

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Mémoire de Master

Présenté à l'Université de 8 Mai 1945 Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Spécialité : Génie Civil

Option : Structures

Présenté par :

MOUHOU B Aqila Manal

**Thème : Comportement de bétons fissurés en milieu agressif
formulés avec des additifs minéraux**

Sous la direction de : **Dr. BENDJAICHE. Robila**

Juin 2024

Remerciements

Tout d'abord, nous remercions Allah de nous avoir accordé la santé, le bien-être, la patience et le courage pour accomplir ce mémoire.

*Mes vifs remerciements et mes sincères reconnaissances sont adressées à **Mme. BENJACHHE Robila** pour son encadrement exceptionnel. Et à **Monsieur BOUDJEHM Hocine** pour son soutien constant et son expertise qui ont été essentiels à la réussite de ce travail.*

*Je remercie **Mme Khaldi Nacera** qui m'a guidé dans mon travail et aidé à trouver des solutions pour avancer.*

Merci à tous les membres du jury pour l'honneur qu'ils me font en acceptant d'examiner ce mémoire et pour leur bienveillante attention.

*Mes remerciements vont aussi à monsieur **MONTRJ Lachref** pour son aide ainsi tous les autres ingénieurs de **CTC** de Guelma.*

Enfin, j'adresse mes remerciements à tous mes professeurs et aux enseignants du département de génie civil et d'hydraulique qui ont contribué à mes études du premier cycle jusqu'à la fin de mon cursus, ainsi aux membres du laboratoire pour leurs aide et leur enthousiasme.

Merci à toutes et à tous

Dédicace

Avec l'aide de dieu le tout-puissant, qui a tracé le chemin de ma vie, j'ai pu réaliser ce modeste et sérieux travail que je dédie à mes plus chers êtres au monde : À la lumière de ma vie, mes chers parents, pour leur amour, leur tendresse et leurs encouragements.

Que Dieu vous protège et vous accorde une longue vie.

À ma jolie sœur Lina et à mon adorable frère Sid Ali.

À mon cher frère Badis Med Islam.

À toute la famille Meuhoub et Lidani

À mes chères tantes : Chahrazed, Fouzia et Sihem

À la personne la plus chère à mes yeux, ma cousine Yasmine.

Merci pour ton soutien, ton amour et tes encouragements.

À mes chères amies que j'aime le plus au monde surtout : Fedjria et Narimane

À mes collègues qui ont étudié avec moi auparavant, qui m'ont aidé dans mon travail acharné en laboratoire et qui m'ont soutenu dans les moments difficiles surtout :

B. Aymen.

Soyez assurées de toute ma reconnaissance et de mon profond respect.

À mes camarades du groupe Structures en Génie Civil, promotion 2023/2024.

À tous ceux que je n'ai pas mentionnés par leur nom

Merci du fond du cœur je vous aime.

Akila Manel

Résumé

L'attaque chimique du béton résulte essentiellement des réactions de dissolution/précipitation qui se produisent lorsque les éléments agressifs, par diffusion ionique ou par pénétration de la solution, viennent en contact avec les hydrates calciques du ciment. L'objectif de ce mémoire est d'étudier le comportement du béton pré-fissuré et modifié par des additions minérales sous l'effet d'une attaque d'acide sulfurique.

Une étude expérimentale a été réalisée pour analyser la durabilité des modifications pré-fissurées du béton avec des additions de métakaolin (MK) et de laitier granulé de haut fourneau broyé (GBFS). Des essais de performances mécaniques et de durabilité ont été effectués sur des éprouvettes de béton durci. Quatre formulations, avec différents pourcentages de substitution du ciment, ont été testées (F0, F5, F10 et F15). Les résultats montrent que le béton contenant du GBFS et du MK offre des résistances mécaniques similaires à celles du béton de ciment Portland seul (béton de référence) et que l'incorporation de ces additions minérales améliore la résistance à la compression.

De plus, le degré de pré-fissuration du béton (80%) réduit la résistance à la compression après exposition à l'acide pour toutes les formulations testées. La formulation F5 a montré la meilleure durabilité par rapport aux autres formulations, avant et après exposition à l'acide. Ainsi, la substitution du ciment à 5% par GBFS et MK est considérée comme la composition optimale pour le béton.

La mécanique et la durabilité des propriétés de trois types différents de béton durci et de béton de ciment conventionnel ont été évaluées en termes de résistance à la compression, de perte de masse, de porosité ouverte et d'absorption d'eau capillaire, après une attaque à l'acide sulfurique (concentration de 5%). Ces propriétés ont été comparées à celles du mélange témoin, et les variations ont été analysées. Les résultats montrent que l'incorporation de MK et GBFS améliore la résistance à la compression par rapport au béton témoin. De plus, l'exposition du béton pré-fissuré à l'acide sulfurique réduit de 80% la résistance à la compression pour toutes les formulations.

Mots clés : Pre-fissuration, durabilité, métakaolin, laitier concassé, béton, attaque acide.

Summary

The chemical attack on concrete essentially results from dissolution/precipitation reactions which occur when the aggressive elements, by ionic diffusion or by penetration of the solution, come into contact with the calcium hydrates of the cement. The objective of this dissertation is to study the behavior of pre-cracked concrete modified by mineral additions under the effect of a sulfuric acid attack.

An experimental study was carried out to analyze the durability of pre-cracked concrete modifications with additions of metakaolin (MK) and ground granulated blast furnace slag (GBFS). Mechanical performance and durability tests were carried out on hardened concrete specimens. Four formulations, with different percentages of cement substitution, were tested (F0, F5, F10 and F15). The results show that concrete containing GBFS and MK offers mechanical strengths similar to those of Portland cement concrete alone (reference concrete) and that the incorporation of these mineral additions improves compressive strength.

In addition, the degree of pre-cracking of concrete (80%) reduces the compressive strength after exposure to acid for all formulations tested. Formulation F5 showed the best durability compared to other formulations, before and after exposure to acid. Thus, substitution of 5% cement with GBFS and MK is considered the optimal composition for concrete.

The mechanical and durability properties of three different types of hardened concrete and conventional cement concrete were evaluated in terms of compressive strength, mass loss, open porosity and capillary water absorption, after a attack with sulfuric acid (concentration of 5%). These properties were compared to those of the control mixture, and the variations were analyzed. The results show that the incorporation of MK and GBFS improves the compressive strength compared to the control concrete. Additionally, exposure of pre-cracked concrete to sulfuric acid reduces the compressive strength by 80% for all formulations.

Keywords : Pre-cracking, durability, metakaolin, ground granulated blast furnace slag (GBFS), concrete, acid attack.

الملخص

الهجوم الكيميائي على الخرسانة ينتج بشكل أساسي عن تفاعلات الذوبان/الترسيب التي تحدث عندما تتلامس العناصر العدوانية، عن طريق الانتشار الأيوني أو اختراق المحلول، مع هيدرات الكالسيوم في الأسمنت. الهدف من هذه الأطروحة هو دراسة سلوك الخرسانة سابقة التشنق والمعدلة بواسطة الإضافات المعدنية تحت تأثير هجوم حامض الكبريتيك.

تم إجراء دراسة تجريبية لتحليل متانة الخرسانة المعدلة بالتشنق المسبق مع إضافة الميناكاولين (MK) وخبث الفرن العالي المحبب المطحون (GBFS) تم إجراء اختبارات الأداء الميكانيكي والمتانة على عينات الخرسانة المتصلبة. تم اختبار أربع صيغ بنسب مختلفة لاستبدال الأسمنت (F0، F5، F10، و F15) أظهرت النتائج أن الخرسانة التي تحتوي على GBFS و MK توفر قوة ميكانيكية مماثلة لتلك الموجودة في الخرسانة الأسمنتية البورتلاندية وحدها (الخرسانة المرجعية) وأن دمج هذه الإضافات المعدنية يحسن قوة الضغط.

بالإضافة إلى ذلك، فإن درجة التشنق المسبق للخرسانة (80%) تقلل من قوة الضغط بعد التعرض للأحماض لجميع التركيبات التي تم اختبارها. أظهرت التركيبة F5 أفضل متانة مقارنة بالتركيبات الأخرى، قبل وبعد التعرض للحمض. وبالتالي، فإن استبدال من الأسمنت بـ 5% GBFS و MK يعتبر التركيب الأمثل للخرسانة.

تم تقييم الخواص الميكانيكية والمتانة لثلاثة أنواع مختلفة من الخرسانة المتصلدة والخرسانة الأسمنتية التقليدية من حيث قوة الضغط، وفقدان الكتلة، والمسامية المفتوحة، وامتصاص الماء الشعري، بعد الهجوم بحمض الكبريتيك (تركيز 5%). وتمت مقارنة هذه الخصائص مع تلك الموجودة في خليط التحكم، وتم تحليل الاختلافات.

أظهرت النتائج أن دمج MK و GBFS يحسن قوة الضغط مقارنة مع خرسانة التحكم. بالإضافة إلى ذلك، فإن تعرض الخرسانة مسبقاً للتشنق لحمض الكبريتيك يقلل من قوة الضغط بنسبة 80% لجميع التركيبات.

الكلمات المفتاحية: ما قبل التكسير، المتانة، الميناكاولين، خبث الفرن العالي المحبب المطحون، الخرسانة، الهجوم الحمضي.

SOMMAIRE

Chapitre I : Généralités sur le béton et les milieux agressifs

I.1.	Introduction	1
I.2.	Généralité sur le béton	1
I.2.1.	Définition du béton	1
I.2.2.	Différents types de bétons	2
I.2.2.1.	Béton lourd	2
I.2.2.2.	Béton léger	2
I.2.2.3.	Béton ordinaire	2
I.2.2.4.	Béton auto plaçant (BAP)	2
I.2.2.5.	Béton de haute performance (BHP)	2
I.2.2.6.	Béton de fibre	2
I.2.2.7.	Béton a durcissement rapide	2
I.2.3.	Caractéristiques du béton	3
I.2.3.1.	Résistance à la compression	3
I.2.3.2.	Résistances à la traction par flexion	3
I.2.3.3.	Rôle des différents éléments constituant le béton	3
I.2.4.	Propriétés des bétons	3
I.2.4.1.	Le Béton frais	3
a.	Définition	3
b.	La valeur d'affaissement au cône d'Abrams	3
c.	La masse volumique du béton frais	4
I.2.4.2.	Le Béton durci	4
a.	Définition	4
b.	Résistance à la compression	5
c.	Résistance à la traction par flexion	5
I.2.5.	Les constituants du béton	6

I.2.5.1. Le ciment	6
a. Définition	6
b. Les constituants du ciment	6
b.1. Clinker Portland	6
b.2. Autres Constituants Des Ciments	6
• Le laitier granulé de haut fourneau	6
• Pouzzolane naturelle : comprennent deux types principaux	6
• Les cendres volantes (V)	7
• Schistes calcinés	7
• Calcaires	7
• Fumées de silice	7
• Fillers	7
c. Classification des ciments	8
c.1. Classification en fonction de leur composition	8
c.2. Classification en fonction de leur résistance	9
c.3. Le processus de fabrication de ciment Portland	9
I.2.5.2. Les granulats	9
a. Définition	9
b. Classification des granulats selon la provenance	10
b.1. Granulats roulés	10
b.2. Granulats concassés (de carrières)	10
c. Classification des granulats selon la grosseur	11
d. Désignation des granulats	11
e. Les grandeurs caractéristiques des granulats	12
e.1. La granulométrie	12
e.2. La propreté	12
e.3. La forme	12
e.4. Résistance à l'usure et aux chocs	12

I.2.5.3. Le sable	13
a. Définition	13
b. Classification des sables	13
c. Module de finesse M_F	13
I.2.5.4. L'eau de gâchage	14
I.2.6. La formulation de béton	14
I.3. Généralité sur les milieux agressives	14
I.3.1. Les attaques chimiques du béton	14
I.3.2. Différents types des attaques chimiques du béton	15
I.3.2.1. Les attaques sulfatiques	15
a. Sources des sulfates	15
b. Mécanismes d'attaques	17
c. Processus d'attaque par les sulfates internes	18
d. Processus d'attaque par les sulfates externes	18
I.3.2.2. Les dégradations dues aux attaque marine	19
I.3.2.3. Attaque par les ions chlorures	19
I.3.2.4. La carbonatation	20
I.3.2.5. L'alcali-réaction	21
I.3.2.6. La lixiviation en eau douce	21
I.3.3. Mécanisme général des attaques chimiques	21
I.3.3.1. Durabilité des bétons vis-à-vis des environnements chimiquement agressifs	21
I.3.3.2. Conséquences générales	21
I.3.4. Principaux milieux agressifs	22
I.3.4.1. Eaux naturelles	22
a. Paramètres d'agressivité	22
I.3.4.2. Eaux agressives	22
a. L'eau de mer	23
b. Les eaux acides	23

c. Les eaux de recyclage	24
d. Les eaux de rejets industriels	24
I.3.4.3. Milieux acides	24
a. Sources des acides	24
b. Mécanisme d'attaque	25
I.3.4.4. Milieux sulfatiques	25
I.4 Conclusion	26

Chapitre II : L'effets des additifs et l'influence de la fissuration sur le comportement du béton

II.1. Introduction	27
II.2. L'effets des additifs sur le comportement du béton	27
II.2.1. Avantages de l'utilisation des ajouts minéraux dans le béton	27
• Amélioration de l'ouvrabilité	27
• Chaleur d'hydratation	28
• Durabilité	28
• Développement des résistances	28
• Développement des bétons à haute résistance	28
II.2.2. Les inconvénients d'utilisation des ajouts minéraux	28
II.2.3. Classification des ajouts minéraux	29
II.2.4. Principaux additifs minéraux ajoutés au béton	30
II.2.4.1. Laitier de haut fourneau (GGBS)	30
II.2.4.2. Métakaolin (MK)	32
a. Kaolin	32
b. Principaux usages du kaolin	32
c. Gisements de kaolin en l'Algérie	33
d. Métakaolin	34
d.1. Structure chimique	35

d.2. Composition chimique et minéralogique	36
II.2.4.3. Fumée de silice	37
II.2.4.4. Cendres volantes	37
II.2.4.5. Pouzzolanes naturelles	38
II.2.4.6. Autres additifs	39
a. Cendres de la balle de riz	39
b. Poudre de verre	39
c. Poudre de marbre	40
d. Dolomie	40
II.3. Influence de la fissuration sur la dégradation du béton	41
II.3.1. Différentes formes des fissures	41
II.3.1.1. Fissures diagonales	41
II.3.1.2. Fissures parallèles	42
II.3.1.3. Fissures horizontales	42
II.3.1.4. Fissures de faïençage	43
II.3.1.5. Fissures de retrait-gonflement	43
II.3.2. Origines des fissures	44
II.3.2.1. Retrait	44
II.3.2.2. Changements de température	44
II.3.2.3. Défauts de construction	45
II.3.2.4. Fissures dues aux attaques chimiques	45
II.4. Conclusion	46

Chapitre III : Caractérisation des matériaux et préparation des éprouvettes

III.1. Introduction	47
III.2. Matériaux utilisés	47
III.2.1. Granulats	47
III.2.1.1. Sable	47

a. Courbe granulométrique	47
b. Module de finesse du sable	49
c. Propreté du sable : Essai équivalent de sable	49
III.2.1.2. Graviers	50
a. Courbes granulométriques	50
b. Dureté des graviers : Essai Los Angeles	51
c. Poids spécifique des granulats	51
III.2.1.3. Ciment	52
III.2.1.4. Additifs minéraux	52
a. Laitier de haut fourneau (GBFS)	53
b. Metakaolin	53
III.2.1.5. Superplastifiant et eau de gâchage	54
III.3. Formulation du béton et confectionnement des éprouvettes	55
III.3.1. Méthode de formulation	55
III.3.1.1. Tracé de la droite de référence de Dreux	55
III.3.1.2. Détermination des pourcentages en volumes absolus de matériaux	56
• Application de la méthode Dreux-Gorisse	57
III.3.2. Confection des éprouvettes de béton	59
III.3.2.1. Préparation des moules	59
III.3.2.2. Malaxage du béton	59
III.3.2.3. Coulage du béton	60
III.3.2.4. Démoulage et cure	60
III.4. Conclusion	61

Chapitre IV : Comportement du béton pré-fissuré et modifié sous attaque chimique

IV.1. Introduction	62
IV.2. Protocoles expérimentaux	62
IV.2.1. Formulation retenue	62

IV.2.2. Protocole de pré-fissuration	63
IV.2.3. Attaque chimique à l'acide sulfurique	64
IV.2.3.1. Résistance à la compression	66
IV.2.3.2. Résistance à la traction	67
IV.2.3.3. Porosité accessible à l'eau	68
IV.2.3.4. Absorption capillaire	70
IV.2.4. Résultats et discussions	72
IV.2.4.1. Résistance a la compression	72
• Avant l'attaque chimique,	72
• Après l'attaque chimique	72
IV.2.4.2. Résistance a la traction	74
• Avant l'attaque acide	74
• Après l'exposition à l'acide	75
IV.2.4.3. Perte de Masse sous l'effet d'attaque chimique	76
IV.2.4.4. Effet d'attaque chimique sur la porosité accessible à l'eau	76
• Avant l'attaque acide	76
• Après pré-fissuration et exposition à l'acide	76
IV.2.4.5. Absorption capillaire du béton pré-fissuré	77
• Avant exposition à l'acide	77
Remarque	78
IV.3. Conclusion	79
Conclusion générale	80

Liste des abréviations

BAP	Béton autoplacant.
BHP	Bétons à hautes performances.
E/C	Rapport eau sur ciment.
Esp	Equivalent de sable par piston.
Esv	Equivalent de sable visuel.
R_c	La résistance à la compression.
R_{tfj}	Résistance à la traction par flexion
M_F	Module de finesse
TAC	Le titre alcalimétrique complet
LA	La dureté
Aff	Affaissement au cône d'Abrams
GBFS	Laitier de haut fourneau
MK	Méta kaolin
CRS	Le ciment Portland
H₂S	Le sulfure d'hydrogène
H₂SO₄	Acide sulfurique
C-S-H	Silicates de calcium hydratés
FeCl₃	Chlorure ferrique
XA1	Environnement à faible agressivité chimique
XA2	Environnement d'agressivité chimique moyenne
XA3	Environnement à forte agressivité chimique
Ca²⁺	Lixiviation des ions
Ca(OH)₂	La portlandite
F0	Formulation de référence
F5	Formulation avec 5% (MK+ GBFS)
F10	Formulation avec 10% (MK+ GBFS)

Liste des tableaux

CHAPITRE I :

Tableau I.1. Classement des bétons selon la valeur d'affaissement au cône d'Abrams	Page 4
Tableau I.2. Classification des sables suivant les valeurs de module de finesse	Page 14

CHAPITRE II :

Tableau II.1. Les avantages et les inconvénients de certains ajouts cimentaires.	Page 29
Tableau II.2. Classification des ajouts selon leur réactivité.	Page 30
Tableau II.3. Utilisations du kaolin.	Page 33
Tableau II.4. Composition chimique des différents types de kaolin DD.	Page 34
Tableau II.5. Exemples de compositions chimiques de méta kaolins.	Page 36

CHAPITRE III :

Tableau III.1. Résultats de la courbe granulométrique par tamisage.	Page 48
Tableau III.2. Calcul du module de finesse du sable.	Page 49
Tableau III.3. Valeurs de l'équivalent de sable.	Page 49
Tableau III.4. Courbes granulométriques par tamisage des deux graviers (5/15 et 15/25).	Page 50
Tableau III.5. Valeurs de la dureté au Los Angeles des deux granulats utilisés.	Page 51
Tableau III.6. Poids spécifique des granulats.	Page 52
Tableau III.7. Composition chimique du ciment CRS utilisé.	Page 52
Tableau III.8. Composition chimique du laitier de haut fourneau utilisé.	Page 53
Tableau III.9. Composition chimique de Meta kaolin utilisé.	Page 54
Tableau III.10. Valeurs du coefficient correcteur K.	Page 55

Tableau III.11. Pourcentages en volumes absolue des trois granulats (Sable 0/5, gravier 5/15, gravier 15/25). Page 57

Tableau III.12. Volumes des matériaux pour un mètre cube de béton. Page 58

Tableau III.13. Poids des matériaux dans la composition du béton. Page 58

CHAPITRE IV :

Tableau IV.1. Composition des formulations pour 50 L de béton (kg) Page 63

Tableau IV.2. Démarche expérimentale de l'étude Page 66

Liste des figures

CHAPITRE I :

Figure I.1. Les différents ciments et les proportions en masse de leurs constituants.	Page 08
Figure I.2. Classes en fonction de la résistance normale à 28 jours.	Page 09
Figure I.3. Etapes de fabrication du ciment.	Page 09
Figure I.4. Différents types de granulats selon leurs natures.	Page 10
Figure I.5. Granulats concassés (artificiels).	Page 11
Figure I.6. Courbes granulométriques des granulats.	Page 12
Figure I.7. Des cas pathologiques d'éléments en béton avant et après contact de sulfate.	Page 15
Figure I.8. L'origine des sulfates (interne ou externe).	Page 16
Figure I.9. L'attaque par les sulfates.	Page 17
Figure I.10. La formation de l'ettringite secondaire.	Page 18
Figure I.11. Agression du béton par activité des chlorures.	Page 20
Figure I.12. Coupe théorique d'un mur en béton.	Page 20
Figure I.13. Les attaques des milieux agressifs.	Page 23
Figure I.14. Les attaques des sulfates sur les armatures et le béton.	Page 26

CHAPITRE II :

Figure II.1. Principe d'obtention des laitiers de haut fourneau	Page 30
Figure II.2. Laitier de haut fourneau (Rocheux et Granulé)	Page 31
Figure II.3. Comparaison des compositions chimiques des ciments Portland et des laitiers de haut- fourneau	Page 32
Figure II.4. Gisements de kaolin de Tamazert et d'Adjarda (Jijel).	Page 33
Figure II.5. Gisement du kaolin de Djebel Debagh (Guelma)	Page 34
Figure II.6. Echantillon brut de kaolin DD3	Page 34
Figure II.7. Photo du Métakaolin	Page 35
Figure II.8. Structure chimique de métakaolin	Page 35
Figure II.9. Structure chimique des atomes d'aluminium et de silicium.	Page 36
Figure II.10. Fumée de silice	Page 37
Figure II.11. Photo de la cendre volante	Page 38
Figure II.12. Pouzzolanes naturelles	Page 38
Figure II.13. Balle de riz (à gauche) cendre de balle de riz (à droite)	Page 39
Figure II.14. Poudre de verre.	Page 40
Figure II.15. Poudre de marbre	Page 40
Figure II.16. Dolomie concassée et poudre.	Page 41
Figure II.17. Fissure diagonale dans une cloison sèche.	Page 42
Figure II.18. Fissuration de la fissure dans Un poteau vertical	Page 42
Figure II.19. Fissure horizontale de béton.	Page 43
Figure II.20. Fissure de faïençage (séchage précoce, retrait plastique)	Page 43

Figure II.21. Fissures de tassement	Page 44
Figure II.22. Fissures de retrait-gonflement	Page 44

CHAPITRE III :

Figure III. 1. Essai de granulométrie par tamisage.	Page 48
Figure III. 2. Courbe granulométrique du sable 0/5 mm.	Page 48
Figure III. 3. Appareillage de l'essai équivalent de sable.	Page 49
Figure III. 4. Courbes granulométriques des graviers 5/15 et 15/25.	Page 50
Figure III. 5. Appareil Los Angeles.	Page 51
Figure III. 6. Ciment Portland résistant aux sulfates (CRS) du groupe LAFARGE Algérie.	Page 52
Figure III. 7. Laitier granulé de haut fourneau broyé (GBFS).	Page 53
Figure III. 8. Calcination thermique du kaolin (Metakaolin).	Page 54
Figure III. 9. Superplastifiant MasterGlenium et eau du robinet.	Page 54
Figure III. 10. Traçage de la droite de Dreux OAB.	Page 56
Figure III. 11. Détermination des pourcentages en volumes absolus des granulats.	Page 57
Figure III. 12. Photos des moules utilisés pour la confection des éprouvettes.	Page 59
Figure III. 13. La bétonnière utilisée.	Page 59
Figure III. 14. Photos du coulage du béton.	Page 60
Figure III. 15. Démoulage et conservation des éprouvettes de béton.	Page 60

CHAPITRE IV :

Figure IV.1. MK, GBFS et Ciment	Page 63
Figure IV.2. Protocole de pré-fissuration et mesure de la vitesse de l'onde ultrasonique	Page 64
Figure IV.3. Essai d'attaque à l'acide sulfurique	Page 65
Figure IV.4. L'état des éprouvettes après l'attaque sulfurique	Page 65
Figure IV.5. Mesure de la résistance à la compression avant et après les attaques d'acide.	Page 67
Figure IV.6. Platine de chargement.	Page 67
Figure IV.7. Mesure de la résistance à la traction par fendage avant et après les attaques d'acide.	Page 68
Figure IV.8. Mesure de la Porosité accessible à l'eau	Page 69
Figure IV.9. L'état des éprouvettes après fissuration et exposés à l'acide sulfurique.	Page 69
Figure IV.10. Imperméabilisation des éprouvettes avant et après exposition à l'acide.	Page 70
Figure IV.11. Essai d'absorption d'eau par capillarité avant et après exposition à l'acide.	Page 70
Figure IV.12. Mesure du poids des éprouvettes avant et après exposition à l'acide.	Page 71

Figure IV.13. Résistance à la compression en fonction du temps de cure avant exposition à l'acide pour différentes formulations.	Page 72
Figure IV.14. Evolution de la résistance à la compression après exposition à l'acide pour différentes formulations.	Page 73
Figure IV.15. Pourcentages de réduction de la résistance à la compression avant et après exposition à l'acide pour différentes formulations.	Page 73
Figure IV.16. Résistance à la traction en fonction du temps de cure avant exposition à l'acide pour différentes formulations.	Page 74
Figure IV.17. Evolution de la résistance à la traction après exposition à l'acide pour différentes formulations.	Page 75
Figure IV.18. Pourcentages de réduction de la résistance à la traction avant et après	Page 75
Figure IV.19. Perte de masse après exposition à l'acide pour les éprouvettes saint et fissuré (80%)	Page 76
Figure IV.20. Porosité accessible à l'eau avant et après exposition à l'attaque d'acide.	Page 77
Figure IV.21. Courbes de sorptivité avant et après pré fissuration pour différents taux de (F0, F5, F10, F15).	Page 78

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Le béton est le matériau principal le plus utilisé dans la construction des ouvrages. Sa durabilité est toutefois menacée par les attaques d'acide sulfurique et de sulfates, qui entraînent divers mécanismes de corrosion. La longévité de ces ouvrages repose en grande partie sur la capacité du béton à se protéger physiquement et chimiquement contre sa propre corrosion et celle des armatures.

