



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
People's Democratic Republic of Algeria  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministry of Higher Education and Scientific Research  
جامعة عبد الحميد بن باديس - مستغانم  
University Abdelhamid Ibn Badis - Mostaganem  
كلية العلوم والتكنولوجيا  
Faculty of Sciences and Technology  
قسم الهندسة المدنية  
Civil engineering department



N° d'ordre : M ...../GCA/2020

## MEMOIRE DE FIN D'ETUDE MASTER ACADEMIQUE

**Filière :** Génie Civil

**Option :** Matériaux de construction

**Thème :**

**INFLUENCE DES AJOUTS MINERAUX SUR LA RESISTANCE DES  
MORTIERS VIS-A-VIS DE L'ATTAQUE DE L'ACIDE SULFURIQUE  
ET LA CARBONATATION NATURELLE**

**Présenté par :**

- KHEIRDDINE Oussama

*Soutenu le 24/06/ 2025 devant le jury composé de :*

**Président :** Dre GUERZOU TOURKIA

**Examineur :** Pre BELAS NADIA

**Encadrant :** Dr BELARIBI OMAR

Année Universitaire : 2024/2025

## REMERCIEMENT

Avant tout, je remercie « **ALLAH** » qui a insufflé en nous la foi nécessaire pour maintenir notre volonté et notre force tout au long de cette tâche, que nous avons tenté d'accomplir du mieux possible.

Je tiens à exprimer toute notre reconnaissance à mon encadrant, Monsieur BELARIBI OMAR, pour sa patience, sa disponibilité constante, ainsi que pour ses conseils avisés qui ont été d'une grande aide au fil des différentes étapes de ce travail.

Je remercie également les membres du jury qui ont bien voulu évaluer notre mémoire. Une mention particulière à Mme GUERZOU TOURKIA, pour avoir accepté de présider le jury, ainsi qu'à Mme BELAS NADIA, pour avoir accepté d'examiner notre travail.

Mes remerciements vont aussi à l'ensemble de mes enseignants de la Faculté des Sciences et Technologies de l'Université de Mostaganem, pour leur dévouement et leur contribution à notre formation.

À mes parents, pour leur soutien inestimable et leurs encouragements constants, ainsi qu'à ma famille et mes amis proches, j'exprime toute ma gratitude.

Enfin, j'adresse mes remerciements à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont participé à ma réussite.

## Résumé

Ce mémoire porte sur l'étude de l'influence de l'incorporation de deux ajouts minéraux naturels — la perlite de Maghnia et la pouzzolane de Béni-Saf — sur la durabilité des mortiers soumis à une attaque chimique par l'acide sulfurique ( $H_2SO_4$ ) et à la carbonatation naturelle. L'objectif principal est d'évaluer les performances de différentes formulations de mortiers en analysant la perte de masse, le comportement visuel et la profondeur de carbonatation, afin d'identifier les combinaisons les plus adaptées aux environnements agressifs.

Des essais expérimentaux ont été menés en laboratoire en exposant les échantillons à une solution d'acide sulfurique à 2 % pendant plusieurs semaines. Parallèlement, des tests de carbonatation naturelle ont été réalisés pour évaluer la pénétration du dioxyde de carbone dans la matrice cimentaire. Les formulations étudiées incluent des dosages variables de perlite (jusqu'à 15 %) et de pouzzolane (jusqu'à 10 %), en substitution partielle du ciment Portland, ainsi qu'un mortier témoin pour référence.

Les résultats ont mis en évidence que le mortier témoin sans ajouts minéraux présente la meilleure résistance à l'attaque acide, avec une perte de masse inférieure à celle des formulations contenant de la perlite et/ou de la pouzzolane. En revanche, l'ajout de perlite, notamment à hauteur de 15 %, s'est révélé efficace pour réduire significativement la profondeur de carbonatation, grâce à la densification de la microstructure et à la diminution de la porosité capillaire.

Cette étude souligne l'importance de sélectionner les ajouts minéraux en fonction du type d'agression visée. La perlite et la pouzzolane locales offrent un potentiel réel dans le contexte de la construction durable, à condition d'adapter leur emploi aux exigences spécifiques de durabilité.

**Mots-clés :** Durabilité, attaque acide, carbonatation, perlite, pouzzolane.

## ملخص

يتناول هذا البحث دراسة تأثير دمج إضافتين معدنيتين طبيعيتين — البرلايت من مغنية والبوزولان من بني صاف — على الكربنة الطبيعية. ( $H_2SO_4$ ) ديمومة المونة الإسمنتية المعرضة لبيئات عدوانية، وبشكل خاص لحمض الكبريت الهدف الأساسي هو تقييم أداء تركيبات مختلفة من المونة من خلال تحليل فقدان الكتلة، مظاهر التدهور البصري، وعمق الكربنة، من أجل تحديد الخلطات الأنسب

تم إجراء اختبارات في المختبر من خلال غمر العينات في محلول حمض الكبريت بتركيز 2% لعدة أسابيع، بالتوازي مع اختبارات الكربنة الطبيعية لدراسة تغلغل ثاني أكسيد الكربون في البنية الإسمنتية. شملت الخلطات نسباً مختلفة من البرلايت (حتى 15%) والبوزولان (حتى 10%) كبديل جزئي عن الإسمنت البورتلاندي، إلى جانب مونة شاهدة للمقارنة

أظهرت النتائج أن المونة الشاهدة (دون إضافات معدنية) أبدت أعلى مقاومة للهجوم الحمضي بحمض الكبريت، حيث سجلت أقل فقدان في الكتلة مقارنة بالخلطات المعدلة. أما بالنسبة للكربنة، فقد أثبتت إضافة البرلايت بنسبة 15% فعاليتها في تقليل عمق الكربنة بفضل تحسين كثافة البنية وتقليل المسامية الشعرية

تؤكد هذه الدراسة على ضرورة اختيار الإضافات المعدنية وفقاً لنوع الوسط العدواني. كما تُبرز إمكانية الاستفادة من الموارد الطبيعية المحلية مثل البرلايت والبوزولان في إطار البناء المستدام، بشرط استخدامها بشكل يتوافق مع متطلبات الديمومة

**الكلمات المفتاحية:** الديمومة، الهجوم الحمضي، الكربنة، البرلايت، البوزولان

## Abstract

This thesis focuses on the influence of incorporating two natural mineral additives — perlite from Maghnia and pozzolan from Béni-Saf — on the durability of mortars exposed to aggressive environments, particularly sulfuric acid ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) and natural carbonation. The main objective is to assess the performance of various mortar formulations by analyzing mass loss, visual degradation, and carbonation depth, in order to identify the most suitable combinations.

Durability tests were carried out in the laboratory by immersing samples in a 2% sulfuric acid solution over several weeks. In parallel, natural carbonation tests were conducted to evaluate the penetration of carbon dioxide into the cementitious matrix. The studied mortars contained varying proportions of perlite (up to 15%) and pozzolan (up to 10%) as partial replacements for Portland cement, along with a control mortar for comparison.

The results revealed that the control mortar without mineral additives showed the highest resistance to sulfuric acid attack, exhibiting lower mass loss than the modified formulations. However, the addition of perlite, especially at 15%, significantly reduced the depth of carbonation, due to microstructure densification and decreased capillary porosity.

This study highlights the importance of selecting mineral additives based on the type of chemical aggression. Local perlite and pozzolan show real potential for sustainable construction, provided that their use is adapted to specific durability requirements.

**Keywords :** Durability, acid attack, carbonation, perlite, pozzolan.

# SOMMAIRE

<b>CHAPITRE I: NOTION DE DURABILITE</b> .....	1
<b>I.2 INTRODUCTION</b> .....	2
<b>I.3 DÉFINITION DE LA DURABILITÉ</b> .....	2
<b>I.4 FACTEURS INFLUENÇANT LA DURABILITE</b> .....	2
<b>I.5 LES ATTAQUES CHIMIQUES</b> .....	3
<b>I.5.1 Actions des sulfates</b> .....	4
<b>I.5.2 La corrosion des armatures induite par les ions chlorures</b> .....	8
<b>I.5.3 Attaque par l'eau de mer</b> .....	9
<b>I.5.4 Action des chlorures</b> .....	10
<b>I.5.5 Lixiviation</b> .....	11
<b>I.6 CONCLUSION</b> .....	12
<b>CHAPITRE II: ATTAQUES DES ACIDES ET CARBONATATION</b> .....	13
<b>II.1 INTRODUCTION</b> .....	14
<b>II.2 ATTAQUES ACIDES</b> .....	14
<b>II.2.1 Actions des acides</b> .....	14
<b>II.2.2 Sources des acides</b> .....	14
<b>II.2.3 Mécanisme d'attaque</b> .....	15
<b>II.2.4 Influence des ajouts pouzzolaniques sur la résistance des mortiers aux attaques acides</b> .....	15
<b>II.2.5 Résistance aux attaques acides</b> .....	18
<b>II.3 CARBONATATION</b> .....	19
<b>II.3.1 Les mécanismes de carbonatation</b> .....	19
<b>II.3.2 Effets des ajouts minéraux sur la carbonatation des bétons</b> .....	20
<b>II.3.3 Paramètres influençant la carbonatation</b> .....	22
<b>II.3.4 Les bienfaits de la carbonatation pour le béton</b> .....	24
<b>II.4 CONCLUSION</b> .....	25
<b>CHAPITRE III: SYNTHESSES DES TRAVAUX</b> .....	26
<b>III.1 INTRODUCTION</b> .....	27
<b>III.2 ATTAQUES ACIDES</b> .....	27
<b>III.3 CARBONATAION</b> .....	30
<b>III.4 CONCLUSION</b> .....	32

<b>CHAPITRE IV: MATERIAUX UTILISES.....</b>	<b>33</b>
<b>IV.1 INTRODUCTION.....</b>	<b>34</b>
<b>IV.2 CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES : .....</b>	<b>34</b>
<b>IV.2.1 Le ciment.....</b>	<b>34</b>
<b>IV.2.2 La perlite .....</b>	<b>36</b>
<b>IV.2.3 La pouzzolane naturelle.....</b>	<b>38</b>
<b>IV.2.4 Le sable.....</b>	<b>40</b>
<b>IV.2.5 L'eau de gâchage.....</b>	<b>43</b>
<b>IV.2.6 L'adjuvant.....</b>	<b>43</b>
<b>IV.3 CONCLUSION.....</b>	<b>44</b>
<b>CHAPITRE V: METHODES EXPERIMENTALES ET RESULTATS .....</b>	<b>45</b>
<b>V.1 INTRODUCTION.....</b>	<b>46</b>
<b>V.2 METHODES EXPERIMENTALES.....</b>	<b>46</b>
<b>V.2.1 Essai de résistance à l'attaque acide :.....</b>	<b>46</b>
<b>V.2.2 Essai de carbonatation .....</b>	<b>48</b>
<b>V.3 RESULTATS ATTAQUES ACIDES.....</b>	<b>51</b>
<b>V.3.1 Examen visuel .....</b>	<b>56</b>
<b>V.3.2 Perte de masse des éprouvettes conservées en H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.....</b>	<b>51</b>
<b>V.4 RESULTATS CARBONATATION .....</b>	<b>58</b>
<b>V.5 CONCLUSION.....</b>	<b>61</b>

## **LISTE DES FIGURES**

1. **Figure I.1:** Mécanismes proposés pour l'attaque aux sulfates de sodium
2. **Figure I.2:** Mécanismes proposés pour l'attaque aux sulfates de magnésium
3. **Figure I.3:** Schéma de la cinétique de corrosion d'un ouvrage
4. **Figure I.4:** Dégradation due à la corrosion des armatures
5. **Figure III.1:** Perte de masse dans l'acide sulfurique
6. **Figure III.2:** Cinétique de dégradation dans l'acide citrique
7. **Figure IV.4:** Diffractogramme aux rayons X de la perlite
8. **Figure IV.5:** Pouzzolane naturelle avant/après broyage
9. **Figure IV.6:** Analyse aux rayons X de la pouzzolane
10. **Figure IV.7:** Sable siliceux utilisé
11. **Figure IV.8:** Masse volumique apparente du sable
12. **Figure IV.9:** Masse volumique absolue du sable
13. **Figure IV.10:** Essai équivalent de sable
14. **Figure IV.11:** Courbe granulométrique
15. **Figure V.1:** Conservation dans solution  $H_2 SO_4$
16. **Figure V.2:** Acide  $H_2 SO_4$
17. **Figure V.3:** Échantillons avant immersion
18. **Figure V.4:** Échantillons pour carbonatation
19. **Figure V.5:** Phénolphtaléine
20. **Figure V.6:** Schéma du principe des mesures
21. **Figure V.7:** Échantillons après 7 jours
22. **Figure V.8:** Échantillons après 30 jours
23. **Figure V.9:** Échantillons après 45 jours
24. **Figure V.10:** Échantillons après 57 jours
25. **Figure V.11:** Échantillons après 64 jours
26. **Figure V.12:** Perte de masse du mortier témoin
27. **Figure V.13:** Perte de masse du mortier 15 % perlite
28. **Figure V.14:** Perte de masse du mortier 10 % pouzzolane
29. **Figure V.15:** Perte de masse du mortier 15 % perlite + 10 % pouzzolane
30. **Figure V.16:** Comparaison de la perte de masse entre toutes les formulations
31. **Figure V.17:** Visualisation de l'effet de l'acide sur les échantillons
32. **Figure V.18:** Profondeur de carbonatation des différentes formulations

## **LISTE DES TABLEAUX**

- 1. Tableau I.1:** Concentration des espèces dans l'eau de mer
- 2. Tableau II.1:** Compositions des pouzzolanes naturelles
- 3. Tableau Iv.5:** Caractéristiques physiques de la perlite
- 4. Tableau Iv.6:** Composition chimique de la pouzzolane
- 5. Tableau Iv.7:** Caractéristiques physiques de la pouzzolane
- 6. Tableau Iv.8:** Composition chimique du sable
- 7. Tableau Iv.9:** Granulométrie du sable
- 8. Tableau Iv.10:** Caractéristiques physiques du sable
- 9. Tableau Iv.11:** Caractéristiques de l'adjuvant
- 10. Tableau V.1:** Perte de masse – Mortier témoin
- 11. Tableau V.2:** Perte de masse – Mortier 15 % Perlite
- 12. Tableau V.3:** Perte de masse – Mortier 10 % Pouzzolane
- 13. Tableau V.4:** Perte de masse – Mortier 15 % Perlite + 10 % Pouzzolane
- 14. Tableau V.5:** Profondeur de carbonatation des mortiers étudiés

## INTRODUCTION GENERALE

L'industrie de la construction est en constante évolution, cherchant en permanence à améliorer la durabilité des matériaux utilisés afin d'assurer la longévité des structures, même dans des environnements hostiles. Parmi les principaux facteurs de dégradation, les attaques chimiques — notamment les agressions acides — représentent une menace importante pour la stabilité et la performance des ouvrages. Ces agressions peuvent provenir de pluies acides, d'émissions industrielles ou de la présence de certains agents chimiques dans l'environnement.

Dans cette optique, la recherche de solutions innovantes capables de renforcer la résistance chimique des matériaux de construction est devenue une priorité. Ce mémoire s'inscrit dans cette démarche en étudiant l'impact de l'ajout de perlite et de pouzzolane, deux matériaux naturels, dans la formulation des mortiers. La perlite est reconnue pour sa légèreté et ses propriétés d'isolation thermique, tandis que la pouzzolane est appréciée pour sa réactivité pouzzolanique et sa contribution à la densification de la matrice cimentaire. L'exploration de leur combinaison dans des proportions contrôlées permet d'évaluer leur efficacité dans l'amélioration de la résistance des mortiers aux environnements acides.

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer la durabilité des mortiers contenant entre 0 % et 15 % de perlite et entre 0 % et 10 % de pouzzolane, exposés à des attaques acides simulées à l'aide de l'acide sulfurique ( $H_2SO_4$ ). Cette recherche cherche à répondre aux questions suivantes :

- Quelle est l'influence de l'incorporation conjointe de la perlite et de la pouzzolane sur la résistance à l'agression acide ?
- Existe-t-il une relation entre les pourcentages de ces ajouts et la performance des mortiers face à l'acide sulfurique ?
- Le comportement des formulations varie-t-il significativement en fonction des proportions des ajouts utilisés ?

Pour répondre à ces interrogations, une démarche expérimentale rigoureuse sera mise en place, combinant des essais de durabilité chimique, des analyses physiques. Les résultats attendus permettront de mieux comprendre le comportement des mortiers modifiés et d'identifier les formulations optimales offrant une meilleure résistance en milieu acide.

Afin de répondre à ces objectifs, ce mémoire a été structuré en cinq chapitres complémentaires. Le premier chapitre introduit la notion de durabilité dans les matériaux cimentaires, en mettant l'accent sur les mécanismes de dégradation chimique tels que les attaques acides, la corrosion, et la lixiviation.

Le deuxième chapitre approfondit les phénomènes spécifiques des attaques acides et de la carbonatation, tout en exposant l'influence des ajouts minéraux sur la résistance des mortiers face à ces agressions.

Le troisième chapitre présente une synthèse bibliographique des principaux travaux antérieurs menés dans ce domaine, permettant de situer notre étude dans le contexte scientifique actuel.

Le quatrième chapitre décrit les matériaux utilisés (ciment, sable, perlite, pouzzolane...) ainsi que leurs caractéristiques physiques et chimiques.

Enfin, le cinquième chapitre expose la méthodologie expérimentale adoptée, les résultats obtenus et leur interprétation, afin d'évaluer l'efficacité des différentes formulations face aux attaques de l'acide sulfurique et à la carbonatation naturelle.

Cette étude vise non seulement à apporter des solutions pratiques à l'industrie de la construction, mais également à enrichir les connaissances scientifiques sur les matériaux cimentaires durables, ouvrant ainsi la voie à des structures plus résistantes et respectueuses de l'environnement.

# **CHAPITRE I:**

## **NOTION DE DURABILITE**

## **I.2 INTRODUCTION**

La durabilité d'un ouvrage de génie civil consiste à assurer sa résistance face aux différentes sollicitations physiques, mécaniques, chimiques et climatiques tout au long de sa durée de vie. Un ouvrage durable doit maintenir ses performances techniques, fonctionnelles et esthétiques malgré les agressions extérieures telles que le vent, la pluie, le gel ou les agents chimiques. Ce chapitre porte sur la notion de durabilité, les facteurs qui l'influencent, et les principaux agents dégradants des matériaux cimentaires. [1]

## **I.3 DÉFINITION DE LA DURABILITÉ**

La durabilité fait référence à la capacité d'une structure à maintenir dans le temps son apparence, sa résistance mécanique, ainsi que son intégrité fonctionnelle, malgré les agressions extérieures. Elle implique que l'ouvrage puisse assurer ses fonctions sans perte significative de performance ou de sécurité durant toute sa durée de service.

En maçonnerie, les deux principales exigences pour garantir la durabilité sont, d'une part, l'utilisation d'une unité de construction stable sur le plan dimensionnel, et d'autre part, un mortier capable de créer une liaison permanente, solide et homogène, assurant ainsi une étanchéité efficace contre les infiltrations d'eau.

La durabilité d'un matériau peut être définie comme sa capacité à résister aux effets des intempéries, aux attaques chimiques, à l'abrasion, ainsi qu'à tout autre phénomène de dégradation naturelle ou artificielle. Un béton durable est un matériau qui conserve sa forme, sa qualité et ses performances lorsqu'il est exposé aux conditions de son environnement. 7

## **I.4 FACTEURS INFLUENÇANT LA DURABILITE**

La durabilité du béton peut être compromise par différentes actions physiques ou réactions chimiques nuisibles, favorisées par l'infiltration de fluides (liquides ou gaz) à travers sa masse. Ainsi, l'analyse dimensionnelle des bétons vibrés requiert la mesure de certaines caractéristiques physico-chimiques.

Le processus de dégradation chimique du béton résulte d'une décalcification progressive lorsqu'il est exposé à un environnement agressif. Cette altération entraîne une augmentation de la porosité du matériau, modifiant ainsi ses propriétés physiques, chimiques et mécaniques. D'un côté, cette hausse de porosité favorise le transport des substances (par perméabilité ou diffusion) et accélère la dissolution des produits hydratés (notamment la portlandite). De l'autre, elle provoque une dégradation des propriétés mécaniques telles que la résistance et la rigidité. Par ailleurs, les contraintes mécaniques génèrent des microfissures qui peuvent intensifier le processus de détérioration chimique.

La perméabilité, la diffusion et l'absorption représentent les trois mécanismes principaux par lesquels des agents agressifs peuvent pénétrer le béton et altérer ses fonctions mécaniques et protectrices (notamment contre la corrosion des armatures). La perméabilité se réfère au déplacement de matière induit par un écart de pression, la diffusion est le déplacement d'un fluide en réponse à une différence de concentration, et l'absorption découle des variations de tension de surface au sein des pores capillaires. Les trois fluides naturels principalement

concernés par ces mécanismes et susceptibles de compromettre la durabilité du béton sont : l'oxygène, l'eau (qu'elle contienne ou non des ions agressifs), et le dioxyde de carbone.

