



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



N° d'ordre: M...../GCA/2026

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie Civil

Option : Matériaux en Génie Civil

Thème:

**DURABILITÉ DES BÉTONS A BASE DE VASE CALCINÉE ENVERS
L'ATTAQUE ACIDE ET LA CARBONATATION NATURELLE**

Présenté par:

- CHERIEF FOUZIA
- TAKARLI NASSIMA MAROUA

Soutenu le 04/06/ 2026 devant le jury composé de :

Présidente : Dre GUERZOU TOURKIA

Examinatrice : Dre MOSTEFA FOUZIA

Encadrant : Dr BELARIBI OMAR

Co-encadrante : Pre NADIA BELAS

Année Universitaire : 2025/2026

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



REMERCIEMENT

Tout d'abord, nous rendons grâce à Dieu Tout-Puissant, Créateur de l'univers, qui nous a accordé la volonté, la détermination et la réussite nécessaires pour mener à bien ce travail.

Nous exprimons notre profonde gratitude à notre honorable encadreur, Monsieur **BELARIBI OMAR** Eddine, pour nous avoir proposé ce sujet innovant, ainsi que pour ses précieux conseils et la confiance qu'il nous a accordée tout au long de la réalisation de ce travail.

Nous adressons également nos sincères remerciements aux membres du jury :

Mesdames **Fouzia MOSTEFA** et **Tourkia GUERZOU**, pour avoir accepté de présider le jury de soutenance de ce mémoire,

Ainsi que Madame **Nadia BELAS** pour avoir accepté d'examiner et d'évaluer notre projet de fin d'études.

Nous tenons également à exprimer notre profond respect et notre reconnaissance à l'ensemble des enseignants du département de Génie Civil, qui nous ont transmis leurs connaissances et leur savoir tout au long de notre parcours universitaire.

Enfin, nous exprimons notre profonde gratitude à nos familles et à nos proches pour leur soutien, leurs encouragements et leur confiance durant tout notre parcours universitaire.

ملخص

تُعَد ديمومة الخرسانة المسلحة من أهم الخصائص التي تُحدد قدرتها على مقاومة مختلف العوامل العدوانية والمحافظة على أداؤها الميكانيكي مع مرور الزمن، حيث تتعرض المنشآت الخرسانية خلال فترة استغلالها إلى عدة ظواهر تؤثر سلباً على متانتها، من بينها الهجوم الحمضي والكربنة الطبيعية. وتُعتبر الكربنة من ظواهر الشذوذة الطبيعية التي تُسبب جميع أنواع الخرسانة، إذ تؤدي إلى انخفاض قلبية الخرسانة وتحييدها، مما يسمح بتآكل حديد التسليح ويؤثر بالتالي على ديمومة المنشآت الخرسانية وعمرها الخدمي. أما الهجوم الحمضي فيُعد من أخطر التفاعلات الكيميائية التي تُسبب تدهور البنية الداخلية للخرسانة نتيجة انحلال نواتج الإماهة وفقدان الكتلة مع الزمن.

يهدف هذا العمل إلى استكمال الدراسات والتجارب المنجزة سابقاً من طرف صافر [82] حول الخرسانة المحتوية على الطين المحروق يستخرج من سد الشرفة بمعسكر، وذلك من خلال دراسة سلوك الخرسانة المهتزة بعد مرور عشر. وقد تم التركيز على تقييم مقاومة الخرسانة للهجوم الحمضي والكربنة الطبيعية باستبدال جزء من الإسمنت بالطين المحروق بنسب 10% و20% و30%.

أظهرت نتائج الهجوم الحمضي أن الخرسانة المحتوية على 30% من الطين المحروق (BOV30%) سجلت أفضل مقاومة مقارنة بالخرسانة المرجعية (BOT) ، تليها خرسانة BOV20% ثم BOV10% ، مما يؤكد الدور الإيجابي للطين المحروق في تحسين ديمومة الخرسانة وتقليل التدهور الناتج عن الوسط الحمضي. ويُعزى ذلك إلى انخفاض نفاذية الخرسانة نتيجة التفاعل البوزولاني للطين المحروق.

فيما يخص الكربنة الطبيعية، فقد بينت النتائج وجود تزايد ملحوظ في عمق الكربنة مع مرور الزمن بالنسبة لجميع الخلطات الخرسانية، إلا أن الخرسانة المرجعية (BOT) أظهرت استقراراً نسبياً ومقاومة مقارنة بالخرسانات المحتوية على الطين المحروق. كما تبين أن الخرسانتين BOV20% وBOV30% كانتا أكثر عرضة للكربنة الطبيعية، في حين سجلت الخرسانة BOV10% سلوكاً قريباً نسبياً من الخرسانة المرجعية. وتشير هذه النتائج إلى أن إضافة الطين المحروق تساهم في تحسين مقاومة الخرسانة للهجوم الحمضي، لكنها قد تؤثر سلباً على مقاومتها للكربنة الطبيعية عند نسب الاستبدال المرتفعة.

الكلمات المفتاحية:

ديمومة الخرسانة، الطين المحروق، الهجوم الحمضي، الكربنة الطبيعية، فقدان الكتلة، عمق الكربنة، مقاومة التدهور

RESUME

La durabilité du béton armé constitue l'une des propriétés essentielles qui déterminent sa capacité à résister aux différentes agressions extérieures tout en conservant ses performances mécaniques au cours du temps. En effet, les structures en béton sont soumises, durant leur période d'exploitation, à plusieurs phénomènes susceptibles d'altérer leur durabilité, parmi lesquels l'attaque acide et la carbonatation naturelle. Cette dernière représente un phénomène naturel de vieillissement affectant tous les types de béton ; elle provoque une diminution de l'alcalinité du matériau et sa neutralisation, favorisant ainsi la corrosion des armatures et compromettant, par conséquent, la durabilité ainsi que la durée de vie des ouvrages en béton armé. Quant à l'attaque acide, elle constitue l'une des réactions chimiques les plus agressives, entraînant la dégradation de la structure interne du béton par dissolution des produits d'hydratation et perte progressive de masse au fil du temps.

Le présent travail vise à compléter les études et expérimentations réalisées antérieurement par Safer [82] sur les bétons contenant de l'argile calcinée issue du barrage de Chorfa à Mascara, à travers l'étude du comportement des bétons vibrés après dix années de conservation. L'étude s'est particulièrement concentrée sur l'évaluation de la résistance du béton à l'attaque acide et à la carbonatation naturelle, en substituant une partie du ciment par de l'argile calcinée à des taux de 10 %, 20 % et 30 %.

Les résultats de l'attaque acide ont montré que le béton contenant 30 % de vase calcinée (BOV30 %) a présenté la meilleure résistance par rapport au béton de référence (BOT), suivi respectivement par les bétons BOV20 % et BOV10 %. Ces résultats confirment l'effet bénéfique de la vase calcinée sur l'amélioration de la durabilité du béton et la réduction de sa dégradation en milieu acide. Cette amélioration est attribuée à la diminution de la perméabilité du béton grâce à la réaction pouzzolanique de la vase calcinée.

Concernant la carbonatation naturelle, les résultats ont révélé une augmentation significative de la profondeur de carbonatation avec le temps pour l'ensemble des formulations étudiées. Toutefois, le béton de référence (BOT) a présenté une meilleure stabilité et une résistance plus importante vis-à-vis de l'avancement du front de carbonatation par rapport aux bétons contenant de l'argile calcinée. Il a également été observé que les bétons BOV20 % et BOV30 % étaient davantage sensibles à la carbonatation naturelle, tandis que le béton BOV10 % a montré un comportement relativement proche de celui du béton de référence. Ces observations indiquent que l'incorporation d'argile calcinée contribue efficacement à l'amélioration de la résistance du béton à l'attaque acide, mais qu'elle peut influencer défavorablement la résistance à la carbonatation naturelle lorsque les taux de substitution deviennent élevés.

Mots-clés:

Durabilité du béton, vase calcinée, attaque acide, carbonatation naturelle, perte de masse, profondeur de carbonatation, résistance à la dégradation.

ABSTRACT

The durability of reinforced concrete is one of the essential properties that determine its ability to withstand various external aggressions while maintaining its mechanical performance over time. Indeed, concrete structures are exposed, during their service life, to several phenomena likely to impair their durability, among which acid attack and natural carbonation. The latter is a natural aging process that affects all types of concrete; it causes a reduction of the material's alkalinity and its neutralization, thereby promoting reinforcement corrosion and consequently compromising the durability and service life of reinforced concrete structures. As for acid attack, it is one of the most aggressive chemical reactions, leading to the degradation of the concrete's internal structure by dissolution of hydration products and progressive loss of mass over time.

The present work aims to complement the studies and experiments previously carried out by Safer on concretes containing calcined clay from the Chorfa dam in Mascara, through the study of the behavior of vibrated concretes after ten years of curing. The study focused particularly on assessing the concrete's resistance to acid attack and natural carbonation, by replacing part of the cement with calcined clay at rates of 10%, 20% and 30%.

The results of the acid attack test showed that the concrete containing 30% calcined sediment (BOV30%) exhibited the highest resistance compared with the reference concrete (BOT), followed by BOV20% and BOV10%, respectively. These results confirm the beneficial effect of calcined sediment on improving concrete durability and reducing its deterioration in acidic environments. This improvement can be attributed to the reduction in concrete permeability resulting from the pozzolanic reaction of the calcined sediment..

Concerning natural carbonation, the results revealed a significant increase in carbonation depth over time for all formulations studied. However, the reference concrete (BOT) showed better stability and greater resistance to the advance of the carbonation front compared with concretes containing calcined clay. It was also observed that BOV20% and BOV30% concretes were more sensitive to natural carbonation, while BOV10% concrete showed behavior relatively close to that of the reference concrete. These observations indicate that incorporation of calcined clay effectively improves concrete resistance to acid attack, but may adversely affect resistance to natural carbonation when substitution rates become high.

Keywords:

Concrete durability, calcined clay, acid attack, natural carbonation, mass loss, carbonation depth, degradation resistance.

REMERCIEMENTS

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

ملخص

RÉSUMÉ

ABSTRACT

INTRODUCTION GÉNÉRAL 1

CHAPITRE I: NOTION SUR LA DURABILITÉ DU BÉTON

I.1 INTRODUCTION.....	3
I.2 DÉFINITION DE LA DURABILITÉ	3
I.3 FACTEURS INFLUENÇANT LA DURABILITE	3
I.4 LES ATTAQUES CHIMIQUES DES BETONS	5
I.4.1 Actions des acides.....	5
I.4.1.1 Sources des acides	5
I.4.1.2 Mécanisme d'attaque.....	6
I.4.2 Actions des sulfates	6
I.4.2.1 Source des sulfates	7
I.4.2.2 Mécanisme d'attaque.....	7
I.4.3 La corrosion des armatures induite par les ions chlorures	10
I.4.3.1 L'amorçage et la propagation.....	11
I.4.3.2 Conséquence de la corrosion.....	11
I.4.4 Attaque par l'eau de mer.....	12
I.4.5 Action des chlorures.....	13
I.4.6 Lixiviation.....	14
I.5. Autres propriétés de durabilité.....	14
I.6 LA CARBONATATION	15
I.6.1 Les mécanismes de carbonatation	15
I.6.2 Paramètres influençant la carbonatation.....	16
I.6.2.1 Paramètres liés au milieu environnant.....	16
I.6.2.2 Paramètres liés au processus de fabrication.....	17
I.6.3 Principales conséquences de la carbonatation.....	19
I.6.4 Les bienfaits de la carbonatation pour le béton	19
I.6.5 Plusieurs paramètres influent sur la cinétique de carbonatation	20

I.7 CONCLUSION	20
-----------------------------	-----------

CHAPITRE II: L'ENVASEMENT ET LES SÉDIMENTS DE DRAGAGE

II.1 INTRODUCTION	23
II.2 ENVASEMENT DES BARRAGES	23
II.2.1 Définition de la vase.....	23
II.2.2 Les causes et l'origine de l'envasement.....	23
II.2.3 La lutte contre l'envasement.....	24
II.2.3.1 La conservation des sols	24
II.2.3.2 Le reboisement.....	25
II.2.3.3 La réalisation des barrages de décantation à l'amont.....	25
II.2.3.4 La réalisation des barrages de chasses	25
II.2.3.5 La surélévation des digues	25
II.2.3.6 Extraction par siphonnement	26
II.2.3.7 Le dragage des barrages	26
II.3 L'ENVASEMENT DES BARRAGES EN ALGERIE	29
II.3.1 Le reboisement, la restauration des sols la formation des banquettes, la plantation de végétation à longues tiges dans les oueds.....	29
II.3.2 Réalisation de barrage de décantation.....	29
II.3.3 Surélévation des barrages	30
II.3.4 Chasses dites à l'Espagnole.....	30
II.3.5 Soutirage des courants de densité	30
II.3.6 Dragage des barrages	30
II.3.7 Reprise de barrage	31
II.3.8 Valorisation des vases.....	31
II.3.9 Envasement en quelques chiffres	32
II.3.10 Présentation du barrage Chorfa	34
II.4 LES SEDIMENTS DE DRAGAGE	36
II.4.1 Origine et définition	36
II.4.2 Constitution des sédiments	36
II.4.3 Le dragage des sédiments	37
II.4.4 La valorisation des sédiments de dragage	38
II.4.4.1 Valorisation dans le béton et mortier	39

II.5 CONCLUSION	41
-----------------------	----

CHAPITRE III: SYNTHESE DES TRAVAUX SUR L'ATTAQUE ACIDE ET CARBONATATION

III.1 INTRODUCTION.....	43
III.2 ÉTUDES RELATIVES A L'ATTAQUE ACIDE DU BETON	43
III.3 CARBONATATION.....	48
III.4 CONCLUSION	52

CHAPITRE IV: METHODES EXPERIMENTALES ET RESULTATS

IV.1 INTRODUCTION.....	54
IV.2 PRESENTATION DES MATERIAUX ENTRANT DANS LA CONFECTION DES BETONS.....	54
IV.2.1 Le Ciment.....	54
IV.2.2. Granulats.....	54
IV.2.3 La Vase	56
IV.2.3.1 Granulométrie	58
IV.2.3.2. Les masses volumiques et surface spécifique	58
IV.2.4 L'adjuvant	58
IV.3 METHODES EXPERIMENTALES.....	59
IV.3.1 Essais de durabilité	60
IV.3.1.1 Essai de résistance à l'attaque acide.....	60
IV.3.2 Essai de carbonatation.....	63
IV.4 RESULTATS.....	64
IV.4.1 ATTAQUE ACIDE SULFURIQUE (H ₂ SO ₄)	64
IV.4.2 LA CARBONATATION	67
IV.5 CONCLUSION	70
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	72
PERSPECTIVES	72
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Le béton est aujourd'hui le matériau de construction le plus utilisé dans le monde grâce à ses excellentes propriétés mécaniques, sa facilité de mise en œuvre et son coût relativement faible. Cependant, la durabilité des structures en béton constitue une préoccupation majeure, car elles sont souvent exposées à des environnements agressifs susceptibles d'altérer progressivement leurs performances. Parmi les principaux mécanismes de dégradation, l'attaque acide et la carbonatation naturelle occupent une place importante. L'attaque acide provoque la dissolution des hydrates cimentaires, entraînant une perte de masse et une diminution de la résistance mécanique, tandis que la carbonatation naturelle induit une baisse du pH du béton, favorisant la corrosion des armatures et compromettant ainsi la pérennité des ouvrages.

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres principaux :

Chapitre 1 : Notions générales sur la durabilité du béton, présentant les principaux mécanismes de dégradation, les facteurs influençant la durabilité ainsi que les méthodes d'évaluation.

Chapitre 2 : Envasement de sédiments de dragage, consacré à l'origine des sédiments, à leurs caractéristiques, à leurs traitements et aux possibilités de leur valorisation, avec un intérêt particulier porté à la vase calcinée.

Chapitre 3 : Synthèse des travaux sur l'attaque acide et la carbonatation naturelle, regroupant les principales recherches relatives au comportement des bétons contenant de la vase calcinée ou d'autres ajouts pouzzolaniques soumis à ces environnements agressifs.

Chapitre 4 : Méthodologie expérimentale, détaillant les matériaux utilisés, les formulations adoptées, les essais réalisés et les procédures expérimentales mises en œuvre.

CHAPITRE I
NOTIONS SUR LA DURABILITE
DU BETON

I.1 INTRODUCTION

La durabilité d'une construction de génie civil est la capacité de l'ouvrage à résister à divers facteurs physiques, mécaniques, chimiques et météorologiques pendant toute sa durée de vie. Un produit durable doit préserver ses caractéristiques techniques, fonctionnelles et esthétiques face aux agressions externes comme le vent, la pluie, le gel ou les substances chimiques. Ce chapitre aborde le concept de durabilité, les éléments qui l'affectent, ainsi que les principaux agents détériorant des matériaux à base de ciment [1].

I.2 DÉFINITION DE LA DURABILITÉ

La durabilité se rapporte à la faculté d'une structure à conserver son esthétique, sa solidité et son intégrité opérationnelle sur le long terme, en dépit des chocs ou des agressions externes. Cela signifie que le produit doit être capable de remplir ses fonctions sans dégradation notable de performance ou de sécurité tout au long de sa durée d'utilisation.

Dans le domaine de la maçonnerie, deux critères essentiels pour assurer une longue durée de vie sont, d'une part, l'emploi d'un élément de construction dimensionnellement stable et, d'autre part, l'utilisation d'un mortier qui permet une liaison durable, robuste et uniforme, garantissant par conséquent une étanchéité efficace contre les infiltrations d'eau. On peut définir la durabilité d'un matériau comme son aptitude à résister aux effets des conditions climatiques, aux agressions chimiques, à l'usure, ainsi qu'à toute autre forme de dégradation naturelle ou artificielle. Un béton durable est un matériau qui préserve sa structure, ses propriétés et son rendement lorsqu'il est soumis aux conditions de son environnement [2].

I.3 FACTEURS INFLUENÇANT LA DURABILITE

La durabilité du béton peut être compromise par différentes actions physiques ou réactions chimiques nuisibles, favorisées par l'infiltration de fluides (liquides ou gaz) à travers sa masse. Ainsi, l'analyse dimensionnelle des bétons vibrés requiert la mesure de certaines caractéristiques physico-chimiques. Le processus de dégradation chimique du béton résulte d'une décalcification progressive lorsqu'il est exposé à un environnement agressif. Cette altération entraîne une augmentation de la porosité du matériau, modifiant ainsi ses propriétés physiques, chimiques et mécaniques. D'un côté, cette hausse de porosité favorise le transport des substances (par perméabilité ou diffusion) et accélère la dissolution des produits hydratés (notamment la portlandite). De l'autre, elle provoque une dégradation des propriétés mécaniques telles que la résistance et la rigidité. Par ailleurs, les contraintes mécaniques génèrent des microfissures qui peuvent intensifier le processus de détérioration chimique.

La perméabilité, la diffusion et l'absorption constituent les trois mécanismes fondamentaux par lesquels des agents agressifs peuvent infiltrer le béton et compromettre ses propriétés mécaniques et protectrices, en particulier contre la corrosion des armatures. La perméabilité désigne le mouvement de matière provoqué par un gradient de pression, la diffusion correspond au déplacement d'un fluide en réaction à une disparité de concentration, et l'absorption résulte des fluctuations de tension de surface dans les pores capillaires.

Les trois fluides naturels principalement impliqués dans ces mécanismes et susceptibles de compromettre la durabilité du béton sont : l'oxygène, l'eau (qu'elle contienne ou not des ions agressifs) et le dioxyde de carbone.

La longévité du béton dépend donc de sa capacité à limiter la pénétration de ces fluides via les trois modes de transfert. Même si, en conditions réelles, ces mécanismes agissent simultanément, ils sont étudiés séparément en laboratoire afin de mieux comprendre les propriétés fondamentales impliquées. Plusieurs tests sont donc mis en œuvre pour évaluer les paramètres représentatifs de la dégradation physico-chimique du béton. La durabilité du béton est généralement liée à la compacité de sa composition ainsi qu'à la nature chimique du liant (et à la composition minéralogique des granulats en cas de réaction alcali-granulat). Les normes en vigueur pour les bétons courants sont définies dans la norme XP 18-305, désormais remplacée par la NF EN 206-1.

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

Les propriétés microstructurales du béton sont influencées principalement par :

- Le volume de pâte utilisé,
- La présence d'ajouts en quantité significative,
- La densité du réseau de bulles d'air [3 ;4 ;5].

L'effet des ajouts sur la matrice cimentaire dépend de la finesse des particules, ainsi que de leur composition chimique et minéralogique. Les particules les plus fines contribuent à améliorer la compacité du squelette granulaire et à réduire l'épaisseur et la porosité des zones de transition (interface pâte–granulats, qui est plus poreuse et contient des pores plus gros). Concernant la densité du réseau de bulles d'air, elle est influencée par la présence d'un agent entraîneur d'air, mais aussi par l'effet secondaire d'un superplastifiant ou d'un agent de viscosité.

Enfin, la durée du malaxage est un paramètre non négligeable : un malaxage prolongé peut doubler le volume d'air emprisonné. [6 ;7 ;8 ;9 ;10].

I.4 LES ATTAQUES CHIMIQUES DES BETONS

Les agressions chimiques que peuvent rencontrer les matériaux à matrice cimentaires sont très liées. 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 [11]. Parmi une multitude de causes de dégradation des matériaux cimentaires, figurent les attaques par les acides, par les sulfates et par le dioxyde de carbone.

I.4.1 Actions des acides

Les environnements agressifs du point de vue de la lixiviation et des attaques acides peuvent être assez variés, et combinés à d'autres types d'agressions. Mais les eaux en contact avec le béton ont en commun d'être faiblement minéralisées, en particulier en calcium. 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^- .

I.4.1.1 Sources des acides

Les milieux acides les plus fréquents sont :

1. Les eaux naturelles dans les tourbières et les marécages, où le pH peut s'abaisser jusqu'à 4 ;
2. 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.

3. 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 de la dégradation de la surface exposée du béton.

I.4.1.2 Mécanisme d'attaque

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 → 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 chloridrique et la portlandite.



Hydroxyde de calcium + acide chlorhydrique → 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) [4].

I.4.2 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. Ainsi, ce type de dégradation est considéré comme une action environnementale, dans la définition des classes d'exposition – XA, environnements chimiquement agressifs [4].

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.