L'acide sulfurique, en particulier, détériore la matrice cimentaire du béton, entraînant sa corrosion. Ce processus conduit à la formation de gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), qui apparaît sous forme de substance blanche et pâteuse à la surface du béton, dépourvue de propriétés cohésives. Le gypse peut ensuite réagir avec l'aluminate de calcium hydraté (C3A) pour former de l'ettringite, un produit expansif. Bien que le processus de dégradation soit lent, souvent prenant des années avant de devenir visible, la formation de gypse et d'ettringite provoque l'expansion et la fissuration du béton, entraînant des dommages significatifs. La présence d'ettringite sous forme de composés microcristallins dans le gel C-S-H (silicates de calcium hydratés) provoque une expansion de la structure du gel et l'apparition de fissures, facilitant la pénétration des acides et aggravant la dégradation.

Cette détérioration de la matrice cimentaire par l'acide sulfurique entraîne une perte de résistance et de cohésion des composés cimentaires calciques. Malgré la complexité des réactions chimiques impliquées, l'application de principes de prévention élémentaires dans la formulation du béton permet de produire des bétons résistants et durables dans des environnements agressifs.

Dans ce contexte, plusieurs chercheurs ont exploré diverses combinaisons de liants pour améliorer la durabilité des ouvrages en béton exposés à des agressions chimiques d'acide sulfurique. L'approche générale consiste à réduire la quantité de clinker dans le ciment et à le remplacer par des additifs minéraux tels que le laitier de haut fourneau (GBFS), les cendres volantes (FA), la fumée de silice (SF), la cendre de balle de riz (RHA) et le métakaolin (MK). Ces substituts améliorent les propriétés mécaniques et les performances de durabilité du béton dans des environnements agressifs. Cependant, le comportement du béton fissuré soumis à des agressions chimiques reste mal connu, et peu de recherches ont été menées sur cette problématique.

L'objectif de notre mémoire de Master est d'étudier le comportement de béton pré-fissuré modifié par des additifs minéraux sous l'effet d'agression d'acide sulfurique. Nous avons choisi deux additifs locaux ayant démontré leur efficacité dans l'amélioration de la durabilité du béton : le laitier de haut fourneau (GBFS) de l'usine métallurgique d'El-Hadjar (Annaba) et le métakaolin (MK) de Djebel Debagh (Guelma). Pour atteindre cet objectif, nous avons adopté une démarche expérimentale basée sur des essais de laboratoire, incluant des tests de performances mécaniques et de durabilité sur du béton durci. Ces essais visent à mieux comprendre le comportement du béton pré-fissuré modifié par des ajouts minéraux.

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres :

Le premier chapitre est consacré à la première partie de l'étude bibliographique. Il a pour objectif de décrire le contexte général du mémoire en abordant les généralités sur le béton et les milieux agressifs.

Le deuxième chapitre constitue le noyau de l'étude bibliographique. Il fournit une synthèse sur l'effet des additifs et l'influence de la fissuration sur le béton. Nous présentons d'abord une synthèse originale des derniers travaux de recherche scientifique concernant l'effet des additifs minéraux de différentes natures sur le comportement et la durabilité des bétons avant et après les attaques chimiques. Cette synthèse est complétée par une étude sur l'influence de la fissuration sur la dégradation des bétons soumis aux agressions des agents chimiques.

Le troisième chapitre présente les caractéristiques des matériaux utilisés dans l'étude expérimentale en laboratoire. La méthode de formulation du béton y est détaillée, ainsi que les proportions des différentes composantes des mélanges. Nous y exposons également les techniques expérimentales employées pour la confection des éprouvettes.

Le quatrième et dernier chapitre de ce mémoire porte sur la présentation et l'analyse des résultats obtenus par expérimentation sur l'effet couplé de la pré-fissuration et de l'incorporation de GBFS et de MK sur le comportement mécanique et la durabilité du béton durci. La composition des quatre formulations testées ainsi que les protocoles de pré-fissuration et d'attaque à l'acide sulfurique y sont également détaillés.

Chapitre I

**Généralités sur le béton et les milieux
agressifs**

Chapitre I

Généralités sur le béton et les milieux agressifs

I.1. Introduction

Le béton est un matériau de construction le plus utilisé au monde pour les réalisations des ouvrages en génie civil. Il est constitué de plusieurs matériaux différents, est caractérisé essentiellement par une bonne résistance à la compression.

La durabilité d'un béton dépend d'une multitude de caractéristiques du matériau, aussi de l'agressivité de son environnement [1].

L'agressivité des milieux dans lesquels peuvent se trouver les ouvrages en béton est liée à la présence d'eau et à l'aptitude de celle-ci à réagir avec certains minéraux de la matrice cimentaire du béton [2].

Des agents agressifs extérieurs pénétreront facilement dans sa matrice à travers les fissures et microfissures formées. Ces agents agressifs peuvent, par la suite, réagir avec les hydrates pour diminuer davantage la capacité portante de l'ouvrage.

En effet, les agents agressifs dissous dans l'eau constituent une solution chimiquement agressive pour le béton qui peut provoquer plusieurs types de phénomènes...

La résistance du béton aux attaques chimiques est l'un des facteurs les plus importants pour sa durabilité. Le problème est aussi ancien que le béton et on a commencé à l'étudier il y a déjà près de 100 ans [3].

I.2. Généralité sur le béton

I.2.1. Définition du béton

Le béton est un matériau composite. Il est constitué de plusieurs matériaux différents, qui deviennent homogènes entre eux, soit à la mise en œuvre (béton frais), soit après durcissement (béton durci). Ses composants sont déterminés dans des proportions étudiées afin d'obtenir des propriétés souhaitées telles que la résistance mécanique, la consistance, la durabilité, l'aspect architectural (formes, teintes, textures), la résistance au feu, l'isolation thermique et phonique, et ceci en utilisant des méthodes spécialisées dites « méthodes de formulation du béton » Le béton est le matériau de construction le plus utilisé au monde pour les réalisations des ouvrages de génie civil .Il est caractérisé essentiellement par une bonne résistance à la compression. Ses inconvénients résident dans sa mauvaise résistance à la traction ainsi que sa masse volumique relativement élevée [3].

I.2.2. Différents types de bétons

I.2.2.1. Béton lourd

C'est un béton dont la masse volumique est supérieure à 2600 kg/m³, les résistances mécaniques du béton lourd sont comparables à celles des bétons classiques et même plus élevées compte tenu des faibles dosages en eau [3].

I.2.2.2. Béton léger

Les bétons légers à une faible densité, comme ayant une masse volumique après séchage 2100 kg/m³, caractérisé par une isolation thermique élevée.

Il est recommandé pour les constructions qui nécessitent le moins de charge possible, dès lors qu'elles permettent de maintenir les performances mécaniques du béton [5].

I.2.2.3. Béton ordinaire

Mélange homogène composé exclusivement des constituants de base ciment, granulats, eau, avec un rapport (**E/C**) qui varie en fonction de la plasticité ainsi que de la résistance désirée. Le béton ordinaire est caractérisé par sa résistance à la compression qui se situe entre :

$$20 \text{ MPA} \leq f_{c28} \leq 50 \text{ MPA} [3].$$

I.2.2.4. Béton auto plaçant (BAP)

Développé dans les années 80 par des chercheurs de l'université de Tokyo au Japon. Le béton auto plaçant est un béton fluide, très déformable, homogène et stable qui se met en place par gravitation et sans l'utilisation d'un moyen de vibration.

Il épouse parfaitement les formes des coffrages les plus complexes, il ne doit pas subir de ségrégation et doit présenter des qualités comparables à celles d'un béton vibré classique [3].

I.2.2.5. Béton de haute performance (BHP)

Bétons aux résistances mécaniques élevées au jeune âge et à 28 jours (Supérieure à 50 MPA), et un rapport pondéral (**E/C**) inférieur à 0,40. Leur propriété essentielle est leur grande résistance en compression qui dépasse largement le cas des bétons ordinaires.

Ceci est obtenu grâce à leur faible porosité qui est diminuée en réduisant la quantité d'eau de Gâchage par l'emploi d'adjuvants plastifiants et super plastifiants [3].

I.2.2.6. Béton de fibre

Béton dans lequel sont incorporées des fibres, ce qui permet suivant l'ouvrage de supprimer le treillis soudé traditionnel [3].

I.2.2.7. Béton à durcissement rapide

Bétons dont le développement des résistances mécaniques est accéléré, ces bétons permettent la réalisation des travaux sur des éléments d'ouvrages demandant une remise en service rapide, ainsi que le décoffrage prématuré ou la mise en précontrainte le plus rapidement en préfabrication [4].

I.2.3. Caractéristiques du béton

Lorsque le béton a durci, il conserve sa forme initiale mais ses propriétés continuent de s'évoluer pendant plusieurs mois. La compacité, ou faible porosité, du béton est un facteur clé de sa durabilité. La résistance à la compression est une caractéristique recherchée pour le béton durci.

I.2.3.1. Résistance à la compression (NF EN-12390-3)

Une méthode déterminant la résistance à la compression d'éprouvettes de béton durci. Les éprouvettes sont chargées dans une machine pour essai de compression jusqu'à rupture. La charge maximale est ainsi enregistrée et la résistance à la compression calculée [6].

I.2.3.2. Résistances à la traction par flexion (NF EN-12390-5)

Spécifie une méthode de détermination de la résistance à la flexion des éprouvettes de béton durci qui sont soumises à un moment de flexion par application d'une charge au moyen de rouleaux supérieurs et inférieurs [7].

I.2.3.3. Rôle des différents éléments constituant le béton [3]

- Ciment : c'est le constituant qui va réagir chimiquement avec l'eau, devenir résistant, et lier tous les ingrédients.
- L'eau : c'est elle qui va hydrater le ciment et rendre le mélange malléable.
- Les granulats : ils vont former une disposition plus ou moins ordonnée qui va conférer au béton sa résistance. C'est le ciment hydraté qui va "coller" les granulats.
- Le sable : il permet de remplir les trous qui subsistent entre les gros granulats.

I.2.4. Propriétés des bétons

Le béton doit être considéré sous deux aspects frais et durci.

I.2.4.1. Le Béton frais

a. Définition

Mélange de matériaux solides en suspension dans l'eau, se trouve en état foisonné à la sortie des appareils de malaxage et en état compacté après sa mise en œuvre dans son coffrage. La propriété essentielle du béton frais est son ouvrabilité, qui le rend apte à remplir n'importe quel volume, à condition que sa composition ait été étudiée en conséquence et que les moyens de mise en œuvre soient appropriés. L'ouvrabilité caractérise l'aptitude d'un béton à remplir les coffrages et à enrober convenablement les armatures.

De nombreux facteurs influent sur l'ouvrabilité : type et dosage en ciment, forme des granulats, granulométrie, emploi d'adjuvants et, bien entendu, dosage en eau [3].

b. La valeur d'affaissement au cône d'Abrams

La norme NF EN 206-1 définit en cinq classes de consistance :

Tableau I.1. Classement des bétons selon la valeur d'affaissement au cône d'Abrams [8]

Classe	Consistance du béton	Affaissement (en mm) au cône d'Abrams
S1	Ferme	10 – 40
S2	Plastique	50 – 90
S3	Très plastique	100 – 150
S4	Fluide	160 – 210
S5	Très fluide	≥ 220

c. La masse volumique du béton frais [3]

La masse volumique du béton frais est déterminée en plaçant le béton dans un récipient étanche et rigide, puis en le vibrant avec une aiguille, une table ou un serrage manuel. Après un arasement, le récipient et son contenu sont pesés, et la masse volumique est calculée en utilisant la formule suivante :

$$D = \frac{(M1 - M2)}{V}$$

D : est la masse volumique du béton.

M1 : est la masse du récipient (kg).

M2 : est la masse du récipient plus la masse du béton contenu dans le récipient (kg).

V : est le volume du récipient en mètre cube (m³).

I.2.4.2. Le Béton durci

a. Définition

Le béton durci est un matériau solide dont les propriétés de résistance mécanique et de durabilité se développent suite à des réactions physico-chimiques qui se produisent sur une période allant de quelques jours à quelques semaines. Une fois durci, le béton conserve sa forme initiale mais ses caractéristiques peuvent encore évoluer sur une longue période, allant de plusieurs mois à des années.

- La compacité d'un béton (ou sa faible porosité) est un avantage déterminant pour sa durabilité.
- Une bonne résistance à la compression est la performance souvent recherchée pour le béton durci.
- Les phénomènes de retrait sont une caractéristique prévisible dans l'évolution du béton.
- Les caractéristiques de déformations sous charge du béton sont connues et peuvent être mesurées [3].

b. Résistance à la compression [3]

La résistance du béton en compression uni-axiale est l'une des caractéristiques les plus étudiées, car elle offre une image générale de la qualité du béton, étant étroitement liée à la structure de la pâte de ciment hydratée. Cette résistance est cruciale dans la conception des structures en béton et l'établissement des normes de conformité.

La résistance caractéristique à la compression à 28 jours, notée f_{c28} , est un indicateur clé de la qualité du béton. Cette mesure est effectuée en écrasant une éprouvette qui a un diamètre et hauteur jusqu'à rupture dans une machine d'essai de compression. La charge maximale atteinte est enregistrée, et la résistance en compression est calculée selon une formule spécifique :

$$f_c = \frac{F}{A}$$

f_c : résistance en compression, exprimée en méga pascal (Newton par millimètres carrés).

F : charge maximale, appliquée à l'éprouvette lors de l'essai de compression, exprimée en newtons (N).

A : 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 en MPa (N/mm²).

c. Résistance à la traction par flexion [3]

Des éprouvettes prismatiques sont soumises à un moment de flexion par application d'une charge au moyen de rouleaux supérieurs et inférieurs.

La charge maximale enregistrée au cours de l'essai est notée et la résistance à la flexion est calculée.

Les mesures sont faites sur une presse qui répond aux normes NFP18-407(NA428), munie d'un banc de flexion à 4 points.

Pour une charge totale P , le moment de flexion constant entre les deux points d'application de la charge est :

$$M = \frac{P * A}{2}$$

P : la charge totale appliquée.

A : la distance entre les deux points d'application de la charge.

La contrainte de traction correspondante sur la fibre inférieure est $f_{tj} = 6M / a^3$

La relation suivante permet de calculer la résistance :

$$F_{tfj} = 1.8 \frac{P}{a^2}$$

I.2.5. Les constituants du béton

I.2.5.1. Le ciment

a. 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. [9]

b. Les constituants du ciment [3]

b.1. Clinker Portland

Le processus de fabrication des ciments commence par la combinaison de chaux (CaO), provenant de roches calcaires, avec de l'alumine (Al_2O_3), de la silice (SiO_2) et de l'oxyde de fer (Fe_2O_3), extraits d'argiles. Ces matériaux sont d'abord extraits de carrières, puis concassés et homogénéisés avant d'être chauffés à 1450 °C dans un four, un processus connu sous le nom de clinkérisation. Après refroidissement rapide, le produit résultant, appelé clinker Portland, est obtenu, qui a des propriétés hydrauliques. Ce clinker est ensuite mélangé avec un pourcentage de gypse et broyé finement pour produire une poudre dont la densité varie entre 3,0 et 3,2 kg/dm³.

b.2. Autres Constituants Des Ciments

Ils modifient les propriétés du ciment grâce à leurs caractéristiques chimiques ou physiques, et en raison de leur nature, ils contribuent également à réduire le coût de production.

• Le laitier granulé de haut fourneau :

Est un matériau principalement constitué de silicates, d'aluminosilicates de calcium et d'autres bases, issu de la fusion du minerai de fer. Il est obtenu en refroidissant rapidement le produit à l'eau, ce qui crée des particules vitreuses granuleuses. Ces particules sont ensuite broyées jusqu'à atteindre une finesse similaire à celle du ciment. Ce produit possède des propriétés hydrauliques.

• Pouzzolane naturelle : comprennent deux types principaux

- **Pouzzolane de verre volcanique** : Ce type de pouzzolane provient de roches pyroclastiques meubles ou à faible cohésion, issues d'éruptions volcaniques. Ces roches sont généralement vitreuses ou présentent une instabilité ou une réactivité qui les rend sensibles à l'attaque par l'hydroxyde de calcium. Des exemples incluent la pouzzolane de Santorin, de Balcol en Italie et de Shirashu au Japon.

- **Tufs volcaniques compacts** : Bien que similaires aux pouzzolanes de verre volcanique, ces tufs ont subi des transformations chimiques. L'altération du verre volcanique dans des conditions hydrothermales conduit à la formation de minéraux zéolithiques de composition chimique variable, donnant à ces pouzzolanes une texture dure et compacte.

Les pouzzolanes naturelles n'ont pas de propriétés hydrauliques par elles-mêmes. Cependant, lorsqu'elles sont en présence de chaux libérée par le clinker lors de l'hydratation, elles forment des hydrates stables, acquérant ainsi des propriétés pouzzolaniques.

• **Les cendres volantes (V) :**

Les cendres volantes peuvent avoir différentes compositions chimiques et physiques dépendant des impuretés contenues dans le charbon utilisé. Du point de vue minéralogique les cendres volantes se divisent en deux catégories, qui diffèrent l'une de l'autre par leur teneur en CaO (ASTM C 618-94a).

- Classe F. contenant moins de 10% de CaO produit de la combustion de l'antracite et du charbon bitumineux.

- Classe C. contenant entre 15 % et 35% de CaO produit de la combustion du lignite.

• **Schistes calcinés :**

Ce sont des schistes portés à une température de 800°C dans un four spécial. Finement broyés, ils présentent de fortes propriétés hydrauliques et aussi pouzzolaniques.

• **Calcaires :**

Ils doivent être constitués de 75% au moins de CaCO_3 .

• **Fumées de silice :**

Les fumées de silice sont des particules de très petite taille (environ 0,1 μm) issues de l'industrie de l'acier. Ces particules sont principalement composées de silice amorphe (>85%) et présentent des propriétés pouzzolanique. Elles permettent de compléter la granulométrie des ciments et ainsi d'améliorer la compacité du matériau durci et donc sa résistance mécanique.

• **Fillers :**

Ce sont des constituants secondaires et n'excèdent pas 5% dans la composition des ciments.

Ce sont des matières minérales naturelles ou artificielles qui agissent par leur granulométrie sur les propriétés physiques des liants (maniabilité, pouvoir de rétention d'eau).

c. Classification des ciments

c.1. Classification en fonction de leur composition : norme NFP15-301[10]

Ciments comportant du laitier de haut fourneau					
Type de ciment	Notation	% Clinker K	% laitier de haut Fourneau S	% pouzzolanes naturelles ou naturelles calcinés ou cendres volantes siliceuses P ou V	% Calcaire (L ou LL)
Ciment Portland au laitier	CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-
	CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-
Ciment Portland composé	CEM II/C-M (S-PouVou L)	50-64	16-44	6-20	6-20
	CEM II/C-M (P ou V-LouLL)	50-64	-	16-44	6-20
Ciment de haut fourneau	CEM III/A	35-64	36-65	-	-
	CEM III/B	20-34	66-80	-	-
	CEM III/C	5-19	81-95	-	-
Ciment pouzzolanique au laitier	CEM V/A	40-64	18-30	18-30	-
	CEM V/B	20-38	31-49	31-49	-
Ciment Composé	CEM VI (S-Pou V)	35-49	31-59	6-20	-
	CEM VI (S-L)	35-49	31-59	-	6-20

* Les constituants principaux, autres que le clinker, doivent être déclarés dans la désignation du ciment.

Figure I.1. Les différents ciments et les proportions en masse de leurs constituants. Les constituants marqués d'une étoile sont secondaires (moins de 5 %).

c.2. Classification en fonction de leur résistance

Trois classes sont définies en fonction de la résistance normale à 28 jours. Les classes doivent respecter les spécifications indiquées dans (Tableau I.3) ci-dessous.

Valeurs limites de résistance à la compression			
Classe de résistance	Résistances minimales absolues en MPa		
	2 jours	7 jours	28 jours
32,5 L	–	10	30
32,5 N	–	14	30
32,5 R	8	–	30
42,5 L	-	14	40
42,5 N	8	–	40
42,5 R	18	–	40
52,5 L	8	–	50
52,5 N	18	–	50
52,5 R	28	–	50

Figure I.2. Classes en fonction de la résistance normale à 28 jours [11]

c.3. Le processus de fabrication de ciment Portland

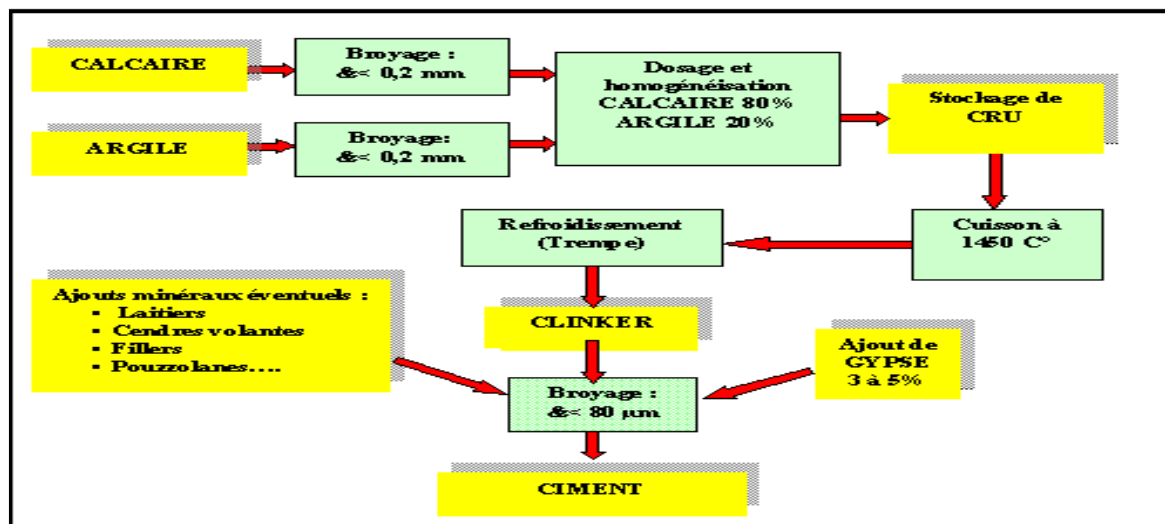


Figure I.3. Etapes de fabrication du ciment.[12]

I.2.5.2. Les granulats

a. Définition

Les granulats, utilisés pour la fabrication du béton, sont définis comme l'ensemble de grains inertes compris entre 0 mm et 40 mm, incluant le sable, les graviers et les cailloux, provenant essentiellement de roches sédimentaires siliceuses ou calcaires, de roches métamor-

phiques comme les quartzs et quartzites, ou de roches éruptives telles que les basaltes, les granites ou les porphyres. Ils peuvent être alluvionnaires (granulats roulés) ou de carrière (granulats concassés), et peuvent également être artificiels, issus de sous-produits industriels comme le laitier granulé de haut fourneau, de granulats industriels (granulats réfractaires, allégés par expansion ou par frittage, etc.), ou de matériaux très légers comme les billes de polystyrène, le caoutchouc ou les fibres de bois. Dans la composition du béton, une sélection rigoureuse des granulats est essentielle pour garantir à la fois une bonne résistance mécanique et une optimisation du remplissage des vides, avec une distribution granulométrique adaptée.[13]

b. Classification des granulats selon la provenance [14]

b.1. Granulats roulés :

Ils sont les résultats de la désagrégation des roches par l'eau, le vent ou le gel. Ainsi ils se sont formés des dépôts sédimentaires de grains de grosseur allant du sable fin aux gros blocs, de natures minéralogiques différentes. Trois catégories de granulats roulés existent dans la nature :

- Les granulats de rivière (d'oued).
- Les granulats de mer.
- Les granulats de dunes.

N.B: Les granulats roulés se caractérisent par leur aspect de grains arrondis et polis.



Figure I.4. Différents types de granulats selon leurs natures.[15]

b.2. Granulats concassés (de carrières) : Ils proviennent du concassage de roches dures (granits, porphyres, basaltes, calcaires durs...etc.). Ils sont caractérisés par un aspect anguleux à arêtes vives.



Figure I.5. Granulats concassés (artificiels).[16]

Les granulats artificiels proviennent également de la transformation thermique des roches (exemple : laitier du haut fourneau) ou de démolition d'ouvrages.

c. Classification des granulats selon la grosseur [14]

Selon leurs dimensions on distingue : les sables, les graviers, les cailloux, les galets et les moellons. Les dimensions soulignées sont celles de la série de base préconisée par la norme européenne (NF EN 933-2).

On distingue les familles de granulats suivantes :

- Fillers 0/D où $D < 2$ mm avec au moins 70 % de passant à 0,063 mm ;
- Sablons 0/D où $D < 1$ mm avec moins de 70 % de passant à 0,063 mm ;
- Sables 0/D où $1 < D < 6,3$ mm ;
- Graves 0/D où $D > 6,3$ mm ;
- Gravillons d/D où $d > \text{let } D < 125$ mm ;
- Ballasts d/D où $d > 25$ mm et $D < 50$ mm.
- Les cailloux d/D avec $d \geq 20$ mm et $D \leq 80$ mm.

d. Désignation des granulats [14]

Les granulats sont souvent désignés en fonction de leur plus petite et leur plus grande dimension comme suit :

Granulat d/D

Granulat : sable ou gravier

d : dimension minimale des grains

D : dimension maximale des grains

Avec une tolérance de 15% d'élément $< \mathbf{d}$ et 15% d'élément $> \mathbf{D}$ si

$\mathbf{D} > 1.58\mathbf{d}$ et une tolérance de 20% si $\mathbf{D} < 1.58\mathbf{d}$

I.2.5.3. Le sable

a. Définition

On définit les sables comme étant la fraction des granulats pierreux dont les grains ont des dimensions comprises entre 80 μm et 05 mm ; il s'agit d'une définition globale, dont les bornes varient d'une Classification à une autre. Ce sont aussi les matériaux dont le diamètre maximal est inférieur à

6,3mm et dont le passant à 80 microns n'excède pas 30%.

