

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

Popular Democratic Republic of Algeria
Ministry of Higher Education and Scientific Research

جامعة عبد الحميد ابن باديس مستغانم

Abdelhamid Ibn Badis University of Mostaganem

كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculty of Sciences and Technology

قسم الهندسة المدنية

Department of Civil Engineering

N° d'ordre: M 2...../GC/2023

Mémoire de Master académique

Filière : Génie Civil

Spécialité : Structure

**DURABILITE DES MORTIERS A BASE DE PERLITE (10%, 15%,
20%, 25%) AUX ATTAQUES ACIDES (HCl, H₂SO₄)**

Présenté par :

- SLAMANI Abdelkader
- MERSALI Chaouki

Devant le jury composé de :

BELHOUARI Fethi	Président
BELARIBI Omar	Examineur
BELAS Nadia	Encadrante

Année Universitaire : 2022 / 2023



REMERCEMENTS

Nous tenons tout d'abord à remercier **LE GRAND DIEU** qui nous a aidé à arriver là et donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail

En second lieu, nous tenons à remercier notre encadrante **Pre BELAS Nadia**, pour ses précieux conseils et son aide durant toute la période du travail

Nous remercions aussi **Mr. BELARIBI Omar**, qui nous a vraiment encouragé et épaulé durant toute notre expérience.

Nos remerciements vont également aux techniciens des laboratoires qui nous ont soutenus avec du matériel et nous ont donné tout ce dont on avait besoin.

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont contribué à notre formation au sein du Département de Génie Civil et qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

ELHAMDOULILAH

DEDICACE

Je dédie ce mémoire à mes chers parents qui ont été et sont toujours à mes côtés et m'ont soutenu tout au long de ces longues années d'étude.

A mon frère **OMRANE**

Mes deux petites sœurs

Et tous mes amis **MOHAMED, ABDOU, HAMIDOU, DAYOU**

Et mon binôme **CHAOUKI**

Et à toute personne présente dans mon parcours

Abdelkader

DEDICACE

Je dédie ce mémoire à ma chère mère qui a été et est toujours à mes côtés et m'a soutenu tout au long de ces longues années d'étude.

A mes frère **DJILALI ET MOHAMED**

Et tous mes amis

Et mon binôme **KADER**

Et à toute personne qui était là dans mon parcours

Chaouki

Table des matières

RESUME	1
ABSTRACT.....	1
ملخص	1
INTRODUCTION GENERALE	1
PARTIE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE.....	1
CHAPITRE I : NOTION DE DURABILITE.....	1
I.1. INTRODUCTION	1
I.2. DEFINITION DE LA DURABILITE	1
I.3. PHENOMENES INFLUENTS SUR LA DURABILITE.....	1
I.3.1. Mécanismes de corrosion des armatures en acier dans le béton	1
I.3.1.1. Carbonatation	2
I.3.1.2. Action des chlorures	3
I.3.1.3. Effets de la corrosion	3
I.3.2. Action des eaux agressives.....	4
I.3.2.1. Lixiviation	4
I.3.2.2. Actions des sulfates.....	5
I.3.2.3. Actions de l'eau de mer	6
I.4. CONCLUSION	7
CHAPITRE II : ATTAQUES DES ACIDES.....	8
II.1. INTRODUCTION	8
II.2. SOURCES DES ACIDES.....	8
II.3. LES DIFFERENTS TYPES D'ACIDES	8
II.3.1. Les pluies acides (cas extrême des eaux douces)	8
II.3.2. Les acides minéraux	9
II.4. MECANISME D'ATTAQUE	9
II.5. INFLUENCE DES AJOUTS POUZZOLANIQUES SUR LA RESISTANCE DES MORTIERS AUX ATTAQUES ACIDES	10
II.5.1. Ajouts pouzzolaniques	10
1. Pouzzolane naturelle	10
2. Pouzzolane artificielle	10
II.5.1.1 Caractéristiques des pouzzolanes	11
Compositions chimiques	11
Composition minéralogique.....	11

L'activité pouzzolanique.....	11
II.5.1.2 La pouzzolane naturelle de Béni-Saf	12
II.5.2. Résistance aux attaques acides.....	13
CONCLUSION	14
CHAPITRE III : LA PERLITE NATURELLE.....	15
III.1. INTRODUCTION	15
III.2. HISTORIQUE	15
III.3. DEFINITION DE LA PERLITE	15
III.4. LES VARIATIONS DES TEXTURES DE LA PERLITE.....	16
III.5. LES DIFFERENTES UTILISATIONS DE LA PERLITE.....	17
III.6. LES TECHNIQUES D'EXTRACTION, DE BROYAGE ET DE CRIBLAGE	17
III.7. CARACTERISTIQUES PHYSIQUES, CHIMIQUES ET MINERALOGIQUES DE LA PERLITE.....	17
III.8. RESERVES DE PERLITE EN ALGERIE.....	20
III.9. LOCALISATION DU GISEMENT DE LA PERLITE DE HAMMAM BOUGHRARA	22
III.10. LES ETAPES DE PREPARATION DE LA PERLITE EN POWDRE.....	22
III.11. CONCLUSION.....	24
PARTIE II : MATERIAUX ET METHODES EXPERIMENTALES.....	
CHAPITRE I : MATERIAUX UTILISES.....	26
I.1. INTRODUCTION	26
I.2. CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX UTILISES	26
I.2.1. Le ciment.....	26
I.2.1.1. Caractéristiques chimiques et minéralogiques.....	26
I.2.1.2. Caractéristiques physico-mécaniques.....	27
I.2.2. Perlite naturelle.....	28
I.2.2.1. Caractéristiques chimiques	28
I.2.2.2. Caractéristiques physiques	28
I.2.3. Le sable.....	29
I.2.3.1. Caractéristiques chimiques du sable.....	29
I.2.3.2. Caractéristiques physiques du sable	30
I.2.3.3. Composition granulométrique.....	30
I.2.4. Adjuvant.....	31

I.5. CONCLUSION	32
CHAPITRE II : LES METHODES EXPERIMENTALES SUR LES MORTIERS A BASE DE LA PERLITE.....	32
II.1. INTRODUCTION	33
II.2. FORMULATIONS DES MORTIERS.....	33
II.3. ESSAIS DES ATTAQUES ACIDES.....	33
II.4. CONCLUSION	40
PARTIE III : RESULTATS ET ANALYSES.....	
CHAPITRE I : BILAN DES RESULTATS DES ESSAIS DEJA EFFECTUES.....	37
I.1. INTRODUCTION	42
I.2. RESULTATS DES ESSAIS SUR PATES NORMALISEES	42
I.2.1. Essais de consistances.....	42
I.2.2. Essais de prise	42
I.3. RESULTATS DES ESSAIS SUR MORTIERS FRAIS	43
I.3.1. Essai de maniabilité.....	43
I.4. RESULTATS DES ESSAIS SUR MORTIER DURCI.....	45
I.4.1. Absorption capillaire	45
I.4.2. Résistances mécaniques des mortiers	45
I.5. CONCLUSION	46
CHAPITRE II : RESULTATS DES ESSAIS D'ATTAQUES ACIDES.....	42
II.1. INTRODUCTION	47
II.2 PERTE DE MASSE.....	47
Perte de masse des éprouvettes conservées en HCl.....	47
Perte de masse des éprouvettes conservées en H ₂ SO ₄	52
II.3 INTERPRETATION DES RESULTATS	57
Examen visuelle.....	59
Acide chlorhydrique	59
Acide sulfurique	60
II.4 CONCLUSION	60
CONCLUSION GENERALE	61

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : corrosion de l'armature de béton armé	2
Figure 2 : différents types de corrosion.....	4
Figure 3 : représentation schématique des différents processus d'attaque du béton par l'eau de mer.....	5
Figure 4 : aménagement du port de Monaco (béton en milieu agressif).....	7
Figure 5 : Diagramme de Keil (Zone des pouzzolanes dans le système CaO – SiO ₂ – Al ₂ O ₃)	12
Figure 6 : Exemple typique d'une roche de perlite [Samar et al. 2016]	16
Figure 7 : Différents degrés de perlitisation. [FERK, 2012].....	18
Figure 8 : le diffractogramme aux rayons X de la perlite naturelle % [CHIHAOUI .R.2017]	19
Figure 9 : Scories de la perlite de Hammam BOGHRARA avant broyage. [HAMDACHE. 2017].....	21
Figure 10 : Localisation du gisement de Hammam BOUGHRARA (TLEMCEN) [HAMADACHE, 2018]	22
Figure 11 Coupe verticale géologique du gisement de Hammam BOUGHRARA [HAMADACHE, 2018].	22
Figure 12 Aspect de la perlite sous forme de roche [OULD MOUSSA. M. T].....	23
Figure 13 : Concassage et broyage [OULD MOUSSA.M.T]	23
Figure 14 : la poudre de perlite après le broyage et tamisage	23
Figure 15 (a) Roche de la perlite naturelle avant broyage, (b) Poudre de la perlite naturelle après broyage (5).	28
Figure 16 . Le diffractogramme aux rayons X de la perlite naturelle (5).....	29
Figure 17 Le sable siliceux de la société Adwan	29
Figure 18 Courbe granulométrique du sable.	31
Figure 19 éprouvettes à l'état zéro.....	34
Figure 20 Concentration d'acide.....	35
Figure 21 bac des mortiers témoin	35
Figure 22 position de tous les éprouvettes dans leurs bacs	36
Figure 23 filet qu'on mets en bas des éprouvettes	36
Figure 24 prise de poids des éprouvettes avant les mettre dans les solutions	38
Figure 25 prise de poids des mortiers après nettoyage	38
Figure 26 éprouvettes laissé 30 min avant de les peser (HCL)	39
Figure 27 éprouvettes laissé 30 min avant de les peser (H ₂ SO ₄)	39
Figure 28 perte de poids des éprouvettes conservés en HCL.....	39
Figure 29 perte de poids des mortiers perlite dans l'H ₂ SO ₄	40
Figure 30 : Temps de prise des pâtes à base de perlite	43
Figure 31 . Temps d'écoulement en fonction du dosage en Perlite des mortiers.....	44
Figure 32 Evolution des coefficients d'absorption capillaire des différents mortiers.....	45
Figure 33 . Evolution des résistances à la compression en fonction du temps.....	46

Figure 34: perte de masse du mortier témoin conservé en (HCl).....	48
Figure 35 perte de masse du mortier Pr 10% conservé en (HCl).....	49
Figure 36 : perte de masse du mortier Pr 15% conservé en (HCl).....	50
Figure 37 perte de masse du mortier Pr 20% conservé en (HCl).....	51
Figure 38 perte de masse du mortier Pr 25% conservé en (HCl).....	52
Figure 39: perte de masse du mortier témoin conservé en (H ₂ SO ₄).....	53
Figure 40 : perte de masse du mortier Pr 10 % en (H ₂ SO ₄).....	54
Figure 41 perte de masse du mortier Pr 15 % en (H ₂ SO ₄).....	55
Figure 42 perte de masse du mortier Pr 20% en (H ₂ SO ₄).....	56
Figure 43 : perte de masse du mortier Pr 25% en (H ₂ SO ₄).....	57
Figure 44 évolution de la perte de masse des mortiers à base de perlite en fonction de la periode d'immersion dans la solution d'HCl.....	57
Figure 45 : évolution de la perte de masse des mortiers à base de perlite en fonction de la periode d'immersion dans la solution d'H ₂ SO ₄	58
Figure 46: perte de masse et changement de forme et de couleur du mortier (HCl).....	59
Figure 47 fragilité du mortier témoin après 9 semaine dans la solution.....	59
Figure 48 apparition de la couche blanche dès la première semaine.....	60

LISTES DES TABLEAUX

Tableau 1: Domaine élargi des compositions des pouzzolanes naturelles.....	11
Tableau 2. Les variations des textures de la perlite	16
Tableau 3. Les domaines utilisations de la perlite	17
Tableau 4 : Les caractéristiques physiques de la perlite	18
Tableau 5 : Les caractéristiques thermo physique	18
Tableau 6 : La composition chimique typique de la perlite brute [MERAL Ç. 2004]	18
Tableau 7: compositions chimiques d'une sélection de perlites typiques commercialisées. 20	
Tableau 8 : Composition chimique élémentaire de la perlite de Hammam Boughrara [HAMDACHE. 2017]	21
Tableau 9: les principaux gisements de la perlite de Maghnia [LSUNMA 1999].....	21
Tableau 10. Composition chimique élémentaire de ciment (CRS) (%) (GICA).	27
Tableau 11 Composition minéralogique du clinker.	27
Tableau 12. Les caractéristiques physico-mécaniques du ciment.....	27
Tableau 13. Caractéristiques physiques du ciment CRS.....	27
Tableau 14 Composition chimique élémentaire de la perlite naturelle.	28
Tableau 15. Caractéristiques physiques de la perlite naturelle (5).....	28
Tableau 16 Composition chimique du sable (Adwan).	29
Tableau 17. Les caractéristiques physiques du sable siliceux.....	30
Tableau 18 La granulométrie du sable utilisé.	30
Tableau 19 Caractéristiques physiques et chimique de l'adjuvant.	31
Tableau 20. Formulations des mortiers.....	33
Tableau 21. Formulation des pâtes.....	42
Tableau 22 perte de masse du mortier témoin conservé en (HCl)	48
Tableau 23: perte de masse du mortier Pr 10% conservé en (HCl)	48
Tableau 24: perte de masse du mortier Pr 15% conservé en (HCl)	49
Tableau 25 perte de masse du mortier Pr 20% conservé en (HCl)	50
Tableau 26 : perte de masse du mortier Pr 25% conservé en (HCl)	51
Tableau 27 : perte de masse du mortier témoin conservé en (H2SO4).....	52
Tableau 28: perte de masse du mortier Pr 10 % en (H2SO4).....	53
Tableau 29 : perte de masse du mortier Pr 15 % en (H2SO4).....	54
Tableau 30 : perte de masse du mortier Pr 20% en (H2SO4).....	55
Tableau 31 : perte de masse du mortier Pr 25% en (H2SO4).....	56

RESUME

Ce mémoire approfondit l'examen de l'impact de différents pourcentages de perlite, allant de 0% à 25%, sur la résistance des mortiers à l'attaque acide, en utilisant l'acide chlorhydrique (HCl) et l'acide sulfurique (H₂SO₄) comme agents corrosifs. Les résultats de cette étude mettent en évidence plusieurs conclusions essentielles pour l'industrie de la construction et la protection des structures dans des environnements potentiellement corrosifs.

Tout d'abord, il est clair que l'incorporation de perlite dans les mortiers joue un rôle significatif dans l'amélioration de leur résistance à l'attaque acide. Cette amélioration est d'autant plus marquée que le pourcentage de perlite dans le mélange est élevé. Les mortiers contenant des proportions plus élevées de perlite ont montré une résistance accrue aux effets néfastes des acides.

Deuxièmement, il est important de noter que l'acide sulfurique (H₂SO₄) a eu tendance à causer des dommages plus graves aux mortiers que l'acide chlorhydrique (HCl). Cette différence dans l'effet des acides souligne l'importance de prendre en compte la nature de l'acide lors de la conception de mortiers résistants à l'attaque chimique.

En outre, la composition globale des mortiers, y compris la quantité de ciment et d'autres constituants, a également influencé leur résistance aux attaques acides. Cela souligne l'importance de concevoir des formulations de mortiers spécifiques en fonction des besoins et des conditions d'application.

En somme, cette étude offre des perspectives prometteuses pour l'industrie de la construction, en montrant que l'ajout de perlite peut considérablement améliorer la durabilité des mortiers dans des environnements corrosifs. Cependant, des recherches futures seront nécessaires pour affiner les formulations de mortiers et mieux comprendre les mécanismes de protection fournis par la perlite. Ces résultats constituent une base solide pour l'optimisation des matériaux de construction et la préservation des structures contre les agressions chimiques.

Mots-clés : Perlite, Mortiers, Durabilité, Acide chlorhydrique, Acide sulfurique

ABSTRACT

This thesis delves into the examination of the impact of different percentages of perlite, ranging from 0% to 25%, on the resistance of mortars to acid attacks, using hydrochloric acid (HCl) and sulfuric acid (H₂SO₄) as corrosive agents. The results of this study highlight several key findings for the construction industry and the protection of structures in potentially corrosive environments.

Firstly, it is clear that the incorporation of perlite in mortars plays a significant role in enhancing their resistance to acid attacks. This enhancement becomes more pronounced as the percentage of perlite in the mix increases. Mortars containing higher proportions of perlite exhibited increased resistance to the detrimental effects of acids.

Secondly, it is important to note that sulfuric acid (H₂SO₄) tended to cause more severe damage to mortars than hydrochloric acid (HCl). This difference in the effect of acids underscores the importance of considering the nature of the acid when designing mortars resistant to chemical attack.

Furthermore, the overall composition of mortars, including the amount of cement and other constituents, also influenced their resistance to acid attacks. This emphasizes the importance of designing specific mortar formulations based on the needs and application conditions.

In conclusion, this study provides promising insights for the construction industry, demonstrating that the addition of perlite can significantly enhance the durability of mortars in corrosive environments. However, further research will be required to fine-tune mortar formulations and better understand the protective mechanisms provided by perlite. These findings constitute a strong foundation for the optimization of construction materials and the preservation of structures against chemical aggressions

Keywords: Perlite, Mortars, Durability, Hydrochloric acid, Sulfuric acid.

ملخص

تتناول هذه الرسالة دراسة تأثير نسب مختلفة من البيرلايت، تتراوح بين 0% إلى 25%، على مقاومة الأسمنت للهجمات الحمضية، باستخدام حمض الهيدروكلوريك (HCl) وحمض الكبريتيك (H₂SO₄) كوكلاء تآكلين. تسلط نتائج هذه الدراسة الضوء على العديد من الاستنتاجات الرئيسية لصناعة البناء وحماية الهياكل في البيئات القابلة للتآكل.

أولاً، من الواضح أن إدخال البيرلايت في الأسمنت يلعب دوراً كبيراً في تعزيز مقاومته للهجمات الحمضية. هذا التعزيز يزداد وضوحاً كلما ارتفعت نسبة البيرلايت في الخليط. أظهرت الأسمنتات التي تحتوي على نسب أعلى من البيرلايت مقاومة متزايدة للتأثيرات الضارة للأحماض.