1.4.2.1 Source des sulfates

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

- Afrique du Nord
- Prairies Canadiennes
- Région parisienne : Na_2SO_4 (58g/l), $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (194g/l), $\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (440g/l) et CaSO_4 (2,1g/l)

Les eaux souterraines en contact avec ces sulfates peuvent se charger en ions SO_4^{2-} . Les sols alluviaux ou argileux peuvent aussi contenir des pyrites qui s'oxydent en sulfates au contact de l'air et de l'humidité avec la formation d'acide sulfurique. Les sulfates peuvent aussi provenir de la décomposition biologique aérobie de substances organiques contenant du soufre (engrais, plantes).

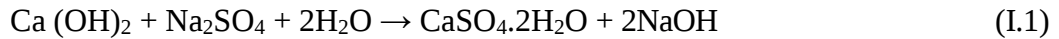
Les sources de sulfates peuvent aussi être internes :

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

1.4.2.2 Mécanisme d'attaque

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 $\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) 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.

Dans le cas du sulfate de sodium, les réactions chimiques se présentent comme suit [12] :
Formation du gypse secondaire : (formule I.1)



NaOH : Alcalinité élevée → stabilisation des CSH.

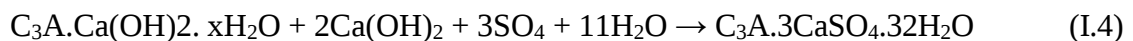
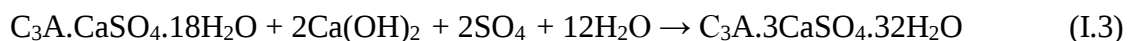
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$: Produit expansif mais qui se forme uniquement dans les espaces internes de la pâte de ciment hydraté. Dans la majorité des cas, il n'y a pas ou peu d'expansion. Cependant, son dispositif agit pour diminuer la résistance et l'adhérence de la pâte de ciment due à la dissolution de la portlandite CH et le gel et la décalcification du C-S-H qui est responsable des propriétés liantes de la pâte de ciment [13].

Formation d'ettringite secondaire :

a) À partir du C_3A anhydre résiduel : (formule I.2)



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



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

La Figure I.1 schématise le mécanisme proposé par Santhanam et al [14] dans le cas de l'attaque par les sulfates de sodium.

L'étape 1 décrit l'état initial du processus. Dans le cas d'une solution à bas pH (6-8), le temps du déclenchement de l'expansion est réduit [15 ;16]. Toutefois, le taux d'expansion après cette initiation (au cours de l'étape 2), n'est pas différente lorsque le pH est faible [16]. Dans l'étape 2, le gypse et l'ettringite commencent à se former à la surface. Ainsi, comme il est décrit dans l'étape 3, une force de compression résultante est produite à la surface. Des fissures à l'intérieur du mortier sont provoquées (étape4) avec un dépôt de produits au niveau des fissures et même dans la pâte. Le gypse se dépose dans les fissures et dans les vides parce que ceux-ci fournissent les meilleurs sites de nucléation. Il existe trois zones distinctes dans le mortier : zone de surface désintégrée, la zone de dépôt des produits d'attaque, et à l'intérieur la zone de fissures qui est chimiquement inchangée.

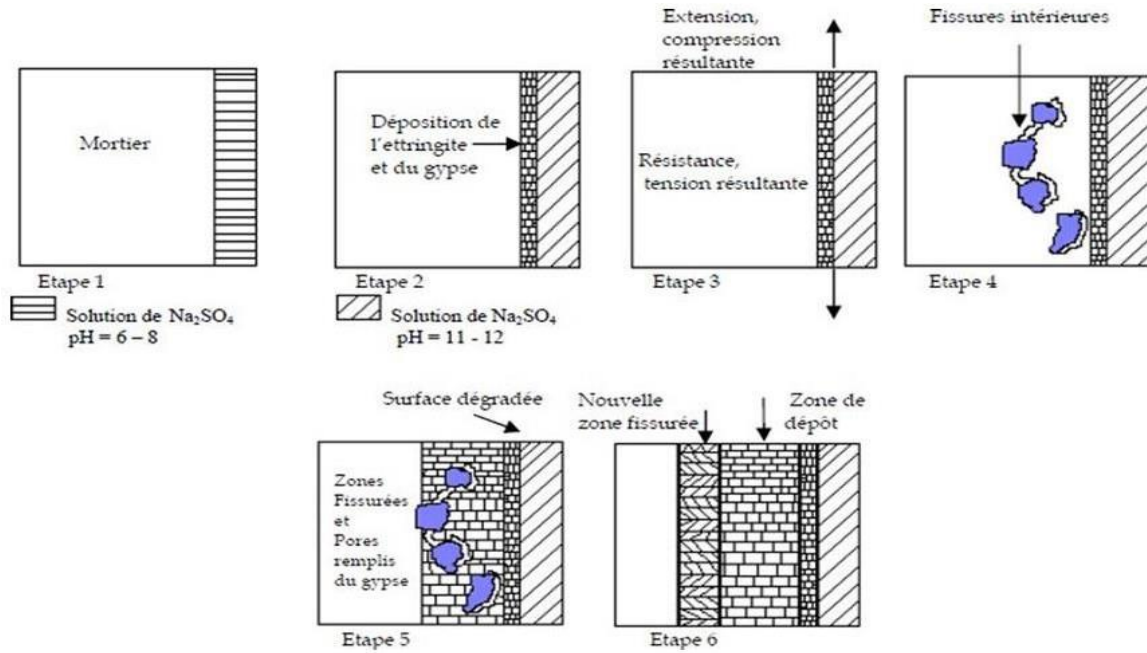


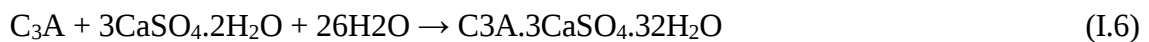
Figure I.1: Mécanismes proposés pour l'attaque aux sulfates de sodium [16].

Les mécanismes de dégradation sont dépendant également de la nature du cation (Ca^{2+} ; K^{+} ; Mg^{2+} ...etc.) qui est associée aux ions sulfates dans la solution d'eau externe ou dans la pâte de ciment. Le sulfate de magnésium est très agressif par rapport au sulfate de sodium [17].

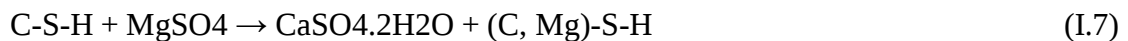
Le sulfate de magnésium réagit par double action (formules I.5, I.6 et I.7) : En présence de magnésium la portlandite réagit pour former de la brucite, le gypse et l'ettringite :



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



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



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

Le mécanisme proposé dans le cas de l'attaque par les sulfates de magnésium est schématisé dans la Figure I.2. Une couche de brucite (hydroxyde de magnésium $\text{Mg}(\text{OH})_2$) se forme rapidement sur la surface de l'échantillon en raison de la réaction de la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ avec la solution. La couche de brucite est souvent complétée par une couche de gypse qui se forme à la suite de la même réaction à l'intérieur de la couche de brucite d'où une augmentation du taux d'expansion [18]. Une fois que les canaux d'écoulement sont établis à travers la surface

de la couche de brucite, une attaque directe des CSH peut se produire. À la suite de cette attaque, la formation de MSH et de gypse secondaire aura lieu (étape 4). La détérioration finale du mortier est la conséquence de la perte de résistance du fait de la transformation de la pâte en MSH. (Ettringite secondaire).

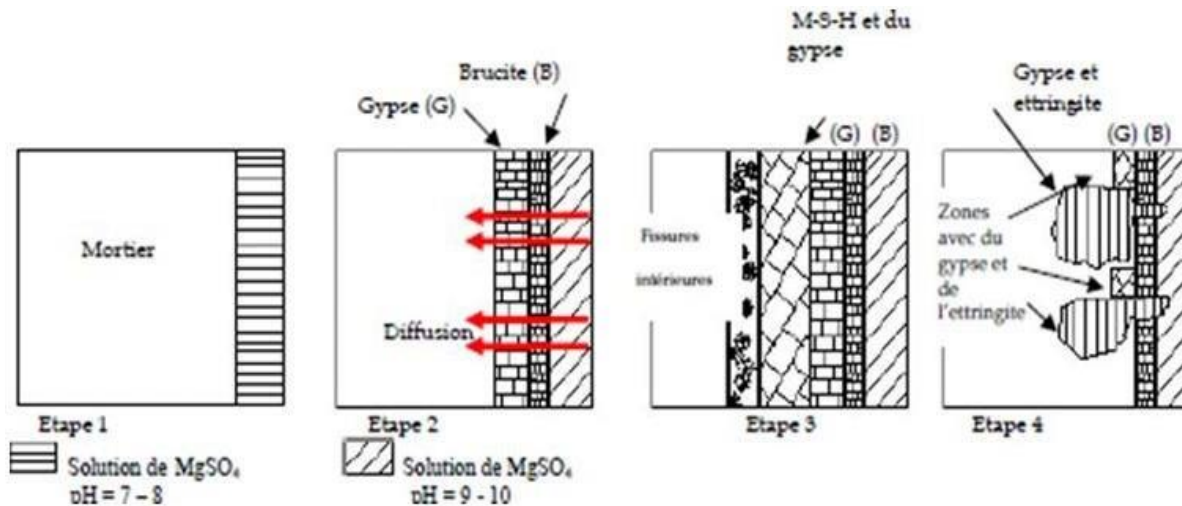


Figure I.2 : Mécanismes proposés pour l'attaque aux sulfates de magnésium [18].

Les eaux souterraines ou l'eau de mer sont souvent riches en sulfates de magnésium ($MgSO_4$). Dans ce cas, les deux ions, cations et anions, participent à la réaction. Les ions SO_4^{2-} réagissent avec les aluminates (ou la portlandite) pour former de l'ettringite (ou du gypse), tandis que les ions Mg^{2+} peuvent réagir avec les ions OH^- et former de la brucite ($Mg(OH)_2$) ou causer un remplacement partiel du calcium par du magnésium dans les CSH. Le silicate de magnésium hydraté (MSH) ainsi formé n'a pas de propriétés liantes, et par conséquent, la pâte hydratée devient molle et incohérente [18].

I.4.3 La corrosion des armatures induite par les ions chlorures

La corrosion des armatures représente le principal facteur pouvant réduire la longévité des structures en béton armé. Il convient tout d'abord de préciser que la durabilité de ces ouvrages dépend directement du béton, qui assure une protection physique et chimique des armatures en acier contre la corrosion. En effet, la forte alcalinité de la solution interstitielle présente dans les pores du béton ($pH \approx 13$) favorise la formation d'une couche passive composée d'oxydes et d'hydroxydes de fer, garantissant ainsi une protection naturelle des armatures. Toutefois, certaines substances chimiques agressives, issues de l'environnement extérieur, peuvent traverser la barrière physique que constitue le béton de revêtement, altérer la stabilité chimique de cette couche passive et provoquer la corrosion des aciers d'armature. Parmi ces agents, la

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

I.4.3.1 L'amorçage et la propagation

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

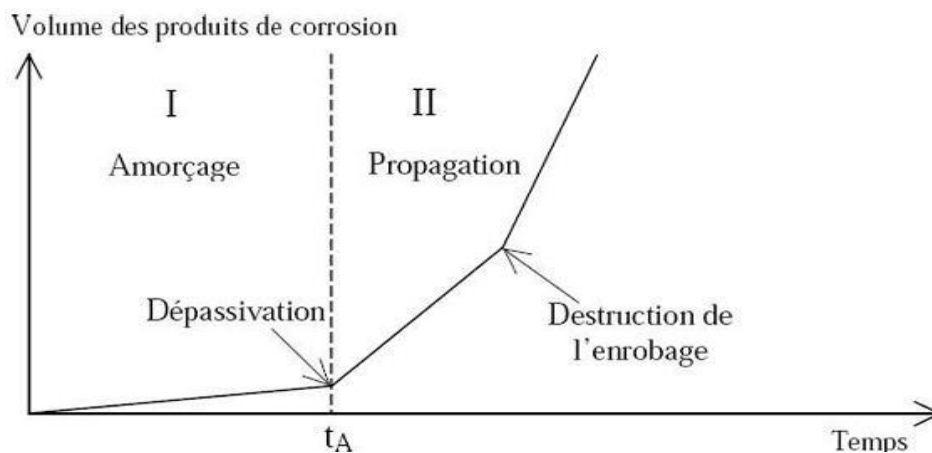


Figure I.3: Schéma de la cinétique de corrosion d'un ouvrage [19] .

La première étape est la période d'amorçage ou d'incubation : l'armature d'acier est passivée initialement par les propriétés de la solution interstitielle du béton où des processus physicochimiques à l'origine de la corrosion des armatures peuvent avoir lieu à l'échelle microscopique, mais aucune dégradation n'est visible à l'échelle macroscopique d'observation. La période d'amorçage se termine par la dépasseivation du métal, et initie la phase de la propagation de la rouille par le développement des réactions d'oxydation à la surface des armatures. Les produits d'oxydation vont alors affecter le béton d'enrobage et diminuer la capacité fonctionnelle de la structure. Comme la durée de la phase d'amorçage (t_A) est primordial pour la conservation des armatures, les bétons d'enrobage doivent être conçus pour retarder ou empêcher la dépasseivation des aciers. La durée t_A dépend d'un certain nombre de paramètres comme la perméabilité du béton, l'épaisseur du béton d'enrobage et la capacité de fixations des chlorures par la pâte de ciment hydraté, etc [19].

I.4.3.2 Conséquence de la corrosion

La corrosion des barres d'acier a principalement deux effets, le premier réside dans le fait que les produits de corrosion occupent un volume beaucoup plus grand que le volume initial de l'acier. En effet, une armature oxydée peut occuper un volume jusqu'à neuf fois plus grand que

le métal initial. La formation de la rouille exerce une pression interne dans le béton, ce qui entraîne éventuellement une fissuration et un éclatement. Donc la corrosion des barres d'acier, lorsque celle-ci est amorcée dans une structure, s'amplifie avec le temps. En effet, la fissuration du béton facilite le transport des agents agressifs jusqu'au niveau de l'acier, et donc augmente la vitesse de corrosion. Le deuxième effet est observé au niveau de la section de la barre d'acier, la progression de la corrosion réduit la section effective de la barre et donc diminue la résistance mécanique de celle-ci la Figure I.4 [20].



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

I.4.4 Attaque par l'eau de mer

La composition de l'eau de mer diffère considérablement de celle de la solution interstitielle du béton, en raison de ses différences de composition chimique. Ces variations entraînent des échanges ioniques entre les deux milieux. La composition chimique de l'eau de mer varie selon les régions du monde. Elle se distingue généralement par une forte concentration en sels dissous, avec une salinité fluctuante entre 10g/kg dans la mer Baltique et 40 g/kg dans la mer Rouge, pouvant même atteindre près de 400 g/kg dans les mers Caspienne et Morte. Pour l'océan Atlantique, ainsi que pour la mer Méditerranée, la salinité avoisine les 30 g/kg. Cependant, malgré ces différences de salinité, les proportions relatives des principaux sels restent constantes. En pratique, les principaux constituants de l'eau de mer sont ceux dont la concentration dépasse 1 g/kg, comme précisé dans le tableau I.1.

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

Tableau2-concentration des principales espèces présentes dans une eau de mer de salinité 35.000. D'après Wilson (1975)		
Espèces	*Concentrations	
	g Kg-soln-1	Mol Kg-soln-1
Ion sodium Na^+	10.77	0.4685
Ion magnesium Mg^{+2}	1.290	0.05308
Ion calcium Ca^{+2}	0.4121	0.01028
Ion potassium K^+	0.399	0.01021
Ion strontium Sr^{+2}	0.0079	0.000090
Bore total $\text{B(OH)}_3 + \text{B(OH)}_4^-$	0.0045	0.00042
Ion chlorure Cl^-	19.354	0.54591
Ion sulfate SO_4^{+2}	2.712	0.02823
Hydrogénocarbonate HCO_3^-	0.118-0.146	0.00194-
+carbonate CO_3^{+2}		0.00240
Ion bromure Br^-	0.0673	
Ion fluorure F^-	0.0013	0.000842
		0.00007
Ces concentrations se rapportent au Kg de solution (Kg-soln). C'est-à-dire au Kg d'eau de mer (eau + sels dissous)		

Les plus grandes concentrations ioniques sont les Na^+ et les Cl^- . En réalité, le chlorure de sodium présente 75 à 85%, de la salinité d'une eau de mer. Par sa prépondérance dans un tel environnement naturel, cette solution est très souvent étudiée en négligeant les concentrations de toutes les autres espèces en solution [21].

I.4.5 Action des chlorures

Les chlorures affectent le béton principalement dans certains environnements spécifiques, tels que les ouvrages exposés aux sels de déverglaçage ou les structures situées en milieu maritime (zones de marnage, surfaces soumises aux embruns). Ces ions peuvent pénétrer le béton par diffusion ou par capillarité, traverser la zone d'enrobage, atteindre les armatures, et déclencher la corrosion de l'acier. Le processus de corrosion débute souvent sous forme de corrosion par piqûres (localisée) avant de se généraliser à toute la surface des armatures. La vitesse de

pénétration des chlorures dépend principalement de la porosité du béton, qui diminue lorsque le rapport eau/ciment (E/C) est réduit. La corrosion des armatures commence dès que la concentration en chlorures atteint un seuil de dépassivations, généralement compris entre 0,4 et 0,5 % par rapport au poids du ciment. Ce seuil varie en fonction du pH de la solution interstitielle et de la teneur en oxygène au niveau des armatures. De plus, ce seuil est atteint plus rapidement si le béton est carbonaté, car ce phénomène réduit l'alcalinité et fragilise la couche passive qui protège l'acier [22].

I.4.6 Lixiviation

Dans une structure en béton exposée à l'air ambiant, l'évaporation de l'eau se limite à une épaisseur de quelques centimètres. Cependant, lorsque le béton est en contact prolongé avec l'eau, ses pores restent saturés, permettant ainsi aux ions provenant de l'environnement extérieur de migrer à travers la phase liquide interstitielle. La pénétration de ces ions peut entraîner des réactions chimiques de dissolution/précipitation, conduisant progressivement à une lixiviation des hydrates. Les eaux pures ou faiblement minéralisées, en raison de leur fort pouvoir de dissolution, peuvent dissoudre les constituants calciques du béton, notamment la portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Malgré la complexité des réactions chimiques engendrées par les eaux agressives, des mesures préventives simples, appliquées dès la formulation du béton, permettent de garantir sa durabilité :

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

L'agressivité des milieux dans lesquels les ouvrages en béton peuvent se trouver dépend principalement de la présence d'eau et de sa capacité à réagir avec les minéraux de la matrice cimentaire. Les solutions agressives, riches en agents chimiques dissous, peuvent engendrer divers phénomènes de dégradation lorsque la formulation du béton n'est pas optimisée [22].

I.5. Autres propriétés de durabilité

Ce sont plus particulièrement les cycles de gel-dégel qui engendrent des dégradations progressives dans le béton. Le gel provoque la migration d'eau contenue dans les pores vers des zones où elle peut geler et créer des fissures sous l'effet de la formation de glace. Lors du dégel, ces fissures ne se referment pas et se remplissent d'eau qui est disponible pour un

nouveau cycle de gel. La quantité d'air entraîné et la répartition des bulles d'air sont donc couramment admises comme facteurs primordiaux de la résistance au gel-dégel des bétons.

La réaction alcali-silice est une pathologie des bétons qui se caractérise par une réaction chimique entre la silice amorphe ou mal cristallisée contenue dans les granulats réactifs et les alcalins de la solution interstitielle. Les conséquences macroscopiques de la réaction sont le gonflement des ouvrages atteints qui entraînent de la fissuration et la chute des caractéristiques mécaniques du béton [23].

I.6 LA CARBONATATION

I.6.1 Les mécanismes de carbonatation

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

La carbonatation entraîne une baisse du pH (initialement entre 12,5 et 13,5) dans la solution interstitielle du béton jusqu'aux environs de 9. La solution interstitielle perd sa capacité protectrice envers les armatures subissant alors une initiation de la corrosion. Dans le cadre d'une approche simplifiée, le mécanisme réactionnel de carbonatation de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ [24] [25] [26] [27] est synthétisé par la réaction chimique hétérogène suivante (formules I.6) :



Cette équation indique que la carbonatation de la portlandite s'accompagne globalement d'une libération de l'eau de structure. Les grandeurs qui peuvent permettre de caractériser l'évolution de la réaction, en fonction du temps ou de la profondeur de pénétration, sont la concentration en portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et le pH de la solution interstitielle du béton.

La Figure I.5 illustre l'intervention combinée des trois phases gazeuse, aqueuse et solide, au cours du processus de carbonatation de la portlandite. La carbonatation est donc maximale lorsque l'humidité relative a une valeur modérée, c'est-à-dire lorsqu'elle est comprise entre 40 et 60 %, ou entre 40 et 80 % [28], [29], voire entre 84 et 92 % [30].

Ce domaine correspond en moyenne à quelques couches de molécules d'eau adsorbées sur la surface du solide [31], [32]. La carbonatation ne se produit donc pas dans un béton totalement sec ou complètement saturé en eau

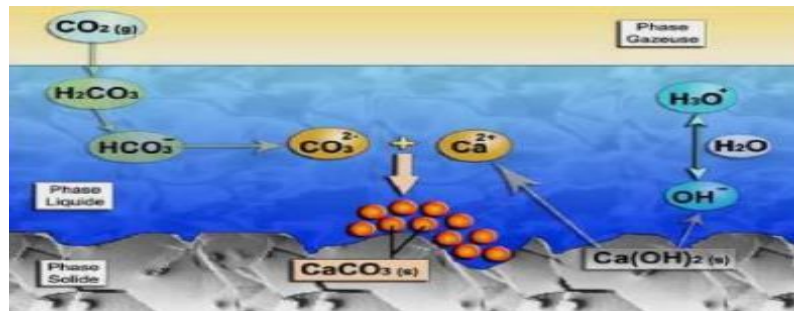


Figure I.5 : Mécanisme de carbonatation de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ [27].