Dans le sens le plus courant, on entend par "sable" les éléments de dimensions 0 à 5 mm, non compris les filles. A cette définition se rattachent les sables de concassage ; mais lorsqu'on dit sable, on pense essentiellement aux sables naturels abondants dans de nombreux pays et dont les réserves sont quasi inépuisables. En fait, la définition granulométrique du sable est plus compliquée, elle varie suivant les époques et diffère suivant les pays et selon la destination. [3]

b. Classification des sables

- **Sable grossier** : Plus de 20% des éléments sont supérieurs à 2mm et plus de 50% des éléments supérieurs à 80 μm sont compris entre 0,5 et 5mm. Ces sables ont des propriétés qui se rapprochent des graves

- **Sable moyen** : Moins de 20% des éléments sont supérieurs à 2mm et plus de 50% des éléments supérieurs à 80 μm sont compris entre 0,2 et 2mm.

- **Sable fin** : Plus de 75% des éléments supérieurs à 80 μm , sont inférieurs à 0,5mm. Ces sables doivent être notablement corrigés pour acquérir des propriétés comparables à celles des graves.[3]

c. Module de finesse M_F

Le module de finesse M_F est une caractéristique importante surtout en ce qui concerne les sables. Un bon sable à béton doit avoir un module de finesse M_F compris entre 2,2 et 2,8 ; au-dessous, le sable a une majorité d'éléments fins et très fins, ce qui nécessite une augmentation du dosage en eau ; au-dessus, le sable manque de fines et le béton y perd en ouvrabilité.[3]

Norme Française [NFP18-540]

Le module de finesse est égal au 1/100e de la somme des refus cumulés exprimée en pourcentages sur les tamis de la série suivante : 0,08- 0,16 -0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5 mm.

- Pour $1,8 < M_f < 2,2$ le sable est à utiliser si l'on recherche particulièrement la facilité de mise en œuvre au détriment probable de la résistance.
- Pour $2,2 < M_f < 2,8$ le sable est à utiliser si l'on recherche une ouvrabilité satisfaisante et une bonne résistance avec des risques de ségrégation limités.
- Pour $2,8 < M_f < 3,2$ le sable est à utiliser si l'on recherche des résistances élevées au détriment de l'ouvrabilité et avec des risques de ségrégation.
- Pour $M_f > 3,2$ le sable est à rejeter.

Tableau I.2. Classification des sables suivant les valeurs de module de finesse [3]

Sable	Module de finesse M_F	Refus cumul sur les tamis 0.633 en %
Gros	3.4 à 2.4	50 à 75
Moyen	2.5 à 1.9	35 à 50
Fin	2.0 à 1.5	20 à 35

I.2.5.4. L'eau de gâchage [3]

L'eau est un constituant du béton nécessaire à l'hydratation du ciment, elle facilite aussi la mise en œuvre du béton ou du mortier. Une Classification classique permet de distinguer trois types d'eau :

- **L'eau chimiquement liée** : Elle n'est plus considérée comme faisant partie de la phase liquide car cette eau est combinée aux hydrates, dont elle fait partie, sous forme d'eau de cristallisation.
- **L'eau adsorbée** : est constituée par les couches de molécules d'eau sur la surface solide des pores. Soumises aux champs des forces électriques superficielles des particules de CSH et à l'action des forces de VAN DER WAALS. La structure électronique de la molécule d'eau ne varie que très peu dans ce cas-là.
- **L'eau libre** : cette eau échappe aux forces superficielles des particules solides. En excès par rapport à l'eau nécessaire à l'hydratation, elle occupe les micropores.

I.2.6. La formulation de béton [3]

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).

Pour notre projet de fin d'étude (PFE) nous utilisons la méthode de Dreux-gorisse qui sera présentée en détails dans la partie expérimentale.

I.3. Généralité sur les milieux agressives

I.3.1. Les attaques chimiques du béton

Les attaques chimiques sont un aspect crucial à prendre en compte dans la durabilité du béton, aussi importante que ses caractéristiques mécaniques.

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 [3].

Les agressions chimiques que peuvent rencontrer les matériaux à matrice cimentaires sont très variées. De par sa porosité et la composition chimique de la solution interstitielle, des échanges de matière peuvent se produire et être à l'origine d'une évolution de la composition solide de la pâte de ciment. Ces phénomènes de transport et de réaction s'effectuent à l'échelle de la microstructure de la pâte de ciment [17].

I.3.2. Différents types des attaques chimiques du béton

I.3.2.1. Les attaques sulfatiques

La résistance du béton aux attaques des sulfates est l'un des facteurs les plus importants pour sa durabilité. Le problème est aussi ancien que le béton et on a commencé à l'étudier il y a déjà près de 100 ans [3]. Ces attaques sont accompagnées de la formation de produits sulfatés "secondaires" après l'hydratation du ciment, entraînant une expansion importante et diverses détériorations chimico-mécaniques telles que des modifications des propriétés de transport, des fissures, et des pertes de résistance et de cohésion. Ces effets conduisent à terme à la ruine du matériau cimentaire, la durée dépendant de l'attaque et du type de ciment utilisé. Les attaques peuvent être externes, issues de l'environnement du béton, ou internes, provenant des composants du béton lui-même. Les sulfates peuvent avoir diverses origines, notamment des régulateurs de prise ajoutés au ciment, des granulats pollués, ou des sources externes telles que les sols, les eaux d'infiltration, ou la pollution atmosphérique. Ces sulfates peuvent détériorer le béton par expansion et perte des propriétés liantes des C-S-H, principalement via la cristallisation d'ettringite secondaire. Les études en laboratoire ont permis de mieux comprendre le processus de dégradation, de la mise en contact avec la solution agressive à la destruction plus ou moins complète du béton [18].



Figure I.7. Des cas pathologiques d'éléments en béton avant et après contact de sulfate. [18]

a. Sources des sulfates :

- On distingue deux types d'attaques : les attaques par les sulfates externes présents

dans l'environnement du béton et les attaques sulfatiques internes pour lesquelles les sulfates proviennent des composants du béton lui-même. [19]

- Lorsqu'il s'agit d'une attaque par les sulfates provenant de l'extérieur, il y a formation de couches de gypse et d'ettringite secondaire ainsi que la thaumasite à partir de la surface exposée aux sulfates. L'attaque par les sulfates externes est souvent combinée avec l'attaque par le cation correspondant, selon la provenance des sulfates, qui peuvent réagir avec certains granulats ou fillers, ou avec les C-S-H ou la portlandite, et contribuer davantage à la dégradation du béton. De plus, l'attaque par les sulfates externes peut être combinée à une attaque par l'acide ce qui accélère également la destruction de la pâte hydratée.

- Lorsqu'il s'agit d'une attaque interne par les sulfates, ces derniers proviennent presque uniquement des sulfates de calcium qui se trouvent dans le béton dès sa confection. Par conséquent, ces sulfates sont uniformément répartis dans la pâte hydratée et le seul produit expansif de la réaction est l'ettringite. L'ettringite secondaire qui est le résultat d'une attaque par les sulfates externes, n'est pas seule à endommager le béton, c'est plutôt la formation du gypse qui contribue à la fissuration, la lixiviation et le délaminage des couches superficielles.[20] L'origine des sulfates peut être : externe (environnement) ou interne (composants du béton).

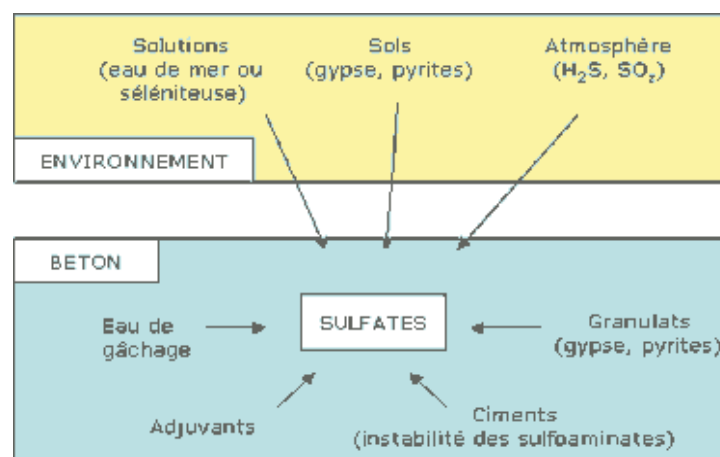


Figure I.8. L'origine des sulfates (interne ou externe).[21]

Les sulfates peuvent avoir différentes origines :

- Ils peuvent d'abord provenir du régulateur de prise ajouté au ciment (gypse, hémihydrate, anhydrite) auquel s'ajoutent, en proportions variables, les sulfates contenus dans le clinker lui-même : sulfates alcalins (arcanite K_2SO_4 , aphtitalite $K_3Na(SO_4)_2$, langbeinite $Ca_2K_2(SO_4)_3$) et solutions solides dans les silicates de calcium.
- Ils peuvent également provenir de l'utilisation de granulats pollués par des sulfates d'origine naturelle ou artificielle (gypse, plâtre, anhydrite ou encore pyrites).
- Ils peuvent venir du milieu extérieur où ils se trouvent sous forme solide (sols gypseux), liquide (eaux naturelles percolant à travers les sols et solutions plus ou moins concentrées d'origine diverses), ou gazeuse (pollution atmosphérique par le SO_2):

- Dans les sols où ils constituent un élément nutritif des plantes, leur concentration moyenne est comprise entre 0,01 % et 0,05 % en masse de sol sec.

Des concentrations beaucoup plus importantes (> 5 %) peuvent se rencontrer dans les sols contenant du gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ou de l'anhydrite CaSO_4 . La décomposition biologique aérobie des matières organiques et l'utilisation d'engrais sont également une source possible de sulfates. Le sulfate d'ammonium $\text{SO}_4(\text{NH}_4)_2$, provenant des engrais, est particulièrement agressif. Les sols peuvent parfois contenir des sulfures de fer (pyrites) qui, par oxydation, peuvent donner naissance à l'acide sulfurique H_2SO_4 , puis au gypse s'ils sont en contact de carbonate de calcium ou de chaux.

- Les eaux d'infiltration peuvent se charger en ions SO_4^{2-} au contact des sols ou des remblais contenant des sulfates.
- Dans les environnements industriels et urbains, l'atmosphère peut contenir de l'anhydride sulfureux SO_2 provenant des gaz de combustion (charbon, carburants divers). En présence d'humidité ces gaz sont susceptibles de s'oxyder pour donner de l'acide sulfurique très agressif.
- Les fermentations anaérobies qui se produisent dans les ouvrages d'assainissement conduisent également à la formation d'acide sulfurique à partir de l'hydrogène sulfuré dégagé.
- L'eau de mer contient des sulfates en solution. [22]

b. Mécanismes d'attaques :

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

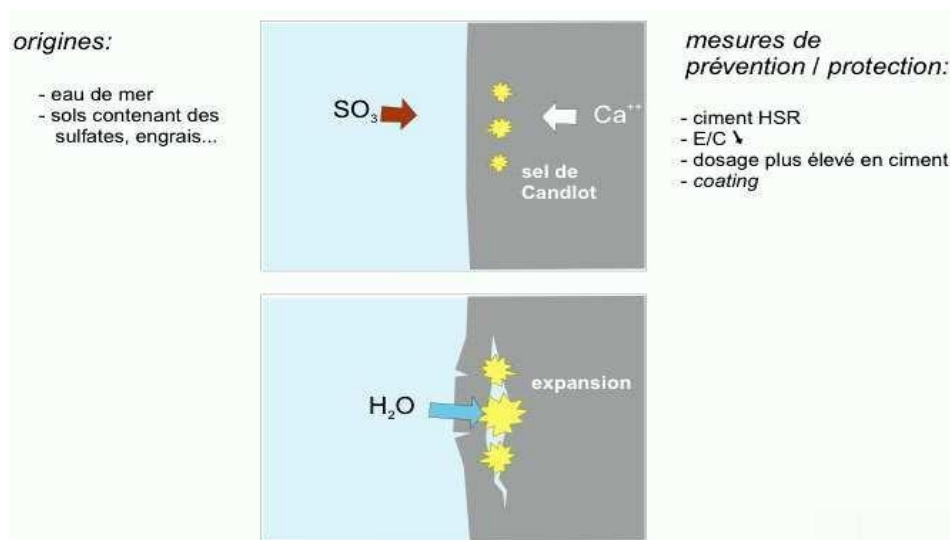


Figure I.9. L'attaque par les sulfates. [23]

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.

c. Processus d'attaque par les sulfates internes :

La dégradation des bétons par les sulfates est due principalement à des phénomènes d'expansion en relation avec la cristallisation d'ettringite, dite ettringite secondaire. La formation de cette ettringite expansive est à distinguer de l'ettringite primaire, obtenue au premier stade de l'hydratation des ciments portland par réaction du gypse, car cette ettringite primaire n'est jamais expansive. Schématiquement, la formation de l'ettringite est résumée ci-après :

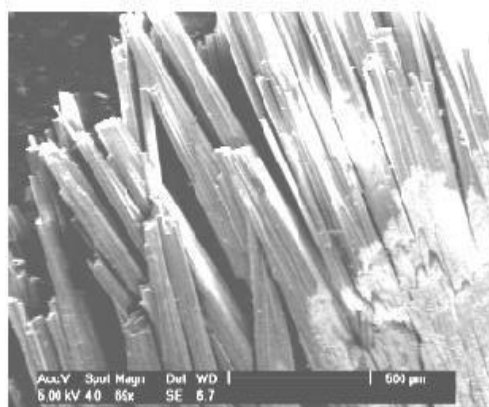


Figure I.10. La formation de l'ettringite secondaire [3]

A - Formation de gypse dit secondaire par opposition au gypse primaire ajouté au ciment comme régulateur de prise, la formation du gypse secondaire résulte d'une réaction de substitution entre la portlandite et le sulfate de sodium.

B - Réaction entre le gypse secondaire et les aluminates de calcium du ciment forment l'ettringite, plusieurs scénarios sont envisageables :

- Soit à partir de reliquats de C_3A anhydre :
- $C_3A + 3CaSO_4 \cdot 2H_2O + 24-26H_2O \rightarrow C_3A \cdot CaSO_4 \cdot H_{30-32}$
- Soit à partir de l'aluminate tétracalcique hydraté C_3AH_13 ou du monosulfoaluminate de calcium $C_3ASO_4H_{12}$.

d. Processus d'attaque par les sulfates externes :

Au travers du développement qui suit, ce type de dégradation sera abordée autant par son aspect phénoménologique que par les conséquences et les moyens de s'en prémunir en agissant sur des paramètres de formulation.

Les études en laboratoire ont conduit à mieux définir les différentes étapes du processus qui entraîne la dégradation du béton :

- Mise en contact de la surface du béton avec la solution agressive.
- Pénétration des anions SO_4 , par diffusion limitée à une zone superficielle.
- Pénétration du cation associé et réaction de substitution : cation (Mg^{+2} , Na^{+2} ,

$\text{NH}_4\dots$), Ca^{+2} et formation de gypse en solution ou cristallisé, suivant les concentrations en SO_4 et en $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

- Réaction ponctuelle des ions sulfates avec les aluminates anhydres (C_3A) ou hydraté (C_4AH_x et $\text{C}_3\text{ACASO}_4\text{H}_{12}$).
- Fissuration par effet de coin due aux pressions de cristallisation de l'ettringite.
- Accentuation de la pénétration des sulfates à la faveur des fissures.
- Progression de l'attaque suivant un front de dégradation, dont l'épaisseur a tendance à s'élargir au cours du temps.
- Destruction plus au moins complète du béton.[24]

I.3.2.2. Les dégradations dues aux attaques marines :

Les environnements maritimes sont parmi les milieux naturels les plus agressifs vis-à-vis des matériaux à matrice cimentaire. En termes de composition chimique, par exemple, la présence d'ions étrangers à la solution interstitielle, tels que les ions chlorure ou magnésium peut conduire à la formation de précipités, la dissolution ou la modification de la structure de certaines phases, au sein de la matrice cimentaire. A l'échelle de structures en béton armé, des risques de corrosion des armatures sont à considérer, à la suite de la pénétration d'ions chlorure ou d'un abaissement du pH de la solution interstitielle.

L'eau de mer est intrinsèquement un milieu modérément agressif chimiquement. Toutefois, dans les zones de marnage et d'aspersion, soumises aux cycles d'humidification/ séchage ainsi qu'aux effets mécaniques des vagues, le milieu doit être considéré comme fortement agressif. L'eau de mer est constituée de sels chargés en ions chlorures de composés sulfatés contenant les ions sulfates (SO_4^{2-}), etc. Ces ions sont nocifs au béton lorsqu'ils pénètrent en son sein.[22]

I.3.2.3. Attaque par les ions chlorures

L'attaque par les ions chlorures constitue l'une des principales causes de dégradation des structures en béton armé. Ces ions, provenant principalement du milieu extérieur, peuvent également être présents dans le béton lors du gâchage ou diffuser dans celui-ci à partir de l'environnement. La corrosion des armatures est initiée par la dissolution du métal et la formation d'ions ferreux, suivie de l'hydrolyse de ces derniers, entraînant l'acidification et la formation d'hydroxyde ferreux, conduisant à la rouille. La diffusion d'ions chlorures dans le béton dépend de la nature du ciment et de la porosité de la pâte de ciment, ainsi que de la concentration de la solution environnante en sels. Cette diffusion favorise la corrosion en diminuant la résistivité de l'électrolyte et en dépassivant la couche superficielle de l'acier, entraînant une corrosion localisée et accélérée sur les zones anodiques. Les chlorures existent sous forme libre ou liée dans le béton, seuls les premiers pouvant diffuser et jouer un rôle actif dans le processus de corrosion des armatures.[25]



Figure I.11. Agression du béton par activité des chlorures. [24]

I.3.2.4. La carbonatation

La carbonatation, phénomène naturel de vieillissement du béton, résulte de la réaction entre les composés du ciment, principalement la portlandite, et le dioxyde de carbone atmosphérique. Cette réaction forme des carbonates de calcium, libérant de l'eau et réduisant le pH du béton, ce qui initie la corrosion des armatures. À une certaine profondeur à l'intérieur du béton, généralement à partir de 25 à 30 mm, la carbonatation cesse en raison des dépôts de calcaire de la pâte de ciment, stabilisant le pH et prévenant la corrosion. Les bétons immergés ne carbonatent généralement pas, mais des manifestations peuvent survenir sur des faces intérieures lors d'humidification de l'air. La composition du béton, le taux d'humidité, la résistivité électrique, la présence d'oxygène et d'autres agents agressifs tels que les sulfates et les perchlorates influencent la corrosion des armatures. La résistivité électrique du béton, dépendant de sa composition, de sa microstructure, de l'humidité et de la température, joue un rôle crucial dans ce processus.[24][26].

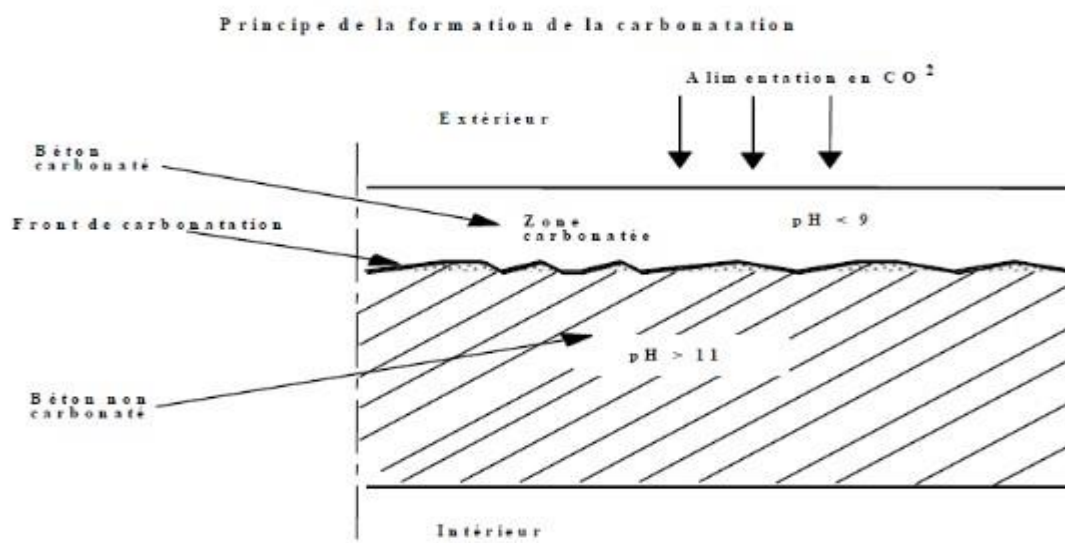


Figure I.12. Coupe théorique d'un mur en béton.[27]

I.3.2.5. L'alcali-réaction

L'alcali-réaction, également connue sous le nom de réaction alcali-granat, est une réaction chimique entre la silice amorphe ou mal cristallisée des granulats réactifs et certains ions de la solution interstitielle. Cette réaction engendre un gonflement des ouvrages en béton, conduisant à des fissures et à une diminution des caractéristiques mécaniques, mettant ainsi en danger la sécurité et la durabilité des structures. Cette réaction peut se manifester sous trois types principaux : alcali-silice, alcali-silicate, et alcali-carbonate. Les granulats réactifs, constitués de silice amorphe ou mal cristallisée, réagissent avec la solution interstitielle, formant des gels silico-alcalins ou calco-silico-alcalins. Les alcalins nécessaires à cette réaction proviennent du ciment et d'autres composants du béton, se dissolvant lors de l'hydratation. Il est crucial de prédire l'évolution du gonflement et des dégradations, car il n'existe actuellement aucun moyen d'arrêter cette réaction [29][28].

I.3.2.6. La lixiviation en eau douce :

La lixiviation en eau douce désigne la dissolution progressive des hydrates de la pâte de ciment durcie lorsque le béton est en contact avec une eau douce, de faible pH et peu chargée en ions. Cela provoque une décalcification, une augmentation de la porosité, et une diminution des propriétés mécaniques, telles que la résistance à la compression, le module d'élasticité et la résistance en flexion. Les cinétiques de dégradation varient en fonction du matériau et de l'environnement. Par exemple, des études ont montré des différences significatives dans l'épaisseur des couches dégradées de béton en fonction du type de ciment et de la présence d'ions dissous, avec des dégradations plus rapides en eau saline qu'en eau douce.[28]

I.3.3. Mécanisme général des attaques chimiques

I.3.3.1. Durabilité des bétons vis-à-vis des environnements chimiquement agressifs

Deux processus majeurs sont mis en jeu lors des attaques chimiques du béton :

- Dissolution et hydrolyse des composés hydratés ;
- Précipitation de composés pouvant avoir un caractère nocif ou non.

L'attaque du béton au contact d'une eau pure ou d'une solution plus moins chargée en ions agressifs se produit généralement selon ces mécanismes de dissolution/précipitation régis par des équilibres thermodynamiques. Dans un solvant polaire tel que l'eau, les interactions fortes entre les dipôles du solvant et les ions d'un composé ionique entraînent la dissolution et la dissociation plus ou moins complète de ce dernier suivant un processus de solvatation des ions. Les substances nuisibles sous forme gazeuse ou solide n'agissent qu'en présence de l'humidité, étant donné que les réactions nuisibles ne peuvent se produire qu'en solution.

Le plus souvent, les substances nuisibles entrent en contact avec le béton sous forme dissoute [25].

I.3.3.2. Conséquences générales

Les dégradations chimiques provoquées dans les bétons sont issues des réactions d'hydrolyse ou de dissolution [30]. L'hydrolyse entraîne la décomposition de certains sels par l'eau qui

est elle-même décomposée. Suivant la perméabilité de béton, le pH et la capacité de renouvellement de l'eau, la réaction peut conduire à un lessivage plus ou moins rapide de la chaux se traduisent par une perte de masse, un accroissement de la porosité et la destruction progressive de liant. Ou bien par une précipitation de composés, nocifs ou non qui va se manifester par : gonflement, fissuration, perte de résistance [31].

La dissolution des hydrates, accompagnée ou non de la précipitation de composés nouveaux, a deux effets majeurs :

D'une part, un accroissement de la porosité du béton qui a pour conséquence une augmentation de sa perméabilité et de sa diffusivité. L'augmentation de porosité se traduit également par une dégradation plus ou moins importante des caractéristiques mécaniques : module d'Young, résistances ;

D'autre part, selon la nature, la solubilité et les conditions de précipitation des composés néoformés, un gonflement et une fissuration plus ou moins importants du matériau : ce peut être le cas, par exemple, de l'ettringite due à une agression par des sulfates d'origine externe.[30]

I.3.4. Principaux milieux agressifs

I.3.4.1. Eaux naturelles

a. Paramètres d'agressivité [32]

L'agressivité d'une eau naturelle dépend de trois paramètres interdépendants qui sont le pH, la dureté et la teneur en dioxyde de carbone agressif.

a. Le pH : Le pH d'une eau traduit son caractère acide ou basique. Elle sera acide ($\text{pH} < 7$) si elle contient du dioxyde de carbone libre, des acides minéraux ou organiques ou encore des sels d'acides forts et de base faible NH_4NO_3 par exemple dont l'hydrolyse génère des protons H^+ (ou H_3O^+) responsables de l'acidité. Elle sera basique si elle contient des carbonates, des bicarbonates ou des ions hydroxydes OH^- .

b. La dureté : La dureté peut être définie par le titre ou degré hydrotimétrique TH qui correspond à la somme des concentrations en cations métalliques, à l'exception de ceux de l'hydrogène et des métaux alcalins :

$$\text{TH} = [\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}] + [\text{Autres cations métalliques Fe, Al, Mn, Sr}]$$

La dureté peut être définie également par le titre alcalimétrique complet (TAC) qui indique la teneur en hydroxydes libres (OH^-), carbonates (CO_3^{2-}) et bicarbonates (HCO_3^-) alcalins ou alcalino-terreux.

$$\text{TAC} = [\text{OH}^-] + [\text{CO}_3^{2-}] + [\text{HCO}_3^-]$$

c. Le dioxyde de carbone : Le dioxyde de carbone agressif représente une partie du dioxyde de carbone dissous dans toute eau naturelle.

I.3.4.2. Eaux agressives [33]

Un ouvrage peut être soumis à de multiples agressions engendrées par l'action des sels ou des gaz en solution dans l'eau (eaux souterraines, eaux de mer, pluie, etc.). Les eaux peuvent être chargées en sels minéraux les plus divers en fonction des sols traversés. Les milieux les plus

agressifs sont soit acides, soit salins (chlorures, nitrates, et surtout sulfates de sodium, de calcium ou de magnésium).