La longévité du béton dépend donc de sa capacité à limiter la pénétration de ces fluides via les trois modes de transfert. Même si, en conditions réelles, ces mécanismes agissent simultanément, ils sont étudiés séparément en laboratoire afin de mieux comprendre les propriétés fondamentales impliquées. Plusieurs tests sont donc mis en œuvre pour évaluer les paramètres représentatifs de la dégradation physico-chimique du béton.

La durabilité du béton est généralement liée à la compacité de sa composition ainsi qu'à la nature chimique du liant (et à la composition minéralogique des granulats en cas de réaction alcali-grulats). Les normes en vigueur pour les bétons courants sont définies dans la norme XP 18-305, désormais remplacée par la NF EN 206-1.

Les publications scientifiques dans ce domaine se penchent notamment sur la microstructure du béton, la perméabilité aux gaz, la migration des ions chlorure, l'absorption d'eau, la carbonatation, la résistance au gel/dégel, et la pénétration des agents agressifs pouvant entraîner le déclenchement (et l'évolution) de la corrosion des armatures. Elles s'intéressent également aux réactions chimiques internes, impliquant des éléments provenant du milieu ambiant ou déjà présents dans le matériau, comme la réaction alcali-silice ou les attaques sulfatiques, sources de gonflement et de fissuration du béton.

Les propriétés microstructurales du béton sont influencées principalement par :

- Le volume de pâte utilisé,
- La présence d'ajouts en quantité significative,
- La densité du réseau de bulles d'air. [2 ;3 ;4]

L'effet des ajouts sur la matrice cimentaire dépend de la finesse des particules, ainsi que de leur composition chimique et minéralogique. Les particules les plus fines contribuent à améliorer la compacité du squelette granulaire et à réduire l'épaisseur et la porosité des zones de transition (interface pâte-granulats, qui est plus poreuse et contient des pores plus gros). Concernant la densité du réseau de bulles d'air, elle est influencée par la présence d'un agent entraîneur d'air, mais aussi par l'effet secondaire d'un superplastifiant ou d'un agent de viscosité. Enfin, la durée du malaxage est un paramètre non négligeable : un malaxage prolongé peut doubler le volume d'air emprisonné. [5 ;6 ;7 ;8 ;9].

## **I.5 LES ATTAQUES CHIMIQUES**

Les matériaux à matrice cimentaire peuvent être soumis à une grande diversité d'agressions chimiques. En raison de leur porosité et de la composition chimique de la solution interstitielle, des échanges de matière peuvent avoir lieu, entraînant une modification progressive de la composition solide de la pâte de ciment. Ces phénomènes de transport et de réaction se produisent principalement à l'échelle de la microstructure de la pâte de ciment

Parmi les nombreuses causes de dégradation des matériaux cimentaires, on retrouve notamment les attaques par les acides, les sulfates et le dioxyde de carbone. [10]

### **I.5.1 Actions des sulfates**

Les ions sulfates sont naturellement présents dans certains sols et eaux souterraines. On parle d'attaques sulfatiques externes lorsque ces ions proviennent de l'environnement. Ce type de dégradation est alors considéré comme une conséquence de l'environnement, conformément à la définition des classes d'exposition – XA, environnements chimiquement agressifs [15].

L'attaque sulfatique externe est souvent associée à l'action du cation correspondant, en fonction de la source des sulfates. Ceux-ci peuvent interagir avec certains granulats, fillers, les C-S-H ou la portlandite, renforçant ainsi la dégradation du béton. En outre, cette attaque par les sulfates externes peut s'accompagner d'une attaque acide, ce qui accélère encore davantage la détérioration de la pâte cimentaire hydratée.

#### ***I.5.1.1 Source des sulfates***

Les sulfates peuvent avoir une origine naturelle, être issus de processus biologiques ou provenir de pollutions domestiques et industrielles. Dans certaines régions où les sols contiennent du gypse ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) ou de l'anhydrite ( $\text{CaSO}_4$ ), on peut observer des concentrations élevées (>5%), notamment dans :

- L'Afrique du Nord
- Les Prairies canadiennes
- La région parisienne, où l'on retrouve des concentrations de :  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (58 g/L),  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  (194 g/L),  $\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (440 g/L) et  $\text{CaSO}_4$  (2,1 g/L).

Les eaux souterraines au contact de ces sulfates peuvent se charger en ions  $\text{SO}_4^{2-}$ . Les sols alluviaux ou argileux peuvent également contenir des pyrites, qui s'oxydent en sulfates lorsqu'ils sont exposés à l'air et à l'humidité, entraînant la formation d'acide sulfurique.

Les sulfates peuvent aussi provenir de la décomposition biologique aérobie de matières organiques contenant du soufre (engrais, végétaux).

Enfin, les sources de sulfates peuvent être internes, notamment :

- La contamination des granulats par du plâtre.
- L'utilisation de granulats gypseux.
- La présence de sulfures dans certains granulats.

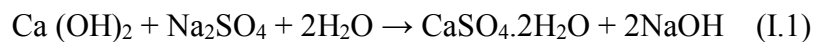
#### ***I.5.1.2 Mécanisme d'attaque***

Les roches et minéraux naturels contenant des sulfates de calcium, comme le gypse ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) et l'anhydrite ( $\text{CaSO}_4$ ), ainsi que des sulfates de magnésium tels que l'epsomite ( $\text{MgSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), constituent la principale source externe de sulfates dans la nature. Cependant, ce n'est que lorsque ces sulfates se dissolvent dans l'eau (souterraine ou de surface)

qu'ils deviennent une menace potentielle, pouvant pénétrer la matrice du béton, réagir avec les hydrates et modifier leur structure cristalline.

Dans le cas du sulfate de sodium, les réactions chimiques se présentent comme suit [11] :

Formation du gypse secondaire : (formule I.1)

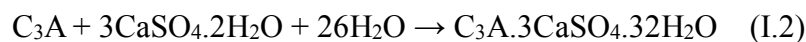


NaOH : Augmente l'alcalinité → stabilisation des CSH.

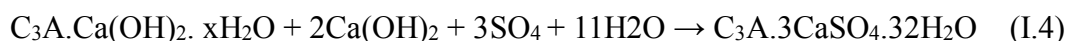
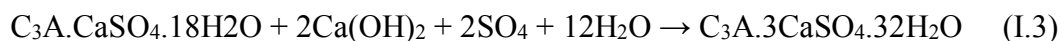
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  : Produit expansif, mais qui se forme uniquement dans les espaces internes de la pâte de ciment hydratée. Dans la plupart des cas, il y a peu ou pas d'expansion. Cependant, cette formation réduit la résistance et l'adhérence de la pâte de ciment en raison de la dissolution de la portlandite (CH) et du gel et de la décalcification du C-S-H, qui est essentiel aux propriétés liantes de la pâte [12].

Formation d'ettringite secondaire :

a) À partir du C3A anhydre résiduel : (formule I.2)



b) À partir des aluminates hydratés : (formules I.3 et I.4) (Et tringite secondaire)



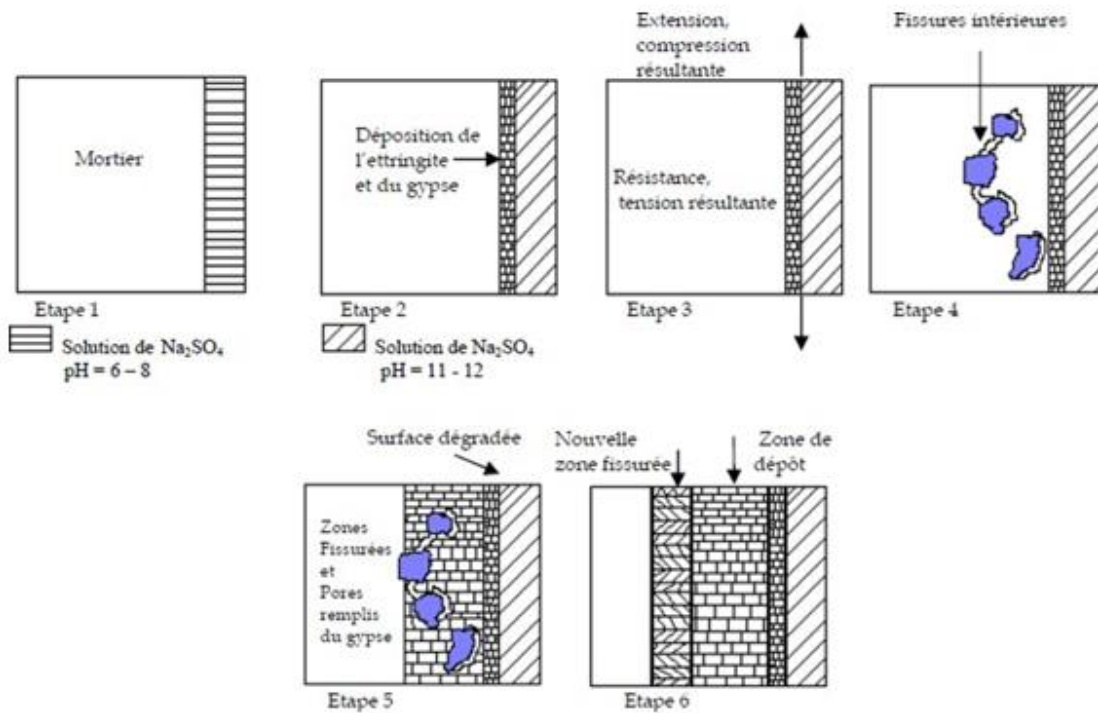
La précipitation de l'ettringite secondaire conduit à la formation de cristaux très fins (ettringite non fibreuse de nature colloïdale), dont le volume molaire est de 3 à 8 fois supérieur à celui du solide initial.

La Figure I.1 schématise le mécanisme proposé par Santhanam et al [13] dans le cas de l'attaque par les sulfates de sodium

- Étape 1 : État initial du processus.
- Étape 2 : Le gypse et l'ettringite se forment à la surface.
- Étape 3 : Une force de compression est générée en surface, provoquant des fissures dans le mortier.
- Étape 4 : Les produits d'attaque se déposent dans les fissures et les pores, favorisant la nucléation.

On distingue alors trois zones dans le mortier :

- Zone de surface désintégrée.
- Zone de dépôt des produits d'attaque.
- Zone interne avec des fissures, mais chimiquement inchangée.

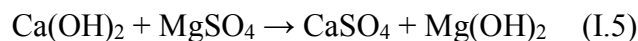


**Figure I.1:** Mécanismes proposés pour l'attaque aux sulfates de sodium [15]

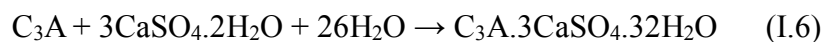
Les mécanismes de dégradation dépendent aussi de la nature du cation ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , etc.) associé aux ions sulfates dans la solution externe ou dans la pâte de ciment. Le sulfate de magnésium est particulièrement agressif comparé au sulfate de sodium [16].

Le sulfate de magnésium réagit par double action (formules I.5, I.6 et I.7) :

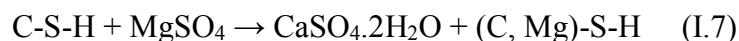
En présence de magnésium la portlandite réagit pour former de la brucite, le gypse et l'ettringite :



$\text{Mg}(\text{OH})_2$  : Brucite (faible solubilité, alcalinité faible, pH faible)



Substitution des ions  $\text{Ca}^{++}$  par les ions  $\text{Mg}^{++}$  dans les CSH :

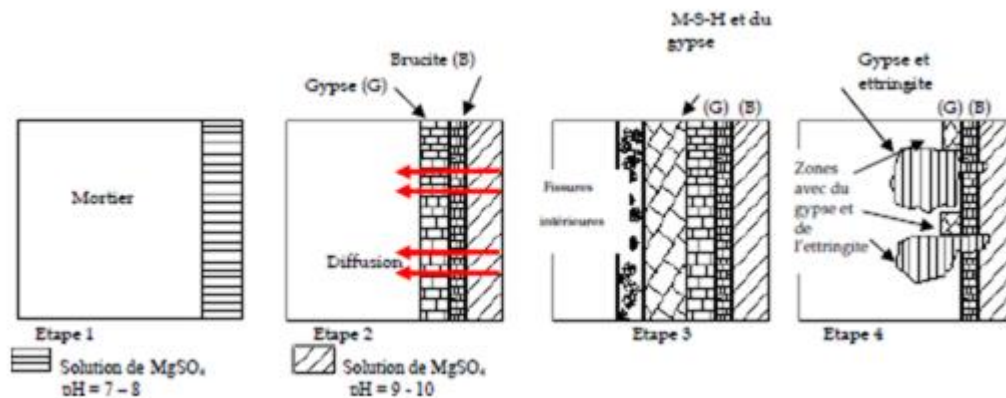


(C, Mg) -S-H : gel faiblement cohésif.

Le mécanisme proposé dans le cas de l'attaque par les sulfates de magnésium est schématisé dans la (Figure I.2) Une couche de brucite ( $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ) se forme rapidement à la surface de l'échantillon, suivie d'une couche de gypse à l'intérieur. Cette double couche entraîne une augmentation de l'expansion [17].

Lorsque des canaux d'écoulement se forment, une attaque directe des CSH devient possible, entraînant la formation de MSH (silicate de magnésium hydraté) et de gypse secondaire. Cela

conduit finalement à une détérioration du mortier en raison de la perte de résistance et de la transformation de la pâte en MSH, un produit sans propriétés liantes.



**Figure I.2 :** Mécanismes proposés pour l'attaque aux sulfates de magnésium [17]

Les eaux souterraines ou l'eau de mer sont souvent riches en sulfates de magnésium ( $MgSO_4$ ). Dans ce contexte, les deux ions (cations et anions) participent aux réactions :

- Les ions  $SO_4^{2-}$  réagissent avec les aluminates (ou la portlandite) pour former de l'ettringite (ou du gypse).
- Les ions  $Mg^{2+}$  réagissent avec les ions  $OH^-$  pour former de la brucite ( $Mg(OH)_2$ ) ou remplacer partiellement le calcium par le magnésium dans les CSH.

Le silicate de magnésium hydraté (MSH) ainsi formé ne possède aucune propriété liante, rendant la pâte hydratée molle et incohérente [17].

### ***1.5.1.3 Influence des ajouts minéraux sur la résistance des bétons aux attaques sulfatique***

Dans une recherche portant sur la durabilité du béton face aux attaques par les sulfates [13], il a été observé une augmentation du gain de masse à mesure que la classe de résistance diminue, ce qui correspond également à une augmentation du rapport E/L équivalent. En effet, lorsque le rapport eau/ciment (E/C) diminue, le volume et la connectivité du réseau poreux se réduisent, rendant ainsi la pénétration des agents agressifs plus difficile [13].

Par ailleurs, une forte teneur en  $Al_2O_3$  dans le système permet de limiter la formation d'ettringite. Cette observation est corroborée par les travaux de Ramlochan et ses collaborateurs [18], qui ont constaté que les matériaux pouzzolaniques tels que les métakaolins, les cendres volantes et la fumée de silice réduisent le phénomène d'expansion dû à la formation d'ettringite différée. De plus, ils retardent le déclenchement de cette expansion en ralentissant sa cinétique de développement.

## I.5.2 La corrosion des armatures induite par les ions chlorures

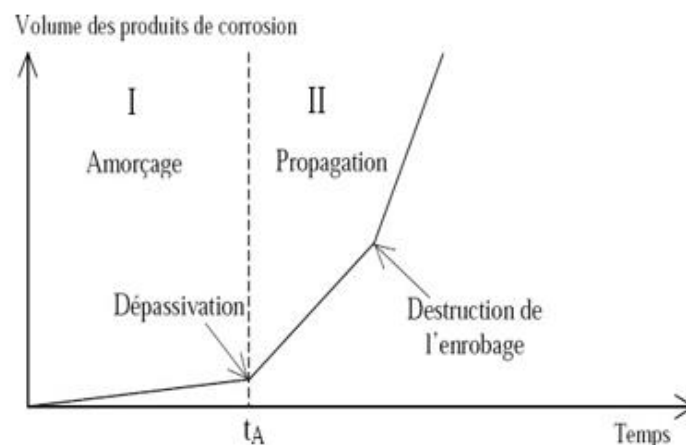
La corrosion des armatures représente le principal facteur pouvant réduire la longévité des structures en béton armé. Il convient tout d'abord de préciser que la durabilité de ces ouvrages dépend directement du béton, qui assure une protection physique et chimique des armatures en acier contre la corrosion. En effet, la forte alcalinité de la solution interstitielle présente dans les pores du béton ( $\text{pH} \approx 13$ ) favorise la formation d'une couche passive composée d'oxydes et d'hydroxydes de fer, garantissant ainsi une protection naturelle des armatures.

Toutefois, certaines substances chimiques agressives, issues de l'environnement extérieur, peuvent traverser la barrière physique que constitue le béton de revêtement, altérer la stabilité chimique de cette couche passive et provoquer la corrosion des aciers d'armature.

Parmi ces agents, la pénétration des ions chlorure (issus de l'eau de mer, des embruns marins ou des sels de déverglaçage) constitue une cause principale de cette dégradation.

### I.5.2.1 L'amorçage et la propagation

D'après Tuuti [19], la dégradation de l'enrobage en béton et des armatures en acier peut être décrite à travers deux phases successives, telles qu'illustrées dans le schéma de la figure I.3.



**Figure I.3:** Schéma de la cinétique de corrosion d'un ouvrage [19]

La première phase, appelée période d'amorçage ou d'incubation, correspond à l'étape où les armatures en acier sont protégées par une couche passive, générée par les caractéristiques de la solution interstitielle du béton. Durant cette période, bien que des phénomènes physico-chimiques initiant la corrosion des armatures puissent se produire à l'échelle microscopique, aucun signe visible de dégradation n'apparaît à l'échelle macroscopique.

Cette période d'amorçage prend fin avec la perte de passivation de l'acier, marquant ainsi le début de la phase de propagation de la corrosion, où les réactions d'oxydation se développent à la surface des armatures. Les produits de corrosion formés affectent alors l'enrobage en béton, ce qui entraîne une diminution des performances de la structure.

Étant donné que la durée de cette phase d'amorçage ( $t_A$ ) est cruciale pour la protection des armatures, les bétons d'enrobage doivent être conçus pour retarder ou empêcher la perte de passivation de l'acier.

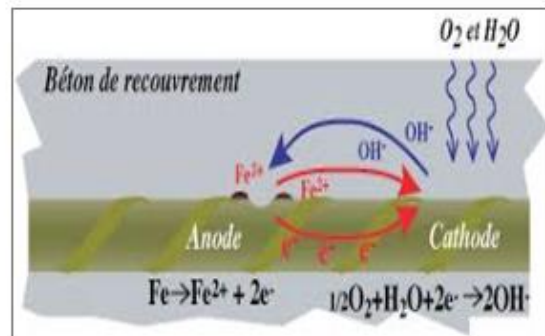
La durée  $t_A$  dépend de plusieurs facteurs, tels que :

- La perméabilité du béton,
- L'épaisseur de l'enrobage,
- La capacité de la pâte de ciment hydratée à fixer les ions chlorure, etc.

### ***1.5.2.2 Conséquence de la corrosion***

La corrosion des barres d'acier dans le béton a principalement deux conséquences majeures. La première réside dans le fait que les produits de corrosion (rouille) occupent un volume nettement supérieur à celui de l'acier initial. En effet, une armature corrodée peut voir son volume atteindre jusqu'à neuf fois celui du métal d'origine. Cette expansion des produits de corrosion génère une pression interne au sein du béton, provoquant ainsi des fissurations et, à terme, un éclatement de l'enrobage. Une fois la corrosion amorcée dans une structure, elle s'aggrave avec le temps, car les fissures facilitent la pénétration des agents agressifs jusqu'à l'acier, accélérant ainsi le processus de dégradation.

La deuxième conséquence se manifeste au niveau de la section des barres d'acier, où la corrosion réduit progressivement la section effective des armatures, diminuant ainsi leur résistance mécanique, comme illustré dans la Figure I.4.



**Figure I.4** : Dégradation due à la corrosion des armatures [20]

### **1.5.3 Attaque par l'eau de mer**

La composition de l'eau de mer diffère considérablement de celle de la solution interstitielle du béton, en raison de ses différences de composition chimique. Ces variations entraînent des échanges ioniques entre les deux milieux.