I.6.2 Paramètres influençant la carbonatation

Dans des travaux effectués en laboratoires, on a pu révéler que le niveau de carbonatation du béton...et aux techniques d'application ; Elle est également affectée par divers facteurs comme le climat; environnant et au processus de fabrication. La réalisation d'une procédure expérimentale basée et sur le fait naturel de la carbonatation serait d'une longueur longue Pour cette C'est pour cela que la majorité des études utilisent les méthodes de vitesse, telles que l'utilisation d'un...enceinte de carbonatation. Mais toutes les méthodes sont néanmoins loin de représenter tout à fait la réalité Afin d'éviter de générer trop de portées sur les résultats (c.-à-d. uniquement quelques résultats ciblés). Certaines formulations de béton [23].

I.6.2.1 Paramètres liés au milieu environnant

- La concentration en dioxyde de carbone

L'influence de la concentration en dioxyde de carbone sur la carbonatation a été étudiée par [33]. Les résultats montrent que dans des environnements où la concentration en dioxyde de carbone est élevée, l'épaisseur du béton carbonaté tend à être plus importante.

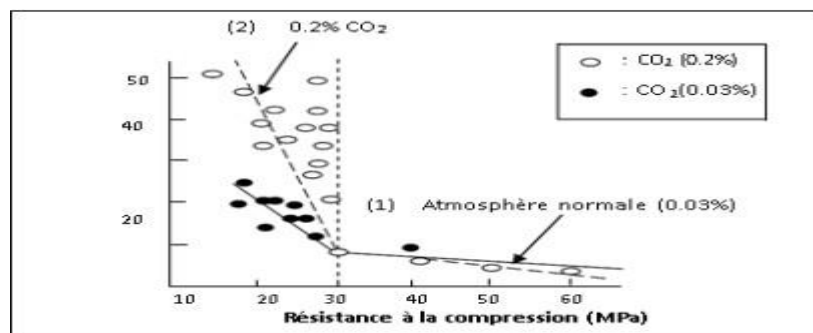


Figure I.6 : Influence de la teneur en dioxyde de carbone sur la carbonatation [34].

-L'humidité relative

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

La diffusion du dioxyde de carbone (CO_2) au sein de la structure poreuse du béton est fortement conditionnée par l'état hygroscopique des pores. La cinétique de la carbonatation est principalement régie par la perméabilité de la matrice cimentaire au CO_2 . Ce gaz peut diffuser via la phase gazeuse dans un réseau poreux partiellement désaturé, ou via la phase liquide par le biais d'un transfert d'eau contenant du CO_2 dissous. Des teneurs élevées en eau, associées à un haut degré de saturation poreuse, entravent significativement cette diffusion. En phase liquide, le coefficient de diffusion du CO_2 est environ 10^4 fois inférieures à celui observé en phase gazeuse.

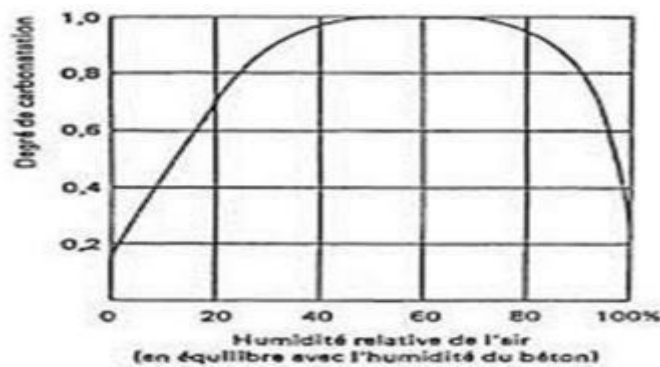


Figure I.7 : Vitesse de carbonatation en fonction de l'humidité relative [35].

-La température

La température influence le processus de carbonatation de manière complexe. Elle agit de deux façons contradictoires :

D'une part, elle accélère la carbonatation en favorisant le dessèchement des pores et, par conséquent, la pénétration du dioxyde de carbone dans la matrice cimentaire [38] [39].

D'autre part, une élévation de température peut atténuer la vitesse de carbonatation dans les bétons, en raison d'une dégradation accélérée de la portlandite à des températures plus basses [36].

1.6.2.2 Paramètres liés au processus de fabrication

Certains facteurs influençant la carbonatation sont particuliers au domaine de la préfabrication [34].

- La mise en œuvre

La mise en œuvre La vibration du béton permet d'éliminer les vides d'air, améliorant ainsi sa compacité. Toutefois, les gros granulats ne peuvent s'approcher des parois du moule, générant une zone enrichie en particules fines en proximité des surfaces. Cet effet de paroi, résultant du déplacement des granulats principalement dans des directions parallèles, influence notablement la microstructure de la peau de béton et est à l'origine d'une hétérogénéité de la résistance mécanique [40][41].

- La cure

La cure correspond aux conditions appliquées aux bétons pour éviter une perte excessive d'eau, essentielle à l'hydratation du ciment.

Une cure appropriée maintient l'humidité nécessaire à l'hydratation, réduisant ainsi la porosité du béton. À défaut de cure, le béton d'enrobage subit une dessiccation rapide qui entrave son hydratation.

Une cure prolongée renforce la résistance du béton à la pénétration d'agents agressifs tels que le dioxyde de carbone et les chlorures [42].

Une durée de cure de trois à sept jours s'avère généralement suffisante pour optimiser la texture du matériau [33 ;43].

En conditions de laboratoire, une cure limitée à trois jours maximums reproduit au mieux les réalités des chantiers.

La figure I.8 : montre un accroissement progressif des résistances mécaniques sur des périodes de cure humide [44].

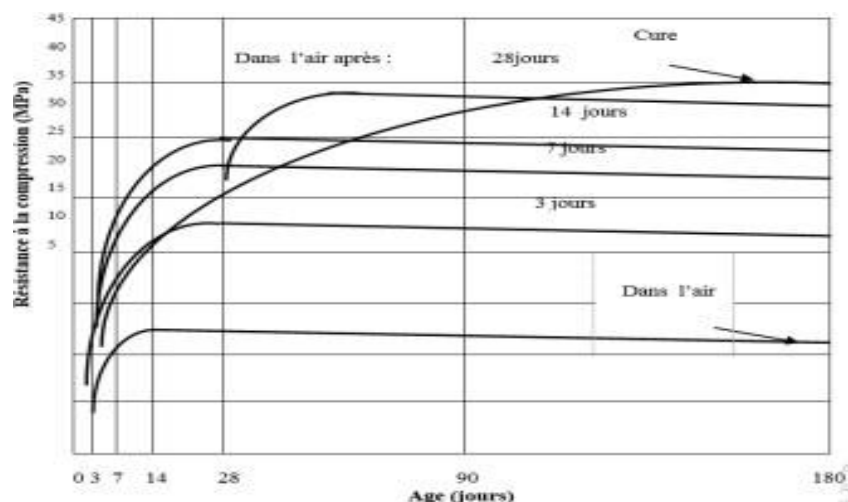


Figure I.8 : Influence de la cure sur la résistance d'un béton de rapport E/C=0,5 [44].

I.6.3 Principales conséquences de la carbonatation

La principale conséquence de la carbonatation est l'amorce d'un phénomène de corrosion des armatures du béton armé ou précontraint lorsque le front de carbonatation est au moins égal à leur profondeur d'enrobage.

Les désordres associés correspondent alors pour l'essentiel à des fissures et à des épaufrures (expulsion du béton d'enrobage) consécutives aux gonflements provoqués par la formation d'oxydes et hydroxydes de fer sur les armatures.

Ces dernières peuvent alors montrer des diminutions de section importantes ou, au stade ultime, des ruptures ayant des conséquences graves sur la capacité portante des éléments de structure. Une conséquence secondaire du phénomène de carbonatation correspond à une densification de la zone carbonatée par rapport au béton sain. Cette densification, qui ne revêt aucun caractère pathologique, peut, dans certaines conditions, conduire à une diminution relative de 10 à 15 % de la porosité de la zone carbonatée, formant ainsi une barrière diffusionnelle limitant les phénomènes de transfert [45].

I.6.4 Les bienfaits de la carbonatation pour le béton

La carbonatation, bien que souvent perçue comme néfaste pour la durabilité des structures en béton, présente des effets bénéfiques du point de vue du matériau béton lui-même. En effet, la carbonatation des matrices cimentaires à base de ciment de type CEM I entraîne un gain de masse lié à la fixation du CO_2 dans les hydrates.

Le carbonate de calcium formé, ayant un volume molaire supérieur à celui des hydrates initiaux, colmate la microstructure, réduisant ainsi la perméabilité du béton aux agents agressifs tels que les gaz (CO_2 et O_2), les ions sulfates, les chlorures et les eaux agressives (eau de mer, eaux séléniteuses ou magnésiennes).

En outre, la carbonatation améliore la résistance mécanique des bétons (compression, chocs, usure) et stabilise le matériau sur le plan chimique en limitant les réactions de gonflement (réaction sulfatique, réaction alcali-granulats).

Cependant, elle augmente également le module de rigidité ou module d'élasticité, ce qui peut entraîner une fragilisation des pièces minces et une hétérogénéité de résistance et de retrait, notamment dans les enduits de façade partiellement carbonatés où des fissures de surface peuvent apparaître, s'arrêtant au niveau de la zone interne non carbonatée [23].

I.6.5 Plusieurs paramètres influent sur la cinétique de carbonatation

Il existe de nombreux modèles de carbonatation qui traduisent, plus ou moins directement, la résistance physico-chimique du béton contre la pénétration du front de carbonatation. Les paramètres utilisés se rapportent à :

- La porosité du béton qui conditionne la résistance « physique » du matériau à la diffusion du CO₂.
- La teneur en hydrates carbonables : plus elle est élevée, plus le béton est capable de freiner « chimiquement » la pénétration du front de carbonatation.
- La microstructure du matériau (taille des pores) dont dépend l'état hydrique du matériau qui conditionnera la cinétique de pénétration du phénomène. C'est alors essentiellement la perméabilité à l'eau liquide du matériau qui sera un indicateur de durabilité pertinent.

Ces modèles aboutissent généralement à une évolution lente en racine carrée du temps de la profondeur de carbonatation. Pour fixer les idées, avec un béton ordinaire conservé dans un environnement dont l'humidité relative est comprise entre 50 et 70 %, la profondeur de carbonatation est de 5 mm après une année, 10 mm au bout de 4 ans et 25 mm après 25 ans. Les modèles sont utilisés pour prédire la durée de vie du matériau béton vis-à-vis de l'initiation de la corrosion par carbonatation. Ils ont donc souvent comme défaut de ne pas tenir compte de la cinétique de corrosion et, dès lors, ils conduisent à un sur dimensionnement de l'épaisseur d'enrobage et à une formulation souvent trop sécuritaire du béton. Cette approche de la conception du béton est de plus en plus remise en cause dans le contexte actuel de préservation des ressources non renouvelables et de limitation de l'empreinte carbone de la construction en béton. La carbonatation peut également être à l'origine de désordres au niveau des enduits de façade correspondant généralement à des mortiers à fort dosage en chaux grasse (Ca(OH)₂) partiellement carbonatée. L'acidification du milieu qui découle de l'attaque du CO₂ peut être à l'origine du développement de microorganismes (lichens, mousses, algues, etc.) qui ne croissent pas dans un milieu fortement basique. Ces micro-organismes sont à l'origine de salissures inesthétiques. Il est possible d'enlever temporairement ces traces par un lavage du mur avec de l'eau de Javel diluée ou en utilisant un produit fongicide adapté [45].

I.7 CONCLUSION

En somme, la longévité du béton armé est un élément essentiel pour garantir la solidité et la durabilité des constructions. Pour prolonger la longévité du béton armé, il est essentiel de sélectionner judicieusement les matériaux, d'assurer un processus de fabrication strictement

contrôlé et de mettre en œuvre des mesures de protection contre les attaques extérieures. L'établissement d'un programme de maintenance périodique est tout aussi crucial pour conserver ses performances dans la durée. En accordant une attention rigoureuse à ces facteurs, il devient possible de promouvoir la conception d'infrastructures durables, fiables et économiquement viables, au profit des générations à venir [23].

CHAPITRE II

L'ENVASEMENT ET LES SÉDIMENTS DE DRAGAGE

II.1 INTRODUCTION

En Algérie de grands efforts ont été déployés pour la réalisation des barrages, mais malheureusement notre pays figure parmi les plus négativement touchés par l'érosion et l'envasement. Le phénomène de l'envasement des barrages en Algérie constitue un enjeu d'envergure nationale. Ces barrages se transforment beaucoup plus en réceptacles de vase que d'eau. A cet effet, les possibilités d'utilisation des sous-produits issus des opérations de dragage sont réelles et touchent de nombreuses applications. L'utilisation de ces matériaux en tant que matière première contribue souvent à la protection de l'environnement des sites suite au rejet des matériaux dragués.

L'Algérie dispose actuellement de 72 barrages plus ou moins envasés. Un envasement d'environ 1085.94 millions m³ [46] qui, selon des estimations prévisionnelles, atteindrait en 2020 un volume de 1 323.52 millions de m³. Il représente une réduction de capacité de 0.65%/an [47]. La valorisation des sédiments comme matériaux de construction demeure une réelle possibilité [48-53]. Elle ouvre de nouvelles perspectives à la recherche dans plusieurs domaines de la construction (granulat, ciment, brique et tuile). Avant l'utilisation des sédiments comme substituts partiels au ciment ils doivent subir une calcination pour les rendre actifs.

II.2 ENVALEMENT DES BARRAGES

II.2.1 Définition de la vase

Le nom de vase (mot emprunté au Néerlandais) est la désignation d'une large famille de sédiments fins, argileux, plus ou moins organiques, pouvant atteindre des teneurs en eau importantes. Elles contiennent une phase minérale dont la granulométrie s'étend des sables, aux argiles et aux colloïdes, une phase organique et une phase liquide. La vase peut se présenter aussi bien à l'état de suspension (crème de vase) que de sol cohérent (sédiment cohésif) alors un caractère plastique, compressible et thixotropique. Elle contient souvent l'habitat d'une faune riche et diversifiée (vers, mollusques, bactéries, ...etc.) [54].

II.2.2 Les causes et l'origine de l'envasement

Il ressort dans les processus de l'érosion que l'eau en est le principal agent moteur. Elle est la cause première de l'altération des roches qui donnent des particules, du détachement et de l'arrachement des agrégats. L'énergie cinétique développée par le ruissellement permet l'enlèvement des agrégats détaches, le creusement du sol et le transport des matériaux qui sont déposés ou accumulent progressivement avec la dissipation de cette énergie [54].

II.2.3 La lutte contre l'envasement

Les barrages servant à l'adduction en eau potable ou à l'irrigation des cultures, il était donc vital de prendre des dispositions pour les sauvegarder et allonger leur durée de vie au maximum. Parmi les mesures prises on peut citer : Le reboisement, la restauration des sols, la formation de banquettes, la plantation de végétation à longues tiges. En Algérie, à l'amont du barrage de Bouhanifia (Wilaya de Mascara), ont poussé des tamaris devenus avec le temps de véritables pièges à sédiments. Les services des forêts ont initié des programmes coûteux pour protéger les bassins versants. Des barrages de décantation ont été réalisés en amont des barrages importants visant à retenir une partie de la vase [55].

II.2.3.1 La conservation des sols

Comme moyen de minimiser la pénétration de matériaux solides dans une retenue, deux méthodes de conservation des sols sont utilisées pour freiner l'érosion :

- L'implantation de structures anti-érosion ;
- L'aménagement des bassins versants et des cours d'eau.

Il s'agit de l'aménagement des bassins versants par la réalisation de la correction torrentielle et l'aménagement de cours d'eau : En créant des ouvrages de correction dans la gorge du torrent. Ouvrages qui arrêteront les matériaux et diminueront la pente, des aménagements déterminants, réduisant l'érosion à sa source.

La figure 9 fournit un exemple de seuil de sédimentation en gabions et en pierres sèches en vue de réduire la torrencialité du réseau hydrographique par la réalisation d'un nombre déterminé de ces ouvrages sur le même affluent [54].



Figure II.8: Seuil de sédimentation en gabions et en pierres sèches [54].

Dans le cadre de la protection des bassins, un programme spécial a été lancé par les services des forêts. Il s'agirait de traiter une superficie de 1,5 millions d'hectares dans le territoire national. Les coûts sont évalués à environ 16 milliards de DA.

II.2.3.2 Le reboisement

La plantation des cultures suivant les courbes de niveau et fixation des berges des oueds est une action préventive. En Algérie, vingt-sept bassins versants sont concernés par les opérations de reboisement pour protéger les barrages face à l'érosion, comme le bassin versant des Issers (barrage de Beni Amrane) qui fait 3700 km² ou celui de Béni Haroun, 7200 km². Il y a également, la nature du sol pour déterminer les espèces d'arbres à planter, il est prévu de consacrer un budget de 18 milliards de DA à ces opérations [54].

II.2.3.3 La réalisation des barrages de décantation à l'amont

On peut construire plusieurs types de structures dans le bassin, par exemple, des bassins de rétention ; conçus soit pour retenir les matériaux solides définitivement pendant la durée de vie de l'ouvrage, soit pour stocker les matériaux solides provenant du ruissellement créé par un certain nombre d'orages entre des vidanges périodiques. L'exemple en Algérie, est le cas du barrage de Boughezoul situé à la ville de Médéa qui est exploité partiellement comme bassin de décantation du barrage de Ghrib, Il réduit l'envasement de Ghrib de près de 24% [54].

II.2.3.4 La réalisation des barrages de chasses

En Algérie, La technique du soutirage peut être un moyen efficace de lutte contre l'envasement des retenues de barrages en Algérie compte tenu de son faible coût et surtout de la présence des courants dans l'ensemble des retenues. Son rendement peut atteindre 70 % des apports solides totaux entrants dans la retenue, c'est à dire que la durée de vie de l'ouvrage sera augmentée d'un tiers. Le barrage d'IghilEmda est parmi les premiers au monde à avoir été équipé d'un dispositif installé spécialement pour le soutirage des sédiments. La durée de vie de ce barrage est ainsi multipliée par trois [54].

II.2.3.5 La surélévation des digues

La surélévation constitue l'une des techniques qui permettent de prolonger la vie d'un barrage. L'augmentation de la hauteur de la digue permet de compenser le volume d'eau perdu en profondeur occupé par la vase. Cette opération est très encourageante.

En Algérie, neuf barrages ont été surélevés. Toutes les opérations de surélévation en Algérie ont permis de récupérer jusqu'en 2007 une capacité de 100 millions de m³. Cette technique a été réalisée sur le barrage K'sob. Certainement, cette réserve supplémentaire créée par la surélévation a augmenté la durée de vie de ces ouvrages, mais l'évolution de l'envasement dans le temps croît beaucoup plus rapidement qu'à l'état initial (sans surélévation) [54].

II.2.3.6 Extraction par siphonnement

L'ingénieur Jandin a développé et utilisé cette méthode entre 1892 et 1894, pour évacuer des sédiments avec un siphon à travers le barrage de Djidiouia en Algérie, ainsi 1,4×10⁶ m³ de limons et d'argile ont été évacués en trois ans.

L'appareil de Jandin se composait d'un tuyau flexible d'un diamètre de 61 cm, avec une capacité d'évacuation de 1,53 m³/s dans des conditions normales d'opération. A partir d'une ouverture dans le bas du barrage, il était relié à des pontons flottants en tôle, ce qui permettait de déplacer le tuyau dans la retenue dans un rayon d'environ 1,6 km.

Hannoyer a développé une nouvelle méthode basée sur le principe de "l'hydro-aspirateur" proposé par Jandin 80 ans auparavant (Figure 9). Un tuyau flexible est relié à la vidange de fond. Le tuyau est amovible afin de créer une charge pour évacuer les sédiments. Il n'y a pas besoin de pompe. Le tuyau peut avoir une longueur de plus de 2 km, et il est attaché à des flotteurs afin de rester au-dessus de la surface de la vase [54].

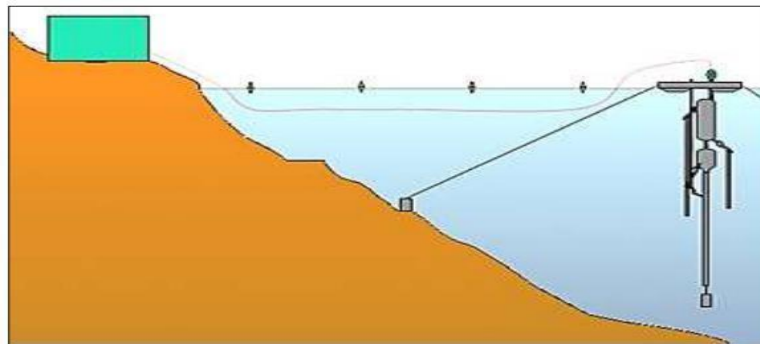


Figure II.9 : Schématisation la disposition de l'hydro-aspirateur [54].

II.2.3.7 Le dragage des barrages

Le dragage est une opération de prélèvement de matériaux, notamment boues, limons, sable, et graviers, au fond d'un cours d'eau ou d'un plan d'eau à l'aide de moyens mécanique, hydraulique ou pneumatique dans un but d'aménagement ou d'entretien, c'est-à-dire tous travaux nécessaires pour rétablir un cours d'eau dans sa largeur et sa profondeur naturelle. Cela exclut un approfondissement ou un élargissement du lit.

Le dragage peut également être défini de façon générale comme l'ensemble des actions caractérisées par un prélèvement de matière par excavation sous l'eau par un déversement de ces produits dans la veine de l'eau, coté aval de la retenue ou sur le rivage.

L'opération de dragage peut se décomposer en plusieurs étapes : Etudes préalables et caractérisation des sédiments, choix de la filière de destination, extraction des boues, transport des matériaux de dragage, et traitement, mais selon certains auteurs, la récupération d'une capacité de stockage par dragage est une opération très coûteuse qui n'est pas économique pour les grandes retenues.

La première drague utilisée en Algérie en 1957 est la drague réfouleuse « Lucien Dumay ».

Depuis les années 2000, plus de 20 millions de m³ de vase ont été extraits de nos barrages [54].

A. Les types de dragages

On distingue trois types de dragages qui diffèrent selon la nature des sédiments à draguer et le type de travail à réaliser :

- L'entretien : sont des opérations répétitives, visant à extraire les sédiments déposés qui gênent la navigation.
- L'aménagements : sont des opérations d'aménager et créer des canaux, des bassins de plaisance et autres voies de navigation.
- L'approfondissement : elle nécessite de déplacer d'importants volumes de sédiments et demandent des moyens de dragages importants.

