

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE
جامعة محمد بوضياف – المسيلة
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF- M'SILA



FACULTE : TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT : GENIE CIVIL

N° /2025

OPTION : MATERIAUX

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique
Par : SALMI HOSSAM & FARHATI CHAIMA

Intitulé

**EFFET DE MILIEUX AGRESSIFS SUR LA DURABILITE DU BETON AVEC
POUDRE DE BRIQUE RECYCLE**

Devant le jury composé de :

NACERI ABDELGHANI

Université de M'Sila

Président

BOUALLEG SAIDA

Université de M'Sila

Examineur

AMRIOU ABDERACHID

Université de M'Sila

Rapporteur

Année universitaire : 2024/2025

Remerciement

Le présent travail a été réalisé au Département GENIE CIVIL

*De la Faculté des sciences de Technologie Université MOHAMED
BOUDIAF-M'SILA*

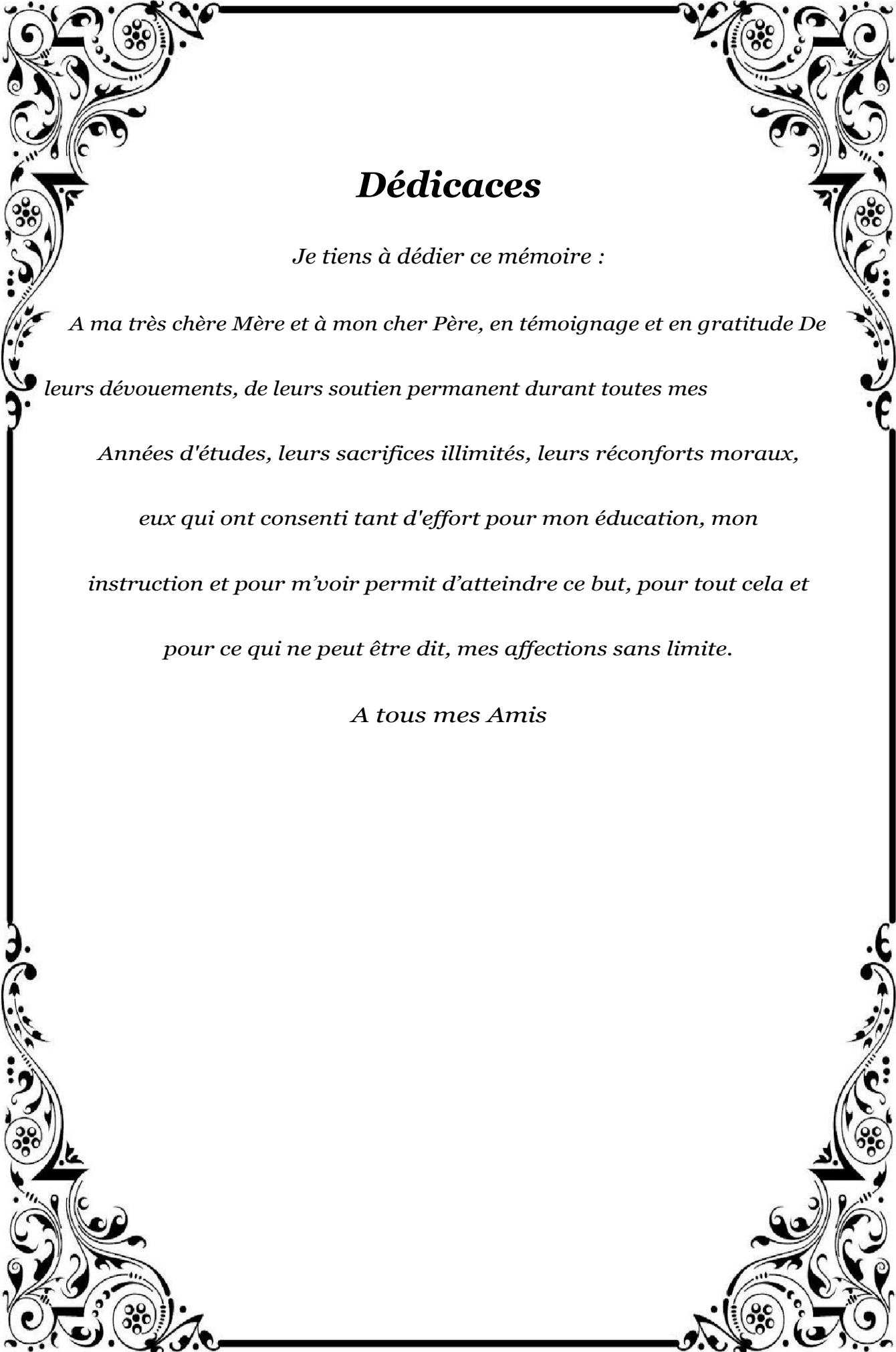
*Nous remercions Dieu, le tout puissant pour la volonté, la patience et le
courage qu'il nous a accordés pour mener à terme ce travail.*

*Nous tenons à exprimer notre sincère reconnaissance à
Dr AMRIOU Abedrrachid.*

*à l'Université M'sila, pour avoir accepté de nous encadrer, pour son
attention discrète, ses recommandations mesurées et ses précieux
conseils et surtout pour ses qualités humaines et scientifiques toujours
en toute Modestie, sa passion du métier qu'il sait rendre contagieuse
et la confiance qu'il a bien voulu nous accorder tout au long de ce
travail.*

*Nous voudrions ensuite remercier tous les membres du jury qui vont juger
ce modeste travail et nous faire profiter de leurs connaissances et
remarques constructives :*

Merci à tous qui de près ou de loin.

A decorative border with ornate floral and scrollwork patterns in each corner, framing the central text.

Dédicaces

Je tiens à dédier ce mémoire :

*A ma très chère Mère et à mon cher Père, en témoignage et en gratitude De
leurs dévouements, de leurs soutien permanent durant toutes mes*

Années d'études, leurs sacrifices illimités, leurs réconforts moraux,

*eux qui ont consenti tant d'effort pour mon éducation, mon
instruction et pour m'avoir permis d'atteindre ce but, pour tout cela et*

pour ce qui ne peut être dit, mes affections sans limite.

A tous mes Amis



Dédicaces :

Je dédie ce travail :

*A mes chers parents, ma mère et mon père pour leur patience,
leur amour, leur
Soutien et leurs encouragements.*

A mes sœurs et mon frère

A mes très chers amis

A tous ceux qui m'aiment

A tous ce que j'aime

A tous ceux qui m'ont aidé de loin où de près à ce travail



Résumé :

La dégradation du béton dans des milieux chimiquement agressifs provient des réactions entre les hydrates du ciment et les agents agressifs, entraînant la dissolution de l'hydroxyde de calcium et la formation de composés comme le sulfate de calcium et l'ettringite. Les paramètres qui régissent le comportement du béton face aux attaques chimiques sont nombreux : les composants du béton, ces propriétés de transfert et les conditions environnementales. Les milieux les plus agressifs incluent l'eau pure, les acides, les sulfates, l'eau de mer et les eaux usées.

Le recyclage et la valorisation des différents déchets dans la confection des bétons sont considérés aujourd'hui comme une solution d'avenir pour répondre au déficit entre production et consommation de matériaux et pour protéger l'environnement.

Dans ce travail, on présente une étude expérimentale sur les performances mécaniques et la durabilité de micro béton contenant la poudre issue de brique recyclé et concassé. Les échantillons sont exposés à des milieux acides et sulfatés.

Dans ce cadre, plusieurs échantillons de micro béton ont été préparés en utilisant des matériaux locaux et en incorporant la poudre de brique comme addition avec des taux de 0 %, 8 % et 15 % par rapport au poids de ciment.

Les résultats obtenus sont comparés avec ceux d'un béton ordinaire.

الملخص:

يتحلل الخرسانة في البيئات الكيميائية العدوانية نتيجة تفاعلات بين هيدرات الأسمنت والعوامل العدوانية، مما يؤدي إلى ذوبان هيدروكسيد الكالسيوم وتكوين مركبات مثل كبريتات الكالسيوم والإترينجيت. وتتحكم عوامل عديدة في سلوك الخرسانة ضد الهجوم الكيميائي، منها مكوناتها، وخصائص انتقالها، والظروف البيئية. وتشمل البيئات الأكثر عدوانية الماء النقي، والأحماض، والكبريتات، ومياه البحر، ومياه الصرف الصحي.

يُعتبر إعادة تدوير واستعادة مختلف مواد النفايات في إنتاج الخرسانة حلاً واعداً لسد الفجوة بين إنتاج المواد واستهلاكها، ولحماية البيئة.

يقدم هذا العمل دراسة تجريبية حول الأداء الميكانيكي ومتانة الخرسانة الدقيقة المحتوية على مسحوق من الطوب المُعاد تدويره والمُكسر. تعرضت العينات لبيئات حمضية وكبريتية في هذا السياق، تم تحضير عدة عينات دقيقة من الخرسانة باستخدام مواد محلية، مع إضافة مسحوق الطوب بنسب 0% و8% و15% من وزن الأسمنت. وقورنت النتائج المُحصل عليها بنتائج الخرسانة العادية.

Abstract:

Concrete decomposes in aggressive chemical environments as a result of reactions between cement hydrates and aggressive agents, leading to the dissolution of calcium hydroxide and the formation of compounds such as calcium sulfate and ettringite. Several factors control the behavior of concrete against chemical attack, including its composition, transport properties, and environmental conditions. The most aggressive environments include fresh water, acids, sulfates, seawater, and wastewater.

Recycling and recovering various waste materials in concrete production is a promising solution to bridge the gap between material production and consumption and to protect the environment.

This work presents an experimental study on the mechanical performance and durability of micro-concrete containing recycled and crushed brick powder. The samples were exposed to acidic and sulfurous environments.

In this context, several micro-concrete samples were prepared using local materials, with brick powder added at 0%, 8%, and 15% by weight of cement.

The results obtained were compared with those of conventional concrete.

Sommaire

Sommaire

Remerciements :

Dédicace :

Résumé :

Sommaire :

Liste de Figure :

Liste des tableaux :

Introduction générale :

Chapitre I: Revue sur les constituants et l'hydratation du ciment

I. Introduction 04

I.1 Le ciment

I.1.1 Fabrication

I.1.2 Différents types de ciment

I.1.3 L'hydratation du ciment et les différents hydrates

I. 1.4L'hydratation des silicates

I. 1.5L'hydratation des aluminates

I.1.6 Rôle de gypse

I.1.7Microstructure de la pâte de ciment hydratée

I.1.8Présentation et description du réseau panneaux de la pâte de ciment

I.1.9 Description des pores dans le béton

I. 2. Facteurs influencent les propriétés mécaniques et la durabilité du béton

I.2.1 La formulation

I.2.2. Types de liant

I.2.3Mode de conservation(cure)

I.2.4Rapport E÷C

I.2.5Facteurs environnementaux

I.2.5 Les adjuvants

I.2.6 Les ajouts

Conclusion

Chapitre II : la durabilité du béton dans les milieux chimiquement agressifs

II. Introduction à la durabilité du béton	24
II.1.la durabilité et économie	24
II.2. Béton durable et béton résistant.	24
II.3. Mécanismes de la dégradation chimique du béton.....	26
II.3.1. carbonation du béton.	27
II.3.1.1. Définition.....	28
II.3.1.2.conséquence de la carbonation	29
II.3.1.3.facteurs influçants la carbonatuion	29
II.3.2.attaque du béton par les sulfates	31
II.3.2.1.définition.....	
II.3.2.2.Ettriugite de formation primaire.....	
II.3.2.3.ettriugite de formation secondaire	32
II.3.2.4.mécanisme d'attaque par le sulfates	34
II.3.2.5.conséquence de goufflement liéé à l'ettriugite	35
II.3.2.6.réaction chimique (C SO ₄ ,Mg SO ₄ ,Na SO ₄ ,....)	36
II.3.3.attaque du béton par les acides	
II.3.3.1.définition	
II.3.3.2.mécanisme d'attaque du béton par les acides	
II.3.3.3.conséquence de l'attaque du béton par les acides	
II.3.3.4. réactions chimiques(H ₂ SO ₄ ,HCL)	
II.4.paramètres influants le compertement du béton face aux agressions chimiques	
II.4.1.facteurs liéé à la composition du béton	
II.4.2.facteurs liéé à les propriétés de transfert dans le béton	
II.4.3.facteurs liéé à l'environement	
II.5.effets des additions et des adjuvants sur le comportement du béton dans les milieux agressifs	
II.6.précautions àprendre contre les attaques chimiques du béton	
II.7.effets des attaques chimiques	
II.7.1.la résistance du béton.....	43
II.7.2.Perte de masse du béton	
Conclusion	43
ChapitreIII. Recyclage et incorporation des déchets dans le béton	

III.1.introduction	45
III.1.différents types de déchets	45
III.1.1.déchets industriels	45
III.1.2.déchets de construction	46
III.2.recyclage et présentation des déchets.....	48
III.2.1.technique et recyclage des déchets.....	49
III.2.2.gestion des déchets	49
III.2.3.préparation des déchets	50
III.2.4classification des déchets	51
III.3.incorporation des dechets dans la fabrication du ciment	51
III.3.1.Laitier haut fourneau	
III.3.2.Fumée de silice	
III.3.3.Cendre de volaute	
III .4.Incorporation des déchets dans le béton	
III.4.1.déchets de démolition.....	52
III.4.1.2.déchets du brique.....	53
III.5.utilisation des déchets de brique pour la préparation du béton	54
III.5.1.présentation des déchets de brique.....	56
III.5.2.gestion et préparation des déchets de brique.....	57
III.5.3.caractéristique du béton contenant les déchets de brique.....	58
III.5.4.déchets de brique comme granulats	58
III.5.5.déchets de brique comme poudre	60
Conclusion.....	62
Chapitre IV : Programme experimental	
A/présentation et Caractéristiques des matériaux utilisés	
IV.1 Introduction	65
IV.2Caractérisationdesmatériauxutilisés	65
IV.3. Essais sur les granulats	66
IV.3.1Analyse Granulométrique.....	66
IV.3.2: Masse volumique apparente	68
IV.3.3: Masses volumiques absolues.....	69
IV.3.4: Absorption d'eau:.....	70

IV.3.5: La porosité.....	70
IV.3.6:La Compacité	71
IV.3.7:Indice des vides	72
IV.3.8:Résistance à la fragmentation.....	72
IV.4:Sable concassé0/5	72
IV.4.1:Composition granulométrique	72
IV.4.2: Module de finesse(EN196-6).....	73
IV.4.3:Masse volumique apparente: NFP18-55	74
IV.4.5 : Porosité.....	75
IV.4.6:Compacité	76
IV.4.7:Indice des vides	76
IV.4.8:Equivalent de sableNF-18-598.....	77
IV.5 :Briques concassés et ajouts	80
IV.5.1.Sable de brique concassé.....	80
IV.5.1.1.Analyse Granulométrique.....	80
IV.5.3: La Fumée de silice (FS)	81
IV.6:Le ciment.....	82
IV.7: L'adjuvant	83
IV.7.1: Description	84
IV.7.2: Caractéristiques	85
IV.8L'eau de gâchage.....	85
IV.9: La formulation des bétons.....	86
IV.9.1: Méthode de formulation de Dreux-Grise	86
IV.9.2.Dosage en ciment et en eau	87
IV.9.3.Ajustement du dosage en eau	87
IV.9.4.Dosagedes granulats	89
IV.9.4.1. DREUX-GORISSE	90
IV.9.4.2.La ligne de partage	92
IV.9.4.3.Dosageen massedes granulats	92
IV.9.4.4.Coefficientdecompacité.....	93
IV.9.4.5.Quantité des agrégats en pourcentage	94
IV.9.4.6.Volume absolue l'ensemble des granulats	94

IV.9.4.7. Dosage des granulats en kg dans 1m ³	94
IV.9.4.7 Programmes expérimentale	95
IV.10. Matériels et essais	95
IV.11. Vibration : [NAEN12390-2]	95
IV.12.: Conduite des essais sous températures élevées	95
IV.13.: Essai de Flexion et Traction	96
IV.14.: Essai de compression	96
B/Représentation et interprétation des résultats:	
IV1. Introduction	99
IV.2. Perte de masse	99
IV.3. Essai de compression	100
IV.3.1: Résistance à la compression	102
IV.4. Essai de flexion	103
IV.4.1: Résistance à la flexion	104
IV.5. Essai de Traction	105
IV.5.1: Résistance à la traction	105
Conclusion	106
Conclusion générale	108

Liste des Figures

Figure	Titre de figure	Page
Chapitre I : Revue générale sur la microstructure de ciment		
I.1	. le ciment	09
I.2	Schéma général du processus de fabrication du ciment [4].	10
I.3	Vue au microscope électronique à balayage de C – S – H dans une pâte de ciment hydratée.[8]	10
I.4	Schématisation de la structure des C–S–H, d’après R. Feldman et P. Sereda [10]	11
I.5	Conservation d’éprouvette de béton (la cure)	11

Chapitre II : influence de la température sur les caractéristiques des Bétons		
Figure.II.01	Carbonatation de béton	25
Figure.II.02	Coupe théorique d'un mur en béton.	25
Figure.II.03	<i>Des cas pathologiques d'éléments en béton en contact de sulfate. [30]</i>	27
Figure.II.04	<i>La formation de l'ettringite secondaire.</i>	28
Figure.II.05	<i>L'attaque par les sulfates. [30]</i>	29
Figure.II.06	<i>Eprouvette de béton dégradé après 5ans de contact avec des sols riches en sulfates.</i>	30

Figure.II.07	Ettringite primaire non expansive dans la pâte de ciment, vue au microscope électronique à balayage. Ettringite secondaire non expansive dans un pore (1), vue au microscope électronique à balayage. Ettringite expansive (1 et 2) au contact d'un granulat (3), vue au microscope électronique à balayage.	30
Figure.II.08	<i>: La détérioration des silos-tours en béton due à l'attaque des acides d'ensilage.</i> <i>(Photo offerte par : Thomas P. Rylett Ltd., ingénieur-conseil en structures).</i>	31
Figure.II.09	<i>L'attaque par les acides. [30]</i>	32

Chapitre III. Généralité sur le Recyclage des déchets		
FigureIII.1	Déchets ménagers	46
FigureIII.2	Déchets encombrants	50
FigureIII.3	Déchets spéciaux organiser	50
FigureIII.4	Déchet des activités de soins	51
FigureIII.5	+déchet agricole	52
FigureIII.6	Déchets inertes	53
FigureIII.7	Temps de prise des ciments avec ajout du laitier [7]	55

FigureIII.8	Déchets de démolition	58
FigureIII.9	Déchets de brique	60
FigureIII.10	Déchets de brique comme poudre	

Chapitre IV : Programme expérimental		
FigureIV.1	Ciment C EM42.5(GICA)	65
FigureIV.2	Analyse granulométrique	67
FigureIV.3	Masse volumique apparente	69
FigureIV.4	Masse volumique absolue	72
FigureIV.5	Essai de Masse volumique absolue	76
FigureIV.6	Equivalent de sable visuel	77
FigureIV.7	Equivalent de sable au piston	78

Figure IV.8	Essai d'Equivalent de sable	80
FigureIV.9	Module de finesse	80
FigureIV.10	La porosité	83
FigureIV.11	La compacité	84
FigureIV.12	Indice de vide	88
FigureIV.13	Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment prévoir en fonction du rapport E/C	89
FigureIV.14	Les lignes de partage	91

FigureIV.15	Déchets de brique comme poudre	65
FigureIV.16	Evolution découlement au cône de Marsh	67
FigureIV.17	Le super plastifiant (MEDAPLAST 30).	69
FigureIV.18	Le malaxeur utilisé (malaxeur de laboratoire Géo-matériaux)	
FigureIV.19	L'affaissement de cône d'Abrams d'un béton	72
FigureIV.20	La table vibrante (vibrant de laboratoire de matériaux)	76
FigureIV.21	Moule d'éprouvette prismatique (4*4*16).	77
FigureIV.22	La machine de compression	78

Figure IV.23	Les solutions d'acide sulfurique H ₂ SO ₄ et d'acide chloridrique HCl et NaSO ₄ . IV	80
FigureIV.24	Pesée hydrostatique.	80
FigureIV.25	L'appareille pour chauffer (ébullition) du béton.	83
FigureIV.26	Résistance à la compression (béton conservé a l'eau ensuite dans l'acide)	84
FigureIV.27	Résistance à la compression (béton conservé a l'air ensuite dans l'acide)	88
FigureIV.28	Porosité accessible à l'eau béton conserve à l'eau ensuite dans l'acide	89
FigureIV.29	Porosité accessible à l'eau béton conserve à l'air ensuite dans l'acide	
FigureIV.30	Perte de masse béton conserve à l'eau ensuite dans l'acide	
FigureIV.31	perte de masse béton conserve à l'air ensuite dans l'acide	

Liste des tableaux :

Tableau	Titre du tableau	Page
CHAPITRE I		
Tableau I.1	Anhydres et les hydrates de ciment [6](.hydratation de ciment .anonyme 2009)	06
Tableau II.1.	<i>Composants du béton menacés par la corrosion.</i>	38
C HAPITRE IV		

CHAPITRE IV		
Tableau IV.1	Résultat l'analyse granulométrique de (3/8) du gravier concassé	66
Tableau IV.2	L'analyse granulométrique d'un sable concassé 0/5	68
Tableau IV.3	Masse volumiques apparente de Gravier 3/8	70
Tableau IV.4	Masse volumiques absolue de Gravier 3/8	71
Tableau IV.5	Equivalent du sable concassé.	70
Tableau IV.6	Comparaison des résultats	71
Tableau IV.7	Masses volumiques apparentes de sable 0.5 Concassée	71
Tableau IV.8	Masse volumiques absolue de sable concassée 0.5	71
Tableau IV.9	La porosité	72
Tableau IV.10	La Compacité des fractions (3/8)	73
Tableau IV.11	Indice de vides (3/8).	74
Tableau IV.12	Valeurs approximatives du coefficient granulaire	75
Tableau IV.13/16	Valeur du terme correcteur	77
Tableau IV.14/17	Valeurs du coefficient de compacité γ	78
Tableau IV.15	Correction du dosage en eau selon le diamètre, D du mélange granulaire	79
Tableau IV.18	Les dosages en matériaux sec en kg/m ³	81
Tableau IV.19	Caractéristiques chimiques et physique de brique	84
Tableau IV.20	L'ensemble des essais réalisés	86

Introduction générale

Introduction générale :

Le béton est un matériau hétérogène composé de granulats maintenu par un liant poreux appelé « pâte de ciment hydraté » qui est la phase continue du composite. La performance et la durabilité du béton dépendent de la qualité des différents composants et de leurs proportions. Principalement, la quantité d'eau de mélange qui influe sur le comportement physico-chimique de la pâte de ciment durcie, en outre, le type de ciment, la nature des agrégats fins et grossiers, la température pendant le gâchage, le mode de cure et l'environnement du béton. Ces paramètres peuvent affecter énormément les aspects physiques, chimiques et durables du béton.

La durée de vie d'une structure en béton est très souvent liée à sa capacité à empêcher agents agressifs à infiltrer dans ses pores. La capacité des bétons à résister à l'intrusion de ces agents est caractérisée par trois grandeurs physiques : la perméabilité, la diffusivité et l'absorption. Ces paramètres sont considérés comme des indicateurs de la durabilité.

Le béton constitue un système très complexe formé d'un squelette granulaire solidarisé par des hydrates (C-S-H, hydroxyde de calcium, aluminates...). Ce béton qui a un PH de l'ordre de 13, lorsqu'il est plongé dans un milieu différent de son milieu naturel, les équilibres chimiques des hydrates vont être déplacés vers un nouvel équilibre qui se traduit généralement par une première étape de décomposition de la partie superficielle du matériau.

Les chantiers de construction et de démolition engendrent une diversité de déchets, une grande partie de ces déchets sont éliminés en décharge. L'épuisement de sources naturelles disponible, les lois relatives à la protection de l'environnement et les problèmes posés par la destruction des déchets sont tous des facteurs qui favorisent le recyclage des déchets de chantier.

En Algérie, les déchets de construction et de démolition sont importants, et rarement valorisés. La seule tentative de valorisation des déchets de construction a été réalisée à El-ASNAM (CHLEF actuellement) suite au tremblement de terre de 1982 en collaboration avec le Centre scientifique et technique de Construction (C.S..C) belge.

Le manque de connaissances sur le comportement et la durabilité de ces bétons engendre la méfiance des usagers. Par conséquent, une meilleure connaissance du comportement des bétons contenant de tels granulats pourrait contribuer au développement de ce type de matériaux.

***CHAPITRE I : Revue sur les
constituants de l'hydratation de
ciment***

1. Introduction :

Les matériaux à matrice cimentaire tels que les bétons sont les matériaux de construction les plus utilisés dans le monde. En 2002, la France a produit pratiquement 20 millions de tonnes de ciment, ce qui correspond à environ un mètre cube de béton produit, par an et par habitant. Comparativement, la production chinoise annuelle s'élève à environ 620 millions de tonnes de ciment [1]. La très grande utilisation des bétons, et donc des ciments, résulte de son faible coût de production, et de sa facilité de mise en œuvre sur chantier. Le ciment est un composant primordial dans la conception des bétons car ses hydrates apportent la cohésion du squelette granulaire, et donc une tenue mécanique du matériau et de la structure en béton. Par contre, la stabilité des propriétés mécaniques d'un béton repose en grande partie sur la stabilité des hydrates du ciment. Il est donc nécessaire de s'assurer du comportement à long terme du ciment pour garantir celui de la structure en béton. Ce chapitre est divisé en deux parties. Tout d'abord, nous décrivons la pâte de ciment, de son hydratation jusqu'aux principales approches pour modéliser sa microstructure. Dans un second temps, nous dressons un inventaire des mécanismes physiques et chimiques pouvant être identifiés dans les matériaux cimentaires.