La composition chimique de l'eau de mer varie selon les régions du monde. Elle se distingue généralement par une forte concentration en sels dissous, avec une salinité fluctuant entre 10

g/kg dans la mer Baltique et 40 g/kg dans la mer Rouge, pouvant même atteindre près de 400 g/kg dans les mers Caspienne et Morte. Pour l'océan Atlantique, ainsi que pour la mer Méditerranée, la salinité avoisine les 30 g/kg.

Cependant, malgré ces différences de salinité, les proportions relatives des principaux sels restent constantes. En pratique, les principaux constituants de l'eau de mer sont ceux dont la concentration dépasse 1 g/kg, comme précisé dans le tableau I.1.

**Tableau I.1** : Concentration des principales espèces présentes dans l'eau de mer [21]

Tableau2-concentration des principales espèces présentes dans une eau de mer de salinité 35.000. D'après Wilson (1975)		
Espèces	Concentrations* g Kg-soln <sup>-1</sup> Mol Kg-soln <sup>-1</sup>	
Ion sodium Na <sup>+</sup>	10.77	0.4685
Ion magnesium Mg <sup>+</sup>	1.290	0.05308
Ion calcium Ca <sup>+2</sup>	0.4121	0.01028
Ion potassium K <sup>+</sup>	0.399	0.01021
Ion strontium Sr <sup>+2</sup>	0.0079	0.000090
Bore total B(OH) <sub>3</sub> +B(OH) <sub>4</sub> <sup>-</sup>	0.0045	0.00042
Ion chlorure Cl <sup>-</sup>	19.354	0.54591
Ion sulfate SO <sup>-2</sup> <sub>4</sub>	2.712	0.02823
Hydrogénocarbonate HCO <sup>-3</sup> <sub>3</sub> +carbonate CO <sup>-2</sup> <sub>3</sub>	0.118-0.146	0.00194-0.00240
Ion bromure Br <sup>-</sup>	0.0673	0.000842
Ion fluorure F <sup>-</sup>	0.0013	0.00007

Ces concentrations se rapportent au Kg de solution (Kg-soln). C'est-à-dire au Kg d'eau de mer (eau+sels dissous)

Les ions les plus abondants dans l'eau de mer sont le sodium (Na<sup>+</sup>) et le chlorure (Cl<sup>-</sup>). En effet, le chlorure de sodium (NaCl) représente entre 75 et 85 % de la salinité totale de cette eau. En raison de sa dominance dans cet environnement naturel, cette solution est fréquemment étudiée en négligeant les concentrations des autres espèces dissoutes.

#### I.5.4 Action des chlorures

Les chlorures affectent le béton principalement dans certains environnements spécifiques, tels que les ouvrages exposés aux sels de déverglaçage ou les structures situées en milieu maritime (zones de marnage, surfaces soumises aux embruns). Ces ions peuvent pénétrer le béton par

diffusion ou par capillarité, traverser la zone d'enrobage, atteindre les armatures, et déclencher la corrosion de l'acier.

Le processus de corrosion débute souvent sous forme de corrosion par piqûres (localisée) avant de se généraliser à toute la surface des armatures. La vitesse de pénétration des chlorures dépend principalement de la porosité du béton, qui diminue lorsque le rapport eau/ciment (E/C) est réduit.

La corrosion des armatures commence dès que la concentration en chlorures atteint un seuil de dépassivations, généralement compris entre 0,4 et 0,5 % par rapport au poids du ciment. Ce seuil varie en fonction du pH de la solution interstitielle et de la teneur en oxygène au niveau des armatures. De plus, ce seuil est atteint plus rapidement si le béton est carbonaté, car ce phénomène réduit l'alcalinité et fragilise la couche passive qui protège l'acier.

### **I.5.5 Lixiviation**

Dans une structure en béton exposée à l'air ambiant, l'évaporation de l'eau se limite à une épaisseur de quelques centimètres. Cependant, lorsque le béton est en contact prolongé avec l'eau, ses pores restent saturés, permettant ainsi aux ions provenant de l'environnement extérieur de migrer à travers la phase liquide interstitielle.

La pénétration de ces ions peut entraîner des réactions chimiques de dissolution/précipitation, conduisant progressivement à une lixiviation des hydrates. Les eaux pures ou faiblement minéralisées, en raison de leur fort pouvoir de dissolution, peuvent dissoudre les constituants calciques du béton, notamment la portlandite ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ).

Malgré la complexité des réactions chimiques engendrées par les eaux agressives, des mesures préventives simples, appliquées dès la formulation du béton, permettent de garantir sa durabilité :

- Formulation adaptée en fonction de l'environnement d'exposition.
- Dosage en ciment suffisant pour assurer une bonne compacité.
- Faible rapport eau/ciment (E/C) pour limiter la porosité.
- Béton compact et peu perméable, obtenu par une vibration et une cure efficace.

L'agressivité des milieux dans lesquels les ouvrages en béton peuvent se trouver dépend principalement de la présence d'eau et de sa capacité à réagir avec les minéraux de la matrice cimentaire. Les solutions agressives, riches en agents chimiques dissous, peuvent engendrer divers phénomènes de dégradation lorsque la formulation du béton n'est pas optimisée.

## **I.6 CONCLUSION**

En somme, la pérennité du béton armé constitue un facteur clé pour assurer la durabilité et la robustesse des ouvrages. Le choix pertinent des matériaux, une fabrication rigoureusement maîtrisée, ainsi que l'adoption de mesures de protection contre les agressions extérieures, sont indispensables pour prolonger la durée de vie du béton armé. La mise en place d'un plan d'entretien régulier est tout aussi essentielle afin de maintenir ses performances au fil du temps. En prêtant une attention particulière à ces éléments, il est possible de favoriser la réalisation d'infrastructures durables, fiables et économiquement rentables, au bénéfice des générations futures.

**CHAPITRE II:**  
**ATTAQUES DES ACIDES ET**  
**CARBONATATION**

## II.1 INTRODUCTION

Le béton, en raison de son caractère basique élevé (pH supérieur à 12), est sensible aux solutions acides telles que les pluies acides, les eaux chargées en  $\text{CO}_2$ , les eaux industrielles ou même les eaux pures. Sa dégradation est causée par la différence de concentration entre les eaux agressives et la solution interstitielle riche en calcium. Ce phénomène entraîne la lixiviation des ions calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) et hydroxyde ( $\text{OH}^-$ ), un processus principalement diffusif confirmé par des modélisations.

Et aussi le béton exposé à l'air subit une carbonatation, une réaction chimique entre le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) et la matrice cimentaire. Ce processus entraîne des changements chimiques, minéralogiques et des modifications de la microstructure du béton. Une discussion aborde les paramètres pertinents pour évaluer la sensibilité du béton à la carbonatation et met en évidence l'influence des ajouts cimentaires.

## II.2 ATTAQUES ACIDES

### II.2.1 Actions des acides

Les milieux agressifs en termes de lixiviation et d'attaques acides peuvent être très divers et parfois associés à d'autres formes d'agression. Cependant, les eaux en contact avec le béton partagent généralement la caractéristique d'être faiblement minéralisées, notamment en calcium, et d'avoir un pH neutre (pH = 7) ou même acide (pH < 7). [10]

Le processus de dégradation résulte de la différence de concentration entre les eaux agressives et la solution interstitielle du béton, qui est basique (pH supérieur à 12) et riche en calcium. Les principaux ions extraits lors de la lixiviation sont le calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) et l'hydroxyde ( $\text{OH}^-$ ) [22]. Leur migration vers l'extérieur s'effectue principalement par diffusion, comme l'ont confirmé les modèles de simulation du phénomène [23,24].

Lorsque la solution interstitielle n'est plus saturée en ions calcium et hydroxyde, les composés solides contenant ces éléments commencent à se dissoudre. La quantité de calcium présente dans les produits solides diminue progressivement à mesure que la concentration en calcium de la solution des pores baisse. Le processus de lixiviation démarre par la dissolution de la portlandite, suivie des monosulfoaluminates, puis de l'ettringite, et enfin des phases C-S-H qui subissent une décalcification [22] [25] [23] [26].

### II.2.2 Sources des acides

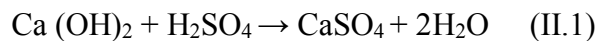
Les environnements acides les plus courants sont :

- Les eaux naturelles présentes dans les tourbières et les marécages, où le pH peut descendre jusqu'à une valeur de 4.
- Les milieux industriels, notamment dans les secteurs de la chimie et de l'agroalimentaire
- Les réseaux d'assainissement, où l'activité bactérienne entraîne la production de sulfure d'hydrogène par la transformation des composés soufrés. Ce gaz, combiné à l'humidité de l'air, se transforme en acide sulfurique, qui attaque ensuite le béton.

- Les pluies acides, principalement composées d'acide sulfurique et d'acide nitrique, avec un pH compris entre 4,0 et 4,5, pouvant entraîner la dégradation de la surface exposée du béton.

### II.2.3 Mécanisme d'attaque

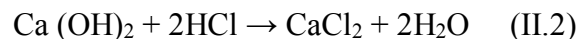
De manière générale, on peut affirmer qu'un acide est d'autant plus nocif que les sels de calcium qu'il forme sont plus facilement solubles. L'acide sulfurique (formule II.1) est relativement peu dangereux, car les sulfates de calcium sont peu solubles dans l'eau. Cependant, les ions sulfate jouent un rôle néfaste pour le béton en provoquant un gonflement dû aux sulfates.



Hydroxyde de calcium + acide sulfurique → sulfate de calcium + eau

L'acide sulfurique réagit donc avec la chaux libre présente dans le béton et produit du gypse. Cette réaction provoque une augmentation de volume du béton. Une réaction encore plus dommageable est celle entre l'aluminate de calcium et les cristaux de gypse formés. Ces deux composants génèrent l'étringite ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ), qui est peu soluble dans l'eau.

L'acide chlorhydrique est considéré comme particulièrement agressif, car le sel qui en résulte (chlorure de calcium) est extrêmement soluble dans l'eau. La (formule II.2) illustre la réaction entre l'acide chlorhydrique et la portlandite.



Hydroxyde de calcium + acide chlorhydrique → chlorure de calcium + eau

Les acides inorganiques forts ne se limitent pas à réagir avec l'hydroxyde de calcium. Ils attaquent également les autres composants de la pâte de ciment durcie, formant des sels de calcium, d'aluminium ou de fer, ainsi que des acides siliciques colloïdaux (gels de silice) [3].

### II.2.4 Influence des ajouts pouzzolaniques sur la résistance des mortiers aux attaques acides

Les liants pauvres en CaO sont souvent privilégiés car ils présentent une meilleure résistance aux attaques acides et à la lixiviation. Leur efficacité repose sur deux principaux mécanismes. D'une part ces liants génèrent une teneur plus faible en portlandite dont la dissolution entraîne une augmentation de la porosité et conduit à la formation de CSH plus denses et stables. D'autre part malgré une porosité globale similaire la morphologie du réseau poreux est modifiée avec une réduction de la porosité capillaire et des coefficients de diffusion plus faibles. Les liants comprenant des additions pouzzolaniques telles que les fumées de silice ou les cendres volantes démontrent une meilleure résistance face à la lixiviation et aux attaques acides ce qui confirme leur efficacité dans des environnements agressifs.

### ***II.2.4.1 Ajouts pouzzolaniques***

Les pouzzolanes sont des matériaux naturels ou artificiels capables de réagir en présence d'eau avec de l'hydroxyde de chaux pour former de nouveaux composés stables, peu solubles dans l'eau et possédant des propriétés liantes. On distingue deux types de pouzzolanes :

- Pouzzolane naturelle : des substances d'origine volcanique ou des roches sédimentaires essentiellement composé de silice, d'alumine et d'oxyde de fer et ayant naturellement des propriétés pouzzolaniques.
- Pouzzolane artificielle : des argiles et des schistes essentiellement composés de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant subi un traitement thermique pour lui assurer des propriétés pouzzolaniques.

Le terme "pouzzolane" tire son origine des cendres volcaniques de la région de Pouzzoles en Italie, dont les propriétés liantes étaient déjà exploitées à l'époque romaine. Leur composition chimique est proche de celle des cendres volantes, mais elles sont produites à haute température lors des éruptions volcaniques.

Cependant, certaines pouzzolanes naturelles peuvent poser des problèmes. Par exemple, les terres à diatomées, en raison de leur texture anguleuse et poreuse, nécessitent un dosage en eau élevé.

L'efficacité des pouzzolanes naturelles peut être optimisée par une calcination à des températures variant entre 550 et 1100 °C, en fonction du matériau concerné.

Le choix des pouzzolanes repose principalement sur leur teneur en phase vitreuse, qui peut être déterminée par l'écart entre la teneur en silice et en chaux des matériaux. Une valeur proche de 34 % indique l'absence de phase vitreuse.

### ***II.2.4.2 Caractéristiques des pouzzolanes***

#### ***II.2.4.2.1 Compositions chimiques***

Le domaine élargi des compositions chimiques des pouzzolanes naturelles est donné Par le tableau II.1 ci-dessous :

**Tableau II.1** : Domaine élargi des compositions des pouzzolanes naturelles

Eléments	Pourcentages	
	D'après VENUAT	D'après SERSALE
SiO <sub>2</sub>	42 - 73	45 - 60
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14 - 34	15 - 30
CaO + MgO + alcalins	03 - 21	≈15
Perte au feu	/	≈10

Une vraie pouzzolane est constituée essentiellement d'une petite quantité de minéraux cristallins comme le feldspath la leucite l'augite et autres minéraux similaires plongée dans une masse amorphe principalement sous forme vitreuse ou submicrocristalline souvent altérée par les agents atmosphériques présentant une structure poreuse pouvant simuler un gel et offrant une large surface interne elle contient également des composants chimiques tels que la silice solubilisable et des quantités significatives d'alumine solubilisable

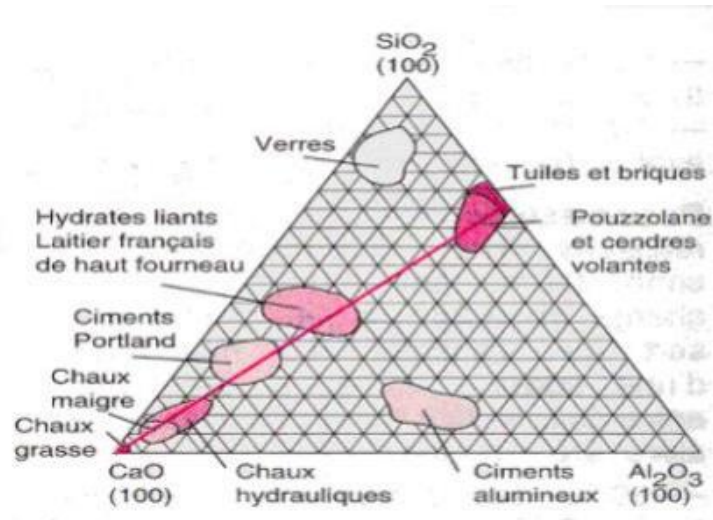
#### II.2.4.2.2 *Composition minéralogique*

Les roches volcaniques peuvent être constituées minéralogiquement comme suit :

- Les composés sialiques où la silice et l'alumine dominant, dans lesquels on peut distinguer les feldspaths (des plagioclases) et le quartz.
- Les composés ferriques, silicates contenant du fer ou/et du magnésium, les plus répandus sont les pyroxènes, les olivines, les oxydes de fer et les minéraux hydroxylés.

#### II.2.4.2.3 *L'activité pouzzolanique*

L'activité pouzzolanique désigne la capacité de lier la chaux en présence d'eau. Cette activité fait l'objet de nombreuses discussions. Nous nous concentrons sur les pouzzolanes d'origine volcanique. L'activité pouzzolanique de ces matériaux naturels peut être influencée par plusieurs facteurs comme le broyage, l'ajout d'additifs, le chauffage de la pouzzolane et l'augmentation de la température. Le mécanisme de la réaction pouzzolanique est illustré par le diagramme triangulaire CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> de Keil, qui montre les positions relatives des différents composés impliqués dans ce phénomène.



**Figure II.1 :** Diagramme de Keil (Zone des pouzzolanes dans le système CaO – SiO<sub>2</sub> – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

L'eau n'étant pas représentée sur le diagramme, la chaux grasse, vive ou éteinte, occupe le pôle CaO. Les briques, les pouzzolanes et les cendres volantes se situent approximativement sur la ligne SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, au premier tiers en partant de la SiO<sub>2</sub>. La droite reliant le centre de l'aire des pouzzolanes au pôle CaO traverse successivement la zone commune aux hydrates à caractère liant et aux laitiers de hauts fourneaux, puis celle des clinkers de ciment Portland, ensuite celle des chaux hydrauliques, avant d'atteindre le pôle représentant la chaux grasse.

Selon différentes études, les matériaux pouzzolaniques doivent satisfaire trois conditions : être acides, c'est-à-dire contenir une forte proportion de silice et d'alumine, contenir une proportion importante de phase vitreuse, et présenter une grande surface spécifique.

Deux catégories d'essais sont utilisées : celles qui caractérisent l'intensité ou l'existence de la réaction pouzzolanique, basées sur des déterminations chimiques, et celles qui mettent en évidence la formation de produits d'hydratation spécifiques, en prouvant leur influence sur les caractéristiques mécaniques du système, généralement par des mesures physiques comme la résistance mécanique.

### II.2.5 Résistance aux attaques acides

D'après l'étude de Semcha, l'effet pouzzolanique est particulièrement remarquable pour des mélanges contenant 20 % et 30 % de pouzzolane à partir de 45 jours, car la réaction pouzzolanique ne commence qu'une fois que la chaux est libérée par l'hydratation du ciment. Plusieurs études, notamment celles de Belas-Belaribi et al. (2003), Eziane et al. (2007), et Mouli et Khelafi (2008), ont démontré que la roche de pouzzolane de Beni-Saf en Algérie possède des propriétés pouzzolaniques. Cette pouzzolane est donc utilisée et commercialisée principalement par des cimenteries qui l'emploient comme ajout actif à des taux de 15 à 20 % dans la fabrication des ciments composés, selon Kaid (2010). Habituellement, seules les caractéristiques mécaniques comme la résistance à la compression et à la flexion sont vérifiées, tandis que les connaissances sur la durabilité de cette pouzzolane restent limitées. Récemment,

des recherches ont été menées sur la durabilité des mortiers à base de cette pouzzolane conservée dans des milieux agressifs. Ghrici et al. ont constaté un gain de résistance à la compression des mortiers conservés dans une solution à 5 % de sulfates de sodium avec 20 % et 30 % de pouzzolane à moyen terme (6 mois). Concernant la perméabilité aux ions chlorure des bétons à base de cette pouzzolane naturelle, les études de Ghrici et al. (2006, 2007) ont mesuré la charge électrique traversant l'échantillon de béton et ont montré que le béton contenant 30 % de pouzzolane présentait une meilleure perméabilité que le béton témoin ainsi qu'un béton ternaire contenant 20 % de pouzzolane naturelle et 10 % de filler calcaire.

### **II.3 CARBONATATION**

La carbonatation du béton est un phénomène initié par la faible concentration de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) présente dans l'air, généralement de 0,03 %. Cette teneur peut être influencée par des facteurs tels que la température, la pression atmosphérique et les conditions d'exposition. [27]

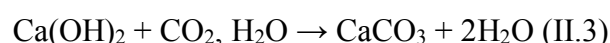
Elle débute par la diffusion du CO<sub>2</sub> dans les pores du béton, où il se dissout pour former de l'acide carbonique. Cet acide réagit ensuite avec les constituants hydratés du ciment. La carbonatation est favorisée par une concentration élevée en CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère environnante [28] et par une humidité relative d'environ 65 %, qui correspond aux conditions des essais de carbonatation accélérée. [29]

#### **II.3.1 Les mécanismes de carbonatation**

La carbonatation atmosphérique repose sur l'action du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) présent dans l'air, qui se diffuse à travers le réseau poreux ou les fissures du béton, puis se dissout en acide au contact de la solution interstitielle. Cette acidification du milieu entraîne une dissolution de la portlandite, qui représente la réserve alcaline du béton. En réagissant avec la solution interstitielle, le CO<sub>2</sub> provoque une réaction chimique avec la pâte de ciment hydratée, transformant des produits d'hydratation, tels que la portlandite (Ca(OH)<sub>2</sub>) et les C-S-H, en carbonates de calcium (CaCO<sub>3</sub>).