B. Les techniques de dragage disponibles

Différentes techniques de dragage ont été développées. Il est courant de classer les équipements de dragage selon leur principe général de fonctionnement. Trois catégories peuvent être recensées :

✓ Les dragages mécaniques

Ils s'effectuent grâce à des engins à godet qui opèrent soit depuis les berges (pelle mécanique), soit depuis la surface (pelle sur ponton, drague à godets...etc.). L'extraction de sédiments pollués se fait actuellement majoritairement par cette méthode [54].



Figure II.10 : dragues à pelle ou à cuillère [54].



Figure II.11 : dragues rétro caveuses [54].

✓ Les dragages hydrauliques

Les matériaux sont désagregés par jets d'eau sous pression ou par rotation d'un outil et mis en suspension pour être aspirés et évacués par des pompes vers les points de stockage. Par exemple la technique aspiratrice utilise des pompes centrifuges, aspirant à travers un tube d'élinde, muni d'un embout, appelé bec d'élinde, un mélange eau sédiments. Elles aspirent et refoulent donc les sédiments sous forme de boues liquides dont la teneur en eau varie autour de 85 % (Figure 12).



Figure II.12: Dragues aspiratrices simple [54].

✓ **Les dragages à l'américaine**

C'est une technique particulière qui consiste à provoquer la remise en suspension des sédiments au moyen d'une hélice ou d'air comprimé dans les cours d'eau ou chenaux à fort courant. Les sédiments sont repris dans le flux et se redéposent le plus souvent en aval. Dans certains cas, une conduite de refoulement peut assurer le transfert des sédiments à plusieurs kilomètres du lieu de dragage.

Le dragage à l'américaine consiste à rejeter en continu dans la veine d'eau les matériaux dragués afin d'utiliser le courant naturel pour évacuer les produits. Elle se pratique pour des fleuves et rivières à fort débit [54].

II.3 L'ENVALEMENT DES BARRAGES EN ALGERIE

La majorité des barrages en Algérie ont une durée de vie de l'ordre d'une trentaine d'année. Il est rare cependant, que l'on puisse admettre à l'issue d'une période aussi courte, l'abondance d'un aménagement hydraulique particulièrement lorsqu'il s'agit de réservoirs destinés à l'adduction en eau potable ou l'irrigation dont les intérêts socio-économiques justifient une garantie de service illimitée. Il importe donc, non seulement de prévoir le rythme de comblement de la retenue de façon aussi précise que possible, de manière à prendre les dispositions économiques et sociales qui s'imposent, mais aussi et surtout de sauvegarder au maximum l'existence de la retenue en luttant contre ce phénomène, utilisés en Algérie. Nous pouvons citer :

II.3.1 Le reboisement, la restauration des sols la formation des banquettes, la plantation de végétation à longues tiges dans les oueds

Il est à noter que les tamaris qui ont poussé à l'amont des barrages de Bouhanifia, du Fergoug, de Cheurfas constituent de véritables pièges à sédiments. Dans le cadre de la protection des bassins, un programme spécial a été lancé par les services des forêts. Il s'agirait de traiter une superficie de 1,5 millions d'hectares d'ici l'an 2010. Soit un rythme de réalisation de 67.000 ha/an. Les coûts sont évalués à environ 16 milliards de DA.

II.3.2 Réalisation de barrage de décantation

Il existe un cas en Algérie, c'est le cas du barrage de Boughezoul qui est exploité partiellement comme bassin de décantation du barrage de Ghrib. Ce barrage a permis de retenir depuis sa création environ $35 \times 10^6 \text{ m}^3$ de vase. Il réduit l'envasement de Ghrib de près de 24 % [56].

II.3.3 Surélévation des barrages

Cette technique a été réalisée sur cinq barrages : Fergoug, Mefiouch, Bakhada, K'sob, Zardézas. La surélévation des barrages permet d'augmenter la capacité de la retenue et donc de compenser la valeur envasée [57].



Figure II.13 : Méthode de surélévation des barrages [57].

II.3.4 Chasses dites à l'Espagnole

Méthode utilisée pendant les premières crues pour les barrages de moindre importance (tel que barrage du barrage Hamiz, Beni Amrane, K'sob, ...).

Cette méthode est efficace quand elle est possible. Elle consiste à vider complètement le barrage au début de l'automne et à le laisser vider, toutes vannes ouvertes, jusqu'aux premières pluies. La première crue enlève sans difficulté les vases de l'année non encore consolidées [56].

II.3.5 Soutirage des courants de densité

Le soutirage des courants de densité a donné des résultats spectaculaires en Algérie. Cette méthode est utilisée aux barrages d'IghilEmda et Oued El Fodda [56].

II.3.6 Dragage des barrages

A travers l'expérience algérienne, le dragage s'est avéré une solution sûre mise à part les difficultés de mise en dépôt et le coût. Jusqu'à maintenant, l'Algérie a procédé un dragage sur quatre barrages : Cheurfas, Fergoug, Hamiz et Fom-El-Gherza (voir figure II.14). La première opération de dévasement en Algérie, a commencé en 1957 et a concerné le barrage de Cheurfas (Wilaya de Mascara) avec un volume à extraire de 10 hm³. A ce jour 10 barrages ont été concerné par le dévasement.

Avec le programme en cours et celui lancé en 2010, le dévasement aura permis un gain de capacité de 108 hm³ [57].



Figure II.14 : Dragage activant dans la retenue du barrage Foug-El-Gherza (Biskra) [57].

II.3.7 Reprise de barrage

La reprise de barrages déclassés n'est pas considérée comme une lutte contre l'envasement mais nous citerons quand même deux cas en Algérie ayant permis un important gain de capacité de stockage [57].

II.3.8 Valorisation des vases

En Algérie, l'exploitation de la vase pour la fabrication des matériaux de construction peut s'avérer utile vu le déficit en matériaux de construction que connaît le pays.

Une étude (B. Remini 2006) orientée vers l'utilisation de la vase pour la fabrication de la brique a été réalisée sur la vase de onze barrages algériens les plus envasés exemple : barrage Lakhel (Wilaya de Bouira) (figure II.15), et a donné des résultats satisfaisants.

La vase doit être considérée comme un produit bénéfique et non un simple rejet dont les difficultés de stockage posent un problème d'environnement. Valorisée, elle peut être une alternative aux coûts des opérations de dragage [57].

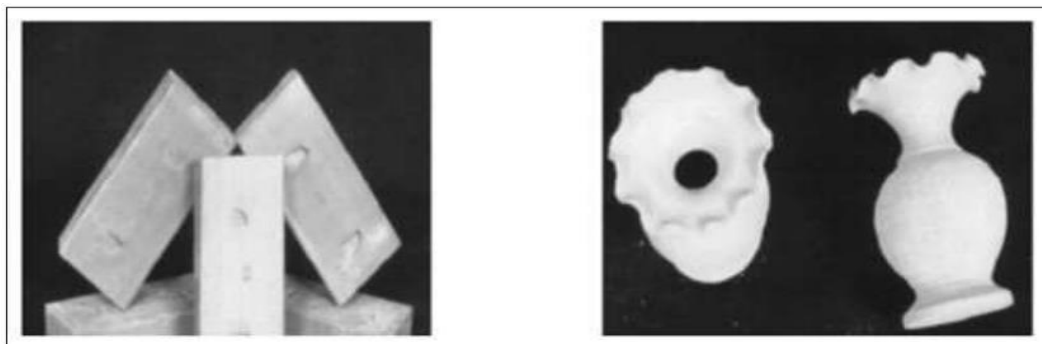


Figure II.15 : Briques et récipients à base de la vase du barrage Lakhel (Bouira) [57].

II.3.9 Envasement en quelques chiffres

Dans le tableau ci-dessous, sont donnés les taux d'envasement des différents barrages en Algérie [58].

Tableau II.6 : Quelques barrages envasés en Algérie (ANBT, 2011) [58].

N°	Barrage	Wilaya	Capacité initiale Hm ³	Capacité (dernier levé) Hm ³	Envasement annuel Hm ³ /an
01	Meurad	Tipaza	0.30	0.25	0.005
02	Oued-fodda	Chlef	228.00	102.85	2.66
03	Boughzoul	Medea	55.00	20.27	0.66
04	Hamiz	Boumerdes	21.00	15.53	0.35
05	Ghrib	Ain-defla	280.00	115.32	3.20
06	f.-el-gueiss	Khenchla	3.00	0.43	0.03
07	Bou-hanifia	Mascara	73.00	38.11	0.78
08	f.-el-gherza	Biskra	47.00	14.89	0.80
09	Beni-bahdel	Tlemcen	63.00	54.63	0.20
10	Sarno	S.B.Abbes	22.00	21.25	0.12
11	Bakhadda	Tiaret	56.00	39.94	0.27
12	Ksob	M'sila	29.50	12.34	0.30
13	Zardezaz	Skikda	31.00	18.68	0.40
14	Meffrouch	Tlemcen	15.00	14.99	0.12
15	Cheffia	El-taref	171.00	158.83	0.17
16	d.torba	Bechar	350.00	260.25	1.30
17	Fergoug	Mascara	18.00	3.12	1.50
18	s.m.b.a	Relizane	235.00	153.71	1.00
19	Derdeur	Ain-defla	115.00	105.12	0.83
20	Harreza	Ain-defla	70.00	76.65	0.28

21	Merdja.s.a	Relizane	54.90	47.97	0.59
22	Guenitra	Skikda	125.00	117.82	0.13
23	Ouizert	Mascara	100.00	93.91	0.30
24	Keddara	Boumerdes	145.60	142.39	0.05
25	Sidi-yacoub	Chlef	280.00	252.85	0.17
26	Lekhal	Bouira	30.00	27.16	0.17
27	Bou roumi	Blida	188.00	181.86	0.80
28	Ain-zada	Borj.b.a	125.00	121.40	0.50
29	h.grouz	Mila	45.00	40.15	0.40
30	Ain-dalia	S.Ahras	82.00	76.08	0.75
31	Dahmouni	Tiaret	41.00	39.52	0.40
32	Hamam debag	Guelma	200.00	184.35	0.53
33	Beni-amrane	Boumerdes	16.00	11.85	4.10

34	Gargar	Relizane	450.00	358.28	4.50
35	Sidi-abdelli	Temcen	110.00	106.61	0.18
36	Harbil	Medea	1.00		
37	Ladrat	Media	10.00	8.47	0.02
38	c.bougara	Tissemsilt	13.00	11.32	0.30
39	Chorfa	Mascara	82.00	70.21	0.36
40	Boukourdane	Tipaza	97.00	105.00	0.36
41	Beni-zid	Skikda	40.00	39.39	0.52
42	Babar	Khenchla	41.00	38.01	0.68
43	Oued-cherf	S.Ahras	157.00	152.65	0.52
44	Mexa	El-taref	47.00	30.27	0.11
45	Mexa	El-taref	47.00	30.27	
46	h.boughrara	Tlemcen	177.00	175.45	0.43
47	Brezina	El bayadh	122.50	108.47	1.20
48	f.d.gazelles	Biskra	55.50	54.74	0.30
49	Zit emba	Skikda	117.39	116.59	0.24
50	Taksebt	Tizi-ouzou	175.00	181.02	0.26
51	El-agrem	Jijel	33.90	33.04	0.09
52	Beni-haroun	Mila	960.00	960.00	0.00
53	k.medouar	Batna	69.10	74.32	0.02
54	o.mellouk	Ain-defla	127.00	127.00	1.40

55	Sikkak	Tlemcen	27.00	27.00	0.11
56	Tilesdit	Bouira	167.00	167.00	0.69
57	Koudiart rosfa	Tissemsilt	75.00	75.00	1.15
58	Kramis	Mostaganem	45.38	45.38	0.55
59	s.m.ben talba	Ain-defla	75.00	75.00	0.40
60	t.nador	Tipaza			
61	Tchy-haf	Bedjaïa	80.00	61.80	4.70
62	t.chiffa	Medea			
63	bougous	El-taref	120.00	120.00	
64	Kissir	Jijel	68.00	68.00	0.15
65	k.acerdoune	Bouira	640.00	640.00	4.00
66	Boussiaba	Jijel	120.00	120.00	0.35
67	Kerrada	Mostaganem	70.00	70.00	

II.3.10 Présentation du barrage Chorfa

Le barrage Chorfa (ainsi appelé après la réalisation de sa nouvelle digue) situé dans la Daïra de Sig, à une quarantaine de kilomètres du chef-lieu de la wilaya de Mascara, de capacité initiale 82 hm³, régularise les eaux du sous bassin de la Mekerra (Oued Mebtouh), et alimente les localités d'Oued Mebtouh, Boudjebaha El-Bordj et Aïn Adden qui relèvent du territoire de la wilaya de Sidi Bel-Abbès. La production actuelle dépasse les 25 000 m³ /jour. Sachant qu'il est d'une capacité de 70 millions de mètres cubes, en raison de la sécheresse qui sévit dans la région, son niveau de remplissage a baissé à 13,5 millions de mètres cubes.

La situation géographique du barrage de Chorfa est représentée dans la Figure II.18

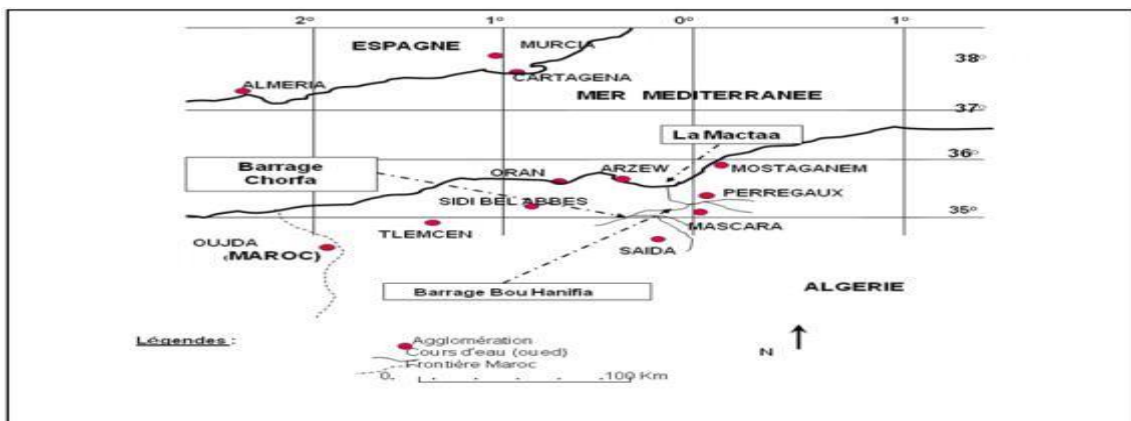


Figure II.18 : Situation géographique de la ville de Mascara et du barrage des Chorfa

Les figures II.19 II.20 et II.21 représentent des photos récentes du barrage Chorfa.



Figure II.19 : Vue générale du barrage de Chorfa

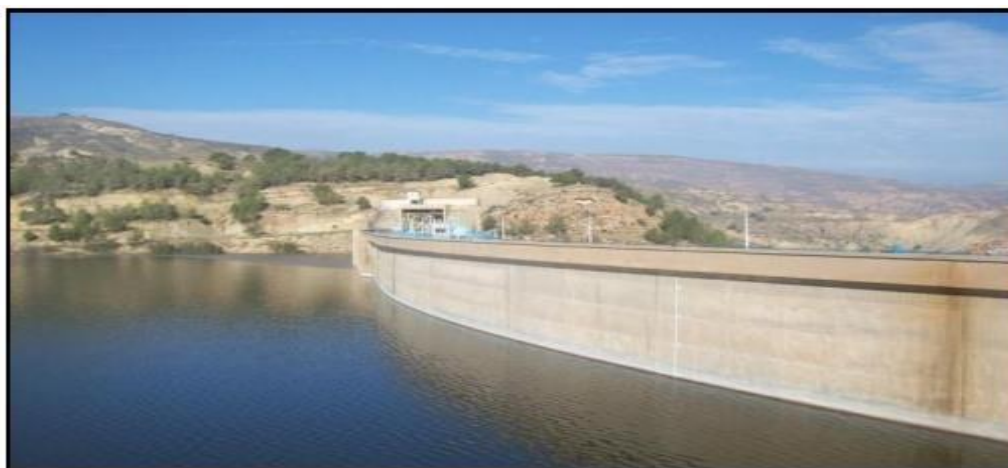


Figure II.20 : Vue du côté interne de la digue du barrage Chorfa



Figure II.21 : Vue du côté interne de la digue du barrage Chorfa

Le barrage Chorfa comme beaucoup d'autres en Algérie est soumis à un phénomène d'envasement progressif. Au bout des dernières années sa capacité a chuté d'une dizaine de millions de m³ ; soit un taux annuel d'envasement dépassant un million de m³.

Cela traduit la complexité du problème : construire l'ouvrage, le protéger, le vidanger régulièrement, préserver le site amont et aval. La valorisation des produits issus du dragage contribue sans aucun doute au développement de la région et à la résolution des questions liées au largage des vases.

II.4 LES SEDIMENTS DE DRAGAGE

II.4.1 Origine et définition

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

II.4.2 Constitution des sédiments

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

1. La matrice minérale : elle comprend essentiellement du quartz, des feldspaths, et parfois des carbonates.
2. La fraction argileuse : composée de minéraux argileux tels que la kaolinite, l'illite ou les montmorillonites.
3. La fraction organique : formée de débris végétaux, de micro-organismes provenant de la décomposition de la matière organique.
4. L'eau, présente sous différentes formes :
 - L'eau libre, occupant les vides entre les particules solides

- L'eau liée, absorbée sur la surface des grains minéraux
- L'eau colloïdale, qui hydrate les colloïdes argileux
- L'eau adsorbée, formant un film autour des particules fines.

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

II.4.3 Le dragage des sédiments

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

- Prévenir les inondations, en maintenant la capacité hydraulique des cours d'eau
- Assurer le tirant d'eau nécessaire à la navigation fluviale ou maritime
- Assainir les zones portuaires ou urbaines, en éliminant les sédiments contaminés ou excédentaires
- Restaurer les milieux naturels, en favorisant une meilleure circulation de l'eau et le bon état écologique des habitats. Brités, sables vaseux en chenal, etc.) [59].



Figure II.22 : Engin mécanique de dragage [59].

L'extraction et l'évacuation des sédiments sont les deux phases importantes d'une opération de dragage. En effet, lors de ces phases, les sédiments subissent de nombreuses transformations pouvant modifier leurs caractéristiques et leurs comportements. Ces deux étapes peuvent aussi avoir un impact direct sur l'environnement par la remise en suspension de ces sédiments.

Il y a quatre principales techniques de dragage : dragage en eau, dragage hydraulique, dragage mécanique et dragage pneumatique.

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

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

- Le stockage sous eau
- La mise en décharge
- Le stockage
- La valorisation.

II.4.4 La valorisation des sédiments de dragage

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

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

- La fabrication de matériaux de construction : briques, céramiques, blocs de béton ou ciment, en mélange avec des liants hydrauliques. Les sédiments peuvent jouer un rôle de charge minérale ou même de substitut pouzzolanique selon leur composition.

- L'aménagement de sols ou remblais : après caractérisation géotechnique, les sédiments non pollués peuvent être utilisés pour le remblaiement de carrières, la stabilisation de berges ou la création d'ouvrages paysagers.
- L'usage agricole : dans certains cas et après validation sanitaire, les sédiments riches en matières organiques peuvent être utilisés comme amendement des sols.
- La reconstitution d'habitats naturels : en milieux côtiers ou estuariens, les sédiments fins peuvent être réutilisés pour restaurer les zones humides, les marais ou les lagunes dégradées.

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

II.4.4.1 Valorisation dans le béton et mortier

L'utilisation des sédiments de dragage dans le béton et le mortier constitue une solution innovante et durable permettant à la fois de valoriser un déchet abondant et de préserver les ressources naturelles. Les granulats naturels, notamment le sable, sont largement exploités pour la fabrication des bétons et mortiers. Cependant, leur disponibilité devient de plus en plus limitée et leur extraction engendre des impacts environnementaux considérables. Dans ce contexte, les sédiments dragués, une fois traités, apparaissent comme une alternative viable.

Avant leur intégration, les sédiments doivent subir un traitement afin d'améliorer leurs propriétés physiques, chimiques et mécaniques. Ces traitements peuvent inclure le séchage, la calcination ou encore des procédés chimiques permettant de stabiliser les polluants éventuels. Plusieurs recherches [60] 42 ont démontré qu'une substitution partielle du sable par des sédiments traités (notamment entre 20 % et 33 %) permet d'obtenir des mortiers présentant une bonne résistance à la compression, une durabilité acceptable et une porosité maîtrisée. Par exemple, une étude [61] a montré qu'un taux de substitution de 33 % permettait même une amélioration de la résistance mécanique par rapport à un mortier de référence.

Cependant, des substitutions plus élevées (jusqu'à 66 % ou 100 %) peuvent entraîner des effets négatifs tels qu'une augmentation de la porosité, une diminution de la masse volumique, un retrait plus important et même l'apparition de fissures. Ces phénomènes sont liés à la nature

fine, souvent argileuse, et à la teneur en matière organique des sédiments. C'est pourquoi une étude approfondie des caractéristiques des sédiments est indispensable avant leur utilisation.

En Algérie, certaines initiatives ont été menées pour intégrer les sédiments issus du dragage des barrages dans des bétons ou mortiers. Par exemple, le barrage de Bouhanifia, qui dispose d'une capacité en eau de 73 millions de m³ et ne renferme actuellement qu'une quantité de 34 millions de m³, soit environ 50 % de sa capacité réelle, vient de bénéficier d'une opération de dragage. Cette opération est assurée par une société algérienne, filiale de l'AMBT, sous la dénomination d'Hydro-Dragage. Cette entreprise devait extraire une quantité de 6 millions de m³ de vase, qui sera ensuite déposée dans des bassins permettant par la suite la récupération des eaux par retour vers le barrage.

L'opération s'effectue à raison de 1 000 m³/jour, soit 250 000 m³/mois, et les travaux devraient durer 31 mois. Cette opération, entamée le lundi 10 juin 2013, a permis la création de 100 postes de travail pour une durée d'environ 36 mois. La vase retirée sera retenue sur les terres agricoles abritant les 15 bassins nécessaires à cette opération.

Les barrages de la wilaya renferment actuellement plus de 153 millions de m³ d'eau, ce qui permet à la wilaya de Mascara d'être à l'abri de tout problème d'eau durant cet été. La ville de Mascara, à elle seule, consomme 18 000 m³/jour et vient de bénéficier d'un dédoublement pour 10 000 m³, soit 28 000 m³ au total, ce qui permettra aux citoyens d'avoir de l'eau quotidiennement pour certains quartiers, et un jour sur deux pour d'autres [62].