ثانياً، من المهم أن نلاحظ أن حمض الكبريتيك (H₂SO₄) عرض لأن يسبب أضراراً أكثر حدة للأسمنت من حمض الهيدروكلوريك (HCl). هذا الاختلاف في تأثير الأحماض يؤكد على أهمية مراعاة طبيعة الحمض عند تصميم الأسمنت المقاوم للهجوم الكيميائي.

علاوة على ذلك، تأثر التكوين العام للأسمنت، بما في ذلك كمية الإسمنت والمكونات الأخرى، أيضاً على مقاومته للهجمات الحمضية. وهذا يؤكد على أهمية تصميم تراكيب الأسمنت الخاصة استناداً إلى الاحتياجات وظروف التطبيق.

في الختام، تقدم هذه الدراسة رؤى واعدة لصناعة البناء، حيث تظهر أن إضافة البيرلايت يمكن أن تعزز بشكل كبير متانة الأسمنت في البيئات القابلة للتآكل. ومع ذلك، ستكون هناك حاجة إلى أبحاث إضافية لضبط تركيبات الأسمنت وفهم أفضل للآليات الواقية التي يقدمها البيرلايت. هذه النتائج تشكل أساساً قوياً لتحسين مواد البناء والحفاظ على الهياكل من الهجمات الكيميائية.

الكلمات الرئيسية: بيرلايت، الخرسانة المسلحة، المتانة، حمض الهيدروكلوريك، حمض الكبريتيك.

INTRODUCTION GENERALE

L'industrie de la construction est en constante évolution, cherchant constamment des moyens d'améliorer la durabilité des matériaux de construction et de garantir la longévité des structures dans des environnements diversifiés et souvent agressifs. Dans ce contexte, la recherche et le développement de nouveaux matériaux de construction capables de résister aux attaques chimiques, notamment les attaques acides, revêtent une importance cruciale. Ces attaques acides peuvent provenir de sources variées, qu'il s'agisse de pluies acides, d'expositions industrielles ou de produits chimiques utilisés dans divers domaines.

Le présent mémoire se concentre sur une approche innovante visant à améliorer la durabilité des mortiers en explorant l'utilisation de la perlite comme composant clé. La perlite, un matériau naturel abondant, est connue pour ses propriétés légères et son isolation thermique, mais son potentiel en tant que renfort de résistance aux attaques acides reste relativement peu exploré.

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer la résistance des mortiers à base de perlite à des attaques acides simulées à l'aide d'acide chlorhydrique (HCl) et d'acide sulfurique (H₂SO₄) dans une plage de pourcentages de perlite allant de 0% à 25%. Cette recherche vise à répondre à plusieurs questions essentielles : Comment l'incorporation de la perlite affecte-t-elle la résistance à l'attaque acide des mortiers ? Existe-t-il une relation entre le pourcentage de perlite et la résistance aux attaques acides ? Les performances des mortiers varient-elles en fonction du type d'acide utilisé ?

Pour répondre à ces questions, cette étude combine des analyses expérimentales approfondies avec des méthodes de caractérisation avancées pour évaluer les performances des mortiers à base de perlite soumis à des conditions d'attaque acide simulées en laboratoire. Les résultats de cette recherche devraient fournir des informations cruciales pour l'industrie de la construction, ouvrant la voie à de nouvelles avancées dans le développement de matériaux de construction durables et résistants aux agressions chimiques.

Au-delà de son intérêt pratique, cette étude contribuera à l'enrichissement des connaissances dans le domaine de la durabilité des matériaux de construction et des réponses aux attaques acides, offrant ainsi des perspectives prometteuses pour un avenir plus résistant et durable dans le domaine de la construction.

PARTIE I :
ETUDE
BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I : NOTION DE DURABILITE

I.1. INTRODUCTION

Un ouvrage doit résister au cours du temps aux diverses agressions ou sollicitations (physiques, mécaniques, chimiques...) c'est-à-dire aux charges auxquelles il est soumis, ainsi qu'aux actions diverses telles que le vent, la pluie, le froid, la chaleur, le milieu ambiant... tout en conservant son esthétisme. Il doit satisfaire, avec un niveau constant, les besoins des utilisateurs au cours de sa durée de service.

Dans ce chapitre, nous allons examiner en profondeur la notion de durabilité et explorer les facteurs influents sur la durabilité ainsi que les différents agents qui peuvent aggraver les matériaux cimentaires.

I.2. DEFINITION DE LA DURABILITE

La durabilité fait référence à la capacité d'une structure à maintenir substantiellement son apparence, sa solidité et sa résistance pendant de nombreuses années.

En maçonnerie, les deux principales exigences pour la durabilité sont une unité dimensionnellement stable et un mortier qui forme une liaison permanente et complète, rendant ainsi la structure étanche à l'eau.

La durabilité d'un matériau est définie comme sa capacité à résister à l'action des intempéries, à l'attaque chimique, à l'abrasion ou à tout autre processus de détérioration. Un béton durable conservera sa forme, sa qualité et sa fonctionnalité lorsqu'il est exposé à son environnement.

I.3. PHENOMENES INFLUENTS SUR LA DURABILITE

I.3.1. Mécanismes de corrosion des armatures en acier dans le béton

Dans des conditions normales, les armatures enrobées d'un béton compact et non fissuré sont protégées naturellement des risques de corrosion par un phénomène de passivation qui résulte de la création, à la surface de l'acier, d'une pellicule protectrice Fe_2O_3CaO (dite de passivation). Cette pellicule est formée par l'action de la chaux libérée par les silicates de calcium sur l'oxyde de fer. La présence de chaux maintient la basicité du milieu entourant les armatures (l'hydratation du ciment produit une solution interstitielle basique de pH élevé de l'ordre de 12 à 13). Les armatures sont protégées tant qu'elles se trouvent dans un milieu présentant un pH compris entre 9 et 13,5. Deux principaux phénomènes peuvent dans certaines conditions détruire cette protection et initier la corrosion des armatures en acier:

- La carbonatation du béton d'enrobage par l'adsorption du gaz carbonique contenu dans l'atmosphère;
- La pénétration des ions chlorures, jusqu'au niveau des armatures.

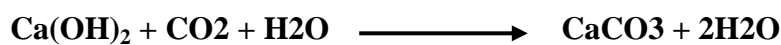
La plus ou moins grande rapidité d'action de ces divers phénomènes est fonction de l'humidité ambiante, de la porosité du béton et de la présence de fissures qui favorisent la diffusion des gaz ou des liquides agressifs. Le diagnostic des ouvrages affectés par une détérioration du béton d'enrobage recouvrant les armatures révèle que les dommages sont dus, dans la grande majorité des cas, à une épaisseur d'enrobage trop mince et/ou à un béton d'enrobage trop poreux et pas assez résistant



Figure 1 : corrosion de l'armature de béton armé

1.3.1.1. Carbonatation

La carbonatation du béton par le gaz carbonique de l'air (CO_2) est un phénomène naturel qui n'est pas nocif pour le béton. Au cours de la prise et du durcissement, les ciments se combinent avec l'eau pour former des produits hydratés de caractère basique. Certains de ces produits [KOH , NaOH et $\text{Ca}(\text{OH})_2$] restent dissous dans la solution aqueuse interstitielle du béton (dont le pH est compris entre 12 et 13). Le gaz carbonique contenu dans l'air a tendance à se combiner avec les produits hydratés, en commençant par les bases alcalines dissoutes dans la solution aqueuse interstitielle, en particulier le $\text{Ca}(\text{OH})_2$, selon une réaction produisant du carbonate de calcium CaCO_3 :



Le milieu basique (pH 12 à 13) se trouve progressivement modifié par la neutralisation de l'alcalinité du ciment pour atteindre un pH de l'ordre de 9, n'assurant plus la protection des armatures et entraînant une dépassivation de l'acier (destruction de la couche de passivation), ce qui développe une réaction d'oxydation à la surface des armatures.

L'humidité relative de l'air joue, en particulier, un rôle important: la vitesse de carbonatation est maximale pour une humidité relative de l'ordre de 60 %, pratiquement nulle en atmosphère sèche ou pour des bétons complètement saturés en eau.

La cinétique et la profondeur de carbonatation d'un béton sont donc fonction de sa composition, de sa structure poreuse, de la classe d'exposition et de l'humidité relative dans

laquelle est situé l'ouvrage. Elle dépend aussi de la concentration en dioxyde de carbone et de la température de l'atmosphère environnant.

1.3.1.2. Action des chlorures

L'action des chlorures est spécifique à certains environnements dans lesquels peut se trouver le béton comme les ouvrages soumis aux sels de déverglaçage ou situés en site maritime (zone de marnage, surfaces soumises aux embruns). Les ions chlorures peuvent pénétrer par diffusion ou migrer par capillarité à l'intérieur du béton, franchir la zone d'enrobage, atteindre les armatures, et provoquer des corrosions.

D'abord ponctuelle (corrosion par piqûres) puis généralisée à toute la surface de l'acier. La vitesse de pénétration des chlorures dépend aussi de la porosité du béton. Elle décroît lorsque le rapport eau/ciment diminue. La corrosion s'amorce dès que la teneur en chlorures au niveau des armatures atteint un certain seuil de dépassivation. Ce seuil est fonction du pH de la solution interstitielle et de la teneur en oxygène au niveau des armatures; il est de l'ordre de 0,4 à 0,5 % par rapport au poids du ciment. Il est atteint plus rapidement si le béton est carbonaté.

1.3.1.3. Effets de la corrosion

Le développement de la corrosion des armatures peut provoquer par gonflement une poussée sur le béton d'enrobage (les oxydes de fer étant plus volumineux que l'acier, ils génèrent des contraintes internes dans le béton qui peuvent être supérieures à sa résistance en traction) et donc une altération de l'aspect extérieur de l'ouvrage (éclatements localisés, formations de fissures, formations d'épaufrures, apparitions en surface de traces de rouille et éventuellement mise à nu des armatures) entraînant une réduction de la section efficace de l'armature et de son adhérence au béton.

En règle générale, dans des milieux peu agressifs les enrobages et les caractéristiques des bétons (compacité, homogénéité, résistance) préconisés sont suffisants pour garantir la protection naturelle des aciers durant la durée de service escomptée de l'ouvrage.

Toutefois, des défauts d'enrobage, des bétons mal vibrés et de ce fait trop poreux, ou des milieux très agressifs, risquent de conduire à une dégradation prématurée de l'armature en acier.

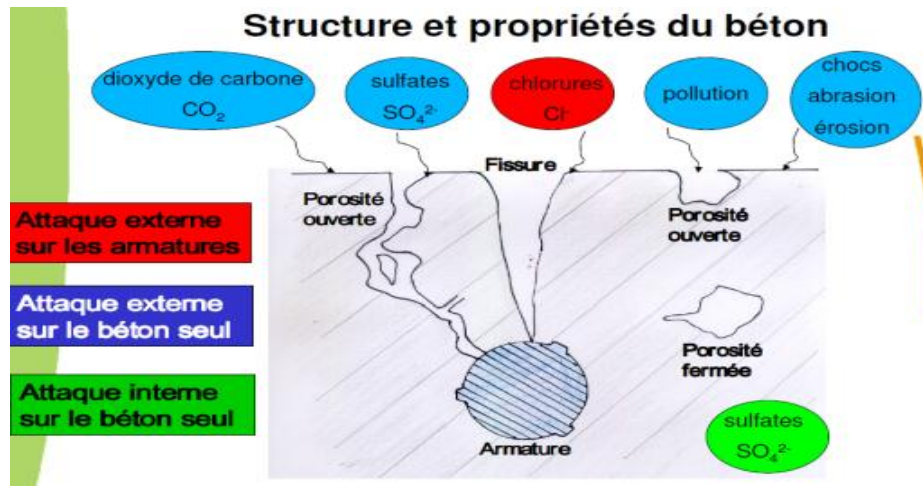


Figure 2: différents types de corrosion

I.3.2. Action des eaux agressives

I.3.2.1. Lixiviation

Dans une structure en béton exposée à l'air ambiant, l'eau ne s'évapore que sur une épaisseur limitée à quelques centimètres. Les pores sont saturés lorsque le béton est en contact de manière prolongée avec l'eau. Des ions en provenance du milieu extérieur peuvent alors transiter, dans la phase liquide interstitielle du béton. En fonction de la nature des éléments chimiques qui pénètrent dans le matériau, il peut en résulter des réactions chimiques de dissolution/précipitation et donc une lixiviation progressive des hydrates. Les eaux pures ou très peu chargées ont un grand pouvoir de dissolution, elles peuvent dissoudre les constituants calciques du béton (la portlandite notamment).

Malgré la complexité des réactions chimiques générées par les eaux agressives, l'application de quelques principes de prévention élémentaires respectés au niveau de la formulation du béton (formulation adaptée, dosage en ciment adéquat, faible E/C, béton compact et peu perméable), de la conception de l'ouvrage et lors de sa réalisation (vibration, cure) permettent d'obtenir des bétons résistants durablement dans les milieux agressifs.

L'agressivité des milieux dans lesquels peuvent se trouver les ouvrages en béton est liée à la présence d'eau et à l'aptitude de celle-ci à réagir avec certains minéraux de la matrice cimentaire du béton.

En effet, les agents agressifs dissous dans l'eau constituent une solution chimiquement agressive pour le béton qui peut provoquer plusieurs types de phénomènes lorsque la formulation du béton n'est pas optimisée.

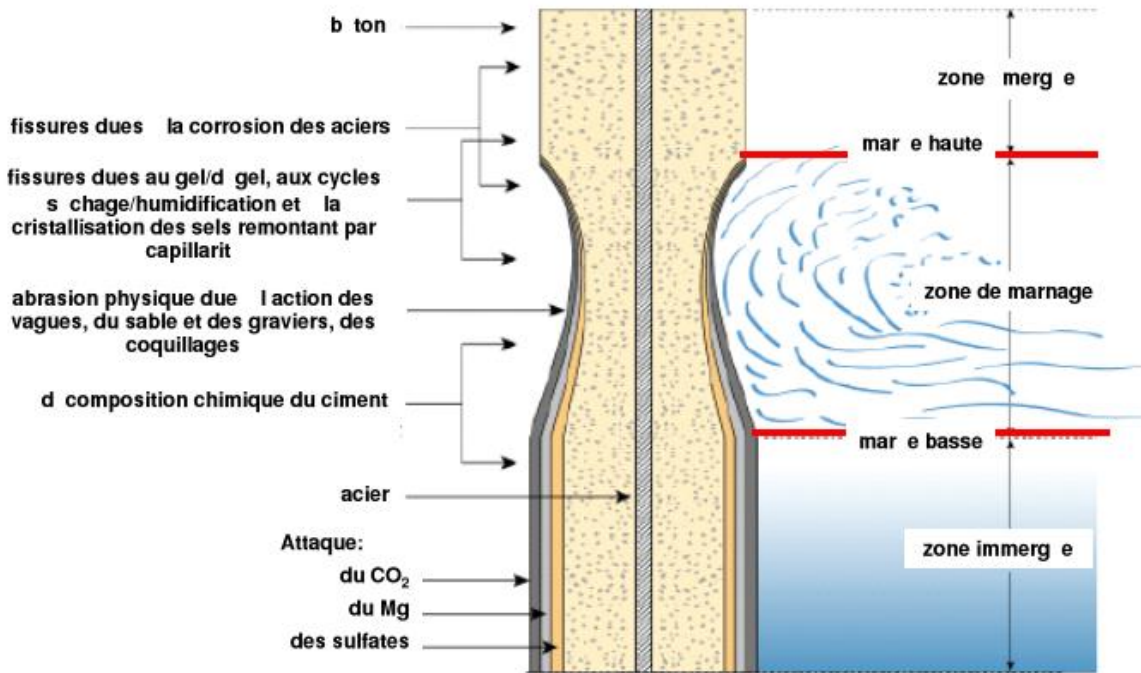


Figure 3 : représentation schématique des différents processus d'attaque du béton par l'eau de mer.

1.3.2.2. Actions des sulfates

Les ions sulfates sont présents de façon naturelle dans certains sols et eaux souterraines. Les attaques sulfatiques sont dites externes quand les ions sulfates proviennent de l'environnement [64].

L'attaque sulfatique externe est souvent combinée avec l'attaque par le cation correspondant, selon la provenance des sulfates, qui peuvent réagir avec certains granulats ou fillers, ou avec les CSH ou la portlandite, et contribuer davantage à la dégradation du béton. De plus, l'attaque par les sulfates externes peut être combinée à une attaque par l'acide, ce qui accélère également la destruction de la pâte hydratée.

Les sulfates peuvent être d'origine naturelle, biologique ou provenir de pollutions domestiques et industrielles. Dans certaines régions (comme l'Afrique du nord) où les sols contiennent du gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ou de l'anhydrite (CaSO_4), on peut en rencontrer des concentrations élevées supérieures à 5%.

Les sources de sulfates peuvent aussi être internes :

- Contamination des granulats par du plâtre
- Granulats gypseux
- Sulfures dans certains granulats

Des roches et des minéraux naturels provenant des sulfates de calcium (gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ et anhydrite CaSO_4), et des sulfates de magnésium (epsomite $\text{MgSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) forment la source externe de sulfates la plus présente dans la nature. Cependant, ce n'est que

lorsque ces sulfates sont dissous dans l'eau (souterraine ou autre) qu'ils présentent un danger potentiel pour pénétrer dans la matrice du béton, réagir avec les hydrates et changer leur structure.

1.3.2.3. Actions de l'eau de mer

Un béton exposé en site maritime peut être l'objet de plusieurs types d'agressions:

- Agressions mécaniques dues à l'action des vagues et des marées, abrasion due aux chocs des matériaux flottants et érosion due aux effets des vagues;
- Agressions chimiques dues à l'action des chlorures présents dans l'eau de mer et des sulfates;
- Agressions climatiques dues aux variations de température et éventuellement à des phénomènes de gel-dégel. Les structures situées en site maritime sont exposées à trois types de configurations. Selon les variations du niveau de la mer, elles peuvent être:
- Continuellement immergées (béton situé sous le niveau de la mer à marée basse), les bétons situés dans cette zone sont rarement l'objet de dégradations importantes;
- Continuellement émergées et soumises aux embruns et brouillards marins contenant des chlorures, les bétons situés dans cette zone peuvent subir de légères agressions;
- Alternativement émergées ou immergées en fonction du niveau de la mer (zones de marnage déterminées par les niveaux de marée haute et basse) ou soumises aux éclaboussures provoquées par les vagues, les bétons situés dans cette zone sont les plus agressés.