Ce processus de carbonatation provoque une diminution du pH de la solution interstitielle du béton, passant de sa valeur initiale (entre 12,5 et 13,5) à environ 9. Une telle baisse de pH réduit la capacité de protection de la solution interstitielle vis-à-vis des armatures, qui deviennent alors vulnérables à la corrosion. (Figure II.2)

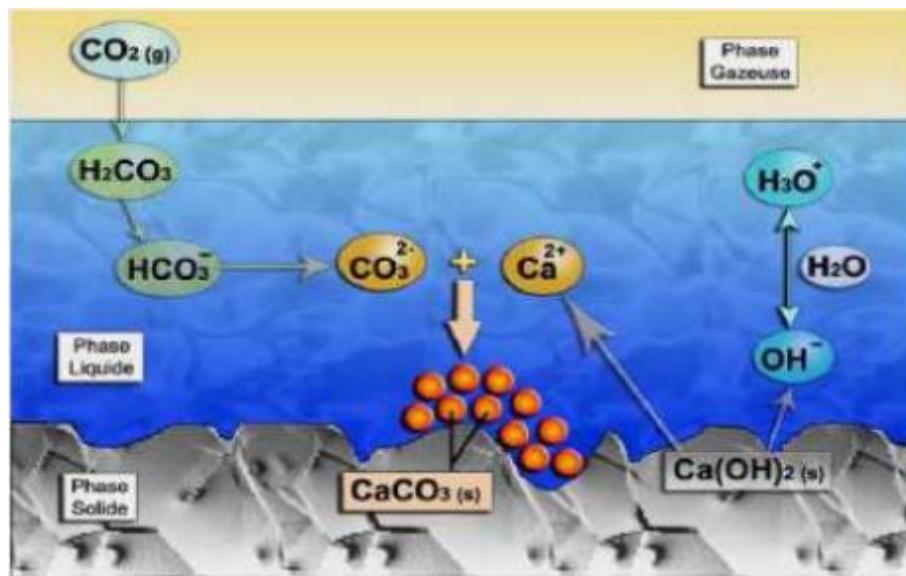
D'un point de vue simplifié, le mécanisme de carbonatation de la portlandite [30 31 32 33] peut être résumé par la réaction chimique hétérogène suivante :



Cette équation montre que la carbonatation de la portlandite s'accompagne d'une libération d'eau.

Les paramètres permettant de suivre l'évolution de cette réaction en fonction du temps ou de la profondeur de pénétration sont la concentration en portlandite ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) et le pH de la solution interstitielle. La figure I.3 illustre l'intervention combinée des trois phases — gazeuse, aqueuse et solide — lors du processus de carbonatation de la portlandite.

La carbonatation est optimale lorsque l'humidité relative est modérée, généralement comprise entre 40 et 60 %, voire entre 40 et 80 % [34 35], et parfois entre 84 et 92 % [36]. Ce domaine correspond en moyenne à la présence de quelques couches de molécules d'eau adsorbées à la surface du solide [37 38]. Ainsi, la carbonatation ne se produit pas dans un béton complètement sec ou totalement saturé d'eau.



**Figure II.2** : Mécanisme de carbonatation de  $\text{Ca(OH)}_2$  [33]

### II.3.2 Effets des ajouts minéraux sur la carbonatation des bétons

Certaines recherches alertent sur les risques liés à l'utilisation de quantités importantes d'additions, notamment lorsque les teneurs en cendres volantes dépassent 30 % [39] et que les proportions de laitier excèdent 50 %. L'impact négatif de ces ajouts sur la résistance à la carbonatation a été confirmé par d'autres études, bien que leur influence puisse varier considérablement en fonction de la durée de la cure humide.

Les fillers calcaires et siliceux semblent avoir un effet bénéfique dans des conditions de conservation humide de 28 jours, mais présentent une influence négative en cas de séchage prématuré, c'est-à-dire un démoulage à environ 30 % de la résistance moyenne à 28 jours [40].

En réalité, les additions peuvent agir sur trois aspects principaux :

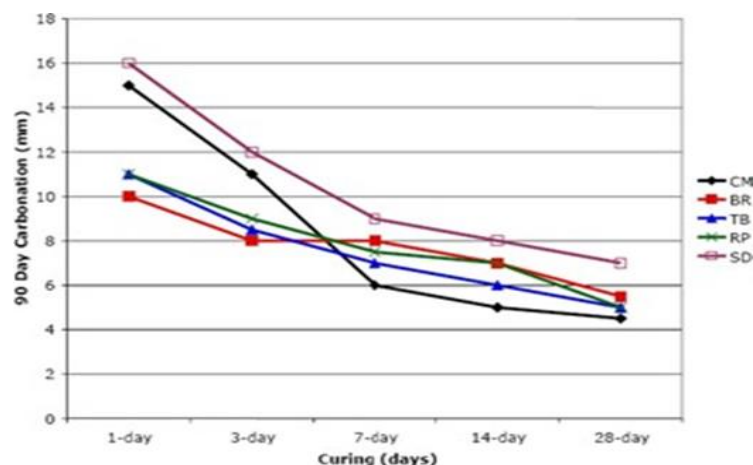
- Dilution de la chaux du clinker et des ajouts, ce qui entraîne une réduction de la quantité initiale de portlandite.
- Consommation de la portlandite par réaction pouzzolanique, générant des composés plus stables.
- Diminution de la compacité au démoulage, en raison de la faible réactivité à jeune âge.

Il a été démontré que la profondeur de carbonatation diminue lorsque le taux de substitution des granulats par des additions minérales, telles que la fumée de silice ou les cendres volantes, augmente. En revanche, cette profondeur s'accroît avec l'augmentation du taux de substitution du ciment [41].

La nature des additions minérales joue également un rôle crucial. En particulier, la teneur en CaO des cendres volantes influence significativement la carbonatation :

- Plus la teneur en CaO est élevée, plus la profondeur de carbonatation est réduite.
- Une étude menée sur des bétons à forte proportion de cendres [42] a mis en évidence que la cure et la composition des cendres influencent également cette profondeur (Figure I.6).

De plus, des profondeurs de carbonatation identiques ont été observées sur des bétons présentant les mêmes taux de substitution volumique en cendres volantes et en filler calcaire, malgré l'absence d'activité pouzzolanique de ce dernier [43]. Ces résultats renforcent l'hypothèse de la dilution, mais remettent en question celle de la consommation de la portlandite par réaction pouzzolanique.



**Figure II.3:** Variabilité des performances due à la durée de la cure humide et au type de cendres [42]

### II.3.3 Paramètres influençant la carbonatation

Des travaux en laboratoire ont mis en évidence que l'intensité de la carbonatation du béton est influencée par plusieurs paramètres, notamment ceux liés à la formulation du béton, au milieu environnant et au processus de fabrication. La réalisation d'une procédure expérimentale basée sur le phénomène naturel de carbonatation serait cependant longue et complexe. Pour cette raison, la majorité des études utilisent des méthodes accélérées, telles que l'utilisation d'une enceinte de carbonatation. Toutefois, ces méthodes ne reflètent pas exactement la réalité, ce qui limite la portée des résultats obtenus, car ils se limitent à quelques valeurs spécifiques pour certaines formulations de béton.

#### II.3.3.1 Paramètres liés au milieu environnant

- **La concentration en dioxyde de carbone** L'influence de la concentration en dioxyde de carbone sur la carbonatation a été étudiée par [49]. Il a été observé que dans les environnements riches en dioxyde de carbone, les épaisseurs de béton carbonaté mesurées ont tendance à être plus importantes.

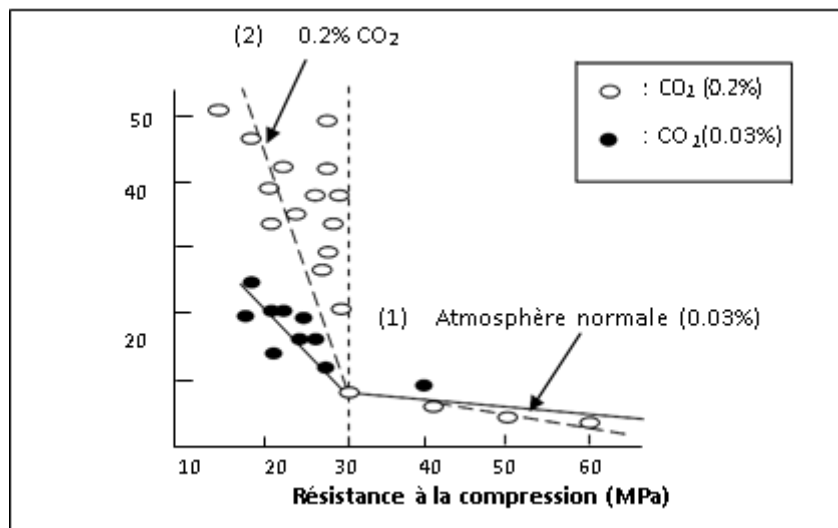


Figure II.4 : Influence de la teneur en dioxyde de carbone sur la carbonatation. [64]

- **L'humidité relative** Les essais de carbonatation accélérée à 20°C sur des bétons traditionnels montrent que la vitesse maximale de carbonatation est atteinte pour une humidité relative comprise entre 50 et 70 %.

La diffusion du dioxyde de carbone à travers la structure poreuse du béton est influencée par l'état hygroscopique des pores. La vitesse de carbonatation dépend principalement de la facilité avec laquelle le dioxyde de carbone pénètre dans la matrice cimentaire.[65]

Ce gaz peut pénétrer par la phase gazeuse lorsque le réseau poreux est désaturé, ou par la phase liquide lorsqu'il y a transfert d'eau contenant du dioxyde de carbone dissous.[52]

Les fortes teneurs en eau, correspondant à un degré de saturation élevé des pores, réduisent considérablement la diffusion du dioxyde de carbone.

En phase liquide, son coefficient de diffusion est environ 104 fois plus faible que sous forme gazeuse.[66]

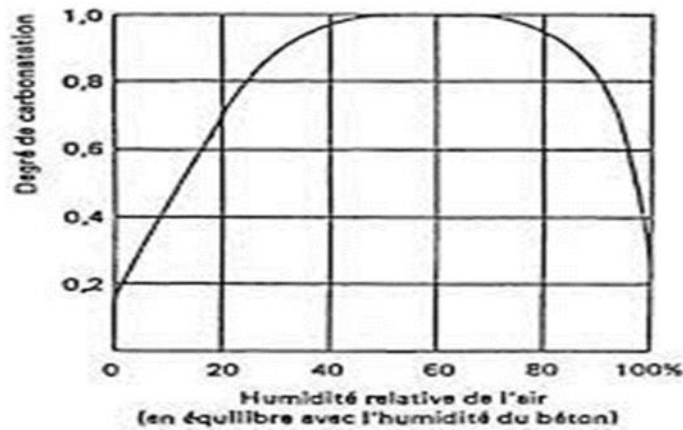


Figure II.5 : Vitesse de carbonatation en fonction de l'humidité relative. [65]

- **La température** La température influence le processus de carbonatation de manière complexe. D'une part, elle accélère la carbonatation en favorisant le séchage des pores, ce qui facilite l'accès du dioxyde de carbone dans la matrice cimentaire.[67] [68] D'autre part, une augmentation de la température peut réduire la vitesse de carbonatation des bétons, car la portlandite se dégrade plus rapidement à basse température. [52]

### II.3.3.2 Paramètres liés au processus de fabrication

Certains facteurs influençant la carbonatation sont particuliers au domaine de la préfabrication. [64]

- **La mise en œuvre** La vibration du béton permet d'éliminer les vides d'air, améliorant ainsi sa compacité. Cependant, les gros granulats ne peuvent pas se rapprocher des parois du moule, créant une zone riche en particules fines près des parois [69]. Cet effet de paroi dû aux granulats, qui ne peuvent se déplacer que dans des directions parallèles, conditionne en partie la microstructure du béton de peau et est à l'origine d'une hétérogénéité de résistance [69 ;70].

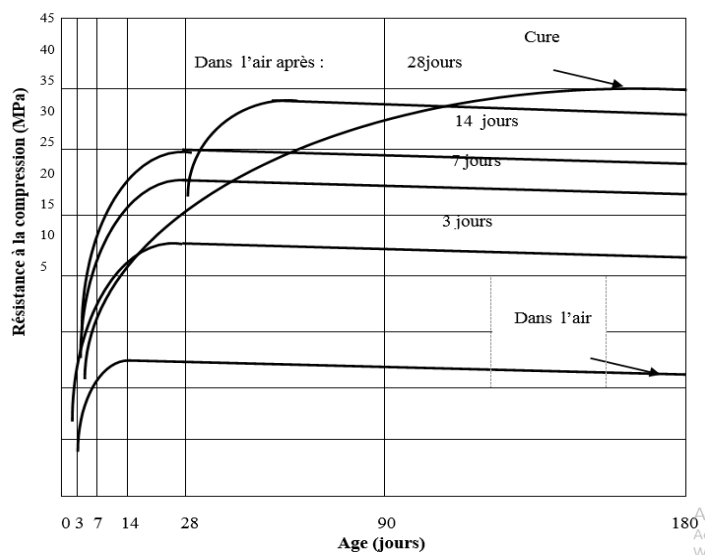
- **La cure** La cure correspond aux conditions appliquées aux bétons pour éviter une perte excessive d'eau, essentielle à l'hydratation du ciment. Une cure adéquate permet de maintenir l'eau nécessaire à l'hydratation, réduisant la taille des pores du béton.

Sans cure, le béton d'enrobage perd rapidement son eau par dessiccation, ralentissant son hydratation. Une cure prolongée améliore la résistance du béton à la pénétration d'agents agressifs comme le dioxyde de carbone et les chlorures [71].

Une durée de cure de trois à sept jours est généralement suffisante pour optimiser la texture du matériau [49 ;72].

En laboratoire, une cure de trois jours maximums se rapproche des conditions de chantier [73].

La figure II.6 : montre un accroissement progressif des résistances mécaniques sur des périodes de cure humide. [73]



**Figure II.6 :** Influence de la cure sur la résistance d'un béton de rapport E/C=0,5. [73]

### II.3.3.3 Conséquences de la carbonatation sur les matériaux cimentaires

Du point de vue du béton seul, la carbonatation présente un effet bénéfique. Elle réduit la porosité, améliore les performances mécaniques et limite la pénétration d'agents agressifs, produisant ainsi un effet de "colmatage" des pores.

### II.3.4 Les bienfaits de la carbonatation pour le béton

La carbonatation, bien que souvent perçue comme néfaste pour la durabilité des structures en béton, présente des effets bénéfiques du point de vue du matériau béton lui-même. En effet, la carbonatation des matrices cimentaires à base de ciment de type CEM I entraîne un gain de masse lié à la fixation du CO<sub>2</sub> dans les hydrates. Le carbonate de calcium formé, ayant un volume molaire supérieur à celui des hydrates initiaux, colmate la microstructure, réduisant ainsi la perméabilité du béton aux agents agressifs tels que les gaz (CO<sub>2</sub> et O<sub>2</sub>), les ions

sulfates, les chlorures et les eaux agressives (eau de mer, eaux séléniteuses ou magnésiennes). En outre, la carbonatation améliore la résistance mécanique des bétons (compression, chocs, usure) et stabilise le matériau sur le plan chimique en limitant les réactions de gonflement (réaction sulfatique, réaction alcali-granulats). Cependant, elle augmente également le module de rigidité ou module d'élasticité, ce qui peut entraîner une fragilisation des pièces minces et une hétérogénéité de résistance et de retrait, notamment dans les enduits de façade partiellement carbonatés où des fissures de surface peuvent apparaître, s'arrêtant au niveau de la zone interne non carbonatée.

## II.4 CONCLUSION

Le béton, bien que durable dans la plupart des milieux naturels, peut subir des dégradations importantes en cas d'exposition à des environnements acides, comme les pluies acides, les zones industrielles ou agricoles, ou le stockage de produits chimiques. Ces attaques chimiques affectent la microstructure poreuse du matériau cimentaire, entraînant une altération de sa composition solide. Parmi ces phénomènes, la carbonatation joue un rôle clé et peut être soit limitée pour protéger le béton, soit favorisée pour augmenter sa compacité.

Pour assurer la durabilité et la résistance du béton face à ces agressions, il est essentiel de respecter certaines précautions :

- Obtenir un béton compact avec une porosité minimale grâce à un dosage optimal en ciment, granulats et eau.
- Assurer une cure prolongée en maintenant la surface humide après le coulage
- Appliquer un serrage et un délai de mise en place adaptés
- Protéger les armatures avec un enrobage d'acier épais et compact.
- Recouvrir les surfaces par des traitements protecteurs tels que des enduits, peintures anti-carbonatation ou hydrofuges.

Pour les milieux très agressifs, l'utilisation d'armatures spéciales comme l'acier inoxydable ou zingué peut également être nécessaire.

**CHAPITRE III:**  
**SYNTHESES DES TRAVAUX**

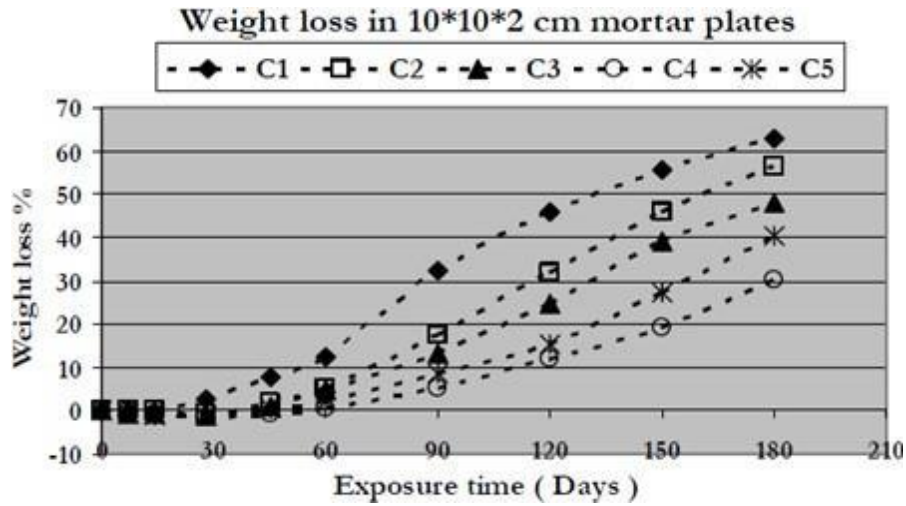
### III.1 INTRODUCTION

Dans le cadre de l'amélioration de la durabilité des matériaux cimentaires, de nombreuses recherches ont été consacrées à l'effet des ajouts minéraux sur leur comportement en milieux agressifs. Cette synthèse rassemble les résultats les plus significatifs portant sur la résistance des mortiers et bétons aux attaques acides et à la carbonatation. Les études analysées mettent en évidence l'influence positive de matériaux tels que le métakaolin, la fumée de silice, la pouzzolane naturelle et la perlite sur la microstructure, la porosité, et la stabilité chimique des liants hydrauliques. Ces résultats permettent de mieux comprendre les mécanismes d'amélioration de la durabilité et d'orienter le choix des formulations dans les environnements sévères.

### III.2 ATTAQUES ACIDES

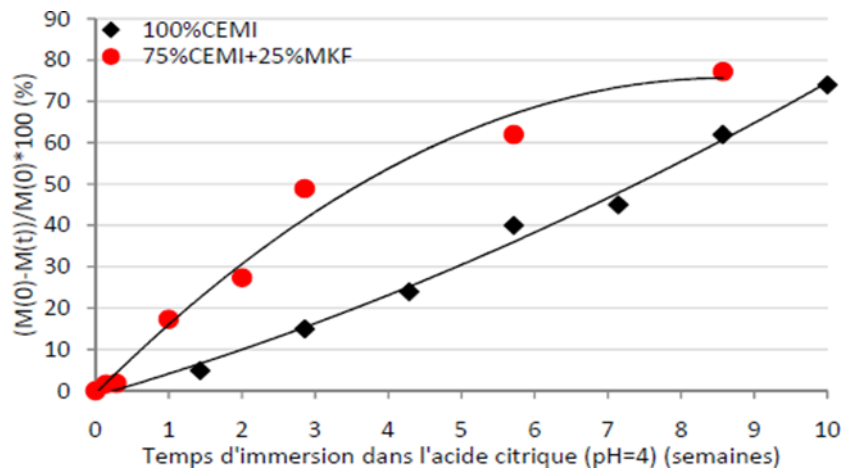
La littérature scientifique regorge d'études mettant en évidence l'impact des ajouts minéraux sur la résistance des matériaux cimentaires aux milieux acides. Nous citons ici quelques travaux clés :

- Étude de Kostuch et al. [44] : Les auteurs ont démontré qu'une substitution de 10 % de métakaolin dans la matrice cimentaire améliore la résistance aux attaques acides. Deux facteurs principaux expliquent cette amélioration :
  - Le métakaolin réduit le coefficient de transfert, limitant ainsi la pénétration de la solution acide.
  - La réaction pouzzolanique transforme la portlandite en C-S-H, un composé présentant une solubilité plus faible, ce qui renforce la résistance du béton.
- Travail de Roy [45] : Il a observé que la résistance aux attaques acides des liants contenant du métakaolin augmente avec le taux de substitution. Les résultats montrent que la perte de masse diminue de 4,5 % à 2 % lorsque le taux de substitution passe de 7,5 % à 22,5 %.
- Recherche de Rahmani et Ramzani [46] : Ils ont étudié la perte de masse des mortiers et bétons soumis à une attaque d'acide sulfurique sur une période de 6 mois. Les résultats sont les suivants (Figure III.1) :
  - Béton à base de filler (C2) : perte de masse de 17,8 %.
  - Addition binaire filler + fumée de silice (C3) : perte de masse de 18,6 %.
  - Addition binaire filler + pouzzolane naturelle (C4) : perte de masse de 10 %, indiquant une meilleure résistance dans cet environnement acide.
  - Béton témoin (C1) : perte de masse plus importante.