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

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

a. L'eau de mer :

Les principaux éléments nocifs contenus dans l'eau de mer sont le chlore, sous forme de chlorures de sodium et de magnésium (environ 30g/l), le sulfate, sous forme de sulfates de magnésium, de calcium et de potassium (environ 3.7g/l), les micro-algues (très variables) [32]



Figure I.13. Les attaques des milieux agressifs [32]

On sait que ce sel se cristallise avec une très grande quantité d'eau ce qui entraîne une augmentation de volume des mortiers et de béton ceux-ci gonflent et se désagrègent et fissurent.

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

- Agressions mécaniques dues à l'action des vagues, de la houle et des marées, abrasion due aux chocs des corps flottants et érosion due aux effets des vagues.
- Agressions chimiques dues à l'action en particulier des chlorures présents dans l'eau de mer et des sulfates, mais aussi des nombreux sels dissous dans l'eau de mer et dans certains cas à la pollution des eaux.
- Agressions climatiques dues aux variations de température.
- Agressions biologiques de micro-organismes.

b. Les eaux acides :

L'acidité de l'eau est, en générale, mesurée par son PH. L'ion hydrogène contenu dans l'eau de gâchage n'est pas à proprement parler nocif pour le béton, car il peut être très largement neutralisé par le ciment qui contient une réserve importante de produit basique.

Les eaux acides peuvent être nocive à cause de l'anion qui est lié à l'ion H^+ , en générale Cl^- ou

SO²⁻, mais parfois tout autre (acide humique, acide lactique, etc.).

c. Les eaux de recyclage :

Les eaux de recyclages sont, en générale, soit des eaux qui ont déjà été utilisées pour gâcher du béton, soit des eaux de lavage du matériel (malaxeurs, camions, etc.).

Elles peuvent parfois avoir été additionnées d'eaux de pluie ou de ruissellement.

Elles sont surtout chargées en éléments fins qui proviennent du ciment, des additions et des granulats ou en composés chimiques qui proviennent du ciment, (sulfates, etc.) et des adjuvants. Lorsque ces eaux restent conformes aux spécifications de la norme, elles sont utilisables sans danger. Une eau non conforme peut être amenée à conformité par un traitement approprié et notamment à l'aide de bassins de décantation. Les matières en suspensions peuvent, néanmoins, déroger sans risque à la limite maximale de 4% prévue dans la norme pour les autres eaux.

d. Les eaux de rejets industriels :

Dans certains cas, ces eaux peuvent contenir des impuretés qui vont faire intervenir des réactions complexes avec le ciment : c'est le cas des usines alimentaires ou de la plupart des rejets organiques et chimiques. Elles ne devraient donc être utilisées qu'après une vérification approfondie de leur non-nocivité.

I.3.4.3. Milieux acides [32]

La solution interstitielle du béton est basique (pH de 13), lorsque contact avec une solution acide (pH inférieur à 7), l'équilibre chimique des hydrates comme la portlandite et les silicates du calcium hydraté C-S-H se déstabilise, ce qui influe sur la stabilité de la matrice cimentaire. La durabilité d'un matériau cimentaire dans un milieu acide dépend de plusieurs facteurs tels que :

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

a. Sources des acides :

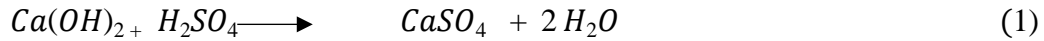
Les milieux acides les plus fréquents sont :

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

exposée du béton.

b. Mécanisme d'attaque :

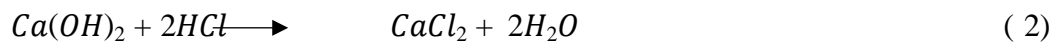
En général, on peut établir qu'un acide est d'autant plus nuisible que les sels de calcium formés sont plus facilement solubles. L'acide sulfurique est relativement inoffensif, car les sulfates de calcium sont difficilement solubles dans l'eau. Mais les ions de sulfate jouent en l'occurrence un rôle 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 chloridrique 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).

I.3.4.4. Milieux sulfatiques

La résistance du béton aux attaques des sulfates est l'un des facteurs les plus importants pour sa durabilité.

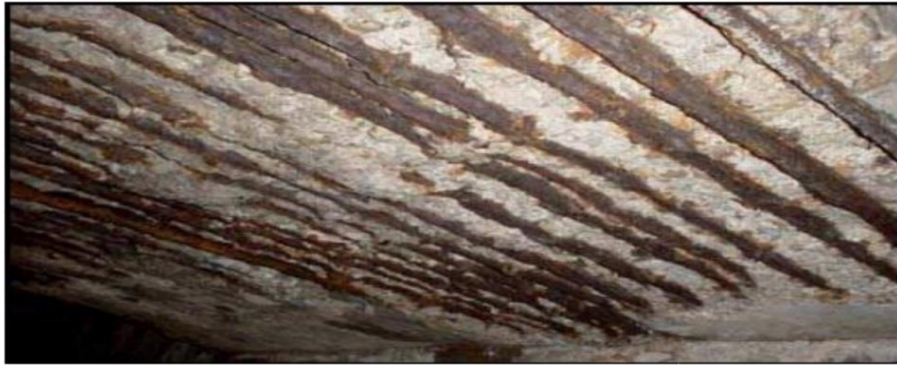
L'action des sulfates sur le béton fait intervenir un certain nombre de phénomènes physico-chimiques complexes, dépendant de nombreux paramètres (type de sulfate, type de ciment, formule du béton, classe d'exposition...). Les réactions chimiques auxquelles elle conduit ainsi que leurs conséquences physiques (augmentation de la porosité, expansion...), peuvent provoquer des dégradations plus ou moins importantes. Bien que les cas réels d'ouvrages atteints soient relativement restreints, l'action des sulfates est généralement considérée comme un risque sérieux.

Les ions sulfates sont présents de façon naturelle dans certains sols et eaux souterraines. Les attaques sulfatiques sont dites externes quand les ions sulfates proviennent de l'environnement. Ainsi, ce type de dégradation est considéré comme une action environnementale, dans la définition des classes d'exposition XA, environnements chimiquement agressifs.

Le béton doit présenter une résistance chimique, lorsqu'il est exposé à des attaques chimiques.

Dans la norme EN 206-1, les conditions environnementales sont exprimées sous forme de classes d'exposition. Selon leur teneur en sulfates, les sols naturels et les eaux souterraines entrent dans

les classes d'exposition XA1, XA2 ou XA3. Les classes d'exposition comprennent certaines valeurs limites recommandées [32].



*Figure I.14. Les attaques des sulfates sur les armatures et le béton.
[32]*

I.4. 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 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, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ potentiels, C_3A , C_3S ...), 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 II

**L'effets des additifs et l'influence de la
fissuration sur le comportement du béton**

Chapitre II

L'effets des additifs et l'influence de la fissuration sur le comportement du béton

II.1. Introduction

Différents ajouts minéraux, utilisés comme matières cimentaires supplémentaires en addition ou en substitution d'une partie du ciment, fournissent au béton une matrice plus dense et résistante aux produits agressifs tels que les sulfates et les chlorures. Leur finesse, composition chimique, structure (vitreuse ou cristalline) et solubilité en milieu alcalin gouvernent leurs propriétés cimentaires, et leur contenu en phase amorphe est clé pour leur réactivité. L'introduction des ajouts minéraux segmente les pores capillaires et offre de nombreux sites de germination pour les produits d'hydratation, accélérant ainsi l'hydratation du ciment et réduisant les dimensions des cristaux de chaux. [34]

En Algérie, l'industrie cimentaire est cruciale et l'utilisation de matériaux locaux comme le laitier d'El-Hadjar, le calcaire et la pouzzolane naturelle de Beni-Saf permet d'augmenter la production à moindre coût. [37]

Les ajouts minéraux présentent des avantages techniques en améliorant la maniabilité du béton, sa résistance mécanique, son imperméabilité et sa ténacité aux attaques chimiques, ainsi que sa résistance à la fissuration grâce à une faible chaleur d'hydratation. Économiquement, ils réduisent les coûts de production en remplaçant le coûteux ciment Portland par des sous-produits moins énergivores.

Environnementalement, la substitution partielle de clinker par des ajouts minéraux réduit les émissions de CO₂, contribuant à une production de ciment plus durable. [35]

II.2. L'effets des additifs sur le comportement du béton

II.2.1. Avantages de l'utilisation des ajouts minéraux dans le béton [36]

Les ajouts cimentaires finement broyés comblent les interstices granulaires inaccessibles aux grains de ciment, rendant le mélange plus fluide et diminuant ainsi la quantité d'eau nécessaire. L'intégration de ces ajouts dans le béton offre de nombreux avantages, améliorant significativement ses propriétés et sa performance. Parmi ces avantages :

- **Amélioration de l'ouvrabilité :**
 - Réduction du ressuage et de la ségrégation.
 - Diminution du besoin en eau (sauf pour les ajouts à très grande surface spécifique comme les fumées de silice).
 - Demande en eau et maniabilité dépendent de la forme et de la granulométrie des particules

- **Chaleur d'hydratation :**
 - Réduction significative de la chaleur d'hydratation, diminuant la fissuration thermique.
 - Chaleur d'hydratation des ajouts pouzzolaniques est environ la moitié de celle du ciment portland.
- **Durabilité :**
 - Meilleure résistance aux acides et aux sulfates par rapport au ciment Portland.
 - Diminution de la quantité de CH et amélioration de l'imperméabilité.
 - Réduction de l'expansion des bétons due aux réactions alcali-silice.
- **Développement des résistances :**
 - Résistances à long terme souvent supérieures à celles du ciment Portland sans ajouts.
 - Affinage des pores et grains, augmentation de la quantité de C-S-H.
- **Développement des bétons à haute résistance :[37]**
 - Augmentation des résistances finales tout en réduisant les résistances initiales.
 - Pouzzolanes réactives, comme les fumées de silice, permettent d'obtenir des bétons à haute résistance.
 - Résistances à jeune âge et à long terme augmentées par l'accélération de l'hydratation et la réaction pouzzolanique.

II.2.2. Les inconvénients d'utilisation des ajouts minéraux [38]

- Retard de prise.
- Résistance à la compression à jeune âge plus faible.
- Mûrissement plus long.
- Résistance à l'écaillage controversée.
- Le broyage et le transport plus cher.

Tableau II.1. Les avantages et les inconvénients de certains ajouts cimentaires [39]

Ajout cimentaire	Avantage	Inconvénient
Fumée de silice	<ul style="list-style-type: none"> • Accroissement des résistances mécaniques. • Affinement de la structure poreuse. • Diminution des coefficients de diffusion. • Diminution du pH et des concentrations en alcalins de la solution interstitielle. 	<ul style="list-style-type: none"> • Allongement du temps de malaxage afin d'assurer une dispersion homogène de la fumée de silice. • Accroissement de la demande en eau • Accroissement du retrait Endogène.
Cendre volantes	<ul style="list-style-type: none"> • Réduction de la demande en eau. • Affinement de la structure poreuse. • Réduction de la chaleur d'hydratation et de la température maximale atteinte. • Résistance accrue à long terme. • Diminution des coefficients de diffusion. 	<ul style="list-style-type: none"> • Variabilité de composition chimique des cendres volantes et une réactivité variable. • Retard de prise. • Affaiblissement des résistances mécaniques au jeune âge.
Laitier de haut Fourneau	<ul style="list-style-type: none"> • Affinement de la structure poreuse. • Réduction de la chaleur d'hydratation. • Diminution de la perméabilité. 	<ul style="list-style-type: none"> • Retard de prise. • Augmentation du retrait Endogène.

II.2.3. Classification des ajouts minéraux

Ces matériaux proviennent principalement des sous-produits de l'industrie métallurgique, des centrales thermiques à charbon, de la nature et sont classés selon la norme NF EN 197 1 en ajouts minéraux inertes et actifs [35]. Ils se divisent selon leur réactivité comme le montre le **tableau (II.1)** ci-dessous.

Tableau II. 2. Classification des ajouts selon leur réactivité.

Type	Réactivité	Matériau
Hydraulique	Fortement réactif	Ciments spéciaux-chaux hydraulique
Hydraulique latent		Laitier granulé-cendres volantes riche en calcium (calciques)
Pouzzolanique	Fortement réactif	Fumée de silice
	Moyennement réactif	Cendres volantes pauvre en calcium, pouzzolanes naturelles (verre volcanique, tufs volcanique, terres a diatomées)
	Faiblement réactif	Scories cristallines
Inerte	Non réactif	Fillers (farine calcaire...) fibres, pigments colorants, matières expansives, dispersions synthétique

II.2.4. Principaux additifs minéraux ajoutés au béton

II.2.4.1. Laitier de haut fourneau (GGBS)

Le laitier de haut fourneau est un sous-produit industriel provenant des déchets du minerai de fer et de coke. A la base du haut-fourneau, la fonte et le laitier sont séparés par densité en utilisant un dispositif de siphonage. [40]

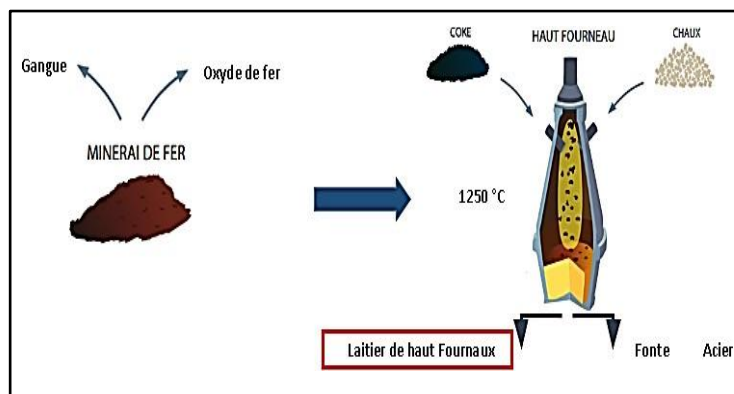


Figure II.1. Principe d'obtention des laitiers de haut fourneau

On peut obtenir deux types de laitiers de haut fourneau suivant le processus de refroidissement :

- Le laitier de haut fourneau est dit cristallisé lorsqu'il se refroidit et se cristallise lentement à l'air sous forme de roche dure. Après le début de la solidification, ce laitier est arrosé afin d'en abaisser la température puis fragmenté, concassé et criblé.
- Le laitier de haut fourneau est dit vitrifié, ou granulé, s'il est trempé brutalement dans l'eau (arrosage violent et abondant d'eau sous haute pression). L'énergie calorifique contenue dans le laitier en fusion provoque son explosion et forme instantanément de fines particules d'un produit vitreux désordonné. Il possède ainsi une énergie interne plus élevée qu'à l'état cristallin, ce qui le rend plus réactif chimiquement. Lors de son hydratation, le laitier évoluera sous une forme cristalline stable pouvant être mise à profit pour les formulations de ciments ou de bétons. Le laitier granulé nécessite beaucoup d'eau pour son refroidissement brutal et son passage de l'état liquide à l'état solide. Le calcul du bilan thermique, qui tient compte de la variation de l'enthalpie, quand le laitier passe de 1400 °C à moins de 100°C, montre qu'il faut près de 600 litres d'eau par tonne de laitier.[40]



Figure II.2. Laitier de haut fourneau (Rocheux et Granulé) [40]

- Le laitier de haut-fourneau vitrifié (granulé) possède des propriétés particulières. Il a une structure vitreuse, c'est-à-dire une structure où les atomes sont désordonnés, contrairement à un cristal. On parle aussi de solide amorphe. Sa composition chimique peut varier dans de larges limites, suivant la pureté du minerai, la nature et la quantité des fondants, la nature du combustible et le procédé employé. En effet, Les laitiers, comme les ciments Portland sont des produits à forte hydraulité. La différence majeure est que le ciment est rapidement soluble dans l'eau, le pH de la solution est voisin 13 (**Fig.II.4**), Le laitier s'hydrate très lentement si le pH est de l'ordre de 10, pour des pH supérieurs l'hydratation est plus rapide. L'emploi de laitier vitrifié dans les ciments a largement précédé la normalisation, où les ciments au laitier, appelés parfois « ciments métallurgiques ».

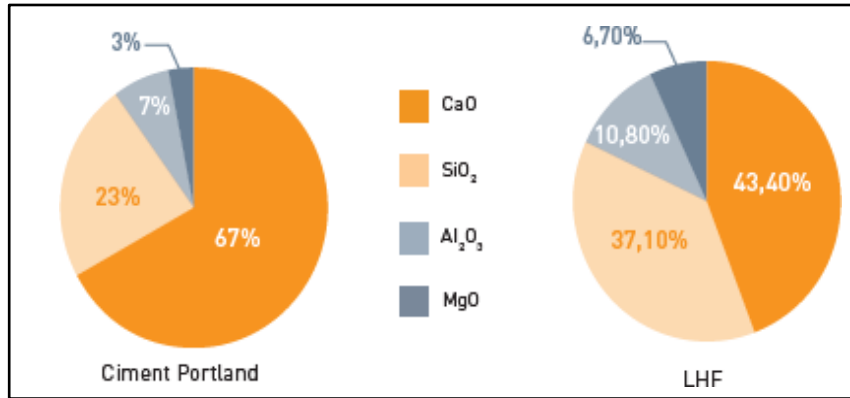


Figure II.3. Comparaison des compositions chimiques des ciments Portland et des laitiers de haut-fourneau [40]

II.2.4.2. Méta kaolin (MK)

Le méta kaolin (MK) est obtenu par la calcination de la kaolinite à une température entre 500°C et 800°C. Dans ce qui suit, nous présentons d'abord le kaolin, son utilisation et ses différents gisements en Algérie. Ensuite, nous présentons le méta kaolin, sa structure chimique et sa composition minéralogique.

a. Kaolin

Le terme kaolin a été utilisé, pour longtemps, pour désigner l'argile chinoise extraite du village « Kao ling ». Actuellement, le terme kaolin désigne les minéraux ayant une composition en kaolinite ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) supérieure à 50%. Ils peuvent être différents selon les conditions géologiques de leur formation, leurs compositions minéralogiques moyennes et leurs propriétés physiques et chimiques. Selon la littérature, il existe une multitude de kaolins, les gisements les plus importants et exploités dans le monde sont en Angleterre, en Géorgie, en Caroline (Etats-Unis) et en Amazonie (Brésil).

Le kaolin est souvent blanchâtre, la présence d'impuretés, particulièrement à base de fer ou de titane, donne au kaolin une certaine coloration. Généralement, le kaolin naturel brut contient d'autres impuretés telles que le quartz, feldspath. Le kaolin présente une grande surface spécifique (entre 10 et 100 m²/g) et une masse volumique d'environ 2,6 g/cm³.

b. Principaux usages du kaolin

Le kaolin est largement utilisé dans la fabrication des ustensiles en porcelaine, des isolants électriques, des sanitaires et des matériaux car il présente l'avantage d'être très peu onéreux et disponible en gisements facilement exploitables. Quelques exemples d'utilisation du kaolin sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau II.3. Utilisations du kaolin [41]

Rôle	Utilisation
Couchage	Couchage de papier, peinture, encre.
Charge	Charge minérale de papier, Caoutchouc, Plastique, Polymères, adhésifs, textiles, linoléum.
Matière première	Catalyseur, fibre de verre, ciment, industrie du bâtiment, céramique, plate, filtre, fonderie, production des composés chimiques d'aluminium, production de zéolite.
Diluant, adsorbant ou Transporteur	Polissage, engrais, insecticide, détergent, produits pharmaceutiques, Produits de beauté, tannerie de cuirs.

c. Gisements de kaolin en l'Algérie

Il existe trois grands gisements de kaolins tous situés au nord Est de l'Algérie. Deux d'entre eux, appelés les gisements de *kaolin de Tamazert* et *d'Adjarda* sont situés au niveau de la Wilaya de **Jijel** (daïras d'El Milia et de Chekfa). Le troisième gisement est situé au niveau de *Djebel Debagh* dans la Wilaya de **Guelma**.

Le gisement de kaolin de Tamazert est divisé en trois principaux corps à savoir (**Fig.II.5**) : le corps central le plus important en réserves, le corps nord en deuxième position et le corps Sud- Ouest le moins important en réserves mais celui qui présente la meilleure qualité.

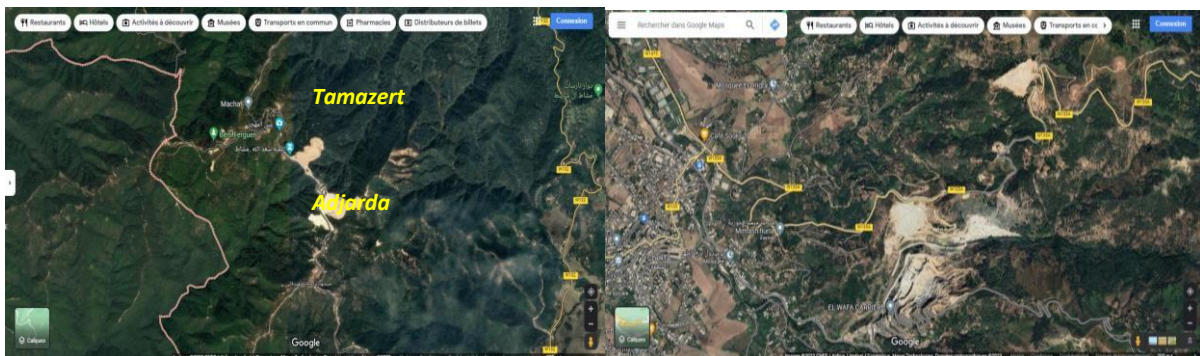


Figure II.4. Gisements de kaolin de Tamazert et d'Adjarda (Jijel) Source : Google Earth, 2021

Le kaolin naturel de Djebel Debagh (kaolin DD) est de formation secondaires ou sédimentaires entraîné par les eaux de ruissellement. Ce gisement est de nature hydrothermal et à proximité se trouve des sources thermales réputées. Il est connu et exploité depuis un siècle (**Fig.II.6**). Les différentes qualités du kaolin DD varie avec les filons d'extraction. Certains filons donnent un kaolin pur avec une concentration d'une pureté d'oxydes métalliques inférieurs à 1% en poids.



Figure II.5. Gisement du kaolin de Djebel Debagh (Guelma) Source : Google Earth, 2021

Le kaolin DD est classifié en 4 catégories ou nuance selon leurs qualités (**Tab. II.1**). Le kaolin DD3 est encore disponible, en revanche les autres kaolins sont épuisés. Le DD3 se présente en blocs friables composés de kaolin blanc (DD1) et de kaolins grisâtres (**Fig.II.7**) Le kaolin DD3 présente une densité de 1.70 g/cm^3 et une humidité de $15 \pm 2 \%$ à l'état nature.

Tableau II.4. Composition chimique des différents types de kaolin DD [41]

Catégorie	SiO ₂	AlO ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	MnO ₂	SO ₃	P.F
Kaolin DD 1	45.3	38.8	0.01	0.00	0.15	0.23	0.02	-	-	0.24	15.3
Kaolin DD 2	43.4	38.9	0.11	0.02	0.21	0.31	0.04	0.02	0.57	0.34	15.9
Kaolin DD 3	42.9	37.7	0.32	0.03	0.74	0.23	0.94	-	0.47	0.56	16.5
Kaolin DD 4	40.5	38.7	0.32	0.06	0.24	0.18	0.08	0.16	2.68	0.43	16.0

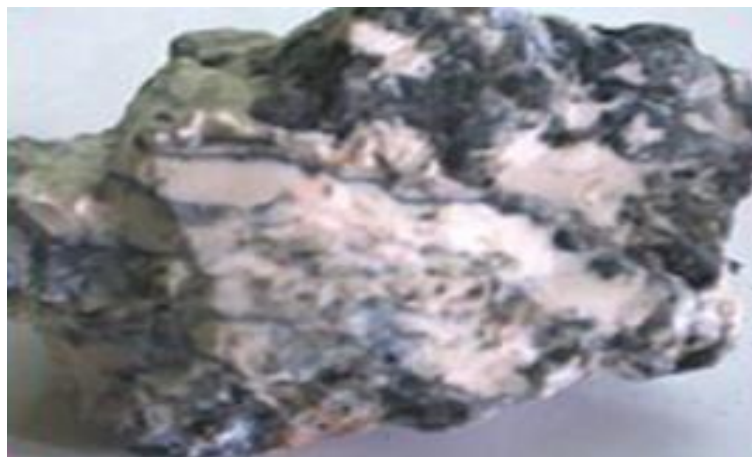


Figure II.6. Échantillon brut de kaolin DD3 [41]

d. Metakaolin

Le métakaolin (MK) est une pouzzolane de synthèse, issue de la calcination du kaolin. Il est un matériau en poudre fine (**Fig II.8**). Il est utilisé comme un additif efficace pour produire le béton à haute performance (BHP) depuis les années 1990 pour son efficacité élevée et son

prix relativement modéré. Le MK est également utilisé comme agent d'amélioration des sols argileux.

Le métakaolin (MK) est obtenu par calcination du kaolin à une température entre 500°C et 800°C et il perd son eau par des hydroxylation. À l'échelle industrielle, il existe principalement deux modes de calcination, une calcination lente (5 heures) et une calcination flash en couche fine (très rapide comparativement à la première méthode).



Figure II.7. Photo du Méta kaolin

d.1. Structure chimique

Certains auteurs ont proposé le modèle de structure présenté dans la Fig II.9 à partir d'observation en diffraction des rayons X. Ce modèle montre la subsistance d'un certain ordre structural dans la métakaolin.

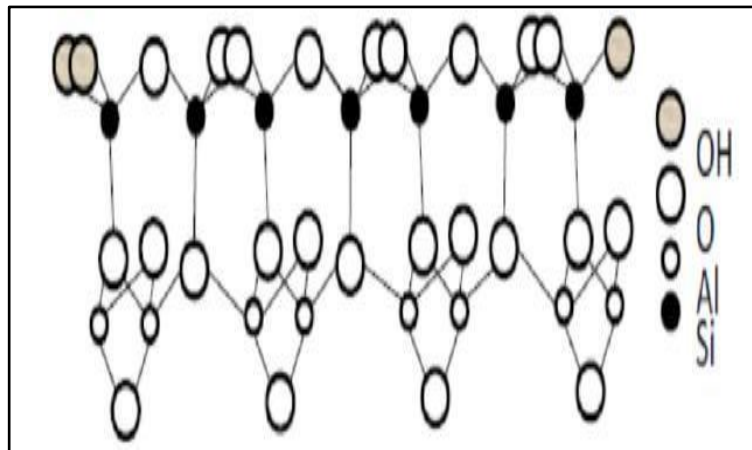


Figure II.8. Structure chimique de métakaolin [41]

L'atome d'aluminium est présent dans le méta kaolin sous forme d'un mélange d'atomes de coordinations et que l'atome de silicium se trouvait soit sous forme de silice amorphe soit constituant une structure mixte SiO_4 reliant les tétraèdres à 1 ou 2 atomes d'aluminium. Quelques atomes de silicium possédaient encore une liaison hydroxyle. Le tableau suivant regroupe toutes les structures des atomes de silicium et d'aluminium, observées dans les aluminosilicates.