Indépendamment de leurs caractéristiques propres, la résistance des bétons est donc variable en fonction du type d'exposition au milieu marin et du degré d'immersion.

Certaines réactions peuvent avoir des effets bénéfiques sur le béton (telle que par exemple la création d'une couche protectrice ou l'obturation des pores par les précipités), d'autres peuvent générer des phénomènes d'expansion ou de lixiviation. La présence d'ions chlorure peut provoquer des phénomènes de corrosion des armatures, si la compacité du béton et l'enrobage des armatures ne sont pas adaptés aux conditions d'exposition. Les sulfates et les chlorures peuvent réagir sur les composés hydratés du ciment.

Les parties d'ouvrages plus particulièrement exposés aux actions de l'eau de mer sont:

- Les piles et culées des ponts situées en zone de marnage ;
- Les blocs de défense maritime;
- Les murs de quais.



Figure 4 : aménagement du port de Monaco (béton en milieu agressif)

I.4. CONCLUSION

En conclusion, la durabilité du béton armé est essentielle pour assurer la longévité et la résilience des structures. Des choix judicieux de matériaux, une fabrication contrôlée, et des mesures préventives contre les agressions extérieures sont nécessaires pour garantir une durée de vie prolongée du béton armé. La mise en œuvre d'un programme de maintenance régulière est également cruciale pour préserver ses performances au fil du temps. En accordant une attention particulière à ces aspects, nous pouvons contribuer à la construction d'infrastructures durables, sûres et économiquement viables pour les générations futures.

CHAPITRE II : ATTAQUES DES ACIDES

II.1. INTRODUCTION

Le béton présente un caractère basique élevé induit par les composés hydratés de la pâte de ciment (la phase interstitielle contenue dans le béton a un pH très élevé). Il peut donc présenter une certaine réactivité vis-à-vis des solutions acides telles que les pluies acides, les eaux naturelles chargées en dioxyde de carbone, les eaux résiduaires, les eaux des industries agroalimentaires ou industrielles contenant des acides organiques, les eaux chargées en acides minéraux, mais aussi les eaux pures.

Le mécanisme de dégradation induit, provient de ces gradients de concentration entre les eaux agressives et la solution interstitielle du béton, d'un pH supérieur à 12 donc basique, et riche en calcium. Les principales espèces lixiviées sont de ce fait les ions calcium Ca^{2+} et hydroxyde OH^- [60]. Leur transport vers le milieu extérieur est donc diffusif, ce qu'ont permis de confirmer les modélisations du phénomène [61] [62].

II.2. SOURCES DES ACIDES

Les milieux acides les plus fréquents sont :

- Les eaux naturelles dans les tourbières et les marécages, où le pH peut s'abaisser jusqu'à 4 ;
- Les milieux industriels : dans les industries chimiques ainsi que les industries agroalimentaires ;
- Les réseaux d'égouts : l'activité bactérienne conduit au dégagement d'hydrogène sulfuré par la transformation des produits soufrés qui, combiné à l'humidité atmosphérique se condensent sous forme d'acide sulfurique qui va attaquer le béton.
- Les pluies acides, qui contiennent principalement de l'acide sulfurique et de l'acide nitrique, ayant un pH entre 4.0 et 4.5, peuvent provoquer la dégradation de la surface exposée du béton.

II.3. LES DIFFERENTS TYPES D'ACIDES

II.3.1. Les pluies acides (cas extrême des eaux douces)

Les pluies dites « propres » ont généralement un pH compris entre 5,6 et 7. Elles n'ont pas d'effets nocifs sur le béton réalisé suivant les règles de l'art. Par contre, les pluies dites « acides », dont le pH peut descendre jusqu'à 4 et parfois moins, sont agressives.

L'occurrence de ce type de pluies est en relation principalement avec la pollution par les oxydes de soufre SO_x d'origine industrielle ou domestique (combustion des charbons, fiouls, carburants) qui représentent environ un tiers de tous les oxydes de soufre de l'atmosphère. Le résultat est la formation d'acide sulfurique très hygroscopique qui se condense rapidement en gouttelettes susceptibles de contenir des métaux lourds (mercure, plomb, argent, cadmium) et des sulfates (d'ammonium, de sodium). Les oxydes d'azote NO_x également présents se

transforment en acide nitrique. La composition et le pH des pluies peuvent varier en fonction de la saison et des conditions locales.

Les pluies acides peuvent provoquer des dégradations superficielles suivant des processus plus ou moins complexes faisant entrer en jeu des phénomènes de dissolution dus aux acides (sulfurique, nitrique, carbonique) et d'expansion dus à la cristallisation de sels, tels que le gypse (salissures des façades) ou l'ettringite.

II.3.2. Les acides minéraux

Les acides chlorhydrique et nitrique, acides minéraux forts qui par réaction avec la chaux du ciment donnent naissance respectivement, au chlorure de calcium CaCl_2 et au nitrate de calcium $(\text{NO}_3)_2\text{Ca}$, sels très solubles, sont très agressifs vis-à-vis des ciments Portland.

L'acide sulfurique H_2SO_4 , formé, par exemple, lors de l'oxydation de l'hydrogène sulfuré produit dans les réseaux d'assainissement ou par condensation à partir du SO_2 atmosphérique, est doublement agressif par son acidité et par l'anion SO_4^{2-} qui peut conduire à la formation de sels expansifs tels que le gypse et l'ettringite.

L'acide phosphorique H_3PO_4 , qui entraîne la précipitation de phosphates de calcium très peu solubles, est modérément agressif, mais provoque une désintégration lente du béton.

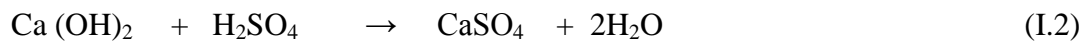
II.4. MECANISME D'ATTAQUE

La durabilité d'un matériau cimentaire dans un milieu acide dépend de plusieurs facteurs tels que :

- Type de ciment, composition et l'utilisation des ajouts cimentaires.
- Type de granulats : gravier, sable, calcaire...
- La durée et les conditions de cures.
- L'acidité, type et le pH du milieu agressif.

En général, on peut établir qu'un acide est d'autant plus nuisible que les sels de calcium formés sont plus facilement solubles.

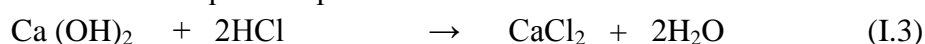
L'acide sulfurique (formule I.2) est relativement inoffensif, car les sulfates de calcium sont difficilement solubles dans l'eau. Mais les ions de sulfate jouent en l'occurrence un rôle nuisible pour le béton (gonflement dû aux sulfates).



Hydroxyde de calcium + acide sulfurique \rightarrow sulfate de calcium + eau

L'acide sulfurique réagit donc avec la chaux libre dans le béton et forme du gypse. Cette réaction est associée à une augmentation du volume du béton. Une action bien plus destructive est la réaction entre l'aluminate de calcium et les cristaux formés de gypse. Ces deux produits forment l'ettringite ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) moins soluble dans l'eau.

L'acide chlorhydrique fait partie des substances très agressives, car le sel correspondant (chlorure de calcium) est très facilement soluble dans l'eau. La formule I.3 décrit la réaction entre l'acide chlorhydrique et la portlandite.



Hydroxyde de calcium + acide chlorhydrique \rightarrow chlorure de calcium + eau

Les acides inorganiques forts ne réagissent pas uniquement avec l'hydroxyde de calcium. Ils attaquent également les autres composants de la pâte de ciment durcie, en formant des sels calciques, aluminiques ou ferriques, ainsi que des acides siliciques colloïdaux (gels de silice) [24].

II.5. INFLUENCE DES AJOUTS POUZZOLANIQUES SUR LA RESISTANCE DES MORTIERS AUX ATTAQUES ACIDES

Les liants pauvres en CaO sont souvent préconisés car ils interviennent à deux niveaux dans le mécanisme de l'attaque basique (lixiviation) et de l'attaque acide. D'une part, ils génèrent une teneur plus faible en portlandite dont la dissolution engendre une augmentation de la porosité et des CSH plus denses et stables. D'autre part, à porosité globale identique, la morphologie du réseau poreux serait différente, et globalement cela se traduirait par une porosité capillaire et des coefficients de diffusion plus faibles [56]. Ainsi les liants comprenant des additions pouzzolaniques telles que les fumées de silice ou les cendres volantes font preuve d'une meilleure résistance à la lixiviation et aux attaques acides [53] [57].

II.5.1. Ajouts pouzzolaniques

Les pouzzolanes sont des matériaux naturels ou artificiels capables de réagir en présence d'eau, avec de l'hydroxyde de chaux pour donner naissance à des nouveaux composés stables, peu solubles dans l'eau et possédant des propriétés liantes :

1. **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.
2. **Pouzzolane artificielle**: des argiles et des schistes essentiellement composé de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant subi un traitement thermique pour lui assurer des propriétés pouzzolaniques.

Les pouzzolanes doivent leur nom aux cendres volcaniques de la région de Pouzzoles, en Italie, dont l'utilisation et les propriétés liantes étaient connues à partir de l'époque romaine. Leur composition chimique est proche de celle des cendres volantes, mais elles sont produites à haute température par les éruptions volcaniques.

Les matériaux pouzzolaniques naturels que l'on rencontre le plus communément sont les cendres volcaniques, la pouzzolane naturelle, la perlite naturelle, la pierre ponce, les argiles schisteuses, les opalines, les terres à diatomées calcinées et l'argile cuite.

En raison de leurs propriétés physiques, certaines pouzzolanes naturelles peuvent poser des problèmes. Par exemple, les terres à diatomées, du fait de leur nature anguleuse et poreuse, nécessitent un dosage en eau élevé. Certaines pouzzolanes naturelles voient leur activité améliorée par calcination entre 550 et 1100 C° selon le matériau concerné.

La sélection des pouzzolanes se fait sur la base du contenu en phase vitreuse, par la différence entre la teneur en silice et celle en chaux, respectivement, qu'on peut déterminer par les méthodes chimiques habituelles, une valeur limite se rapprochant de 34 % révélerait l'absence de phase vitreuse

II.5.1.1 Caractéristiques des pouzzolanes

Compositions chimiques

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

Tableau 1: Domaine élargi des compositions des pouzzolanes naturelles

Eléments	Pourcentages	
	D'après VENUAT	D'après SERSALE
SiO ₂	42 - 73	45 - 60
Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	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 : (feldspath, leucite, augite, ... etc.), plongée dans une abondante masse amorphe, dans la plupart des cas vitreux, ou tout au plus submicrocristalline, plus au moins altérée par les agents atmosphériques, poreuse au point qu'elle simule un gel et avec une ample surface interne. A côté de la silice solubilisable, elle présente des quantités significatives d'alumine solubilisable.

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.

L'activité pouzzolanique

L'activité pouzzolanique est la possibilité de lier la chaux en présence d'eau. Les causes de cette activité font le sujet de beaucoup de discussions. Nous nous intéressons à des pouzzolanes d'origine volcanique. L'activité pouzzolanique de ces matériaux naturels peut être influencée en changeant l'état physique par broyage, en ajoutant des additifs, en chauffant la pouzzolane et en augmentant la température.

Le mécanisme de la réaction pouzzolanique peut se comprendre aisément grâce au diagramme triangulaire CaO-SiO₂-Al₂O₃ de Keil (voir Figure III.1) à partir des positions relatives des différents composés impliqués dans le phénomène de la réaction.

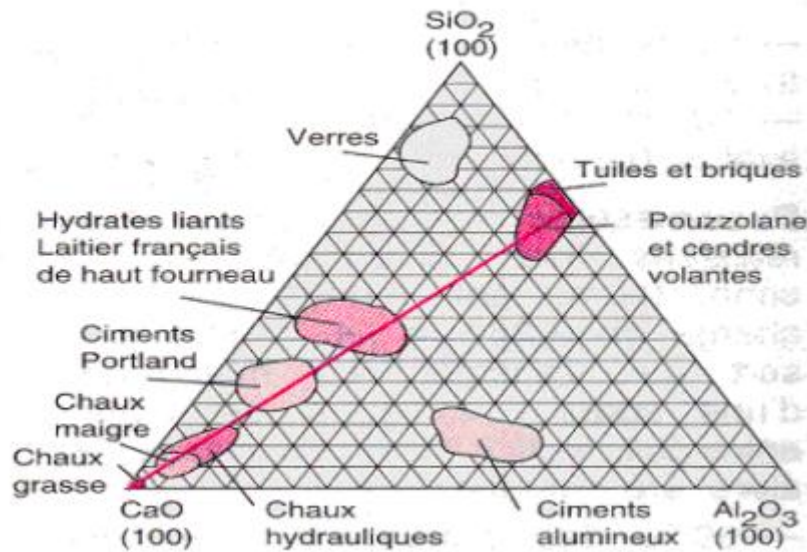


Figure 5: Diagramme de Keil (Zone des pouzzolanes dans le système CaO – SiO₂ – Al₂O₃)

L'eau n'étant pas représentée sur ce diagramme, la chaux grasse, vive ou éteinte, occupe le pôle CaO. Les briques, les pouzzolanes et les cendres volantes sont approximativement sur la ligne SiO₂-Al₂O₃ au premier tiers en partant de la SiO₂.

La droite qui relie le centre de l'aire des pouzzolanes et le pôle CaO traverse d'abord la zone commune aux hydrates à caractère liant et aux laitiers de hauts fourneaux, ensuite celle des clinkers de ciment Portland et enfin celle des chaux hydrauliques, avant de rejoindre le pôle même, représentatif de la chaux grasse.

Selon différentes études, les matériaux pouzzolaniques doivent satisfaire trois conditions :

- 1- Etre acide : contenir une forte proportion de silice et d'alumine.
- 2- Contenir une proportion importante de phase vitreuse.
- 3- Présenter une grande surface spécifique.

Deux catégories d'essais sont envisagées soit pour caractériser l'intensité ou simplement l'existence de la réaction pouzzolanique, soit pour mettre en évidence la formation de produits d'hydratation spécifiques (plus précisément de prouver que ces produits ont une influence sur les caractéristiques mécaniques du système). Le premier type d'essais se rattache à des déterminations chimiques, tandis que le second s'appuie plutôt sur des mesures physiques à savoir sur les résistances mécaniques

II.5.1.2 La pouzzolane naturelle de Béni-Saf

Les formations volcaniques du littoral oranais se développent sur une étendue de 160 km de long, allant de la frontière Algéro-Marocaine au Cap Sigale à 35 km à l'Est de la ville d'Oran. La largeur de cette bande atteint 20 km.

Ce sont des roches saturées (andésites) ou nettement acides (dacites, rhyolites). Elles ont donné lieu non seulement à l'édification d'un grand volcan (Tifraouine) mais également à des

pitons volcaniques de type péléen, à d'importants dépôts de cendres et fait plus remarquable, à des phénomènes secondaires très particuliers tels une intense salification de tout un secteur environnant. Ce massif vaut soit par les tufs andésitiques ou dacitiques, soit par des roches salicifiées qui peuvent être le constituant secondaire idéal pour réaliser des ciments sursilicés de qualité, hautement résistants aux agents agressifs.

Dans la région de Béni-Saf les formations géologiques d'origine volcanique sont nombreuses. Plusieurs carrières de pouzzolanes y sont exploitées au profit des cimenteries locales et approvisionnent d'autres cimenteries de régions plus éloignées.

Le laboratoire de la cimenterie de Béni-Saf, sous l'égide de la SNMC (Société Nationale de Matériaux de Construction, a effectué plusieurs séries d'essais dans le but de produire à une échelle industrielle un ciment de type CEM II en incorporant au ciment portland (CEM I) de la pouzzolane. Les conclusions suivantes ont été émises :

- Substituer un pourcentage de produit de moindre coût (pouzzolane naturelle) au ciment (CEM I) plus coûteux, diminue son coût de revient.
- L'utilisation de la pouzzolane comme ajout dans les ciments, en plus de l'aspect économique, offre de meilleures performances techniques : le CEM II obtenu est de classe supérieure.
- Une amélioration des résistances mécaniques ainsi que la durabilité chimique des mortiers et bétons ont été constatées. Cela est attribué aux effets physiques et pouzzolaniques de l'ajout.
- La quantité d'ajout doit être définie par des essais préliminaires en fonction des caractéristiques de la pouzzolane substituée et des caractéristiques techniques recherchées.
- Les résistances mécaniques ainsi que la durabilité chimique des mortiers à base de pouzzolane ont nettement été améliorées avec l'augmentation de la finesse de la pouzzolane.

II.5.2. Résistance aux attaques acides

D'après l'étude de Semcha, l'effet pouzzolanique pour les mélange 20% et 30% de pouzzolane est remarquable à partir de 45 jours. Cela est dû à la réaction pouzzolanique qui ne s'amorce qu'à partir du moment où la chaux est libérée par l'hydratation du ciment.

Quelques études Belas-Belaribi et al, 2003, Eziane et al, 2007, Mouli et Khelafi, 2008, ont démontré que la roche de pouzzolane du Beni-Saf (Algérie) possède des propriétés pouzzolaniques. Ainsi, elle est employée et commercialisée principalement auprès des cimenteries qui l'utilisent comme ajout actif à des taux de 15 à 20 % dans la fabrication des ciments composés Kaid, 2010. Habituellement, seules les caractéristiques mécaniques (résistance à la compression et à la flexion) sont vérifiées. La connaissance des performances de cette pouzzolane en termes de durabilité demeure encore limitée.

Récemment des recherches ont été entreprises sur la durabilité des mortiers à base de cette pouzzolane conservés dans des milieux agressifs Ghrici. Ils ont constaté un gain dans les résistances à la compression des mortiers conservés dans une solution de 5% en sulfates de sodium avec l'utilisation de 20% et 30% de pouzzolane à moyen terme (6 mois). L'étude de la

perméabilité aux ions chlore des bétons à base de cette pouzzolane naturelle a été limité à la mesure de la charge électrique traversant l'échantillon de béton Ghrici et al, 2006, 2007. Ce résultat a révélé une meilleure perméabilité du béton à base de 30% de pouzzolane par rapport à celui d'un béton témoin et un béton ternaire à base de 20% de pouzzolane naturelle et 10% de filler calcaire.