2. Le ciment

2.1. Définition

Le ciment est un composant fondamental dans la construction, servant de liant dans la fabrication de divers matériaux tels que le béton et le mortier. Il est principalement présent sous forme de poudre fine, qui, lorsqu'elle est mélangée avec de l'eau, se solidifie pour créer une liaison robuste entre les agrégats. Le processus de production du ciment implique la décarbonatation d'un calcaire et la décomposition d'une argile à une température proche de 1450 °C. Une fois broyé en une poudre fine, le ciment, lorsqu'il est exposé à l'eau, forme des minéraux hydratés extrêmement stables, ce qui lui confère sa couleur grise caractéristique. [2]



Figure1.1.le ciment

2.2. Fabrication d'un ciment

Le ciment est fabriqué essentiellement à partir des matières premières sont extraites et les blocs obtenus sont concassés pour obtenir des éléments inférieurs à 50 mm. Le procédé de la fabrication du ciment dans la figure (1.2) consiste essentiellement à broyer des matières premières, à les mélanger dans certaines proportions puis à les cuire dans un grand four rotatif à une température atteignant environ de 1450 °C, température à laquelle le matériau fond partiellement jusqu'à formes des nodules connus sous le nom de clinker. Le clinker est refroidi puis broyé en poudre fine, opération au cours de laquelle on ajoute le gypse. Le produit ainsi obtenu constitue le ciment Portland [3].

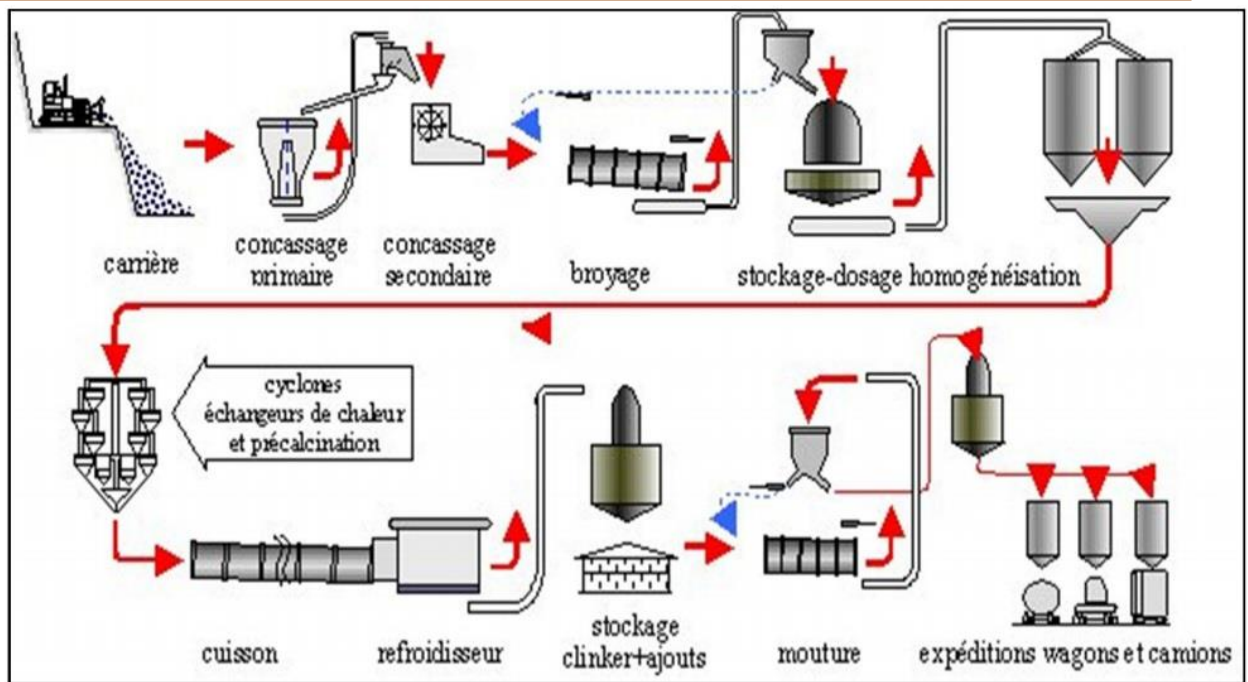


Figure1.2: Schéma général du processus de fabrication du ciment [4].

2. 3.Les différents types de ciment:

Les ciments sont classés en fonction de leur composition, en cinq types principaux selon les normes NF P 15-301 et EN 197-1:

CPA-CEMI: ciment Portland artificiel (CPA dans la notation française)

CPJ-CEM II: ciment Portland composé (CPJ)

CHF-CEM III: ciment de haut fourneau

CPZ-CEM IV: ciment pouzzolanique

CLC-CEM V: ciment au laitier et aux cendres (ciment composé).

En plus des ciments courants cités précédemment, il existe des ciments courants à caractéristiques complémentaires comme le cas des ciments résistant aux sulfates (CRS), ciments pour travaux à lamer, ciments pour travaux au contact d'eaux très pures [5].

2. 4. Hydratation d'un ciment

L'hydratation est un ensemble de réaction chimique qui transforme de la pâte après ajout l'eau de l'état liquide à l'état solide. Les réactions qui transforment le ciment en un liant ont lieu dans la pâte en présence d'eau, les silicates et les aluminates forment des produits d'hydratation qui donne avec le temps une masse dure. [2]

Les anhydres et les hydrates cités dans ce paragraphe sont résumés dans **le tableau (1.1)** ci-dessous

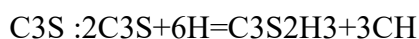
Anhydres et les hydrates de ciment [6] (.hydratation de ciment. Anonyme 2009)

Notation Abrégée	Formule Chimique en oxyde	Dénomination
C3S	(CaO) ₃ -SiO ₂	Silicate tricalcique
C2S	(CaO) ₂ -SiO ₂	Silicate bicalcique
C4AF	(CaO) ₃ -Al ₂ O ₃	aluminate tricalcique
C3A	(CaO) ₄ -O ₁₂ O ₃ -Fe ₂ O ₃	Aluminoferritetétracalcique
CH	Ca(OH) ₂	Portlandite
C-S-H	(CaO) _x -SiO ₂ -(H ₂ O) _y	Silicate de calcium hydraté
C3A.(C3S) ₃ .H ₃₂	(CaO) ₆ -O ₁₂ O ₃ -(SO ₃) ₃ -(H ₂ O) ₃₂	Ettringitou "Aft"
C3A. (C2S) H ₁₂	(CaO) ₆ -Al ₂ O ₃ -(SO ₃)-(H ₂ O) ₁₂	Monosulfoaluminate calcium hydrate ou "Afm"
C2AH ₈	(CaO) ₂ -O ₁₂ O ₃ -(H ₂ O) ₈	aluminatedicalcique hydraté
C3AH ₆	(CaO) ₃ -O ₁₂ O ₃ -(H ₂ O) ₆	aluminate tricalcique hydraté
C4AH ₁₃	(CaO) ₄ -O ₁₂ O ₃ -(H ₂ O) ₁₃	Aluminate tétracalciquehydraté

2. 5. Hydratation des silicates

Au contact de l'eau, les silicates tricalciques et les silicates bicalciques réagissent entre eux et forment des silicates de calcium hydratés (C-S-H) et de la portlandite (Ca(OH)₂) [2].

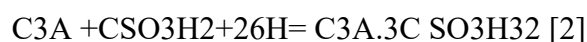
Les équations des réactions d'hydratation des silicates, En ne tenant pas compte des lois de la stœchiométrie, on peut écrire



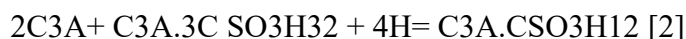
2.6. Hydratation des aluminates

L'hydratation des aluminates est très rapide que les cimentiers ajoutent du gypse au clinker pour contrôler ces réactions. Les réactions avec les aluminates s'effectuent en plusieurs étapes :

Étape 1 : Formation d'ettringite Les aluminates réagissent avec le sulfate du gypse pour former de l'ettringite



l'étape 2 : Transformation de l'ettringite en monosulfate de calcium hydraté Lorsque le gypse est épuisé, la concentration en sulfates de la solution baisse. L'ettringite devient alors instable et se dissout pour former du monosulfate de calcium hydraté :

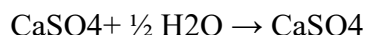
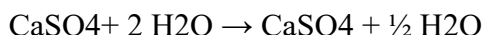


Étape 3 : Hydratation des aluminates résiduels Une fois que l'ettringite se transforme totalement. Au-delà d'un mois, les réactions se poursuivent lentement avec l'aluminate ($C3A$) et l'aluminoferrite ($C4AF$) pour former de l'aluminoferrite de calcium hydraté. Même si les séquences réactionnelles sont proches du $C3A$, l'aluminoferrite tétracalcique ($C4AF$) est nettement plus lent à réagir et n'apparaît de manière significative qu'une fois que le gypse est totalement épuisé.

2.7. Le rôle de gypse:

Le gypse est une roche blanche, d'aspect mat, finement cristallin, tendre (rayable à l'ongle) et de densité 2.3. Quelques traces jaunes de soufre peuvent apparaître. Il est constitué en majeure partie de sulfate de calcium hydraté ($CaSO_4, 2(H_2O)$). Le gypse est très pur (souvent 98%) et ne nécessite pas de purification lors de son exploitation. L'addition de gypse au clinker a pour but de régulariser la prise du ciment, notamment de ceux qui contiennent des proportions importantes d'aluminate tricalcique. Grâce à ce gypse, la prise du ciment, c'est-à-dire le début de son durcissement, s'effectue au plus tôt une demi-heure après le début de l'hydratation. Sans gypse, la prise serait irrégulière et pourrait intervenir trop rapidement.[7]

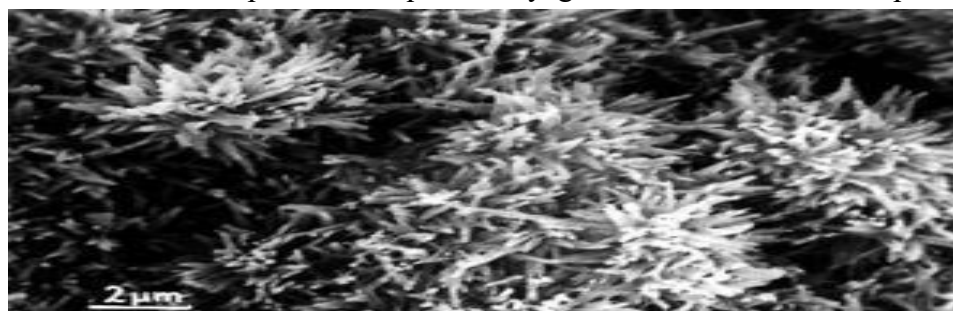
Le gypse va se déshydrater en plâtre, éventuellement en anhydrite et modifier le comportement rhéologique du ciment.



2.8 Microstructure d'une pâte de ciment hydratée :

Les silicates de calcium hydratés (désignés par C – S – H), issus de l'hydratation des phases alite et bélite, représentent en volume 50 à 60% des hydrates formés dans un ciment Portland. Le terme C – S – H désigne une famille de silicates de calcium, mal structurés et de stœchiométrie variable, ce qui la distingue dans la pâte de ciment par rapport aux autres hydrates, cristallins, tels que la portlandite. Dans une pâte de ciment, les C – S – H ont une structure fibreuse .

Figure 1.3. Vue au microscope électronique à balayage de C – S – H dans une pâte de ciment



hydratée.[8]

La formation des C – S – H dans une pâte de ciment peut avoir plusieurs origines. Les C – S – H peuvent être issus de l'hydratation des C₃S ou C₂S et avoir un rapport C/S proche de 1,7 ou aussi bien être issus de la réaction de la portlandite avec de la fumée de silice et avoir un rapport C/S plutôt proche de 1,1. Ce deuxième C – S – H est dit pouzzolanique. Dans une pâte de ciment, et dès les premières secondes la formation du C – S – H a lieu à la surface des grains de clinker, à partir des ions Ca²⁺, H₂SiO₂⁻⁴ et OH⁻ fournis par la dissolution de l'alite et de la bélite [8]. Ce C – S – H a initialement un rapport C/S proche de 1,1. La porosité de cette couche conduit à contrôler par diffusion la vitesse de dissolution des anhydres. Après formation de cette "couche" deux types de C – S – H se forment : À l'extérieur de cette couche un C – S – H en forme d'aiguilles nommé outer product est formé à partir des ions en solution tandis qu'à l'intérieur de cette couche, "en remplacement" des anhydres, se forme un C – S – H plus dense que l'outer product, l'inner product. En laboratoire la synthèse des C – S – H peut se faire par des suspensions où l'on fait réagir de la portlandite et de la fumée de silice, ou bien du CaCl₂ avec du Na₂SiO₃.

Cette deuxième réaction conduit à former des C – S – H de rapport C/S proche de 1 et du chlorure de sodium. La structure des C – S – H est assez complexe. Son étude à l'échelle nanométrique peut expliciter le comportement physico-chimique des C – S – H et en particulier sa stoechiométrie variable. La synthèse en laboratoire des C – S – H de rapport C/S proche de 1 et leur étude, notamment par observation au Microscope Electronique à Transmission (MET)

a révélé la structure lamellaire et permis de confirmer l'existence d'un analogue naturel de ces C – S – H, la tobermorite, structure proposée par H.F.W. Haylor [9]. Elle peut aussi se former dans des ciments ayant subi un autoclavage. La tobermorite a une structure lamellaire, dite drierketten, composée de plans de CaO et de tétraèdres de SiO₄. Les tétraèdres de silice liés aux plans de calcium sont parfois reliés entre eux par d'autres tétraèdres dits pontants et forment des chaînes de silicates. Cette représentation donne une bonne idée de la structure d'un C–S–H de rapport C/S faible mais ne permet pas d'expliquer les changements de composition d'un C – S – H, lorsque le rapport C/S augmente, par exemple. La Résonance Magnétique Nucléaire du silicium (RMN ²⁹Si) donne des informations quantitatives sur la connectivité des atomes de silice dans un matériau considéré. Cette connectivité correspond au nombre de liaisons communes avec d'autres tétraèdres de silice. Par RMN ²⁹Si, des pics distincts sont observables, et sont reliés aux connectivités de type Q0, Q1, Q2 ou Q3. Les tétraèdres de silice de type Q1 sont liés au plan de CaO et situés aux bouts des chaînes silicatées. Les tétraèdres de type Q2 sont soit situés sur un plan de CaO et liés à des Q1 et à un tétraèdre pontant (notés Q2i ou Q2v), soit des tétraèdres pontants (notés Q2p). Le suivi de la connectivité de la silice, et en particulier le ratio des pics Q1/Q2 permet donc d'évaluer la longueur des chaînes silicatées et par conséquent en déduire une évolution de la structure des C–S–H, en termes de rapport C/S. De par leur grande surface spécifique, conséquence de la structure en feuillets, les C – S – H sont susceptibles de fixer d'autres espèces que la silice. Par exemple, des ions aluminium peuvent se substituer au silicium dans les tétraèdres pontants, ce qui a été observé par RMN [8] pour des matériaux lixiviés. Dans les espaces interlamellaires l'aluminium peut aussi se substituer au calcium lorsque le rapport C/S est supérieur à 1. De même, lors de l'attaque sulfatique [2] des sulfates peuvent se fixer sur les C – S – H.

2.9. Description du réseau poreux :

La porosité initiale est implicitement définie à partir de la quantité d'eau qui est utilisée pour hydrater le ciment, autrement dit du rapport E/C. Pour des raisons de mise en œuvre et dans un béton courant, la quantité d'eau introduite est supérieure à la quantité d'eau stœchiométriquement nécessaire à l'hydratation totale du ciment. De ce fait, même à hydratation complète, il reste nécessairement une phase aqueuse au sein de la microstructure de la pâte de ciment. Cette phase aqueuse peut s'évaporer et être remplacée partiellement par une phase gazeuse. De ce fait, une pâte de ciment est obligatoirement poreuse. Suivant les matériaux cimentaires, la quantité et la distribution de la porosité peuvent varier. Un diagramme de distribution de la porosité de pâtes de mêmes ciments mais avec différents rapports E/C a été proposé par G.J. Verbeck et al [10]. Ce diagramme montre la présence de deux pics de distribution de la porosité, mettant en valeur deux classes de porosité dans une pâte de ciment hydratée. Une première porosité, dite porosité capillaire, a une taille de pores comprise entre 0,1 et 10 μm . Cette porosité est un "reliquat" de la porosité initialement introduite lors de la définition du rapport E/C. C'est au sein de cette porosité que la plupart des phénomènes de dissolution ou précipitation de phases solides se produit, ou que l'échange d'espèces par diffusion avec l'environnement extérieur se fait. Cette porosité peut être partiellement ou totalement connectée. Une étude statistique de percolation dans un réseau 3D composé de mailles cubiques de 1 μm de côté a mis en évidence un seuil de percolation de la porosité pour une valeur d'environ 18%. Des essais de diffusivité confirment l'ordre de grandeur de cette porosité limite. La porosité capillaire d'une pâte de ciment de rapport E/C = 0,65 est d'environ 30% alors que pour un béton de poudres réactives elle est plutôt proche de 4% [11]. Les essais de porosimétrie mettent aussi en évidence une porosité nanométrique. Cette porosité est due à la porosité intrinsèque de certains hydrates et en particulier les C – S – H qui ont une structure lamellaire, mise en évidence par des observations au Microscope Electronique à Transmission et illustrée dans le modèle de R. Feldman et P. Sereda figure (1.4). La porosité nanométrique comprend aussi bien l'espace interfeuillet des C – S – H que les vides créés par l'empilement parfois irrégulier des lamelles de C – S – H. L'ordre de grandeur de ces pores est de 0,1 à 10 nm. A cette échelle, les effets surfaciques tels la pression capillaire ou l'absorption dans les pores sont prépondérants devant les phénomènes de transport tels que le transport diffusif. Powers a évalué à 28% la porosité comprise au sein du gel de C – S – H [10].

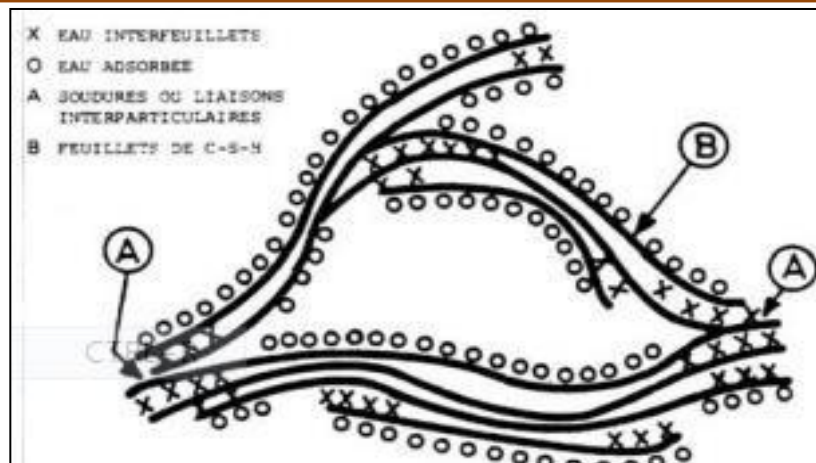


Figure1.4–Schématisation de la structure des C–S–H, d’après R. Feldman et P. Sereda [10]

3.facteurs influençant les propriétés mécaniques du béton

3.1.la formulation :

L'étude de la composition d'un béton consiste à définir le mélange optimal des différents composants du béton (granulat, eau, ciment) afin de réaliser un béton dont les qualités soient celles recherchées (résistance, consistance). On a recours, dans ce cas aux méthodes de détermination des proportions des différents composants ou on trouve soit :

- Les méthodes semi-empiriques (Faury, Bolomey, Vallette).
- Les méthodes graphiques (Joisel, Dreux-gorisse). [12].

3.2. Types de liant :

Le type de liant utilisé dans le béton influence fortement la profondeur de carbonatation. Les liants contenant des ajouts comme le laitier de haut fourneau ou les cendres volantes produisent moins de portlandite, ce qui entraîne une carbonatation plus profonde par rapport aux bétons au CEM I. La portlandite agit comme un régulateur du pH, et sa faible quantité accélère la baisse du pH lors de la carbonatation.

La fumée de silice, bien qu'elle consomme également la portlandite, est utilisée dans des bétons très compacts à faible rapport E/L, ce qui limite la carbonatation grâce à une densité élevée de la matrice. Ainsi, la compacité du béton peut compenser les effets chimiques liés à la réduction de portlandite, surtout pour des rapports E/L faibles ($\leq 0,50$). À ces niveaux, la porosité devient le facteur déterminant de la carbonatation, plus que le type de liant. Certains travaux montrent qu'une substitution en fumée de silice jusqu'à 50 % n'affecte pas la résistance à la carbonatation dans les bétons à hautes performances. La résistance à la carbonatation résulte donc d'un équilibre entre les effets chimiques du liant et les effets physiques de la compacité du béton. [13].

3.3. Mode de conservation(cure) :

La compacité du béton est fortement influencée par la vibration de celui-ci lors de sa fabrication. Plus le béton sera mis en moule et vibré correctement plus la matrice sera compacte et donc plus la vitesse de pénétration du CO₂ dans le béton sera lente [14].

Concernant la cure, il a été montré qu'une cure adaptée améliore la résistance du béton à la carbonatation. La cure a pour objectif de favoriser l'hydratation du liant et donc d'augmenter la quantité d'hydrates susceptibles d'être carbonatés. Il est plus facile d'évaluer l'impact de la cure sur des bétons à base de liants composés étant donné leur cinétique d'hydratation plus lente. [15].



Figure 1.5: conservation d'éprouvette de béton (la cure)

3.4. Rapport E/C :

Le rapport E/C (eau sur ciment) est un facteur clé qui influence fortement les propriétés mécaniques du béton, notamment sa résistance à la compression, sa durabilité et sa porosité.

Influence du rapport E/C :

1. Résistance à la compression :

Plus le rapport E/C est faible, plus la résistance à la compression est élevée. Cela s'explique par une réduction de la porosité du béton, permettant une meilleure cohésion entre les particules.

À l'inverse, un rapport E/C élevé augmente la quantité d'eau libre, créant des pores capillaires lors de l'évaporation, ce qui diminue la résistance mécanique.

2. Durabilité :

Un faible rapport E/C améliore la durabilité en réduisant la perméabilité, ce qui limite la pénétration de substances agressives (chlorures, sulfates, etc.).

3. Ouvrabilité :

Un rapport E/C plus élevé augmente l'ouvrabilité, mais au détriment des propriétés mécaniques. Il faut donc trouver un équilibre ou utiliser des adjuvants plastifiants [2].

3.5. Les adjuvants :

Par définition, les adjuvants sont des produits dosés en faible quantité dans les bétons : moins de 5 % de la masse de ciment. Ce sont souvent des composés organiques, spécialement formulés pour les applications béton, et disponibles commercialement sous forme de solutions aqueuses. Ils ont pour but d'améliorer certaines propriétés du matériau. C'est surtout la rhéologie du béton frais et la cinétique de prise et de durcissement que l'on peut espérer modifier directement. Parfois, les adjuvants commerciaux sont des mélanges de molécules de base, ce qui leur confère une certaine poly fonctionnalité [16].

I .5.1. Le mode d'action des adjuvants [17]:

Soit mécanique : en modifiant la consistance du mélange

Soit physique : en agissant sur la tension superficielle des composants.

Soit chimique : en modifiant la vitesse de prise du ciment.

3.6. Facteurs environnementaux :

Les principaux rejets en termes de volume sont le dioxyde de carbone (CO_2), les oxydes d'azote (NO_x), le dioxyde de soufre (SO_2) et les poussières [18].

Dans le secteur cimentier, les émissions de (CO_2) sont les plus importantes. En effet, pendant la cuisson des matières premières calcaires, le carbonate de calcium est transformé en oxyde de calcium, laissant s'échapper le dioxyde de carbone (CO_2) contenu dans le calcaire. Les sources d'émissions de (CO_2) comprennent donc l'utilisation de combustibles pour la production d'énergie et la décarbonatation du calcaire. Le développement durable du béton permet entre autres de réduire l'émission des gaz à effet de serre, la production d'une tonne de ciment génère environ la même quantité de (CO_2) dans l'atmosphère. Le remplacement d'une partie du ciment par des ajouts cimentaires permettra de diminuer de façon systématique la quantité de (CO_2) émise [19].

La clinkérisation est la partie la plus importante du procédé de fabrication du ciment pour ce qui concerne la consommation d'énergie et les rejets dans l'atmosphère du fait de la nécessité d'atteindre une température d'environ 1500°C [20].