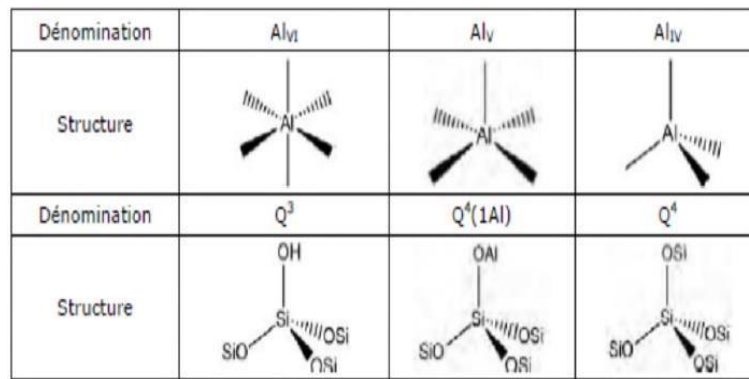


Figure II.9. Structure chimique des atomes d'aluminium et de silicium [41]

La déshydroxylation d'une kaolinite entre 500°C et 750°C entraîne le changement de coordination des atomes d'aluminium de la couche octaédrique. Les atomes classent en trois structures différentes : 4, 5 et 6 coordonnés en proportions respectives 30%, 60% et 10%. Sous changement structural est accompagné par la destruction du réseau de la kaolinite lors de la déshydroxylation.

La structure de la métakaolinite est composée de plusieurs zones distinctes :

- Des régions amorphes ségréguées de silice et l'alumine.
- Des régions mixtes de SiO₄, structure reliant les tétraèdres à un 1 ou 2 atomes l'aluminium est possédant encore quelques liaisons hydroxyles.
- Des traces de kaolinite mère.
- Des régions où les atomes de silicium comportent des groupements hydroxyles.

d.2. Composition chimique et minéralogique

Les ultrafines d'origine naturelle étant issues de roches, les oxydes majoritairement représentés sont les oxydes de calcium, de silicium, d'aluminium et de fer. Les métakaolins contiennent principalement de l'oxyde de silicium (entre 50 et 55 %) et de l'oxyde d'aluminium (entre 40 et 45 %). Des exemples de compositions chimiques de métakoaolins tirés de la littérature sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau II.5. Exemples de compositions chimiques de métakaolins [41]

Composition	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	TiO ₂ (%)
[Khatib et al, 1996]	52.1	41.0	4.3	-	-	-	-	-
[Poon et al, 2001]	53.2	43.9	0.4	0.02	0.05	0.2	-	1.7
[Gruber et al, 2001]	52.1	45.3	0.6	0.05	-	0.2	0.2	1.6
[Staquer et al, 2004]	55.0	40.0	0.6	<0.1	-	1.6	1.6	-
[Batis et al, 2005]	47.8	38.2	1.3	0.03	0.04	-	-	-

II.2.4.3. Fumée de silice

La fumée de silice, sous-produit des fours à arcs électriques produisant du silicium et des alliages, est principalement constituée de SiO_2 (> 90%). Sous forme de poudre grise ultrafine, ses particules micro sphériques ont un diamètre moyen de 0,1 à 0,2 μm , une surface spécifique de 13 000 à 30 000 m^2/kg et une densité de 2,00 à 2,25. Introduite dans le ciment par les Norvégiens en 1952, elle améliore les résistances mécaniques grâce à sa structure amorphe et sa réactivité pouzzolanique. Depuis 1979, elle est utilisée dans les ciments islandais et canadiens à hauteur de 6-8%. Aujourd'hui, elle est couramment ajoutée aux bétons à ultra hautes performances pour ses avantages reconnus.



Figure II.10. Fumée de silice [42]

II.2.4.4. Cendres volantes

Les cendres volantes sont des particules fines issues de la combustion du charbon dans les centrales thermiques, mesurant de 1 à 150 μm . Leur utilisation en cimenterie a été étudiée dès 1937 à l'université de Californie et appliquée pour la première fois en 1948 lors de la construction du barrage de Hungry Horse aux USA. Depuis, leur usage s'est largement répandu, améliorant le béton et offrant des économies. Composées de silicium, aluminium, fer, calcium et magnésium, les cendres volantes réagissent avec l'hydroxyde de calcium pour former des silicates de calcium hydratés, conférant des propriétés pouzzolaniques et hydrauliques. [41] On distingue deux grandes familles de cendres volantes :

- *Cendres volantes siliceuses*
- *Cendres calciques*



Figure II.11. Photo de la cendre volante [41]

II.2.4.5. Pouzzolanes naturelles

Les pouzzolanes naturelles, matériaux volcaniques cendreux riches en silice et alumine, réagissent avec la chaux pour former des produits liants. Bien qu'abandonnées en raison de leur faible résistance et lenteur de prise, elles sont redevenues populaires pour leurs avantages techniques dans la construction, notamment en substitution du ciment Portland. Utilisées dès 1910 en Italie et aux États-Unis pour divers ouvrages, elles ont montré des progrès notables en durabilité et résistance. Aujourd'hui, de nombreux pays, dont l'Algérie, exploitent la pouzzolane dans l'industrie cimentaire pour améliorer la qualité du béton et réduire les émissions de CO₂. En Algérie, les gisements de Béni-Saf sont utilisés par les cimenteries locales, conformément à la norme NA 442 : 2000.



Figure II.12. Pouzzolanes naturelles [43]

II.2.4.6. Autres additifs

a. Cendres de la balle de riz

La cendre de balle de riz est un sous-produit de la combustion de la balle de riz. La balle de riz est extrêmement répandue en Asie de l'Est et du Sud-Est en raison de la production de riz dans cette région. L'enveloppe du riz est retirée au cours du processus de culture avant d'être vendue et consommée. Il s'est avéré bénéfique de brûler cette balle de riz dans des fours pour fabriquer divers objets. La cendre de la balle de riz est ensuite utilisée comme substitut ou adjuvant du ciment. La combustion de la balle doit être soigneusement contrôlée afin de maintenir la température en dessous de 700°C et de s'assurer que la création de carbone est maintenue au minimum en fournissant une quantité d'air adéquate. À des températures de combustion inférieures à 700°C, il se forme une cendre riche en silice amorphe, très réactive.



Figure II.13. Balle de riz (à gauche) cendre de balle de riz (à droite) [41]

b. Poudre de verre

Le verre est un matériau ou un alliage dur, fragile et transparent à la lumière visible, à base d'oxyde de silicium (silice SiO_2). Du point de vue physique, le verre est un matériau amorphe (c'est-à-dire non cristallin) présentant le phénomène de transition vitreuse. En dessous de sa température de transition vitreuse, qui varie fortement avec la composition du verre (plus de 1000°C pour la silice vitreuse, moins de 40 °C pour le sélénium amorphe), le verre se présente à l'état vitreux. La poudre de verre peut être considérée en tant que source alternative de matière pouzzolanique car elle dispose de propriétés chimiques (oxyde de silice SiO_2) et physiques (structure amorphe) compatibles pour l'activation alcaline. Plusieurs chercheurs ont utilisé les déchets de poudre de verre dans la composition de mortiers et de bétons.



Figure II.14. Poudre de verre [44]

c. Poudre de marbre

Le marbre est défini comme une roche métamorphique qui s'est entièrement recristallisée et durcie dans des conditions hydrothermales. La poussière de marbre produite par la coupe et le broyage du marbre a une taille de particule très fine, non plastique. La poussière de marbre est une solution alternative, elle peut être utilisée dans la construction de revêtement de canal, de structures de chaussée et de fondations.

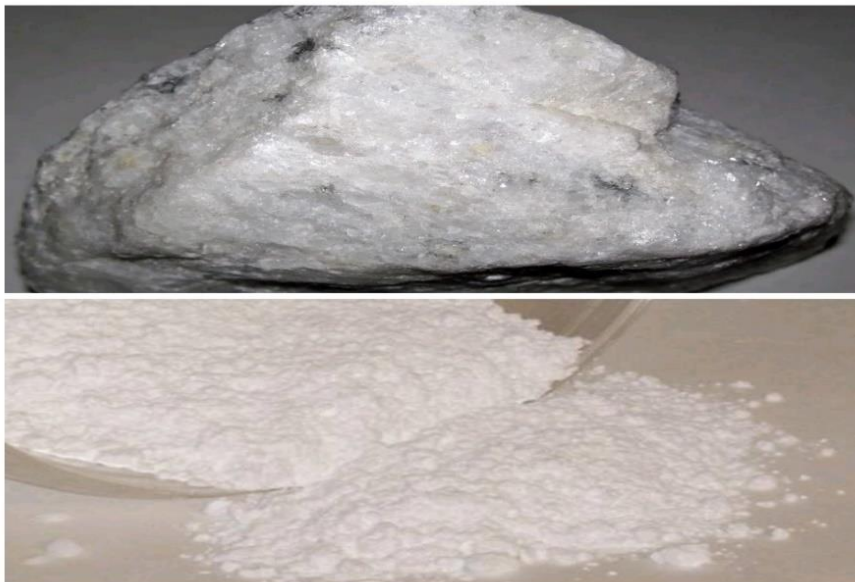


Figure II.15. Poudre de marbre [45]

d. Dolomie

La dolomie est une roche sédimentaire carbonatée composée d'au moins 50% de dolomite, c'est-à-dire d'un carbonate double de calcium et de magnésium (CaCO_3 , MgCO_3). Elle est formée par imprégnation des roches calcaïques par des eaux très salines riches en

magnésium à l'état naturel. La décomposition thermique à une température entre 700 et 800 °C de la dolomie naturelle permet de leur approprier de source d'oxyde de calcium (CaO) et magnésium (MgO). Les proportions de ces derniers dépendent de la minéralogie de la roche mère et la température de calcination. La transformation des carbonates de calcium à des oxydes de calcium demande une température plus élevée par rapport au carbonate de magnésium. La dolomie est considérée plus respectueuse de l'environnement que la chaux car sa température de calcination est inférieure à celle de la chaux.



Figure II.16. Dolomie concassée et poudre [46]

II.3. Influence de la fissuration sur la dégradation du béton

II.3.1. Différentes formes des fissures

Les différentes formes de fissures dans le béton peuvent apparaître pendant la construction ou après mise en service de la construction en raison de diverses causes. Les fissures se produisent lorsque la contrainte dépasse la résistance du matériau. Les charges et les forces externes sont les causes principales de ces dégradations. Les fissures de différentes formes se développent en fonction des contraintes et des conditions d'exposition auxquelles elles sont soumises. Dans ce qui suit, nous présentons les différentes formes de fissures de béton les plus courants. [47]

II.3.1.1. Fissures diagonales

Les fissures diagonales peuvent apparaître à différentes positions dans les éléments structuraux du béton armé. Les causes les plus courantes des fissures diagonales sont la présence d'une section transversale insuffisante, des capacités de charge insuffisantes et un acier de renforcement insuffisant



Figure II.17. Fissure diagonale dans une cloison sèche.

II.3.1.2. Fissures parallèles

Ce type de fissuration apparaît sous la forme de courtes fissures verticales parallèles avec une largeur non uniforme sur la face d'un élément structuraux en béton. La capacité portante insuffisante de l'élément, une section transversale inadéquate, une armature en acier insuffisante et une mauvaise qualité du béton peuvent provoquer ce genre de fissures dans le béton.



Figure II.18. Fissuration de la fissure dans Un poteau vertical

II.3.1.3. Fissures horizontales

Les fissures horizontales se rencontrent le plus souvent aux jonctions de poutres et de poteaux, ainsi qu'à la face du poteau où la contrainte de traction est élevée. Elles sont causées par l'insuffisance de résistance, armature insuffisante, effet de l'effort tranchant, de la charge directe et de la flexion uniaxial, et de l'emplacement des armatures. Cette forme de fissures nécessite une réparation immédiate car elle réduit la résistance au cisaillement des poteaux causant ainsi un risque important de défaillance structurelle.



Figure II.19. Fissure horizontale de béton

II.3.1.4. Fissures de faïençage

Les fissures de faïençage sont généralement causées par le séchage précoce du béton (séchage précoce, retrait plastique). Dans le cas d'un séchage précoce, les craquelures de croûte sont des fissures de surface qui ressemblent à des toiles d'araignées ou à du verre brisé. Elles se forment lorsque le haut de la dalle sèche plus rapidement que le bas. Ces craquelures ne présentent pas de risque structurel. Dans le cas de la fissuration par retrait plastique, l'eau s'évapore progressivement du béton (avant durcissement) et elle laisse des vides entre les particules solides. Ces vides affaiblissent le béton et le rendent plus susceptible de se fissurer. Ce type de fissures est le plus courant de fissures dans le béton.



Figure II.20. Fissure de faïençage (séchage précoce, retrait plastique)

II.3.1.5. Fissures de retrait-gonflement

Les fissures de retrait sont provoquées par le tassement qui se produit lorsqu'un vide se forme dans le sol sous la surface du béton. Ce tassement peut être dû au chargement et/ou séchage du sol.

Les fissures de gonflement peuvent être d'origine thermique (cycle gel-dégel du sol) ou

hydrique (remontée de la nappe). Lorsque le sol gèle, il peut s'élever de plusieurs centimètres avant de se remettre à son état initial. Le mouvement du sol causé par le cycle de gel et de dégel contribue de manière significative à la fissuration du béton. Les grosses racines d'arbres peuvent avoir le même effet sur le béton que les petites racines d'arbres.



Figure II.21. Fissures de tassement

II.3.2. Origines des fissures

La fissuration est l'un des problèmes les plus courants dans le béton et doit être évitée sérieusement. Différentes causes de fissures dans le béton sont décrites ci-dessous.

II.3.2.1. Retrait

Le retrait est l'une des principales causes de fissuration du béton durci. Lors du retrait de séchage qui est causé par la perte d'humidité des constituants de la pâte de ciment, le béton subit une perte de volume progressive empêchant ainsi le déplacement libre des composants et des contraintes de traction se développent, ce qui provoque des fissures.

Les fissures de retrait sont souvent observées dans les grandes dalles de béton, relativement droites parallèles à la portée des planchers. Ils sont principalement observés et se sont produits en raison d'une fourniture inadéquate d'acier de distribution dans le béton.



Figure II.22. Fissures de retrait-gonflement

II.3.2.2. Changements de température

La variation de température dans le béton entraîne le changement de volume différentiel (se dilatent lors du chauffage et se contractent lors du refroidissement). Le béton se fissure lorsque la capacité de déformation en traction du béton est dépassée en raison du changement de volume différentiel.

II.3.2.3. Défauts de construction

Des défauts de construction peuvent parfois provoquer des fissures dans le béton. Certains de ces défauts sont liés à une mauvaise mise en œuvre, l'ajout excessif d'eau au mélange, le manque de durcissement, un mauvais compactage, l'utilisation de matériaux de qualité inférieure, manque des joints de dilatation, erreurs de conception ... etc.

II.3.2.4. Fissures dues aux attaques chimiques

Des réactions chimiques nocives peuvent se produire dans le béton, provoquant des fissures dans celui-ci. Les réactions chimiques peuvent être dues aux matériaux utilisés dans la fabrication du béton ou aux matériaux qui entrent en contact avec le béton après qu'il ait durci et mûri correctement. Des fissures dans le béton peuvent se produire avec le temps en raison de réactions expansives se développant lentement dans la matrice du béton dû aux alcalis dérivés de l'hydratation du ciment, des adjuvants ou de sources externes tel que les attaques sulfatiques. La réaction se traduit par la formation d'un gel gonflant qui provoque une expansion locale et des contraintes de traction qui l'accompagnent, et la masse finit par entraîner la détérioration complète de la structure. [48]

II.4. Conclusion

L'étude approfondie de l'effet des additifs et de l'influence de la fissuration sur le comportement du béton met en évidence des résultats significatifs pour l'amélioration des propriétés rhéologiques, mécaniques et de durabilité des bétons. La présence d'ajouts minéraux dans les mélanges de béton joue un rôle crucial dans l'optimisation de ces propriétés.

Les différents types d'ajouts minéraux, tels que les fillers calcaires, les cendres volantes, le laitier de haut fourneau, le métakaolin, et la pouzzolane, influencent la viscosité du béton, chaque ajout présentant des effets distincts en fonction de ses propriétés spécifiques. La recherche montre que ces ajouts ont une influence directe sur la résistance à la compression, avec des résultats variés. Les fillers calcaires, les cendres volantes, le laitier et le métakaolin améliorent la résistance à la compression, tandis que l'utilisation de la pouzzolane tend à la diminuer.

En ce qui concerne la durabilité, l'incorporation d'ajouts minéraux dans le béton s'avère bénéfique. L'amélioration notable de la durabilité est observée à travers plusieurs aspects :

- La réduction du coefficient de diffusion des ions chlorures grâce à la présence de laitier, de cendres volantes et de métakaolin.
- La protection accrue contre les attaques sulfatiques avec l'utilisation du laitier de haut fourneau et des fillers calcaires.

Par ailleurs, la fissuration du béton, bien que courant, est un facteur de dégradation qui ne doit pas être négligé. Les fissures, qu'elles soient diagonales, parallèles, horizontales, de faïençage ou de retrait-gonflement, ont des causes multiples allant de l'insuffisance structurelle aux conditions environnementales et aux défauts de construction. Ces fissures peuvent compromettre l'intégrité structurelle et la durabilité du béton, nécessitant des interventions adéquates pour éviter des défaillances.

En résumé, les ajouts minéraux améliorent significativement les performances du béton en termes de résistance et de durabilité, tandis que la gestion proactive de la fissuration est essentielle pour maintenir l'intégrité structurelle. Ces deux aspects combinés permettent de développer des bétons plus résistants, durables et adaptés aux exigences de construction moderne.

Chapitre III

**Caractérisation des matériaux et
préparation des éprouvettes**

Chapitre III

Caractérisation des matériaux et préparation des éprouvettes

III.1. Introduction

A travers ce chapitre, on présente les caractéristiques des matériaux utilisés dans cette étude, la méthode formulation des bétons et les techniques expérimentales entreprises pour le confectionnement des éprouvettes. L'obtention d'un béton adapté à une utilisation donnée passe par un choix judicieux de ses composants ainsi qu'une étude de sa composition. Le mélange optimal des différents granulats, le dosage en ciment et l'eau, les pourcentages d'additifs minéraux sont tous des paramètres essentiels afin de réaliser un béton répondant aux qualités recherchées. Ce chapitre est divisé en deux parties une première partie qui traite les caractéristiques des matériaux utilisés et une deuxième sur la préparation et la formulation des bétons.[1]

III.2. Matériaux utilisés

III.2.1. Granulats

Une combinaison de trois agrégats acquis auprès des carrières locales a été utilisée pour la confection du béton. La phase granulaire est composée de :

- Sable de dune naturel (S) d'étendue granulaire 0/5 mm,
- Gravier moyen (G1) 5/15 mm,
- Gravier grossier (G2) 15/25 mm.

Ces granulats ont fait l'objet d'essais de caractérisations, notamment la courbe granulométrique, la propreté et la dureté.[1]

III.2.1.1. Sable

a. Courbe granulométrique

Le tracé de la courbe granulaire du sable est une étape nécessaire pour pouvoir étudier la composition des bétons. L'essai de granulométrie par tamisage a été réalisé sur des échantillons représentatifs de sable. On a utilisé une série de tamis normalisée avec un pas décroissant de la maille des tamis. Les résultats de cet essai est présenté dans le tableau et la figure ci-dessous. [1]



Figure III.1. Essai de granulométrie par tamisage. [1]

Tableau III.1. Résultats de la courbe granulométrique par tamisage. [1]

Maille tamis (mm)	5	4	3,15	2,5	2	1,6	1,25	1	0,63	0,5	0,315	0,2	0,125	0,1	0,08	0,063
Tamisât (%)	100	98,6	97,1	94,7	92,3	89,9	86,5	82,7	72,1	63,9	39,9	17,8	8,7	6,7	3,4	2,4

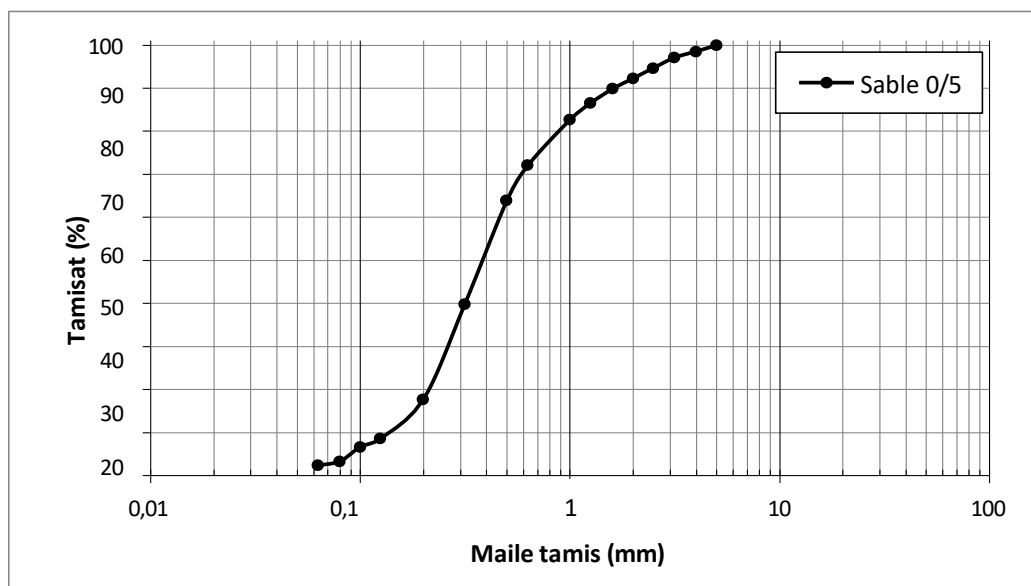


Figure III.2. Courbe granulométrique du sable 0/5 mm. [49]

b. Module de finesse du sable [1]

À partir de la courbe granulométrique, on a calculé le module de finesse qui est égal au $1/100^{\text{ième}}$ de la somme des refus cumulés exprimés en pourcentages des tamis de la série suivante : 0,16

Tableau III.2. Calcul du module de finesse du sable. [49]

Tamis (mm)	0,16	0,315	0,63	1,25	2,5	5	SPi	$M_f = SP_i/100$
Refus cumulés (%)	86,96	60,10	27,88	13,46	5,29	0,00	193,7	1,94

Pour le sable testé le module finesse est donc : **$M_f = 1,94$**

Le sable utilisé correspond à un sable fin de catégorie A.

c. Propreté du sable : Essai équivalent de sable

La mesure de la propreté du sable, a été conduite conformément à la norme EN NF 933-8 [50]



Figure III.3. Appareillage de l'essai équivalent de sable. [1]

Les résultats de l'essai sont présentés dans le tableau suivant.

Esv = 81 et Esp = 80

Tableau III.3. Valeurs de l'équivalent de sable. [1]

Prise	N°1	N°2	N°3
h1	12	12,6	12,5
h2v	10	10	10
h2p	9,7	10	9,9
Esv	83,33	79,37	80,00

Esp	80,83	79,37	79,20
Esv moy	80,9		
Esp moy	79,8		

D'après la classification de la norme NF P18-589 [51], le sable testé correspond à un sable propre à faible teneur en fines. Pour formuler un béton avec une résistance à la compression supérieure à 35 MPa, il faut que : $Esv > 80$ et $Esp > 75$ et par conséquent cette condition est vérifiée. [1]

III.2.1.2. Graviers

a) Courbes granulométriques

Les courbes granulométriques des deux graviers 5/15 et 15/25 sont présentées dans le tableau et la figure ci-dessous.

Tableau III.4. Courbes granulométriques par tamisage des deux graviers (5/15 et 15/25). [1]

Maille tamis(mm)	25	20	16	14	12,5	10	8	6,3	5
Gravier 5/15	-	98,66	92,62	84,56	72,82	49,66	25,50	8,72	4,03
Gravier 15/25	100	95,81	30,14	14,77	7,98	4,19	3,19	2,40	2,00

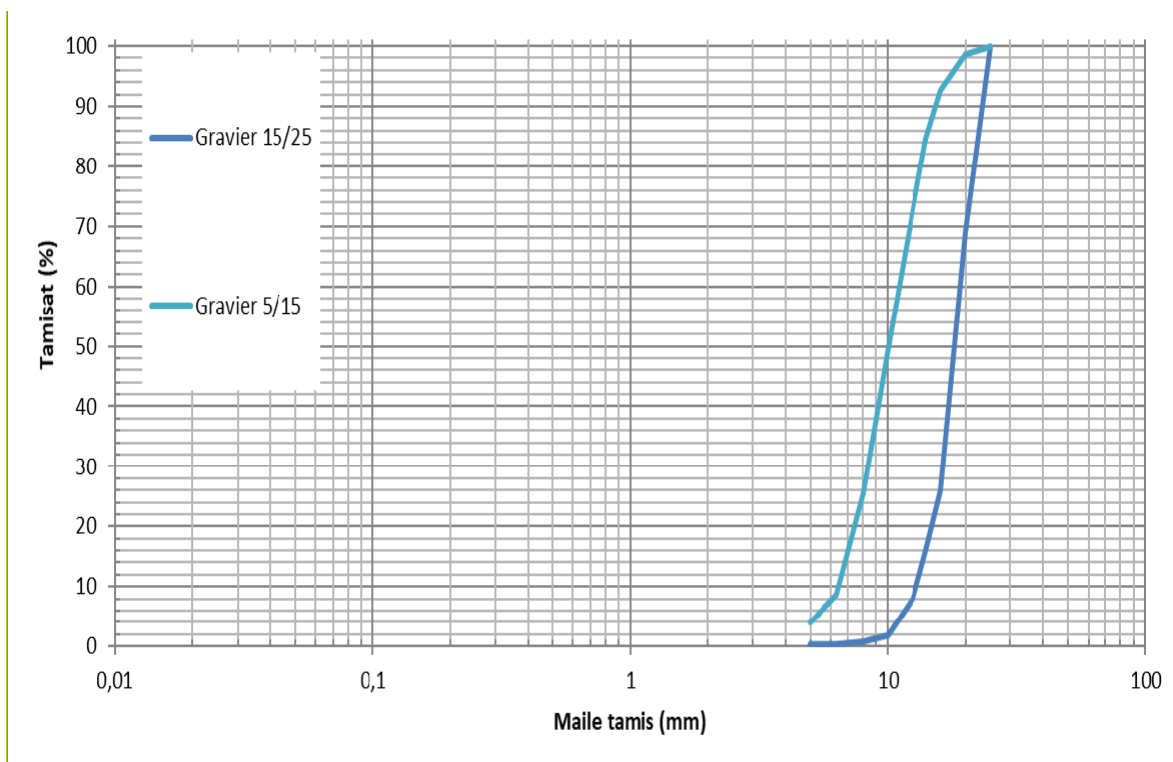


Figure III.4. Courbes granulométriques des graviers 5/15 et 15/25. [49]

b) Dureté des graviers : Essai Los Angeles (NF P 18-573)

La dureté (LA) des graviers a été mesurée par l’essai Los Angeles dont le principe consiste à mesurer la quantité des éléments inférieurs à 1,6 mm produite en soumettant le matériau aux chocs de boulets normalisés et aux frottements réciproques dans la machine Los Angeles (Fig.III.5). [1]



Figure III.5. Appareil Los Angeles. [1]

Le tableau suivant expose la dureté ‘‘LA’’ des deux graviers.