CONCLUSION

Le béton est durable dans la plupart des milieux naturels, par contre en cas d'un milieu acide comme une pluie acide, contact avec un milieu fortement acide (centre nucléaires, agricoles), le stockage des produits chimiques, ces milieux présentent des problèmes de durabilité dus aux attaques chimiques.

Les attaques chimiques que peuvent rencontrer les matériaux à matrice cimentaires sont très variées. De par sa porosité et la composition chimique de la solution interstitielle, des échanges de matière peuvent se produire et être à l'origine d'une évolution de la composition solide de la pâte de ciment. Ces phénomènes de transport et de réaction s'effectuent à l'échelle de la microstructure de la pâte de ciment [50]. Parmi une multitude de causes de dégradation des matériaux cimentaires, figurent les attaques par les différents acides.

CHAPITRE III : LA PERLITE NATURELLE

III.1. INTRODUCTION

Dans l'industrie cimentaire, la recherche d'un liant moins coûteux, en utilisant des déchets industriels et des ressources naturelles, est devenue une préoccupation majeure pour palier au déficit dans la fabrication du ciment Portland. L'Algérie est riche en gisements volcaniques, comme le gisement de pouzzolane naturelle de Béni Saf qui est employé comme ajout minéral actif dans les usines locales de fabrication du ciment. D'autres gisements des roches volcaniques vitreuses se trouvent au Nord-Ouest de l'Algérie, tel que la perlite de Hammam Boughrara.

III.2. HISTORIQUE

La première identification de la perlite en tant que verre volcanique particulier semble remonter à l'antiquité, peut-être dès le troisième siècle avant identification de la perlite en tant que verre volcanique [LANGFORD, 1979]. D'autres auteurs situent les premières descriptions de la roche et de ses propriétés au XVIIIe et au XIXe siècle, mais ce n'est que depuis 1940-1950 environ qu'est née une véritable industrie de la perlite obtenue par expansion thermique rapide de cette roche.

La perlite est un aluminosilicate roche volcanique, en raison de sa nature vitreuse et de sa composition chimique (70-75% SiO₂ et 12-18% Al₂O₃) [Meral Ç., 2004] [Rashad A. M., 2016]. Elle peut être utilisée comme ajout pouzzolanique [Yu L. H. et al, 2003] [ERDOGAN S. T. et SAGLIKA. Ü., 2013][CHHAOUI R., 2018]. Il est très intéressant d'étudier cette roche comme apport en matière première pour l'utiliser comme ajout minéral actif.

III.3. DEFINITION DE LA PERLITE

La perlite est une roche volcanique siliceuse concassée et calibrée, elle comme un sable ou de granules de couleur blanche, c'est un matériau naturel contenant de l'eau et qui est très stable dans le temps en raison d'un refroidissement rapide, la perlite se dilate de quatre à vingt fois son volume d'origine sous l'effet de l'évaporation de l'eau. La pierre volcanique éclate, ce qui entraîne la formation d'innombrable petite bulle d'air, cette porosité confère à la perlite des propriétés physique remarquables telles qu'une faible conductivité thermique ainsi qu'une incroyable légèreté pour la perlite expansée.

De la famille des rhyolites perlitiques, qui a une teneur en eau relativement élevée (2 à 6% d'eau combinée chimiquement), habituellement formée par l'hydratation d'obsidienne. Elle a la propriété inhabituelle de s'expansé lorsqu'elle est chauffée entre 850°C et 1100°C. Cette expansion se traduit par une augmentation de volume 7 à 20 fois le volume initial



Figure 6 : Exemple typique d'une roche de perlite [Samar et al. 2016]

III.4. LES VARIATIONS DES TEXTURES DE LA PERLITE

Dans certains gisements, peuvent être observées des variations de texture de la perlite selon le tableau 2.

Tableau 2. Les variations des textures de la perlite

la texture cendreuse	une très faible densité, elle est de couleur gris à beige
la texture granulaire	saccharoïde et rubané, et avec une fracturation à débit en blocs, ses meilleures caractéristiques physiques permettent son broyage, son criblage et son transport.
la texture classique	les nodules d'obsidienne résiduelle peuvent se présenter en grains isolés ou en rognons de dimension variée

III.5. LES DIFFERENTES UTILISATIONS DE LA PERLITE

Les utilisations principales de la perlite mettent en valeur sa faible densité et sa faible conductibilité thermique, cette différence en exprimer dans le tableau 3.

Tableau 3. Les domaines utilisations de la perlite

Domaine de bâtiment	Utilisée dans les bétons léger, et dans les panneaux isolants, pour les terrasses, et pour les sous –couches de plancher, et les revêtements anti incendie, et en l’isolation phonique et thermique.
Domaine de l’horticulture	mélangée avec de la tourbe ou avec du sable siliceux, elle empêche le dessèchement des tourbes dont le ré humectation est, difficile
Domaine de la sidérurgie	diminue la vitesse de refroidissement des cubilots, lingots et coulées.
Domaine des minéraux de charge	les peintures, un agent anti – agglomérant.....

III.6. LES TECHNIQUES D’EXTRACTION, DE BROYAGE ET DE CRIBLAGE

La seule méthode d’extraction de la perlite c’est la méthode de l’exploitation à ciel ouvert qui est plus économique car elle a une texture cendreuse, elle peut être ripée, mais si elle est insuffisamment friable, des explosifs sont nécessaires. La présence de l’argile ou d’obsidienne nécessite une extraction sélective qui cette opération d’extraction dépense une énergie de l’ordre de 0.4 thermie /t.

La première étape est la réduction du matériau par broyeur à mâchoires à moins de 8 mm, la réduction à 1.6mm se fait par un broyeur giratoire et celle à moins de 2.36 mm par un broyeur à percussion. Le fractionnement granulométrique est assuré par des cribles vibrants et un classificateur pneumatique pour les plus fines particules. Pour les opérations de séchage, broyage et criblage, l’énergie dépensée varie de 6.3 à 12.6 thermies /m³

III.7. CARACTERISTIQUES PHYSIQUES, CHIMIQUES ET MINERALOGIQUES DE LA PERLITE

Les tableaux 4, 5 et 6 donnent respectivement les caractéristiques physiques,thermo-physiques et chimiques de la perlite. Les différents degrés de perlitisation sont montrés dans la figure 7.

Tableau 4 : Les caractéristiques physiques de la perlite

pH	Densité	Densité apparente	Point de ramollissement	Point de fusion	Chaleur spécifique
6.5à8.0	2.2à2.4	32-400 kg/m ³ .	871-1093°C.	1260-1343°C	387 J/kg K

Tableau 5 : Les caractéristiques thermo physique

Conductivité thermique a 24°C	0,04 à 0,06 W/m·K
Dureté	5.5. – 7 (échelle de Mohs).
capacité d'absorption d'eau	50% en poids 50% en volume.

Tableau 6 : La composition chimique typique de la perlite brute [MERAL Ç. 2004]

Désignation	Teneur (%)
SiO ₂	71à 75
AL ₂ O ₃	12.5à16
Na ₂ O	2.9 à 4
k ₂ O	4 à 5
CaO	0.2 à 0.5
Fe ₂ O ₃	0.5à 1.45
MgO	0.03à 0.5
H ₂ O	3.05à 5.16

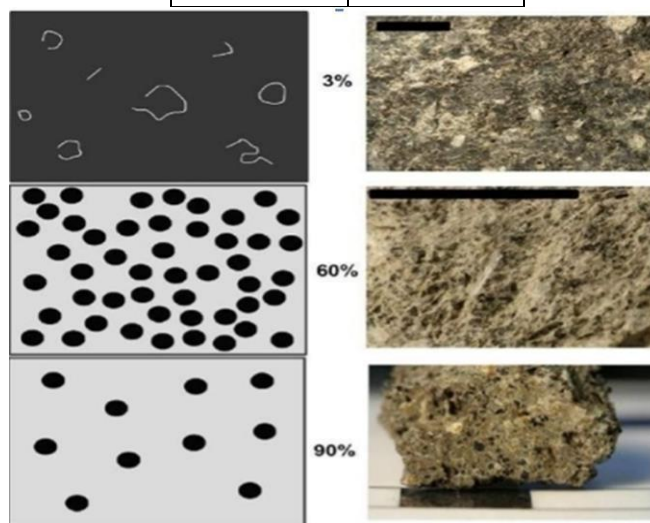


Figure 7: Différents degrés de perlitisation. [FERK, 2012].

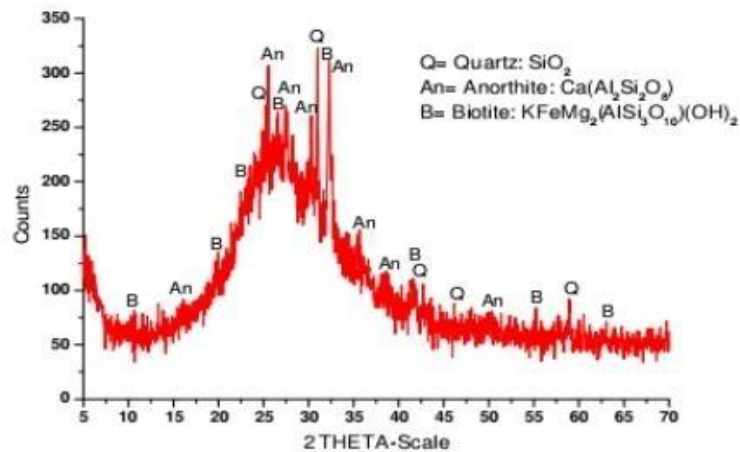


Figure 8: le diffractogramme aux rayons X de la perlite naturelle % [CHIHAOUI .R.2017]

Ce diagramme nous 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 [CHIHAOUI, 2017].

Une série d'analyses chimiques de la perlite de différentes origines donnée par le tableau 7

Tableau 7: compositions chimiques d'une sélection de perlites typiques commercialisées

Pays	Région	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	H ₂ O+
Grèce	(Milos)	74.20	12.30	0.95	0.08	0.85	0.13	4	4.40	2.80
Turquie	(Biga)	73	13.80	0.70	0.20	0.70	0.25	3.25	4.50	3.70
Italie	(Monte, sparau, sardaigne)	72.80	13.80	2.10	0.30	0.90	0.40	3.30	5.60	Nd
Bulgarie	(schupenata	73.80	12.8	0.56	0.07	0.50	0.03	3	4.90	4
Hongrie	(Palhaza)	73.50	13	1.80	-	1.50	0.40	3.50	3.80	3
USA	No Agua (nouveau Mexique	72.10	13.50	0.80	0.06	0.89	0.50	4.60	4.40	372.
	Pioche (nevada)	73.10	12.80	0.70	0.08	0.90	0.20	3	4.70	3.90
	Fish Springs (californée	75	13.20	0.70	n.d	0.50	trac	4.30	4.60	3.20
Argentine	Rio Negro	72.30	13.40	1	0.08	0.59	0.30	3.40	4.70	3.70
Russie	Sibérie	72.80	14.15	0.17	n.d	0.82	-	2.50	4.35	?
Japon	Akita	74.20	12.90	0.68	0.06	0.45	0.05	4.10	4	3.30
chine	Xinyang (Henan)	72	12.31	1.34	n.d	1	0.14	3.29	4.67	?
Arménie	Aragats	73	12.40	0.70	0.05	0.40	0.10	4.50	4.90	3.50

III.8. RESERVES DE PERLITE EN ALGERIE

La perlite existe dans les roches volcaniques et sédimentaires au Nord-Ouest de Tlemcen près de Hammam BOUGHRARA (MAGHNIA). Les gisements sont localisés près des routes et peuvent apparemment être exploités à ciel ouvert [LSUNMA, 1999].

La roche est d'abord concassée et calibrée par granulométrie. L'expansion industrielle de la perlite est réalisée par EFISOL dans des fours spéciaux, fixes ou rotatifs. Sous l'effet de la chaleur, les grains de perlite s'expansés : une multitude de cellules fermées se constituent à l'intérieur des grains. La perlite est utilisée sous forme d'une poudre tamisée à 80 µm dans tous les essais. La composition chimique de la perlite broyée et le spectre DRX sont montrés dans le tableau, respectivement.



Figure 9 : Scories de la perlite de Hammam BOGHRARA avant broyage. [HAMDACHE. 2017]

Tableau 8 : Composition chimique élémentaire de la perlite de Hammam Boughrara [HAMDACHE. 2017]

CaO	SiO ₃	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	Cl	CaCO ₃
3.16	76.40	13.43	2.92	0.01	4.33	0.82	0.37	0.008	8.75

La perlite de Maghnia sont des roches intrusives, légères, massives, dures, formées dans les zones de fin de contact des massifs intrusifs acides de Rhyolite (Liparite) suite au refroidissement rapide et la cristallisation en subsurface [LSUNMA 1999 ; GUENANOU 2014]. Deux sites situés au Nord-est de Maghnia sont reconnus comme gisement de la perlite. Ils forment des petits corps lenticulaires d'épaisseur 6 à 29 m et une longueur de 150 à 300 m.

Tableau 9: les principaux gisements de la perlite de Maghnia [LSUNMA 1999]

N° de gisement	Réserves ou paramètres estimatifs en tonnes	Conditions techniques et minières	Composition chimique (%) ou propriété physico-mécaniques
93	Secteur principale : 142500 Secteur Bab : 196000 Secteur Roussel : 15000	Favorable (Inexistence de roche de recouvrement)	SiO ₂ = 71.68 AL ₂ O ₃ =12.69 Fe ₂ O ₃ = 1.34 CaO =1.08 Mg O =0.55 K ₂ O= 3.91 Na ₂ O = 3.62 Fe O = 0.49 SO ₃ =0.08 P ₂ O ₅ = 0.05 PF = 3.53 (perte aux feux %)
94	Considérables	Favorable	SiO ₂ = 71.38 AL ₂ O ₃ =14.25 Fe ₂ O ₃ = 2.19 CaO =0.7 Mg O =0.35 K ₂ O= 3.30 Na ₂ O = 4.00 Fe O = 1.15

III.9. LOCALISATION DU GISEMENT DE LA PERLITE DE HAMMAM BOUGHRARA

La perlite est extraite du gisement de Hammam BOUGHRARA situé à Tlemcen, Algérie. En trouve cette forme des roches volcanique siliceuse, la figure 10 représente localisation du gisement.

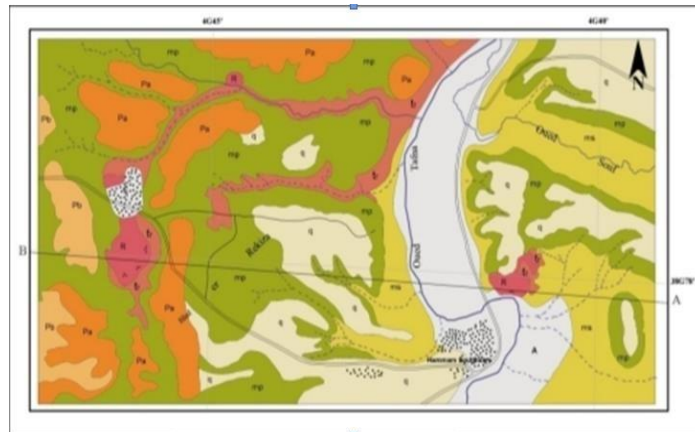


Figure 10: Localisation du gisement de Hammam BOUGHRARA (TLEMEN) [HAMADACHE, 2018]

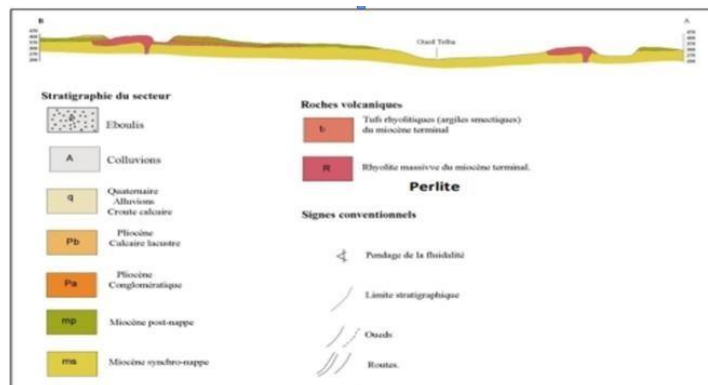


Figure 11 Coupe verticale géologique du gisement de Hammam BOUGHRARA [HAMADACHE, 2018].

III.10. LES ETAPES DE PREPARATION DE LA PERLITE EN POWDRE

Après l'extraction de la perlite du gisement sous forme de roche de couleur gris (Figure12), elle est séchée dans l'étuve pendant 24 h à une température de 80°C pour éliminer toute éventuelle humidité et faciliter son broyage puis elle est broyée et tamisée à travers un tamis de 80 µm (Figure 13 et 14).



Figure 12 Aspect de la perlite sous forme de roche [OULD MOUSSA. M. T]



Figure 13: Concassage et broyage [OULD MOUSSA.M.T]



Figure 14: la poudre de perlite après le broyage et tamisage

III.11. CONCLUSION

Au terme de ce chapitre nous avons décrit la nature de la perlite de HAMMAM BOUGHRARA, ses caractéristiques physiques, chimiques et la localisation de cette roche volcanique. Aussi nous avons évoqué les réserves de la perlite qui peuvent assurer son abondance et les techniques d'extraction et de préparation de ce matériau.

PARTIE II :
MATERIAUX
ET
METHODES
EXPERIMENTALES

CHAPITRE I : MATERIAUX UTILISES

I.1. INTRODUCTION

Le dosage et la nature de l'addition sont des facteurs qui influencent considérablement sur le comportement à l'état frais et à l'état durci des mortiers.

Ce travail vise à apporter une contribution à la valorisation de la perlite de Hammam Boughrara, en tant qu'une substitution partielle dans la composition de mortiers. Il s'agit d'étudier la durabilité de ces mortiers face à l'attaque des acides chloridrique et sulfatique en comparant l'influence de cet ajout sur des différents mortiers incorporant ce matériau, datant d'une année.