3.7 Les ajouts :

Les ajouts pour béton sont des matériaux présentant une granulométrie très fine que l'on incorpore le plus souvent au ciment, quelque fois également au béton. Les ajouts permettent soit d'améliorer les caractéristiques du béton ou de lui conférer des propriétés spécifiques. Les ajouts sont souvent meilleur marché que le ciment Portland et permettent d'obtenir un ciment composé ou varié et plus économique. Contrairement aux adjuvants, les ajouts doivent être pris en compte dans le calcul de la composition du béton. Des ajouts, tels que les cendres volantes, les fillers, les laitiers, etc., entrent dans la majorité des compositions du ciment dans le but d'améliorer ses caractéristiques rhéologiques et/ou mécaniques. On obtient ainsi un liant de composition binaire voire tertiaire. Les pays industrialisés tels que les États-Unis, la Russie, la France, l'Allemagne, le Japon et l'Angleterre, sont les plus grands producteurs de cendres volantes, de fumée de silice et de laitier de haut fourneau. La Chine et l'Inde produisent également des quantités importantes de cendres de balles de riz [21].

4. Conclusion :

La microstructure du ciment est un aspect clé pour comprendre les propriétés et le comportement du matériau. Le ciment est essentiellement composé de grains de clinker, qui sont des agglomérats de silicates, d'aluminates et de ferrites de calcium formés lors de la calcination de matières premières telles que le calcaire, l'argile et le fer. Les grains de clinker sont liés ensemble par une matrice de gel de silice hydraté, qui est formée lorsque le ciment est mélangé avec de l'eau. La microstructure du ciment est donc caractérisée par la taille, la forme et la disposition des grains de clinker et des pores dans la matrice de gel. Ces caractéristiques influencent les propriétés physiques et mécaniques du matériau, telles que la résistance, la porosité, la perméabilité et la durabilité. Des techniques modernes d'imagerie comme la microscopie électronique à balayage et la tomographie aux rayons X ont été utilisées pour étudier la microstructure du ciment avec une précision élevée. En résumé, la compréhension de la microstructure du ciment est essentielle pour optimiser les propriétés et la performance du matériau dans diverses applications de construction et d'ingénierie.

Chapitre II: Durabilité du béton dans les milieux chimiquement agressifs

1Introduction:

La durée de vie d'un ouvrage en béton est très souvent liée à la capacité du béton à empêcher les agents agressifs de pénétrer dans sa porosité. L'aptitude des bétons à résister à l'intrusion de ces agents est caractérisée par trois grandeurs physiques : la perméabilité, la diffusivité et l'absorption. Ces trois paramètres sont considérés comme des « indicateurs de la durabilité ». Les altérations du béton sont variées. Elles atteignent soit la matrice cimentaire soit les armatures, par fois les deux. Leurs origines sont très nombreuses : chaque étape depuis la formulation, jusqu'à la mise en œuvre, mais aussi l'agressivité de l'environnement peuvent être source de dégradation.

La durabilité est tout aussi importante que les caractéristiques mécaniques pour le matériau béton. Cette propriété est définie (dans un cadre très général) par la capacité du matériau à maintenir ses caractéristiques physiques et performances mécaniques dans des conditions de sécurité satisfaisantes pendant la durée de vie prévue pour l'ouvrage compte tenu des conditions de services existantes et de l'environnement dans lequel il évolue. Le paramètre régissant la durabilité est bien entendu la perméabilité. Plus cette dernière est réduite et mieux sa durabilité en sera augmentée.

Pour évaluer la durabilité « potentielle » d'un béton, il est nécessaire de connaître les mécanismes susceptibles de conduire à sa dégradation, et la résistance du matériau vis-à-vis de ces dégradations. [22]

2.Durabilité et économie:

La durabilité est un objectif de qualité pour l'ingénieur, et le métier de ce dernier consiste à atteindre les objectifs fixés au moindre coût. Il en résulte deux règles qui permettent de concilier au mieux économie et durabilité.

Règle 1 : l'expérience du temps : Toute innovation doit être évaluée par comparaison avec ce qui est connu pour avoir subi avec succès l'épreuve du temps.

Règle 2 : la communication des règles de comparaison : Les règles de comparaison entre l'innovant et le traditionnel doivent donner lieu à une délibération intra et interprofessionnelle en vue de déterminer celle qui, à chaque époque, paraissent les mieux adaptées. De nos jours, l'application de la règle 1 se fait principalement dans les laboratoires et la règle 2 se traduit par l'élaboration de normes, de codes et de règlements. Le fondement d'une approche économique de la durabilité réside donc dans le lien nécessaire entre les résultats expérimentaux et le cadre normatif.

3.Béton durable et béton résistant:

1.Béton résistant

Le béton résistant se caractérise principalement par sa résistance mécanique, en particulier la résistance à la compression, qui est souvent mesurée à 28 jours. Béton conçu pour supporter des charges mécaniques importantes. Haute résistance à la compression (souvent > 50 Mpa pour les bétons haute performance). Utilisation de faibles rapports E/C (généralement $< 0,4$). Formulation optimisée avec des ciments à haute résistance et parfois des additions (fumée de silice, cendres volantes...), Limite : Un béton peut être très résistant mais peu durable s'il est poreux ou sensible aux agressions chimiques. [23]

2. Béton durable

Le béton durable est conçu pour résister aux conditions environnementales agressives sur le long terme, tout en conservant ses performances mécaniques. Béton capable de conserver ses caractéristiques mécaniques et physico-chimiques dans le temps, sous l'effet des agents agressifs. Faible perméabilité.

Résistance aux cycles gel/dégel, aux chlorures, aux sulfates, au CO. Utilisation de matériaux complémentaires (cendres volantes, laitiers, fumée de silice). Optimisation du rapport E/C pour limiter la porosité.

Durabilité $\neq$ résistance uniquement : Un béton peut avoir une résistance initiale modeste mais être plus durable qu'un béton très résistant, si sa formulation protège contre les agressions environnementales. [24]

4. Mécanisme de la dégradation chimique du béton:

4.1. Carbonatation du béton:

4.1.1. Définition :

La carbonatation est un phénomène chimique lié à l'émission de gaz carbonique dans l'atmosphère. C'est une pathologie de béton qui avec le temps atteint des couches de plus en plus importantes. Elle dégrade les bétons armés et elle est notamment responsable de la mise à nu de leurs armatures. Le dioxyde de carbone CO_2 pénètre sous forme gazeuse dans le béton. Il provoque une réaction dite de carbonatation avec l'eau interstitielle. Le front de carbonatation avance progressivement à partir du parement. Il transforme l'hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$ « chaux hydratée », qui est une base, et qui confère à l'eau qui se trouve dans les pores du béton un pH élevé (entre 12,5 et 13), en carbonate (CaCO_3). Ce front de carbonatation abaisse le pH de la solution interstitielle depuis 13 jusqu'à environ 9. Ceci dégrade la passivation des armatures. La chaux libre (CaO) et les alcalis du ciment (Na_2O et K_2O) contribuent également à rendre l'eau des pores basique. $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{CO}_2 \leftrightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ La carbonatation entraîne des problèmes de durabilité puis de résistance sur les structures en béton armé. Les barres d'acier censées garantir cette résistance gonflent sous l'effet de la corrosion et font éclater le béton d'enrobage les aciers sont alors mis à nu. [25]

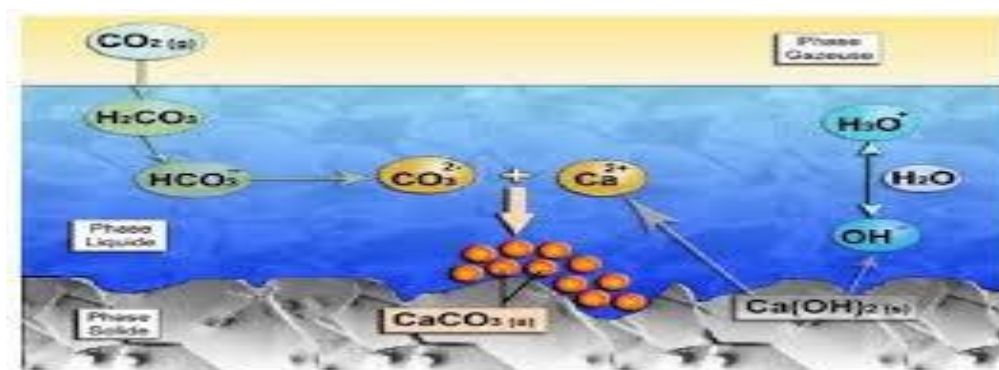


Figure 2.1. : carbonatation de béton

4.1.2. Conséquence de la carbonatation :

En termes de durabilité, le seul inconvénient de la carbonisation est le faible pH de la solution interstitielle dans la pâte dure du ciment Portland, qui passe d'une valeur de 12,6 à 13,5 à une valeur d'environ 9 . Lorsque tout le $\text{Ca}(\text{OH})_2$ est carbonisé, le pH chute à 8,3. La conséquence de cette diminution du pH peut être décrite comme suit : La couche d'oxyde passive protège l'acier de toute réaction avec l'oxygène et l'eau, c'est-à-dire contre la formation de rouille ou de corrosion. Cet état de l'acier est appelé passivation. Le maintien de cette passivation nécessite une solution interstitielle à pH élevé en contact avec la couche passive. Ainsi, si le front de carbonisation atteint la surface du renfort, une corrosion de ce dernier peut se produire. À condition que l'oxygène et l'humidité nécessaires soient présents. Pour cette raison, il est important de connaître la profondeur et le front de carbonisation, d'autant plus que ce dernier n'évolue pas uniformément du fait de l'inhomogénéité du béton.

La carbonisation d'une pâte de ciment durci contenant des chlorures liés au même effet que la libération de chlorures liés et augmente le risque de corrosion. D'autre part, physiquement, la carbonatation augmente la perméabilité en réduisant la porosité grâce au colmatage de certains pores par les carbonates de CaCO_3 qui occupent un plus grand volume de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ qu'ils remplacent. De plus, l'eau libérée par $\text{Ca}(\text{OH})_2$ lors de la carbonisation peut contribuer à l'hydratation du ciment anhydre. Ces changements entraînent une augmentation de la dureté et de la résistivité de la surface [26]. Et une résistance accrue aux formes d'attaque dépendant de la perméabilité.

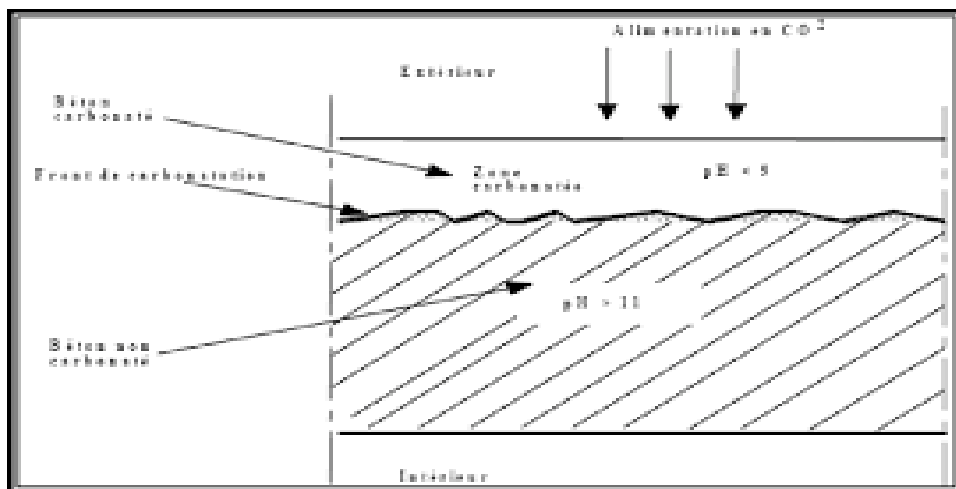


Figure2.2. : Coupe théorique d'un mur en béton.

4.1.3. Facteurs influençant la carbonatation :

La composition du beton

Le dosage en eau et en ciment rapprt E/C.

Le milieu et la nature de l'ouvrage.

Le rapport surface/volume.

La cinétique du processus de carbonatation dépend de la teneur en dioxyde de carbone de l'air et de la facilité avec laquelle le gaz carbonique pénètre dans les pores du béton et de paramètres liés aux caractéristiques du béton (nature et dosage du ciment, teneur en hydrates carbonatés, dosage en eau, porosité totale et distribution de la taille des pores et perméabilité) et au milieu environnant (teneur en dioxyde de carbone, humidité relative dans laquelle la structure est située) et sa structure poreuse. Plus le béton est compact, le dosage en ciment élevé, le rapport E/C faible et la résistance du béton élevée, plus la progression du front de carbonatation est lente.

Suivant la quantité de chaux renfermée dans le ciment, l'humidité du matériau et de l'ambiance enfin et aussi de l'exposition le phénomène évoluera différemment.

Dès la formation superficielle des premiers couches carbonatées, le phénomène se ralentit ou s'annule. [27]

4.2. L'attaque par les sulfates

4.2.1. Définition de l'attaque sulfatique :

La résistance du béton à l'attaque des sulfates est l'un des facteurs les plus importants pour sa durabilité. Le problème est aussi ancien que concret et nous avons commencé à l'étudier il y a près de 100 ans. L'attaque des sulfates s'accompagne de la précipitation de soi-disant « sous-produits » du sulfate, dont la formation après hydratation du ciment, dilatation importante et dégradation chimio mécanique (modification des propriétés de transport et de porosité, fissures, perte de résistance et de cohésion). Cela endommage le matériau cimentaire, approximativement à long terme en fonction de l'attaque (nature, teneur et concentration des sulfates en contact) et du ciment utilisé. [28]



Figure2. 3 : Des cas pathologiques d'éléments en béton en contact de sulfate. [30]

4.2.2. Ettringite de formation primaire :

Correspond à un produit issu de l'hydratation des ciments qui se forme par réaction entre le régulateur de prise

(gypse, himihydrate, anhydrite) et les aluminates de calcium. Ces cristaux, de forme aciculaire, ne provoquent pas de gonflement car ils cristallisent avant le durcissement du béton, dans les espaces libres du matériau. Ils revêtent même un caractère bénéfique, puisqu'ils contribuent à la cohésion de la pâte de ciment au jeune âge, leur formation étant accompagné par une diminution de la porosité et par une augmentation concomitante de la résistance mécanique du mélange. [31]

4.2.3. Ettringite de formation secondaire :

Correspond à une ettringite qui cristallise dans le béton durci, à la faveur de circulation d'eau dans les bétons (phénomènes de dissolution/recrystallisation) et de sources de sulfates externes (sols, milieu marin) ou internes (quantités trop importantes de sulfates dans les constituants du béton). Cette ettringite peut générer des gonflements internes pouvant conduire à l'apparition de désordres sur les ouvrages. Dans le cas des phénomènes de dissolution/recrystallisation, elle cristallise sous forme aciculaire dans les espaces libres du béton (pores, fissures, interfaces pate-granulats) à partir de la solution interstitielle ou à la faveur de percolation d'eau dans le matériau poreux ou fissuré, et ne présente généralement pas de caractère expansif. En revanche, l'ettringite de formation secondaire consécutive à un apport externe ou interne de sulfates, est susceptible de générer des gonflements internes principalement attribués aux pressions de cristallisation. Contrairement aux faciès non expansifs, cette ettringite pathologique cristallise sous une forme massive et comprimée. [31]

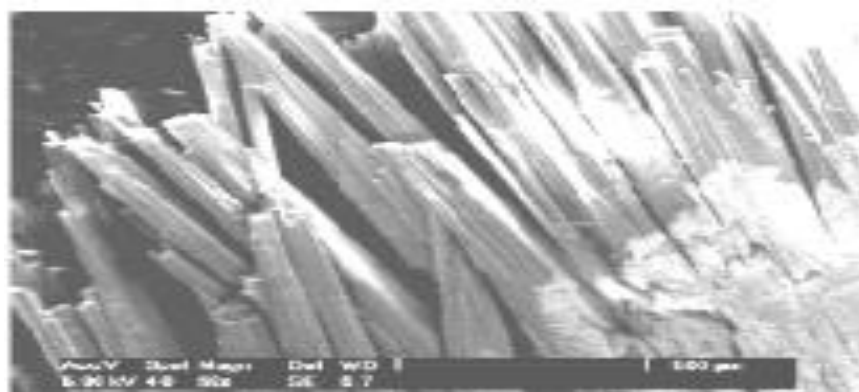


Figure 2.4.: La formation de l'ettringite secondaire.

4.2.4. Mécanisme d'attaque par les sulfates :

Le schéma suivant résume les différentes étapes de l'attaque sulfatique.

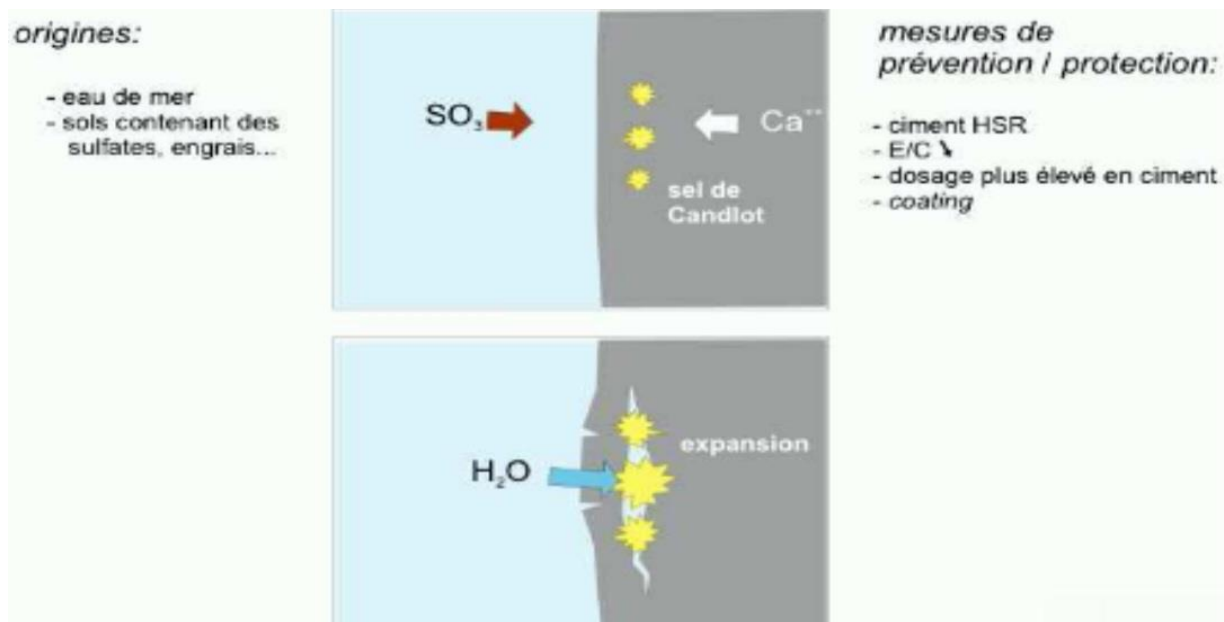


Figure 2.5. : L'attaque par les sulfates. [30]

Les sulfates peuvent détériorer le béton selon deux mécanismes physico-chimiques :

- Expansion.
- Perte des propriétés liantes des C-S-H.

Les aluminates et la portlandite sont les deux produits les plus sensibles à l'attaque par les sulfates.

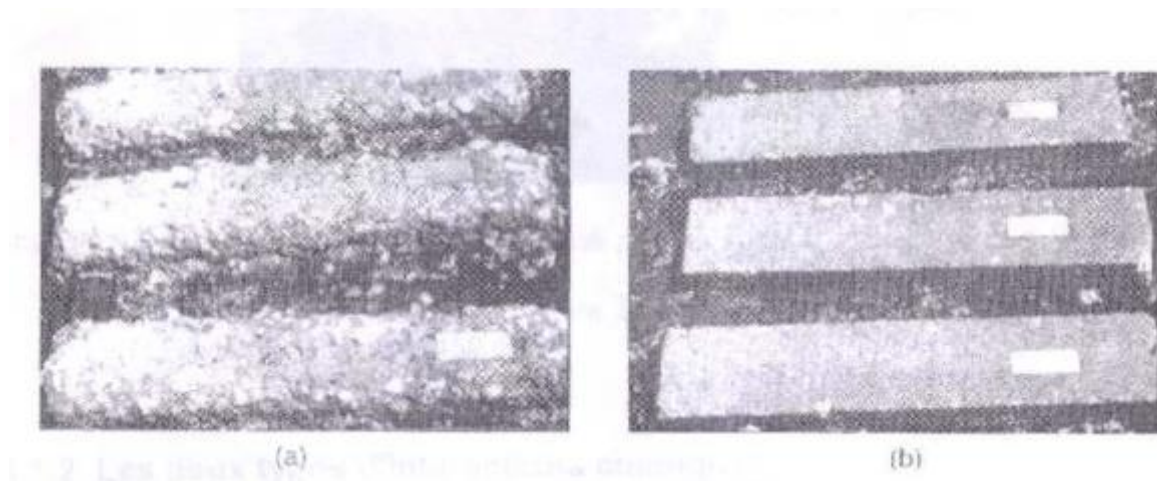


Figure 2.6. : Eprouvette de béton dégradé après 5ans de contact avec des sols riches en sulfates.

4.2.5 les conséquences du gonflement lié à l'ettringite :

Les désordres consécutifs aux pressions de gonflement liées à la formation d'ettringite correspondent à des phénomènes de fissuration multidirectionnelle. Cette fissuration peut diminuer la capacité portante des

ouvrages. Il convient néanmoins de souligner que dans le cas des attaques sulfatiques externes, liées à la présence d'une source de sulfates dans le milieu environnant, la dégradation s'effectue progressivement du parement vers le cœur des éléments en béton.

En revanche, dans le cas d'une formation d'ettringite liée à une source interne de sulfates (ettringite différée ou réserve excessive en sulfates dans les constituants du béton), la dégradation affecte la masse des éléments en béton (réaction de gonflement interne), conduisant ainsi à des désordres plus préoccupants et plus sévères. Enfin, les désordres sur ouvrages peuvent, d'une part, apparaître au bout de quelques mois ou de quelques années en fonction du contexte environnant (apport de sulfates, conditions d'humidité, nature des ciments...). Et, d'autre part, la présence d'une fissuration en parement est susceptible d'accélérer l'apparition et d'autres phénomènes pathologiques tels que la corrosion des armatures.[32]

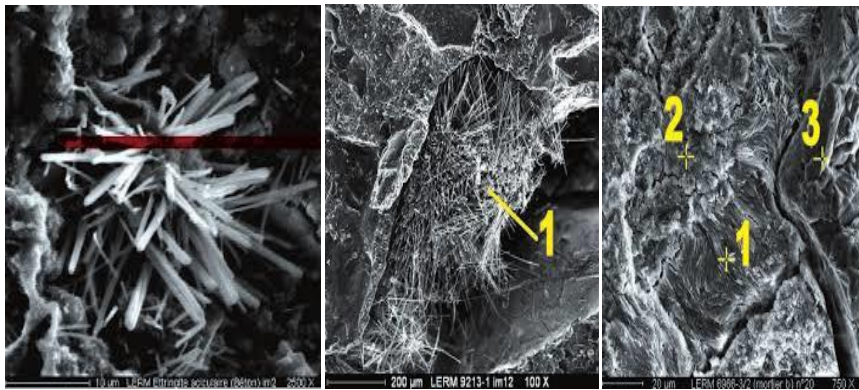
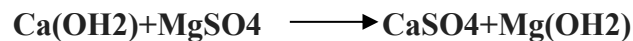
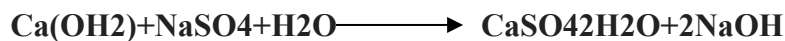


Figure 2.7.: Ettringite primaire non expansive dans la pâte de ciment, vue au microscope électronique à balayage.

Ettringite secondaire non expansive dans un pore (1), vue au microscope électronique à balayage.

Ettringite expansive (1 et 2) au contact d'un granulat (3), vue au microscope électronique à balayage.

4.2.6. Reaction chimique ($\text{MgSO}_4, \text{NaSO}_4$) :



4.3. Attaque par les acides :

4.3.1 Définition :

Les attaques acides se font principalement suivant un mécanisme de dissolution.

Suivant le cas, le phénomène de dissolution peut être accompagné de la précipitation du sel formé lors de la réaction base + acide si le sel est peu soluble. Ce sel peut avoir un effet colmatant et ralentir les réactions de dissolution.

Le produit final de dégradation par un acide peut-être un gel de silice résultant de la décalcification totale des C-S-H qui, selon Grube et al [33], peut avoir un rôle protecteur à la surface du béton et ralentir les réactions. Ces auteurs insistent également sur le fait que les conditions de transport de l'agent agressif sont plus importantes que sa concentration.



Figure 2.8. : La détérioration des silos-tours en béton due à l'attaque des acides d'ensilage.

(Photo offerte par : Thomas P. Rylett Ltd., ingénieur-conseil en structures).

4.3.2 Mécanisme d'attaque par les acides :

Le béton est très alcalin en nature, il est extrêmement susceptible à l'attaque de l'acide. Le mécanisme pour ce processus est très simple. De façon générale, les réactions chimiques et/ou l'élimination physique n'endommage qu'un ou deux composants de la pâte de ciment. Le tableau 2.1. mentionne les composants du béton menacés par la corrosion [34] .