**Figure III.1:** Perte de masse en fonction de temps d’immersion dans l’acide sulfurique [46]

- Ghrici et al. [47] ont trouvé que le filler calcaire présente une meilleure résistance dans la solution d’acide sulfurique que celle avec de l’addition pouzzolane naturelle et l’addition binaire pouzzolane naturelle + filler calcaire. Cependant dans la solution d’acide chlorhydrique le béton à base de pouzzolane naturelle présente une faible perte de masse.
- Tamimi [48] a remarqué que la substitution de ciment par 50 % de cendre volante est très bénéfique en termes de résistance des bétons à haute performance vis-à-vis de l’acide sulfurique et de l’acide chlorhydrique. Avec 60 %, l’effet positif de cendre volante diminue et la perte de masse augmente.
- D’après les travaux de Rackel [49] la Figure III.2, les pâtes avec métakaolin sont moins résistantes à l’attaque vis-à-vis de l’acide citrique que celle avec 100% de CEMI.



**Figure III.2:** Cinétique de dégradation des pâtes en immersion dans l’acide citrique [49]

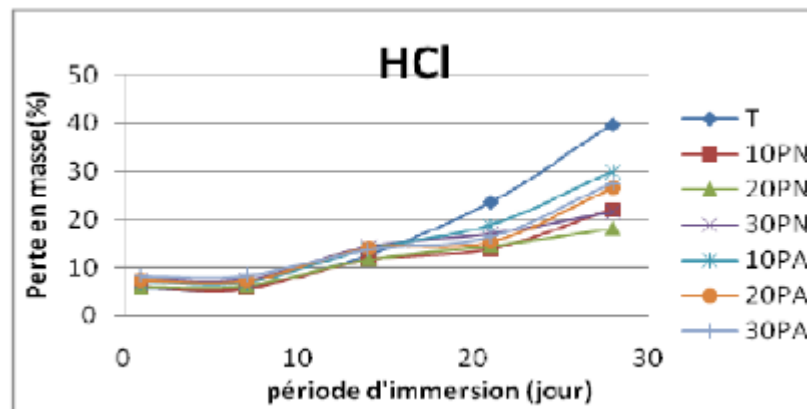
D'un point de vue des attaques à l'acide citrique, les matrices avec métakaolin sont, d'après les résultats, moins résistante [49]. La seule hypothèse pour expliquer ce phénomène est la pression des sels d'acide citrique. Les sels se formant dans les pores de la matrice, exercent une pression capable de la fissurer.

Comme les pores sont plus fins dans les matrices avec métakaolins la matrice subit plus rapidement cette pression, ce qui accélère la ruine des éprouvettes, comparée à celles avec 100% de CEMI.

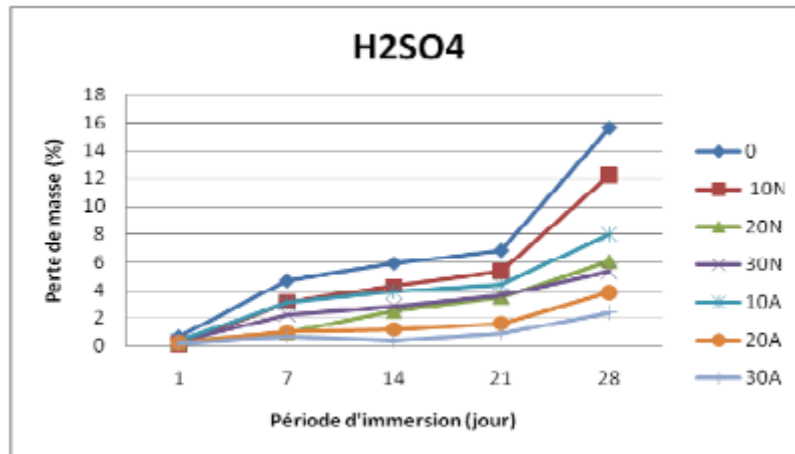
- Selon les résultats obtenus de M. BENKADDOUR, F. KAZI AOUAL et Abdelaziz SEMCHA [50] les mortiers contenant des additions minérales présentent une meilleure résistance aux attaques acides (Figure III.3 et Figure III.4).

La réduction de la perte de masse est particulièrement notable dans les mortiers contenant de la poudre activée (PA) immergés dans l'acide sulfurique, atteignant jusqu'à 84,80 % par rapport au témoin.

Ces résultats sont en accord avec les conclusions de Sayamipuk (1999), qui a également observé une amélioration de la résistance chimique des matériaux cimentaires en présence d'ajouts minéraux.



**Figure III.3:** perte de masse des différents mortiers à 28 jours d'immersion [50]  
(5% HCl).[24]



**Figure III.4 :** perte de masse des différents mortiers à 28 jours d'immersion (5% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). [50]

- Selon LAOUFI, L., SENHADJI, Y et Al [51] l'incorporation de pouzzolane naturelle (PN) améliore significativement la durabilité des mortiers exposés à une solution d'acide sulfurique (5% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). Les mortiers contenant 10%, 20% et 30% de PN présentent une réduction de perte de masse de 15,24%, 17,86% et 19,80% respectivement après 105 jours, comparés au mortier témoin. Cette amélioration est due à la réaction pouzzolanique qui réduit la porosité en formant des gels C-S-H, limitant ainsi la pénétration de l'acide. En conséquence, les mortiers avec PN conservent mieux leurs dimensions et leur pH est plus stable, traduisant une résistance chimique accrue.
- Selon les résultats de CHIHAOUI, R [52] les mortiers contenant de la perlite naturelle présentent une meilleure résistance aux attaques acides. En immersion dans une solution d'acide sulfurique (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> à 5%), les mortiers sans perlite (M0) subissent une perte de masse plus élevée par rapport à ceux avec de la perlite (M5, M10, M15, et M20). Cette amélioration est due à la réduction de la portlandite libre (Ca(OH)<sub>2</sub>) grâce à la réaction pouzzolanique de la perlite, qui réduit la porosité et améliore la résistance chimique des mortiers

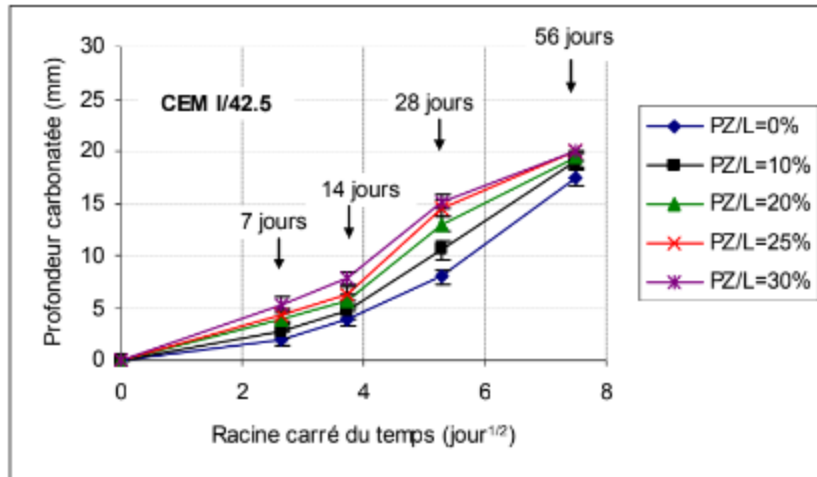
### III.3 CARBONATAION

De nombreuses recherches scientifiques mettent en lumière l'influence des ajouts minéraux sur la durabilité des matériaux cimentaires en environnements acides. Voici quelques études marquantes :

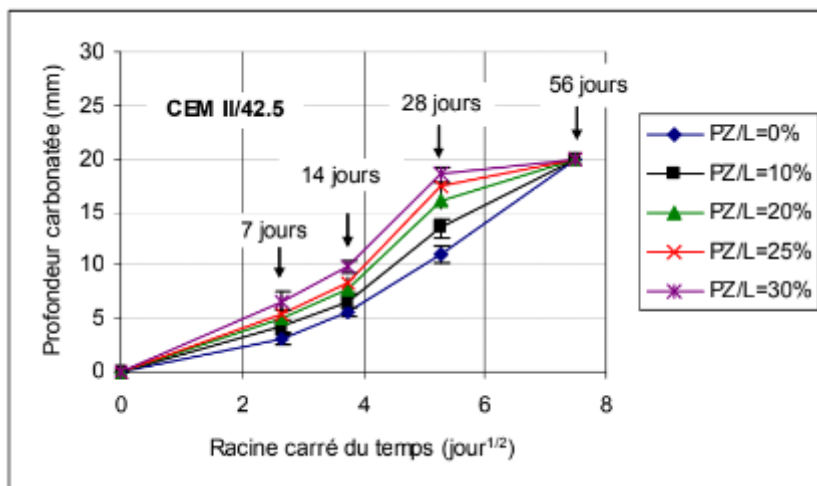
- D'après la recherche de KAID, N., AYED, K et Al [53] les mortiers contenant de la pouzzolane naturelle (PN) présentent une profondeur de carbonatation plus élevée que les mortiers de référence, particulièrement avec des taux de substitution de 20% à 30%. Cette augmentation est due à la réduction de la portlandite (Ca(OH)<sub>2</sub>) dans les mortiers pouzzolaniques, ce qui favorise la réaction de carbonatation. Les mortiers avec du

ciment CEM II montrent une plus grande sensibilité à la carbonatation comparés aux mortiers avec CEM I

La (figure III.5) et (figure III.6) montre la profondeur de carbonatation en fonction de la racine du temps



**Figure III.5** 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. [53]



**Figure III.6** 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. [53]

- GUENANOU, F [54] à trouver qu'après 90 jours de carbonatation accélérée, les mortiers montrent un gain de masse en lien avec la formation de carbonates, traduisant une réduction de la porosité. La profondeur de carbonatation maximale observée est de 11 mm pour M0 et M2, et de 9 mm pour M1. La carbonatation a entraîné une amélioration de la résistance à la compression (jusqu'à +20%) et une diminution de la porosité accessible à l'eau (jusqu'à -36%). Les analyses DRX et MEB confirment la transformation de la portlandite en calcite et vatérite, densifiant la matrice du mortier

### **III.4 CONCLUSION**

À l'issue de cette synthèse, il ressort que l'incorporation d'ajouts minéraux améliore généralement la résistance des matériaux cimentaires face aux agressions acides et à la carbonatation. Ces ajouts réagissent avec la portlandite, réduisant ainsi la porosité et favorisant la formation de phases plus stables comme les gels C-S-H. Toutefois, l'efficacité de ces ajouts dépend fortement de leur nature, de leur proportion et du type d'environnement agressif. Tandis que certains matériaux comme la pouzzolane naturelle ou la perlite renforcent significativement la résistance en milieu acide, d'autres présentent des effets variables selon le type d'acide ou les conditions de carbonatation. Ces observations soulignent l'importance de la sélection judicieuse des ajouts minéraux pour concevoir des matériaux durables, adaptés aux contraintes environnementales spécifiques.

# **CHAPITRE IV:**

# **MATERIAUX UTILISES**

## IV.1 INTRODUCTION

Cette recherche complète les investigations expérimentales menées par BELKHERASSANE F ALLILECHE H [55] sur le comportement mécanique des mortiers formulés avec ou sans ajouts minéraux.

Ce chapitre a été dédié à la description et à la caractérisation des matériaux employés, notamment le sable normalisé, le ciment, la perlite, la pouzzolane, l'eau et les adjuvants. Notre travail met en lumière la perlite issue de Maghnia et la pouzzolane de Béni-Saf, dans l'optique de leur utilisation comme substituts partiels au ciment (substitution en volume). Il s'agit ici de comparer l'impact de ces ajouts minéraux sur les propriétés des différents mortiers les intégrant.

Ils sont effectués une série d'essais physiques et mécaniques dans les laboratoires suivants :

- Laboratoire pédagogique de matériaux de construction, Département de Génie Civil de l'Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem.
- Laboratoire Construction, Transport et Protection de l'Environnement (LCTPE), Faculté des Sciences, Université de Mostaganem.

## IV.2 CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES :

### IV.2.1 Le ciment

Le ciment utilisé dans tous les essais est un résistant aux sulfates (CRS) CPA CEM I 42,5 provenant du groupe GICA. Le choix particulier de ce type de ciment se justifie par le fait qu'il ne contient aucun ajout minéral. Ce choix nous permet de justifier nos conclusions.

Ce ciment présente une résistance moyenne en compression à 28 jours de 42,5 MPa, est constitué de : 95% de clinker, des constituants secondaires (de 0 à 5%) peuvent être incorporés dans ce ciment et du sulfate de calcium sous forme de gypse est rajouté en tant que régulateur de prise. [55]

La composition chimique du ciment est représentée dans le tableau IV.1.

**Tableau IV.1** : compositions élémentaire chimique de ciment CRS en% [55]

Élément chimique	Teneur %
Na <sub>2</sub> O	0.20
MgO	2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.5
SiO <sub>2</sub>	20
SO <sub>3</sub>	2.5
Cl	0.02
K <sub>2</sub> O	0.6

CaO	63.1
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.5

La composition minéralogique du clinker est donnée par le tableau IV.2, selon la formule de Bogue.

$$C3S = 4,07 (CaO) - 7,60 (SiO_2) - 6,72 (Al_2O_3) - 1,43 (Fe_2O_3) - 2,85 (SO_3)$$

$$C2S = 2,87 (SiO_2) - 0,75 (C3S)$$

$$C3A = 2,65 (Al_2O_3) - 1,69 (Fe_2O_3)$$

$$C4AF = 3,04 (Fe_2O_3)$$

**Tableau IV.2** : compositions chimique de clinker (%) [55]

C3S	C2S	C3A	C4AF
59.59%	12.71%	2.63%	16.72%

- La masse volumique apparente est obtenue par la pesée d'un récipient d'un litre rempli de ciment comme le montre la figure IV.1.



**Figure IV.1** : La masse volumique apparente du ciment. [55]

- La masse volumique absolue du ciment a été déterminée selon la NF P 18-555 par le Pycnomètre et le benzène figure IV.2.



**Figure IV.2 :** Masse volumique absolue de ciment. [55]

- Les caractéristiques physiques du ciment utilisé sont montrées dans le tableau Tableau.IV.3

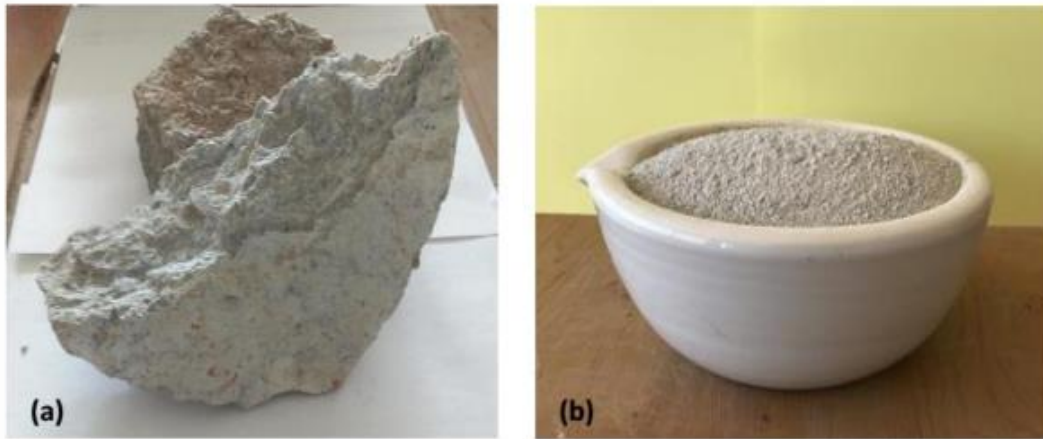
**Tableau.IV.3 :** Caractéristiques physiques du ciment CRS [55]

Caractéristiques	Valeurs
Masse volumique apparente (g/cm <sup>3</sup> )	1.01
Masse volumique absolue (g/cm <sup>3</sup> )	3.13
Finesse (cm <sup>2</sup> /g)	2869
Perte de feu	≤1%
Résidu insoluble	0.5 % - 1 %
Densité	0.950 à 1.10
Refus sur tamis 45 micron	≥ 20%

#### IV.2.2 La perlite

La perlite utilisée dans cette étude est d'origine volcanique extraite du gisement de Hammam Boughrara situé à Maghniya [56], Ce matériau sous forme de roches, après concassage a été

séché à 105 °c dans une étuve pendant 24 heures pour éliminer l'eau libre, puis broyé (Figure IV.3)



**Figure IV.3 :** (a) Roche de la perlite naturelle avant broyage, (b) Poudre de la perlite naturelle après broyage et tamisage. [55]

- La composition chimique de la perlite broyée est montrée dans le tableau IV.4.

**Tableau IV 4.** Composition chimique élémentaire de la perlite naturelle [57]. [55]

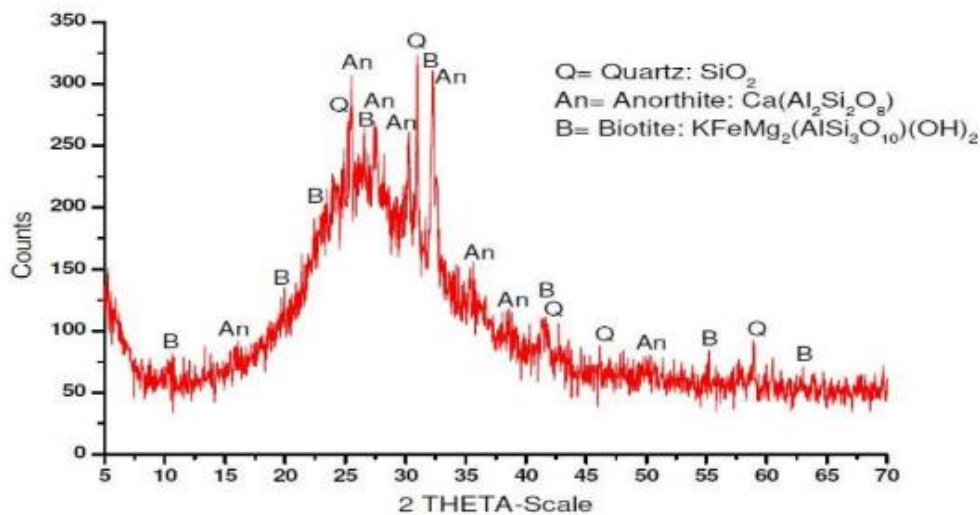
Composants	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	MgO	PAF
Contenu (%)	2,38	72,81	13,68	2,16	0,01	3,64	0,97	0,05	4,20

- Les caractéristiques physiques de la perlite naturelle, est donnée dans le tableau IV.5.

**Tableau IV.5.** Caractéristiques physiques de la perlite naturelle [57]. [55]

Désignation	Propriété	Désignation	Propriété
Couleur	Gris	La finesse au tamis 45 µm	12 %
Masse volumique absolue	2.6 g/cm <sup>3</sup>	Surface spécifique de Blaine	4230 cm <sup>2</sup> /g

- Le diagramme (Figure IV.4) montre que la perlite naturelle est composée de minéraux courants pour une substance volcanique avec principalement du quartz, anorthite et biotite. Aucun minéral hydraulique n'a été reconnu dans ce matériau, néanmoins le décollement de la ligne de base du diffractogramme sous forme d'une bosse nous indique la présence d'une phase amorphe potentiellement réactive.



**Figure IV.4.** Le diffractogramme aux rayons X de la perlite naturelle [57]. [55]

### IV.2.3 La pouzzolane naturelle

La pouzzolane naturelle utilisée est d'origine volcanique extraite du gisement de Bouhamidi situé au Sud de Béni-Saf (Algérie). Cette pouzzolane est fournie sous forme de roches concassées de type pierre ponce et scorie (Figure IV.5). Pour pouvoir l'utiliser comme substitut dans la composition des pâtes et mortiers, nous avons d'abord procédé à son étuvage à 105°C afin d'éliminer toute éventuelle humidité et faciliter son broyage, nous l'avons ensuite complètement broyé puis passé au tamis de 80 µm.



**Figure IV.5:** La pouzzolane naturelle utilisée, avant broyage et après broyage. [55]

Les caractéristiques chimiques de la pouzzolane naturelle de Bni-Saf sont représentées dans le tableau IV.6.