Figure II.23 : Les Bassins de décantations des sédiments dragués du barrage Bouhanifia avant et après l'opération de dragage [62].

II.5 CONCLUSION

Le phénomène de l'envasement des barrages est beaucoup plus important dans les régions arides. A cause d'une forte érosion des sols des bassins versant et aussi le sapement des berges des oueds qui peut être spectaculaire en périodes de crues. Mais malheureusement ce phénomène n'a jamais été quantifié [63].

Aujourd'hui, le réseau hydrographique du nord Algérien est saturé. Il y a peu de sites favorables pour la réalisation de nouveau barrages. La priorité sera donnée à l'entretien et à la maintenance des barrages en exploitation. La recherche et la prospection de nouveaux sites est une piste à encourager. Quant au sud Algérien, il faut construire les barrages souterrains tout en explorant de nouveaux sites. Il faut rappeler que l'Algérie possède une dizaine de barrages. Un nombre de barrages assez faible vu le réseau hydrographique composé d'oueds qui drainent des crues éclairées de débits exceptionnels.

CHAPITRE III

SUNTHESE DES TRAVAUX SUR

L'ATTAQUE ACIDE ET

CARBONATATION

III.1 INTRODUCTION

Dans le cadre de l'amélioration de la durabilité des matériaux cimentaires, de nombreuses recherches ont été consacrées à l'effet des ajouts minéraux sur leur comportement en milieux agressifs. Cette synthèse rassemble les résultats les plus significatifs portant sur la résistance des mortiers et bétons aux attaques acides et à la carbonatation. Les études analysées mettent en évidence l'influence positive de matériaux tels que le métakaolin, la fumée de silice, la pouzzolane naturelle et la perlite sur la microstructure, la porosité, et la stabilité chimique des liants hydrauliques. Ces résultats permettent de mieux comprendre les mécanismes d'amélioration de la durabilité et d'orienter le choix des formulations dans les environnements sévères [23]

III.2 ÉTUDES RELATIVES A L'ATTAQUE ACIDE DU BETON

Le suivi de la perte en poids en fonction du temps des éprouvettes des BAP immergées dans la solution à base d'acide chlorhydrique HCl à 5 % de concentration est illustré par la figure III.1.

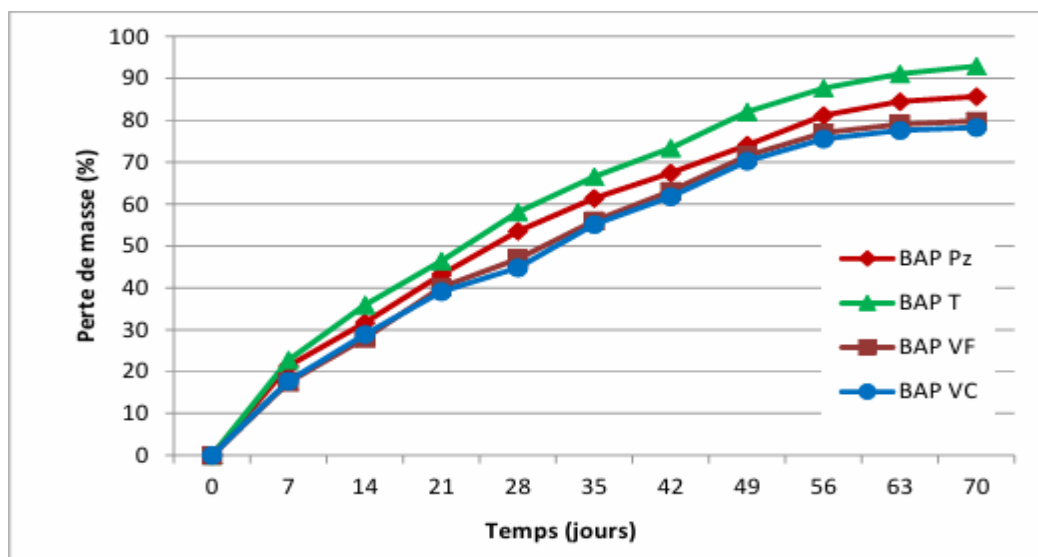


Figure III.1 : Variation de la perte en poids des BAP en fonction de la période d'immersion en 5% HCl [64].

Belarbi [64] a observé une perte continue de masse à partir de la première jusqu'à la dixième semaine pour tous les types de bétons immergés dans une solution d'acide chlorhydrique à une

concentration de 5 %. Il a également constaté que le béton BAP T a subi une dégradation plus importante par rapport aux autres bétons autoplaçants, avec une perte de 92 % de sa masse après 70 jours d'immersion. Quant au béton BAP PZ, il a enregistré presque la même perte de masse, atteignant 86 % après 70 jours.

Belaribi [64] a aussi remarqué que les bétons BAP VF et BAP VC ont montré une meilleure résistance à l'attaque de l'acide chlorhydrique comparativement aux autres types de bétons, avec des pertes de masse respectives de 79 % et 78 % après 70 jours d'immersion.

Le suivi de la perte en poids en fonction du temps des éprouvettes des BAP immergées dans la solution à base d'acide sulfurique H_2SO_4 est illustré par la figure III.2

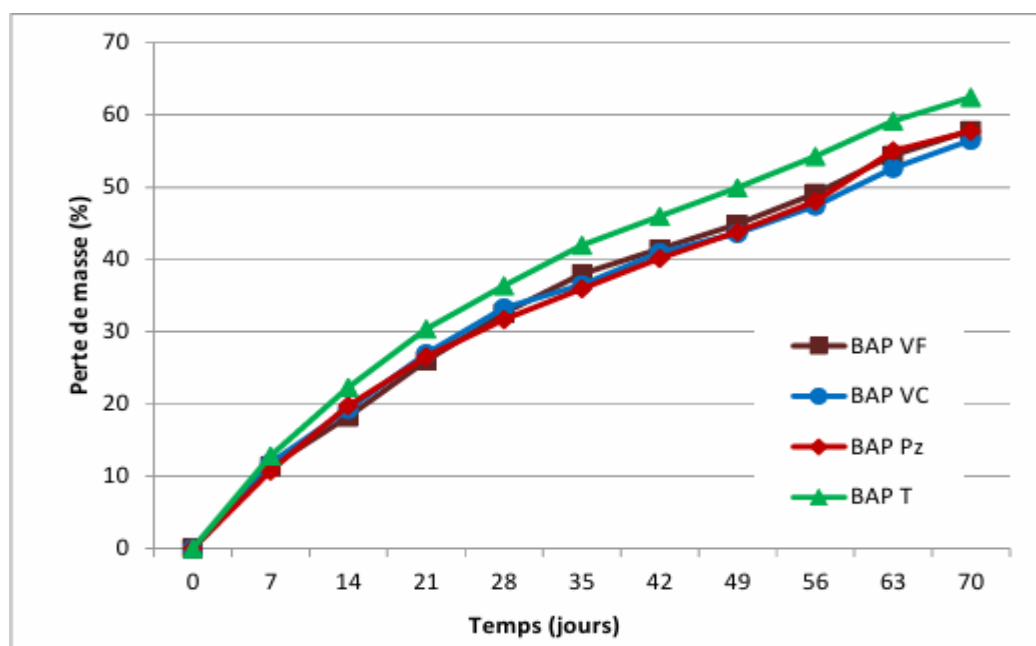


Figure III.31. Perte de masse des bétons âgés de 90j et immergés dans la solution H_2SO_4 [64]

D'après la même étude [64], il a été constaté que le béton BAP T immergé dans une solution d'acide sulfurique a subi une dégradation plus importante par rapport aux autres types de bétons, avec une perte de 62 % de sa masse après 70 jours d'immersion.

Il convient également de noter que les bétons autoplaçants à base de vase de Chorfa et de Fergoug ont montré une meilleure résistance à l'attaque de l'acide sulfurique comparativement aux autres bétons, puisqu'ils ont perdu 56 % de leur masse après 70 jours d'immersion.

La figure III.3.et III.4 illustre la perte de masse des différents mortiers après 28 jours d'immersion dans une solution d'acide sulfurique et une solution d'acide chlorhydrique à une concentration de 5 %

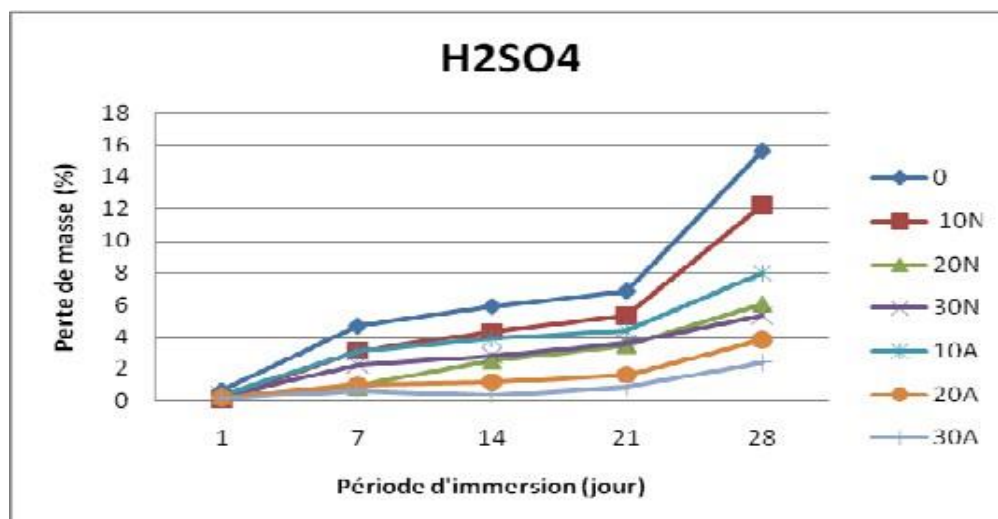


Figure III.3: perte de masse des différents mortiers à 28 jours d'immersion (5% H₂SO₄) [65].

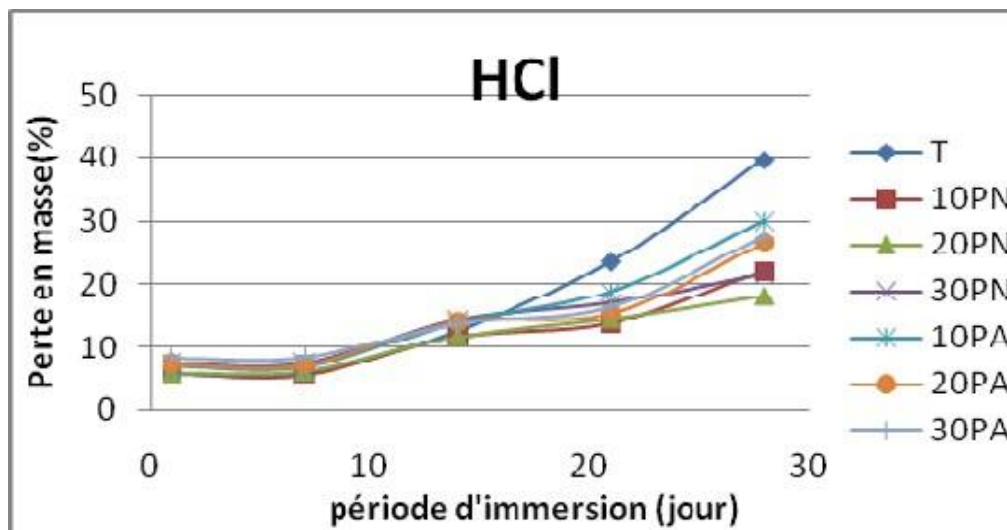


Figure III.4: perte de masse des différents mortiers à 28 jours d'immersion (5% HCL) [65].

Selon les résultats obtenus par M. BENKADDOUR et al. [65], les mortiers contenant des additions minérales présentent une meilleure résistance aux attaques acides (Figure III.3 et Figure III.4). La réduction de la perte de masse est particulièrement remarquable dans les mortiers contenant de la poudre activée (PA) immergés dans l'acide sulfurique, avec une

amélioration atteignant jusqu'à 84,80 % par rapport au mortier témoin. Ainsi, les auteurs ont recommandé l'utilisation de 20 % de pouzzolane artificielle pour les milieux agressifs contenant de l'acide chlorhydrique, et de 30 % de pouzzolane artificielle (argile calcinée) pour les solutions agressives contenant de l'acide sulfurique.

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

Cette amélioration est due à la réaction pouzzolanique qui réduit la porosité en formant des gels C-S-H, limitant ainsi la pénétration de l'acide.

La Figure III.5 présente les résultats Cinétique de dégradation des pâtes en immersion dans l'acide citrique [33]

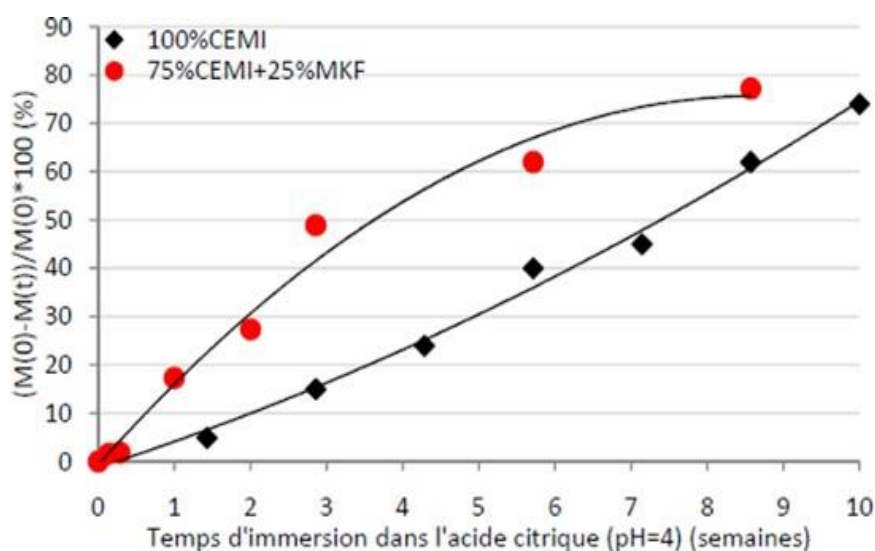


Figure III.5 : Cinétique de dégradation des pâtes en immersion dans l'acide citrique [33]

D'après les travaux de Rackel [33] la Figure III.5, les pâtes avec métakaolin sont moins résistantes à l'attaque vis-à-vis de l'acide citrique que celle avec 100% de CEM I; et la seule hypothèse pour expliquer ce phénomène est la pression des sels d'acide citrique. Les sels se formant dans les pores de la matrice, exercent une pression capable de la fissurer.

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

La figure III.6 montre perte de masse en fonction de temps d'immersion dans l'acide sulfurique

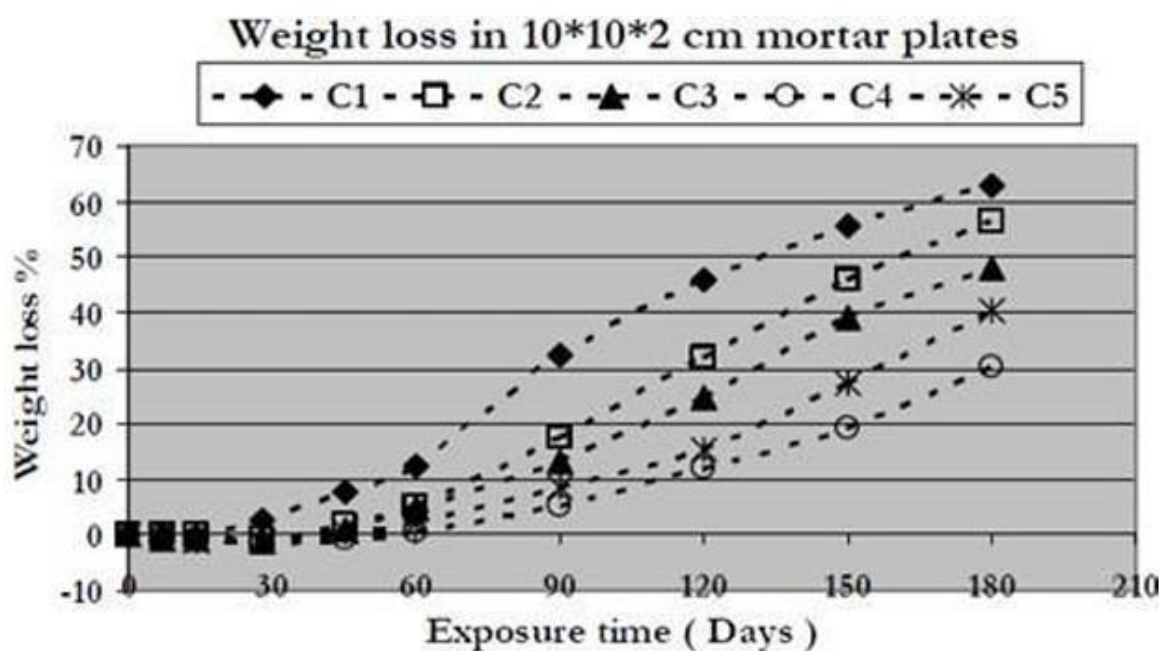


Figure III.6: Perte de masse en fonction de temps d'immersion dans l'acide sulfurique [66]

Recherche de Rahmani et Ramzanian [66] : Ils ont étudié la perte de masse des mortiers et bétons soumis à une attaque d'acide sulfurique sur une période de 6 mois. Les résultats sont les suivants (Figure III.6) :

- Béton à base de filler (C2) : perte de masse de 17,8 %.
- Addition binaire filler + fumée de silice (C3) : perte de masse de 18,6 %.
- Addition binaire filler + pouzzolane naturelle (C4) : perte de masse de 10 %, indiquant une meilleure résistance dans cet environnement acide.
- Béton témoin (C1) : perte de masse plus importante.

III.3 CARBONATAION

D'après les données de la littérature, on peut remarquer que l'effet de la vase calciné sur la carbonatation des bétons est très peu étudié. Toutefois, les travaux dans ce domaine se concentrent sur l'influence des ajouts minéraux (filaires calcaires, pouzzolane, cendres volantes...) sur la carbonatation des bétons. Voici quelques études marquantes :

La figure III.7 représente les mesures de la profondeur de carbonatation naturelle de trois échantillons formulations des BAP exposés à l'air.

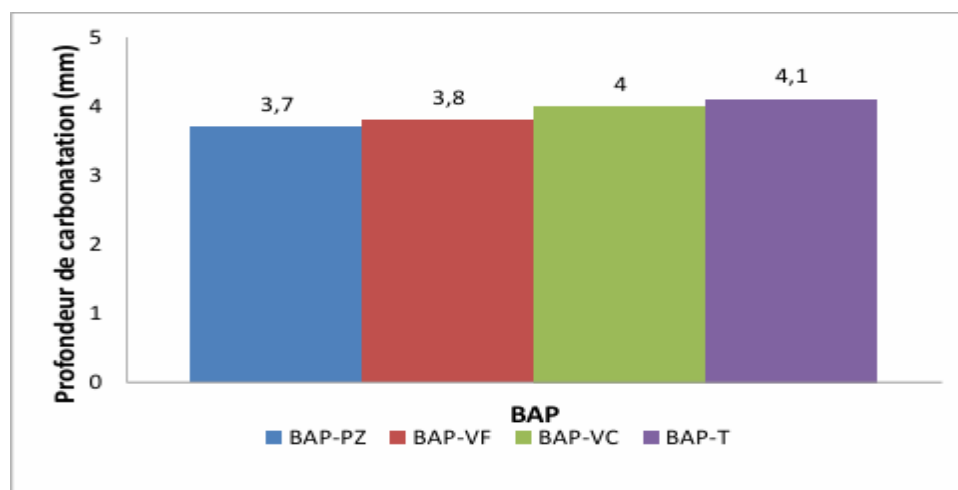


Figure III.7: Profondeur de carbonatation naturelle des bétons d'études, après 15 mois à l'air libre de laboratoire [64].

À travers l'étude de Belarbi [64], il a été démontré que l'utilisation de la vase calcinée et de la pouzzolane naturelle contribue de manière significative à l'amélioration de la résistance des bétons autoplaçants vis-à-vis de la carbonatation accélérée.

Les résultats ont montré que la profondeur de carbonatation du BAP-T était plus élevée que celles des BAP-VC, BAP-VF et BAP-PZ.

La (figure III.7) et (figure III.8) montre la profondeur de carbonatation en fonction de la racine du temps

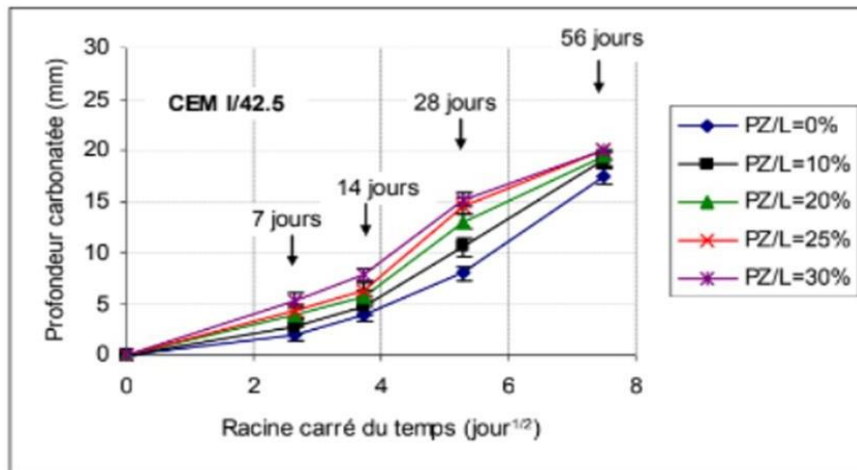


Figure III.7: Profondeur de carbonatation (projection de phénolphthaléine) en fonction de la racine du temps (CEM I/42.5) : mode A.F.P.C.-A.F.R.E.M [67].