Composants du béton	Désignation	Formule chimique
Pâte de ciment	Hydroxyde de calcium (CH)	Ca(OH)_2
	Silicate de calcium hydraté (CSH)	$3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$
	Aluminate de calcium hydraté	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
	Aluminate de calcium ferrique hydraté	$6\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$
Granulats	Calcaire (Carbonate de calcium)	CaCO_3
	Dolomite	$\text{CaMg(CO}_3)_2$
	Grès amorphe	$\text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$

Tableau 2.1. : Composants du béton menacés par la corrosion.

On distingue deux types de détérioration :

i- L'agression résolvante ;

ii- Le gonflement.

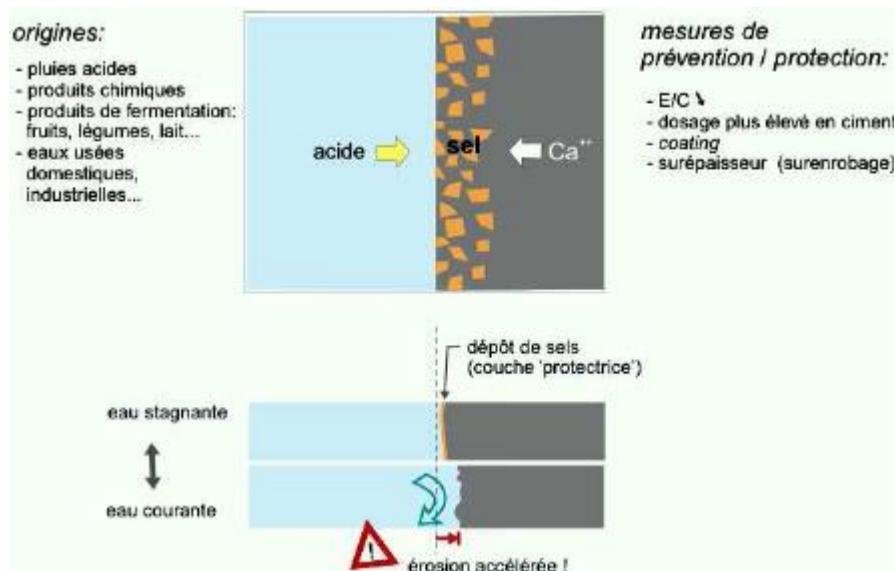


Figure 2.9.: L'attaque par les acides. [30]

4.3.3. Conséquence

La solubilité du sel formé ; La dissolution des CSH, dans les cas les plus avancés de l'attaque par l'acide, peut endommager considérablement le béton.

L'attaque acide provoque une neutralisation des composés basiques du béton, notamment la portlandite (Ca(OH)_2) et le C-S-H (calcium silicate hydrate). [35]

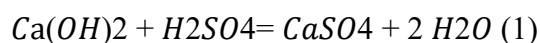
Perte de résistance, Diminution significative de la résistance mécanique à cause de la dissolution des liants.

Le béton devient plus poreux et perméable, facilitant la pénétration d'autres agents agressifs.

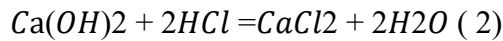
- Raccourcissement de la durée de vie de l'ouvrage
- Augmentation des coûts d'entretien et de réparation
- Risque de perte de fonctionnalité ou d'effondrement

4.3.4. Réaction chimique (H_2SO_4 , Hcl):

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 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 ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$) 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.2 décrit la réaction entre l'acide chlorhydrique et la portlandite.



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 caciques, aluminiques ou ferriques, ainsi que des acides siliciques colloïdaux (gels de silice).

5. Paramètre influant le comportement de béton face aux agressions chimiques

5.1. Composition de béton ;

Voici les paramètres liés à la composition du béton qui influencent fortement son comportement face aux agressions chimiques (sulfates, chlorures, acides, carbonatation, etc.) :

Rapport Eau/Ciment (E/C)

Un rapport E/C élevé augmente la porosité capillaire, facilitant la pénétration des agents agressifs.

Type de ciment

Certains ciments sont plus résistants chimiquement que d'autres :

CEM III (ciment au laitier) : bonne résistance aux sulfates.

CEM V (ciment composé) : bon comportement en milieu agressif.

CEM I (ciment Portland) : sensible si utilisé seul dans les milieux agressifs.

• Utilisation d'ajouts minéraux

Cendres volantes, laitier de haut-fourneau, fumée de silice : Réduisent la porosité.

Améliorent la résistance chimique du béton (moins d'hydroxydes libres, moins de perméabilité).

Dosage en ciment

Un dosage trop faible peut compromettre la compacité et la résistance chimique.

Un dosage trop élevé peut favoriser la fissuration (chaleur d'hydratation).

Nature des granulats

Granulats siliceux ou calcaires stables sont préférés.

Les granulats réactifs (ex : silice réactive) peuvent provoquer des réactions alcali-silice.

Adjuvants

Certains superplastifiants permettent de réduire l'eau sans augmenter le rapport E/C.

Des adjuvants hydrofuges ou inhibiteurs de corrosion peuvent renforcer la résistance à certains agents chimiques.

Compacité et granulométrie

Une formulation bien granulaire (avec un bon enrobage de pâte) limite la porosité et améliore la densité du béton. *[36]*

5.2. Propriété de transfert :

Voici les facteurs liés aux propriétés de transfert dans le béton, qui influencent directement son comportement face aux agressions chimiques (pénétration des chlorures, carbonatation, sulfates, etc.) :

Perméabilité : Capacité du béton à laisser passer des fluides sous pression.

Plus la perméabilité est élevée, plus les agents chimiques peuvent pénétrer en profondeur.

Porosité totale et porosité capillaire : Volume de vides dans la matrice cimentaire.

La porosité capillaire favorise le transport d'eau et d'ions agressifs.

Diffusivité : Capacité des ions (ex. : chlorures) à diffuser dans le béton en l'absence de pression.

La diffusivité ionique élevée accélère la corrosion des armatures.

Capillarité (absorption capillaire): Capacité du béton à absorber l'eau par action capillaire.

Facilite l'acheminement d'agents chimiques même sans pression externe.

Conductivité électrique : Mesure indirecte de la facilité de circulation des ions.

Plus elle est élevée, plus le béton est vulnérable à la corrosion (courants électrochimiques facilités).
[37]

5.3. Facteur lié à l'environnement :

PH du milieu :

Le pH de l'environnement est un facteur déterminant. Le béton est naturellement basique (pH ~12-13), et lorsqu'il est exposé à un milieu acide (pH < 5.5), ses constituants (comme la portlandite et le C-S-H) commencent à se dissoudre. Plus le pH est bas, plus la réaction est rapide et destructrice.

Type d'agent chimique

Tous les acides n'ont pas la même agressivité. Par exemple, l'acide sulfurique (H_2SO_4) non seulement dissout les constituants du béton, mais réagit avec le calcium pour former du gypse ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), qui est expansif et destructurant. L'acide chlorhydrique (HCl) dissout rapidement la chaux mais ne forme pas de produits

expansifs.

Concentration de l'agent agressif

Un agent chimique très concentré accélère la vitesse d'attaque. À l'inverse, une solution diluée aura un effet plus lent. Toutefois, même une faible concentration peut avoir un effet cumulatif sur le long terme, surtout si elle est renouvelée régulièrement.

Température ambiante

La température influe directement sur la cinétique des réactions chimiques. Une température plus élevée favorise l'attaque acide en accélérant la dissolution des produits cimentaires et en augmentant la mobilité ionique.

Humidité et présence d'eau

L'eau est un vecteur essentiel pour les acides. Elle facilite le transport des ions H^+ à travers les pores du béton et permet également la lixiviation des produits dissous. De plus, les cycles d'humidité (alternance sec/humide) provoquent des microfissures et favorisent l'infiltration acide.

Mouvement ou renouvellement de la solution acide

Si le liquide agressif est en mouvement (comme dans les canalisations ou stations d'épuration), les produits de dégradation sont évacués, empêchant la saturation du milieu. Cela permet à l'acide de continuer à attaquer le béton. Un liquide statique provoque une saturation qui ralentit la réaction.

Durée d'exposition

La durée pendant laquelle le béton est exposé aux agents chimiques est un facteur critique. Plus cette exposition est longue, plus les dommages sont importants.

Présence de sels dissous

Les sels tels que les chlorures, les nitrates et les sulfates peuvent interagir avec le béton, augmentant sa dégradation. Par exemple, les sulfates réagissent avec l'aluminat du ciment pour former de l'ettringite, un produit expansif qui fissure le béton.

Effets combinés

Dans les environnements réels, plusieurs de ces facteurs sont souvent présents en même temps (ex. : acide + humidité + température + sels), ce qui entraîne une dégradation plus rapide et plus complexe du béton. [38]

6. effet des additions et des adjuvants sur le comportement du béton dans les milieux agressifs :

Diminuer le coût des constructions en béton.

Donner au béton certaines caractéristiques plus efficacement que par d'autres moyens.

Assurer la qualité du béton durant le malaxage, le transport, la mise en place et la cure dans des conditions météorologiques défavorables.

Obéir à certaines urgences durant le bétonnage.

D'après leur composition, les ajouts minéraux contiennent principalement de la silice amorphe qui réagit activement avec l'hydroxyde de calcium qui se forme lors de l'hydratation des minéraux faisant partie du clinker. Le rapport entre le clinker et l'adjuvant hydraulique (ajout minéral) est établi en fonction de l'activité de l'adjuvant et de la composition minéralogique du clinker.

Par leur finesse et par leur réactivité plus ou moins importante en présence du ciment, les additions minérales engendrent des modifications significatives sur les propriétés des matériaux cimentaires à l'état frais et durci. À l'état frais, la présence des additions minérales modifie la structure du squelette granulaire et les frictions entre les composants solides dans la phase liquide. Au cours de la prise et du durcissement, les particules des additions interagissent dans le processus d'hydratation du ciment en modifiant la structure des produits hydratés et pour certaines peuvent réagir chimiquement en milieu cimentaire pour former de nouveaux produits hydratés qui présentent un caractère liant supplémentaire [39].

7.Précautions à prendre contre les attaques :

Les attaques chimiques sont l'une des principales causes de dégradation du béton, notamment dans les environnements agressifs (stations d'épuration, industries chimiques, milieux marins, etc.).

Voici les principales précautions à prendre pour prévenir ces attaques :

Pour éviter une attaque due aux sulfates, on fera les choix suivants :

- Utiliser un ciment HSR (High Sulfate Resisting). Un ciment CEM I HSR (ciment Portland à haute résistance aux sulfates) donne un béton avec une teneur en aluminates de calcium fort réduite.

- Réaliser une perméabilité limitée. Selon la teneur en sulfates à laquelle le béton est exposé, il faut respecter des valeurs minimales pour la teneur en ciment et maximales pour le rapport eau/ciment. [40]

Assurer une distance de 30 mm entre les armatures et les faces du béton. Les dernières normes en la matière le stipule très clairement.

Pour des ouvrages particuliers en milieux très exposés, il est possible d'utiliser des armatures zinguées, revêtues de composés époxydiques ou en acier inoxydable. [41]

D'autres solutions innovantes de remplacement apparaissent : par exemple utilisation de plaques d'acier frettant l'élément endommagé, de feuilles de polymères renforcés de fibres de carbone. [42]

L'incorporation, aux ciments ou aux bétons, d'additions minérales (laitiers de haut-fourneau, cendres silico-alumineuses, fumées de silice, pouzzolanes) qui abaissent la teneur en chaux et sont favorables à l'accroissement de compacité du matériau. [42]

Des conclusions semblables ont été avancées par De Bélie et al. [43], [44] qui classent la résistance des ciments aux attaques par les acides lactique et acétique dans l'ordre suivant, du plus résistant au moins résistant : ciment au laitier de haut-fourneau, ciment aux cendres volantes, ciment Portland ordinaire et ciment Portland sans C_3A .

Cependant, il convient de faire attention au choix des critères de durabilité utilisés pour qualifier un matériau ou un liant (profondeur dégradée, perte relative de masse, taux de dissolution des éléments chimiques...) car cela peut conduire à des classements différents en termes de performances.

Par ailleurs, les études réalisées par Monteny et al. Ont montré l'effet bénéfique de l'addition d'un polymère de type ester styrène-acrylique sur la tenue des bétons soumis à l'acide sulfurique d'origine biogénique.

La mise en œuvre de béton de haute compacité, susceptible de ralentir de manière importante le transport des acides au sein du béton, constitue également une bonne mesure de protection.

Toutefois, en cas de risque d'attaque très sévère, il peut être nécessaire d'appliquer une protection supplémentaire, les phénomènes de dissolution et d'érosion superficielle ne pouvant être évités. [42]

8.Effets des attaques chimiques sur :

8.1.la résistance du béton

Les agents chimiques agressifs altèrent la microstructure du béton, en particulier la pâte de ciment, ce qui entraîne :

Réduction de la résistance à la compression

La dégradation des produits hydratés du ciment (principalement les CSH et la portlandite) affaiblit la matrice. [45]

Exemple : une perte de 20 à 50 % de résistance à la compression a été mesurée dans des environnements sulfatés ou acides après quelques mois d'exposition

Microfissuration et gonflement : Certaines réactions, comme la formation d'ettringite dans les attaques sulfatées, provoquent expansion et fissuration, aggravant la perte de résistance.

8.2.sur la perte de masse

Dissolution des composés cimentaires : Les acides forts (H_2SO_4 , HCl) dissolvent la portlandite et les CSH, provoquant une érosion progressive de la surface.

Perte de masse mesurable : En conditions de laboratoire, on observe des pertes de masse allant de 1 à 10 % selon :

Le type d'attaque (acide, sulfatique, etc.), La durée d'exposition, Le rapport E/C et la porosité du béton. [46]

9.Conclusion

Le béton est un système chimique fortement basique, évolutif, plus ou moins réactif au contact du milieu extérieur souvent plus « acide » (atmosphère, eaux, solutions salines, acides) mais CHAPITRE II : la durabilité du béton vis-à-vis des environnements chimiquement agressifs 67 qui, pour les durées de vie prévues par les normes, est durable s'il est fabriqué conformément aux règles de l'art. Pour les milieux chimiquement agressifs, le vecteur commun à tous les agents agressifs est l'eau qui dissout les composés gazeux ou solides. Le transport des substances agressives se fait essentiellement par perméation et par diffusion, indicateurs majeurs de durabilité dépendant de la compacité du béton. De manière synoptique, les différents paramètres de la durabilité chimique sont : – les paramètres liés au matériau : chimie et minéralogie du ciment (type de constituants, Ca(OH)_2 potentiel, C3A, C3S...), formulation et propriétés de transfert du béton (compacité) – les paramètres liés à l'environnement : nature physique (solide, liquide, gaz) et chimique (acide, base, sel) de l'agent agressif, conditions climatiques générales et locales (immersion, semi-immersion, marnage, aérien, H.R., t° , cycles, mobilité) ; – les paramètres liés à la structure : contraintes de fonctionnement (charges, fatigue), fissuration. Pour la plupart des agressions chimiques, l'utilisation d'additions minérales consommatrices de chaux (laitier, cendres silico-alumineuses, fumées de silice, pouzzolanes), et productrices de C-S-H de rapport CaO/SiO_2 plus faibles, contribue à améliorer la tenue des bétons. Toutefois, il convient d'adapter la formulation au cas par cas et par partie d'ouvrage pour prendre en compte la spécificité de l'agression

Chapitre III. Généralité sur le Recyclage des déchets

1.introduction:

Le recyclage est une méthode de traitement des déchets industriels et des déchets ménagers qui admet de réintroduire, dans le cycle de production d'un produit, des matériaux qui le composent. Le recyclage a deux conséquences écologiques majeures : la réduction du volume de déchets et la préservation des ressources naturelles. Certains procédés sont simples et bon marché mais, à l'inverse, d'autres sont complexes, coûteux et peu rentables.

- Le recyclage est une activité importante de l'économie et des conditions de vie des pays étendus. - Le recyclage s'inscrit dans la stratégie de traitement des déchets dite des **trois R** :

- **Réduire**, qui regroupe tout ce qui concerne la réduction de la production de déchets.
- **Réutiliser**, qui regroupe les méthodes admettant de donner produit usé un nouvel usage.
- **Recycler**, qui désigne le procédé de traitement des déchets par recyclage.

- Le recyclage apporte une contribution importante à la baisse des quantités de déchets à éliminer par enfouissement et par incinération, mais il n'est pas suffisant pour contrer l'augmentation de la production des déchets ou y suffit à peine.

- Pour lutter contre l'augmentation des déchets, le recyclage est donc nécessaire, mais il doit être inclus dans une démarche plus large.

Déchets ménagers et assimilés (DMA) .

Tout déchet produit par des ménages (OM) ainsi que les déchets similaires provenant des activités industrielles, artisanales et commerciales, des écoles, des services publics, du secteur tertiaire, des hôpitaux et autres qui, par leur nature et leur composition, sont assimilables aux déchets ménagers. À l'échelle mondiale, environ un tiers de la nourriture que nous produisons pour la consommation est perdu ou gaspillé quelque part le long de la chaîne alimentaire. Dans les pays industrialisés, plus de 40% des aliments sont gaspillés au stade de la vente et aussi par le consommateur, d'où un énorme gaspillage de ressources précieuses qui s'accompagne également de pollutions environnementales. [47]



Figure1 : Déchets ménagers

Déchets encombrants

Tous les déchets issus des ménages qui, en raison de leur caractère volumineux, ne peuvent être collectés dans les mêmes conditions que les DMA. On y trouve les équipements ménagers usagés (électroménager, vieux meubles et literie, textiles et vêtements, gros cartons, vélos.....), les déblais, les gravats, les déchets verts (espace aménagé, gardienné, clôture). Cela peut être aussi des déchets de chantier : bâtiment (bois, matières plastiques, métaux, briques, béton, tuiles), génie civil (asphalte, revêtements routiers et matériaux d'excavation) ou divers tels que les déchets d'origine animale, voiture usagées, batteries d'automobiles ; déchets électroniques). [47]



Figure2: déchets encombrants

Déchets spéciaux

Tous les déchets issus des activités industrielles, agricoles, de soins, de services et toute autre activité qui en raison de leur nature et de la composition des matières qu'ils contiennent ne peuvent être collectés, transportés dans les mêmes conditions que les DMA. Ils sont appelés aussi toxiques, ces déchets présentent un risque physique, biologique et un risque environnemental. Le traitement de ces déchets nécessite des installations adaptées car leur élimination demande des précautions particulières pour la protection de l'environnement. Par ailleurs, l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) a défini les déchets dangereux comme "des substances ayant des caractéristiques physiques, chimiques ou biologiques imposant des procédés de manipulation et d'évacuation éliminant les risques sanitaires et/ou d'autres effets nocifs sur l'environnement. Bien que plusieurs initiatives existent pour la collecte séparée des déchets spéciaux des ménages, certains déchets spéciaux sont généralement égarés et sont gérés avec les déchets ménagers résiduels. Les déchets spéciaux sont parfois collectés en tant que déchets résiduels, et le tout est incinéré. Les conséquences environnementales des déchets spéciaux des ménages égarés sont relativement inconnues. Astrup et al. ont mené des essais sur l'effet de l'incinération des déchets de batterie et ont constaté que les batteries entraînaient une augmentation du mercure (Hg) et du cadmium (Cd) dans les gaz de combustion, ainsi qu'une augmentation du nickel (Ni) et du soufre (S) dans les résidus solides. Dans notre pays, le transport des déchets spéciaux dangereux est soumis à l'autorisation du ministre chargé de l'environnement après avis du ministre chargé des transports. [48]



Figure3: déchets spéciaux organiser

Déchets des activités de soins

Tout déchet issu des activités de diagnostic, de suivi et de traitement préventif ou curatif, dans les domaines de la médecine humaine et vétérinaire. Ces déchets sont classés comme des déchets dangereux et doivent être séparés des autres déchets. Les déchets générés par l'amélioration des soins aux patients ont posé un grave problème, un défi au monde entier. Aujourd'hui, le défi de l'élimination des déchets de soins d'une manière écologiquement, socialement et économiquement durable est devenu encore plus compliqué avec des déchets hautement infectieux provenant de patients atteints de Covid- 19. En effet, la pandémie de la Covid-19 a exercé une pression extrêmement élevée sur les mouvements des équipements chirurgicaux due aux perturbations de la chaîne d'approvisionnement et au recul des activités d'élimination et de recyclage. [48]



Figure 4: déchet des activités de soins

Les déchets agricoles

Le secteur agricole dispose de ressources considérables pour fournir des matériaux d'origine végétale. En effet, divers matériaux ont été appliqués avec succès dans la confection des composites tels que les copeaux de bois, les déchets de menuiserie, la coque de palmier, la coque de noix de coco, le bambou, etc. Plus récemment, la coque d'abricot et de pêche ont été utilisées pour le béton léger d'origine biologique. La pêche est un fruit originaire de Chine, elle est largement cultivée dans le monde, principalement en Chine, en Italie, en Grèce, en Espagne et aux États-Unis. L'abricot est également l'un des principaux fruits au monde. En 2017, la superficie de plantation d'abricotiers dans le monde était d'environ $5,4 \times 10^5$ ha, avec une production annuelle d'environ $4,26 \times 10^6$ tonnes [Wennberg A]. En dehors de leur consommation comme fruits, la plupart des pêches et des abricots sont transformés en jus en conserves, etc. Par conséquent, les coques de pêche et d'abricot sont utilisées dans la fabrication du béton léger en raison de leur légèreté et de leur rigidité. D'autres déchets comme le liège ont suscité beaucoup d'intérêt pour la production de matériaux composites isolants. [49]



Figure 5: déchet agricole

Déchets inertes :

L'exploitation continue de diverses ressources naturelles pour la construction conduit à la génération de millions de tonnes de déchets de construction et de démolition chaque année. Ces déchets sont généralement définis comme des déchets solides inertes. Ils sont classés inertes lorsqu'ils ne peuvent pas subir de transformations importantes, physiquement, chimiquement ou biologiquement. La définition précédente des déchets inertes est conforme à la loi Algérienne du 15 décembre 2001. Ces déchets se composent principalement de terre, de pierres et de galets, de béton, de briques, de bois, de matériaux de toiture,...etc. Les principaux travaux responsables de l'augmentation de la quantité des déchets de construction et de démolition sont la rénovation, la nouvelle construction, la démolition des anciennes structures, l'élargissement des routes et la reconstruction du réseau de transport. Ces différents secteurs dégagent des quantités importantes. A titre d'exemple, aux Etats-Unis, environ 136 106 tonnes de débris de construction et de démolition liés au bâtiment sont générées sur lesquelles 20% à 30% seulement sont recyclés chaque année. Ces déchets composés principalement de béton, de maçonnerie, de calcaire, de grès, de métal, de bois, etc. peuvent varier selon le type de construction. Ces types de déchets peuvent affecter la santé publique et l'environnement en raison de la présence d'autres polluants secondaires qui sont pour la plupart toxiques comme les métaux lourds. Par conséquent, il y a lieu de recycler ces déchets. En effet, on peut trouver plusieurs utilisations comme du béton à base de déchets de briques ou la production de blocs de ciment en utilisant du béton en poudre, ou bien encore des bétons verts en utilisant des granulats en céramique. Ce béton présente des caractéristiques mécaniques similaires à celles du béton ordinaire. En raison de la disponibilité des ressources de déchets, le potentiel de réutilisation et de recyclage de ces résidus est élevé. Afin de mettre fin aux décharges anarchiques et illicites en Algérie, la loi relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets interdit le dépôt, le rejet et l'abandon des déchets inertes sur tout site non désigné à cet effet et notamment sur la voie publique. Le générateur des déchets doit prendre en charge la collecte, le tri, le transport et la mise en décharge de ces déchets inertes.

Quant aux déchets urbains, ils couvrent les DMA et les déchets que la collectivité collecte tels que les boues de station d'épuration, les matières de vidange, les déchets d'espaces verts, les résidus de nettoyage des rues, les papiers divers des locaux administratifs....etc. Les déchets plastiques, les papiers-cartons, les textiles, le bois non traité, les métaux, les verres et matières organiques appartiennent, en général, à la catégorie des déchets banals (non dangereux) qui sont des déchets non inertes et non dangereux que produisent aussi bien les ménages que les entreprises.[50]



Figure6 : Déchets inertes

Valorisation des déchets industriels dans la fabrication des ciments :

L'utilisation des déchets industriels en béton est très répandue pour réduire au minimum l'impact des activités humaines sur l'environnement et la planète et ainsi réduire considérablement la consommation d'énergie et par conséquent, le coût de la fabrication et l'émission de CO₂. La réutilisation des déchets inorganiques générés par l'industrie tels que le laitier de haut fourneau, la fumée de silice et la cendre volante est la meilleure dans la fabrication du ciment et du béton vert. En effet, les résultats montrent que l'introduction des cendres volantes augmente la résistance à la pénétration de chlorure comparé au béton ordinaire [50].

3. Recyclage et présentation des déchets :

3.1. Technique de recyclage de déchets :

Il existe trois grandes familles de technologies de recyclage chimique, mécanique et organique.