Tableau III.5. Valeurs de la dureté au Los Angeles des deux granulats utilisés. [1]

	G1 (5/15)	G2 (15/25)
Prise d’essai M (g)	5000	5000
Masse éléments < 1,6 mm m (g)	1230	1295
LA = (m/M)*100	24,6%	25,9%

Le gravier moyen présente un LA = 24,6% et le grossier un LA = 25,9%. Les deux valeurs sont inférieures au seuil limite fixé et qui est de 30%. Ils correspondent ainsi à des granulats courants qui conviennent parfaitement bien pour la confection de bétons ayant de bonnes performances mécaniques. [1]

c. Poids spécifique des granulats

Le tableau suivant énumère les poids spécifiques des trois agrégats (sable, gravier 5/15, gravier 15/25). Ces valeurs sont des valeurs moyennes prises de la littérature. [1]

Tableau III.6. Poids spécifique des granulats. [49]

Granulats	Sable	Gravier 5/15	Gravier 15/25
Poids spécifique (kN/m ³)	2.54	2.62	2.62

III.2.1.3. Ciment

Le ciment Portland (CRS) résistant aux sulfates, appelé Mokaouem Plus, a été utilisé pour produire tous les mélanges de béton. Il a été fourni par le groupe cimentier LAFARGE d'Algérie (région de M'Sila). Il a une classe de résistance de 42,5 N-SR3 selon la norme NF EN 197-1 [52] et une teneur en C3A inférieure à 3%. Les principaux produits d'hydratation de ce ciment sont le CH et le C-S-H. Selon la norme NF EN 206-1 [53], ce type de ciment est couramment recommandé pour l'étanchéité des ouvrages d'assainissement exposés à des attaques chimiques. **Le tableau (III.7)** résume la composition physique et chimique du ciment utilisé. [1]



Figure III.6. Ciment Portland résistant aux sulfates (CRS) du groupe LAFARGE Algérie [1]

Les différentes caractéristiques du ciment utilisé sont indiquées sur la fiche technique élaborée par le producteur au niveau d'un laboratoire spécialisé conformément à la norme NA 442-2008 [54], et dont la composition chimique moyenne est présentée dans **le tableau (III.7)**.

Tableau III.7. Composition chimique du ciment CRS utilisé. [1]

Propriétés	Blaine (cm/g ²)	Composition chimique (%)						
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O
Valeurs	3200 – 3800	21.33	3.63	4.31	-	2.29	0.25	0.09

III.2.1.4. Additifs minéraux

Deux types d'additions minérales ont été utilisés. Il s'agit du laitier de haut fourneau (GBFS) et du métakaolin (désigné par la suite par MK).

a. Laitier de haut fourneau (GBFS)

Les scories granulées de haut fourneau (GBFS) ont été collectées auprès du complexe métallurgique d'El Hadjar d'Annaba (Nord-Est de l'Algérie). Le GBFS a été séché dans le l'étuve puis broyé avec la machine Micro Deval. Deux kilogrammes de GBFS avec quatre kilogrammes de billes d'acier ont été utilisés pour l'opération de broyage, qui a duré 12 heures. **Le tableau (III.8)** résume la composition chimique et les propriétés physiques du GBFS. [1]



Figure III.7. Laitier granulé de haut fourneau broyé (GBFS). [1]

Tableau III.8. Composition chimique du laitier de haut fourneau utilisé. [1]

Propriétés	Finess (cm/g)	Composition chimique (%)							
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	LOI
GBFS	~ 4000	41.07	9.06	3.31	42.71	2.25	0.25	0.83	0.32

b. Metakaolin

Le kaolin naturel local extrait de Djebel Debbagh près de Guelma (Nord-Est de l'Algérie) par l'usine de céramique ETER a été utilisé pour produire du métakaolin (MK). Le kaolin noté DD3 est de couleur grisâtre, contenant des impuretés (% MnO entre 2 – 5 %). Tout d'abord, le kaolin a été broyé en fine poussière à l'aide de l'appareil Micro-Deval contenant des billes d'acier. Ensuite, il a été tamisé à 80 µm pour éliminer les grosses particules. Enfin, il a été calciné thermiquement par four sous une température contrôlée à 750°C pendant 5 h pour produire du MK. **Le tableau (III.9).** Présente les propriétés physiques et la composition chimique du MK. [1]



Figure III.8. Calcination thermique du kaolin (Metakaolin). [1]

Tableau III.9. Composition chimique du Metakaolin utilisé. [1]

Propriétés	Blaine(cm/g ²)	Analyse chimique (%)							
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	LOI
MK (DD3)	~ 3500	43	39.9	1.9	0.20	0	0.06	0.10	15

III.2.1.5. Superplastifiant et eau de gachage

Un superplastifiant désigné par le nom commercial « Master Glenium 114 » a été utilisé pour la production de tous les mélanges de béton. Il s'agit d'un superplastifiant à base de polymères d'éther polycarboxylique qui permet d'obtenir un béton fluide avec une demande en eau considérablement réduite. Son taux de dosage normal recommandé est de 0,8 à 2,5 L/100 kg de matériau cimentaire total. Il a été utilisé à des pourcentages très faibles selon les résultats obtenus pour l'essai d'affaissement. De l'eau du robinet a été utilisée pour le coulage et la cure de toutes les éprouvettes de béton. [1]



Figure III.9. Superplastifiant MasterGlenium et eau du robinet. [1]

III.3. Formulation du béton et confectionnement des éprouvettes

III.3.1. Méthode de formulation

Pour déterminer les pourcentages de sable, et de graviers qui vont permettre la réalisation d'un squelette granulaire à minimum de vides, nous avons utilisé la formulation de Dreux-Gorisse. Les quantités des matériaux de chaque classe granulaire doivent être judicieuses pour que les plus petits éléments viennent combler les vides laissés par les plus gros. La courbe granulométrique théorique d'un matériau à minimum de vides peut être schématisée par une droite brisée. La démarche proposée par Dreux pour déterminer le mélange optimum à minimum de vides est la suivante [49].

- Tracé de la droite brisée de référence.
- Détermination des pourcentages en volumes absolus de matériaux.

III.3.1.1. Tracé de la droite de référence de Dreux

La droite de référence O A B de Dreux représente la courbe idéale d'un matériau à minimum de vides. C'est une droite brisée dont le point de brisure A est défini par son abscisse X et son ordonnée Y :

- Si $D_{\max} \leq 20$ mm Module(X) = $D_{\max} / 2$
- Si $D_{\max} > 20$ mm Module(X) = $(\text{Module}(D_{\max}) + 38) / 2$

Y est donné en pourcentage de passants cumulés : $Y = 50 - \sqrt{D_{\max}} + k$

K : étant un coefficient correcteur qui dépend du dosage en ciment, de l'efficacité du serrage, de la forme des granulats (roulés ou concassés) et le module de finesse du sable.

Ce coefficient est donné par le tableau suivant :

Tableau III.10. Valeurs du coefficient correcteur K. [49]

Vibration		Faible		Normale		Puissante	
		Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé
Forme des granulats (Du sable en particulier)		Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé
Dosage en ciment	400 + Fluid	-2	0	-4	-2	-6	-4
	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 droite de Dreux a pour origine le point O qui a pour coordonnées (0,08, 0) et pour extrémité le point B qui a pour coordonnées (D_{max} , 100).

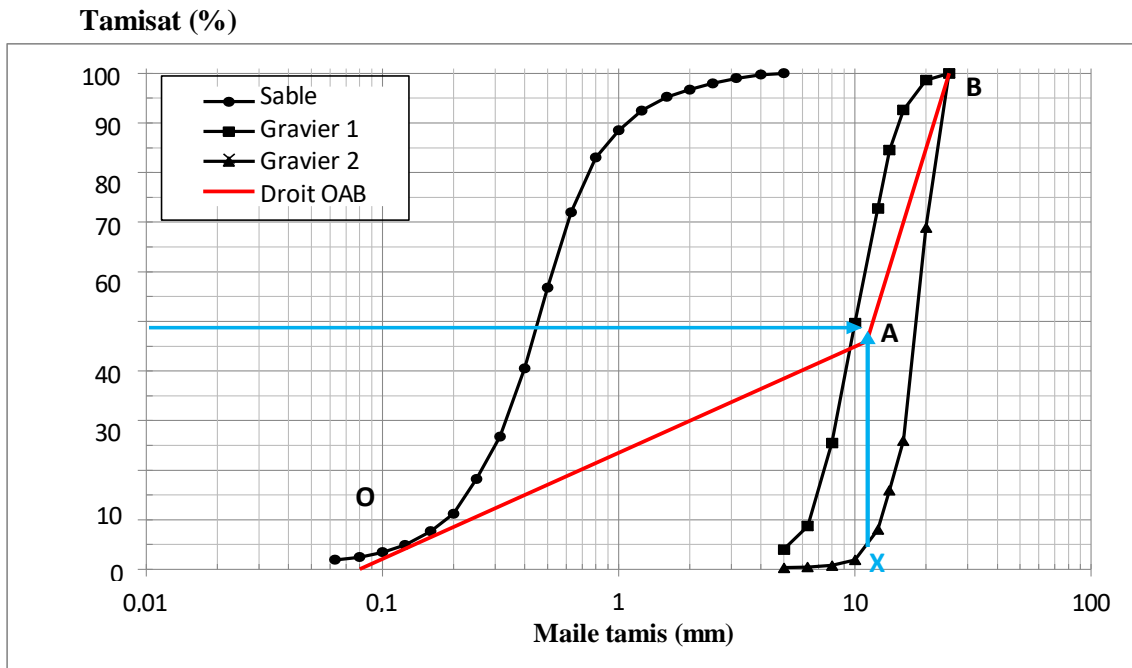


Figure III.10. Traçage de la droite de Dreux OAB. [49]

III.3.1.2. Détermination des pourcentages en volumes absolus de matériaux

Pour déterminer les pourcentages en volumes absolus de granulats permettant la confection d'un mélange à minimum de vide, il est nécessaire de tracer comme indiqué sur la Figure suivante des droites reliant deux à deux les courbes granulométriques des matériaux du mélange. Ces droites sont définies par 5 % de refus pour le matériau à faible granularité et par 5% de passant pour le matériau à forte granularité. L'intersection des droites ainsi tracées avec la droite brisée de Dreux permet, par prolongement sur l'axe des ordonnées, de déterminer les pourcentages en volumes absolus de chaque matériau. Ces pourcentages doivent permettre l'obtention d'un mélange dont la courbe granulométrique est proche de la droite brisée de Dreux. Si la courbe du mélange obtenue est trop éloignée de la courbe de Dreux, un ajustement de ces pourcentages peut s'avérer nécessaire. [1]

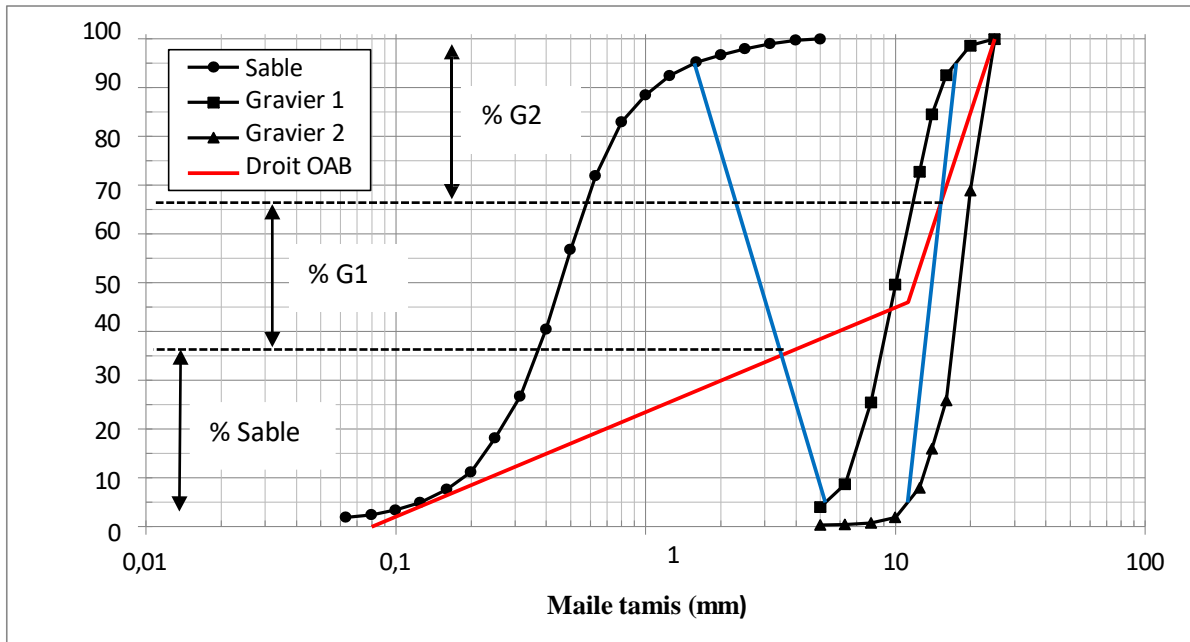


Figure III.11. Détermination des pourcentages en volumes absolus des granulats. [49]

- **Application de la méthode Dreux-Gorisse**

Pour notre cas :

La composition est calculée selon les données suivantes :

- Type de béton : Résistant au sulfate de classe d'exposition **XA3** selon NF EN 206-1[55].
- Résistance à la compression du béton à 28 jours : **40/50 MPa** (selon NF EN 206-1) [55].
- Dosage en ciment (selon NF EN 206-1) : $385 - 5\% = 365,75 \text{ kg/m}^3$ (correction en fonction du $D_{\max} = 25$: $- 5\%$).
- Rapport **E/C = 0,45** (selon NF EN 206-1) [55].
- Les trois classes granulaires des agrégats concassées : 0/5, 5/15 et 15/25.
- Diamètre maximal des granulats $D_{\max} = 25\text{mm} > 20 \text{ mm}$.
- Ouvrabilité du béton : plastique/mou (Affaissement au cône d'Abrams, Aff > 7 cm).
- Vibration courante : aiguille vibrante.

A partir de la (**Fig.III.11**) On détermine les pourcentages en volumes absolus des trois granulats. Les résultats sont présentés dans le tableau suivant. [1]

Tableau III.11. Pourcentages en volumes absolue des trois granulats (Sable 0/5, gravier 5/15, gravier 15/25). [1]

Granulats	Sable 0/5	Gravier 5/15	Gravier 15/25
% en volumes Absolut	35%	31%	34%

Par la suite, on a calculé les volumes de ciment, sable 0/5, gravier 5/15 et gravier 15/25 pour un mètre cube (1 m³) de béton. Les résultats sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau III.12. *Volumes des matériaux pour un mètre cube de béton.* [1]

Volume béton	1 m³
Compacité	0.825
Volume total absolu (x10⁻³)	825 m ³
Dosage ciment	365.75 kg/m ³
Densité ciment	3.1
Volume ciment (x10⁻³)	117.984 m ³
Volume absolu granulats (x10⁻³)	707.016 m ³
% Sable 0/5	35%
Volume absolu sable (x10⁻³)	247.456 m ³
% Gravier 5/15	31%
Volume absolu gravier 1 (x10⁻³)	219.175 m ³
% Gravier 15/25	34%
Volume absolu gravier 2 (x10⁻³)	240.385 m ³
Vérification du volume total	825.00 m ³ ok

A partir des volumes obtenus, on a calculé les masses en kg des différents matériaux pour 1 m³ de béton. Les résultats sont présentés dans le tableau suivant. Il faut préciser qu'on a fait le malaxage du béton dans un malaxeur de capacité de 50L de béton. [1]

Tableau III.13. *Poids des matériaux dans la composition du béton.* [1]

Matériaux	Pour 1 m³ béton	Pour 50L béton
Poids sable 0/5	628,54	31,427
Poids gravier 5/15	574,24	28,712
Poids gravier 15/25	629,81	31,490
Poids ciment	365,75	18,288
Poids eau (E/C = 0,45±1)	170	8,5
Densité théorique béton	2,37	2,37

III.3.2. Confection des éprouvettes de béton

On a utilisé trois types d'éprouvettes :

- Cubiques de $(150 \times 150 \times 150)$ mm³ pour mesurer la résistance à la compression et la traction.
- Cubiques de $(100 \times 100 \times 100)$ mm³ pour mesurer la porosité et l'absorption capillaire.

Un minimum de deux éprouvettes de béton a été adopté pour l'ensemble des essais. [1]

III.3.2.1. Préparation des moules

Les moules utilisés sont rigides en fonte et ne réagissent pas avec le béton Ils résistent aux vibrations, aux déformations et réutilisables avec des caractéristiques constantes à chaque utilisation.



Figure III.12. Photos des moules utilisés pour la confection des éprouvettes. [1]

III.3.2.2. Malaxage du béton

Une bétonnière de capacité de 50 L a été utilisée pour le malaxage du béton. On a introduit d'abord les deux types de gravier, le sable, le ciment et les additifs (GBFS et MK) et les malaxer à sec jusqu'à obtention d'un mélange homogène. Ensuite, l'eau et le superplastifiant sont rajoutés progressivement. Le malaxage a duré environ 3 à 4 minutes. [1]



Figure III.13. La bétonnière utilisée. [1]

III.3.2.3. Coulage du béton

D'abord le malaxeur est vidé de béton en déversant l'ensemble du béton frais dans une brouette afin de faciliter le remplissage des moules. Ensuite, le béton est mis en place dans les moules en deux couches successives plus en moins de hauteurs égales. Les deux couches sont vibrées l'une après l'autre jusqu'à l'arrêt d'apparition des bulles d'air à la surface du béton. On a utilisé une aiguille vibrante comme moyen de compactage du béton. [1]



Figure III.14. Photos du coulage du béton. [1]

III.3.2.4. Démoulage et cure

Les éprouvettes laissées à l'air libre sont démoulées après 24 h. Les moules sont ouverts en deux parties afin d'éviter l'endommagement des éprouvettes. Ensuite et à l'aide d'un marqueur permanent, toutes les éprouvettes sont numérotés successivement et immergées dans l'eau du robinet à température ambiante. La cure de conservation des éprouvettes cubiques de béton a duré 28 jours. [1]



Figure III.15. Démoulage et conservation des éprouvettes de béton. [1]

III.4. Conclusion

Dans ce troisième chapitre, nous avons détaillé les caractéristiques des matériaux utilisés pour la préparation des éprouvettes ainsi que la méthode de formulation et de confection du béton. Un choix judicieux des matériaux et une mise en œuvre rigoureuse sont essentiels pour obtenir un béton conforme aux exigences spécifiées et performant, en particulier en termes de résistance aux attaques chimiques.

Les essais de caractérisation de la phase inerte, incluant sable et graviers, ont révélé que les granulats sélectionnés dans cette étude respectent les différentes normes en vigueur, et sont donc adaptés pour la confection de bétons hydrauliques.

Les résultats relatifs aux performances mécaniques et aux critères de durabilité des bétons étudiés seront présentés et analysés dans le quatrième chapitre.

Chapitre IV

**Comportement du béton pré fissuré et
modifié sous attaque chimique**

Chapitre IV

Comportement du béton pré-fissuré et modifié sous attaque chimique

IV.1. Introduction

La corrosion du béton est la principale pathologie présente dans les ouvrages de génie civil. La détérioration causée par ce processus chimique réduit la durée de vie des éléments structuraux en béton. La durabilité des structures est menacée par les attaques d'acide sulfurique qui détériore la matrice cimentaire du béton par la formation du gypse et d'ettringite qui sont des produits expansifs. Ce processus de dégradation se produit très lentement et peut prendre plusieurs années avant que les premières fissures ne soient visibles ce qui peut causer de graves dommages aux structures en béton.

Pour améliorer la durabilité du béton sous attaque d'acide sulfurique, la substitution du ciment par des additifs minéraux résistants aux attaques chimiques a montré ces performances à travers plusieurs études. Parmi ces additifs, on trouve le laitier de haut fourneau (GBFS) et le métakaolin (MK) qui sont des matériaux locaux disponibles dans les régions proches de Guelma.

Dans ce contexte, cette étude expérimentale est focalisée sur l'effet couplé de la pré-fissuration et de l'incorporant du GBFS et du MK sur le comportement mécanique et de durabilité du béton durci. Le GBFS et MK ont été utilisés comme substitution du ciment à différents pourcentages afin d'évaluer leur effet, sous attaque chimique, sur la résistance à la compression, la perte de masse, la porosité accessible à l'eau et l'absorption d'eau par capillarité pour un niveau de pré-fissuration du béton. L'acide sulfurique a été utilisé comme agent corrosif pour accélérer le processus de corrosion du béton et obtenir ainsi des résultats rapides.

IV.2. Protocoles expérimentaux

IV.2.1. Formulation retenue

Dans notre étude, on a choisi de travailler sur quatre formulations de béton avec différents taux de remplacement du ciment par le MK et le GBFS. La première formulation notée « F0 » est la formulation de référence préparée avec le ciment portland seul. Les trois autres formulations notées « F5, F10 et F15 » sont composées avec des niveaux de remplacement (par masse de liant) ascendants qui sont « 5%, 10% et 15% » respectivement. Pour chaque formulation, une quantité égale de MK et de GBFS a été utilisée comme liant binaire pour remplacer le ciment. Les quatre formulations ont été conçues selon la norme NF EN 206-1[56] pour représenter le minimum acceptable spécifié dans la classe d'exposition chimique XA3.



Figure IV.1. MK, GBFS et Ciment

Le (tableau IV.1.) Présente les détails des proportions des mélanges pour 50 L de béton. Au total, dix-neuf cubes ont été coulés par formulation en une seule fois c'est-à-dire neuf cubes de moules 150 mm et dix cubes de moules de 100 mm. Au total, 76 éprouvettes de cubiques ont été coulées pour les quatre formulations soit 76 éprouvettes par formulation (36 cubes de 150 mm et 40 de 100 mm).

Tableau IV.1. Composition des formulations pour 50 L de béton (kg)

Description	F0	F5	F10	F15
Ciment RS	18,288	17,374	16,459	15,545
Metakaolin (MK)	0	0,457	0,914	1,372
Laitier de haut Fourneau (GBFS)	0	0,457	0,914	1,372
Sable (0/5)	31,427			
Gravier moyen (5/15)	28,712			
Gravier grossier (15/25)	31,490			
Eau	8,5			
Superplastifiant (1% du poids de liant)	0,183			
Poids total	118,6			

IV.2.2. Protocole de pré-fissuration

La pré-fissuration consiste à créer des microfissures dans les éprouvettes de béton par l'effet des charges cycliques de compression à différents niveaux de la résistance à la compression de référence (R_c) à 28 jours. Les dommages causés par la pré-fissuration sont contrôlés en mesurant le temps des ondes ultrasoniques avant et après l'application de la charge.

Des éprouvettes de béton avec un niveau de pré-fissuration ont été préparées pour étudier l'effet de la pré-fissuration sur la dégradation du béton sous attaque d'acide sulfurique.

Tout d'abord, les valeurs moyennes de la résistance à la compression à 28 jours de toutes

les formulations (F0, F5, F10 et F15) ont été mesurées pour deux éprouvettes cubiques. La vitesse initiale de l'onde ultrasonore temporelle "T₀" a été mesurée pour chaque éprouvette par l'analyseur d'impulsions ultrasoniques (UPV) en plaçant ses deux sondes (une émettrice et l'autre réceptrice) sur les faces opposées des cubes. L'analyseur d'impulsion ultrasonique (UPV) commercial fabriqué par CONTROLS a été utilisé (**Fig. IV.2**). Ensuite, des dommages mécaniques ont été imposés aux éprouvettes de béton. La vitesse de chargement était de 0,5 MPa/s et le niveau de chargement éteignent 80%, selon le cas, de la résistance moyenne ultime à la compression à 28 jours. Après avoir atteint la pré-fissuration, la charge a été maintenue pendant 1 min puis le béton a été déchargé (**Fig. IV.2**). En utilisant l'UPV, la vitesse de l'onde ultrasonique temporelle après le cycle de chargement- déchargement "T_i" est mesurée pour quantifier les dommages mécaniques induits. La (**figure IV.2**) présente l'essai de chargement-déchargement appliqué et la mesure de la vitesse de l'onde sonique. Le degré d'endommagement « D » des éprouvettes de béton est calculé en utilisant l'équation (4.1).

$$D = 1 - \left(\frac{T_0}{T_i}\right)^2 \quad (4.1)$$

Où, T₀ et T_i sont respectivement les temps des ondes ultrasoniques avant et après le cycle de chargement-déchargement.

Pour l'ensemble des éprouvettes testées par les différents essais, on a adopté deux degrés d'endommagement différents à savoir : pas d'endommagement initial noté « D₀ », degré d'endommagement de 0,5± 0,02 noté « D80 ». Le degré d'endommagement a été produit en appliquant le cycle de chargement- déchargement sur les éprouvettes jusqu'à obtention de la valeur « D » prédéterminée. A titre d'exemple, on a appliqué trois cycles de chargement-déchargement pour atteindre le degré d'endommagement D80. Le choix de ces degrés d'endommagement est basé sur les travaux de Zhiming et al, 2020, [57].