Les différentes caractéristiques physiques, chimiques et minéralogiques de tous les matériaux entrant dans la composition des mortiers à base de 10%, 15%, 20% et 25% de perlite, sont résumées dans ce chapitre.

Les essais ont été effectués 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.

I.2. CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX UTILISES

La connaissance des propriétés des matériaux est fondamentale dans toutes les études, le respect des exigences de sécurité des constructions, de confort et l'environnement et directement liées aux performances et capacités des matériaux.

I.2.1. Le ciment

Un seul type de ciment a été utilisé pour les différentes compositions, il s'agit du ciment résistant aux sulfates (CRS) CEM I 42,5 R.

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.

I.2.1.1. Caractéristiques chimiques et minéralogiques

Dans notre étude le ciment utilisé provenant du groupe GICA. La proportion chimique et minéralogique du ciment varie en fonction de l'état physique ou du traitement thermique subit par le matériau pendant le processus de sa fabrication.

Les compositions chimiques du ciment et minéralogique du clinker sont données respectivement par les tableaux 10 et 11.

Tableau 10. Composition chimique élémentaire de ciment (CRS) (%) (GICA).

Les oxydes	Pourcentages %
Silicate tri calcique C_3S	59.68
Silicate bi calcique C_2S	12.52
Aluminate tricalcique C_3A	2.62
Alummino-ferrite tetracalcique C_4AF	16.73

Tableau 11 Composition minéralogique du clinker.

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	Cl
63.10	20.0	4.50	5.50	2.50	0.60	0.20	2.00	0.02

1.2.1.2. Caractéristiques physico-mécaniques

Les caractéristiques physico-mécaniques du ciment CRS est donne dans le tableau 12.

Tableau 12. Les caractéristiques physico-mécaniques du ciment.

Expansion à chaud	Surface spécifique de Blaine	Résistance à la compression		Temps de début de prise	Chaleur d'hydratation
0 -5 mm	3000 à 3800 cm ² /g	02 Jours ≥20 N/mm ²	28 jours ≥ 42.5 N/mm ²	60 min – 150 min	≤270j/g

Le tableau 13 résume les caractéristiques physiques du ciment utilisé dans notre étude.

Tableau 13. Caractéristiques physiques du ciment CRS

Caractéristiques	Valeurs
Masse volumique apparente (g/cm³)	1.01
Masse volumique absolue (g/cm³)	3.05
Finesse (cm²/g)	2869
Perte de feu	≤1%
Résidu insoluble	0.5 % - 1 %
Densité	0.950 à 1.10
Refus sur tamis 45 micron	≥20%

I.2.2. Perlite naturelle

La perlite naturelle utilisée est extraite du gisement de Hammam Boughrara situé à Maghnia. 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 15).

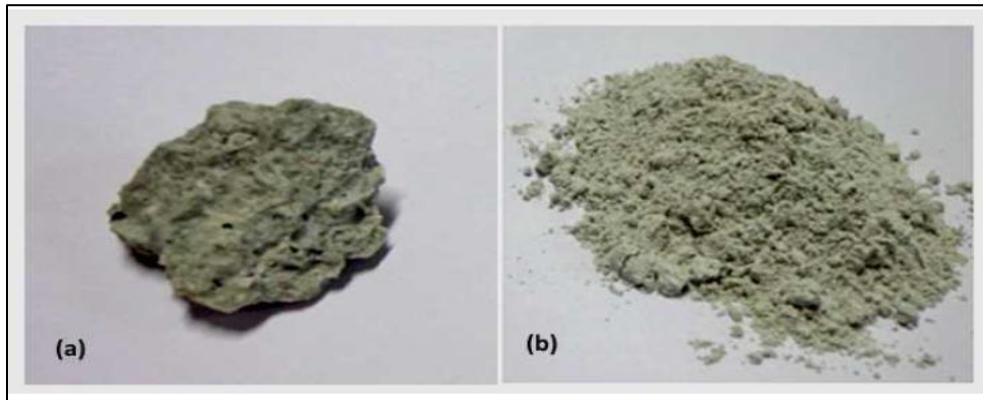


Figure 15 (a) Roche de la perlite naturelle avant broyage, (b) Poudre de la perlite naturelle après broyage (5).

I.2.2.1. Caractéristiques chimiques

La composition chimique de la perlite naturelle, est donnée dans le tableau 14.

Tableau 14 Composition chimique élémentaire de la perlite naturelle.

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	Cl	PAF
2.24	72.29	14.24	2.44	0.02	2.74	2.78	0.53	0.26	2.36

I.2.2.2. Caractéristiques physiques

Les caractéristiques physiques de la perlite naturelle est donnée dans le tableau 15.

Tableau 15. Caractéristiques physiques de la perlite naturelle (5).

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

Le diagramme (Figure 16) 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.

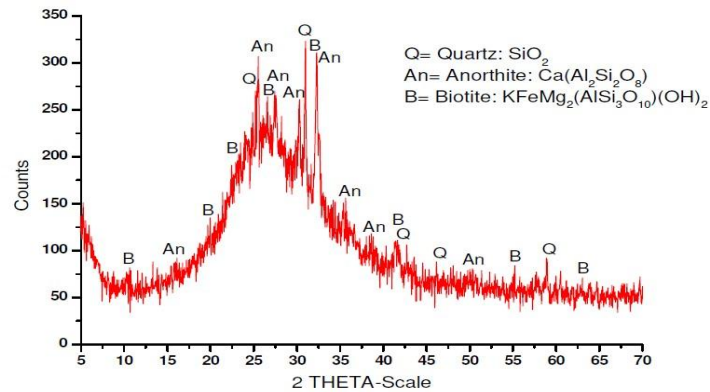


Figure 16. Le diffractogramme aux rayons X de la perlite naturelle (5).

I.2.3. Le sable

Le sable utilisé est un sable siliceux provenant de la société Adwan, zone industrielle Fornaka à Mostaganem (Figure 17).



Figure 17 Le sable siliceux de la société Adwan

I.2.3.1. Caractéristiques chimiques du sable

La composition chimique du sable, est donnée dans le tableau 16.

Tableau 16 Composition chimique du sable (Adwan).

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

1.2.3.2. Caractéristiques physiques du sable

Le Tableau 17 résume les caractéristiques physiques du sable utilisé dans notre étude.

Tableau 17. Les caractéristiques physiques du sable siliceux.

Caractéristiques		Sable siliceux
Masse volumique apparente (g/cm³)		1.62
Masse volumique absolue (g/cm³)		2.79
Equivalent de sable (%)	Visuel	96.84
	Piston	92.70
Module de finesse		1.94
Pourcentage de fines (%)		1

1.2.3.3. Composition granulométrique

La composition granulométrique du sable siliceux utilisée dans nos mélanges dans le tableau 18, figure 18.

Tableau 18 La granulométrie du sable utilisé.

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	/

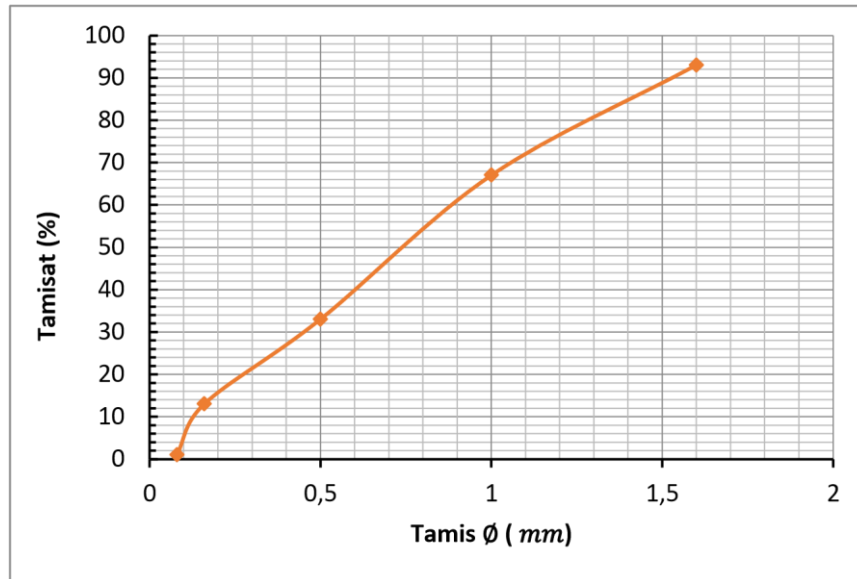


Figure 18 Courbe granulométrique du sable.

I.2.4. 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). Les caractéristiques physiques et chimiques du BV 40 sont résumées dans le tableau 19.

Tableau 19 Caractéristiques physiques et chimique de l'adjuvant.

Caractéristiques	
Aspect	Liquide brun clair
Densité	$1,040 \pm 0,015$
PH	4.5 ± 1 $\leq 0.5 \%$
Teneur en Na_2O	
Teneur en chlore	$< 0,1 \%$
Extrait sec	$36,6 \pm 40,4 \%$
Teneur en ions Cl^-	$\leq 0,1 \%$
Plage du dosage Recommandée	$0,3$ à 1% du poids du ciment

I.5. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons identifié tous les matériaux entrant dans la composition des mortiers (ciment, perlite, sable et adjuvant). Ce qui constitue une étape indispensable avant d'entamer l'étude expérimentale de ces mortiers. Les caractéristiques physico-chimiques de chaque matériau ont été identifiées ce qui nous facilite à faire les essais et comprendre leur effet.

CHAPITRE II : LES METHODES EXPERIMENTALES SUR LES MORTIERS A BASE DE LA PERLITE

II.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous allons exposer les différents essais expérimentaux durant notre recherche, Ces essais ont été effectués pour l'étude des propriétés des mortiers à base de 10%, 15%, 20% et 25 % de perlite. Un mortier témoin sans perlite a été utilisé pour les besoins de comparaison. Les éprouvettes datant d'une année (conservées dans l'eau) ont subi des attaques d'acide chlorhydrique et sulfatique.

Les échantillons testés sont de formes cylindriques de 6.3cm de diamètre et de 12.6cm de hauteur. Deux échantillons sont utilisés par formulation. L'essai a été réalisé après 90 jours de conservation dans l'eau.

II.2. FORMULATIONS DES MORTIERS

Le tableau 20 fournit les détails des mélanges de chaque mortier

Tableau 20. Formulations des mortiers.

	M0%p	M10%p	M15%p	M20%p	M25%p
E/C	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Perlite /C	0	0.1	0.15	0.2	0.25
Sable (g)	1350	1350	1350	1350	1350
Ciment (g)	450	427.6	417.19	407.73	398.7
Perlite (g)	0	42.76	62.58	81.54	99.67
Eau (g)	225	213.8	208.59	203.86	199.35
Adjuvant (g)	0	0.3	0.5	1	1.8
Vol. de la pâte (cm ³)	369	369	369	369	369

II.3. ESSAIS DES ATTAQUES ACIDES

L'essai de la résistance aux attaques acides, consiste à suivre l'évolution de la masse des échantillons de mortiers immergés dans une solution saturée en acide (2% en volume).

Des essais d'immersion dans des solutions d'acide sulfurique (H₂SO₄) et d'acide chlorhydrique (HCl) ont été effectués pour évaluer la résistance des différentes formulations de mortiers.

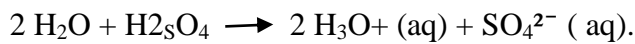
II.3.1. Acide chlorhydrique (HCl)

L'acide chlorhydrique est une solution aqueuse ayant pour solutés des ions de type oxonium (plus précisément des ions hydrate d'hydrogène H_3O^+) et des ions chlorure (Cl^-). On peut l'obtenir par dissolution dans l'eau (H_2O) du chlorure d'hydrogène (HCl) qui est un gaz.

Le HCl est un acide fort qui s'ionise totalement en solution aqueuse. Etant un liquide très corrosif, il doit être manié avec précaution. L'acide chlorhydrique concentré peut avoir un pH inférieur à 1.

II.3. 2. Acide sulfurique (H_2SO_4)

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



II.3.3. Préparations des solutions

Les attaques acides ont été effectuées sur des éprouvettes de mortier témoin et à base de perlite datant d'une année et préparées par les étudiants en Master II de l'année dernière (figure 19).



Figure 19 éprouvettes à l'état initial

Pour préparer les solutions où on va conserver les éprouvettes on doit calculer combien mettre d'acide et d'eau pour être dans les normes.

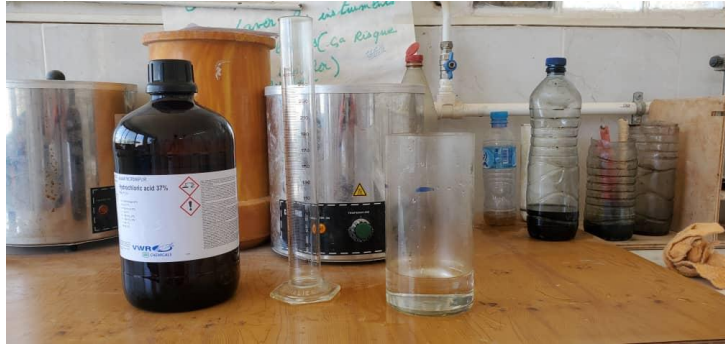


Figure 20 Concentration d'acide

Deux catégories de bacs ont été utilisés :

1. Un petit pour l'attaque des éprouvettes témoins : 3 éprouvettes pour l'HCL et trois pour l'H₂SO₄ (figure 21).
2. 4 autres bacs pour mettre les éprouvettes de perlites, 6 dans chaque bac (figure 22):
 - Le premier avec l'acide HCL, 3 éprouvettes de 10% de perlite et 3 autres de 15% de perlite.
 - Le deuxième avec l'acide HCL, 3 éprouvettes de 20% de perlite et 3 autres de 25% de perlite.
 - Le troisième avec l'acide H₂SO₄, 3 éprouvettes de 10% de perlite et 3 autres de 15% de perlite.
 - Le quatrième avec l'acide H₂SO₄, 3 éprouvettes de 20% de perlite et 3 autres de 25% de perlite.



Figure 21 Bac des mortiers témoins



Figure 22 position de tous les éprouvettes dans leurs bacs

On prépare la solution et on pèse nos éprouvettes (figure 24) après on les mets l'une après l'autre et l'une un peu loin de l'autre pour laisser l'espace entre eux et on met un filet en dessous pour que la solution touche toutes les parties des éprouvettes (figure 23).

On change les solutions toutes les semaines pendant 9 semaines.



Figure 23 Filet qu'on met en bas des éprouvettes

Calcul de la solution du mortier témoin

$$4 \times 4 \times 16 \times 3 \times 3 = 2,304 L$$

Calcul de solution des mortiers de perlite

$$4 \times 4 \times 16 \times 6 \times 3 = 4,608 L$$

Calcul de la concentration d'acide HCl dans 1L

$$\frac{0.02 \times 1000}{37} = 54.05 \text{ mL}$$

Calcul de la concentration d'acide HCl pour les mortiers témoins

$$54.05 \times 2.304 = 125 \text{ mL}$$

On a donc 125 mL d'acide HCl dans 2.304 L de solution.

Calcul de la concentration d'acide HCl pour les mortiers de perlite

$$54.05 \times 4.608 = 249 \text{ mL}$$

On a donc 249 mL d'acide HCl dans 4.608 L de solution.

Calcul de la concentration d'acide H2SO4 dans 1L

$$\frac{0.02 \times 1000}{98} = 20.05 \text{ mL}$$

Calcul de la concentration d'acide H2SO4 pour les mortiers témoins

$$20.05 \times 2.304 = 47 \text{ mL}$$

On a donc 47 mL d'acide H2SO4 dans 2.304 L de solution.

Calcul de la concentration d'acide H2SO4 pour les mortiers de perlite

$$20.05 \times 4.608 = 94 \text{ mL}$$

On a donc 94 mL d'acide H2SO4 dans 4.608 L de solution.

II.3.4. Perte de masse

Les éprouvettes des mortiers témoins et à base de perlite ont été immergées dans des solutions contenant 5% d'acide chloridrique et d'acide sulfurique pour une durée de 7, 14 et 28 jours. Chaque semaine une pesée est effectuée pour évaluer le pourcentage de perte de masse.



Figure 24 Prise de poids des éprouvettes avant de les mettre dans les solutions



Figure 25 *Prise de poids des mortiers après nettoyage*



Figure 26 éprouvettes laissé 30 min avant de les peser (HCL)



Figure 27 éprouvettes laissé 30 min avant de les peser (H₂SO₄)

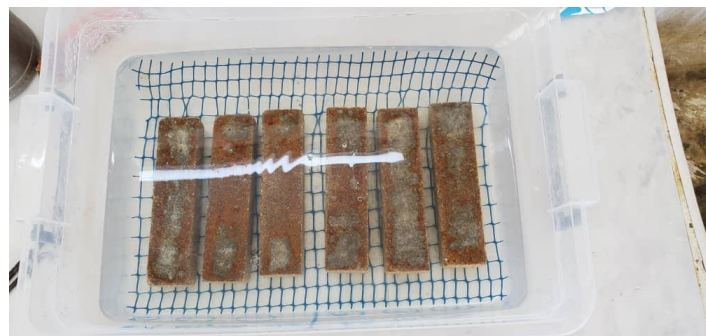


Figure 28 Eprouvettes de mortiers immergées en solution acide HCl 2%.



Figure 29 Echantillons de mortiers immergés en solution acide H_2SO_4 2%.

II.4. CONCLUSION

Les essais physiques, les analyses chimiques et les analyses minéralogiques effectués dans les différents laboratoires donnent une idée générale sur les caractéristiques principales des matériaux servant à la formulation des mortiers qui seront étudiés au chapitre suivant.

***PARTIE III :
RESULTATS
ET
ANALYSES***

CHAPITRE I : BILAN DES RESULTATS DES ESSAIS DEJA EFFECTUES

I.1. INTRODUCTION

Dans la partie précédente nous avons donné les caractéristiques principales des matériaux entrant dans la constitution des mortiers ainsi que les méthodes d'essais, dans cette partie nous allons présenter un résumé des résultats déjà effectués [Masters] relatifs aux essais sur mortiers à base de perlite (0%, 10% ,15%, 20% et 25%).en vue de montrer l'influence de la perlite sur leurs comportements à l'état frais et durci.