Le recyclage chimique utilise une réaction chimique pour traiter les déchets, par exemple pour séparer certains composants. Le mécanisme de recyclage est le traitement des chutes de machines. Recyclage organique, après compostage ou fermentation, pour produire des engrais et des carburants comme le biogaz. [51]

A l'économie locale. Cependant, pour que le recyclage fonctionne de manière efficace, il est essentiel que chacun d'entre nous fasse sa part en triant correctement les déchets et en les déposant dans les bacs de collecte appropriés. Enfin, il est important de souligner que le recyclage doit être considéré comme une solution de dernier recours, après la réduction et la réutilisation. En diminuant notre consommation et en optant pour des produits durables

3.2. Gestion des déchets :

La gestion des déchets concerne tous les types de déchets, qu'ils soient solides, liquides ou gazeux, et chacun a sa propre filière. Les méthodes de gestion des déchets diffèrent selon que vous vous trouvez dans un pays développé ou en développement.

La gestion des déchets non toxiques des particuliers ou des collectivités des agglomérations relève généralement de la responsabilité des collectivités locales, tandis que la gestion des déchets commerciaux et industriels relève de leur propre responsabilité. [52]

3.3. Préparation des déchets :

1. **Collecte de déchets :** les opérations de recyclage des déchets commencent par la collecte des déchets. Dans les pays développés, les ordures ménagères sont généralement incinérées ou enfouies en centres d'enfouissement pour déchets non dangereux. Les déchets collectés pour le recyclage ne sont pas destinés à l'enfouissement ni à l'incinération, mais à la transformation. La collecte s'organise en conséquence. La collecte sélective, dite aussi « séparative » et souvent appelée à tort « tri sélectif »^[e], est la forme la plus répandue pour les déchets à recycler. Le principe de la collecte sélective est le suivant : celui qui jette le déchet le trie lui-même. La taxe au sac est un bon moyen pour inciter les personnes au tri sélectif, car seuls les déchets non recyclables finissent en général dans ces sacs taxés, les déchets recyclables étant, eux, déposés dans des lieux où il n'y a pas de taxe. À la suite de la collecte, les déchets, triés ou non, sont envoyés dans un centre de tri où différentes opérations mécanisées permettent de les trier de manière à optimiser les opérations de transformation. Un tri manuel,

par des opérateurs devant un tapis roulant, complète souvent ces opérations automatiques. Avant ce stade, le verre brisé est systématiquement écarté pour éviter les risques de blessure ;

2. **Transformation** : une fois triés, les déchets sont pris en charge par les usines de transformation. Ils sont intégrés dans la chaîne de transformation qui leur est spécifique. Ils entrent dans la chaîne sous forme de déchets et en sortent sous forme de matière prête à l'emploi ;
3. **Commercialisation et conservation** : une fois transformées, les matières premières issues du recyclage sont utilisées pour la fabrication de produits neufs qui seront à leur tour proposés aux consommateurs.

3.4. Classification des déchets :

Classification selon le producteur du déchet

Les déchets peuvent être divisés en deux classes :

- Les « **déchets ménagers** », dont le producteur initial est un ménage ;
- Les « **déchets d'activités économiques** » (DAE), dont le producteur initial n'est pas un ménage.

Classification selon les propriétés du déchet

Les déchets peuvent être divisés en trois catégories :

- Les **déchets dangereux** (DD) : ils s'agissent des déchets qui présentent une ou plusieurs des 15 propriétés de danger définies au niveau européen : inflammables, toxiques, dangereux pour l'environnement... Les déchets dangereux font l'objet de règles de gestion particulières en raison des risques particuliers d'impact environnemental et sanitaire associés à leur manipulation.
- Les **déchets non dangereux** (DND) : il s'agit de déchets qui ne présentent aucune des 15 propriétés de danger définies au niveau européen. Les règles de gestion sont plus souples que pour les déchets dangereux. Il s'agit par exemple de biodéchets, de déchets de verre ou de plastique, de bois, etc.
- Les **déchets non dangereux inertes** : parmi les déchets non dangereux, ce sont des déchets qui ne subissent aucune modification physique, chimique ou biologique importante, qui ne se décomposent pas, ne brûlent pas, ne produisent aucune réaction physique ou chimique, ne sont pas biodégradables et ne détériorent pas les matières avec lesquelles ils entrent en contact d'une manière susceptible d'entraîner des atteintes à l'environnement ou à la santé humaine. Il s'agit en majorité de déchets provenant du secteur du bâtiment et des travaux publics (déchets de béton, de briques, de tuiles, etc.).

Classification selon le secteur de production

La « nomenclature des déchets » est une codification réglementaire établie au niveau européen qui permet d'identifier chaque type de déchet par un code à six chiffres faisant référence au secteur de production du déchet. Les déchets dangereux sont signalés par une étoile après le code.

La nomenclature des déchets est la référence en termes de classification des déchets. Le code du déchet issu de cette nomenclature est nécessaire dans tous les documents officiels de gestion de ce déchet.

4. incorporation des déchets dans la fabrication de ciment :

4.1. Le laitier de haut fourneau

Le laitier est un sous-produit des aciéries. Les industries métallurgiques génèrent environ 300 kg de laitier par tonne de fonte. Le refroidissement appliqué et le procédé de fabrication déterminent les variétés de laitier. Les variétés de laitier de haut fourneau dépendent essentiellement du refroidissement. Lorsque le laitier liquide est refroidi très lentement, on obtient un laitier rocheux (cristallisé). Ce matériau est ensuite arrosé pour obtenir un laitier cristallisé de masse volumique apparente de 1,2 à 1,4 t/m³. Ce déchet minéral possède une porosité variant de 3 à 20% due à l'oxydation du soufre. Par conséquent, la masse volumique absolue et la conductivité thermique du laitier sont plus faibles. Par comparaison, ce matériau présente une masse volumique et une

conductivité thermique inférieures à celles du calcaire et du granite. Le béton confectionné avec les granulats de laitier constitue un excellent isolant thermique. Le refroidissement du laitier liquide, suivi par une injection d'air et de vapeur d'eau, produit un laitier expansé de masse volumique apparente de l'ordre 0,3 à 1,1 t/m³. Ce procédé de fabrication du laitier génère une structure poreuse et, par conséquent, une faible conductivité thermique variant de 0,1 à 0,18 W/m.K et une faible résistance mécanique, variant de 1 à 8 MPa, à la compression. L'utilisation de ce matériau peut être bénéfique pour l'isolation thermique. Il existe aussi le laitier de haut fourneau vitrifié (granulé ou bouleté). Le laitier liquide est dirigé, après séparation avec la fonte, vers un dispositif dans lequel il va subir un refroidissement par arrosage violent et abondant d'eau sous haute pression (trempe) afin d'obtenir le laitier vitrifié ou granulé. Le laitier granulé doit présenter des propriétés hydrauliques latentes, c'est-à-dire qui se manifestent quand le laitier subit une activation convenable. La densité apparente de ce matériau est de l'ordre de 0,7 à 1,4 et sa densité absolue est de l'ordre de 2,6 à 2,8. Par contre, le laitier bouleté est obtenu par arrosage et exposition à l'air libre et prend une forme sphérique sous l'effet de tension superficielle. Cela produit un laitier bouleté, de granulométrie variant de 0-20 mm, de masse volumique absolue de 1,4 à 1,6 t/m³, avec une porosité de 45 à 50%. Ce matériau peut également améliorer les caractéristiques thermiques du béton par sa faible conductivité thermique qui tourne autour de 0,15 W/m.K. Ce déchet industriel a des propriétés hydrauliques, et son utilisation améliore l'ouvrabilité du béton frais et le rend plus plastique et de meilleure cohésion. Les caractéristiques de surface des grains de laitier, plus lisses, absorbent un peu d'eau au cours du malaxage. Le laitier granulé peut être broyé à la finesse désirée, mais habituellement à une finesse supérieure à 350 m²/kg, plus fine que celle du ciment Portland. Une augmentation de la finesse conduit à une augmentation de l'activité à jeune âge. Une étude réalisée par [montre que la surface spécifique de Blaine de 250 m²/kg à 500 m²/kg augmente la résistance du béton plus que du double. En ce qui concerne la prise du béton contenant du laitier, la présence du laitier conduit à un retard de prise variant entre 30 à 60 minutes ont également examiné l'évolution du temps de prise en fonction de la teneur en laitier. Ces auteurs ont pu montrer que l'augmentation du pourcentage du laitier a un effet retardateur sur le temps de prise et une diminution de la résistance initiale par rapport à celle du béton à base de ciment Portland. [53]

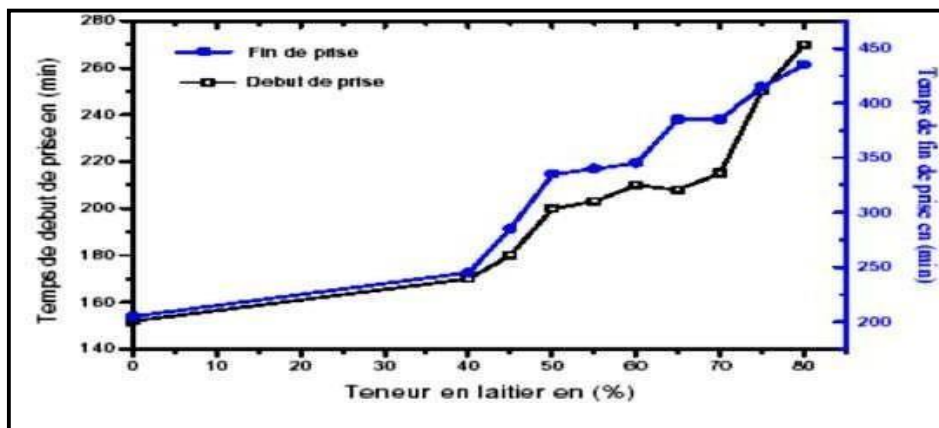


Figure7 : Temps de prise des ciments avec ajout du laitier [53]

La résistance du béton durci est influencée par le pourcentage de laitier. A moyen terme, pour obtenir une résistance élevée, le pourcentage du laitier à mettre en œuvre est de 50% de liant. La norme ACI 318-89 impose une limite de la teneur en laitier de 50% du total du liant. Lorsque le laitier et les cendres volantes sont ajoutés ensemble dans le béton, la masse totale de ces deux matériaux doit être limitée à 50% de la masse initiale du liant ; la limite de la teneur en cendres volantes étant de 25% [53] [Sivasundaram et Malhotra] ont présenté une étude où ils ont accrédité la possibilité d'utiliser des pourcentages de laitier plus importants variant entre 50 et 75%. Dans cette étude, les auteurs ont démontré une bonne évolution de la résistance du béton pour un dosage en liant compris entre 300 et

420 kg/m³. La résistance du béton à base de ciment et de laitier est également influencée par le mode de conservation. En effet, la conservation humide prolongée doit être importante en raison de la faible vitesse initiale d'hydratation qui provoque une perte d'eau dans le système des pores capillaires sous l'effet des conditions de séchage [Neville AM]. En ce qui concerne la perméabilité, les essais réalisés sur les mortiers à base de laitier de haut fourneau ont montré que ces derniers sont moins perméables à l'eau. L'utilisation du laitier de haut fourneau dans la confection des mortiers, selon Bakker, réduit fortement la diffusion des chlorures. À ce propos, on doit noter que, pour le béton ayant au moins 60% de teneur en laitier avec un rapport Eau/Ciment de 0,50, la diffusion de ce matériau exposé aux chlorures est au moins, 10 fois plus faible que dans le cas où le liant est constitué de ciment Portland. Par conséquent, la durabilité du béton contenant du laitier de haut fourneau est plus marquée que celle d'un béton confectionné avec du ciment Portland seul. En effet, l'incorporation du laitier a un effet bénéfique sur la microstructure. La pâte de ciment hydratée est plus dense, l'espace poreux étant rempli par des C-S-H par rapport à la pâte de ciment Portland seul. Par conséquent, la résistance aux sulfates de ce béton à long terme est particulièrement durable. [54]

4.2. La fumée de silice

La fumée de silice est un sous-produit d'industrie provient de la réduction du quartz de grande pureté du charbon dans des fours à arc électrique utilisés pour la fabrication de silicium et d'alliages de Ferro silicium. Ces particules sont sphériques très fines contenant une forte teneur en silice amorphe (SiO₂). La fumée de silice est aussi appelée micro- silice ou fumée de silice condensée, mais l'expression « fumée de silice » est plus utilisée. Les fumées de silices sont utilisées en remplacement du ciment. En général, la densité de la fumée de silice est de 2,20, mais elle est peu plus élevée lorsque la teneur en silice est plus faible. Le diamètre de la fumée de silice varie entre 0,03 et 0,3µm et habituellement le diamètre de ces particules fines est inférieur à 0,1µm. Par conséquent, la surface spécifique de la fumée de silice est plus élevée, elle est d'environ de 20 000 m²/kg. Cette surface spécifique ne peut pas être déterminée par la méthode de Blaine, elle est déterminée par la méthode d'absorption d'azote. La silice est très réactive et le raffinement des particules accélère la réaction avec l'hydroxyde de calcium engendrée par l'hydratation du ciment Portland. Les très petites particules des sphères permettent généralement de diminuer la perméabilité à l'air et à l'eau. Les propriétés du béton frais sont influencées par la présence de fumée de silice. En effet, les bétons contenant de la fumée de silice ont très peu de ressuage. En revanche, la diminution du ressuage peut provoquer le retrait plastique. Par ailleurs, ce béton peut être facilement pompé et bétonné sous l'eau, il peut être utilisé comme un béton fluide. L'incorporation de la fumée de silice augmente la résistance du béton durci jusqu'à environ 7 jours (jeune âge). En effet, la fumée de silice agit comme un filler qui améliore l'interface avec les granulats et particulièrement avec les gros granulats. Une augmentation de la résistance est également constatée, à long terme, avec un ciment contenant de la fumée de silice. En effet, la résistance augmente respectivement de 7 MPa et de 16 MPa avec une teneur de 10% et de 20% de fumée de silice. Le taux de remplacement optimal de la fumée de silice se situe aux environs de 10% de la masse totale du liant. La perméabilité de la pâte de ciment est réduite avec ce pourcentage et l'augmentation de ce pourcentage conduit à de faibles changements. [55]

4.3. Les cendres volantes :

Les cendres volantes sont des résidus nuisibles à l'environnement. Ce sont des particules minérales,

très fines et de forme sphérique, recueillies dans des installations de dépoussiérage de gaz de combustion des centrales thermiques alimentées au charbon. La finesse des cendres est très élevée, la surface spécifique de Blaine varie entre 250 et 600m²/kg. Par conséquent, les cendres volantes réagissent facilement avec l'hydroxyde de calcium et leur forme contribue à l'amélioration de la maniabilité. Il existe deux types de cendres volantes, les cendres volantes de classe F provenant de charbon bitumineux, principalement siliceuses et les cendres de classe C provenant des charbons et lignite sous-bitumineux. On a pu constater, lors de la substitution une partie du ciment Portland par de la cendre volante d'une teneur de 5 à 15%, dans la confection du béton, une réduction du besoin en eau, réduction autant plus importante pour un rapport Eau/Ciment plus élevé. La présence de cendres volantes dans un béton frais retarde la prise du béton d'environ une heure. Par conséquent, cela peut être avantageux par temps chaud. Les cendres volantes sont moins sensibles aux agents agressifs et ont la capacité de réagir avec la chaux libérée lors de l'hydratation du ciment Portland (réaction pouzzolanique). La présence de la cendre volante améliore également d'autres aspects des propriétés du béton : porosité capillaire plus fine et hydratation plus lente. De ce fait, un tel résidu présente des bénéfices forts intéressants qui méritent d'être évoqués [56]

5. Incorporation des déchets dans le béton :

5.1. Déchets de démolition :

Déchets de démolition Le béton constitue presque 75%, en poids de tous les matériaux de construction. Il s'ensuit donc que la plus grande partie de rebuts de démolition est constituée de béton. Par ailleurs, les sinistres (principalement les séismes) fournissent chaque année des millions de tonnes de débris de béton. Aujourd'hui, les producteurs de granulats recyclés ont une politique de sélection des matériaux de démolition. Ainsi, on distingue cinq catégories de matériaux de démolition en fonction de leur nature :

- 1) les bétons armés sans enduit ni plâtre,
- 2) les matériaux composés de briques, de tuiles, de graves, de pierres et de blocs rocheux, etc.
- 3) les matériaux mélangés avec une faible teneur en plâtre, bois, plastique, etc.
- 4) les mauvais matériaux avec une teneur en bois, plâtre, plastique : supérieure à 10%,
- 5) les autres matériaux n'entrant pas dans les catégories précédentes.



Figure 8: Déchets de démolition

5.2. Déchets de brique :

Déchets de briques Les déchets de briques sont issus de l'industrie des produits rouges. Ces produits comptent parmi les plus anciens matériaux de construction, ils sont des produits céramiques dont les

argiles sont la matière première et parfois des additifs. Les briques ont généralement une forme parallélépipède rectangle. Il existe deux types de briques : briques en terre crue et briques en terre cuite.[57].



Figure9 : Déchets de brique

6.Utilisation des déchets de brique pour la préparation du béton :

6.1. Présentation des déchets brique :

Déchets de briques : Les déchets de briques sont issus de l'industrie des produits rouges. Ces produits comptent parmi les plus anciens matériaux de construction, ils sont des produits céramiques dont les argiles sont la matière première et parfois des additifs. Les briques ont généralement une forme parallélépipède rectangle.

L'industrie des produits génèrent des quantités considérables de déchets. Selon les statistiques disponibles, la quantité de rebus dans cette industrie représente environ 10% de la production globale [58].

6.2. Gestion et préparation des déchets de brique :

Il existe peu d'informations disponibles sur le devenir des déchets de briques qui constituent la plus grande partie des déchets de démolition et de décombres. D'une part, techniquement, les déchets de briques sont pratiquement recyclés comme composant d'un matériau type maçonnerie. D'autre part, l'absence quasi-totale des textes réglementaires qui régissent la fabrication et l'utilisation des déchets de briques. La valorisation de la matière est un mode d'exploitation des déchets qui vise à leur mise en valeur afin de les réintroduire dans le circuit économique. Elle couvre le réemploi, la réutilisation, la régénération et le recyclage de la matière.[59].

6.3. Caractéristique du béton contenant les déchets de brique :

Déchets de brique comme granulats :

*L'utilisation du granulat grossier de brique concassée peut produire un béton de structure de haute résistance avec une économie de poids allant jusqu'à 15 % pour une diminution de quelques 20 % de la résistance, par rapport à un béton normal [60].

*Le béton contenant des granulats de brique concassée est plus perméable que le béton normal. Si les briques contiennent des sels solubles, il peut y avoir corrosion et efflorescence dans le béton [61].

*Pour le même niveau du béton (même résistance à la compression), la résistance à la traction est de 11% supérieure à ceux du béton normal [62].

* Pour les bétons de granulats de brique concassée, le rapport eau / ciment optimum est 0,55 ; bien que si la haute ouvrabilité est exigée, alors les mélanges puissent être faits avec un rapport eau / ciment jusqu'à 0,7 [60].

Déchets de brique comme poudre :

Les briques concassées sont utilisées largement, bien que largement usage, il n'y avait pas d'études systématique des différentes propriétés du béton de granulats de brique. Les différentes propriétés, de granulats ainsi que de béton de granulats de brique concassée, résultantes des recherches sont : La procédure de la reproduction de mélange pour bétons de granulats normal, peut être utilisée avec succès pour la production du béton de brique concassée. Le béton contenant de l'argile cuite comporte une résistance au feu beaucoup élevée que celle de béton à base de gravier naturel. Le béton contenant des granulats de brique concassée est plus perméable que le béton normal. Pour la même résistance à la compression, la résistance à la traction est de 11% supérieure à ceux du béton normal. La masse volumique apparente de béton de brique concassée varie de 2000 à 2080 kg/m³. Pour le béton à base de granulats de brique concassées, cette chute est plus importante. Elle est de l'ordre de 10 à 40%. Lorsque les granulats naturels sont remplacés par d mélange de granulats de béton et de briques concassées en même temps, la chute de résistance est en moyenne de 35 à 42%.



Figure10: Déchets de brique comme poudre

Conclusion :

Les déchets sont un vrai problème, inhérent à toute forme de vie biologique et à toute activité industrielle, agricole ou urbaine, et à ce titre, la recherche de solutions est une nécessité pour les sociétés. Les déchets sont par définition des « substances » et, en tant que tels, la biochimie physique, la mécanique et la chaleur sont principalement nécessaires pour les traiter. Les déchets ont la vie, souvent en mutation au cours de leur existence pour finir dans les poubelles et les décharges. Avec une telle diversité moléculaire, il est essentiel de trouver un moyen d'extraire les fractions valorisables ou d'en pallier les capacités délétères. Plusieurs types de déchets et sous-produits peuvent être utilisés comme groupes. Le laitier de haut fourneau et les cendres volantes sont déjà exploités commercialement. L'utilisation des différents déchets dépend de leur rentabilité opérationnelle et de leurs caractéristiques. De nombreux types de déchets peuvent ne pas être largement utilisables en raison de leurs propriétés physiques et chimiques variables. Dans cette étude, nous nous intéressons aux déchets de construction et de démolition et à leur utilisation comme granulats pour le béton

Chapitre IV : Programme expérimental

4.1. Introduction :

L'emploi judicieux des matériaux de construction exige la pré-connaissance de leurs diverses propriétés ; physiques et mécaniques, afin d'obtenir le meilleur choix répondant à leur destination. Les informations concernant les matériaux utilisés doivent être récoltées par des techniques fiables tout en préférant les essais normalisés. En plus, il est nécessaire que les matériaux soient malaxés correctement afin de produire un mélange homogène possédant par conséquent des propriétés uniformes. Nous avons utilisé des matériaux locaux, leurs caractéristiques sont étudiées expérimentalement au laboratoire de génie civil à L'université de Mohamed Boudiaf -M'sila. Nous avons analysé les caractéristiques des granulats fins recyclés et des granulats ordinaires entrant dans la composition des bétons. En effet, notre recherche a pour objet l'étude des caractéristiques du micro béton face aux agressions chimiques. Le micro béton a été confectionné en utilisant les déchets de brique concassé et broyé inférieur à 0.16 mm comme additions dans le béton avec des taux de (0%, 8%, 15%) par rapport au poids de ciment. Ce chapitre présente les caractéristiques des matériaux utilisés dans cette étude, ainsi que les différents essais expérimentaux réalisés pour caractériser nos bétons et les résultats obtenus. La formulation du béton a été basée sur la méthode de « Dreux-Gorisse »

4.1.1 Matériaux utilisés :

Un sable concassé (0/5).

⊗ Un gravier (3/8).

⊗ Le ciment : ciment portland NA 442/2013.GICA

⊗ Eau de gâchage : L'eau potable du Laboratoire de département de génie civil d'Universitaire Mohamed Boudiaf de M'sila.

⊗ L'adjuvant : (Super- plastifiant).

⊗ Déchets de brique (inférieur à 0.16 mm)

4.2. Caractéristiques des matériaux utilisés :

4.2.1 Le ciment :

Ciment Portland NA 442/2013 Le ciment utilisé dans notre étude est le CEM II 42.5 (GICA) de la Cimenterie Ain Touta Les propriétés physiques et chimiques ont été étudiées selon la norme algérienne (NA 442) et européenne (EN 197-1). Ces propriétés sont présentées d'après la fiche technique du ciment. [63]



Figure4.1. Ciment CEM42.5(GICA)

4.2.1.2. DOMAINE D'APPLICATION :

Béton étanche.

- ♣ Le béton résiste au gel en présence de sels de déglacage.
- ♣ Béton comprimé.
- ♣ Mortier.

4.2.1.2.1. Dosages :

Dosage moyen pour béton courant

- Conditionnement : Sac et Vrac
- Caractéristiques techniques

Analyses chimiques :

→ Teneur en sulfates (SO_3) • $< 2,5\%$

Teneur en Chlorures (Cl) • $< 0,1\%$

Teneur en (MgO) • $< 1\%$ Perte au feu (PAF): 0,5–1,5%

•Composition minéralogique du clinker (Selon BOGUE) :

$\text{C}_3\text{S} > 60 \pm 3\%$

$\text{C}_3\text{A}: 3 - 7,5 \%$

4.2.1.2.2. Propriétés physiques:

Consistance normale : 26 à 28%

Début de prise $\geq 60\text{min}$

Fin de prise : 200 à 350min

Expansion $< 5\text{mm}$

Finesse (SSB): 3200-3800 (Cm^2/g).

4.2.1. 3.. Résistance à la compression :

2 jours (EN 196-1) $\geq 10 \text{ Mpa}$

28 Ours (EN 196-1) ≥ 42.5 Mpa

4.2.2. Les granulats (naturels et recyclés) :

4.2.3 L'analyse granulométrique :

- But de l'essai :

L'analyse granulométrique a pour but de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différents grains constituant l'échantillon.

Principe de l'essai :

L'essai consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis un matériau en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes. Les dimensions de mailles et le nombre des tamis sont choisis en fonction de la nature de l'échantillon et de la précision attendue.

Les masses des différents refus et tamisats sont rapportées à la masse initiale du matériau. Les pourcentages ainsi obtenus sont exploités sous forme de tableau ou graphique.