Figure IV.2 Protocole de pré-fissuration et mesure de la vitesse de l'onde ultrasonique

IV.2.3. Attaque chimique à l'acide sulfurique

Après la création de la pré-fissuration dans les éprouvettes de béton, des essais d'attaque d'acide sulfurique ont été effectués afin d'étudier la durabilité du béton dans des conditions chimiques similaires. Les éprouvettes de béton ont été immergées dans un bain de solution

d'acide sulfurique (H_2SO_4) à 5% de concentration. Le choix de cette dernière est basé sur le travail de (L. Wu,2021) [59] dont lequel le processus de dégradation était accéléré afin de se rapprocher au maximum des conditions réelles où la dégradation peut prendre plusieurs années à se produire. Les éprouvettes ont été divisées en deux parties afin de faire une comparaison et de quantifier avec précision l'effet binaire de la pré-fissuration et de la dégradation par l'acide sulfurique. La première partie a été durcie dans l'eau du robinet, tandis que l'autre a été immergée dans une solution d'acide sulfurique (**Fig. IV.3.**).



Figure IV. 3. Essai d'attaque à l'acide sulfurique

La masse des éprouvettes cubiques a été mesurée à différentes périodes (**voir Tab. IV.2**). Avant la prise de masse, les éprouvettes ont été nettoyées en enlevant la croûte superficielle provoquée par l'action de l'acide à 7,15, 21 et 28 jours sous l'eau courante (**Fig. IV.4**). Cette action a donné lieu à un écoulement blanc laiteux et on a arrêté le nettoyage lorsque l'eau est devenue claire.

Tous les cubes ont été égouttés et immédiatement pesés pour évaluer tout changement de masse (Perte ou gain). A la fin, les éprouvettes ont été remises dans la solution d'acide après son renouvellement.



Figure IV.4. L'état des éprouvettes après l'attaque sulfurique

A la fin de l'exposition à l'acide c-à-dire après 28 jours d'attaque, les éprouvettes ont été testées en termes de changement de la résistance à la compression, la traction, la porosité accessible à l'eau et l'absorption capillaire. Le **Tableau IV.2** présente la démarche des essais,

la description détaillée des essais est fournie dans les paragraphes suivants.

Tableau IV.2. Démarche expérimentale de l'étude

Type d'essai	Détails des essais	
	Pas de Pré-fissuration	Pré-fissuration et exposition à l'acide sulfurique
Résistance à la compression	Eprouvettes testées à 28 jours	- Eprouvettes de béton pré-fissurées après 28 jours de temps de cure puis exposées immédiatement à l'acide sulfurique.
Résistance à la traction		- Un niveau de pré-fissuration est appliqué (80 %). - Eprouvettes testées après exposition à l'acide sulfurique.
Perte de masse	-	- Mesurée l'ensemble des épreuves. - Exposées à l'acide sulfurique pour différents périodes (7, 15, 21 et 28 jours).
Porosité accessible à l'eau	Eprouvettes testées après 28 jours	- Eprouvettes de béton pré-fissurées après 28 jours de temps de cure puis exposées immédiatement à l'acide sulfurique.
Absorption d'eau par capillarité	Eprouvettes testées après 28 jours	- Un niveau de pré-fissuration est appliqué (80 %). - Eprouvettes testées après exposition à l'acide sulfurique.

IV.2.3.1. Resistance à la compression

La résistance à la compression est l'une des propriétés essentielles du béton. L'essai de compression consiste à appliquer un effort de chargement sur une éprouvette jusqu'à rupture en utilisant une presse d'essai de compression. La presse utilisée est une machine de marque CONTROLS ayant une capacité maximale de 3000 kN. Les éprouvettes doivent être bien centrées entre les deux plateaux, afin d'éviter l'apparition des moments dus à l'excentricité de la charge de compression.

Tout d'abord, des cubes de béton non endommagés de (150x150x150) mm³ ont été testés pour déterminer la résistance à la compression après 28 jours de cure dans l'eau, conformément à la norme NF P 18-406, 2013. La résistance moyenne à la compression a été déterminée en testant deux éprouvettes pour chaque formulation. Ensuite, des cubes de béton similaires (non endommagés) ont été testés pour chaque formulation après 28 jours d'exposition à l'acide sulfurique. Cet essai a pour objectif de montrer l'effet de l'attaque chimique seule sur la résistance à la compression et à la traction. La résistance à la traction a été évaluée par des essais de traction par fendage (ou brésilien), permettant de mesurer la capacité du béton à résister à des forces de tension indirectes.

Enfin, la résistance à la compression a été déterminée pour les éprouvettes de béton endommagées (D80) et exposées à l'acide sulfurique afin d'évaluer leur effet combiné. Cet essai permet de mieux comprendre l'impact des dégradations mécaniques et chimiques sur les performances structurelles du béton.



Figure IV.5. Mesure de la résistance à la compression avant et après les attaques d'acide.

IV.2.3.2. Résistance à la traction

L'essai de traction par fendage, également connu sous le nom d'essai brésilien, Cet essai est particulièrement pertinent pour évaluer la capacité du béton à résister aux forces de tension, qui sont cruciales pour la durabilité et la performance structurelle.

La machine est la même que ceux utilisés pour l'essai de compression, avec deux platines rigides pour répartir uniformément la charge sur l'échantillon (**Fig.IV.6**).



Figure IV.6. Platine de chargement.

La préparation de la résistance moyenne à la traction des échantillons cubiques de béton sont les mêmes que celles de la résistance de compression.

Placer l'échantillon cylindrique horizontalement entre les platines de chargement de la presse hydraulique, et s'assurer que l'échantillon est centré et bien aligné pour garantir une distribution uniforme de la charge.

Appliquer la charge de manière continue et progressive à une vitesse de chargement constante jusqu'à la rupture de l'échantillon.

Enfin, la résistance à la compression été déterminées pour les éprouvettes de béton endommagées (D80) et exposées à l'acide sulfurique afin d'évaluer leur effet combiné. Cet essai de traction par fendage permet de mieux comprendre la résistance en traction du béton, notamment après exposition à des conditions chimiques agressives, et complète l'analyse de la résistance à la compression pour une évaluation globale des performances structurales du béton.



Figure IV.7. Mesure de la résistance à la traction par fendage avant et après les attaques d'acide.

IV.2.3.2. Porosité accessible à l'eau

La porosité accessible à l'eau est un paramètre de premier ordre dans l'évaluation et la prévision de la durabilité du béton. Parmi les méthodes à disposition, la détermination de la porosité accessible à l'eau par pesée hydrostatique.

L'évolution de la porosité accessible à l'eau de béton non endommagé (D0) et des cubes de béton endommagés et exposés à l'acide sulfurique a été suivie sur des éprouvettes cubiques de 100 mm. De côté cette porosité permet d'évaluer le pourcentage des vides dans la matrice de béton reliés à la surface. Elle est considérée comme un indicateur de durabilité d'un point de vue microstructural car elle influence les propriétés de transfert du béton. La porosité a été mesurée par pesée hydrostatique selon la norme ASTM C1754 [60]. Tout d'abord, les éprouvettes ont été immergées dans l'eau à température ambiante pendant 28 jours jusqu'à saturation complète. Ensuite, les éprouvettes ont été pesés sous l'eau, à l'air et après avoir été séchées au four à 80°C jusqu'à obtention d'une masse constante. La combinaison du poids immergé, du poids à l'air et du poids après séchage a été utilisée pour calculer la porosité

accessible à l'eau selon la formule (4.2).

$$n = \frac{v_v}{v_t} = \frac{M_{air} - M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} \quad (4.2)$$

V_v : volume des vides accessible à l'eau.

V_t : volume total de l'éprouvette testée.

M_{eau} : la masse de l'éprouvette immergée dans l'eau. M_{air} : la masse saturée dans l'air.

M_{sec} : la masse de l'éprouvette après séchage à $80 \pm 5^\circ\text{C}$ jusqu'à masse constante.



Figure IV.8. Mesure de la Porosité accessible à l'eau



Figure IV.9. L'état des éprouvettes après fissuration et exposés à l'acide sulfurique.

IV.2.3.3. Absorption capillaire

Comme pour l'essai de porosité accessible à l'eau, l'essai d'absorption d'eau par capillarité (sorptivité) a été réalisé sur des cubes de béton non pré-fissurés (D0) et sur des cubes de béton pré-fissurés et exposés à l'acide sulfurique (cubes de 100 mm). D'abord, trois éprouvettes cubiques pour chaque mélange ont été séchées dans l'étuve à 80°C jusqu'à stabilisation de la masse. Ensuite, les éprouvettes ont été imperméabilisées sur leur surface latérale afin d'assurer une absorption d'eau uniaxial et empêcher l'évaporation latérale.



Figure IV. 10. Imperméabilisation des éprouvettes avant et après exposition à l'acide.

Ensuite, les éprouvettes ont été pesées avant d'être testées, et la face inférieure des éprouvettes a été placée sur des tiges pour permettre un accès libre à une profondeur d'eau de 5 mm (Fig. IV.11). Enfin, la sorptivité a été évaluée en mesurant le changement de masse de l'échantillon (quantité d'eau absorbée).



Figure IV.11. Essai d'absorption d'eau par capillarité avant et après exposition à l'acide.

Les poids des éprouvettes ont été mesurés à un intervalle défini de 0,25, 0,5, 0,75, 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10, 24 heures et tous les jours à la même heure pour la suite de l'essai. Les essais ont été effectués dans des conditions de laboratoire et avant chaque pesée le film d'eau retenu sur la face inférieure de l'éprouvette a été essuyé avec une serviette en papier pour éliminer l'excès d'eau.



Figure IV.12. Mesure du poids des éprouvettes avant et après exposition à l'acide.

Les valeurs moyennes de la sorptivité pour trois échantillons de chaque mélange ont été rapportées. Le coefficient de sorptivité (S) selon la norme BS EN 480-5, 2005 [61], a été calculé en utilisant l'équation suivante (4.3).

$$S = \frac{Q}{A \cdot t^{1/2}} \quad (4.3)$$

Où Q : est le poids d'eau absorbé,

A : est la section transversale de l'éprouvette en contact avec l'eau, t est le temps,

S : est le coefficient de sorptivité (m/s^{1/2}).

IV.2.4. Résultats et discussions

IV.2.4.1. Résistance a la compression

Les figures (IV.13) et (IV.14) présente la résistance à la compression (R_c) avant et après exposition à l'acide pour différentes formulations.

- **Avant l'attaque chimique**, à 28 jours, par rapport à la référence F0 :

- F5 présente une augmentation de +8,2%

- F10 une augmentation de +5,4%

- F15 une augmentation de +3,2%

Donc, avant l'attaque chimique (l'exposition à l'acide), les formulations modifiées (F5%, F10%, F15%) présentent des résistances à la compression légèrement plus élevées que la formulation de référence (F0%) et le remplacement partiel du ciment par 5% de Métakaolin et laitier de haut fourneau (formulation F5) a donné la résistance à la compression la plus élevée à 28 jours grâce à la réaction pouzzolanique. Ceci s'explique par le renforcement apporté par les fibres dans la matrice cimentaire.

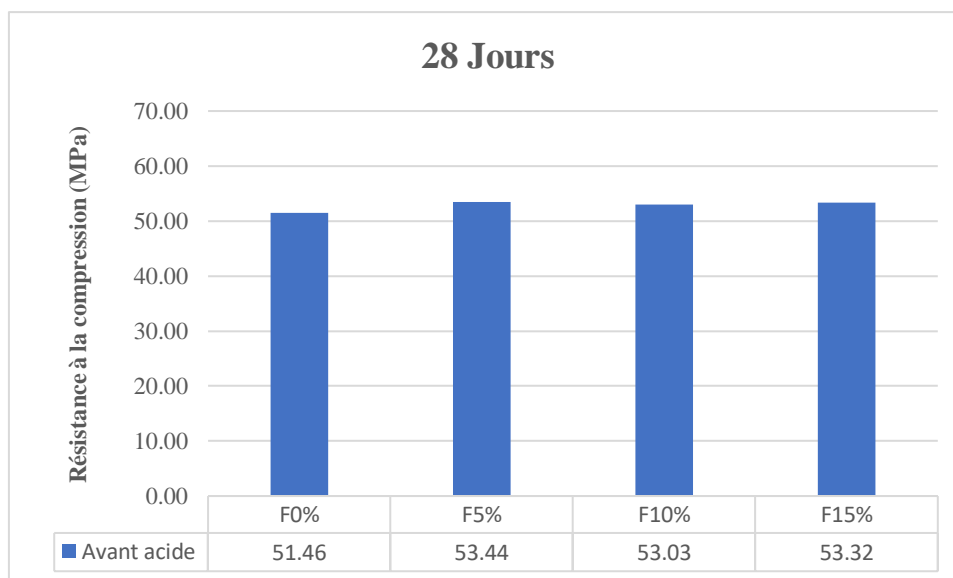


Figure IV.13. Résistance à la compression avant exposition à l'acide pour différentes formulations.

- **Après l'attaque chimique** pendant 28 jours sur béton non pré-fissuré :

- F0 perd 47,6% de sa résistance initiale.

- F5 perd 45,1%, soit 2,5% de moins que F0.

- F10 et F15 perdent autant que F0 (environ 48%).

Donc, après l'exposition à l'acide sulfurique, il y a une diminution ente 45 et 50% de la résistance pour toutes les formulations, mais la formulation F5 résiste légèrement mieux que les autres.

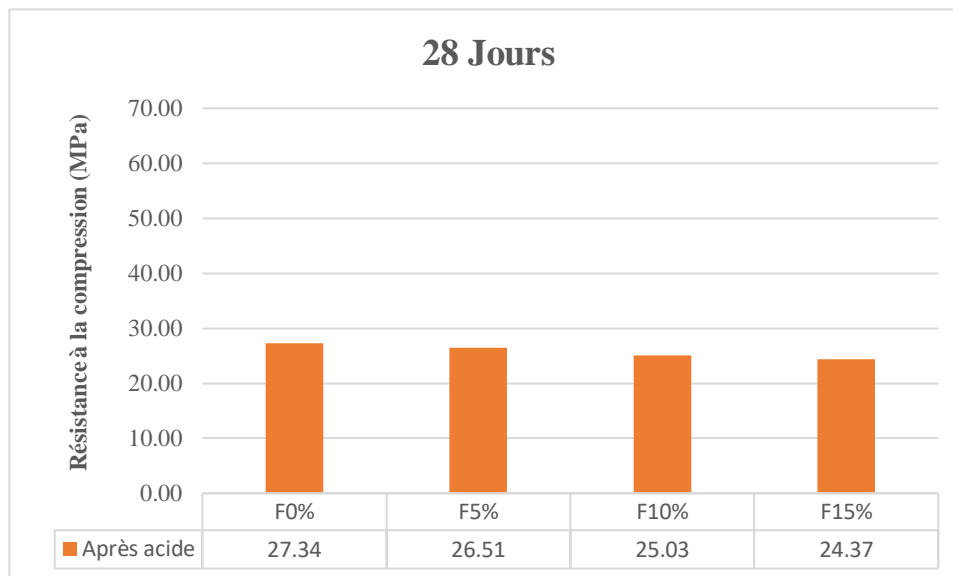


Figure IV.14. La résistance à la compression après exposition à l'acide pour différentes formulations.

- Après l'exposition à l'acide, les résistances à la compression sont considérablement réduites pour toutes les formulations, avec des pourcentages de réduction **Fig (IV.15)** allant de 46,5% (F5%) à 52,8% (F10%). Cette dégradation est probablement due à l'attaque chimique de l'acide sur la matrice cimentaire, entraînant une dégradation de la microstructure et une perte de résistance mécanique.

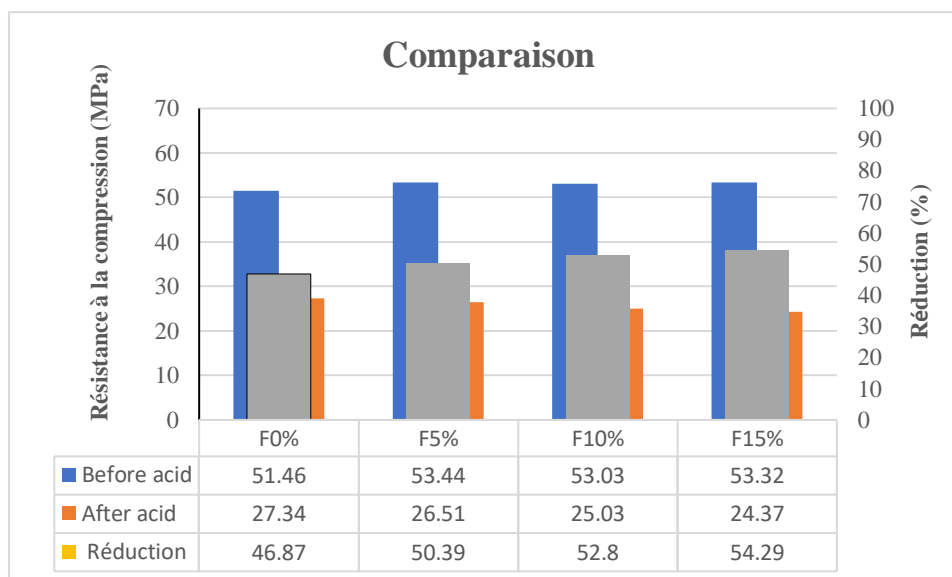


Figure IV.15. Pourcentages de réduction de la résistance à la compression avant et après exposition à l'acide pour différentes formulations.

IV.2.4.2. Résistance à la traction

Les figures (IV.16) et (IV.17) présente la résistance à la traction (R_t) avant et après exposition à l'acide pour différentes formulations.

Les tendances sont similaires à la compression, avec une meilleure performance de la formulation F5 avant attaque acide.

- **Avant l'attaque acide**, les formulations modifiées (F5%, F10%, F15%) ont montré une résistance à la traction supérieure à la formulation de référence (F0%), grâce au renforcement des fibres.
 - La formulation F5 a donné la résistance à la traction la plus élevée à 28 jours avant attaque acide, avec un gain de +10,8% par rapport à F0.

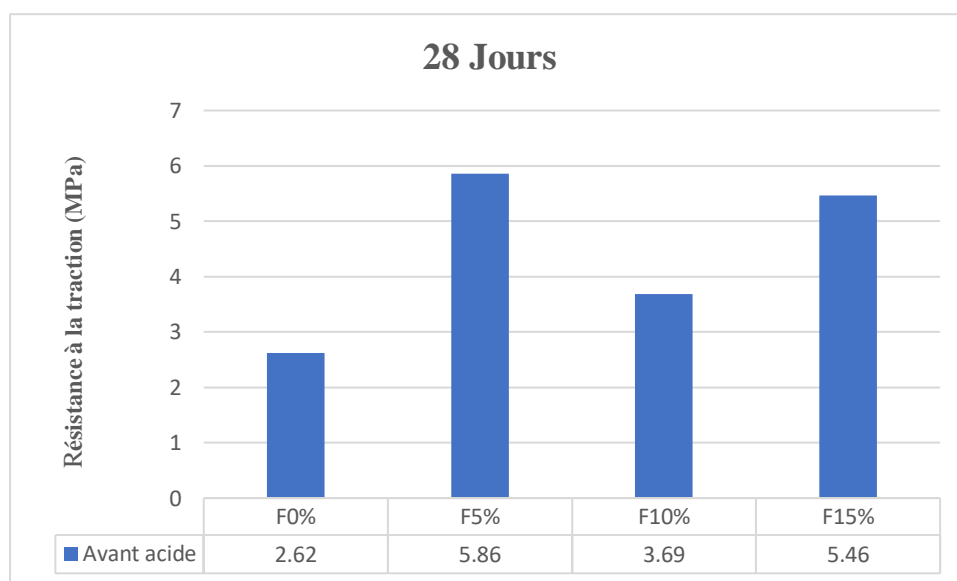


Figure IV.16. Résistance à la traction avant exposition à l'acide pour différentes formulations.

- **Après 28 jours d'attaque acide non pré-fissuré :**
 - F0 perd 37,1%
 - F5 perd 33,5%, soit 3,6% de moins.

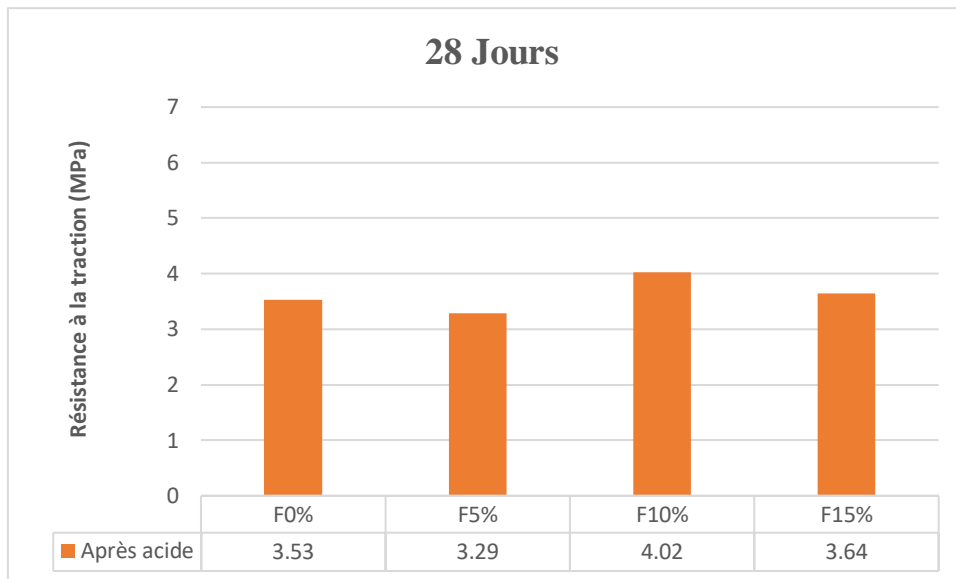


Figure IV.17. Evolution de la résistance à la traction après exposition à l'acide pour différentes formulations.

• **Après l'exposition à l'acide :**

- Les formulations F5% et F15% ont subi une légère réduction de la résistance à la traction, tandis que les formulations F0% et F10% ont connu une augmentation. Cette amélioration inattendue pourrait être liée à des changements dans la microstructure ou à des effets de fissuration différents pour ces formulations spécifiques sous l'attaque acide.
- La formulation F5 conserve donc environ 3 à 4% de résistance à la traction résiduelle en plus après attaque acide.

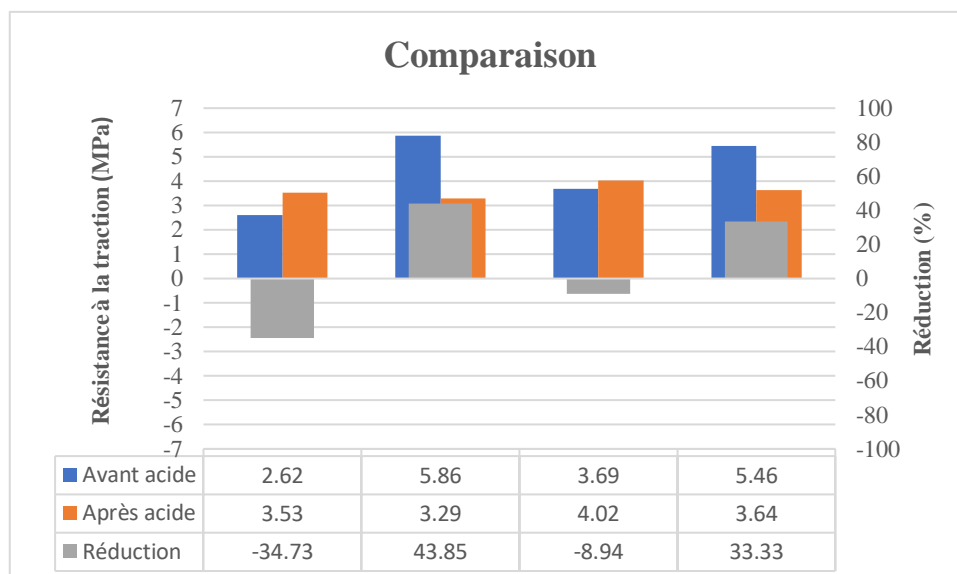


Figure IV.18. Pourcentages de réduction de la résistance à la traction avant et après exposition à l'acide pour différentes formulations.

IV.2.4.3. Perte de Masse sous l'effet d'attaque chimique

La (fig.IV.19.) Présente l'influence de la pré-fissuration sur l'évolution de la masse de l'éprouvette soumise à l'acide.

La masse des éprouvettes a diminué rapidement après 7 jours d'attaque d'acide puis elle a stabilisé après 20 jours pour toutes les formulations.

- Après 28 jours d'attaque acide, la perte de masse est plus faible pour la formulation témoin F0 (4%) que pour les autres formulations contenant les additions (5,5 à 7%).
- F0 perd 4,0% de sa masse.
- F5 perd 7,0%, soit 75% de plus que F0.
- F10 et F15 perdent environ 5,5%, soit 37% de plus que F0.

La référence F0 montre ici un net avantage avec une perte de masse plus faible que les formulations avec additions. Donc l'effet de la pré-fissuration sur la perte de masse négligeable.

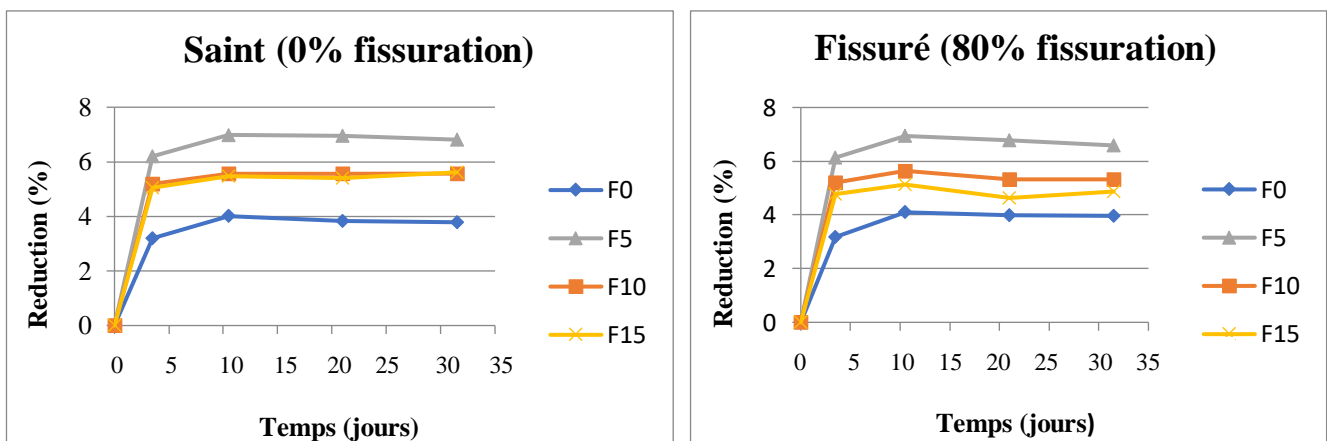


Figure IV.19. Perte de masse après exposition à l'acide pour les éprouvettes saines et fissuré (80%)

IV.2.4.4. Effet d'attaque chimique sur la porosité accessible à l'eau

La (fig.IV.20.) présente l'évolution de la porosité accessible à l'eau après pré-fissuration et exposition à l'acide sulfurique pour les différentes formulations.