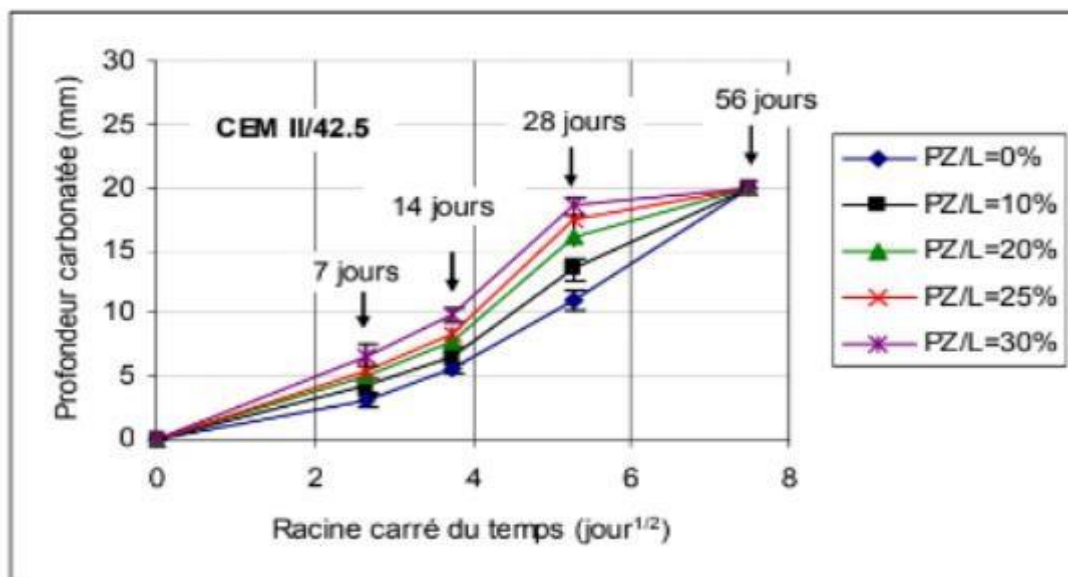


Figure III.8 : Profondeur de carbonatation (projection de phénolphthaléine) en fonction de la racine du temps (CEM II/42.5) : mode A.F.P.C.-A.F.R.E.M [67].

Selon les travaux de KAID, N., AYED, K et Al [67] les mortiers contenant de la pouzzolane naturelle (PN) présentent une profondeur de carbonatation plus élevée que les mortiers de référence, particulièrement avec des taux de substitution de 20% à 30%. Cette augmentation est due à la réduction de la portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) dans les mortiers pouzzolaniques, ce qui favorise la réaction de carbonatation. Les mortiers avec du ciment CEM II montrent une plus grande

sensibilité à la carbonatation comparés aux mortiers avec CEM I La (figure III.7) et (figure III.8) montre la profondeur de carbonatation en fonction de la racine du temps

GUENANOU, F [68] à trouver qu'après 90 jours de carbonatation accélérée, les mortiers montrent un gain de masse en lien avec la formation de carbonates, traduisant une réduction de la porosité. La profondeur de carbonatation maximale observée est de 11 mm pour M0 et M2, et de 9 mm pour M1. La carbonatation a entraîné une amélioration de la résistance à la compression (jusqu'à +20%) et une diminution de la porosité accessible à l'eau (jusqu'à -36%). Les analyses DRX et MEB confirment la transformation de la portlandite en calcite et vatérite, densifiant la matrice du mortier.

On peut citer quelques travaux sur la comparaison entre des BAP et des BOV [69]. Ces travaux montrent qu'en général, les BAP composés à partir d'un ajout de filler calcaire présentent une légère vulnérabilité par rapport aux BOV, mais il n'y a pas un important écart entre les valeurs de profondeurs de carbonatation de ces deux types de béton la Figure II.5.

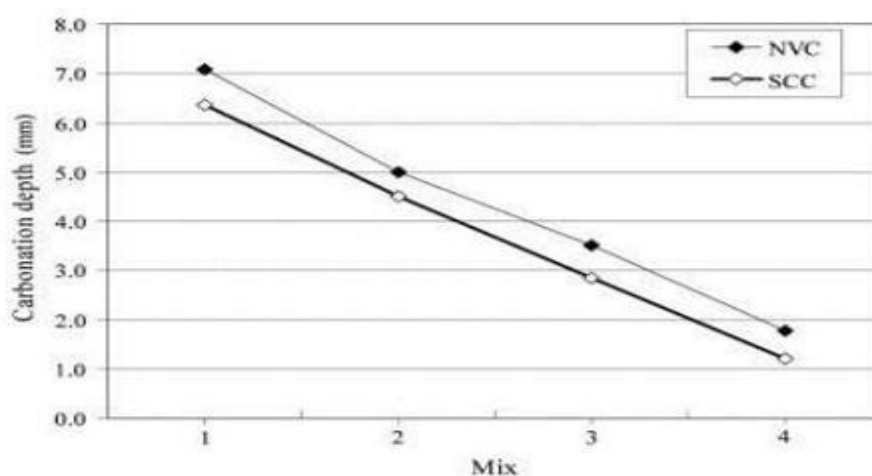


Figure II.5 : Profondeur de carbonatation après 9 mois [69].

Selon la recherche de SIAD HOCINE [80] qui a étudié l'évolution des profondeurs de carbonatation en fonction du temps d'exposition un béton ordinaire vibré (BOV), un BAP à base de pouzzolanes naturelles (BAP PZ), un BAP à base de fillers calcaires (BAP FC) et un BAP à base de cendres volantes (BAP CV), a trouvé les résultats montrés sur la figure II.6 que les valeurs des profondeurs carbonatées pour les BAP de classe 50 MPa sont comprises entre 0

et 3 mm; En revanche, celle du béton ordinaire vibré atteint une valeur de 6 mm à 56 jours. On remarque que la cinétique de carbonatation du BAP50 PZ est plus faible que celle du BAP50 CV qui à son tour est plus faible que celle du BAP50 FC.

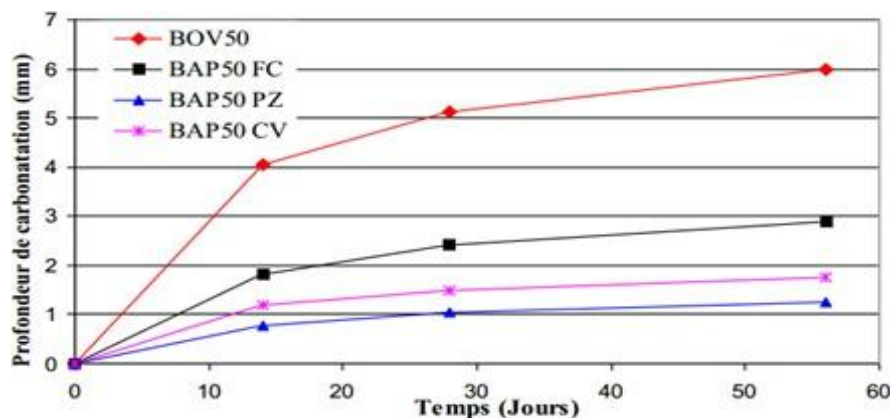


Figure II.6 : Evolution de la profondeur de carbonatation accélérée des bétons de classe 50 MPa [81]

KAID NOURIA [81] a également étudié l'évolution de la profondeur de carbonatation jusqu'à deux mois pour trois bétons ('RefPz', 'RefCem', 'ConPz'), en utilisant la procédure accélérée dans l'AFPC-AFREM (l'âge des bétons au moment de l'essai était de 60 jours). Chaque point représente la valeur moyenne de 20 mesures faites autour de la couche carbonatée des échantillons de bétons. Les résultats sont présentés dans la figure II.7

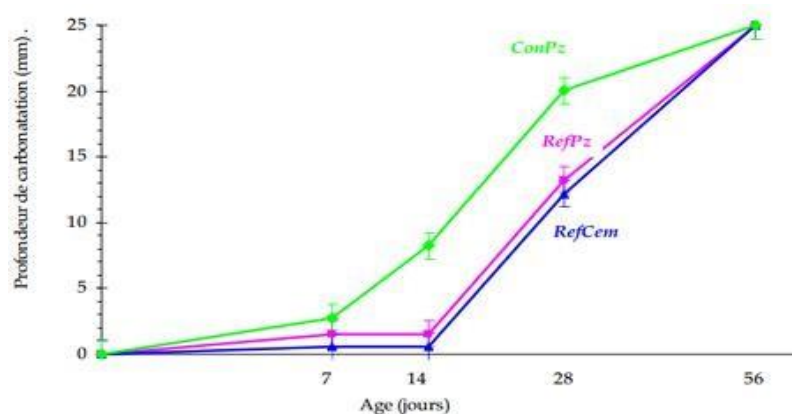


Figure II.7 : Variation de la profondeur de carbonatation dans le temps pour les trois bétons, selon l'essai accéléré (Âge du béton au début de l'essai : 60 jours) [81].

Les résultats montrent que la profondeur de carbonatation du béton 'ConPz' est de 7 millimètres, profondeur plus importante que celles des deux autres bétons ('RefCem' et 'RefPz'). Les bétons

contenant des pouzzolanes sont habituellement moins résistants à l'attaque d'anhydride carbonique et plusieurs articles rapportent des résultats semblables à ceux présentés ici.

III.4 CONCLUSION

À l'issue de cette synthèse, il ressort que l'incorporation d'ajouts minéraux améliore généralement la résistance des matériaux cimentaires face aux agressions acides et à la carbonatation. Ces ajouts réagissent avec la portlandite, réduisant ainsi la porosité et favorisant la formation de phases plus stables comme les gels C-S-H. Toutefois, l'efficacité de ces ajouts dépend fortement de leur nature, de leur proportion et du type d'environnement agressif. Tandis que certains matériaux comme la pouzzolane naturelle et vase calcinée renforcent significativement la résistance en milieu acide avec le temps ; d'autres présentent des effets variables selon le type d'acide ou les conditions de carbonatation. Ces observations soulignent l'importance de la sélection judicieuse des ajouts minéraux pour concevoir des matériaux durables, adaptés aux contraintes environnementales spécifiques [23].

PROBLEMATIQUE

Et OBJECTIFS

PROBLEMATIQUE

La durabilité des ouvrages en béton constitue aujourd'hui un enjeu majeur en raison de leur exposition à divers environnements agressifs pouvant altérer leurs performances mécaniques et réduire leur durée de vie. Parmi les principaux mécanismes de dégradation figurent l'attaque acide et la carbonatation naturelle, qui affectent progressivement la microstructure du béton et favorisent la corrosion des armatures. Par ailleurs, la valorisation des sédiments de dragage, notamment la vase calcinée, comme matériau cimentaire de substitution représente une solution écologique et économique prometteuse.

Cependant, malgré les résultats encourageants obtenus sur les propriétés mécaniques des bétons contenant de la vase calcinée, l'influence de cet ajout sur leur comportement à long terme face aux phénomènes de dégradation demeure insuffisamment connue.

Dès lors, la problématique de cette étude peut être formulée comme suit :

Dans quelle mesure le remplacement partiel du ciment par de la vase calcinée issue du barrage de Chorfa améliore-t-il ou affecte-t-il la durabilité des bétons vibrés vis-à-vis de l'attaque acide et de la carbonatation naturelle après une longue période de conservation (10 ans) ?

Questions de recherche

- Quel est l'effet de la vase calcinée sur la résistance du béton à l'attaque de l'acide sulfurique ?
- Comment évolue la profondeur de carbonatation des bétons contenant différents taux de vase calcinée ?
- Quel est le taux de substitution optimal permettant d'améliorer la durabilité tout en limitant les effets négatifs de la carbonatation ?
- La valorisation de la vase calcinée peut-elle constituer une alternative durable et écologique au ciment Portlandite

OBJECTIFS DU TRAVAIL

Évaluer l'influence du remplacement partiel du ciment par de la vase calcinée issue du barrage de Chorfa (10 %, 20 % et 30 %) sur la durabilité des bétons vibrés après dix années de

conservation, en étudiant leur comportement vis-à-vis de l'attaque acide et de la carbonatation naturelle.

Objectifs spécifiques

- Valoriser la vase calcinée comme ajout cimentaire dans la formulation des bétons.
- Étudier la résistance des bétons à l'attaque de l'acide sulfurique (H_2SO_4).
- Évaluer l'évolution de la profondeur de carbonatation naturelle après 10 ans.
- Comparer les performances des bétons contenant 10 %, 20 % et 30 % de vase calcinée avec celles du béton de référence.
- Déterminer le taux de substitution le plus favorable pour améliorer la durabilité du béton.

CHAPITR IV
METHODES EXPRIMENTALES ET
RESULTATS

IV.1 INTRODUCTION

Cette étude complète les mesures expérimentales qui remontent à 2016, réalisées par Safer [82] sur la durabilité du béton face à l'attaque de l'acide sulfurique H_2SO_4 et le développement de la carbonatation naturelle sur des échantillons de béton témoin et avec ajout. Ils sont composés de gravier, d'eau et de vase calcinée issue des sédiments de dragage du barrage de Chorfa (Mascara), et ce dans le but de l'utiliser comme substitut partiel au ciment dans des proportions de (10, 20 et 30%) et d'évaluer sa durabilité dans des environnements agressifs (acide sulfurique et dioxyde de carbone) après 10 ans de durcissement à l'air libre.

IV.2 PRESENTATION DES MATERIAUX ENTRANT DANS LA CONFECTION DES BETONS

IV.2.1 Le Ciment

Un seul type de ciment a été utilisé pour des différentes compositions : un ciment CEMI 42,5 ES provenant de l'usine de Zahana (Ouest Algérien).

Il a une surface spécifique Blaine de $3180 \text{ cm}^2/\text{g}$ et une densité de 3,03. Les détails de sa composition chimique et minéralogique sont donnés dans les Tableaux IV.1 et IV.2 [82].

Tableau IV.1 : Composition chimique du ciment [82].

Éléments	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	PF	RI
Teneur en %	22.30	5.10	3.99	63.60	1.43	1.24	0.70	0.34	1.18	0.36

Tableau IV.2 : Composition minéralogique (%) du clinker [82].

C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	CaO libre
53.13	23.55	6.76	12.13	< 01

IV.2.2. Granulats

Les graviers utilisés dans la confection des bétons de classes 3/8 et 8/15 (Figure IV.1) sont calcaires et proviennent de la carrière de Kristel située dans la région d'Oran. Tandis que les sables 0/3 ils sont d'origine calcaire pour le sable de carrière de Kristel et siliceuse pour le sable

de mer de Sidi Lakhdar. Les analyses chimiques et physiques du sable de mer de Sidi-Lakhdar et des granulats de Kristel sont données dans les tableaux IV.3 et IV.4 [82].



Figure IV.1 : Les granulats utilisés pour la confection de nos bétons [82]

Tableau IV.3 : Analyse chimique du sable de mer de Sidi-Lakhdar et des granulats de Kristel [82]

Constituants chimiques	Sable de mer (%)	SC, G3/8, G8/15 (%)
Silice SiO ₂	88.78	2.06
Chaux CaO	9.80	54.58
Magnésie MgO	0.42	0.14
Alumine Al ₂ O ₃	1.37	-
Oxyde de fer Fe ₂ O ₃	0.94	0.13
Sulfates SO ₃	0.03	-
Nature	Siliceuse	Calcaire

Tableau IV.4 : Tableau récapitulatif des caractéristiques physiques des granulats [82]

Caractéristiques		Sable de mer (SM)	S. de carrière (SC)	Graviers	
				(3/8)	(8/15)
Masse volumique apparente (g/cm ³)		1.50	1.52	1.42	1.41
Masse volumique absolue (g/cm ³)		2.64	2.65	2.59	2.63
Equivalent de sable (%)	Visuel	95.89	93.55	-	-
	Piston	94.03	89.26	-	-
Module de finesse		1.39	3.2	-	-
Pourcentage de fines (%)		0.30	1.06	0.41	0.33
Absorption (%)		1.12	0.81	0.58	0.61

Les courbes granulométriques des granulats sont données par la Figure IV.2.

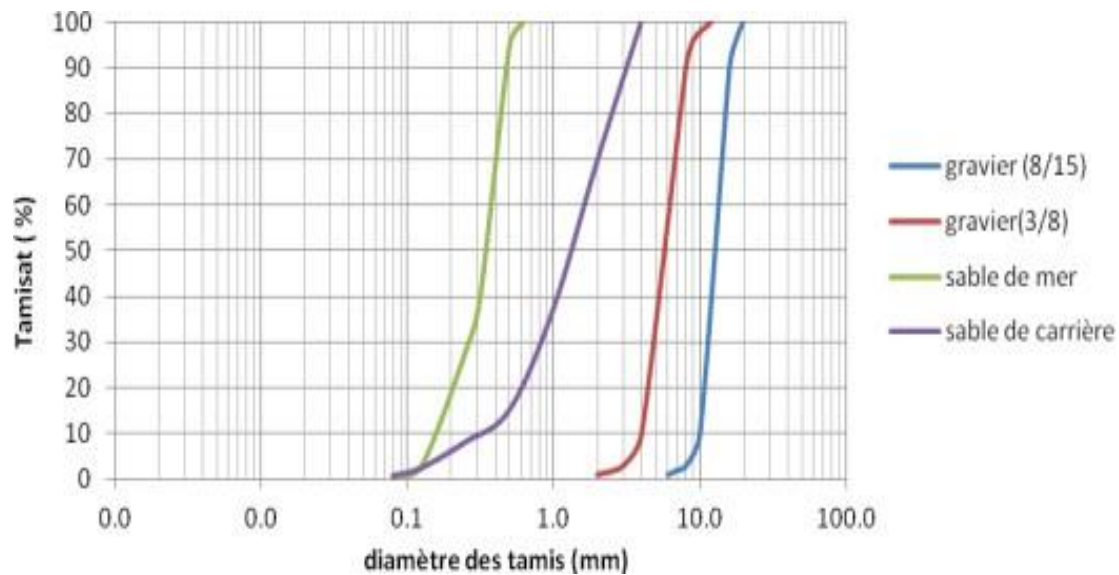


Figure IV.2 : Courbes granulométriques des différents granulats utilisés [82].

IV.2.3 La Vase

Les vases, prélevées en aval du barrage de Chorfa dans la zone de rejet post-dragage, ont été caractérisées physiquement, chimiquement et minéralogiquement [82]. Leur composition chimique révèle un potentiel de transformation des structures argileuses stables en structures amorphes, conférant la réactivité pouzzolanique nécessaire pour la substitution prévue. Un traitement thermique a été appliqué pour préparer les échantillons, permettant d'évaluer ensuite leurs caractéristiques physiques et performances mécaniques.

La vase draguée passe par les étapes suivantes (Figure IV.3) [83].

1. **Séchage** : L'échantillon de vase est d'abord séché par passage à l'étuve (105 °C) afin d'éliminer toute éventuelle humidité et faciliter son broyage ainsi que son tamisage.
2. **Concassage** : La vase étuvée est concassée pour faciliter son broyage.
3. **Broyage** : La vase concassée est totalement broyée.
4. **Tamisage** : La vase broyée est tamisée par voie sèche à travers un tamis de 80 μm où seul le passant est considéré par la suite.
5. **Calcination** : C'est un traitement thermique effectué sur la vase préparée préalablement par cuisson à 750 °C [84], [85].

La vitesse de cuisson doit être réglée à 5 °C/min afin d'éviter les chocs thermiques, ensuite, la température de cuisson qui est de (750 °C $\pm$ 5) est maintenue constante pendant 05 heures pour

obtenir à la fin le produit final qui est la vase calcinée et qui doit être conservé à l'abri de l'air et de l'humidité dans des sacs hermétiques.

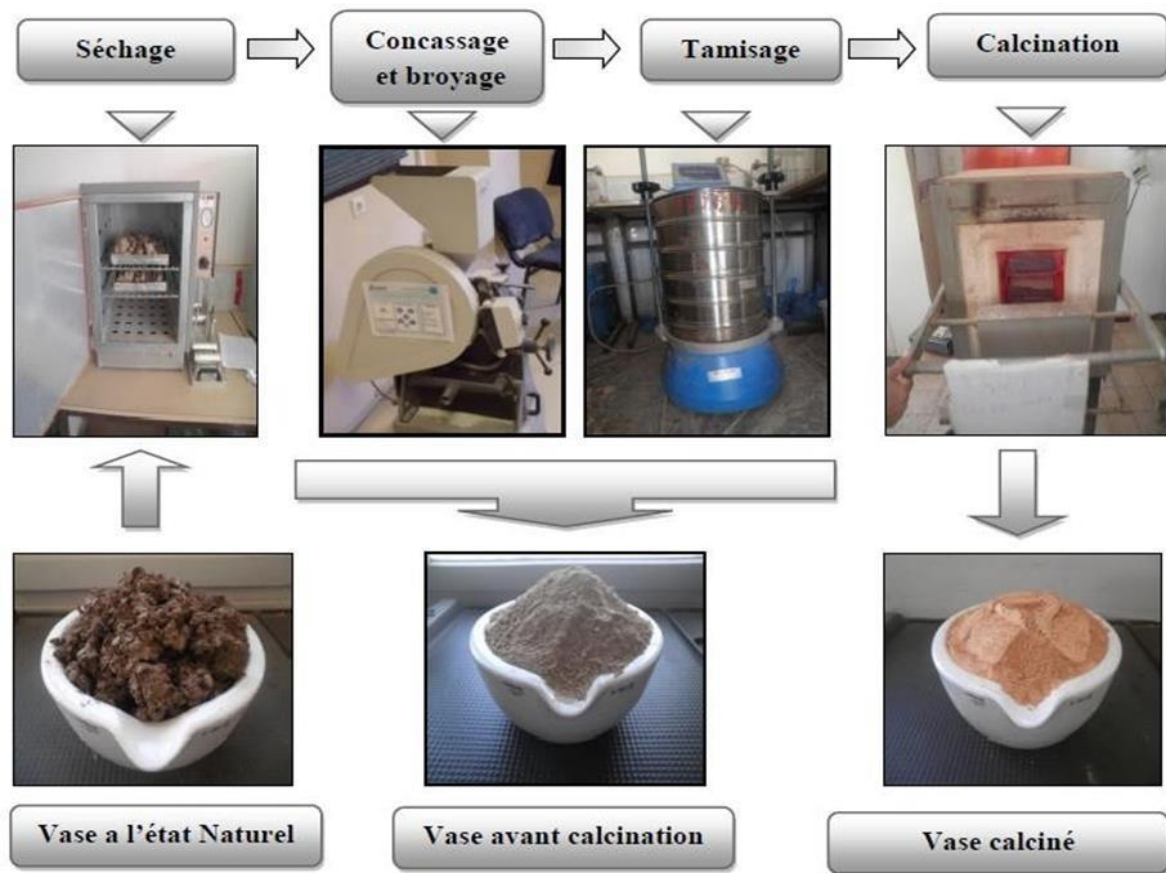


Figure IV.3 : Les étapes de la préparation de la vase [82].