**Tableau IV.6 :** composition chimique élémentaire de la pouzzolane naturelle de Bni-Saf [58][55]

Elément (Teneur en %)	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	PF
Pouzzolane naturelle	45.96	16.32	9.41	9.72	4.57	0.11	1.59	0.47	4.85

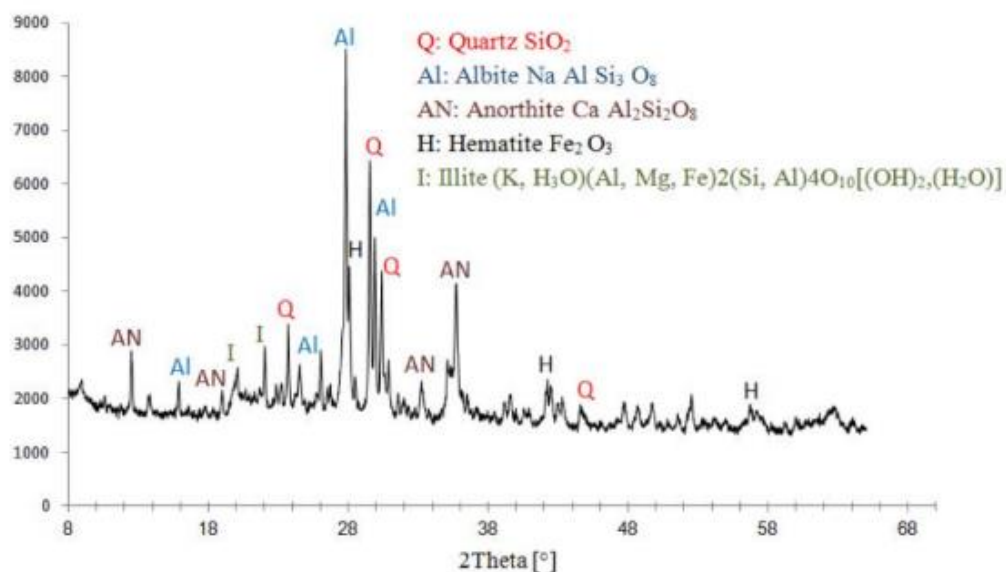
En plus de leur effet pouzzolanique, elles jouent un rôle de remplissage des pores des produit hydraté et correcteurs granulaires, ce qui améliore la compacité et diminue la perméabilité.

- Les caractéristiques physiques de la pouzzolane sont données dans les tableaux tableau IV.7.

**Tableau IV.7 :** caractéristiques physiques de la pouzzolane naturelle de Bani-Saf [58] [55]

Caractéristiques	Valeurs
Masse volumique apparente de la vase (g/cm <sup>3</sup> )	0.81
Masse volumique absolue de la vase (g/cm <sup>3</sup> )	2,73
Finesse suivant la méthode de Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	4453

- La composition minéralogique de la pouzzolane est obtenue par DRX, elle a donné les résultats illustrés dans la figure IV.6.



**Figure IV.6.** L'analyse aux rayons X de PZ [56]. [55]

#### IV.2.4 Le sable

Le sable utilisé est un sable siliceux provenant de la société Adwan, zone industrielle Fornaka à Mostaganem, ouest algérien. Il est initialement préparé pour être classé suivant les normes françaises NF P 15-403 (Figure IV.7).



**Figure IV.7.** Le sable siliceux de la société Adwan.[55]

Le sable normalisé est un sable naturel siliceux, il est propre les grains de forme isométrique et arrondie, elle préparé dans labo de défrent fraction

Le sable est conditionné en sachets contenant chacune de  $1350 \pm 5$  g.

- La composition chimique du sable, est donnée dans le tableau IV.8.

**Tableau IV.8.** Composition chimique du sable (Adwan) [59] [55]

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	TiO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	L.O.I
97.2%	3.70%	0.30%	0.003%	0.240%	0.023%	0.02%	0.24%

- Les masses volumiques apparentes et absolues sont montrées par la figure IV.8 et IV.9.

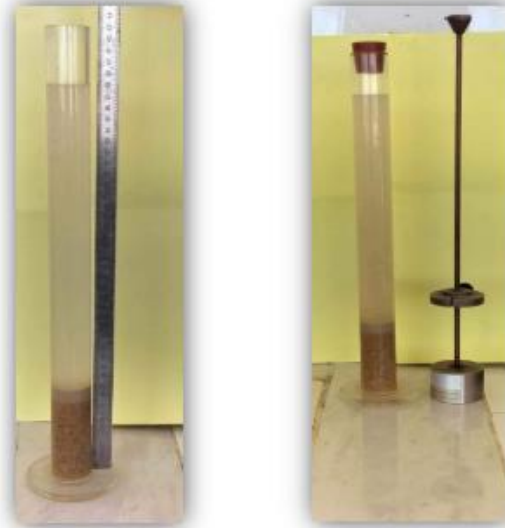


**Figure IV.8.** La masse volumique apparente du sable. [55]



**Figure IV.9.** La masse volumique absolue du sable. [55]

- L'équivalent de sable est déterminé avec deux méthodes différentes visuelles et avec le piston La procédure de l'équivalent de sable visuel est montrée dans la figure IV.10.



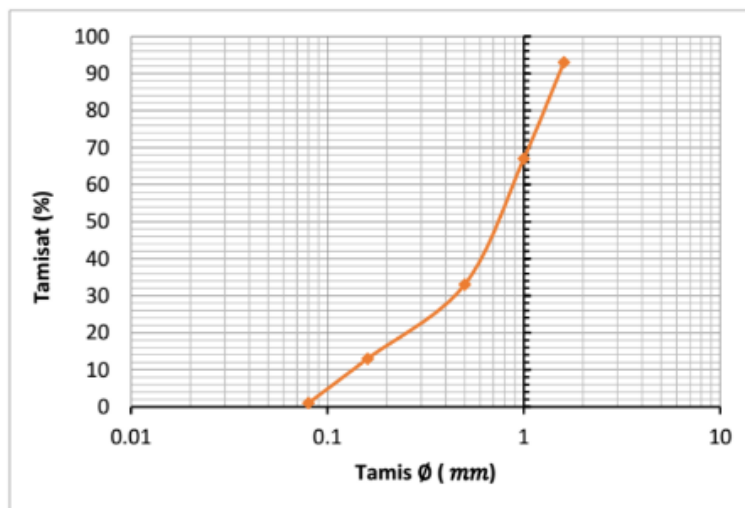
**Figure IV.10 :** Essai équivalents de sable [55]

D'après l'équivalent de sable on conclut que le sable utilisé est très propre : absence presque totale des fines mesurer suivant la norme [NF EN18]

- La composition granulométrique déterminé par tamisage est conforme aux exigences des normes EN 196-1 voir le tableau IV.9 et la figure IV.11.

**Tableau IV.9.** La granulométrie du sable utilisé. [55]

Tamis (mm)	1.6	1	0.5	0.16	0.08	Fond
Refus (g)	94.5	351	459	270	162	13.5
Tamisât (%)	93	67	33	13	1	/



**Figure IV.11.** Courbe granulométrique du sable [59] [55]

- Les caractéristiques physiques du sable sont représentées dans le tableau IV.10.

**Tableau IV.10.** Les caractéristiques physiques du sable siliceux. [55]

Caractéristiques		Sable siliceux
Masse volumique apparente (g/cm <sup>3</sup> )		1.61
Masse volumique absolue (g/cm <sup>3</sup> )		2.7
Equivalent de sable (%)	Visuel	95.64
	Piston	91.75
Module de finesse 1.91		1.91
Pourcentage de fines (%)		1.2

#### IV.2.5 L'eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée pour la préparation des pâtes et mortiers est l'eau potable du robinet.

#### IV.2.6 L'adjuvant

L'adjuvant utilisé dans nos mélanges est le PLASTIMENT BV 40 qui est un plastifiant réducteur d'eau énergétique qui augmente la compacité du béton et facilite sa mise en place entraînant ainsi une amélioration des résistances mécaniques et diminue l'absorption capillaire des bétons. Il permet de réduire l'eau de gâchage d'environ 10 % sans diminuer la maniabilité du témoin et d'améliorer la maniabilité à teneur en eau constante (Voir fiche technique en annexe A). Les caractéristiques physiques et chimiques du BV 40 sont résumées dans le tableau IV.11. [55]

**Tableau IV.11 :** Caractéristiques physiques et chimiques de l'adjuvant [55]

<b>Forme</b>	LIQUIDE
<b>Couleur</b>	Brun foncé
<b>Densité</b>	1,180 ± 0,025
<b>Durée de Conservation</b>	3 ans
<b>pH</b>	4,5 ± 1.
<b>Teneur Totale en Ions Chlorure</b>	< 0,1 %.
<b>Extrait Sec</b>	36,6 à 40,4 %
<b>Plage d'utilisation recommandée</b>	0,3 à 1% du poids du ciment
<b>Conditionnement</b>	Fût de 250 kg Cubi de 1100 kg

<b>Équivalent Oxyde de Sodium</b>	$\leq 2,0 \%$ .
-----------------------------------	-----------------

### **IV.3 CONCLUSION**

Dans ce chapitre, nous avons caractérisé les différents matériaux utilisés ciment, perlite, pouzzolane sable et adjuvant. C'est une étape nécessaire avant d'entamer l'étude expérimentale de ces matériaux cimentaires. Ces matériaux servent à la formulation des pâtes et mortiers. La connaissance de ces caractéristiques nous aide d'une façon significative à commenter les résultats des essais expérimentaux.

**CHAPITRE V:**  
**METHODES**  
**EXPERIMENTALES ET**  
**RESULTATS**

## V.1 INTRODUCTION

Ce chapitre est consacré à l'analyse des résultats expérimentaux issus des essais d'attaque acide et de carbonatation réalisés sur des échantillons de mortier. Ces essais revêtent une importance particulière pour évaluer la résistance chimique et la durabilité des mortiers exposés à des environnements agressifs, tant urbains qu'industriels. Une méthodologie a été adoptée, consistant à soumettre les échantillons à l'acide  $H_2SO_4$  fréquemment rencontré, ainsi qu'au carbonatation naturelle.

Ce chapitre présentera les données brutes recueillies, mettra en évidence les altérations physiques et chimiques observées, et analysera les facteurs influençant la dégradation des matériaux. L'ensemble de ces résultats permettra de mieux comprendre le comportement des mortiers face aux attaques chimiques acides et à la carbonatation, et offrira des perspectives utiles pour améliorer la durabilité des ouvrages dans des contextes exposés à de fortes agressions.

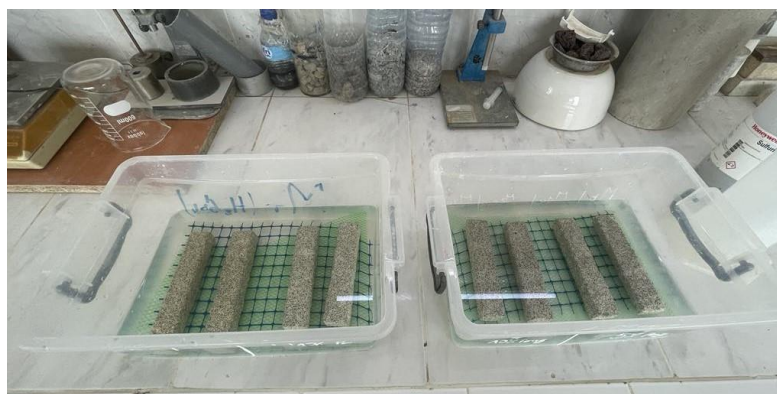
Nous allons aussi présenter les différents essais expérimentaux réalisés dans le cadre de notre recherche. Ces essais portent sur l'étude des propriétés des mortiers élaborés à base de perlite et de pouzzolane naturelle, ainsi que sur des formulations témoins utilisées à des fins de comparaison.

Parmi les essais menés, figurent notamment l'essai d'attaque acide et l'essai de carbonatation naturelle.

## V.2 METHODES EXPERIMENTALES

### V.2.1 Essai de résistance à l'attaque acide :

La résistance des différents mortiers à l'attaque acide a été déterminée selon la norme ASTM C267 [2001]. Des échantillons de différents mortiers (4 x 4 x 16 cm) ont été utilisés pour évaluer la résistance à l'attaque de l'acide sulfurique. Après une année de durcissement dans l'eau saturée en chaux, les échantillons ont été immergés dans une solution à 2 % d'acide sulfurique ( $H_2SO_4$ ) à  $20 \pm 2$  °C durant une période de 10 semaines (Figure V.1).



**Figure V.1.** Conservation des prismes de mortier dans la solution  $H_2SO_4$  à 2 % de concentration.

La résistance des échantillons immergés dans les solutions acides est évaluée physiquement (variation de masse) et visuellement.

- **Variation de masse**

Selon la procédure de la norme ASTM C 267 : les éprouvettes sont nettoyées 3 fois avec de l'eau douce 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 10 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 II.5 :

$$VM\% = \left[ \frac{M_0 - M_i}{M_0} \right] \times 100 \quad (II.5)$$

Avec VM : variation de la masse en (%) ;

M<sub>0</sub> : la masse de l'éprouvette avant exposition à l'attaque acide en (gramme) ;

M<sub>i</sub> (i=1, 2, 3..., 10) : la masse après 1, 2, ..., 10 semaines d'attaque en (gramme).

- **Etude visuelle**

Une comparaison a été faite visuellement (à partir de photos numériques) entre l'état de chaque échantillon avant et après attaque acide.

- **Préparation de la solution acide utilisée :**



**Figure V.2. : Acide H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>**

- Les pourcentages utilisés sont : Acide H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (2%) dans 2048 ml d'eau distillée utilisée dans chaque bassin qui contient 4 éprouvettes.

- **Quantité d'eau distillée**

$$4 \times 4 \times 16 = 256 \text{ cm}^3$$

$$256 \times 4 = 1024 \text{ cm}^3$$

$$1024 \times 2 = 2048 \text{ cm}^3 = 2,048 \text{ L}$$

- **Pourcentage acide H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (2%)**

$$98 \% \rightarrow 100 \%$$

$$02 \% \rightarrow x \%$$

$$\Rightarrow X = 2.04\%$$

$$2048 \rightarrow 100 \%$$

$$Y \rightarrow 2 \%$$

$$\Rightarrow Y = 40,96 \text{ gr.}$$

$$02 \% \rightarrow 2.04 \%$$

$$40,96 \rightarrow X$$

$$\Rightarrow X = 41,77 \text{ gr}$$

\*Volume d'acide = 41,77 gr.

\*Volume d'eau = 2048 - 41,77 = 2 006,23 gr.



**Fig. V.3** : Échantillons du mortier avant immersion dans les solutions acides.

## V.2.2 Essai de carbonatation

La carbonatation résulte de l'interaction entre le dioxyde de carbone présent dans l'atmosphère et le béton. Ce phénomène compromet la durabilité des structures en béton, notamment en favorisant la corrosion des armatures

La teneur en CO<sub>2</sub> dans l'air ambiant varie généralement entre 0,03 % et 1 %, créant ainsi les conditions propices à la carbonatation naturelle.

Dans notre étude, les éprouvettes ont été exposées à l'air libre au sein du laboratoire afin de suivre l'évolution de la carbonatation dans des conditions naturelles.



**Figure V.4 :** Les éprouvettes destinées à l'essai de carbonatation naturelle

Pour évaluer la profondeur de la carbonatation, on utilise la pulvérisation d'un indicateur coloré tel que la phénolphthaléine, qui permet de distinguer visuellement les zones carbonatées sur les surfaces fracturées du béton. Cet indicateur reste incolore dans les zones carbonatées et prend une teinte rose dans les zones non atteintes, réagissant à un pH d'environ 9.

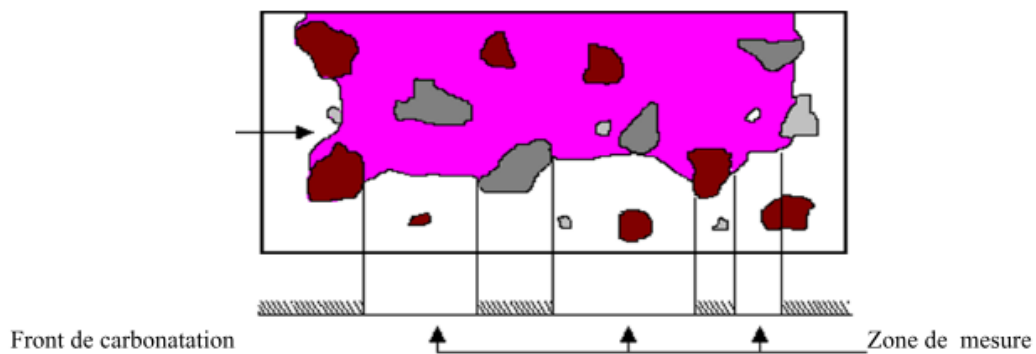
Dans le cadre de notre étude, nous avons effectué les mesures de carbonatation sur les mêmes échantillons utilisés par Belkherassane F. et Allileche H. [55], âgés d'un an (voir figure V.4). Les éprouvettes de dimensions 4×4×16 cm<sup>3</sup> ont été rompues afin de réaliser cet essai.

La phénolphthaléine est un matériau nécessaire pour faire cet essai (Figure V.5).



**Figure V.5 :** La phénolphtaléine

Les mesures de l'épaisseur de la zone carbonatée du béton sont effectuées après humidification des surfaces de rupture, suivie de la pulvérisation d'une solution de phénolphtaléine. Cet indicateur permet de visualiser l'interface entre la zone saine (alcaline) et la zone carbonatée. L'épaisseur de carbonatation correspondant à une date donnée est déterminée en calculant la moyenne des mesures prises sur les quatre faces de l'échantillon.



**Figure V.6 :** Schéma illustrant le principe des mesures

### V.3 RESULTATS DE L'ATTAQUE ACIDE SULFURIQUE (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)

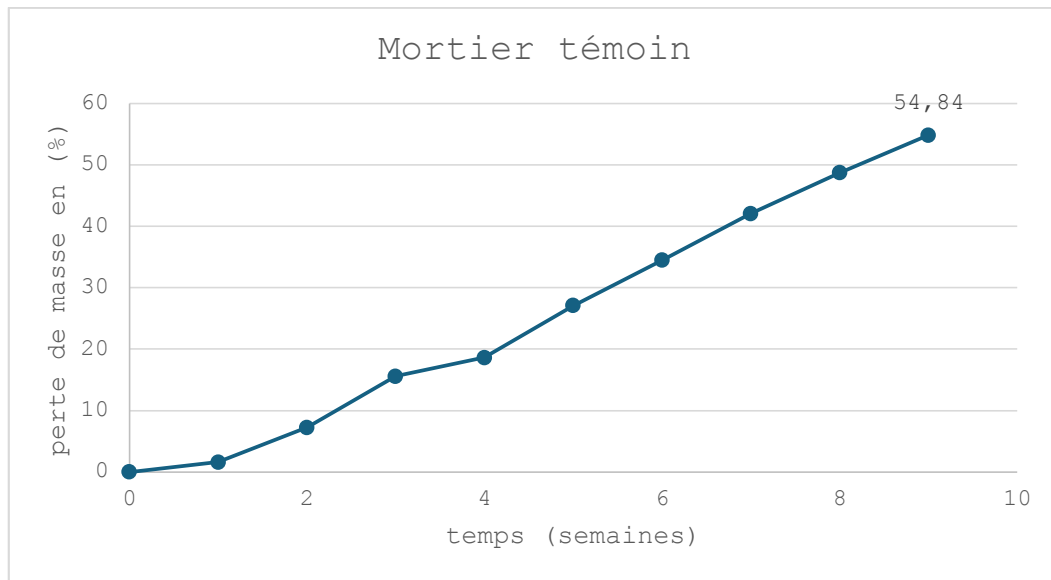
L'essai de résistance aux attaques acides consiste à observer l'évolution de la masse des échantillons immergés dans une solution acide H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> saturée (concentration de 2 % en volume). La résistance des échantillons exposés à ces solutions est évaluée à la fois par des mesures physiques (variation de la masse) et par une observation visuelle de leur état de surface.

#### V.3.1 Perte de masse des éprouvettes conservées en 2% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

Le suivi de la perte de masse au cours du temps des éprouvettes de mortier immergées dans une solution d'acide sulfurique (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) à une concentration de 2 % sont présentés dans les tableaux et les figures ci-après.