- Mode opératoire :

- Monter la colonne de tamis dans l'ordre décroissant de l'ouverture des mailles en ajoutant le couvercle et le fond.
- Verser le matériau sec dans la colonne de tamis.
- Agiter automatiquement cette colonne.
- Reprendre un à un les tamis en commençant par celui qui a la plus grande ouverture, en adaptant un fond et un couvercle.
- Nous prenons le poids de chaque tamis à l'aide d'une balance électronique.
- Varier la validité de l'analyse granulométrique imposée par la Norme NF EN 933 -1 (différence entre la somme des masses de refus et de tamisats et de la masse initiale).

Les résultats des analyses granulométriques des différents sables étudiés sont regroupés dans le tableau suivant :

1) Gravier 3/8

Tableau 4.1 : Résultat de l'analyse granulométrique du gravier (3/8)

Poids initial sec :		2000 G			
Module	Maille tamis	Refus partiel (gr)	Refus cumulé (gr)	%Refus	%Tamisât
	8	0	0	0	100
	6.3	460	460	23	77
	5	380	840	42	58
	4	600	1440	72	28
	2.5	340	1780	89	11
Fond	Fond	220	2000	100	0

2) Sable concassé (naturel):

Tableau 4.2.: l'analyse granulométrique d'un sable concassé0/5

Poids initial sec :	1500 G				
Module	Maille tamis	Refus partiel (gr)	Refus cumulé (gr)	%Refus	% Tamisat
	5	0	0	0	100
	4	15	15	1	99
	2.5	210	225	15	85
	1.25	735	960	64	36
	0.63	210	1170	78	22
	0.315	255	1425	95	5
	0.16	30	1455	97	3
Fond	0	45	1500	100	0

3) déchets de brique :

Les déchets de briques proviennent principalement des chantiers de démolition et peuvent être recyclés dans le béton comme substitut aux granulats naturels. Leur valorisation permet de réduire l'impact environnemental et d'encourager la construction durable. Toutefois, leur utilisation nécessite une analyse préalable de leurs propriétés physiques et mécaniques pour garantir la qualité du matériau final. Le brique recyclé a été broyé ensuite tamiser dans un tamis 0.16 mm. Il a été utilisé deux pourcentages comme addition par rapport au poids de ciment : 8 et 15 %



Figure 4.2 : Analyse granulométrique

4.2.4 Masse volumique apparente du gravier :

- But de l'essai :

Cet essai a pour but de permettre de connaître la masse d'une fraction granulaire lorsque par exemple on élabore une composition de bétons. Ce paramètre permet, en particulier, de déterminer la masse ou le volume des graviers pour l'obtention d'un béton dont les caractéristiques sont imposées.

- Mode opératoire de l'essai :

1. Déterminer le volume du récipient = V .
2. Noter la masse du récipient propre et vide = M_0 .
3. Placer le récipient dans le bac en plastique.
4. Verser les granulats secs, par couches successives et sans tassement : utiliser les mains comme entonnoir naturel.

5. Araser à l'aide de la règle métallique par un mouvement horizontal de va et vient.
 6. Noter la masse du récipient rempli= M1.
 7. Vider les granulats dans un autre bac en plastique
 8. Renouveler l'opération au moins (3) fois avec un autre échantillon du même type.
- La masse volumique absolue est donnée par :

$$\rho_{app} = \frac{(M_2 - M_1)}{V_r}$$

Figure 4.3. Masse volumique apparente

Tableau 4.3 Masse volumiques apparente de Gravier 3/8

Fraction	Essai	M1 (Kg)	Fraction	Essai	ρ_{app} moyen (kg/l)
3/8 Vr=7 L	1	2.934	12.668	1.39	1.383
	2	2.934	12.627	1.384	
	3	2.934	12.560	1.375	

4.2.5. Masses volumiques absolues DU GRAVIER 3 /8:

Cet essai est régi par la norme NFP 18-301 ; elle est définie comme étant la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat sans tenir compte des vides pouvant exister entre les grains

- But de l'essai:

Cet essai a pour but de permettre de connaître la masse d'une fraction granulaire lorsque par exemple on élabore une composition de bétons. Ce paramètre permet, en particulier, de déterminer la masse ou le volume des différentes classes granulaires malaxées pour l'obtention d'un béton dont les caractéristiques sont imposées.

Dans ce travail nous avons utilisé la méthode de l'éprouvette graduée, elle est Simple, rapide et utilise un matériel courant du laboratoire.

- Mode opératoire :

- 1 . Placer l'éprouvette dans le bac en plastique.
2. Verser de l'eau dans l'éprouvette (presque demi hauteur) et noter V1.
- 3 . Préparer un échantillon de granulats secs de masse M (environ 400 g).
4. Verser l'échantillon dans l'éprouvette à l'aide d'un entonnoir et provoquer le départ des vides

(air) en remuant le mélange avec la tige agitatrice.5. Noter le nouveau volume d'eau dans l'éprouvette V2.

6. Vider les granulats dans un bac en plastique et jeter son contenu.

7. Renouveler l'opération au minimum 3 fois. La masse volumique absolue est donnée par :

$$\rho_{abs} = \frac{M}{(V_2 - V_1)}$$

Figure4.4.: La Masse Volumique absolues

Tableau4.4.: Masse volumiques absolue de Gravier 3/8.

Fraction	Essai	M1 (g)	V1 (ml)	V2 (ml)	ρ_{abs} (g/ml)	ρ_{abs} moyen (g/ml)
3/8	1	400	400	550	2.66	2.66
	2			551	2.64	
	3			549	2.68	

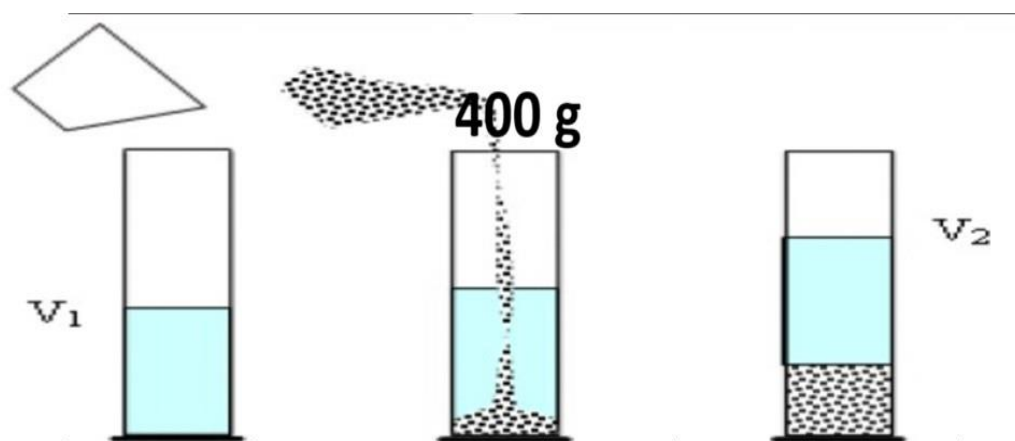


Figure4.5. Essai de La Masse Volumique absolues

4.2.6 Sable concassé (0/5)

4.2.7 Equivalent de sable : NF P 18-598 :

Nous essai permet de mettre en évidence la proportion d'impuretés argileuses ou ultra fines

contenues dans le sable et le pourcentage de poussières nuisibles et les éléments argileux qui diminuent la qualité du béton et mortier.

- Mode opératoire :

Tamiser une quantité de sable (masse supérieure à 400 g).

→ Prendre une pesée de 120 g.

→ Remplir l'éprouvette de solution la vente jusqu'au premier repère (10cm).

A l'aide de l'entonnoir verser la prise d'essai (120g) dans l'éprouvette et taper fortement à plusieurs reprises avec la paume de la main afin de chasser toutes les bulles d'air et favoriser le mouillage de l'échantillon. Laisser reposer pendant 10 minutes.

Fermer l'éprouvette à l'aide du bouchon en caoutchouc et lui imprimer 90 cycles de coups horizontaux en 30 secondes à la main à l'aide d'un agitateur mécanique. Retirer ensuite le bouchon, le rincer avec la solution la vente au-dessus de l'éprouvette, Rincer ensuite les parois de celle-ci.

Faire descendre le tube laveur dans l'éprouvette, le rouler entre le pouce et l'index en faisant Tourner lentement le tube et l'éprouvette et en imprimant en même temps au tube un léger piquage.

Cette opération a pour but de laver le sable et de faire monter les éléments fins et argileux. Effectuer cette opération jusqu'à ce que la solution la vante atteigne le 2èmerepère. Laisser ensuite reposer pendant 20 minutes.

a. Equivalent de sable visuel (ESV) :

Après 20 minutes de dépôt de sable, lire la hauteur h_1 du niveau supérieur du flocculant jusqu'au fond de l'éprouvette à l'aide d'une réglette. • Mesurer également avec la règle la hauteur h_2 comprise entre le niveau supérieur de la partie sédimentaire et le fond de l'éprouvette

$$ESV = \frac{h_2}{h_1} * 100$$

Figure 4.6. **Equivalent de sable visuel**

Où : $h_2 > h_1$ avec : h_1 : sable propre + éléments fins.

b. Equivalent de sable au piston (ESP) :

- Introduire le piston dans l'éprouvette et laisser descendre doucement jusqu'à ce qu'il repose sur le sédiment. A cet instant bloquer le manchon du piston et sortir celui-ci de l'éprouvette.
- Introduire le régllet dans l'encoche du piston jusqu'à ce que le zéro vienne buter contre la face intérieure de la tête du piston. Soit partie sédimentée.

$$ESV = \frac{h_2}{h_1} * 100$$

Figure 4.7. Equivalent de sable au piston

Où h'_2 : La hauteur du sable ($h'_2 < h_1$)



Figure 4.8.: Essais d'équivalent de sable.

On a :

ESV moy	81.87%	$75\% \leq ESV < 85\%$
ESP moy	72.94%	$70\% \leq ESP < 80\%$

Tableau 4.5.: Equivalent du sable de sable concassé.

N° d'essais	h1(cm)	h'2(cm)	ESV(%)	h2(cm)	ESP (%)
1	9	9	81.81	11	72.81
2	9	8.80	82.56	10.90	73.76
3	9.1	9	81.25	11.20	72.25

(ESV)moye=81.87%

(ESP)moye=72.94%



Figure 4.8.: Essais d'équivalent de sable.

Tableau 4.6.: Comparaison des resultants

E.S.V	E.S.P	Nature et qualité du sable
ES<65	ES<60	Sable argileux : Risque de retrait ou de gonflement à rejeter pour des bétons de qualité.
65<ES<75	65<ES<70	Sable légèrement argileux de propriété admissible pour des bétons de qualité courante quand on ne craint pas particulièrement le retrait.
75≤ES≤85	70≤ES≤80	Sable propre à faible pourcentage de farine argileuse convient parfaitement pour des bétons de haute qualité.
E.S ≥85	E.S >80	Sable très propre : L'absence totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.

Résultat :

Pour le sable concassé c'est un Sable propre à faible pourcentage de farine argileux convient parfaitement pour des bétons de haute qualité.

4.2.8 Masses volumiques apparentes :

Cet essai a pour but de permettre de connaître la masse d'une fraction granulaire lorsque par exemple on élabore une composition de bétons. Ce paramètre permet, en particulier, de déterminer la masse ou le volume des sables malaxés pour l'obtention d'un béton dont les caractéristiques sont imposées.

- **Principe de l'essai :** Le principe de cet essai c'est de remplir un récipient gradué (200ml) et déterminer la masse du contenu. Récipient gradué. - balance. – sable.

- **Mode opératoire :** Dans cet essai on va faire les étapes suivantes :

On met l'échantillon dans le récipient gradué (d'environ 200 ml), et on pèse le récipient à l'aide d'une balance.

Puis on note les masses et les volumes pour calculer la masse volumique. La Masse volumique apparente est donnée par formule suivant :

$$\rho_{app} = \frac{(M_2 - M_1)}{V_r}$$

Tableau 4.7.: Masses volumiques apparentes de sable0.5Concassée.

N° d'essais	Volume(L)	M1(g)	M2(g)	ρ_{app} (g/cm3)	$\rho_{appmoye}$ (g/cm ³)
01	1	218	1840	1,621	1,63
02	1	218	1855	1,637	
03	1	218	1851	1,633	

4.2.9. Masses volumiques absolues :

C'est la masse de l'unité de volume absolu de corps, c'est-dire de la matière qui constitue le corps sans tenir compte du volume vide.

La masse volumique absolue du sable est calculé d'après la Formule :

$$\rho_{abs} = \frac{M}{(V_2 - V_1)}$$

Tableau 4.8. : Masses volumiques absolues de sable Concassée 0.5

Fraction	Essai	M1 (g)	V1 (ml)	V2 (ml)	ρ_{abs} (g/ml)	ρ_{abs} moyen (g/ml)
3/8	1	400	400	550	2.66	2.66
	2			551	2.64	
	3			549	2.68	

4.2.10. Module de finesse (EN196-6):

Le module de finesse (MF) est une facture très importante qui nous permet de juger la qualité du sable, il est donné par la relation suivant :

$$M_f = \sum \frac{R_c}{100}$$

Figure 4.9. Module de finesse

RC: Refus cumulé.

Les normes soviétiques spécifient le M_f de sables comme suit:

- Sable gros $M_f \geq 2.5$
- Sable moyen $2 < M_f < 2.5$
- Sable fin $1.5 < M_f < 2$

Sable très fin $1 < M_f < 1.5$

Donc, dans notre cas $M_f = 3.5$. Le sable concassé avec $M_f > 2.5$: C'est un sable gros

4.2.10.1. La porosité

La porosité des échantillons de granulats est un paramètre important dans la formulation du béton car elle affecte sa compacité et donc ses propriétés mécaniques. Les valeurs P de porosité pour différents agrégats ont été calculées à l'aide de l'équation suivante :

$$P\% = \left(1 - \frac{\rho_{app}}{\rho_{abs}}\right) * 100$$

Figure4.10. La porosité**Tableau.4.9.: La porosité de sable Concassée 0.5**

Sable	(P %)
0.5	41.5

4.2.10.2. La Compacité :

La compacité d'un matériau est une proportion de son volume réellement occupé par la matière solide qui le constitue, c'est-à-dire.

Le rapport du volume absolu des grains au volume apparent du matériau. La compacité donnée par la formule.

$$C = \frac{\rho_{app}}{\rho_{abs}} = 100 - P$$

Figure4.11. La Compacité :

Tableau 4.10.: Compacité de sable

Sable	La compacité C(%)
0.5	58.5

4.2.10.3. Indice de vide:

$$I = \frac{P}{C}$$

Figure 4.12. Indice de vide :

Tableau 4.11: Indice de vide de sable.

Fraction	Indice de vide
0.5	.0709

4.3. La formulation des bétons :

4.3.1 L'objectif de la formulation de béton :

L'Objectifs d'une formulation est trouvé les composants pour avoir les performances requises pour un béton, soit :

- Une consistance adaptée à sa destination, généralement définie par l'affaissement au cône d'Abram, noté h ;
- Les qualités de résistance à différentes échéances, le plus souvent à 28 jours ; notée f_{cm28} (Résistance moyenne) ;
- Des qualités de durabilité qui conduisent à imposer une résistance caractéristique minimum, un dosage minimum en liant équivalent ($C + kA$) et un rapport maximum $E / (C + kA)$ - La formulation du béton doit permettre de respecter les deux premières exigences au moindre coût, le plus souvent donc à partir d'un dosage en ciment le plus faible possible tout en vérifiant que le dosage minimal est atteint. Même avec de tels outils, il est indispensable de comprendre comment les différents paramètres influent sur les qualités du béton, car ces paramètres sont trop nombreux et trop variables pour qu'ils puissent être pris en compte dans toute leur complexité (sans compter que des produits comme les adjuvants sont en constante évolution). C'est l'objet des paragraphes qui suivent de présenter ces paramètres de manière à rendre d'autant plus efficaces les outils de calcul (et les essais qui demeurent incontournables) pour et lui qui cherche à résoudre un problème de formulation de béton. [64]

4.3.2 Quelques Méthodes de composition des bétons :

Le calcul de la composition du béton a pour but de déterminer le dosage en ciment, granulats (fins et gros) et en eau pour 1m³ de béton frais, afin d'obtenir un mélange homogène et d'une capacité élevée, ainsi qu'une résistance mécanique acceptée.

Il existe plusieurs méthodes de détermination la composition du béton proposé et appliqué dans les différentes pays du monde, permis ces méthodes on peut citer

Méthode de BOLOMEY (méthode à granularité continue).

→ Méthode de JOISEL.

→ Méthode de VALETTE.

→ Méthode de DREUX GORISSE.

→ Méthode des volumes absolus.

→ Méthode générale du CES (centre d'essai des structures).→

L'objectif de toutes les méthodes de formulation des bétons est de déterminer la combinaison de matériaux à utiliser pour produire le béton qui aura les propriétés désirées et qui sera le plus économique possible. Dans notre travail nous utiliserons la méthode pratique de DREUX – GORISSE.

4.3.3 Méthode de formulation de Dreux- Gorisse :

C'est une méthode pratique qui simplifie et rend la formulation du béton plus pragmatique. Elle consiste à rechercher conjointement la résistance à la compression et l'ouvrabilité désirée à partir des données de base essentielles pour la formulation du béton telles que la dimension des granulats (D). La méthode de formulation de Dreux-Gorisse permet de déterminer les quantités optimales de matériaux (eau E, ciment C, sable S, gravillon g et gravier G) nécessaires à la confection d'un mètre cube de béton conformément au cahier des charges. Plusieurs étapes de calcul successives sont nécessaires à l'obtention de la formulation théorique de béton. Il faut déterminer au préalable le rapport C/E, C et E, le mélange optimal à minimum de vides, la compacité du béton et les masses des granulats. [65]

IV.3.4 Détermination du dosage en ciment :

On évalue d'abord le rapport E/C en fonction de la résistance désirée sur la base de la formule :

$$R_b = G \cdot R_c (E/C - 0.5)$$

Où :

R_b : Résistance à la compression du béton prévue à 28 jours, en bars.

G : Coefficient granulaire

R_c : Classe vraie du ciment à 28 jours, en bars.

Connaissant le rapport C/E la fluidité désirée, qui est une donnée du problème, on peut déterminer le dosage en ciment d'après l'abaque. [66]

4.3.4 Détermination du dosage en ciment :

On évalue d'abord le rapport E/C en fonction de la résistance désirée sur la base de la formule :

$$R_b = G \cdot R_c (E/C - 0.5)$$

Où :

R_b : Résistance à la compression du béton prévue à 28 jours, en bars.

G : Coefficient granulaire

R_c : Classe vraie du ciment à 28 jours, en bars.

Connaissant le rapport C/E la fluidité désirée, qui est une donnée du problème, on peut déterminer le dosage en ciment d'après l'abaque. [66]

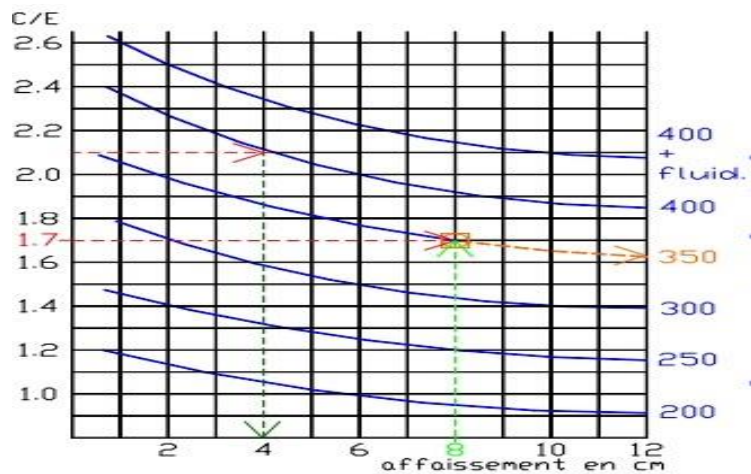


Figure 4.13.: Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment prévoir
...en fonction du rapport E/C

Tableau 4.12.: Valeurs approximatives du coefficient granulaire

Qualité des Granulats	Dimension des Granulats		
	D < 12,5	20 < D < 31,5	D < 50
	Fins	Moyens	Gros
Excellente	0,55	0,60	0,65
Bonne	0,45	0,50	0,55
P assable	0,35	0,40	0,45

4.3.5 Détermination du dosage en eau :

Connaissant C/E et le dosage en ciment (C) on déduit le dosage en eau total à prévoir par la formule :

$$E = C / (E/C)$$

4.3.6 Détermination du dosage en granulat :

C'est le pourcentage de sable et de gravier exprimé à partir de la courbe granulaire de référence construite par l'une des méthodes de composition de béton, ci-dessous courbe OAB. La courbe OAB, où B à l'ordonnée 100% correspond à la dimension D du plus gros granulat et le point de brisure A à des coordonnées ainsi définies comme suit :

En abscisse :

- Si $D \leq 20\text{mm}$ l'abscisse est $D/2$.

Si $D \geq 20\text{mm}$ l'abscisse est située au milieu du segment, gravier limité par le module 37 (4mm) et le module correspond à (D max).

En ordonnée : Y donnée par la formule suivante :

$$YA = 50 - \sqrt{D + K + K_s + K_p}$$

K_s , ajustement de la granularité du sable.

Pour $FM \clubsuit > 2.8$ $K_s = 5.4 FM - 15$

Pour FM est varié de 2 à 3 $K_s = 6 MF - 15$

$\clubsuit K$: est un terme correcteur qui dépend du dosage en ciment, de l'efficacité du serrage, de la forme des granulats roulés ou concassés (sur tout le sable, dont l'influence est prépondérante) et également du module de finesse du sable qui est donné par le Tableau. [67]

Tableau 4.13.: valeur du terme correcteur k

.Vibration		Faible		Normale		Puissante	
F. format des granulats		Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé
Dosage ciment	400	-2	0	-4	-2	-6	-4
	+f	0	+2	-2	0	-4	-2
	400	+2	+4	0	+2	-2	0
	350	+4	+6	+2	+4	0	+2
	300	+6	+8	+4	+6	+2	+4
	250	+8	+10	+6	+8	+4	+6
	200						

La courbe granulaire de référence OAB doit être tracée sur le même graphique que les courbes granulométriques des granulats composants. On trace alors les lignes de partage entre chacun des granulats en joignant le point à 95% de la courbe du granulat suivant, et ainsi de suite. On lira alors sur

la courbe de référence au point de croisement avec la ou les droites de partage le pourcentage en volume absolu de chacun des granulats g1, g2, g3 par exemple. Si c'est le dosage en ciment, le volume absolu des grains de ciment est :

$$C = C / \rho_c$$

ρ_c : C'est la masse spécifique pour les grains du ciment

Le volume absolu de l'ensemble des granulats est:

$$V = (1000 \times \gamma) - c.$$

Où : γ : coefficient de compacité qui est donné par le tableau :

Tableau 4.14. Valeurs du coefficient de compacité γ

Consistance	Serrage	Coefficient γ en fonction du diamètre D des Granulats						
		D=5	D=10	D=12,5	D=20	D=31,5	D=50	D=80
Molle	Piquage	0,750	0,780	0,795	0,805	0,810	0,815	0,820
	Vibration faible	0,755	0,785	0,800	0,810	0,815	0,820	0,825
	Vibration normale	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
	Piquage	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
	Vibration faible	0,765	0,795	0,810	0,820	0,825	0,830	0,835
Plastique	Vibration normale	0,770	0,800	0,815	0,825	0,830	0,835	0,840
	Vibration puissante	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
	Vibration faible	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
	Vibration normale	0,780	0,810	0,825	0,835	0,840	0,845	0,850
	Vibration puissante	0,785	0,815	0,830	0,840	0,845	0,850	0,855
Ferme								

- Dosage en ciment :
- $C=350 \text{ kg/m}^3$ valeur prescrite.
- b. Dosage en eau:

- d. On a $C=350 \text{ kg/m}^3$
- e. $\rightarrow$ Et affaissement = 8 cm (béton plastique)
- f. $\rightarrow$ Après l'abaque : $C/E= 1.71 \rightarrow E/C= 0.57$
- g. $\rightarrow$ Alors : $E= 350/1.71=198.86 \text{ l/m}^3$

• **Correction du dosage en eau selon le diamètre maximal D du mélange granulaire**

Tableau 4.15.: valeur de la Correction sur le dosage en eau

Diamètre en (mm)	10	12.5	16	20	25	31,5	40	50
Correction en (%)	+9	+6	+4	+2	0	-2	-4	-6

On a un $D_{\text{max}} = 8 \text{ mm}$ qui correspond à une correction de 9% en plus de la quantité d'eau calculée donc on obtient :

$$E = F_{\text{calculée}} + 0.04 \times F_{\text{calculée}} = 198.86 + 0.09 (198.86) = 216.7 \text{ l Litre E après correction.}$$

Dosage des granulats :

La granularité du mélange obtenu peut être représentée et approchée par deux segments de droite.

Cette courbe simplifiée est une modélisation de la courbe réelle. Cette modélisation est intéressante car cette courbe théorique est suffisamment proche de la courbe réelle pour être significative et elle peut être entièrement déterminée à partir de seulement trois points appelés respectivement O origine, A point de brisure, B extrémité.