I.2. RESULTATS DES ESSAIS SUR PATES NORMALISEES

I.2.1. Essais de consistances

Les résultats de consistance obtenus pour chaque composition de pâte de ciment sont notés dans le tableau 21.

Tableau 21. Formulation des pâtes

Les pâtes	Pâte (0%p)	Pâte 10%p	Pâte 15%p	Pâte 20%p	Pâte 25%p
Eau(g)	135.5	135.6	135.7	135.8	135.9
Ciment (g)	500	450	425	400	375
Perlite(g)	0	50	75	100	125
E/L	0.271	0.2712	0.2714	0.2716	0.2718

Le rapport E/L croit avec l'augmentation légère du pourcentage de perlite, cela à cause de la demande en eau par la pâte de ciment pour avoir une consistance normale.

L'absorption et la réduction d'eau destinée à l'hydratation du ciment est probablement due à la présence de la poudre de perlite. Ceci est dû probablement à la grande surface spécifique présentée par le mélange et donc un fort appel aux molécules d'eau afin de mouiller toute la surface est constaté.

I.2.2. Essais de prise

La figure 30 donne les valeurs des temps de début de prise, fin de prise et les temps de prise, obtenus par les essais sur les pâtes témoin et celles contenant 10% et 20% de perlite par rapport au dosage du ciment.

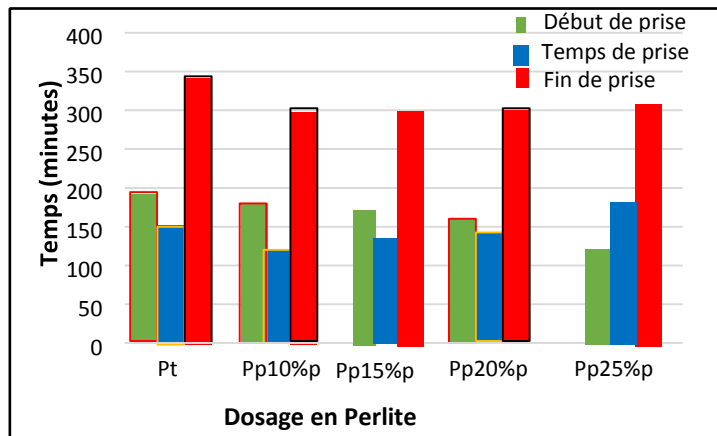


Figure 30 : Temps de prise des pâtes à base de perlite

Comme le montre la figure 30, tous les temps de début de prise enregistrés sur les ciments contenant la perlite naturelle sont supérieurs à 45 min et tous les temps de fin de prise sont inférieurs à 420 min. Cela confirme que tous les mélanges contenant de la perlite naturelle sont satisfaites les exigences de la norme EN196-1.

Le résultat décrit clairement, que les temps de début de prise sont accélérés avec l'ajout de la perlite naturelle tandis que les temps de fin de prise, ils se stabilisent pour les pâtes avec 10 et plus de perlite. Il apparaît que l'ajout de la perlite affecte légèrement les temps de prise puisqu'un écart maximal de 32 minutes est enregistré entre la pâte témoin et celle dont 10% de perlite ont été substitués au ciment. Plusieurs chercheurs, rapportent des résultats similaires sur l'augmentation des temps de prise dans le cas des pâtes incorporant des ajouts pouzzolaniques à teneur élevée en Al_2O_3 (13,68 % pour la perlite de Maghnia). Nos résultats prouvent que la présence de la perlite dans les mortiers même à un dosage de 20% n'affecte pas beaucoup le temps de prise.

I.3. RESULTATS DES ESSAIS SUR MORTIERS FRAIS

I.3.1. Essai de maniabilité

La comparaison entre plusieurs formulations exige une maniabilité équivalente. Les temps d'écoulement des mortiers contenant la perlite doivent être proches de celui du mortier témoin. Le rapport E/C est fixé, égal à 0,5.

Comme référence, la maniabilité obtenue, mesurée à l'aide d'un Maniabilimètre sur un mortier témoin a été d'environ 12s (Figure 31).

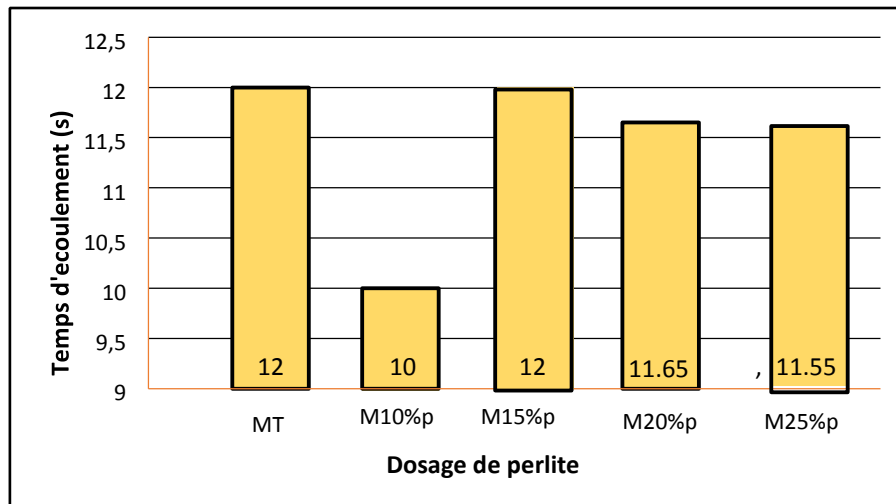


Figure 31. Temps d'écoulement en fonction du dosage en Perlite des mortiers.

D'après l'histogramme dans la figure I.3 on observe que les temps d'écoulements des mélanges avec perlite sont légèrement inférieurs à celui du mortier témoin mais les temps satisfont..., Pour garder une maniabilité plus ou moins constante, on augmente la quantité d'adjuvant nécessaire pour l'obtention d'un mélange maniable et ouvrable.

Les recherches précédentes ont également prouvé que le mortier avec du ciment Portland sans ajout présente une maniabilité supérieure aux mortiers pouzzolaniques. Ainsi, la maniabilité des mortiers pouzzolaniques diminue avec l'augmentation du taux de substitution du ciment par la perlite. Ce qui prouve que l'augmentation du taux de la perlite accroît sensiblement la demande en eau (15).

Ceci est en accord avec les résultats de recherches de Senhadji (16) et Chihaoui (5) qui ont trouvé les mêmes résultats des essais menés sur des mortiers à base de plusieurs ajouts pouzzolaniques notamment la perlite. Ils indiquent une diminution de la maniabilité à cause de leur demande en eau qui est supérieure à celle du mortier de ciment pur.

En conclusion la maniabilité est inversement proportionnelle au dosage de l'ajout pouzzolanique.

I.4. RESULTATS DES ESSAIS SUR MORTIER DURCI

I.4.1. Absorption capillaire

La figure 32 représente les résultats obtenus de l'essai d'absorption capillaire des mortiers.

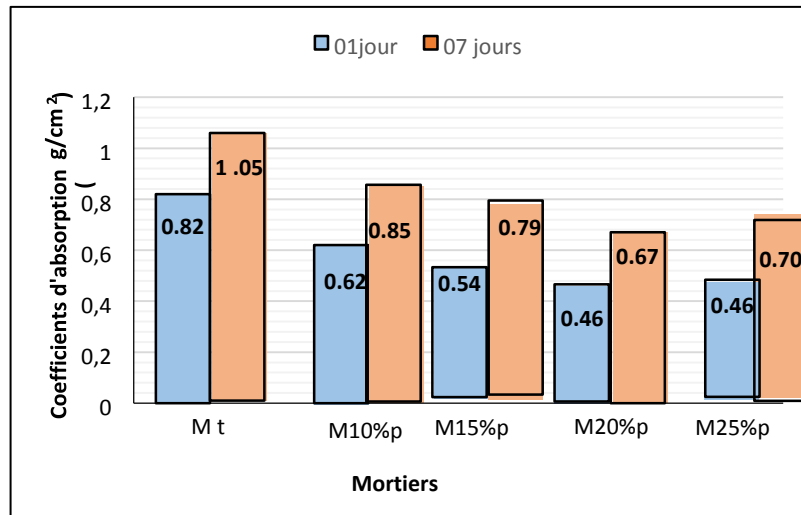


Figure 32 Evolution des coefficients d'absorption capillaire des différents mortiers.

L'absorption d'eau du mortier témoin est plus élevée que celles des mortiers à base 10, 15, 20 et 25% de perlite et ce pour les deux échéances.

L'accroissement de l'absorption d'eau relative à chaque mortier est observé entre le premier et le septième jour. On distingue qu'avec l'augmentation du pourcentage de la perlite le coefficient de l'absorption capillaire diminue ce qui rend l'effet de la substitution plus avantageuse et notamment le dosage de 20%.

Ainsi, on peut dire que la perlite a contribué à sceller les capillaires résultant de l'interaction du ciment, de l'eau et du sable.

Ces résultats sont en accord avec les résultats de Bourroubey (43) et Maamar Benhadjar et al. (44).

I.4.2. Résistances mécaniques des mortiers

La figure 33 donne les résultats des résistances à la compression menées sur les mortiers témoins et à base de perlite.

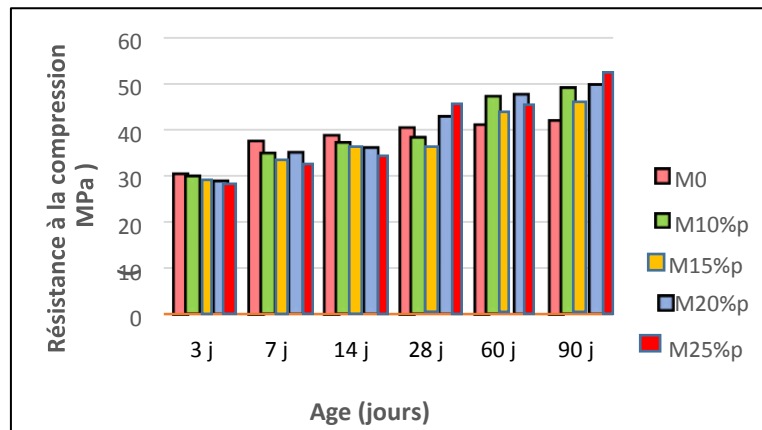


Figure 33. Evolution des résistances à la compression en fonction du temps.

Une augmentation continue de la résistance à la compression pour les différents mortiers, en fonction de l'âge (3, 7, 14 et 28, 60, 90 jours) a été notée. Cet accroissement est la conséquence normale de l'hydratation du ciment au cours du temps. De 3 à 14 jours, c'est le mortier témoin qui prend le dessus en développant des résistances plus élevées. Au-delà de cette échéance, les mortiers perlitiques commencent à se distinguer du mortier témoin par leurs performances mécaniques notamment le mortier M25%p.

Cette augmentation peut être attribuée aux rôles complémentaires de l'effet filler et l'effet pouzzolanique de la perlite au sein de la matrice cimentaire. L'effet filler réduit la porosité de la zone de transition pâte-granulat et l'effet pouzzolanique contribue à la formation de gels de C-S-H issus de la réaction pouzzolanique qui se déclenche tardivement entre la silice présente dans la perlite et la portlandite générée par l'hydratation du ciment, d'où une structure plus dense, plus compacte et par conséquent une pâte plus résistante (15).

1.5. CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons présenté un résumé des résultats des essais déjà effectués à l'état **frais et durci** sur des mortiers témoin et avec différents pourcentages de perlite. L'essai de consistance sur les pâtes à montrer que la présence de la perlite exige une augmentation du besoin de la quantité d'eau. Ainsi que le temps de prise amoindri avec l'augmentation du pourcentage de l'ajout de la perlite dans les pâtes de ciment et reste inférieur à celui au témoin. Ceci implique que la perlite contribue légèrement à l'accélération de la prise. Enfin, l'augmentation de la quantité d'adjuvant est nécessaire pour l'obtention d'un mélange maniable et ouvrable, avec une maniabilité plus ou moins constante et comparable à celle du mortier témoin.

Les résultats des essais mécaniques ont mis en évidence l'effet des différents pourcentages de la perlite 10, 15, 20 et 25% sur le développement du comportement mécanique des mortiers. Ils permettent de conclure qu'on peut utiliser jusqu'à 25% de perlite car c'est le pourcentage idéal, il donne des bonnes résistances à la compression et une faible absorption d'eau parce

que les pores capillaires de la matrice cimentaire sont remplis par la perlite et ils sont ainsi réduits.

CHAPITRE II : RESULTATS DES ESSAIS D'ATTAQUES ACIDES

II.1. INTRODUCTION

Ce chapitre se concentre sur les résultats de nos essais d'attaques d'acides sur des échantillons de mortier. Ces essais sont cruciaux pour évaluer la résistance et la durabilité des mortiers face aux agressions chimiques potentielles. Nous avons élaboré une méthodologie rigoureuse, exposant les échantillons à différents acides couramment rencontrés dans les environnements urbains et industriels. Dans ce chapitre, nous présenterons les données brutes de nos essais, mettrons en évidence les changements observés, et analyserons les facteurs influençant la résistance à l'attaque acide. Ces résultats contribueront à une meilleure compréhension de la performance des mortiers dans des environnements corrosifs et auront des implications pratiques pour l'industrie de la construction.

II.2 PERTE DE MASSE

L'essai de la résistance aux attaques acides, consiste à suivre l'évolution de la masse d'échantillons immergés dans une solution saturée en acide (2% en volume).

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

Perte de masse des éprouvettes conservées en Hcl

Le suivi de la perte en poids en fonction du temps des éprouvettes des mortiers immergées dans la solution à base d'acide chlorhydrique HCl à 2% de concentration sont représentés sur les tableaux et figures ci-dessous.

Tableau 22 Perte de masse du mortier témoin conservé en (HCl)

MT 0% - Mortier témoin (HCl)					
	1	2	3	Moyenne	% perte de masse
Mortier intact	571,7	562,1	567,1	566,966667	0
1ère semaine	530,9	524,8	525,9	527,2	7,0139338
2ème semaine	487,8	481,5	471,5	480,266667	15,29190429
3ème semaine	418,1	409,4	422,1	416,533333	26,53301193
4ème semaine	371,9	367,4	373,7	371	34,56405432
5ème semaine	318,4	324,2	333	325,2	42,64213064
6ème semaine	273,5	286,2	297,7	285,8	49,59139279
7ème semaine	175,7	209,2	186,5	190,466667	66,40602034
8ème semaine	140,1	168,8	155,6	154,833333	72,69092833
9ème semaine	107,1	139,9	128,6	125,2	77,91757305

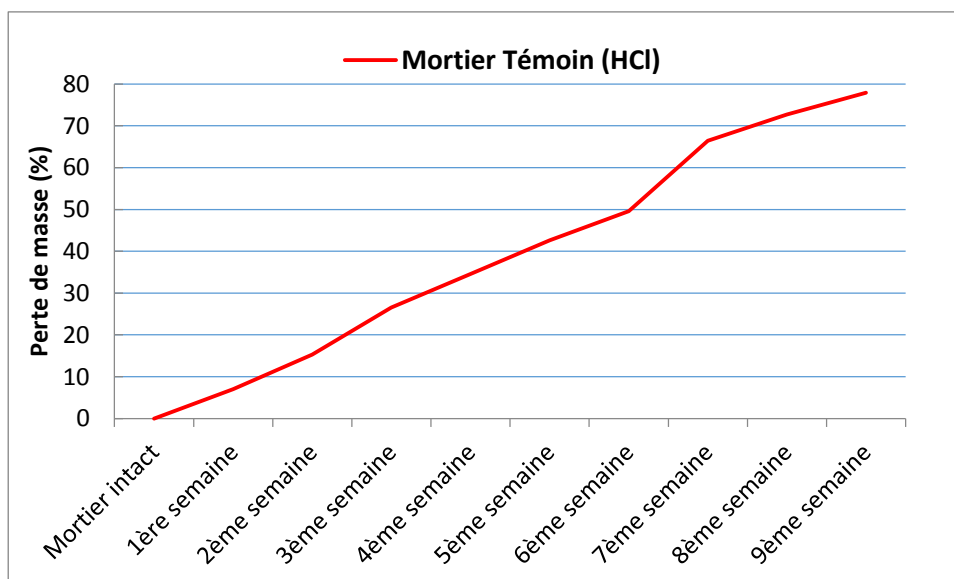


Figure 34: Perte de masse du mortier témoin âgé de 1 ans et immergé dans la solution en (2% HCl)

Tableau 23: Perte de masse du mortier Pr 10% conservé en (HCl)

MPr 10% - Mortier 10% P (HCl)					
	1	2	3	Moyenne	% perte de masse
Mortier intact	574,9	548,8	564,4	562,7	0
1ère semaine	517,1	529,6	543,6	530,1	5,793495646
2ème semaine	474,9	490,5	506,8	490,733333	12,78952669
3ème semaine	461,5	478,3	443,1	460,966667	18,07949766
4ème semaine	451,7	433	417,3	434	22,87186778
5ème semaine	415,6	399,1	432,4	415,7	26,12404478

6ème semaine	396,2	382,2	414,6	397,666667	29,32883123
7ème semaine	370,2	358,9	384,5	371,2	34,03234406
8ème semaine	342,5	335,6	363,2	347,1	38,31526568
9ème semaine	315,1	310,2	338,9	321,4	42,88253066