**Tableau V.1** Résultats des pertes de masses du mortier témoin conservé dans la solution en 2% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

<b>Mortier témoin</b>				
	<b>Masse 1(g)</b>	<b>Masse 2(g)</b>	<b>Moyenne(g)</b>	<b>Perte de masse (%)</b>
<b>Mortier intact</b>	569	553,1	561.05	0,00
<b>Semaine 1</b>	559,6	544,5	552.05	1,60
<b>Semaine 2</b>	527,2	513,8	520.5	7,23
<b>Semaine 3</b>	480	467,1	473.55	15,60
<b>Semaine 4</b>	455,9	457,4	456.65	18,61
<b>Semaine 5</b>	404,3	413,7	409	27,10
<b>Semaine 6</b>	362,6	372,6	367.6	34,48
<b>Semaine 7</b>	318,8	330,9	324.85	42,10
<b>Semaine 8</b>	281,8	293,6	287.7	48,72
<b>Semaine 9</b>	247,1	259,6	253.35	54,84

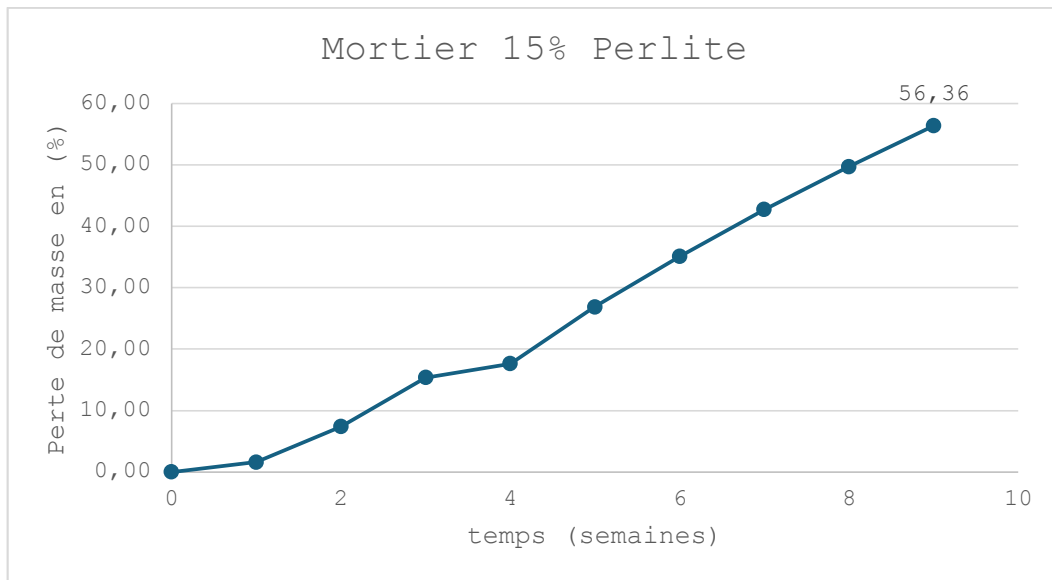


**Figure V.7 :** Evolution de la perte de masse du mortier témoin conservé dans la solution en  $2\%H_2SO_4$

L'évolution de la courbe présentée sur la Figure V.7, indique des pertes en masse significatives pour le mortier témoin. Après une immersion de 64 jours dans la solution d'attaque, le mortier témoin à base du ciment CEM I développent un gain maximal dans la perte de masse est de **54,84 %**. Il sert de référence pour évaluer les effets des ajouts.

**Tableau V.2 :** Résultats des pertes de masses du mortier 15 % Perlite en  $2\%H_2SO_4$

Mortier 15% Perlite				
	Masse 1(g)	Masse 2(g)	Moyenne(g)	Perte de masse (%)
<b>Mortier intact</b>	561,7	556,4	559,05	0,00
<b>Semaine 1</b>	552,1	548,2	550,15	1,59
<b>Semaine 2</b>	521,1	514,5	517,8	7,38
<b>Semaine 3</b>	475,7	470,6	473,15	15,37
<b>Semaine 4</b>	458,7	462,4	460,55	17,62
<b>Semaine 5</b>	409,6	408	408,8	26,88
<b>Semaine 6</b>	362,7	362,9	362,8	35,10
<b>Semaine 7</b>	319,6	320,8	320,2	42,72
<b>Semaine 8</b>	280	281,9	280,95	49,75
<b>Semaine 9</b>	242,9	245	243,95	56,36

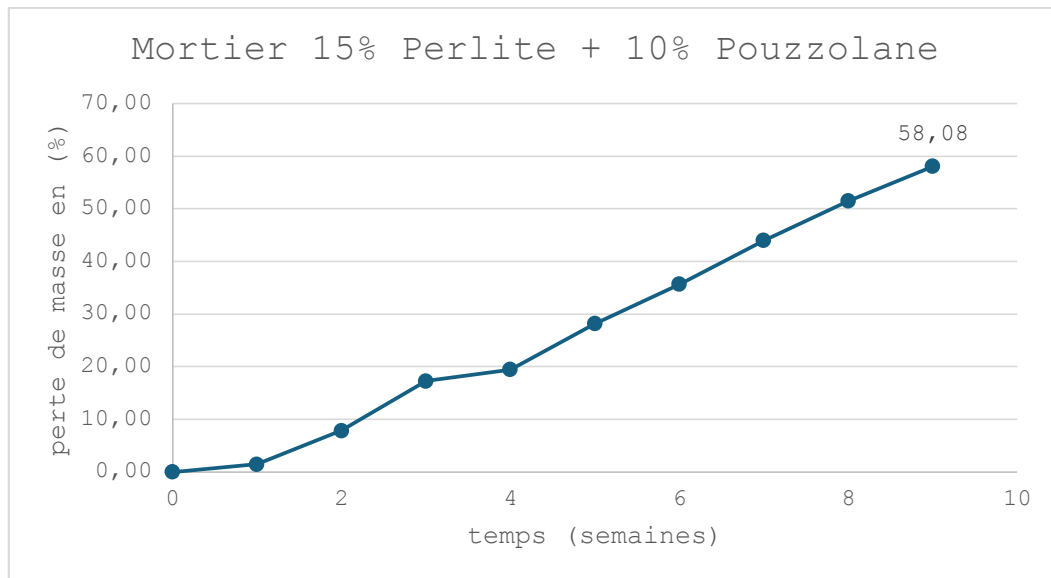


**Figure V.8 :** Evolution de la perte de masse du mortier Pr 15% conservé dans la solution en  $2\%H_2SO_4$

Après une immersion de 64 jours dans la solution d'attaque, le mortier à base de 15% de perlite en substitution d'une partie de ciment CEM I, développent un gain maximal dans la perte de masse est égal à 56,36 % voir Figure V.8, soit une performance inférieure au mortier témoin.

**Tableau V.3 :** Résultats des pertes de masses du mortier 15 % Perlite + 10% Pouzzolane en  $2\%H_2SO_4$

Mortier 15% Perlite + 10% Pouzzolane				
	Masse 1(g)	Masse 2(g)	Moyenne(g)	Perte de masse (%)
<b>Mortier intact</b>	566,7	566,7	566,7	0,00
<b>Semaine 1</b>	557,7	559,2	558,45	1,46
<b>Semaine 2</b>	519,2	525,6	522,4	7,82
<b>Semaine 3</b>	463,7	473,7	468,7	17,29
<b>Semaine 4</b>	452,5	460,7	456,6	19,43
<b>Semaine 5</b>	401,9	412,2	407,05	28,17
<b>Semaine 6</b>	360,2	368,9	364,55	35,67
<b>Semaine 7</b>	314,9	320,3	317,6	43,96
<b>Semaine 8</b>	272,7	277,3	275	51,47
<b>Semaine 9</b>	236,1	239	237,55	58,08

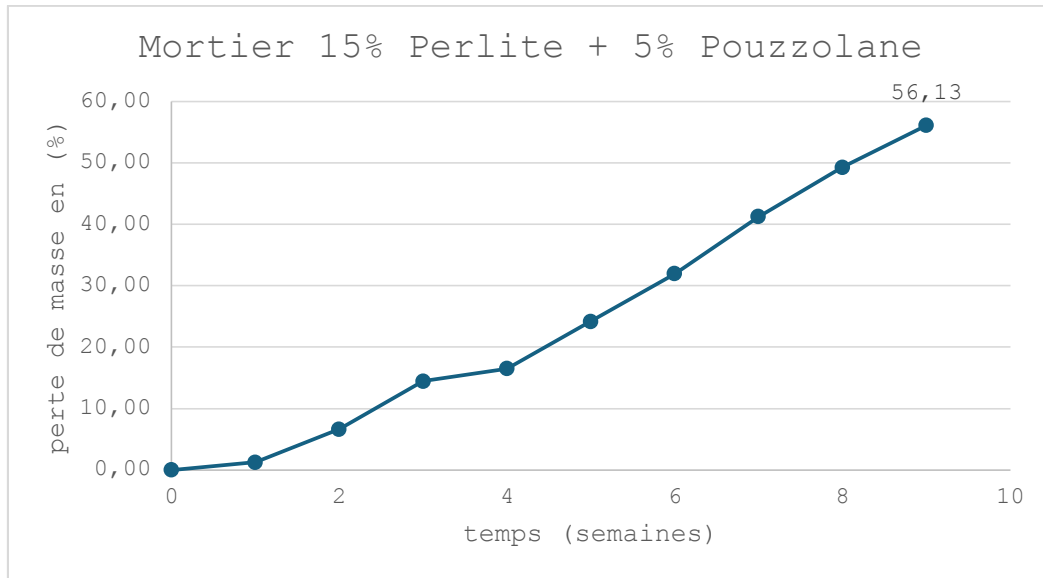


**Figure V.9 :** Evolution de la perte de masse du mortier Pr 15% + Pz 10% conservé dans la solution en 2% $H_2SO_4$

L'évolution de la courbe présentée sur la Figure V.9, indique des pertes en masse significatives pour le mortier à base de 15% de perlite + 10% de pouzzolane en substitution d'une partie de ciment. Après une immersion de 64 jours dans la solution d'attaque, ce dernier développe un gain maximal de perte de masse qui égal à 58,08 %.

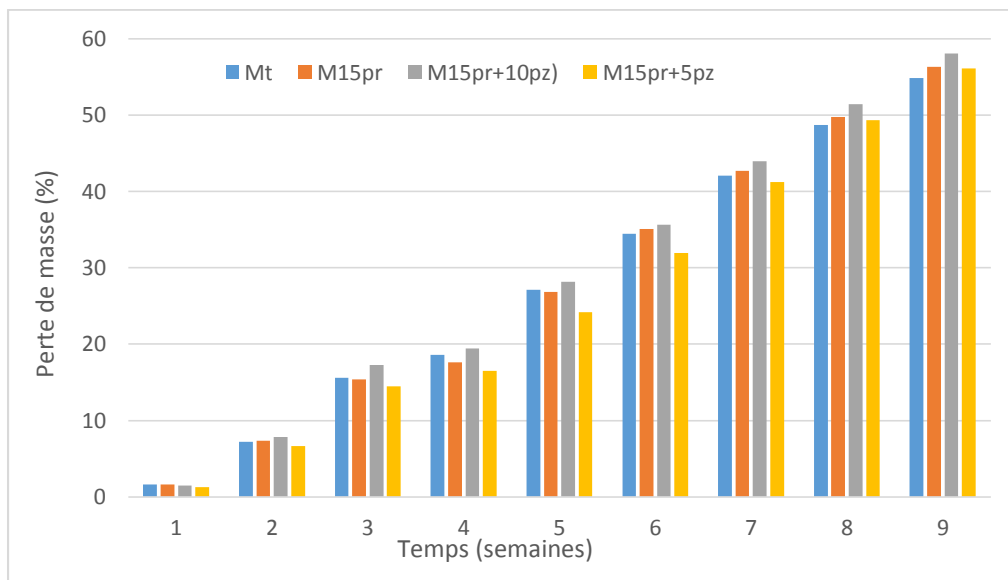
**Tableau V.4 :** Résultats des pertes de masses du mortier 15 % Perlite + 5% Pouzzolane en 2% $H_2SO_4$

Mortier 15% Perlite + 5% Pouzzolane				
	Masse 1(g)	Masse 2(g)	Moyenne(g)	Perte de masse (%)
<b>Mortier intact</b>	571,3	572,8	572,05	0,00
<b>Semaine 1</b>	563,7	566,2	564,95	1,24
<b>Semaine 2</b>	534,5	533,5	534	6,65
<b>Semaine 3</b>	486,7	492	489,35	14,46
<b>Semaine 4</b>	475,6	479,7	477,65	16,50
<b>Semaine 5</b>	433,5	433,7	433,6	24,20
<b>Semaine 6</b>	390,4	387,9	389,15	31,97
<b>Semaine 7</b>	337,6	334,4	336	41,26
<b>Semaine 8</b>	291,5	288,4	289,95	49,31
<b>Semaine 9</b>	251,9	250	250,95	56,13



**Figure V.10 :** Evolution de la perte de masse du mortier 15% Pr + 5% Pz conservé dans la solution en 2% $H_2SO_4$

La Figure V.10 représente l'évolution des pertes en masse du mortier 15% Perlite + 5% Pouzzolane. Après une immersion de 64 jours dans la solution d'attaque, le mortier développe un gain maximal dans la perte de masse est de 56,13 %. La petite quantité de pouzzolane permet une réaction pouzzolanique bénéfique, comblant partiellement la porosité induite par la perlite.



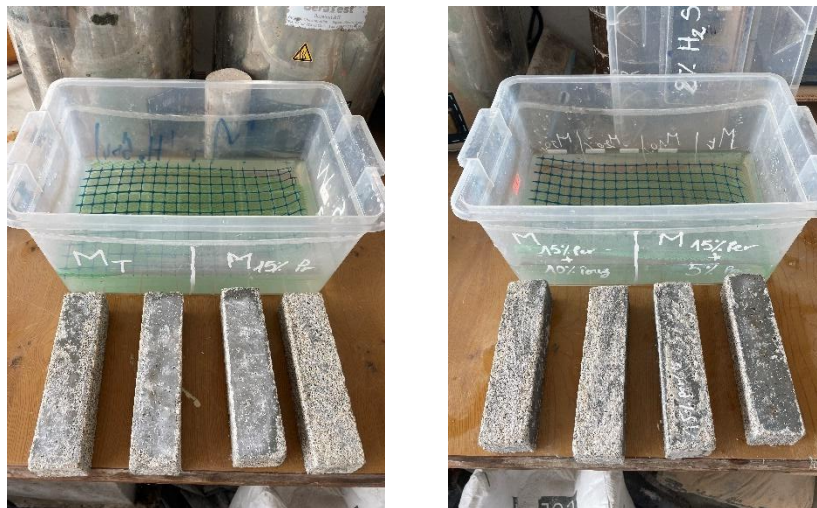
**Figure V.11 :** Évolution de la perte de masse (%) des mortiers en fonction du temps

L'histogramme de la Figure V.11 montre que la perte de masse augmente progressivement pour tous les échantillons au fil des semaines, reflétant une dégradation continue des matériaux. Le

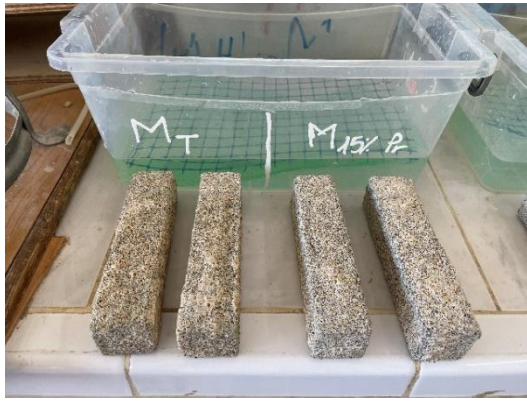
mortier contenant 15 % de perlite et 10 % de pouzzolane (M15pr+10pz) présente la plus forte perte de masse, indiquant une biodégradabilité accrue, tandis que le mortier témoin (Mt) est le plus résistant. Le mortier avec 15 % de perlite et 5 % de pouzzolane (M15pr+5pz) et celui contenant uniquement 15 % de perlite (M15pr) montrent une dégradation intermédiaire. Sur le plan chimique, ces différences s'expliquent par la nature des ajouts : la perlite, matériau siliceux léger et poreux, augmente la porosité du mortier, favorisant ainsi la pénétration de l'eau et des agents agressifs ; la pouzzolane, riche en silice et alumine réactives, participe à des réactions pouzzolaniques qui consomment la chaux libre pour former des produits cimentaires secondaires (CSH), mais sa granularité et sa réactivité accélèrent aussi la dissolution dans les milieux humides, surtout en forte teneur. Ainsi, une proportion élevée de pouzzolane combinée à la perlite accroît la porosité et la réactivité chimique globale du mortier, ce qui explique la perte de masse plus importante observée dans le cas du M15pr+10pz. Et de cela nous concluons que l'ajout de la pouzzolane a un effet négatif sur la résistance à l'attaque acide sulfurique

### V.3.2 Examen visuel

En plus de l'épluchage, les spécimens se sont transformés en masse pulpeuse blanche (Figure V.12). Ces transformations sont causées par les réactions expansibles dans les différentes pâtes. La couleur blanchâtre des mortiers immergés dans la solution d'acide sulfurique est vraisemblablement celle des couches de gypse déposées à la surface.



**Figure. V.12 :** Aspect visuel des échantillons après 7 jours de conservation dans la solution en  $2\%H_2SO_4$



**Figure. V.13 :** Aspect visuel des échantillons après 30 jours de conservation dans la solution en 2% $H_2SO_4$ .



**Fig. V.14 :** Aspect visuel des échantillons après 45 jours de conservation dans la solution en 2% $H_2SO_4$ .



**Fig. V.15 :** Aspect visuel des échantillons après 57 jours de conservation dans la solution en 2% $H_2SO_4$ .



**Fig. V.16 :** Aspect visuel des échantillons après 64 jours de conservation dans la solution en  $2\%H_2SO_4$ .

En effet, les sulfates réagissent avec les phases hydratées du ciment (CH et C-S-H), générant du gypse ( $Ca_2SO_4$ ), lequel interagit ensuite avec les  $C_3A$  résiduels pour produire de l'ettringite et du monosulfoaluminate. Ces réactions entraînent une expansion marquée ainsi qu'un éclatement progressif, contribuant ainsi à une augmentation notable de la perte de masse. [60]

Après nettoyage et élimination des couches altérées par brossage, l'observation visuelle des échantillons tout au long de la période d'immersion confirme la dégradation progressive, notamment à long terme (Figure V.16)

#### **V.4 RESULTATS CARBONATATION**

La mesure de la profondeur de carbonatation a été réalisée après une année de conservation dans une température ambiante au laboratoire. Les zones carbonatées ont été révélées à l'aide de la phénolphthaléine. Les photographies des sections des éprouvettes illustrant ces zones qui sont présentées par la figure V.17.



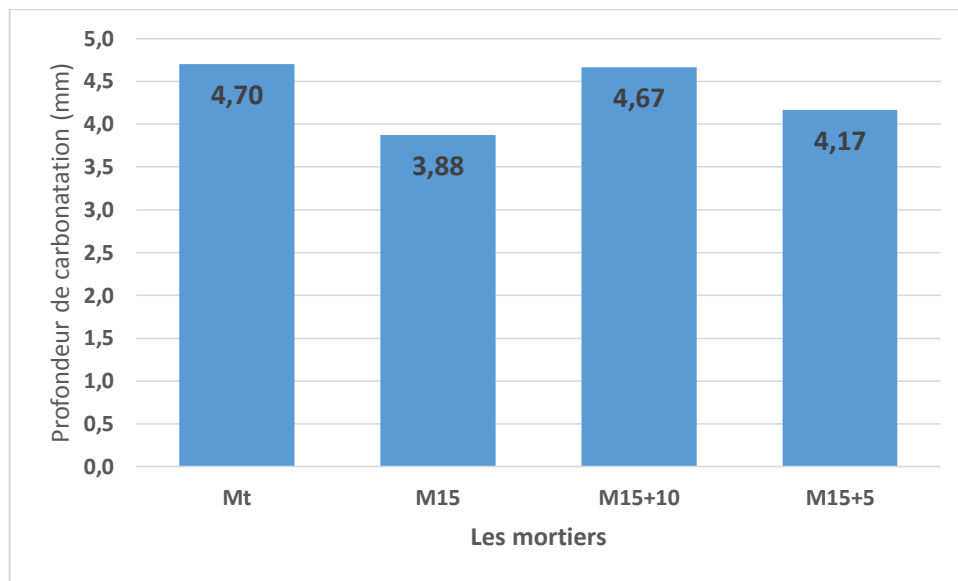
**Figure V.17 :** Profondeur de carbonatation après pulvérisation de la phénolphtaléine sur des Eprouvettes de mortiers conservées 12 mois dans une température ambiante au laboratoire

**Tableau V.5 :** Résultats de profondeur de carbonatation en (mm) pour chaque type de mortier

	Mt	M15	M15+10	M15+5
Face (1)	7.5	4.4	5.5	3.5
Face (1)	5	4	7.5	4
Face (1)	4	4.5	6.5	4
Face (2)	3	3	5.5	5
Face (2)	3	4	5.5	4.5
Face (2)	4	4	5.5	4.5
Face (3)	7	5	3.5	4
Face (3)	6	3	5	3.5
Face (3)	5	4	4	4
Face (4)	5	4	5.5	4.5
Face (4)	5	4.5	5	4
Face (4)	5.5	4.5	4.5	4.5
<b>Moyenne</b>	4,70	3,88	4,67	4,17

La comparaison du mortier de référence (sans ajout) et celle des mortiers contenant respectivement 15%Pr, 15%Pr+10%Pz et 15%Pr+5%Pz s'effectue sur les valeurs moyennes de profondeur carbonatée. Cette profondeur de carbonatation est calculée à partir de douze points

de mesure répartis sur les quatre faces de l'échantillon, portées sur un graphique (figure V.18) illustrent l'évolution des profondeurs carbonatées des mortiers de référence (sans ajout) et celle des mortiers contenant de la pouzzolane et la perlite



**Figure V.18 :** Profondeur de carbonatation (projection de phénolphthaléine) pour chaque type de mortier

L'évolution de carbonatation naturelle présentée sur cette figure, indique la profondeur de carbonatation significatives pour tous les mortiers étudiés après 1 an d'exposition à l'aire libre. Le mortier témoin présente une profondeur de carbonatation moyenne la plus élevée (4,70 mm). Cela est peut être dû à la connectivité du réseau poreux du mortier témoin.