Pour les granulats à béton, il apparaît que les points O, A et B, sont invariables quel que soit les proportions du mélange. Le point d'origine, O est fixé à 0% de tamisât sur le plus petit tamis (0.08 mm).

Ce point est repéré par ses coordonnées : O [0.08 ; 0] de même, le d'extrémité, B se situe le tamis, D du gravier, avec 100% de tamisât. Ce point est repéré par ses coordonnées : B [D ; 100]. Pour le point de brisure A, il apparaît que le tamis sur lequel il se situe est invariable quel que soit les proportions du mélange. En observant de plus près, il apparaît que ce tamis se situe à $D/2$, si $D \leq 20 \text{ mm}$, et au milieu de l'intervalle [5 ; D] si $D > 20$ il reste à déterminer le pourcentage de tamisât du point de brisure. Cette position dépend des proportions du mélange.

Or, les proportions du mélange influent sur la compacité du béton et par conséquent sur sa résistance. La meilleure compacité au béton. Cette position est optimisée par la méthode dite DREUX-GORISSE. L'ordonnée optimisée du point de brisure, Y_A est déterminée par la relation suivante :

$$Y_A = 50 - \sqrt{D + K + K_s + K_p}$$

Cette relation prend en compte l'influence de la forme des granulats, du dosage en ciment, de la

vibration, de la finesse du sable et de la mise en œuvre du béton par une pompe à béton sur la compacité du béton et sa facilité de mise en œuvre. K, optimisation de la compacité en fonction du type de vibration, de la forme des granulats, et du dosage en ciment. Voir tableau ci-contre :

Tableau4.16.: valeur du terme correcteur k

Vibration		Faible		Normale		Puissante	
Format des granulats		Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé
Dosage ciment	400	-2	0	-4	-2	-6	-4
	+f						
	400	0	+2	-2	0	-4	-2
	350	+2	+4	0	+2	-2	0
	300	+4	+6	+2	+4	0	+2
	250	+6	+8	+4	+6	+2	+4
	200	+8	+10	+6	+8	+4	+6

La valeur trouvée est $K=+2$

K_s , ajustement de la granularité du sable

-Pour FM est varié de 2à3 $K_s=6MF-15$ On a $M_f =$

$$3.5 K_s = (6 \times 3.5) - 15 = 6$$

K_p , ajustement du dosage en sable pour faciliter le transfert par pompes à béton $K_p = 0$

si le béton est non pompable

Donc: $K_p = 0$

Pour un béton non pompable réalisé avec des granulats roulés dont le gravier a un diamètre, $D = 8$ mm, le sable a un module de finesse $MF = 2.947$, un dosage en ciment de 350 kg $K = 0$,

$$K_s = (6 \times 3.5) - 15 = 6$$

$K_p = 0$,

$$YA = 50 - \sqrt{8} + 6 + 2 = 55.18\%$$

$$XA = 8/2 = 4\text{mm}$$

Le point A à pour coordonnées : A[4;55.18]

Ainsi la courbe du mélange optimum, c'est-à-dire du mélange permettant d'obtenir la meilleure compacité est complètement déterminée.

4.3.7 La ligne de partage :

La ligne de partage joint le point d'ordonnée 95% de la courbe des plus petits granulats au point d'ordonnée 5% de la courbe granulaire des plus gros granulats. Le point d'intersection entre cette ligne et la courbe théorique du mélange optimum indique les proportions en pourcentage de volume absolu de sable et de gravier. Ces proportions sont lues sur le pourcentage de tamisât correspondant à ce point d'intersection. Ce pourcentage indique la proportion de sable, le complément donne la proportion de gravier • Le mélange optimal est obtenu avec un volume absolu de 48 % de sable et 52% de gravier 3/8

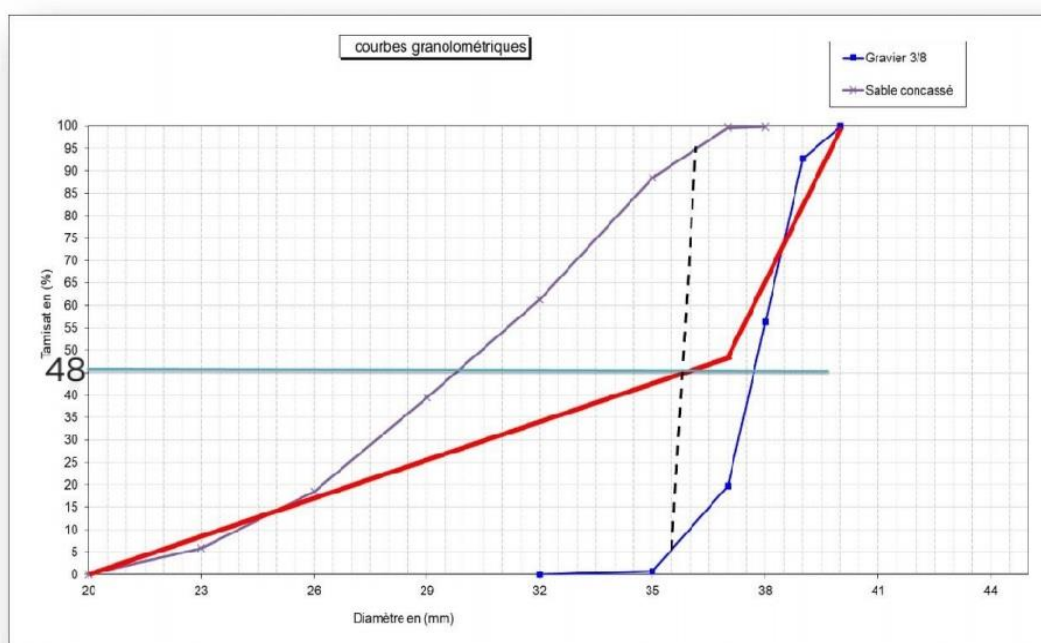


Figure4.14. :les lignes de partage

4.3.7.1. Dosage en masse des granulats :

La connaissance de la compacité du béton et des masses volumiques absolues des matériaux. La meilleure compacité est obtenue en vérifiant les proportions du mélange granulaire. Mais indépendamment de cela, elle dépend également du diamètre D des granulats, des conditions de vibration du béton et de sa plasticité. L'expérience permet de prévoir approximativement la compacité du béton selon les valeurs suivantes.

4.3.7.2. Coefficient de compacité :

Tableau4.17.: Valeurs du coefficient de compacité γ

La	Consistance	Serrage	Coefficient γ en fonction du diamètre D des Granulats						
			D=5	D=10	D=12,5	D=20	D=31,5	D=50	D=80
	Molle	Piquage	0,750	0,780	0,795	0,805	0,810	0,815	0,820
		Vibration faible	0,755	0,785	0,800	0,810	0,815	0,820	0,825
		Vibration normale	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
	Plastique	Piquage	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
		Vibration faible	0,765	0,795	0,810	0,820	0,825	0,830	0,835
		Vibration normale	0,770	0,800	0,815	0,825	0,830	0,835	0,840
		Vibration puissante	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
		Vibration faible	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
	Ferme	Vibration normale	0,780	0,810	0,825	0,835	0,840	0,845	0,850
		Vibration puissante	0,785	0,815	0,830	0,840	0,845	0,850	0,855

Correction effectuée, on trouve $\gamma = 0.790$

Ces valeurs sont convenables pour des granulats roulés sinon il conviendra d'apporter la correction suivante :

Sable Et gravier concassé $= -0.01$

Alors : $\gamma = 0.790 - 0.01 = 0.780$

Toutes les masses des constituants du béton ont été déterminé pour obtenir un béton conforme aux attentes. Il est maintenant nécessaire de réaliser des éprouvettes, pour vérifier et ajuster les dosages

expérimentalement afin de garantir la qualité du béton.

Quantité des agrégats en pourcentage :

Sable concassée (%) = 48%.

Gravier 3/8(%) = 52%.

4.3.8. Volume absolue de l'ensemble des granulats :

On a : $V = (1000 \times \gamma) - c$

$$C = c/3.1 = 350/3.1 = 112.901$$

Volume absolu de l'ensemble des granulats

$$V = (1000 \times \gamma) - c = (1000 \times 0.790) - 112.9 = 677.1 \text{ L}$$

4.3.8.1. Dosage des granulats en kg dans 1 m³ :

$$V_{\text{sable}} = 677.1 \times 48/100 = 325.0081$$

$$V_{\text{gravier 3/8}} = 677.1 \times 52/100 = 352.0921$$

Les masses spécifiques sont :

$$\text{Sable concassée [kg]} = 325.008 \times 2.79 = 906.77 \text{ kg}$$

$$\text{Gravies 3/8 [kg]} = 352.092 \times 2.65 = 933.04 \text{ Kg}$$

Tableau 4.18. : Les dosages en matériaux secs seront donc en kg/m³:

Constituants	Les dosages kg/m³
Ciment	350
Sable	906.77
Gravier	933.04
Au total	200

4.4 les Ajouts :

4.4.1 déchets de brique

Les déchets de brique, souvent sous forme de poudre, peuvent être ajoutés en remplacement d'une partie du ciment dans la formulation du béton.

Les déchets de brique peuvent être concassés pour devenir des granulats, remplaçant ainsi les granulats naturels dans la composition du béton.

Ces caractéristiques physiques et chimiques sont présentées au tableau

Tableau4.19.: Caractéristiques chimiques et physique de brique

Analysechimique		Analysephysique		
Oxydes	%Massique	Désignation	Valeurs	Unité
SiO ₂	85–95	Masse volumique absolue	2.2	g/cm ³
CaO	0.8–1.2			
MgO	1–2	Densité	250	kg/cm ³
Fe ₂ O ₃	0.05–1	Surface spécifique de Blaine	15000	m ² /kg
Al ₂ O ₃	1–3			
Pert au feu	0.5–1	Taille des particules	<1	µm



Figure4 . 15: Déchets de brique comme poudre

4.4 .2 L'adjuvant :

Dans notre travail, l'adjuvant qui nous avons utilisé s'appelle : Le super plastifiant (MEDAPLAST 30).

- Description :

D'après la fiche technique (Annexe), le MEDAPLAST 30 est un super plastifiant haut réducteur d'eau permettant d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité, en plus de sa fonction principale de super plastifiant, il permet de diminuer considérablement la teneur en eau du béton.

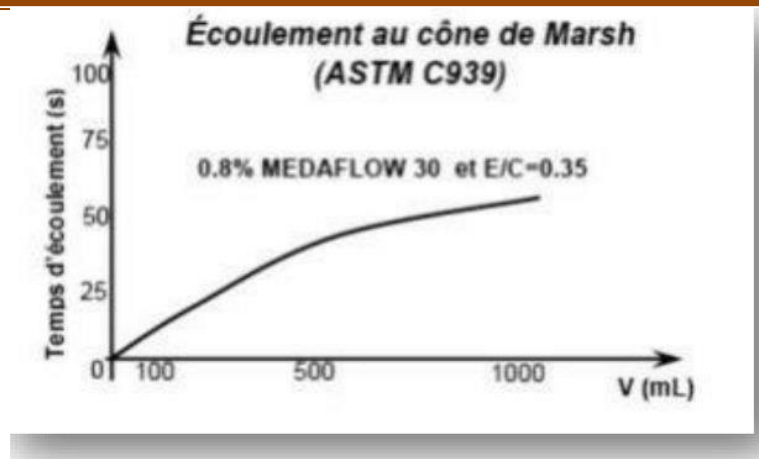


Figure 4.16 . : Evolution découlement au cône de Marsh

- Propriétés :

Grâce à ses propriétés le MEDAFLOW 30 permet : Sur béton frais :

- Obtention d'un rapport E/C très faible
- Amélioration considérable de la fluidité
- Une très bonne maniabilité - Éviter la ségrégation
- Faciliter la mise en œuvre du béton Sur béton durci :
- Augmenter les résistances mécaniques à jeune âge et à long terme (voir tableau).
- Diminuer la porosité
- Augmenter la durabilité
- Diminuer le retrait et le risque de fissuration.

- Dosage :

Plage de dosage recommandée : 0,5 à 2,0 % du poids de ciment soit 0,46 à 1,85 litre pour 100 Kg de ciment.

Le dosage optimal doit être déterminé sur chantier en fonction du type de béton et des effets recherchés.



Figure 4.17. : Le super plastifiant (MEDAPLAST 30).

- Caractéristique:

- Aspect Liquide
- Couleur Brun clair
- pH 6 – 6,5
- Densité $1,07 \pm 0,01$
- Teneur en chlore $< 0,1 \text{ g/l}$
- Extrait sec 30 %

4.4.3 Programmes expérimentaux :

Le tableau suivant récapitule l'ensemble des mélanges réalisés dans la présente étude.

Tableau 4.20. : l'ensemble des essais réalisés

N	Poudre de brique % (Poids de ciment)	Adjuvant %	Solution agressive de traitement Concentration = 5%	Essais
1. à l'eau	0	0	H2SO4 HCL NaSO4	-Compression -Perte de masse -porosité
2. à l'air	0	0		
3. à l'eau	8	2		
4. à l'air	8	2		
5. à l'eau	15	2		
6. à l'air	15	2		

4.4.4. Matériels et essais :

4.4.4.1. L'exécution du malaxage :

Le malaxage a pour but d'assurer une répartition homogène des différents constituants du béton grâce à l'action mécanique des outils de brassage. Une maîtrise rigoureuse du dosage des composants est essentielle pour garantir la constance et l'homogénéité du béton obtenu. La préparation du béton est réalisée à l'aide d'un malaxeur. Les étapes de fabrication se déroulent comme suit : on commence par introduire la quantité de gravier, suivie de celle du sable, puis on met en marche le malaxeur pour effectuer le malaxage initial des granulats. Ensuite, on ajoute le ciment, puis l'eau. Le malaxage complet dure environ 35 secondes. À la fin de cette durée, le malaxeur est arrêté et un essai d'affaissement au cône d'Abrams est effectué afin d'évaluer la consistance du béton préparé.

4.4.4.2. Malaxage du béton :

Il est fondamental que les constituants de base du béton (ciment, sable, gravier et eau) soient mélangés de manière appropriée afin d'obtenir un béton frais dont tous les granulats sont correctement enrobés par la pâte de ciment. Ce mélange homogène garantit une répartition uniforme des composants, ce qui confère au béton des propriétés mécaniques constantes et fiables à grande échelle. Le malaxage peut être réalisé manuellement ou à l'aide de malaxeurs mécaniques. Dans le cadre de notre étude, le malaxage a été effectué à l'aide d'un malaxeur.

4.4.4.3. Malaxeurs à béton :

Selon la norme [NA EN 12390-2], les malaxeurs à béton doivent être capables de mélanger les constituants de manière uniforme afin d'assurer une homogénéité parfaite du béton. De plus, ils doivent permettre le déchargement du béton sans en altérer l'uniformité. Ces appareils jouent un rôle déterminant dans la qualité finale du béton produit.



Figure4.18.: Le malaxeur utilisé (malaxeur de laboratoire Géo-matériaux)

4.4.4.4 Programme des essais :

4.4.4.4.1. Mesure de la consistance (Norme NF P 18 415) :

Le contrôle de l'ouvrabilité est effectué grâce à l'essai d'affaissement au cône d'Abrams qui consiste à :

- Remplir le cône en trois couches, tassé es avec une tige d'acier pointue de 16 mm de diamètre à raison de 25 coups par couche ;
- Sou lever le moule avec précaution et mesurer l'affaissement en cm.

Table au 4.21. : Classement des bétons selon la valeur d'affaissement au cône d'Abrams.

Classe de consistance	Définition	Affaissement (mm)
S1	Ferme	10 à 40
S2	Plastique	50 à 90
S3	Très plastique	100 à 150
S4	Fluide	160 à 210
S5	Très fluide	≥220

Notre béton est dans la classe S2 : 5 à 9 (cm) alors c'est béton plastique.



Figure 4 . 18 .: l'affaissement de cône d'Abrams d'un béton.

4.4.4.4.2 Vibration : [NAEN12390-2]:

La vibration est la méthode de compactage la plus répandue, le degré de compactage d'un béton frais par vibration dépend de la fréquence et de l'amplitude de ses oscillations, ainsi que de la durée de vibration. La vibration des éprouvettes est effectuée sur une table vibrante.

Les éprouvettes sont ensuite maintenues à l'air libre au laboratoire pendant 24h puis décoffrées et marquées par peinture et conservées dans l'eau pendant 28 jours.



Figure 4.19: la table vibrante (vibrant de laboratoire de matériaux).

4.4.4.4.3 Résistance à la compression :

L'essai de compression à la compression est mené sur des éprouvettes de forme prismatique normalisée (4*4*16) cm³. La vitesse de chargement est constante. La machine d'essai est une presse de force de classe « B » et d'une capacité maximale de 1500 kN conforme à la norme NF P 18-412 (NA 2832).



Figure 4.20.: Moule d'éprouvette prismatique (4*4*16).

Les éprouvettes sont conservées sans être déplacées pendant 24 heures. Après démoulage, Des éprouvettes 4x4x16 cm³ sont conservées dans l'eau à une température de $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ jusqu'à 28 jours. Des essais d'écrasement ont été réalisés aux âges (28) jours La résistance est calculée selon la formule :

$$f_c = F/AC$$

f_c : résistance en compression, exprimée en mégapascal (Newton par millimètres carrés)

F : charge maximale, exprimée en Newtons

AC : l'aire de la section de l'éprouvette sur laquelle la force de compression est appliquée, calculée à partir de la dimension nominale de l'éprouvette.

La résistance à la compression doit être exprimée à MPa (N/mm²) près.



Figure 4.21.: La machine de compression

4.4.5 Traitement des échantillons de béton par H₂SO₄ et HCl et Na SO₄ :

L'objectif de cette étude est de détecter la dégradation des éprouvettes de micro béton confectionnées à base de ciment CPJ, sous l'effet de solutions d'acide sulfurique H₂SO₄ et d'acide chloridrique HCl et NaSO₄.

Après une durée de cure des échantillons dans l'eau pendant 28 jours. Ces échantillons sont conservés dans des solutions d'acide sulfurique H₂SO₄ et d'acide chloridrique HCl et NaSO₄ avec des concentrations de 5%. Le choix d'une concentration de 5 % de H₂SO₄ et HCl et NaSO₄ est basé sur la bibliographie. [68.69.70]

Pour accélérer le phénomène de dégradation des échantillons, les échantillons ont subi une série d'immersion et de séchage à 60°C selon la norme ASTM C 342 : Ce protocole a été choisi pour accélérer le vieillissement des bétons causé par l'immersion complète, il est basé sur des cycles de séchage/immersion de 24 heures. Les éprouvettes sont immergées dans de l'eau dosée à 5 % de H₂SO₄ et HCl pendant 4 heures (saturation), puis séchées dans une étuve à 60°C pendant 20 heures. Ce protocole s'appuie sur des tests normalisés de vieillissement des pierres. [71]



Figure 4.22.: Les solutions d'acide sulfurique H_2SO_4 et d'acide chloridrique HCl et $NaSO_4$.

4.4.6 Perte de masse :

La résistance due aux agressions chimiques des échantillons immergés dans des différentes solutions est évaluée selon la norme ASTM C 267-96 : les éprouvettes sont nettoyées 3 fois avec de l'eau douce pour éliminer le mortier altéré et puis on les laisse sécher pendant $\frac{1}{2}$ heure. Ensuite on procède à la pesée de ces dernières Cette opération est effectuée après chaque 24 heures (cycle de séchage à $60^\circ C$ / immersion dans l'acide).

Le degré de l'attaque est évalué par la perte de masse (PM) donnée par la formule (2.1) :

$$PM (\%) = [(M1-M2/M1)] \times 100$$

Avec : $M1$, $M2$ les masses des éprouvettes avant et après immersion, respectivement.

4.4.7 Évaluation de La porosité :

Procédure d'essai : [ASTM C642-97]

Etape de l'essai :

— 1- Sécher les éprouvettes dans une étuve de 100 à $110^\circ C$ pendant 24 heures jusqu' à obtention d'une masse constante.

2- Immersion des éprouvettes dans l'eau pendant 24 heures.

3- Chouffer l'échantillon jusqu'à l'ébullition pendant 5 heures.

4- Les éprouvettes sont retirées pour être pesées à l'air et pesée hydrostatique (dans l'eau).

On aura : A : poids de l'échantillon après l'étuvage.

C : poids de l'échantillon après ébullition (pesée à l'air).

D : poids de l'échantillon après ébullition (pesée à l'eau : hydrostatique)

Alors :

$$Vp (\%) = [(C-A) / (C-D)] * 100$$

Où ; Vp : volume des pores en %.



Figure 4.23.: Pesée hydrostatique.



Figure 4.24. : l'appareille pour chauffer (ébullition) du béton.

4.5. Résultats et Discussions :

4.5.1 Introduction :

Ce travail avait pour but d'étudier le comportement de micros bétons confectionnés de granulats

recyclés issus du concassage de brique de maçonnerie. Les travaux ont donc contribué à l'amélioration des connaissances sur les propriétés physiques et mécaniques de ces matériaux et leur influence sur le comportement du béton. Dans ce chapitre nous allons passer en revue les résultats obtenus après une série de mesures des propriétés des micros bétons confectionnés. Ces mesures sont réalisées sur des échantillons conservés dans des solutions agressives préparées à base d'acide sulfurique et d'acide chloridrique avec une concentration de 5%.

Les tests réalisés sont :

Résistance à la compression à 28j.

- Porosité
- Perte de masse.●

4.5.2 Représentation et analyse des résultats :

4.5.2.1 Avant traitement avec les acides :

4.5.2.1.1. La résistance à la compression 28 jours :

Pour la détermination de la résistance à la compression, des éprouvettes prismatique $4 \times 4 \times 16$ ont été confectionnés. Les essais ont été effectuées sous une presse hydraulique en respectant les prescriptions des règles suivantes :

L'éprouvette est centrée sur le plateau de la presse.

Aucune matière n'est interposée entre l'éprouvette et les plateaux de la presse. La charge est applique d'une manière continue jusqu'à la rupture de l'éprouvette.

4.5.2.1.1.1. Béton conservé dans l'eau :

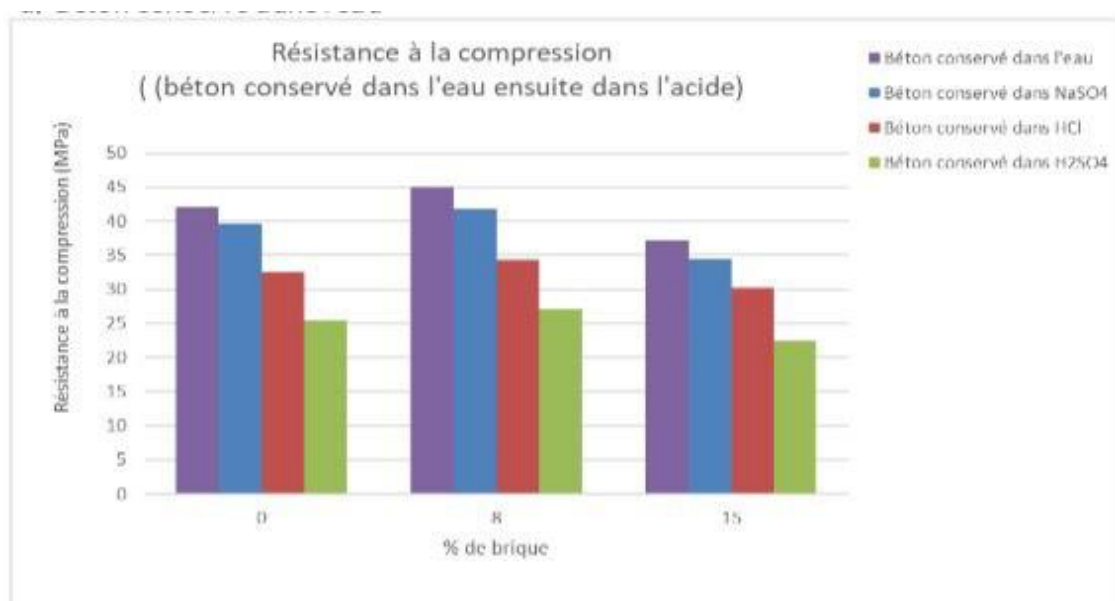


Figure 4.25. : Résistance à la compression (béton conservé a l'eau ensuite dans l'acide)

D'après la figure 4.25., on peut dire :

On observe que le béton conservé dans l'eau présente la plus grande résistance à la compression comparée à celui exposé ensuite aux acides (Na_2SO_4 , HCl , H_2SO_4). La résistance diminue progressivement avec l'augmentation du pourcentage de brique (0 %, 8 %, 15 %). L'acide sulfurique (H_2SO_4) semble avoir l'effet le plus dégradant sur la résistance, suivi de l' HCl , puis du Na_2SO_4 . Cela indique que l'attaque acide réduit considérablement la résistance mécanique du béton, surtout en présence d'un taux élevé de brique.