Les caractéristiques chimiques et physiques des vases après calcination sont représentées dans le Tableau IV.5 [85], [68].

Tableau IV.5 : Caractéristiques chimiques des vases après calcination [82]

Élément		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	PF
Teneur en %	Vase calcinée de Chorfa	47.36	15.75	7.43	23.08	2.67	0.17	2.97	0.37	1.76

Les méthodes et les manipulations utilisées pour la caractérisation physique de la vase sont les mêmes que celles utilisé pour le ciment.

IV.2.3.1 Granulométrie

L'analyse granulométrique d'un échantillon de la vase utilisée est donnée par la Figure IV.4 [82].

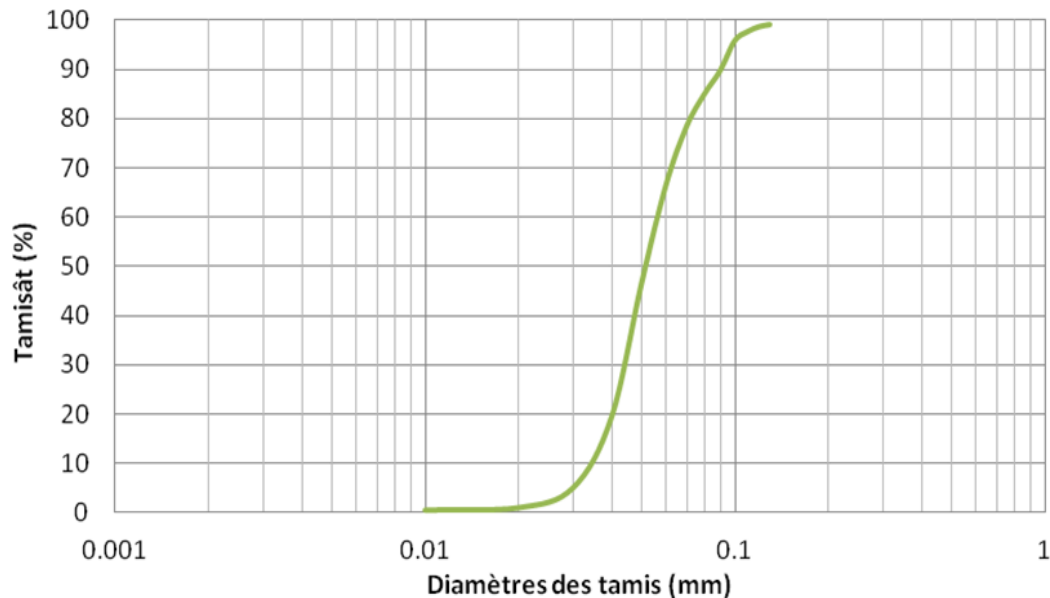


Figure IV.4 : Courbe granulométrique de la vase utilisée [82]

IV.2.3.2. Les masses volumiques et surface spécifique

Elles sont représentées dans le tableau IV.6.

Tableau IV.6 : Tableau récapitulatif des caractéristiques physiques de la vase [82] .

Caractéristiques	Vase Chorfa
Masse volumique apparente de la vase (g/cm^3)	0.49
Masse volumique absolue de la vase (g/cm^3)	2.65
Finesse suivant la méthode de Blaine (cm^2/g)	6446

IV.2.4 L'adjuvant

L'adjuvant utilisé pour confectionner notre béton est un PLASTIMENT® BV 40 (SIKA) (Tableau IV.7) ; c'est un plastifiant/Réducteur d'Eau pour hautes résistances mécaniques.

Tableau IV.7 : Caractéristiques du PLASTIMENT® BV 40

Caractéristiques	PLASTIMENT® BV 40
Aspect	Liquide brun foncé
Densité	$1,180 \pm 0,015$
PH	4.5 ± 1
Teneur en Na ₂ O Eq	$\leq 2 \%$
Extrait sec	$38,5 \pm 1,9 \%$
Teneur en ions Cl ⁻	$\leq 0,1 \%$
Plage d'utilisation	à 1%

IV.3 METHODES EXPERIMENTALES

Les éprouvettes étudiées sont issues des formulations (Tableau IV.8) élaborées par Safer [82].

Tableau IV.8 : composition des bétons d'étude [82]

Designations	Ciment kg/m³	P/L (%)	Addition kg/m³	Graviers		Sable kg/m³	Eau kg/m³	E/L	P kg/m³
				kg/m³					
				3/8	8/15				
BOT00%	402	00	00	179	912	663	201	0.5	00
BOV10%	363.6	0.3	35.33	179	912	663	199.4	0.5	1.19
BOV20%	324.8	0.4	71.02	179	912	663	197.9	0.5	1.58
BOV30%	286.3	0.6	107.31	179	912	663	196.8	0.5	196.8

Avec :

BOT 0% : Béton Ordinaire Témoin avec 0% de vase

BOV10% : Béton Ordinaire avec 10% de vase

BOV20% : Béton Ordinaire avec 20% de vase

BOV30 % : Béton Ordinaire avec 30% de vase

IV.3.1 Essais de durabilité

IV.3.1.1 Essai de résistance à l'attaque acide

La résistance des différents bétons à l'attaque acide a été déterminée selon la norme ASTM C267[87]. Des échantillons de différents bétons (7 x 7 x 5 cm) ont été utilisés pour évaluer la résistance à l'attaque de l'acide sulfurique [82].

Les échantillons ont été immergés dans une solution à 2 % d'acide sulfurique (H_2SO_4) à 23 °C. Les échantillons sont alors espacés de 2 cm et recouverts d'environ 2 cm de solution acide durant une période de 12 semaines (Figure IV.5).

Deux échantillons sont utilisés par formulation.



Figure IV.5 : Conservation des échantillons de béton dans la solution H_2SO_4 à 2 % de concentration

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

Variation de masse

Selon la procédure de la norme ASTM C 267 (1997) [87] : les éprouvettes sont nettoyées 3 fois avec de l'eau douce pour éliminer le béton altéré, puis on les laisse à l'air libre pendant 30 mn

pour procéder ensuite à la pesée. Cette opération est effectuée après chaque semaine d'immersion et pendant 12 semaines (ASTM C 267, 1997). La solution acide est renouvelée toutes les deux semaines [87].

La variation de la masse de chaque éprouvette est calculée à partir de l'équation IV.1 :

$$VM\% = \left[\frac{M_0 - M_i}{M_i} \right] \quad (IV. 1)$$

Avec

VM : variation de la masse en (%) ;

M₀ : la masse de l'éprouvette avant exposition à l'attaque acide en (gramme) ;

M_i (i=1, 2, 3,..., 12) : la masse après 1, 2, ..., 12 semaines d'attaque en (gramme).

Etude visuelle

Une comparaison a été faite visuellement entre l'état de chaque échantillon avant et après attaque acide.

Préparation de la solution acide utilisée

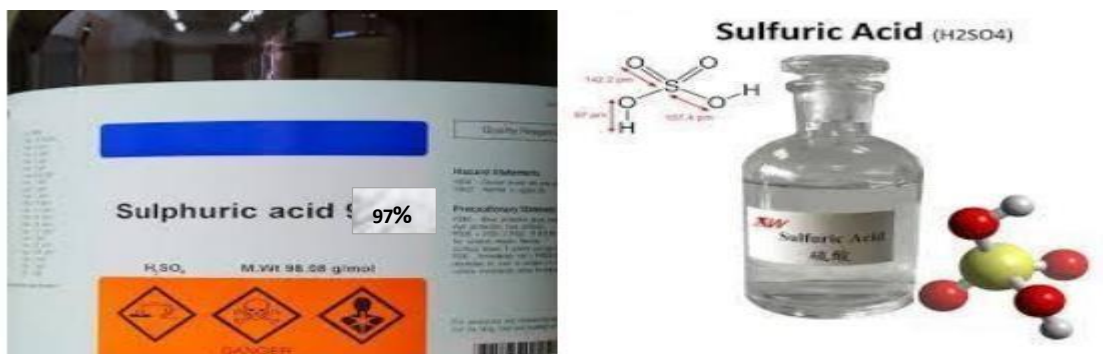


Figure IV.6 : Acide H₂SO₄

Les pourcentages utilisés sont : Acide H₂SO₄ (2%) dans 7840 ml d'eau distillée

- **Quantité d'eau distillée**

Soit :

V_1 : volume de la solution concentrée à prélever.

N_1 : normalité de la solution concentrée.

V_2 : volume final de la solution préparée.

N_2 : normalité de la solution souhaitée.

$d\rho_{\text{eau}}$: Masse volumique de l'acide sulfurique concentré.

ρ_{eau} : masse volumique de l'eau.

$M_{\text{molaire}}(H_2SO_4)$: masse molaire de l'acide sulfurique.

$M_{1\%}$: pourcentage massique de H_2SO_4 ;

$N_{\text{équivalente}}$: nombre d'équivalents de l'acide sulfurique.

$$7 \times 7 \times 5 = 245 \text{ cm}^3$$

$$245 \times 2 \times 4 = 1960 \text{ cm}^3$$

$$1960 \times 4 = 7840 \text{ cm}^3 = 7,840 \text{ L}$$

$$N_1 \times V_1 = N_2 \times V_2$$

$$N_1 = \frac{d\rho \times \rho_{\text{eau}} \times \frac{M_{1\%}}{100} \times N_{\text{équivalente}}}{M_{\text{molaire}}(H_2SO_4)}$$

$$N_1 = \frac{1.840 \times 1000}{98.07} \times \frac{97}{100} \times 2 = 36.40$$

$$V_1 = \frac{N_2 \times V_2}{N_1} \Rightarrow V_1 = \frac{2 \times 1000}{36.40} = 54.95 \text{ ml (pour 1 L)}$$

- **Volume d'acide**

- BOT (2 éprouvettes) = 107,702 ml
- BOV (6 éprouvettes) = 323,106 ml

IV.3.2 Essai de carbonatation

Dans notre étude, les éprouvettes (Figure IV.7) ont été exposées à l'air libre au sein du laboratoire afin de suivre l'évolution de la carbonatation dans des conditions naturelles.



Figure IV.7 : Les éprouvettes destinées à la carbonatation naturelle

Pour mesurer la profondeur de carbonatation, la pulvérisation d'un indicateur coloré tel que la phénolphthaléine (Figure IV.8) permet de visualiser les zones carbonatées sur des surfaces fendues de béton. Elle est incolore sur les zones carbonatées et rose sur les zones saines, elle vire pour un pH d'environ 9. Des mesures de carbonatation sur les mêmes échantillons de dimension $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$ que ceux de Safer [82] âgés de 10 ans, ont été effectués (Figures IV.7). Pour ce faire, les éprouvettes ont été rompues par fendage grâce à une presse manuelle (Figure IV.9).



Figure IV.9 : La presse utilisée pour les écrasements

Figure IV.8 : La phénolphthaléine

Les mesures de l'épaisseur de béton carbonaté sont réalisées après humidification des surfaces et pulvérisation d'une solution de phénolphthaléine. Cette dernière révèle l'interface entre la zone saine et la zone carbonatée la Figure IV.10. La valeur de l'épaisseur de carbonatation correspondant à une échéance donnée est la moyenne des mesures effectuées sur les quatre faces de l'échantillon.

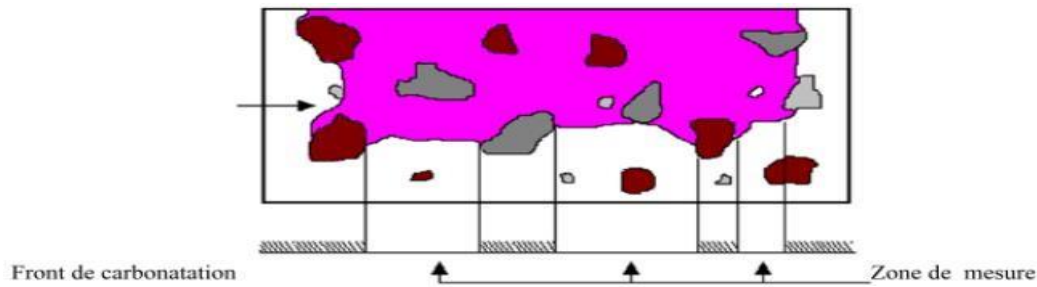
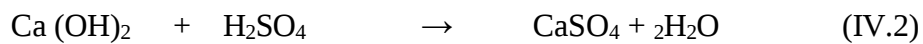


Figure IV.10 : Schéma illustrant le principe des mesures [64].

IV.4 RESULTATS

IV.4.1 ATTAQUE ACIDE SULFURIQUE (H₂SO₄)

Un cas très agressif et destructif d'attaque par acide se produit lorsque le béton est exposé à l'acide sulfurique (H₂SO₄). Le sel de calcium produit par la réaction de l'acide sulfurique et de l'hydroxyde de calcium est un sulfate de calcium qui cause une dégradation accrue. Ce processus est illustré par la formule IV.2.



Hydroxyde de calcium acide sulfurique sulfate de calcium eau

Le suivi de la perte en poids en fonction du temps des éprouvettes des bétons immergés dans la solution à base d'acide sulfurique H₂SO₄ est illustré par la Figure IV.11.

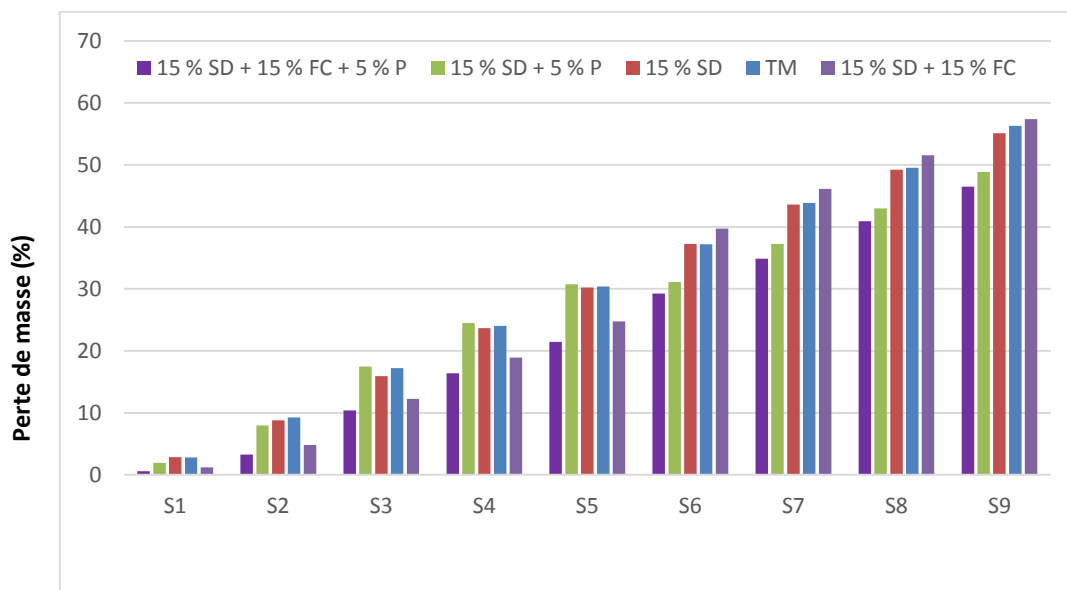


Figure IV.11 : Perte de masse des bétons âgés de 12 semaines et immergés dans la solution H₂SO₄

Les résultats montrent que la perte de masse augmente progressivement avec le temps pour l'ensemble des formulations étudiées, ce qui traduit le caractère cumulatif de l'attaque acide sur la matrice bétonnée.

.

On peut classer les formulations en termes de résistance à la perte de masse comme suit : BOV 30 % > BOV 20 % > BOV 10 % > BOT 0 %. Ce classement confirme l'effet bénéfique de l'ajout de BOV dans l'amélioration de la durabilité du béton lorsqu'il est exposé à un milieu acide agressif.

Examen visuel

La Figure IV.12 montre l'état des échantillons de tous les bétons d'étude avant nettoyage, après 11 semaines d'immersion dans la solution du 2% H_2SO_4 .



Figure IV.12 : Dégradation des échantillons du béton après 12 semaine d'immersion dans la solution d'acide sulfurique

La Figure IV.13 montre l'état des échantillons de tous les bétons d'étude après nettoyage, après 11 semaines d'immersion dans la solution du 2% H_2SO_4 .

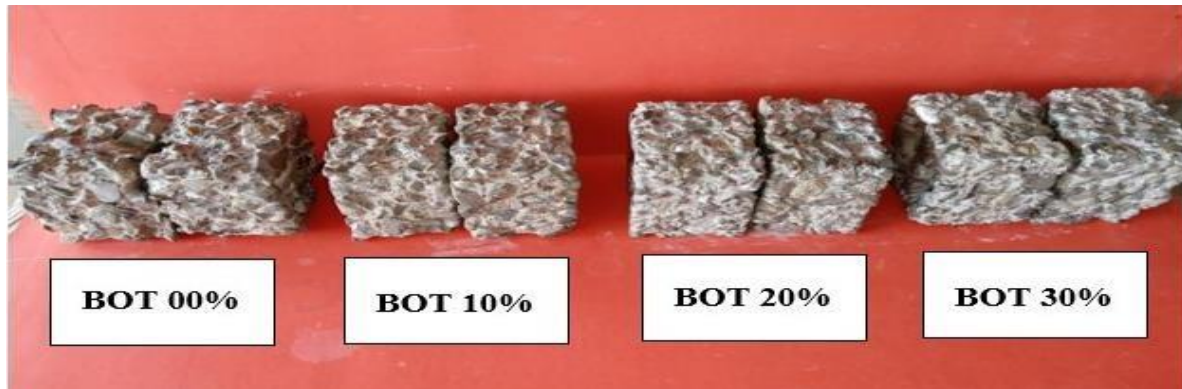


Figure IV.13 : Dégradation des échantillons du béton après 12 semaines d'immersion dans la solution d'acide sulfurique

Avant de nettoyer les échantillons retirés de la solution d'acide sulfurique, nous avons observé une couche blanche caractérisant la stimulation de la formation de gypse, qui pouvait être facilement lavée par l'eau utilisée pour ce nettoyage.

Globalement, la vase calcinée améliore la résistance à l'attaque acide à jeune âge, tandis que cet effet devient moins marqué après un vieillissement prolongé.

IV.4.2 LA CARBONATATION

La mesure de la profondeur carbonatée a été effectuée après 10 ans d'exposition. Les Figures IV.15a, IV.15b et IV.15c illustrent respectivement les photos des sections des éprouvettes carbonatées âgées de 12 mois [82], de 6 ans [45] et de 10 ans de conservation.



Figure

IV.5 CONCLUSION

Les résultats expérimentaux montrent que le mortier amélioré par l'ajout d'argile calcinée présente une meilleure résistance aux attaques acides, tandis qu'il demeure relativement moins résistant vis-à-vis du phénomène de carbonatation naturelle. L'incorporation de l'argile calcinée contribue à réduire les effets des milieux acides agressifs, ce qui constitue un facteur essentiel pour assurer la durabilité des structures en béton et améliorer leurs performances à long terme. Les résultats ont également révélé que la formulation contenant 30 % de vase calcinée présente la meilleure résistance à l'attaque acide, alors que le béton contenant 10 % de vase calcinée a montré la meilleure stabilité vis-à-vis de la carbonatation naturelle par rapport aux formulations contenant 20 % et 30 %.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

CONCLUSION GÉNÉRALE

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

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

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

PERSPECTIVES

Il serait pertinent de poursuivre le suivi du comportement des bétons sur une période plus longue afin d'évaluer l'effet du vieillissement naturel sur leur durabilité, particulièrement vis-à-vis des attaques acides et de la carbonatation naturelle.

L'étude pourrait également être étendue à d'autres milieux agressifs, tels que les solutions chlorées, les environnements sulfatés ou encore l'eau de mer, dans le but d'obtenir une évaluation plus complète des performances des bétons à base d'argile calcinée.

Il serait également intéressant d'étudier le comportement des bétons soumis à l'action combinée de plusieurs agents de dégradation, tels que la carbonatation et les chlorures, ou les attaques acides associées aux cycles de séchage et d'humidification, afin de mieux représenter les conditions réelles d'exposition des ouvrages.

Des recherches complémentaires portant sur le taux optimal de substitution du ciment par l'argile calcinée permettraient d'atteindre un compromis entre l'amélioration de la résistance aux agressions chimiques et le maintien d'une bonne résistance à la carbonatation naturelle.

Enfin, l'extension de cette étude à des éléments structuraux réels, tels que les poutres, les dalles et les poteaux, permettrait de confirmer l'efficacité de l'argile calcinée dans les conditions pratiques d'utilisation en génie civil.

En conclusion, ce travail constitue une contribution scientifique à l'étude de la durabilité des bétons contenant de l'argile calcinée comme addition minérale. Les résultats obtenus mettent en évidence le potentiel prometteur de cette ressource locale pour améliorer la résistance du béton face aux milieux agressifs, tout en contribuant au développement de matériaux de construction plus durables et plus respectueux de l'environnement.

Ce travail met en évidence l'utilisation de la vase calcinée du barrage de Chorfa (Mascara) comme substitution partielle au ciment (10 %, 20 % et 30 %) et son influence sur la résistance du béton à l'attaque acide ainsi que sur l'évolution de la carbonatation naturelle après dix années de vieillissement.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCE

- [1] **SLAMANI. A MERSALI. Ch** « durabilité des mortiers à base de perlite (10%, 15%, 20%, 25%) aux attaques acides (hcl, h2so4) » thèse de master, université Abdelhamid ibn badis Mostaganem 2023.
- [2] **SONEBI M., BAHADORI-JAHROMI, A., BARTOS, P.J.M.,** « Development and optimization of medium strength self-compacting concrete by using pulverized fly ash ». 3rd International Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Iceland, 514-524, 2003.
- [3] **ZHU W., GIBBS J.C.,** « Use of deferent limestone and chalk powders in self-compacting concrete ». Cement and Concrete Research, Vol. 35, N_8 :1457-1462, 2005.
- [4] **LAUER K. R.,** « Classification of concrete damage caused by chemical attack ». Materials and Structures 23 pp 223-229 (1990).
- [5] **DOMONE P.L.,** « Self-compacting concrete: an analysis of 11 years of case studies ». Cement and Concrete Composites, 28, 197-208, 2006.
- [6] **KAMALI S., GÉRARD B., MORANVILLE M.,** « Modelling the leaching kinetics of cement-based materials – influence of materials and environment », Cement and Concrete Composites 25, 451-458, 2003.
- [7] **CARDE C., FRANÇOIS R.,** « Effect of ITZ leaching on durability of cement-based materials ». Cement and Concrete Research 27, 971-978, 1997.
- [8] **SONEBI M., BAHADORI-JAHROMI, A., BARTOS, P.J.M.,** « Development and optimization of medium strength self-compacting concrete by using pulverized fly ash ». 3rd International Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Iceland, 514-524, 2003.
- [9] **PARK C.K., NOH M.H., PARK T.H.,** « Rheological properties of cementitious materials containing mineral admixtures ». Cement and Concrete Research, 35, 842-849, 2005.
- [10] **SHADLE, R., AND SOMERVILLE, S.,** « The Benefits of Utilizing Fly Ash in Producing Self Compacting Concrete ». First North American Conference on the Design and Use of Self Consolidating Concrete, Chicago, 2002 IL : ACBM, 235-241.