Le dioxyde de carbone pénètre facilement, ce qui accélère la carbonatation. Et pour le mortier 15%Pr montre la plus faible profondeur de carbonatation (3,88 mm). Bien que la perlite augmente la porosité globale, sa structure alvéolaire complexe semble ralentir la diffusion du CO<sub>2</sub>, agissant comme une barrière partielle. Cela suggère un effet protecteur inattendu sur la carbonatation. Et avec une profondeur moyenne de (4,67 mm), le mortier 15%Pr + 10%Pz est presque au même niveau que le témoin.

La pouzzolane réagit avec la chaux libre, ce qui réduit la teneur en portlandite disponible pour réagir avec le CO<sub>2</sub>. Cependant, l'effet est limité ici, probablement à cause d'un excès de perlite, qui maintient une porosité élevée favorable à la carbonatation. Et le mélange de 15%Pr + 5%Pz affiche une profondeur de (4,17 mm), intermédiaire entre M15%Pr et le témoin.

Dans les mortiers pouzzolaniques, la quantité de Ca(OH)<sub>2</sub> sera diminué d'une part par la quantité faible du ciment Portland et d'autre part par la réaction pouzzolanique. Donc, l'introduction de l'ajout perlite conduit à obtenir un mortier à faible teneur en Portlandite Ca(OH)<sub>2</sub>. Il résulte qu'une plus petite quantité de CO<sub>2</sub> est nécessaire pour réagir avec le calcium pour consommer toute la Portlandite, de sorte que le pH chute plus facilement. Ce qui est très souvent le cas pour les fines pouzzolaniques [53].

## V.5 CONCLUSION

Les résultats expérimentaux démontrent que les mortiers enrichis en perlite et en pouzzolane offrent une meilleure résistance face à la carbonatation naturelle mais plus mauvaise envers les attaques acides. L'ajout de ces matériaux permet de limiter la pénétration du dioxyde de carbone, ce qui est essentiel pour garantir la durabilité des ouvrages en béton dans des environnements agressifs. La formulation la plus performante s'est avérée être celle contenant 15 % de perlite, en raison de sa stabilité chimique et de sa capacité à limiter la perméabilité

# **CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES**

## CONCLUSION GÉNÉRALE

L'objectif principal de ce mémoire était d'étudier l'influence de l'incorporation de perlite et de pouzzolane sur la durabilité des mortiers, notamment face aux attaques acides (acide sulfurique) et au phénomène de carbonatation. Dans un contexte où l'amélioration de la longévité des matériaux de construction est primordiale, cette étude visait à évaluer le potentiel de ces ajouts minéraux, disponibles localement, pour renforcer la matrice cimentaire.

Pour atteindre cet objectif, une campagne expérimentale a été menée sur différentes formulations de mortiers : un mortier témoin sans ajouts et des mortiers élaborés en fonction de différentes combinaisons de perlite et de pouzzolane (15% Pr, 15%Pr+5%.Pz et 15%Pr+10%.Pz en volume du ciment). Les performances de ces mortiers ont été évaluées à travers des essais de perte de masse envers l'attaque acide sulfurique et mesure de la profondeur de carbonatation naturelle.

Les résultats obtenus ont révélé que :

- Face à l'acide sulfurique, de manière surprenante, le mortier témoin sans ajouts minéraux a présenté la meilleure résistance, avec une perte de masse moindre que celle des formulations contenant de la perlite, de la pouzzolane, ou leur combinaison. Cette observation indique que les ajouts, bien qu'efficaces dans d'autres contextes de durabilité, peuvent ne pas convenir dans certains environnements acides particuliers où leur structure poreuse ou leur réaction chimique engendrent une dégradation accrue.
- Concernant la carbonatation, en revanche, l'ajout de perlite, notamment à 15 %, a permis de réduire significativement la profondeur de carbonatation, en densifiant la matrice cimentaire et en limitant la diffusion du CO<sub>2</sub>. Le mortier M15%Pr a montré la profondeur la plus faible (3,88 mm), confirmant son efficacité sur cet aspect.

Ainsi, aucune formulation n'offre une supériorité absolue dans tous les environnements agressifs. Le mortier témoin reste plus performant en milieu acide sulfurique, tandis que les ajouts minéraux, en particulier la perlite, apportent un bénéfice en matière de protection contre la carbonatation.

Ces résultats soulignent la nécessité d'un choix raisonné des ajouts en fonction du type d'agression chimique visée. La valorisation de ressources locales comme la perlite et la pouzzolane reste une piste prometteuse pour améliorer la durabilité des matériaux cimentaires, à condition d'en maîtriser les dosages et les conditions d'utilisation.

Néanmoins, il convient de noter que cette étude présente certaines limites, telles que le nombre limité de pourcentages testés, la durée d'exposition aux attaques et l'absence d'étude de certains paramètres microstructuraux.

Enfin, des études complémentaires sont recommandées pour approfondir les mécanismes de dégradation observés et évaluer le comportement de ces formulations dans des environnements combinés ou à long terme, en intégrant également les propriétés mécaniques et économiques.

## PERSPECTIVES

Les conclusions issues de ce travail ouvrent la voie à plusieurs perspectives de recherche et de développement intéressantes :

- Il serait pertinent de suivre l'évolution des mortiers sur une période plus longue pour observer l'effet du vieillissement sur la durabilité, notamment en milieu acide et carbonaté.
- Tester les formulations dans d'autres environnements chimiques comme l'acide chlorhydrique, l'eau de mer, ou les milieux riches en sulfates permettrait d'élargir l'évaluation des performances.
- Étudier le comportement des mortiers sous l'effet combiné de plusieurs agents de dégradation (acide + cycles de gel/dégel, carbonatation + chlorures, etc.) refléterait mieux les conditions réelles.
- Rechercher un dosage optimal plus précis des ajouts (notamment pour la perlite et la pouzzolane) pour éviter une dégradation accélérée en milieu acide, tout en maximisant la résistance à la carbonatation.
- L'analyse des résistances mécaniques (compression, traction) et de la microstructure (porosité, densité, SEM, DRX) permettrait de mieux comprendre les mécanismes de dégradation ou de protection.
- Explorer d'autres matériaux naturels ou industriels disponibles en Algérie (argiles calcinées, laitiers, cendres volantes...) comme ajouts minéraux alternatifs ou complémentaires.
- Étendre l'étude aux bétons (et non seulement aux mortiers), puis à des éléments structuraux (poutres, dalles, enrobages), pour valider l'efficacité à l'échelle du chantier.

En conclusion, les travaux présentés dans ce mémoire constituent une contribution à la compréhension et à l'amélioration de la durabilité des mortiers par l'utilisation d'ajouts minéraux. Les pistes de recherche proposées pourraient permettre de consolider ces résultats et d'ouvrir la voie à des applications concrètes dans le domaine du génie civil.

# **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **SLAMANI Abdelkader MERSALI Chaouki** « durabilité des mortiers à base de perlite (10%, 15%, 20%, 25%) aux attaques acides (hcl, h2so4) » thèse de master, université Abdelhamid ibn badis Mostaganem 2023
- [2] **ZHU W., GIBBS J.C.**, « Use of deferent limestone and chalk powders in self compacting concrete ». Cement and Concrete Research, Vol. 35, N\_8 :1457-1462, 2005.
- [3] **LAUER K. R.**, « Classification of concrete damage caused by chemical attack ». Materials and Structures 23 pp 223-229 (1990).
- [4] **DOMONE P.L.**, « Self-compacting concrete : an analysis of 11 years of case studies ». Cement and Concrete Composites, 28, 197-208, 2006.
- [5] **KAMALI S., GÉRARD B., MORANVILLE M.**, « Modelling the leaching kinetics of cement-based materials – influence of materials and environment », Cement and Concrete Composites 25, 451-458, 2003.
- [6] **CARDE C., FRANÇOIS R.**, « Effect of ITZ leaching on durability of cement-based materials ». Cement and Concrete Research 27, 971-978, 1997.
- [7] **SONEBI M., BAHADORI-JAHROMI, A., BARTOS, P.J.M.**, « Development and optimization of medium strength self-compacting concrete by using pulverized fly ash ». 3rd International Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Iceland, 514-524, 2003.
- [8] **PARK C.K., NOH M.H., PARK T.H.**, « Rheological properties of cementitious materials containing mineral admixtures ». Cement and Concrete Research, 35, 842-849, 2005.
- [9] **SHADLE, R., AND SOMERVILLE, S.**, « The Benefits of Utilizing Fly Ash in Producing Self Compacting Concrete ». First North American Conference on the Design and Use of Self Consolidating Concrete, Chicago, 2002 IL : ACBM, 235-241.
- [10] **BELARIBI O.**, « Durabilité des bétons autoplaçants à base de VASE ET DE pouzzolane » these doctorat, l'université Cergy-pontoise et de l'université de Mostaganem, 2015
- [11] **GCI – 714.**, « Cours : Durabilité et Réparations du Béton ». Université de Sherbrooke, CANADA, Juillet 2009.
- [12] **MEHTA P.K.**, « Sulfate Attack on Concrete - A Critical Review ». Materials Science of Concrete III, The American Ceramic Society, 1993 pp. 105-130.
- [13] **FERRARIS C.F., CLIFTON J.R., STUTZMAN P.E., GARBOCZI E.J.**, « Mechanisms of degradation of Portland cement-based systems by sulfate attack », in : K.L. Scrivener, J.F. Young (Eds.) ». Mechanisms of Chemical Degradation of Cement-Based Systems, E & FN Spon, London, pp. 185– 192. 1997.
- [14] **BROWN P.W.**, « An evaluation of sulfate resistance of cements in a controlled

Environment ». Cement and Concrete Research. (11) : 719– 727. 1981.

[15] **GOLOP R.S., TAYLOR H.F.W.**, « Microstructural and micro analytical studies of sulfate attack, III. Sulfate resisting Portland cement : reaction with sodium and magnesium sulfate solutions ». Cement and Concrete Research, vol.25, 8, 1995, p.1581-1590.

[16] **SANTHANAM M., COHEN M.D., OLEK J.**, « Mechanism of sulfate attack : A fresh look : Part 1'. Summary of experimental results ». Cement and Concrete Research. 32 (6) 915–921.2002.

[17] **TAGNIT-HAMOU A., PETROV N.**, « Durability of Concrete in à Very Aggressive Environment ». Proceedings of the Twenty-Second International Conference on Cement Microscopy, Montréal, Québec, Canada, 29 Avril au 4 Mai, pp 420-430, 2000.

[18] **RAMLOCHAN T., ZACARIAS P., THOMAS M.D.A., HOOTON R.D.**, « The effect of pozzolans and slag on the expansion of mortars cured at elevated temperature ». Cement and Concrete Research, Vol. 33, pp. 807–814, 2003.

[19] **TUUTTI K.**, « Corrosion of steel in concrete ». Swedish Cement and Concrete Research Institute, Ed. Stockholm, pp. 469, 1982.

[20] **THANH S. N.**, « Influence de la nature du liant et de la température sur le transport des chlorures dans les matériaux cimentaires ». Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées (INSA) Toulouse, 2006.

[21] **MEHTA, P. K.**, « Concrete : structure, properties and materials ». Prentice hall, 1986 Ed., p.105-169.

[22] **ADENOT F., BUIL M.**, « Modeling of the corrosion of the cement paste by deionized water », Cement and Concrete Research 22, 259-272, 1992.

[23] **KAMALI S.**, « Modélisation de la lixiviation de matériaux cimentaires, application à différents ciments dans différents environnements », Thèse de doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2003.

[24] **NGUYEN V.H., NEDJAR B., COLINA H., TORRENTI J.M.**, « A separation of scales analysis for the modelling of calcium leaching in concrete », Computer methods in applied mechanics and engineering, 195, 7196-7210, 2006.

[25] **CARDE C., FRANÇOIS R.**, « Effect of ITZ leaching on durability of cement-based materials », Cement and Concrete Research 27, 971-978, 1997.

[26] **ROZIERE E.**, « Etude de la durabilité des bétons par une approche performantielle », Thèse de doctorat, l'Ecole Centrale de Nantes, 2007.

[27] **LAMBERT G.** « Les gaz à effet de serre ». La Recherche, 1992 ; 23(243) : 550-556.

[28] **COWIE J, GLASSER FP.** « The reaction between cement and natural waters containing dissolved carbon dioxide ». Advances in Cement Research, 1992 ; 4(15) : 119-134.

- [29] **CHAUSSADENT T.** « Etat des lieux et réflexions sur la carbonatation du béton armé ». Rapport du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (Paris), Thème de recherche OA9, 1997 :64.
- [30] **PAPADAKIS V.G., VAYENAS C.G., FARDIS M.N.,** « Physical and chemical characteristics affecting the durability of concrete ». ACI materials journal, vol. 88, n° 2, p. 186-196, 1991.
- [31] **PAPADAKIS V.G., VAYENAS C.G., FARDIS M.N.,** Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation », ACI Materials Journal, V. 88, No. 4, July-August 1991.
- [32] **THIERY M., DANGLA P., VILLAIN G., PLATRET G.,** « MASSIEU E., DRUON M., BAROGHEL-BOUNY V., « Modélisation de la carbonatation atmosphérique des matériaux cimentaires », Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 252-253, septembre-octobre-novembre-décembre, pp. 153-187, 2004.
- [33] **THIERY M.,** « Modélisation de la carbonatation atmosphérique des matériaux cimentaires, Prise en compte des effets cinétiques et des modifications microstructurales et hydriques », Etudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées' LPC, OA 52, 2006.
- [34] **VAN BALEN K., VAN GEMERT D.,** « Modeling lime mortar carbonation », Materials and Structures, n° 27, pp 393-398, 1994.
- [35] **SAETTA A.V., SCHREFLER B.A., VITALIANI R.V.,** «2-D Model for carbonation and moisture/heat flow in porous materials », Cement and Concrete Research, vol. 25, n° 8, pp 1703- 1712, 1995.
- [36] **ROY S.K., POH K.B., NORTHWOOD D.O.,** « Durabilité of concrete, accelerated carbonation and weathering studies » Building and Environment, 34, pp 597-606, 1999.
- [37] **BAROGHEL-BOUNY V.,** « Caractérisation des pâtes de ciment et des bétons - Méthodes, Analyse, Interprétations', (LCPC, Paris, France) décembre, 468 p, 1994.
- [38] **CHAUSSADENT T.,** « Analyse des mécanismes de carbonatation du béton » Compte-rendu des journées techniques AFPC-AFREM Durabilité des bétons'. Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité', pp 75-87, 1997.
- [39] **BARON J., GAGNE R., OLLIVIER J.P.,** « Chapitre 11 – Viser la durabilité ». Dans ATILH, sous la direction de J. Baron et J.-P. Ollivier, Les Bétons, Bases et données pour leur formulation, Ed. Eyrolles, Chapitre 11, pp. 307-363, 1996.
- [40] **COQUILLAT G.,** « Rapport du CEBTP, Recherche collective Bétons avec additions ». Béton B 25 – Type « Bâtiment », Rapport Fina, 1996.
- [41] **PAPADAKIS V. G.,** « Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress ». Cement and Concrete Research 30, 291-299, 2000.

- [42] **BURDEN D.**, « The durability of concrete containing high levels of fly ash ». Thèse de doctorat, université de New Brunswick, dans PCA R&D Serial No. 2989, Portland Cement Association, 2006.
- [43] **KHOKHAR M.I.A, ROZIÈRE E., GRONDIN F., LOUKILI A.**, « Effect of mineral additives on some of durability parameters of concrete ». International Conference on Advances in Cement Based Materials and applications to civil infrastructure, (ACBM-ACI), December 12-14, Lahore, Pakistan. Proposé, 2007.
- [44] **KOSTUCH J.A., WALTERS G.V., JONES T.R.**, « High performance concrete incorporating metakaolin : à review Concrete 2000 ». University of Dundee, p. 1799-1811, 1993.
- [45] **ROY D.M., ARJUNAN P., SILSBEE, M.R.**, « Effect of silica fume, metakaolin, and low calcium fly ash on chemical resistance of concrete ». Cement and Concrete Research, 2001, Vol.31, 12, p1809-1813.
- [46] **RAHMANI H., RAMZANIANPOUR A.A.**, « Effect of silica fume and natural pozzolanas on sulfuric acid resistance of dense concretes ». Asian journal of civil engineering (building and housing) VOL. 9, NO. 3, 2008, pp 303-319.
- [47] **GHRICI M., KENAI S., SAID-MANSOUR M.**, « Mechanical properties and durability of mortar and concrete containing natural pozzolana and limestone blended cements », Cement & Concrete Composites 29 (2007) 542–549.
- [48] **TAMIMI A. K.**, « High-performance concrete mix for an optimum protection in acidic conditions ». Materials and Structures/Matériaux et Constructions, Vol. 30, pp 188-191, 1997.
- [49] **RACKEL S.N.**, « Approche performancielle des bétons avec métakaolins obtenus par calcination flash ». Thèse de doctorat, Université de Toulouse Paul Sabatier, mai 2001.
- [50] **BENKADDOUR M, KAZI AOUAL F, SEMCHA A** « Durabilité des mortiers à base de pouzzolane naturelle et de pouzzolane artificielle » LABMAT, Département Génie Civil, École Normale Supérieure d'Enseignement Technique (ENSET Oran), Oran, Algérie.
- [51] **LAOUFI, L., SENHADJI, Y et AI** (2016). « Evaluation de la durabilité de mortiers pouzzolaniques exposés à une attaque chimique ». Journal of Materials and Environmental Science, 7(5), 1835-1845.
- [52] **CHHAOUI, R.** (2018). « Durabilité des matériaux cimentaires : Résistance aux attaques acides ». Thèse de doctorat, Université d'architecture et génie civil Oran, Algérie.
- [53] **KAID, N., AYED, K et AI** (2010). « Étude de la durabilité des mortiers pouzzolaniques face aux milieux agressifs ». Symposium International sur la Construction en Zone Sismique (SICZS\_2010), Université Hassiba Benbouali de Chlef, Algérie.
- [54] **GUENANOU, F.** (2019). « Durabilité des mortiers contenant la perlite vis-à-vis de la corrosion des armatures » [Mémoire de Master, Université des Sciences et de la Technologie

d'Oran Mohamed-Boudiaf (USTO-MB)]. Faculté d'Architecture et Génie Civil, Département Génie Civil.

**[55] BELKHERASSANE, F. Y., & ALLILECHE, H. (2024).** « *Comportement mécanique des mortiers à base des ajouts minéraux* » Mémoire de fin d'études de Master, Université de Mostaganem. Département de Génie Civil.

**[56] GUENANOU F.,** « Durabilité des mortiers contenant la perlite vis-à-vis de la corrosion des armatures », Thèse de Doctorat en Sciences, 2018.

**[57] CHIHAOUI.R.** « Etude de durabilité des matériaux cimentaire exposés aux attaque », USTOMB, 2018.

**[58] BELARIBLO., SAFER.O., BELAS. N., BELGUESMIA K. HADJ SADOK R.** « Influence de la perlite sur le comportement mécanique, l'absorption capillaire et la conductivité thermique des mortiers » The Journal of Engineering and Exact Sciences – jCEC, Vol. 10 N. 03 (2024)

**[59] BOUZIDI C. BOUTADJINE Z** « Etude du comportement physico-mécanique des mortiers à base de 10 et 20% de perlite naturelle de Maghnia » mémoire de fin d'études de master académique, 2022.

**[60] RAMDANE CHIHAOUI** « étude de la durabilité des matériaux cimentaire exposé aux attaques chimiques» thèse doctorat en science, 2018