4.5.2.1.1.2. Béton conservé a l'air :

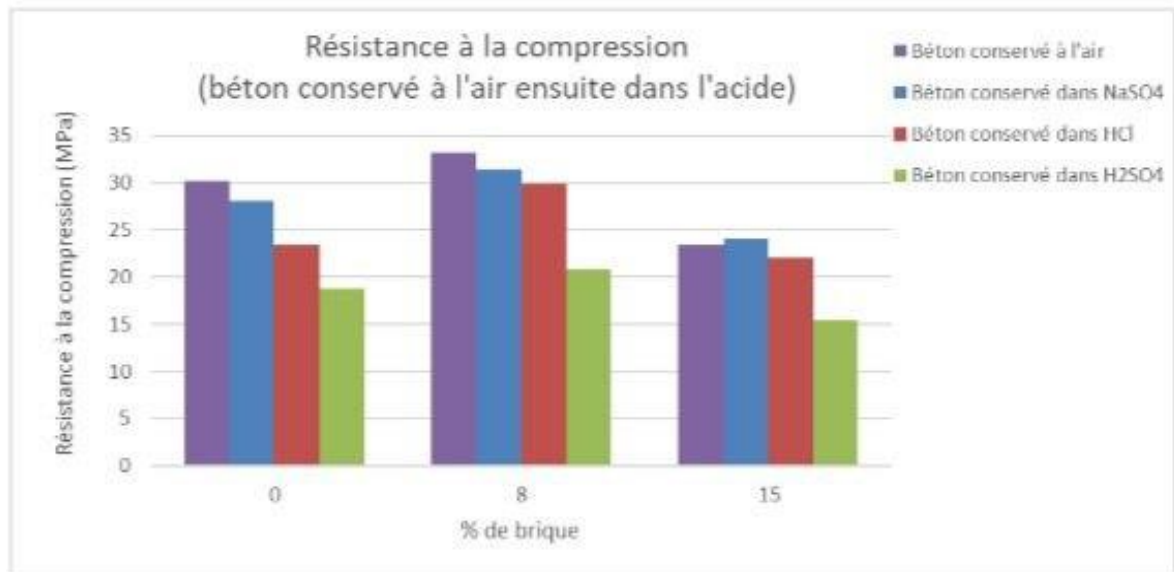


Figure 4.26. : Résistance à la compression (béton conservé a l'air ensuite dans l'acide)

D'après la figure 4.26., on peut dire :

La résistance à la compression est globalement plus faible que celle du béton conservé dans l'eau, ce qui montre l'effet bénéfique de la cure humide sur le développement des résistances mécaniques. Comme dans le cas précédent, une augmentation du pourcentage de brique entraîne une diminution de la résistance. L'effet des acides suit le même ordre de sévérité, avec H_2SO_4 étant le plus agressif.

4.5.2.1.2. Porosité accessible :

4.5.2.1.2.1./béton conserve dans l'eau :

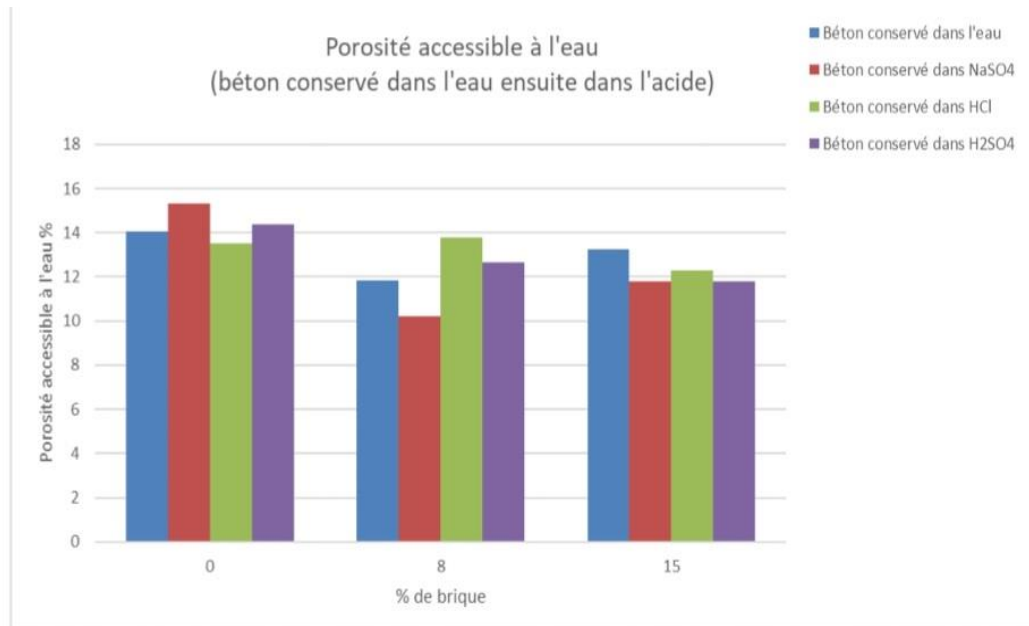


Figure 4.27.: . Porosité accessible à l'eau béton conserve à l'eau ensuite dans l'acide

D'après la figure 4.27., on peut dire :

La résistance à la compression est globalement plus faible que celle du béton conservé dans l'eau, ce qui montre l'effet bénéfique de la cure humide sur le développement des résistances mécaniques. Comme dans le cas précédent, une augmentation du pourcentage de brique entraîne une diminution de la résistance. L'effet des acides suit le même ordre de sévérité, avec H_2SO_4 étant le plus agressif.

4.5.2.1.2.2/ béton conserve dans l'air :

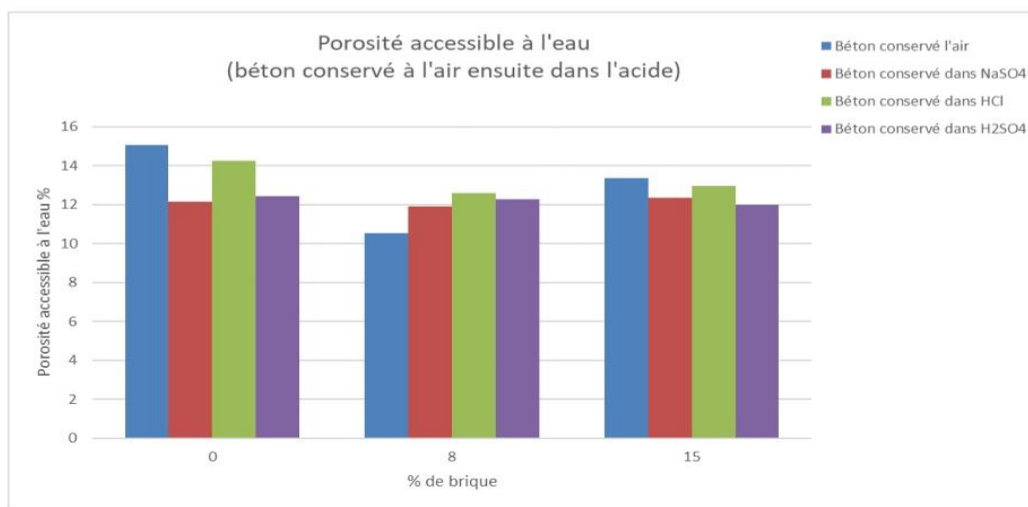


Figure 4.28.: . Porosité accessible à l'eau béton conserve à l'air ensuite dans l'acide

D'après la figure 4.28., on peut dire :

Les tendances sont similaires, avec une légère augmentation de la porosité dans les conditions acides, surtout pour HCl et H₂SO₄.

4.5.2.1.3. Perte de masse :

4.5.2.1.3.1. Béton conserve dans l'eau :

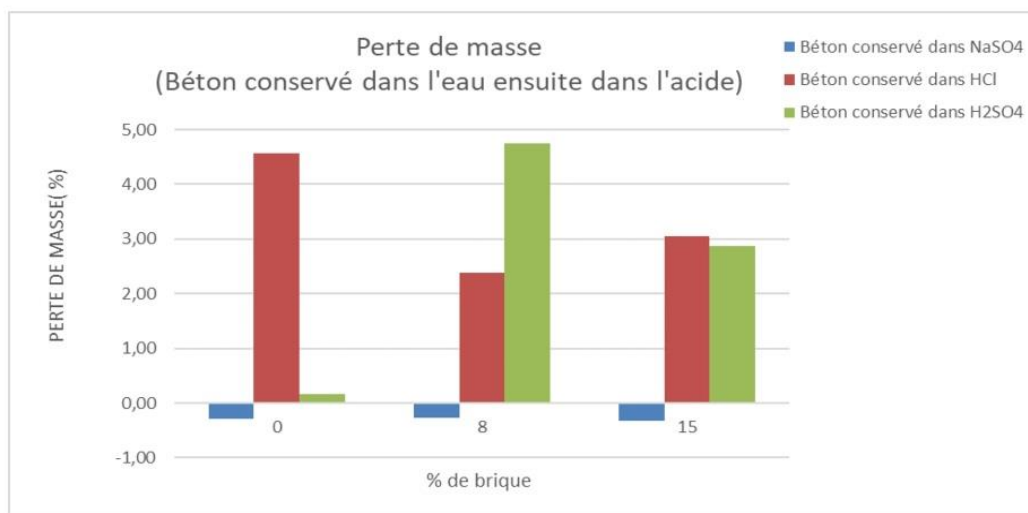


Figure 4.29. : perte de masse béton conserve à l'eau ensuite dans l'acide

D'après la figure 4.29., on peut dire :

La perte de masse est plus significative pour les échantillons exposés à HCl et H₂SO₄, particulièrement pour les pourcentages de brique de 8 % et 15 %.

Les échantillons exposés à NaSO₄ montrent une perte de masse négligeable.

4.5.2.1.3.2./ béton conserve dans l'air

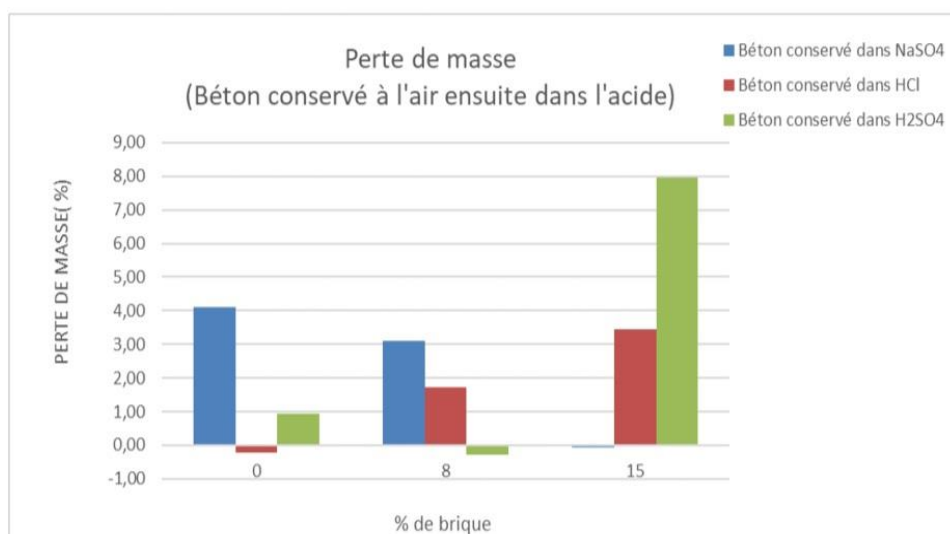


Figure 4.30.: perte de masse béton conserve à l'air ensuite dans l'acide.

D'après la figure 4.30., on peut dire :

La perte de masse est plus marquée, surtout pour H_2SO_4 à 15 % de brique.

NaSO_4 a encore un effet minimal, ce qui reflète sa moindre agressivité chimique comparée aux acides

Conclusion générale

L'attaque chimique est considérée comme la principale cause de détérioration du béton. Ainsi, cette étude visait à analyser le comportement de bétons comportant une poudre de brique fin, après immersion dans des solutions chimiques agressives. Une partie des échantillons ont reçu une cure standard dans l'eau à l'intérieur du laboratoire, d'autres ont été conservés à l'air.

L'objectif de cette recherche était donc d'étudier le comportement mécanique et la durabilité d'échantillons de béton fin fabriqués à partir d'agréats recyclés provenant de briques de construction concassées. Ces échantillons de béton fin ont été conservés dans des solutions d'acide sulfurique (H_2SO_4), d'acide chlorhydrique (HCl) et de sulfate de sodium (Na_2SO_4). Ce travail a contribué à améliorer la compréhension des propriétés physiques et mécaniques du béton.

L'exposition du béton aux milieux acides entraîne une dégradation notable de ses propriétés mécaniques, en particulier sous l'effet de l'acide sulfurique (H_2SO_4), suivi de l'acide chlorhydrique (HCl), tandis que le sulfate de sodium (Na_2SO_4) présente un effet beaucoup plus faible. L'augmentation du pourcentage de brique incorporée réduit à la fois la résistance à la compression et augmente la porosité, surtout en milieu agressif. La cure à l'eau reste la condition la plus favorable, assurant la meilleure résistance mécanique et la porosité la plus faible.

Cette étude nous a permis de concentrer notre travail sur d'autres thématiques :

- L'étude de la microstructure après une exposition chimique.
- La modélisation du processus de dégradation chimique

Reference

- [1] ATILH CNRS. Ecole thématique 'physique, chimie et mécanique des matériaux cimentaires', 2003.
- [2] NEVILLE, A.M. propriétés des bétons, édition Eyrolles, 4^{ème} édition française, 2000, p.37.
- [3] OSSELIN, J.-F. le béton-composition, fabrication et mise en œuvre, presses des ponts, 2009, p.45.
- [4] VIMANE PHOUMMAVONG, M. Cours en béton armé-Essais de laboratoire, p.1-146.
- [5] [Miller, 1993]. (blendes cements applications and implactions cement and concrete composites vol 15 no 4 p 237-245
- [6] (.hydratation de ciment .anonyme 2009)
- [7] BELHOCINE.A, NAGOUDIN, Etude expérimentale d'un mortier avec ajouts Minéraux, Mémoire de Master Université KASDI Merbah d'Ouargla, Algérie, 2014.
- [8] M. REGOURD H. HORNAIN. Applications de la microscopie électronique à balayage. Revue des matériaux de construction, 693 : 73–87, 1975.
- [9] H.F.W. TAYLOR. Proposed structure for calcium silicate hydrate gel. Journal of the American Ceramic Society, 69(6): 464–467, 1986.
- [10] COLLEPARDI S, CORINALDESI V, MORICONI G, NONORA G, COLLEPARDI M , « Durability of high- concretes with pozzolanic and composite cements », ACI Special 172, 2000.
- [11] V. MATTE. Durabilité des bétons à ultra hautes performances : rôle de la matrice cimentaire. Thèse de doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan, France, 1999.
- [12] HAFFAF, A., DJAR, I., & SAHED, B. (2023). "TRAUMA AND CULTURAL DISPLACEMENT IN V.S. NAIPAUL'S THE ENIGMA OF ARRIVAL". Thèse de Master, Université Mohamed Boudiaf, M'Sila. Consulté le 11 juin 2024.
- [13] Scrivener, K. L., et al. (2018). Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry, Cement and Concrete Research, Vol. 114, pp. 2–26.
- [14]: Stéphanie BONNET et Abdelhafid KHELIDJ : La durée de vie des ouvrages en béton armé situés sur la façade atlantique Report N°2-1 « Concrète in marine environment ».
- [15] Feldman R .FSeredaP.J. (1968) A model of hydrated Portland cement paste as deduced from sorption-length change and mechanical properties. Revue des Matériaux de Construction,
- [16] Baron J. et Ollivier J.P. Les Bétons : bases et données pour leur formulation. Edition Eyrolles. Paris. 1997.
- [17] François de Larrard .Construire en béton : l'essentiel sur les matériaux. Edition Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées. Paris. 2002 ,p.197.
- [18] Soroka I, Setter, N, 1977: The effects of filler on strength of cement mortars, Cement and Concrete Research, vol.26, n°4, p.449-456.
- [19] Salim GUETTALA, B. MEZGHICHE et M. MELLAS, 2008. Performances physico-mécaniques et la durabilité du ciment prémélangé du sable de dune finement broyé. Troisième Conférence Internationale à Biskra sur l'Architecture et la Durabilité (BASC 2008), «Stratégies et Perspectives», Université Mohamed Khider Biskra, 8-10 Avril. Thème 4: La recherche et le transfert technologique, 396-407.
- [20] Treadaway K. W, Page C.L. and Macmillan G.L, «The prediction of reinforcement corrosion: from laboratory studies to exposure trials », Proc. 1st Intern. RILEM Congress, Versailles, 1987, 3, 1323-1329.

- [21] Hermann K, « Les ajouts : Les cendres volantes », Bulletin du ciment, Bruxelles, N°6/Juin 1995.
- [22] Yassine SENHADJI : *L'influence de la nature du ciment sur le comportement des mortiers vis-à-vis des attaques chimiques (acides et sulfatiques) (Mémoire de Magister- USTMB d'Oran -2006).*
- [23] Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). Concrete: Microstructure, Properties, and Materials (4th ed.). McGraw-Hill Education.
- [24] Aïtcin, P.-C. (2000). Durable Concrete. Modern Concrete Technology Series. CRC Press.
- [25] JEAN-PIERRE OLLIVIER ET Angélique VICHOT. «La durabilité des bétons». «Chapitre 9»/ATILH/ 2008.France.
- [26] I. LEBER et F.A. BLAKEY, some effects of carbon dioxide on mortars and concrete, ACI J. AMER. Concr. Inst., 53 pp. 295-308 (sept. 1956).
- [27] (mouhamed salim khoudji<degradation au niveau de l'usine al zinc constate et recommandations> mémoire de master .université de tlemcen.2013)
- [28] CHIAOUI Ramdane : Durabilité des matériaux cimentaires vis-à-vis d'un environnement chimiquement agressif (Mémoire de Magister- USTMB d'Oran -2008).
- [29] Saida BOUALLEG : *Effet des milieux agressifs sur les caractéristiques de durabilité des bétons et des matrices cimentaires (Mémoire de Magister- Université Mohamed Boudiaf de M'sila-2004).*
- [30] Dr. Ir. P. Boeraeve : *Cours de Béton armé*
- [31] Taylor, H.F.W. (1997). Cement Chemistry, 2nd ed., Thomas Telford Publishing, pp. 212–214
- [32] Scrivener, K. L. & Taylor, H. F. W. (1997). "Delayed ettringite formation: a review", Cement and Concrete Research, Vol. 27, Issue 8, pp. 1153–1160.
- [33] GRUBE H., RECHENBERG W. - «Durability of concrete structures in acidic water». *Cem. Concr. Res.*, vol. 19, n° 5, p 183-
- [34] Neville, A. M. (2011). Properties of Concrete, 5th edition. Pearson Education Limited
- [35] Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). Concrete: Microstructure, Properties, and Materials. McGraw-Hill. Neville, A. M. (2011). Properties of Concrete. Pearson Education.
- . [36] Neville, A. M. (2011). Properties of Concrete, Pearson Education. Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). Concrete: Microstructure, Properties, and Materials, McGraw-Hill. Baroghel-Bouny, V. (2007). Caractérisation des propriétés de transport dans le béton. AFGC – Presses de l'ENPC
- [37] Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). Concrete: Microstructure, Properties, and Materials. Taylor, H. F. W. (1997). Cement Chemistry.
- [38] Boudchicha A., « Utilisation des additions minérales et des adjuvants fluidifiants pour l'amélioration des propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons ». Thèse de Doctorat, Université Mentouri Constantine, 2007.
- [39] J. P Olivier : *livre de " Durabilité des bétons ". (A. NONAT : chapitre 2 ; V. BAROGHEL-BOUNY, B. CAPRA, S. LAURENS : chapitre 9 ; A. CARLES-GIBERGUES, H. HORNAIN : chapitre 11 ; G. ESCADEILLAS, H. HORNAIN : chapitre 12) .(Edition : Presse de l'école nationales des ponts et chaussées -2008)*

- [40] Richard Gagné : GCI 714 - Durabilité et réparations du béton : Cours de génie civil (Université de Sherbrooke).
- [41] C. Girard Division ST - Technical Facilities Management (ST/TFM) CERN, Genève, Suisse.
- [42] DE BELIE N., H.J. VERSELDER, B. DE BLAERE, D. VAN NIEUWENBURG, R. VERSCHOORE - «Influence of the cement type on the resistance of concrete to feed acids». *Cem. Concr. Res.*, vol. 26, n° 11, 1996, p. 1717-1725.
- [43] DE BELIE N., DEBRUYCKERE M., VAN NIEUWENBURG D., DE BLAERE B. - *Journal of Agricultural Engineering Research*, vol. 68, n° 2, 1997, p 101-108.
- [44] MONTENY J., DE BELIE N., VINCKE E., VERSTRAETE W., TAERWE L. - «Chemical and microbiological tests to simulate sulfuric acid corrosion of polymer-modified concrete». *Cem. Concr. Res.*, vol. 31, n° 9, 2001, p. 1359-1365.
- [45] Skalny, J., Marchand, J., & Odler, I. (2002). *Sulfate Attack on Concrete*. Spon Press.
- [46] Badogiannis, E., Giousdimos, D., & Tsivilis, S. (2015). Durability of concrete exposed to acid attack. *Construction and Building Materials*, 77, 452–459.
- [47] Ivanov D. (2020). Predicting the impacts of epidemic outbreaks on global supply chains: a simulation-based analysis on the coronavirus outbreak (COVID-19/ SARS-CoV 2) case. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2020.101922>.
- [48] Bakker R.F.M. (1985). Diffusion within and into concrete. 13th Annual Convention of the institute of concrete Technology, University of Technology, Loughborough
- [49] Jean Bernard L. (1997). Les déchets et leur traitement-les déchets solides industriels et ménagers, 3^e édition, pp. 6-7, Paris.
- [50] Hadj sadok A. (2010). Comportement des mortiers et bétons à base de ciments au laitier d'Elhadjar dans les milieux agressifs, Thèse de Doctorat en génie civil, Université de Blida, Algérie.
- [51] united nations university (2019). the global E-waste monitor 2020
- [52] BOURMATTEN. Granulats recyclés de substitution pour bétons hydrauliques, thèse de doctorat, université des Frères Mentouri Constantine, Mars 2017,
- [53] Shankar, B and Neeliah H. (2005). Tropospheric ozone and winter wheat production in England and Wales: a Note. *Journal of Agricultural Economics*, vol. 56, No. 1, pp. 145-151.
- [54] Bentz D.P., Stutzman P.E., Garboczi E.J. (1992). Experimental and simulation studies of the interfacial zone in concrete. *Cement and Concrete Research*, vol. 22, N° 5, pp. 891-902.
- [55] Sharma V., Giri A., Thakur S., Pant D. (2020). Chapter 13 - Resource recovery from inert municipal waste, *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering*, In book: *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering*, doi: 10.1016/B978-0-444-64321-6.00013-6.

- [56] NIGRI G., « Nouvelle élaboration d'un liant hydraulique », thèse de doctorat, Université 8 Mai 1945 Guelma, 2018.
- [57] Kartam N., Al-Mutairi N., Al-Ghusain I., Al Humoud J. (2004). Environmental management of construction and demolition waste in Kuwait. *Waste Manag.*, vol. 24, No.10,
- [58] LALAOUI S. et KADRI A. : « Etude des performances Thermiques des briques en terre cuite BRIQUETERIE DE L'Atlas », Mémoire de Master, Université de -M'SILA-, 2021.
- [59] [Marc Mélon, 2017] : Marc Mélon, « A25 ans ; Mathier Guiton se lance dans la fabrication de la brique Mesbay », publié le mercredi 7 juin 2017 à 15h 55.
- [60] : devenny A et KHALAF F.M « the use of crushed brick as coarse aggregate in concrete » *masonart international*, vol.12, N3.1999 p.81-84
- [61] : ramachandran V.S « utilisation des déchets et sous produits comme granulats de béton » *conseil national de recherches canada* 2004
- [62] akhtauruzzaman, A. A et HASNAT A 'properties of concrete using crushed brick as aggregate » *concrete international* Vol5, N2, feb.1983 p58-63
- [63] Rao, A., Jha, K. N. ET Misra, S. (2007). Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, volume 50, numéro 1, p.71-81.
- [64] <https://sodismac.dz/wp-content/uploads/2019/05/CEM-AL-42.5-SR5.pdf>
- [65] R.DUPAIN ; J.C.saint-arroman » GRANULATS.SOLS.CIMENTS ET BÉTONS
- [66] Safi B. « les méthodes composition de béton », SL, pp1-5. 2011.
- [67] « J.Festa ; G.Dreux » Eyrols, Nouveau guide du béton et ses constituants, huitième édition, troisième tirage 2007.
- [68] Kleinlogel A, « Influence des divers éléments physico - chimique sur les Bétons ». Edition Dunod, Paris, 1960, p. 75 140.
- [69] Ghrici M., Kenai S., Mansour M. S., Kadri E. « Some engineering properties of concrete containing natural pozzolana and silica fume », *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, November 2006.
- [70] Ghrici M., Kenai S., Meziane E. « Mechanical and durability properties of cement mortar with Algeria, natural pozzolana », Springer Science + Business Media, LLC 2005.
- [71] Cours de Génie Civil « Durabilité et réparation du béton », GCI-714, Université de Sherbrooke, Canada, Internet, 2008.
- [72] Lane D. S. and Ozyildirim, « Evaluation of the potential for internal sulphate attack through adaptation of ASTM C 342 and the Duggan test », *Cement, Concrete and aggregates*; Vo. 21, N°1, pp. 43- 58.