- [11] **GUILLON E.**, « Durabilité des matériaux cimentaires –modélisation de l’influence des équilibres physico-chimiques sur la microstructure et les propriétés mécaniques résiduelles". Thèse de doctorat, d’école normale supérieure de Cachan, France 2004.
- [12] **GCI – 714.**, « Cours : Durabilité et Réparations du Béton ». Université de Sherbrooke, CANADA, Juillet 2009.
- [13] **MEHTA P.K.**, «Sulfate Attack on Concrete - A Critical Review». Materials Science of Concrete III, The American Ceramic Society, 1993 pp. 105-130.
- [14] **FERRARIS C.F., CLIFTON J.R., STUTZMAN P.E., GARBOCZI E.J.**, «Mechanisms of degradation of Portland cement-based systems by sulfate attack’, in: K.L. Scrivener, J.F. Young (Eds.) ». Mechanisms of Chemical Degradation of Cement-Based Systems, E & FN Spon, London, pp. 185– 192. 1997.
- [15] **BROWN P.W.**, «An evaluation of sulfate resistance of cements in a controlled environment». Cement and Concrete Research. (11): 719– 727. 1981.
- [16] **GOLOP R.S., TAYLOR H.F.W.**, «Microstructural and micro analytical studies of sulfate attack, III. Sulfate resisting Portland cement: reaction with sodium and magnesium sulfate solutions». Cement and Concrete Research, vol.25, 8, 1995, p.1581-1590.
- [17] **SANTHANAM M., COHEN M.D., OLEK J.**, «Mechanism of sulfate attack: A fresh look: Part 1’. Summary of experimental results». Cement and Concrete Research. 32 (6) 915– 921.2002.
- [18] **TAGNIT-HAMOU A., PETROV N.**, «Durability of Concrete in a Very Aggressive Environment». Proceedings of the Twenty-Second International Conference on Cement Microscopy, Montréal, Québec, Canada, 29 Avril au 4 Mai, pp 420-430, 2000.
- [19] **RAMLOCHAN T., ZACARIAS P., THOMAS M.D.A., HOOTON R.D.**, « The effect of pozzolans and slag on the expansion of mortars cured at elevated temperature ». Cement and Concrete Research, Vol. 33, pp. 807–814, 2003.
- [20] **TUUTTI K.**, «Corrosion of steel in concrete». Swedish Cement and Concrete Research Institute, Ed. Stockholm, pp. 469, 1982.

- [21] **THANH S. N.**, « Influence de la nature du liant et de la température sur le transport des chlorures dans les matériaux cimentaires ». Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées (INSA) Toulouse, 2006.
- [22] **MEHTA, P. K.**, « Concrete: structure, properties and materials ». Prentice hall, 1986 Ed., p.105-169.
- [23] **KHEIRDDINE. O**;« influence des ajouts minéraux sur la résistance des mortiers vis-à-vis de l'attaque de l'acide sulfurique et la carbonatation naturelle » mémoire de master université Abdelhamid ibn badis Mostaganem 2025
- [24] **PAPADAKIS V.G., VAYENAS C.G., FARDIS M.N.**, « Physical and chemical characteristics affecting the durability of concrete ». ACI materials journal, vol. 88, n° 2, p. 186-196, 1991.
- [25] **PAPADAKIS V.G., VAYENAS C.G., FARDIS M.N.**, Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation », ACI Materials Journal, V. 88, No. 4, July August 1991.
- [26] **THIERY M., DANGLA P., VILLAIN G., Platret G., MASSIEU E., DRUON M., BAROGHELBOUNY V.**, « Modelisation de la carbonatation atmosphérique des matériaux cimentaires ». Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussees, 252-253, septembre-octobre-novembre-décembre 2004, pp. 153-187.
- [27] **THIERY M.**, « Modélisation de la carbonatation atmosphérique des matériaux cimentaires, Prise en compte des effets cinétiques et des modifications microstructurales et hydriques », Etudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées‘ LPC, OA 52, 2006.
- [28] **VAN BALEN K., VAN GEMERT D.**, « Modeling lime mortar carbonation », Materials and Structures, n° 27, pp 393-398, 1994.
- [29] **SAETTA A.V., SCHREFLER B.A., VITALIANI R.V.**, «2-D Model for carbonation and moisture/heat flow in porous materials », Cement and Concrete Research, vol. 25, n° 8, pp 1703- 1712, 1995.
- [30] **ROY S.K., POH K.B., NORTHWOOD D.O.**, « Durabilité of concrete, accelerated carbonation and weathering studies » Building and Environment, 34, pp 597-606, 1999.

- [31] **BAROGHEL-BOUNY V.**, « Caractérisation des pâtes de ciment et des bétons - Méthodes, Analyse, Interprétations », (LCPC, Paris, France) décembre, 468 p, 1994.
- [32] **CHAUSSADENT T.**, « Analyse des mécanismes de carbonatation du béton » Compte rendu des journées techniques AFPC-AFREM Durabilité des bétons'. Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité', pp 75-87, 1997.
- [33] **RACKEL S.N.**, « Approche performancielle des bétons avec métakaolins obtenus par calcination flash ». Thèse de doctorat, Université de Toulouse Paul Sabatier, mai 2001.
- [34] **HYVERT N.** «Application de l'approche probabiliste à la durabilité des produits préfabriqués en béton». Thèse de Doctorat Université de Toulouse, 2009.
- [35] **DAKHMOCHE F.** «Carbonatation de bétons adjuvantes à base de ressources locales algériennes». Thèse de Doctorat de l'Université de Mentouri, Constantine, Algerie, 2009.
- [36] **CHAUSSADENT T.** Etat des lieux et réflexions sur la carbonatation du béton armé .Rapport du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (Paris), Thème de recherche OA9, 1997: 64.
- [37] **THIERY, VILAIN, PLATRET.** «3 Effect of carbonation on density, microstructure and liquid water saturation concrete ». Proc. 9th Eng. Conf. On Advances in cement and concrete, USA, 2003.;481-490.
- [38] **RAHMAN A.A, GLASSER F.P.**«Comparative studies of the carbonation of hydrated Cements».Advances in Cement Research, 1989; 2(6): 49-54.
- [39] **NEVILLE A.** «Properties of concrete». Fourth and Final edition, Ed. John Wiley and Sons, New York, 1995; 844.
- [40] **SADOUKI H.** « L'effet de paroi : son influence sur les propriétés du béton superficiel» .Chronique des Matériaux de Construction, 1987; 11-15.
- [41] **KREIJGER P.C.**«The skin of concrete – Composition and Properties». Materials and Structures,1984; 1 17(100): 275-283.

- [42] **BARON J, OLLIVIER J.P.** «Les bétons, bases et données pour leur formulation». Publication ATHIL, Eyrolles, 1996 ; 552.
- [43] **EWERTSON C, PETERSSON P.E.**, « The influence of curing conditions on the permeability and durability of concrete». Results from a field exposure test. Cement and Concrete Research, 1993; 23(3): 683-692.
- [44] **BALAYSSAC J.P, DETRICHE C.H, DIAFAT N.** « Influence de la durée de cure humide sur la durabilité du béton de peau ». RILEM, Matériaux et Constructions, 1998 : 31(209).
- [45] **CHEIKR. N GRINE. B**« CARBONATATION DU BETON » mémoire de master université Abdelhamid ibn badis Mostaganem 2022
- [46] - **ANBT, 2015**, « Agence nationale des barrages et transferts ».
- [47] - **REMINI, B., LEDUC, C., HALLOUCHE, W.**, « Evolution des grands barrages en région arides : quelques exemples algériens », Sécheresse ; N°1, p. 096-103, 2009.
- [48] - **ACHOUR, R., ABRIAK, N.-E., ZENTAR, R., RIVARD, P., GREGOIRE, P.**, “Valorization of unauthorized sea disposal dredged sediments as a road foundation material”, Environ. Technol. 35, 1997–2007, 2014.
- [49] - **AZRAR, H., ZENTAR, R., ABRIAK, N.-E.**, “The effect of granulation time of the pan granulation on the characteristics of the aggregates containing dunkirk sediments”, Procedia Eng., advances in transportation geotechnics iii 143, 10–17. 2016.
- [50] - **HAMOUCHE, F., ZENTAR, R.**, “Effects of organic matter on mechanical properties of dredged sediments for beneficial use in road construction”, Environ. Technol. 41, 296–308, 2018.
- [51] - **MAHERZI, W., BENZERZOUR, M., MAMINDY-PAJANY, Y., VEEN, E. VAN, BOUTOUIL, M., ABRIAK, N.E.**, “Beneficial reuse of brest-harbor (france)-dredged sediment as alternative material in road building: laboratory investigations”, Environ. Technol. 39, 566–580, 2018.

- [52] - **MAROUF, H., SEMCHA, A., MAHMOUDI, N., BOUHAMOU, N., BENZERZOUR, M., MAHERZI, W.**, “Experimental study on the reuse of a dredging sludge from west of algeria in brick fabrication”, *Journal of materials and engineering structures* 5, 63–172 163–172, 2018
- [53] - **WANG, D., ABRIAK, N.E., ZENTAR, R.**, “Co-valorisation of dunkirk dredged sediments and siliceous–aluminous fly ash using lime”, *Road mater. Pavement design*. 14, 415–431, 2013.
- [54] **BOUDJLEL, M. (2013)**. Mémoire Influence du traitement par ciment sur les caractéristiques mécaniques des sédiments du barrage K’sob. Mémoire de Master, Université de M’sila.
- [55] **HADJ SADOK, R. (2019)**. Analyse du cycle de vie des sédiments de dragage. Thèse de Doctorat d’état, Université de Mostaganem.
- [56] **REMINI, B. (2000)**. L’envasement des barrages : Quelques exemples Algériens. *Bull. Réseaux Erosion IRD, Montpellier*, (20),165-171.
- [57] **MANSER, A.** (undated). Erosion et envasement des barrages réservoirs[online]. ANBT Algérie. (Availableat : <http://docplayer.fr/1600124-Erosion-et-envasementdes-barrages-reservoirs.html>)
- [58] **GUILLON E.**, « Durabilité des matériaux cimentaires –modélisation de l’influence des équilibres physico-chimiques sur la microstructure et les propriétés mécaniques résiduelles ». Thèse de doctorat, d’école normale supérieure de Cachan, France 2004.
- [59] **L’EST REPUBLICAIN. (2016)**. *Le dragage de la Saône*.
- [60] **CEN. (2013)**. **EN 12620** : Aggregates for concrete. European Committee for Standardization.
- [61] **AMAR, M., BENZERZOUR, M., ABRIAK, N., & MAHERZI, W.** (2016). Étude de valorisation des sédiments de dragage. *Academic Journal of Civil Engineering*, 34(1), 882–889.
- [62] **BENDAHOUA, Y., & GOUDJIL, B. (2015)**. Gestion et caractérisation de sédiments de dragage du barrage de Bouhanifia [Mémoire de Master, Université Ibn Khaldoun de Tiaret].

- [63] **REMINI B. & AL. / LARHYSS JOURNAL, 27 (2016)**, 63-90. Article « Envasement des barrages dans les régions arides exemples algériens ». Département des Sciences de l'Eau et Environnement, Faculté de Technologie, Université Blida1, Blida 9000, Algérie,
- [64] **BELARIBI. O**; « Durabilité des bétons autoplaçants à base de vase et de pouzzolane»; thèse en cotutelle Présentée pour obtenir le grade de docteur de l'université Cergy-pontoise et de l'université de mostaganem;2025
- [65] **BENKADDOUR M, KAZI AOUAL F, SEMCHA A** « Durabilité des mortiers à base de pouzzolane naturelle et de pouzzolane artificielle » LABMAT, Département Génie Civil, École Normale Supérieure d'Enseignement Technique (ENSET Oran), Oran, Algérie.
- [66] **RAHMANI H., RAMZANIANPOUR A.A.**, « Effect of silica fume and natural pozzolanas on sulfuric acid resistance of dense concretes ». Asian journal of civil engineering (building and housing) VOL. 9, NO. 3, 2008, pp 303-319.
- [67] **KAID, N., AYED, K et Al (2010)**. « Étude de la durabilité des mortiers pouzzolaniques face aux milieux agressifs ». Symposium International sur la Construction en Zone Sismique (SICZS_2010), Université Hassiba Benbouali de Chlef, Algérie.
- [68] **GUENANOU, F. (2019)**. « Durabilité des mortiers contenant la perlite vis-à-vis de la corrosion des armatures » [Mémoire de Master, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed-Boudiaf (USTO-MB)]. Faculté architecture et Génie Civil, Département Génie Civil.
- [69] **BOEL V., AUDENAERT K., DE SCHUTTER G.**, «Experimental durability evaluation of self-compacting concrete with limestone filler», Proceedings of the Second North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete (SCC) and the Fourth International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, pp. 297-303, 2005
- [80] **SIAD H.**, « La durabilité des bétons autoplaçants à base des additions pouzzolaniques et fillers calcaires », Thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2010.

- [81] **KAID N., CYR M., JULIEN S., KHELAFI H.**, « Durability of concrete containing a natural pozzolan as defined by a performance-based approach ». *Construction and Building Materials* 23 (2009) 3457–3467.
- [82] **SAFER.O**, « Optimisation de la formulation d'un éco-béton à base de sédiments de dragage et étude de sa résistance aux attaques chimiques » Thèse de doctorat à l'Université de Mostaganem, 2017.
- [83] **EI OUARDI E.M.**, « Etude de la calcination du phosphate clair de Youssoufia, Maroc ». *Afrique Science*. 04 (2008) 199.
- [84] **BELAS N., BESSEGHIER N., MEBROUKI A., BOUHAMOU N.**, « Vers une protection de l'environnement en valorisant la vase draguée du barrage comme composant du béton ». *Mater. Tech.* 97 (2009) 231–240.
- [85] **LABIOD Z., REMINI B., BELAREDJ M.**, « Traitement de la vase du barrage de Bouhanifia en vue de sa valorisation ». *Larhyss Journal*. 03 (2004) 7–12.
- [86] **XU Y., YAN C., XU B., RUAN X., WEI Z.**, « The use of urban river sediments as a primary raw material in the production of highly insulating brick ». *Ceramics International*. 40 (2014) 8833–8840.
- [87] **AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS.**, « Standard Test Methods for Chemical Resistance of Mortars, Grouts, and Monolithic Surfacing and Polymer Concretes ». ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 1997.

ANNEXES

NOTICE PRODUIT

Sika® Plastiment® BV-40

PLASTIFIANT/RÉDUCTEUR D'EAU

INFORMATIONS SUR LE PRODUIT

Le Sika® Plastiment® BV-40 est un plastifiant réducteur d'eau énergétique qui :

- Augmente la compacité du béton, entraînant ainsi une amélioration des résistances mécaniques et de l'imperméabilité.
- Permet d'obtenir un retard de début de prise plus ou moins important en augmentant le dosage normal d'utilisation.
- Facilite la mise en place du béton.

DOMAINES D'APPLICATION

1. Augmentation des résistances mécaniques.

Le Sika® Plastiment® BV-40 permet de réduire l'eau de gâchage d'environ 10 % sans diminuer la maniabilité du témoin.

Des essais sont indispensables pour déterminer la quantité d'eau de gâchage nécessaire à l'obtention de la maniabilité souhaitée.

La compacité et l'imperméabilité sont améliorées. Les résistances mécaniques à long terme sont augmentées en moyenne de 15 à 40 %.

Le Sika® Plastiment® BV-40 est donc particulièrement indiqué pour :

- les bétons armés à hautes performances,
- les bétons précontraints,
- les bétons préfabriqués étuvés.

2. Réduction du dosage en ciment.

Le Sika® Plastiment® BV-40 permet de réduire le dosage en ciment de l'ordre de 10% en conservant les résistances mécaniques.

Il est utilisé dans ce cas en B.P.E. pour la confection de béton à la résistance.

3. Amélioration de la maniabilité.

Le Sika® Plastiment® BV-40 permet d'améliorer la maniabilité à teneur en eau constante.

4. Augmentation du délai de mise en oeuvre.

A dosage élevé, le Sika® Plastiment® BV-40 augmente le temps de prise du béton.

La température jouant un rôle important, il est bon de procéder à des essais. A titre indicatif :

- à 20°C, on obtient un retard de prise de 3 à 4 heures environ avec 0,6 %.
- à 5°C, le même dosage provoque un retard de prise de l'ordre de 8 heures.

Le Sika® Plastiment® BV-40 est compatible avec nos entraîneurs d'air SIKA AER et SIKA AER AX1.

Cette combinaison conduit à :

- l'amélioration des résistances aux cycles gel-dégel,
- la possibilité de coulage en continu (béton extrudé, béton routier),
- l'amélioration des résistances de tous bétons situés dans les zones de marnage.

CARACTÉRISTIQUES / AVANTAGES

Le Sika® Plastiment® BV-40, grâce à ses propriétés physico-chimiques permet :

Sur béton frais

- d'augmenter considérablement la maniabilité même en réduisant l'eau de gâchage,
- de disperser le ciment dans la masse,
- d'améliorer l'adhérence béton-armatures,
- de s'opposer à la ségrégation,
- d'améliorer la thixotropie,
- d'étaler éventuellement la prise.

Sur béton durci :

- d'augmenter les résistances mécaniques,
- d'accroître la compacité,
- d'augmenter l'imperméabilité,
- de diminuer le retrait et le fluage.

Le Sika® Plastiment® BV-40 est compatible avec tous les ciments et en particulier le ciment fondu.

DESCRIPTION DU PRODUIT

Conditionnement	▪ Bidon de 25 kg ▪ Fût de 250 kg ▪ CP de 1200 kg
Aspect / Couleur	Liquide brun foncé
Durée de Conservation	12 mois dans son emballage d'origine intact
Conditions de Stockage	Dans un local, à l'abri du l'ensoleillement et du gel, entre 5 °C et 30 °C. En cas de gel accidentel, le produit retrouve ses qualités d'origine une fois dégelé lentement et réhomogénéise
Densité	1,20 ± 0.03
Valeur pH	5,5 ± 2
Teneur Totale en Ions Chlorure	≤ 0,1 %
Équivalent Oxyde de Sodium	≤ 2 %

INFORMATIONS TECHNIQUES

RENSEIGNEMENTS SUR L'APPLICATION

Dosage	Plage de dosage : 0,3 à 1,2 % en fonction du poids du liant ou du ciment selon la fluidité et les performances recherchées. Comme retardateur : à partir de 0,5% du poids du ciment. Son dosage exact se détermine sur chantier en procédant à quelques essais puisqu'il est fonction de la nature des composants du béton, des qualités recherchées (compacité, plasticité) et des conditions climatiques. Ne pas dépasser 1% sans essai préalable : possibilité de retard de prise important.
---------------	---

VALEURS DE BASE

Toutes les caractéristiques spécifiées dans cette fiche technique sont basées sur des tests de laboratoire. Les mesures effectives peuvent varier en raison de circonstances échappant à notre contrôle.

ÉCOLOGIE, SANTÉ ET SÉCURITÉ

Pour des informations et des conseils concernant la manipulation, le stockage et l'usage au rebut de produits chimiques en toute sécurité, veuillez consulter la fiche de sécurité la plus récente du matériau concerné, qui comporte ses données physiques, écologiques, toxicologiques, etc.

LIMITATIONS

Manipulation non dangereuse.
En cas de contact avec la peau, un simple lavage suffit.

INSTRUCTIONS POUR L'APPLICATION

DISTRIBUTION

Introduire le Sika® Plastiment® BV-40 dans l'eau de gâchage.

RESTRICTIONS LOCALES

Les performances de ce produit peuvent varier d'un pays à l'autre en raison de réglementations locales spécifiques. Veuillez consulter la fiche technique locale pour la description exacte des champs d'application.

INFORMATIONS LÉGALES

Les informations sur la présente notice, et en particu-

lier les recommandations relatives à l'application et à l'utilisation finale des produits Sika, sont fournies en toute bonne foi et se fondent sur la connaissance et l'expérience que la Société Sika a acquises à ce jour de ses produits lorsqu'ils ont été convenablement stockés, manipulés et appliqués dans des conditions normales conformément aux recommandations de Sika. En pratique, les différences entre matériaux, substrats et conditions spécifiques sur site sont telles que ces informations ou toute recommandation écrite ou conseil donné n'impliquent aucune garantie de qualité marchande autre que la garantie légale contre les vices cachés. L'utilisateur du produit doit tester la compatibilité du produit pour l'application et but recherchés. Sika se réserve le droit de modifier les propriétés du produit. Notre responsabilité ne saurait d'aucune manière être engagée dans l'hypothèse d'une application non conforme à nos renseignements. Les droits de propriété détenus par des tiers doivent impérativement être respectés. Toutes les commandes sont acceptées sous réserve de nos Conditions de Vente et de Livraison en vigueur. Les utilisateurs doivent impérativement consulter la version la plus récente de la fiche technique locale correspondant au produit concerné, qui leur sera remise sur demande.

Sika Tunisie

Zone Industrielle
2086 Douar Hicher.Tunisie
sika.tunisienne@tn.sika.com
Tél. 00216 700 22 700
Fax.00216 715 47 130
tun.sika.com

Notice produit

Sika® Plastiment® BV-40
Septembre 2020, Version 01.01
021302011000000717

SikaPlastimentBV-40-fr-TN-(09-2020)-1-1.pdf