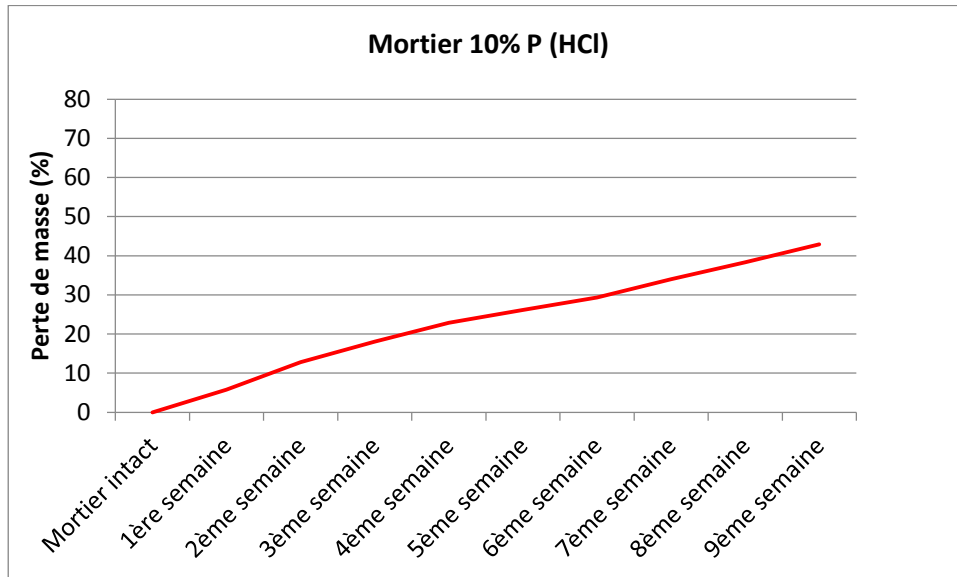


Figure 35 Perte de masse du mortier Pr 10% âgé de 1 ans et immergé dans la solution en (2% HCl)

Tableau 24: perte de masse du mortier Pr 15% conservé en (HCl)

MPr 15% - Mortier 15% P (HCl)					
	1	2	3	Moyenne	% perte de masse
Mortier intact	566,1	566	576,5	569,533333	0
1ère semaine	544,3	536,2	535,4	538,633333	5,425494557
2ème semaine	499,4	506,1	505,2	503,566667	11,58258223
3ème semaine	484,1	481,3	477,2	480,866667	15,56830153
4ème semaine	455,4	463,6	459	459,333333	19,34917476
5ème semaine	446,2	441,7	436,1	441,333333	22,50965703
6ème semaine	428	425,7	420	424,566667	25,45358773
7ème semaine	407	406,3	400,3	404,533333	28,97108744
8ème semaine	389,4	391,4	376	385,6	32,29544656
9ème semaine	367,4	373	357,7	366,033333	35,73100784

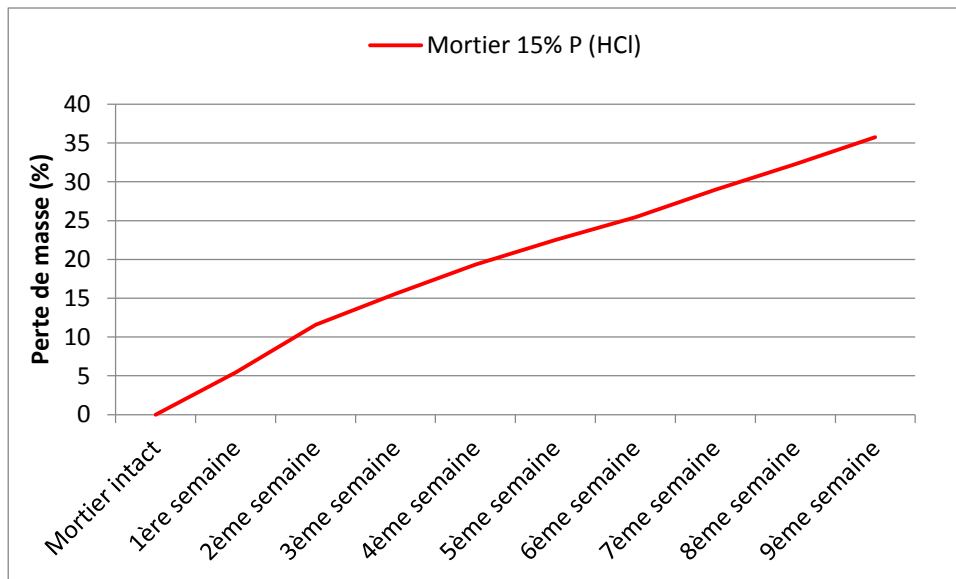


Figure 36 : perte de masse du mortier Pr 15% âgé de 1 ans et immergé dans la solution en (2% HCl)

Tableau 25 Perte de masse du mortier Pr 20% conservé en (HCl)

	MPr 20% - Mortier 20% P (HCl)				
	1	2	3	Moyenne	% perte de masse
Mortier intact	568,4	559,7	564,4	564,166667	0
1ère semaine	539,8	526,1	529,5	531,8	5,737075332
2ème semaine	507,6	488,2	497,8	497,866667	11,75184638
3ème semaine	485,7	465,2	475,6	475,5	15,71639586
4ème semaine	462,2	444,4	453,1	453,233333	19,66322009
5ème semaine	447,5	428,4	438,4	438,1	22,34564254
6ème semaine	434,3	413	424,1	423,8	24,88035451
7ème semaine	413,3	393,7	406,2	404,4	28,31905465
8ème semaine	393,9	374,8	386,4	385,033333	31,75184638
9ème semaine	367,9	355,5	363,2	362,2	35,79911374

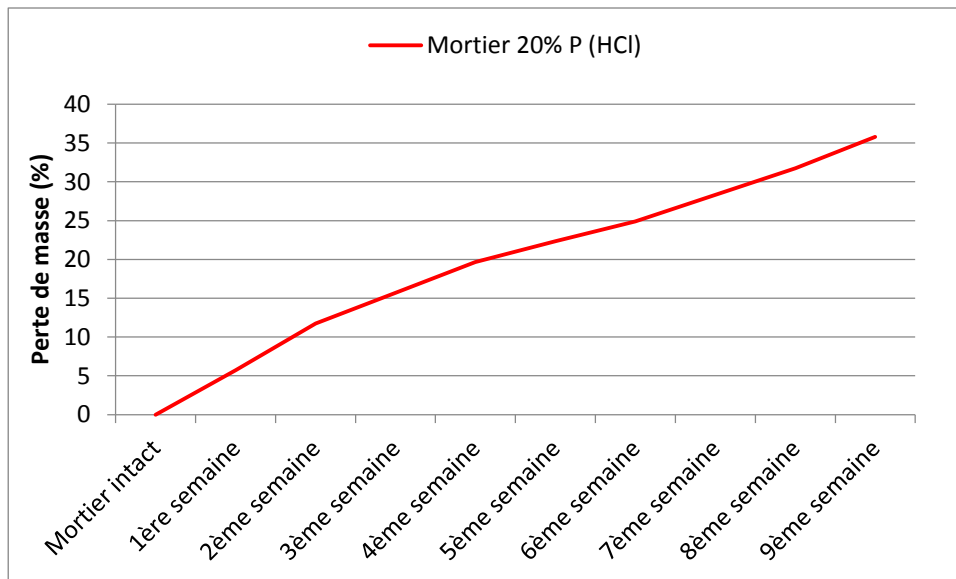


Figure 37 Perte de masse du mortier Pr 20% âgé de 1 ans et immergé dans la solution en (2% HCl)

Tableau 26 : Perte de masse du mortier Pr 25% conservé en (HCl)

MPr 25% - Mortier 25% P (HCl)					
	1	2	3	Moyenne	% perte de masse
Mortier intact	557,4	558,4	546,6	554,133333	0
1ère semaine	518,4	530	528,8	525,733333	5,125120308
2ème semaine	491,2	502,6	508,2	500,666667	9,648700674
3ème semaine	471,7	481,7	491,3	481,566667	13,09552454
4ème semaine	470	460,2	448,7	459,633333	17,05365736
5ème semaine	445,1	434,2	452,9	444,066667	19,86284889
6ème semaine	430,5	419,3	437,7	429,166667	22,55173244
7ème semaine	410,5	403,6	421,7	411,933333	25,66169394
8ème semaine	388	387,3	407,1	394,133333	28,87391723
9ème semaine	372	367,6	385,4	375	32,3267565

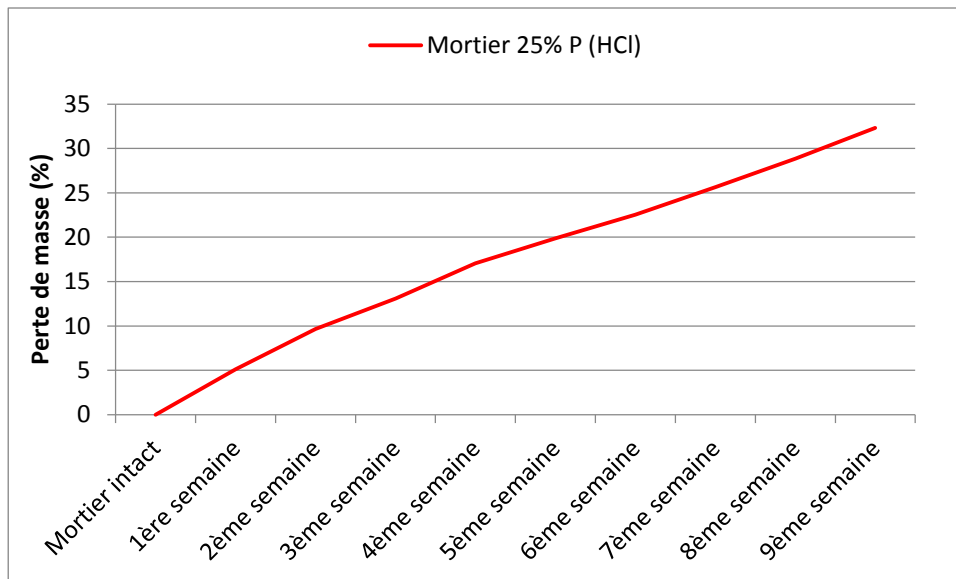


Figure 38 Perte de masse du mortier Pr 25% âgé de 1 ans et immergé dans la solution en (2% HCl)

Perte de masse des éprouvettes conservées en H₂SO₄

Le suivi de la perte en poids en fonction du temps des éprouvettes des mortiers immergées dans la solution à base d'acide sulfurique H₂SO₄ à 2% de concentration sont représentés sur les tableaux et figures ci-dessous.

Tableau 27 : perte de masse du mortier témoin conservé en (H₂SO₄)

MT 0% -Mortier témoin (H ₂ SO ₄)					
	1	2	3	Moyenne	% perte de masse
Mortier intact	585,6	593,4	587,5	588,833333	0
1ère semaine	565,9	570	563,6	566,5	3,79281064
2ème semaine	525,6	528,9	522,3	525,6	10,7387489
3ème semaine	480,6	481,1	475,4	479,033333	18,6470422
4ème semaine	442,5	432,9	438,2	437,866667	25,6382678
5ème semaine	391,5	399	406,4	398,966667	32,2445514
6ème semaine	373,4	357,1	354	361,5	38,6074158
7ème semaine	316,8	319,9	341,7	326,133333	44,6136428
8ème semaine	313	284,6	286,9	294,833333	49,9292386
9ème semaine	284,4	252,3	254,3	263,666667	55,2221908

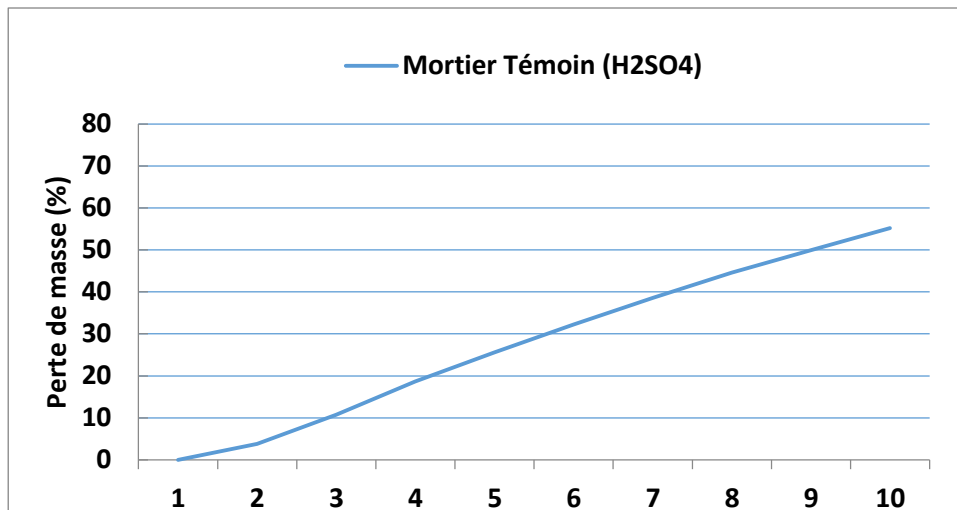


Figure 39: Perte de masse du mortier témoin âgé de 1ans et immergé dans la solution en (2% H_2SO_4)

Tableau 28: perte de masse du mortier Pr 10 % en (H_2SO_4)

MPr 10% - Mortier 10% P (H_2SO_4)					
	1	2	3	Moyenne	% perte de masse
Mortier intact	601	599,7	601	600,566667	0
1ère semaine	576,2	579,8	575,9	577,3	3,87411889
2ème semaine	532,5	531,5	529,4	531,133333	11,5613032
3ème semaine	478,2	477,3	474,5	476,666667	20,6305156
4ème semaine	432,4	431,7	427,9	430,666667	28,2899484
5ème semaine	390,1	387,8	384	387,3	35,5109064
6ème semaine	348,1	344,6	341	344,566667	42,6264084
7ème semaine	308,2	304	300,9	304,366667	49,3200866
8ème semaine	272,5	267,3	264,2	268	55,3754787
9ème semaine	229,3	239,9	232,3	233,833333	61,0645501

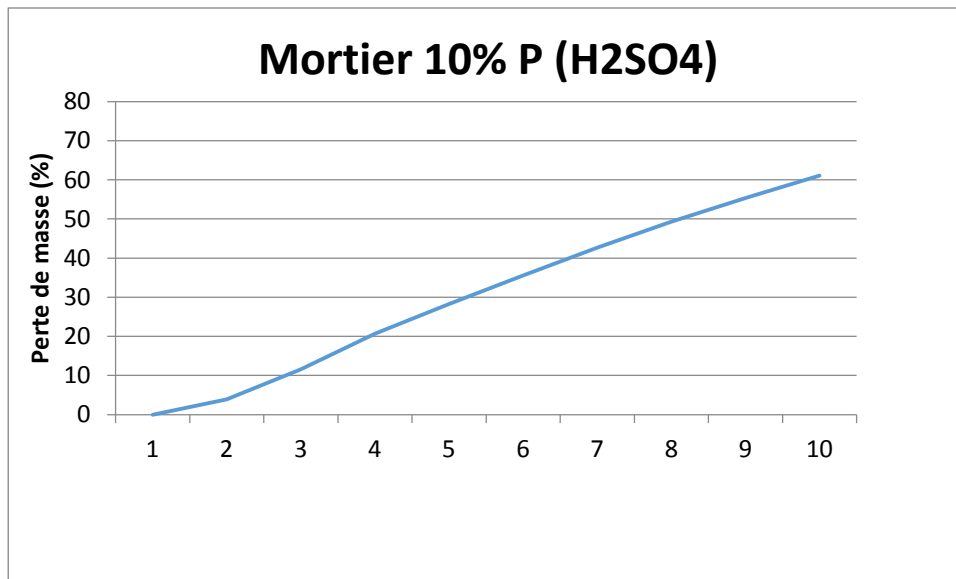


Figure 40 : perte de masse du mortier Pr 10 % âgé de 1ans et immergé dans la solution en (2% H_2SO_4)

Tableau 29 : Perte de masse du mortier Pr 15 % en (H_2SO_4)

MPr 15% - Mortier 15% P (H_2SO_4)					
	1	2	3	Moyenne	% perte de masse
Mortier intact	579,9	590,1	598,7	589,566667	0
1ère semaine	574,7	554,8	568,4	565,966667	4,00294001
2ème semaine	525,9	506	522,9	518,266667	12,0936281
3ème semaine	471,1	451,5	467,3	463,3	21,4168598
4ème semaine	427,7	407,7	422,3	419,233333	28,8912761
5ème semaine	383,2	365,3	380	376,166667	36,1960762
6ème semaine	340,1	324	337,5	333,866667	43,3708373
7ème semaine	300,8	286,8	299,8	295,8	49,827557
8ème semaine	265,1	252,3	264,5	260,633333	55,7923899
9ème semaine	229,4	217,9	231,6	226,3	61,6158761

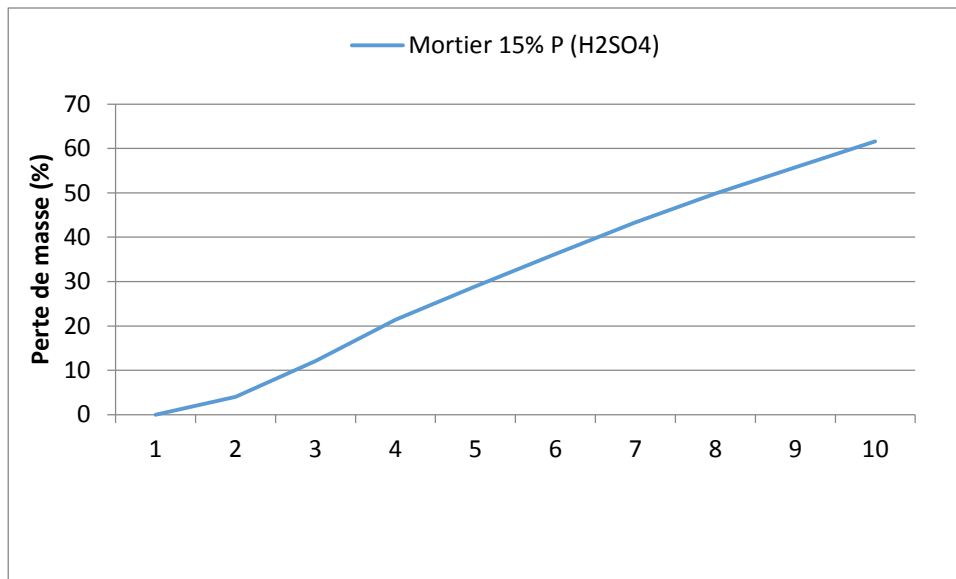


Figure 41 perte de masse du mortier Pr 15 % âgé de 1 ans et immergé dans la solution en (2% H_2SO_4)

Tableau 30 : perte de masse du mortier Pr 20% en (H_2SO_4)

MPr 20% - Mortier 20% P (H_2SO_4)					
	1	2	3	Moyenne	% perte de masse
Mortier intact	602	612,8	588,9	601,233333	0
1ère semaine	569,1	591,5	584	581,533333	3,2765981
2ème semaine	521,3	537,6	542,3	533,733333	11,2269224
3ème semaine	494,2	490	475,4	486,533333	19,0774519
4ème semaine	445,9	442,5	426,4	438,266667	27,1053945
5ème semaine	399,5	395,6	381,8	392,3	34,75079
6ème semaine	356,2	350,6	338,3	348,366667	42,0579919
7ème semaine	319,6	310,8	298,6	309,666667	48,4947608
8ème semaine	283,2	275,1	262,9	273,733333	54,4713644
9ème semaine	228,2	238,6	228,2	231,666667	61,4680934

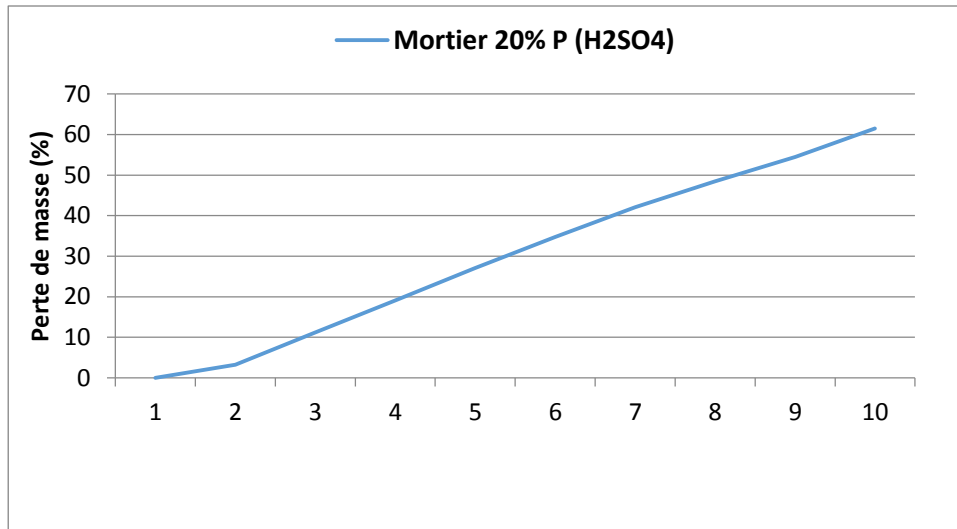


Figure 42 perte de masse du mortier Pr 20% âgé de 1 ans et immergé dans la solution en (2% H_2SO_4)

Tableau 31 : Perte de masse du mortier Pr 25% en (H_2SO_4)

MPr 25% - Mortier 25% P (H_2SO_4)					
	1	2	3	Moyenne	% perte de masse
Mortier intact	571,6	579,6	574,9	575,366667	0
1ère semaine	560,8	559,1	552,4	557,433333	3,11685302
2ème semaine	525,8	509,3	498,7	511,266667	11,1407219
3ème semaine	476,4	461,6	449,3	462,433333	19,6280633
4ème semaine	429,6	416,6	405,8	417,333333	27,4665431
5ème semaine	384,9	371,7	361,2	372,6	35,2412954
6ème semaine	342,7	331,4	320,4	331,5	42,3845664
7ème semaine	306,4	294,8	284,5	295,233333	48,6877933
8ème semaine	270,8	257,6	248,9	259,1	54,9678466
9ème semaine	237,5	224,5	214,8	225,6	60,7902207

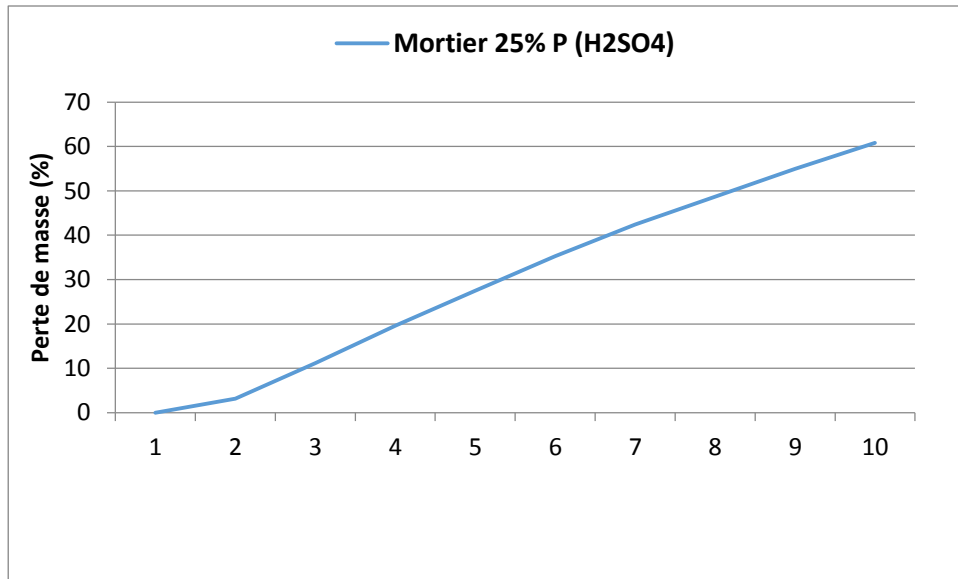


Figure 43 : Perte de masse du mortier Pr 25% âgé de 1 ans et immergé dans la solution en (2% H₂SO₄)

II.3 INTERPRETATION DES RESULTATS

Les figures 44 et 45 montent l'évolution de la perte de masse des mortiers (0%, 10%, 15%, 20% et 25%) à base de perlite en fonction de la période d'immersion dans une solution à de 2 % de HCl et H₂SO₄.

- *Résultats de l'attaque par l'acide chlorhydrique HCl*

La Figure 44 montre la variation de la perte de masse des mortiers MT, MPr 10%, MPr 15%, MPr 20% et MPr 25% confectionnés avec et sans ajout de la Pr avec différents pourcentages, en fonction de la période d'immersion dans la solution de 2% HCl pendant 63 jours.

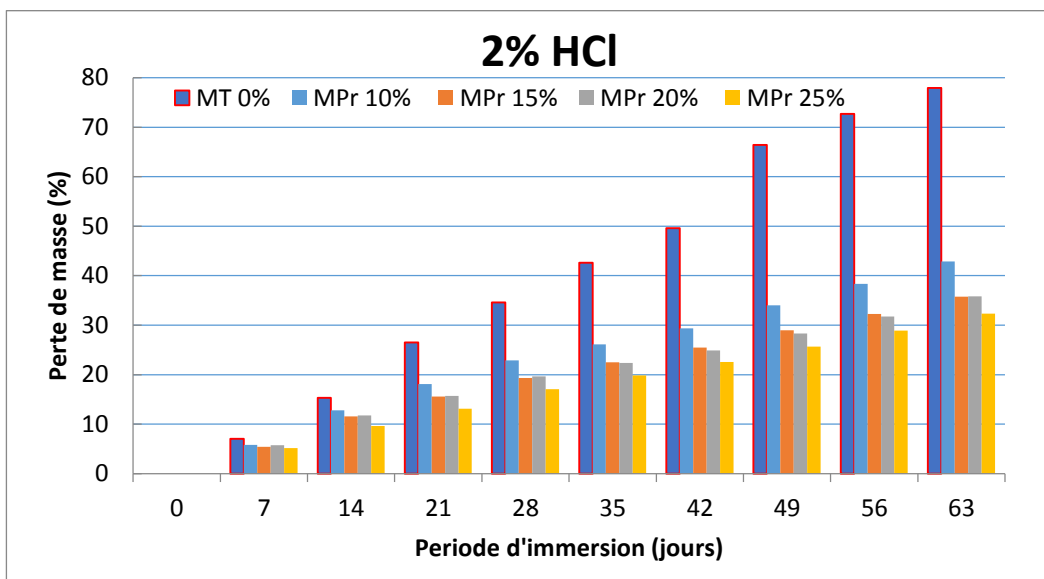


Figure 44 Evolution de la perte de masse des mortiers à base de perlite en fonction de la période d'immersion dans la solution d'HCl

On constate d'abord que tous les mortiers avec et sans ajout de la perlite, sans exception, accusent des pertes de poids permanents à toutes les périodes considérées. Il est remarquable d'apercevoir que tous les mortiers à base de perlite sans exception accusent des pertes en masse inférieures à celle du mortier témoin MT et ceci à toutes les échéances de la période d'immersion.

On peut affirmer que la perlite a joué un rôle important pour permettre aux mortiers de résister à l'agression de l'acide chlorhydrique. La réduction de perte de masse par rapport à MT est de 35.03, 42.18, 42.12 et 45.59 pour les mortiers MPr 10%, MPr 15%, MPr 20% et MPr 25% respectivement à l'échéance 64 jours. Mais c'est le pourcentage de perlite de 25% qui affiche les pertes de masses les moins élevées, donc plus le pourcentage de perlite est grand plus la résistance du mortier est grande à l'agression acide chlorhydrique (2% HCl).

- *Résultats de l'attaque par l'acide H₂SO₄*

La Figure 45 montre la variation de la perte de masse des mortiers MT, MPr 10%, MPr 15%, MPr 20% et MPr 25% confectionnés avec et sans ajout de la Pr avec différents pourcentages, en fonction de la période d'immersion dans la solution de 2% H₂SO₄ pendant 63 jours.

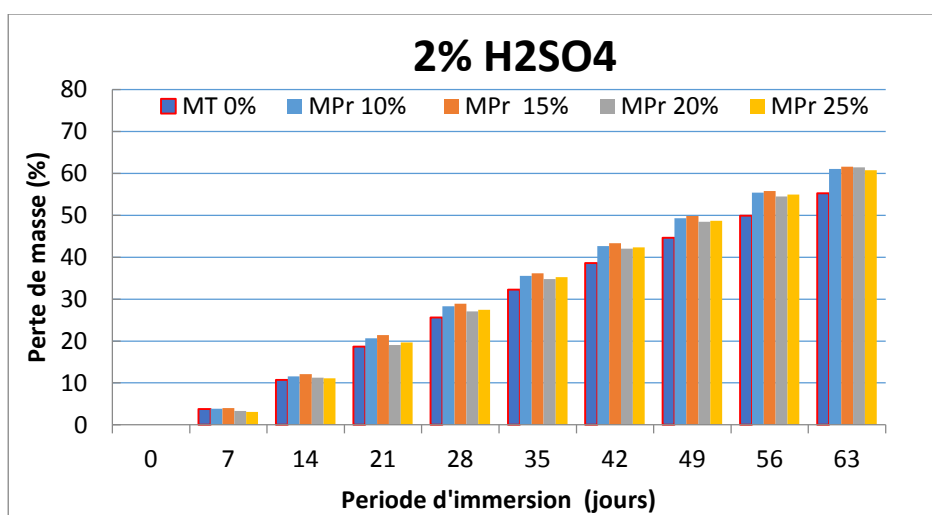


Figure 45 : Evolution de la perte de masse des mortiers à base de perlite en fonction de la période d'immersion dans la solution d'H₂SO₄

On remarque dans la figure II.12 que la perte de masse pour les mortiers à base de perlite dans l'H₂SO₄ commence après 7 jours mais presque tous les pourcentages ont presque la même moyenne de perte de masse, mais avec le temps on voit que la moyenne de perte de masse du mortier témoin est moins que tous les autres éprouvettes même si la différence est légère, et par rapport à l'HCl on peut dire que l'attaque d'acide sulfurique est plus agressive que celle de l'acide chlorhydrique.

Examen visuel

Acide chlorhydrique

L'examen visuel des échantillons en contact avec l'acide HCl, est un moyen pour évaluer la détérioration des propriétés physiques et les dégradations de l'aspect extérieur des éprouvettes.

Les Figures 46 et 47 montent l'état des échantillons après 9 semaines d'immersion dans la solution 2% HCl



Figure 46: perte de masse et changement de forme et de couleur du mortier (HCl)



Figure 47 Fragilité du mortier témoin après 9 semaines dans la solution

Acide sulfurique

3. Perte de poids mais sans perdre la forme cubique pour tous les mortiers témoin et à base de perlite
4. La surface est recouverte d'une couche de couleur blanche différente
5. Après nettoyage on remarque le changement de couleur des mortiers et apparition des petits trous.



Figure 48 Apparition de la couche blanche dès la première semaine

II.4 CONCLUSION

En conclusion de ce chapitre sur les attaques acides (HCl et H_2SO_4) sur les mortiers à base de perlite avec différents pourcentages (0%, 10%, 15%, 20%, 25%), il est clair que l'ajout de perlite a notablement réduit la vulnérabilité des mortiers à l'attaque acide. Cette diminution de la vulnérabilité est plus marquée à mesure que le pourcentage de perlite augmente. L'acide sulfurique (H_2SO_4) a montré des effets plus dommageables que l'acide chlorhydrique (HCl), et la composition globale des mortiers, notamment la proportion de ciment, influence également leur résistance à l'attaque acide. En somme, l'incorporation de perlite offre un potentiel prometteur pour améliorer la durabilité des structures en environnements corrosifs, mais des recherches plus poussées sont nécessaires pour optimiser les formulations.

CONCLUSION GENERALE

Ce mémoire s'est concentré sur l'exploration de la durabilité des mortiers à base de perlite, avec des pourcentages variant de 0% à 25%, face à des attaques acides simulées à l'aide d'acide chlorhydrique (HCl) et d'acide sulfurique (H₂SO₄). L'objectif principal de cette étude était d'évaluer comment l'incorporation de la perlite affecte la résistance de ces mortiers aux agressions chimiques, tout en offrant des perspectives pour l'amélioration de la durabilité des matériaux de construction dans des environnements corrosifs.

Les résultats obtenus dans cette recherche ont fourni des informations cruciales qui contribuent significativement à notre compréhension de l'efficacité de la perlite en tant que composant protecteur dans les mortiers exposés à des attaques acides. Voici les principales conclusions tirées de cette étude :

1. **Amélioration de la Résistance** : L'incorporation de perlite a nettement amélioré la résistance des mortiers à l'attaque acide. Les mortiers avec des pourcentages plus élevés de perlite ont montré une résistance accrue aux effets néfastes des acides.
2. **Différenciation entre les Types d'Acides** : L'acide sulfurique (H₂SO₄) a eu un impact plus sévère que l'acide chlorhydrique (HCl) sur les mortiers, soulignant l'importance de prendre en compte la nature spécifique de l'acide lors de la conception des mortiers résistants aux attaques chimiques.
3. **Influence de la Composition Globale** : Outre le pourcentage de perlite, la composition globale des mortiers, y compris la quantité de ciment et d'autres constituants, a joué un rôle dans leur résistance aux attaques acides.

En somme, cette étude confirme que l'incorporation de perlite est une stratégie prometteuse pour améliorer la durabilité des mortiers en présence d'attaques acides. Ces résultats revêtent une grande importance pour l'industrie de la construction, ouvrant la voie à des avancées dans la formulation de matériaux de construction plus résistants aux agressions chimiques.

Cependant, il est essentiel de noter que cette recherche représente une étape initiale et que des investigations futures sont nécessaires pour approfondir notre compréhension des mécanismes de protection offerts par la perlite, ainsi que pour optimiser les formulations des mortiers en fonction des besoins spécifiques de chaque application. Ces efforts continus contribueront à renforcer la durabilité des structures dans des environnements corrosifs, ce qui revêt une importance capitale pour l'industrie de la construction.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Noumia Asma , Niati Sara 2022 « Valorisation de la perlite naturelle de Maghnia dans les mortiers (15-25 %) », université abdelhamid ibn badis mostaganem, faculté de science et technologie.

Boucif Belhachemi1 et Nasr Eddine Hassaine2 « ETUDE D'UN MILIEU AGRESSIF ACIDE SUR UN MORTIER A BASE DE CIMENT COMPOSE » université aboubakr belkaid de tlemcen.

Zahira boutadjine, chahrazed bouzidi 2022, université abdelhamid ben badis mostaganem , faculté science et technologie.

Ismail Hanafi, Ait-amrane Djohra 2012 « ETUDE DE L'INFLUENCE DES AJOUTS CIMENTAIRES SUR L'ACTIVITE POZZOLANIQUE DES MORTIERS » université A.MIRA de Bejaia, faculté de technologie

ACI Committee 201 2001 , « Guide to Durable Concrete »

N. Bur , S. Roux , L. Delmas , Y. Géraud et F. Feugeas ; 2010 « Porosité des mortiers et bioréceptivité »

Safer Omar 2012 « Etude du comportement vis-à-vis des attaques sulfatiques et de la carbonatation d'un béton ordinaire à base de sédiment de dragage » , université abdelhamid ibn badis mostaganem , faculté des sciences et technologie.

Bernard Quénée, Abdelkarim Ammouche, Christophe Carde, Nouredine Rafai, Isabelle Moulin « La durabilité et le cycle de vie des bétons »

Robert S.Boynton , Kenneth A. Gutschick, 1989 « durability of mortar and masonry »

V Pavlík1 Slovak University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Department of Material Engineering, Radlinského 11, 810 05, Bratislava, Slovak Republic « Acid attack on hardened cement paste by acids forming low soluble calcium salts »

Shulanki Pal1 , Dhrubajyoti Das , Dhanjit Deka and Himanshu Garodia, 2015 « Study of Cement Mortar and its Reaction to King of Acids “Sulphuric Acid” », **Royal School of Engineering and Technology**

Seyed Mahmoodreza Joorabchian, B.Eng 2005 « DURABILITY OF CONCRETE EXPOSED TO SULFURIC ACID ATTACK » **Azad University of Tehran Central, Tehran, Iran, 2005**

Durabilité des ouvrages en béton

Belaribi Omar, 2015 « Durabilité des bétons autoplaçants à base de VASE ET DE pouzzolane» université abdelhamid ibn badis , faculté des sciences et technologie.

Safer Omar 2017 « OPTIMISATION DE LA FORMULATION D’UN ÉCO-BÉTON À BASE DE SÉDIMENTS DE DRAGAGE ET ÉTUDE DE SA RÉSISTANCE AUX ATTAQUES CHIMIQUES » université abdelhamid ibn badis , faculté des sciences et technologie.

Belguesmia Khalil 2018 « « Optimisation d’un éco-BAP à base de sédiment de dragage vis-à-vis des états frais, durci et de la durabilité » » université abdelhamid ibn badis , faculté des sciences et technologie.