- **Avant l'attaque acide :**

Les formulations modifiées (F5%, F10%, F15%) présentaient une porosité plus élevée que la formulation de référence (F0%), probablement en raison de la création des vides supplémentaires dans la matrice.

- **Après pré-fissuration et exposition à l'acide :**

- Une diminution de la porosité a été observée pour la plupart des formulations.
- La plus petite diminution a été obtenue pour la formulation F0, tandis que la plus grande

a été obtenue pour la formulation F10. Cette diminution de la porosité accessible à l'eau peut être due au développement d'ettringite sur la surface de l'éprouvette de béton à cause d'attaque chimique par l'acide. La croûte développée à la surface obture (colmate) les vides externes du béton ce qui réduit la porosité accessible.

- L'effet du taux de pré-fissuration est négligeable sur la valeur de la porosité dans les pourcentages testés 80%.

On peut conclure que l'effet de la pré-fissuration sur la porosité pour l'ensemble des formulations est faible pour 80% de pré-fissuration.

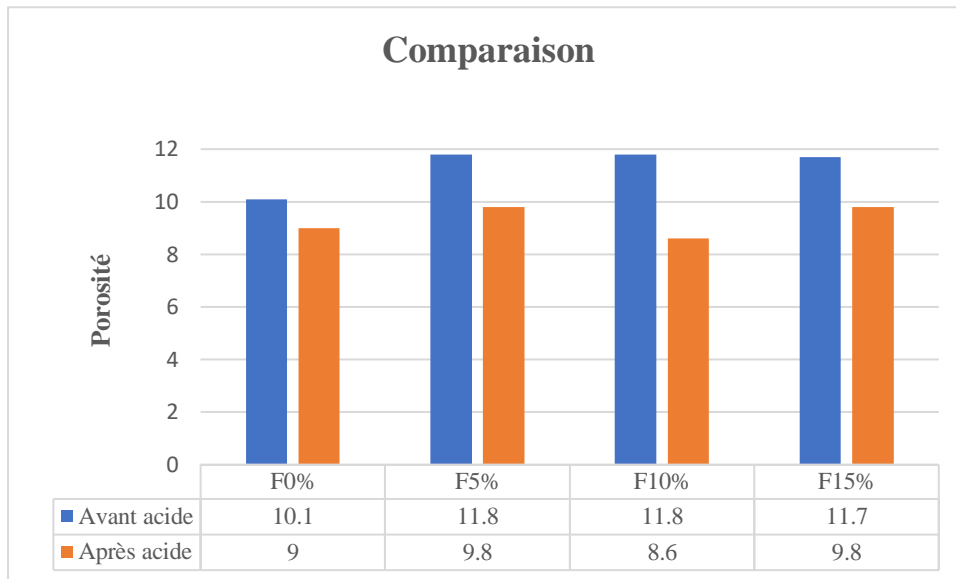


Figure IV.18. Porosité accessible à l'eau avant et après exposition à l'attaque d'acide.

IV.2.4.5. Absorption capillaire du béton pré-fissuré

- **Avant exposition à l'acide :**

L'évolution des valeurs de sorptivité (absorption capillaire) en fonction du temps pour l'ensemble des formulations avant exposition à l'acide est présentée sous forme de courbes (**Fig. IV.21**).

- Les résultats montrent qu'il y a des différences entre les tendances de sorptivité en fonction du pré-fissuration.
- L'absorption capillaire des éprouvettes saines est moins élevée que celles fissurées. Cette différence peut être liée à la pré-fissuration créée.
- L'effet de la pré-fissuration 80% n'amplifie pas outre mesure la dégradation des performances mécaniques dans ces conditions d'exposition.

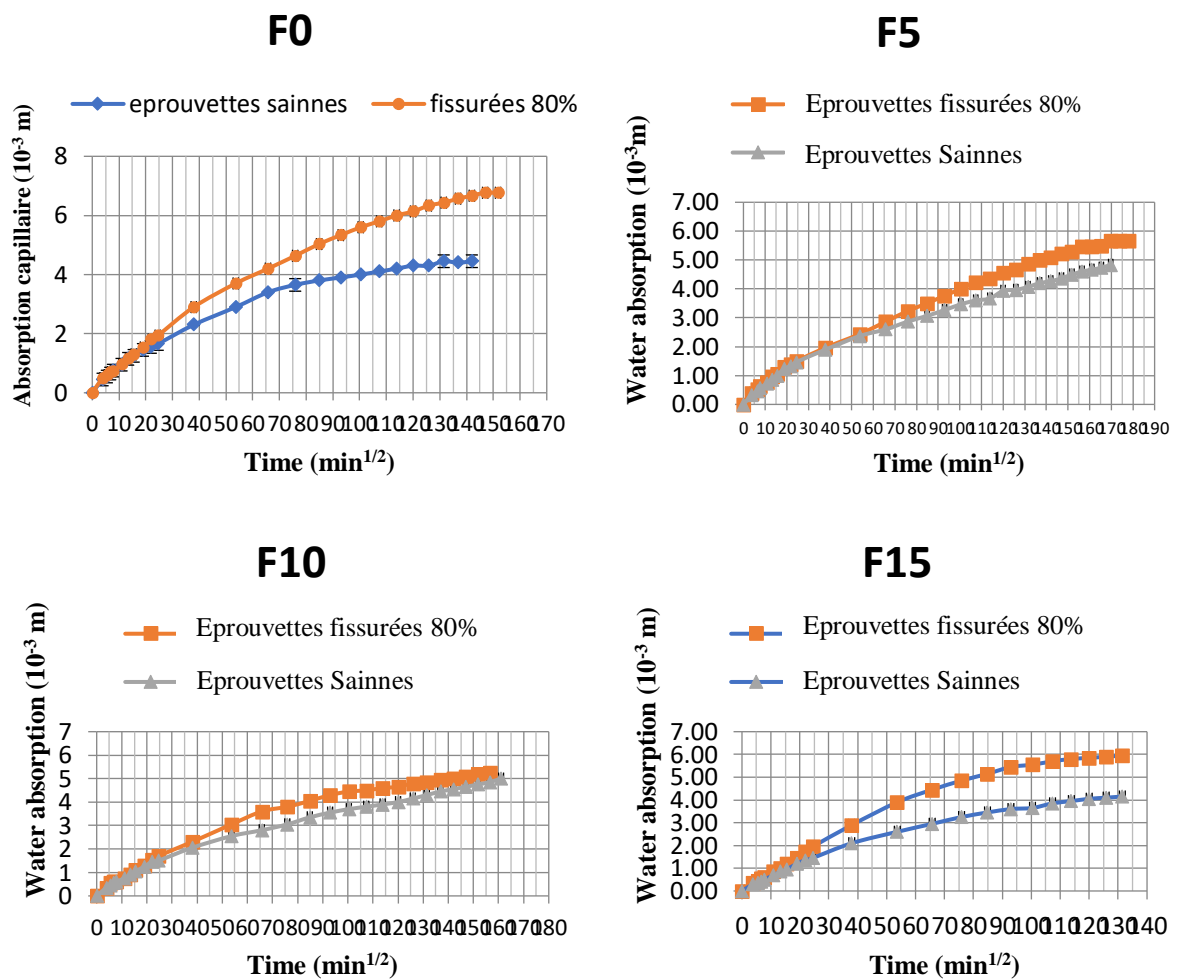


Figure IV.21. Courbes de sorptivité avant exposition à l'acide pour les éprouvettes saines et pré-fissuré (F0, F5, F10, F15)

Remarque :

Pour les courbes de l'absorption capillaire après exposition à l'acide, j'ai lancé les éprouvettes dans l'appareil d'absorption, mais je n'ai pas eu le temps d'exprimer les résultats. L'essai est en cours (voir fig. IV.11).

IV.3. Conclusion

Les résultats montrent que les modifications apportées aux formulations de béton modifiées (F5%, F10%, F15%) ont généralement montré de meilleures performances mécaniques initiales que la formulation de référence (F0%) avant l'attaque acide, et la formulation F5 a donné la résistance à la compression la plus élevée à 28 jours.

Cependant, après l'exposition à l'acide, toutes les formulations ont subi une dégradation significative de la résistance à la compression, allant jusqu'à 52,8% de réduction pour F10.

Les effets sur la résistance à la traction étaient variables, avec une légère réduction pour F5% et F15%, mais une augmentation pour F0% et F10% après l'attaque acide.

Une diminution de la porosité pour la plupart des formulations après l'exposition à l'acide.

Des études complémentaires sont nécessaires pour comprendre les mécanismes de dégradation spécifiques à chaque formulation et optimiser leur résistance aux attaques chimiques.

En conclusion, les modifications apportées aux formulations de béton peuvent offrir des avantages en termes de performances mécaniques initiales, mais doivent être évaluées en tenant compte de la durabilité et de la résistance aux environnements agressifs dans lesquels le béton sera utilisé.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion Générale

Ce travail consiste à étudier la dégradation des bétons dans les milieux agressifs. Le nombre de désordres pouvant affecter la durabilité de tels ouvrages est en effet important et leurs origines sont très diverses. Nous avons focalisé nos efforts sur les dégradations sous l'effet d'attaque chimique d'acide sulfurique. Pour ces 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 essentiellement de la compacité du béton.

Le béton est un système chimique fortement basique, à comportement évolutif dans le temps et plus ou moins réactif au contact avec le milieu extérieur. Pour améliorer ses performances et sa durabilité, il est indispensable de mieux comprendre sa réponse aux agressions chimiques et la capacité de sa matrice solide à se protéger contre ces attaques afin de faire en sorte que sa période d'amorçage soit la plus longue possible.

D'une manière générale, les attaques chimiques des bétons mettent en jeu deux mécanismes couplés que sont la dissolution des hydrates (lixiviation des ions Ca^{2+} de la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et des silicates de calcium hydratés C-S-H) et la précipitation de sels nocifs ou non. Les conséquences générales sont un accroissement de la porosité et de la fissuration, une augmentation de la perméabilité et de la diffusivité, des pertes de raideur et de résistances mécaniques. Pour lutter contre ces attaques chimiques dans les bétons, l'utilisation d'addition minérale consommatrice de chaux et productrice de C-S-H contribue à améliorer la durabilité des bétons.

Le principal objectif de ce mémoire était d'étudier les effets de couplage de la pré-fissuration et de l'utilisation du Laitier de haut fourneau (GBFS) et du Métakaolin (MK) comme matériaux cimentaires binaires sur les propriétés mécaniques et de durabilité du béton durci. Notre démarche de travail est basée sur des essais expérimentaux réalisés au laboratoire sur des éprouvettes de béton. Nous avons réalisé sur quatre formulations (F0, F5, F10 et F15) des essais de résistance à la compression, des essais de perte de masse suite aux attaques chimiques, des essais de porosité accessible à l'eau et des essais d'absorption capillaire. L'ensemble de ces essais ont été réalisés sur des éprouvettes de béton sain (sans fissuration ni attaque chimique) et pré-fissuré et exposé à l'acide sulfurique.

Les résultats des essais ont permis d'apporter des nouveaux éléments sur l'effet couplé, sous attaque chimique, de la pré-fissuration et de la substitution du ciment par GBFS et MK.

Les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- La réaction pouzzolanique générée par l'ajout du GBFS et MK offre au béton une résistance à la compression supplémentaire. La formulation F5 (5% de GBFS et MK) a fourni la meilleure R_c à 28 jours.

- Le béton non pré-fissuré et modifié par GBFS et MK des trois formulations F5, F10 et F15 se prouve au même niveau de résistance à la compression à 28 jours de la formulation de référence (F0) et cela avant et après exposition à l'acide. Les pourcentages de diminution de R_{c28} dû à l'attaque de l'acide sont en moyenne à 50% de la résistance initiale. L'augmentation du degré de pré-fissuration du béton a réduit la résistance à la compression du béton après exposition à l'acide pour l'ensemble des formulations.
- La formulation optimale est celle correspondant au remplacement de ciment à 5% par GBFS et MK (F5) car cette formulation a fourni une meilleure durabilité initiale comparativement à la formulation de référence (F0) avant exposition à l'acide.

En conclusion, cette étude souligne l'importance de l'utilisation de matériaux cimentaires binaires tels que le GBFS et le MK pour améliorer la durabilité et la résistance du béton dans des environnements chimiquement agressifs.

Les Références

Les Références

- [1] BOUDJEHM, Hocine. "ÉTUDE ET AMELIORATION DES PERFORMANCES DE DURABILITE DES BETONS EN MILIEUX AGRESSIFS". Thèse de Doctorat, Univ. 8 Mai 1945 – Guelma, 2023.
- [2] InfoCiments. "Résistance aux agents agressifs". <https://www.infociments.fr/betons/resistance-aux-agents-agressifs>.
- [3] HAFFAF, A., DJIAR, 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.
- [4] Je-Construis.co. "Types de béton". <https://je-construis.co/beton/types-de-beton/>.
- [5] BECOSAN. "Les types de béton et leurs caractéristiques". <https://www.becosan.com/fr/types-de-beton/>.
- [6] LCBTP. "Résistance à la compression sur éprouvettes".
- [7] AFNOR. "Essais pour béton durci - Partie 5: Résistance à la flexion des éprouvettes". <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-123905/essais-pour-beton-durci-partie-5-resistance-a-la-flexion-des-eprouvettes/fa190567/83459>.
- [8] Wikipedia. "Essai d'affaissement au cône d'Abrams". https://fr.wikipedia.org/wiki/Essai_d'affaissement_au_cône_d'Abrams.
- [9] Academia.edu. "Influence des particules fines sur les caractéristiques mécaniques et le retrait d'un béton ordinaire". https://www.academia.edu/103280657/Influence_des_particules_fines_sur_les_caract%C3%A9ristiques_m%C3%A9caniques_et_le_retrait_d_un_b%C3%A9ton_ordinaire?uc-sw=37811572.
- [10] InfoCiments. "Caractéristiques et emplois des ciments". <https://www.infociments.fr/ciments/caracteristiques-et-emplois-des-ciments>.
- [11] InfoCiments. "Tableau des caractéristiques des ciments". https://www.infociments.fr/sites/default/files/article/image/ciments/tableau1_1.png.
- [12] Mémoire Online. "Mécanismes d'altérations des matériaux cimentaires soumis aux milieux fortement agressifs". <https://www.memoireonline.com/10/12/6325/Mecanismes-d-alterations-des-materiaux-cimentaires-soumis-aux-milieus-fortement-agressifs.html>.
- [13] Université Abou Bekr Belkaid à Tlemcen. "Les granulats", consulté le 11 juin 2024. <https://ft.univ-tlemcen.dz/assets/uploads/pdf/departement/gc/granulats.pdf>.
- [14] Université Abou Bekr Belkaid à Tlemcen. "CHAPITRE II : LES GRANULATS", consulté le 11 juin 2024. https://staff.univ-batna2.dz/sites/default/files/benabid-abderrahmane/files/chapitre_ii_les_granulats.pdf

- [15] GuideBeton.com. "La composition du béton", consulté le 11 juin 2024. <https://www.guidebeton.com/composition-beton>.
- [16] Usine Nouvelle. "Le chartrain Poullard vise le béton 100% recyclé". <https://www.usinenouvelle.com/article/le-chartrain-poullard-vise-le-beton-100-recycle.N449157>.
- [17] Université de Djelfa. "DSpace Repository", consulté le 11 juin 2024. <http://dspace.univ-djelfa.dz:8080/xmlui/handle/123456789/1142?show=full>.
- [18] Université de Djelfa. "DSpace Repository", consulté le 11 juin 2024. <http://dspace.univ-djelfa.dz:8080/xmlui/handle/123456789/1142?show=full>.
- [19] CHIHAOUI Ramdane : Durabilité des matériaux cimentaires vis-à-vis d'un environnement chimiquement agressif (Mémoire de Magister- USTMB d'Oran - 2008).
- [20] KERBOUCHE : Influence des ajouts minéraux sur les résistances mécaniques et la durabilité des mortiers (Mémoire de Magister- l'ENSET d'Oran-2009).
- [21] HAUSMANN D.A. – "Steel corrosion in concrete: how does it occur?" Materials protection, vol. 4, 11, 1967, p. 19-23.
- [22] J. P Olivier : livre de " Durabilité des bétons." (A. NONAT : chapitre2 ; V. BAROGHEL-BOUNY, B. CAPRA, S. LAURENS : chapitre9 ; A. CARLES-GIBERGUES, H. HORNAIN : chapitre11 ; G. ESCADEILLAS, H. HORNAIN : chapitre 12). (Edition : Presse de l'école nationales des ponts et chaussées -2008).
- [23] Dr. Ir. P. Boeraeve : Cours de Béton armé
- [24] 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).
- [25] Université de Blida. "DSpace Repository", consulté le 11 juin 2024. <https://di.univ-blida.dz/jspui/bitstream/123456789/10833/1/Memoire%20final%202020%20Fella%20Maroua%202.pdf>
- [26] Le LERM : Dossier technique (laboratoire et société d'études et de conseil en matériaux de construction (BTP/génie Civil, Patrimoine Bâti, Environnement).
- [27] C. Girard Division ST – Technical Facilities Management (ST/TFM) CERN, Genève, Suisse.
- [28] 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).
- [29] Stéphane POYET : Etude de la dégradation des ouvrages en béton atteints par la réaction alcali-silice : Approche expérimentale et modélisation numérique multi-échelles des dégradations dans un environnement hydro-chemo-mécanique variable

- [30] J.-P. O. & A. VICHOT, La durabilité des bétons. France, 2004.
- [31] O. Mehena, "Indicateurs de durabilité du béton dans le contexte Algérien," Université M'Hamed Bougara- BOUMERDES, 2009.
- [32] M. B. S. Eddine, "Formulation et Propriétés des Bétons Autoplaçants à Base de Matériaux Locaux," UNIVERSITE MENTOURI-CONSTANTINE.
- [33] W. Yahiaoui, "Durabilité du béton autoplaçant en climat chaud," Blida, 2018.
- [34] R. CHAID, R. JAUBERTHIE et A. BOUKHALED. Effet de l'ajout calcaire sur la durabilité des bétons. Le banese Science Journal, Vol. 11, No. 1, 2010
- [35] DJOBO YANKWA Jean Noël, effets de l'incorporation d'adjuvants minéraux sur les propriétés de ciments gépolyinérés à base scories volcanique.
- [36] Bouglada Mohamed Salah, « Effet de l'activation du ciment avec ajout minéral par la chaux fine sur le comportement mécanique du mortier », Mémoire de Magister, Université de M'sila, Année 2007 / 2008.
- [37] À Kerbouche, M. Mouli, L. Laoufi, Y. Senhadji, S. Benosmane (Faculté des sciences, Laboratoire de Chimie des Polymères, Université d'Oran, Es-sénia, Oran) (Influence des ajouts minéraux sur les résistances mécaniques des mortiers).
- [38] G. Cherifa, B. Feriel. Effet des ajouts cimentaires sur les propriétés physiques et mécanique du mortier. mémoire de master. Blida, 2020
- [39] Bechar S., Etude et formulation d'un laitier de ciment pétrolier élaboré avec l'incorporation des additions naturelles ; Thèse en vue de l'obtention du diplôme de doctorat, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2019.
- [40] BENSALFI. E., F. Bouteldja, M.S. Nouaouria, P. Breul,(2019) Influence of crushed granulated blast furnace slag and calcined eggshell waste on mechanical properties of a compacted marl, Transportation Geotechnics 20 (2019), 100244, <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2019.100244>.
- [41] RABEHI Bahia, (2013), Evaluation des propriétés réfractaires et cimentaires du kaolin de Djebel Debbagh Thèse de Doctorat 2013 UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES.
- [42] ACPresse. "Image fumée de silice". <https://www.acpresse.fr/fumee-de-silice-approche-environnementale-securitaire-et-sanitaire/>
- [43] AquaPortail. "Pouzzolane : définition et explications", consulté le 11 juin 2024. <https://www.aquaportail.com/dictionnaire/definition/4647/pouzzolane>.
- [44] Rock Identifier. "Marbre (Marble)", consulté le 11 juin 2024. <https://rockidentifier.com/fr/wiki/Marble.html>
- [45] "Sibelco et Mineris Environnement créent une entreprise commune pour la collecte et le recyclage du verre plat", Verre & protections.com, consulté le 11 juin 2024, <https://www.verreetprotections.com/sibelco-et-mineris-environnement-creent-une-entreprise->

commune-pour-la-collecte-et-le-recyclage-du-verre-plat/.

[46] “Concassé Dolomie”, Mategro, consulté le 11 juin 2024, <https://www.mategro.com/product/concasse-dolomie-brune/>.

[47] Types de fissures dans le béton | Fissures dans la colonne, dalle <https://dailycivil.com/types-of-cracks-in-concrete>.

[48] Kiliswa M.W, K.L, Scrivener, M.G. Alexander, (2019) The corrosion rate and microstructure of Portland cement and calcium aluminate cement-based concrete mixtures in outfall sewers: a comparative study, *Cement and Concrete Research* 124 (2019), 105818, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105818>.

[49] Jean FESTA, Georges DREUX « Nouveau guide du béton et ses constitutions » huitième édition -EYROLLES- page 237-246.

[50] Singh Gill et Siddique (2018) A. Singh Gill, R. Siddique, Durability properties of self-compacting concrete incorporating metakaolin and rice husk ash, *Construction and Building Materials* 176 (2018) 323–332, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.054>.

[51] Xupeng. C. S. Zhuowen, P. Jianyong, (2021). Effects of active mineral admixture on mechanical properties and durability of concrete. *Materials Research Express* 8, 115506. doi: 10.1088/2053-1591/ac3b7e.

[52] Adel Al Menhosh, Yu Wang, Yan Wang, Levingshan Augustus-Nelson. (2018) Long term durability properties of concrete modified with metakaolin and polymer admixture. *Construction and Building Materials* 172 (2018) 41–51.

[53] Chen Xupeng, Sun Zhuowen and Pang Jianyong. (2021) Effects of active mineral admixture on mechanical properties and durability of concrete. *Materials Research. Express* 8 (2021) 115506. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ac3b7e>.

[54] Daily Civil. "Types de fissures dans le béton". <https://dailycivil.com/types-of-cracks-in-concrete>.

[55] La norme NF EN 206-1. "Le Béton à l'Heure Européenne : mise en vigueur de la norme NF EN 206-1." *Revue technique du bâtiment et des constructions industrielles* 225 (2004) : 33- 37.

[56] La norme NF EN 206-1. "Le Béton à l'Heure Européenne : mise en vigueur de la norme NF EN 206-1." *Revue technique du bâtiment et des constructions industrielles* 225 (2004): 33- 37.

[57] M. Zhiming, L. Miao, T. Qin, L. Chaofeng, D. Zhenhua, Chloride permeability of recycled aggregate concrete under the coupling effect of freezing-thawing, elevated temperature or mechanical damage, *Construction and Building Materials* 237 (2020), 117648, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117648>.

[58] Y. Lv, W. Zhang, F. Wu, H. Li, Y. Zhang, G. Xu, Influence of initial damage degree on the degradation of concrete under sulfate attack and wetting–drying cycles, *international journal of concrete structures and materials* 14 (2020) 47, <https://doi.org/10.1186/s40069->

020- 00422-z.

[59] Bulatović 'c, M. Melešev, M. Radeka, V. Radonjanin, I. Lukić,(2017) Evaluation of sulfate resistance of concrete with recycled and natural aggregates, *Construction and Building Materials* 152 (2017) 614–631, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.161>.

[60] ASTM C1754 Effects of macrosynthetic fibers on pervious concrete properties. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(9), 06014031.

[61] BS EN 480-5 (2005) British Standards Institution: Admixtures for concrete, mortar and grout - test methods - part 5: determination of capillary absorption (2005).

[62] N. Bheel, S.A. Abbasi, P. Awoyera, O.B. Olalusi, S. Sohu, C. Rondon, A. M. Echeverría, Fresh and Hardened Properties of Concrete Incorporating Binary Blend of Metakaolin and Ground Granulated Blast Furnace Slag as Supplementary Cementitious Material, *Advances in Civil Engineering* 2020 (2020) 1–8.

[63] Duan, Z. Shui, W. Chen, C. Shen, (2013) Enhancing microstructure and durability of concrete from ground granulated blast furnace slag and metakaolin as cement replacement materials, *Journal of Materials Research and Technology* 2 (1) (2013) 52–59, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2013.03.010>.

Références normatives

Références normatives

NF EN 206-1 : Béton - Partie 1 : spécification, performances, production et conformité

NF EN-12390-5 : Essais pour béton durci - Partie 5 : résistance à la flexion des éprouvettes

NF EN-12390-3 : Essais pour béton durci - Partie 3 : résistance à la compression des éprouvettes

NF EN 933-2 : Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 2 : détermination de la granularité - Tamis de contrôle, dimensions nominales des ouvertures

NFP18-540 : Granulats - Définitions, conformité, spécifications.

NFP18-407(NA428) : Bétons - Essai de flexion

NFP15-301 : Liants hydrauliques - Ciments courants - Composition, spécifications et critères de conformité.

NF EN 197 : Ciment - Partie 1 : composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants

NA 442-2000 : Composition, Spécifications ET Critères DES Ciments Courants

EN NF 933-8 : Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 8 : évaluation des fines - Équivalent de sable

NF P18-589 : Granulats - Réactivité potentielle de type alcali silice et alcali silicate - Test cinétique - Méthode chimique.

NF P 18-573 : Granulats - Essai de Los Angeles

NF EN 197-1 : Ciment - Partie 1 : composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants