

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعلّم والعالي والبعث العلمى

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبى بكر بلقايد - تلمسّان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



THESE

Présentée pour l'obtention du grade de DOCTORAT 3ème Cycle

En : Génie Civil

Spécialité : Matériaux en Génie Civil

Par : **YOUSARI Fatima Zohra**

Sujet

**Etude de la résistance des bétons à base de fibres métalliques
à la lixiviation et aux attaques acides**

Soutenue publiquement, le 15 / 10 /2023, devant le jury composé de :

M. GHOMARI Fouad	Professeur	Univ. Tlemcen	Président
M. TALEB Omar	MCA	Univ. Tlemcen	Directeur de thèse
M. BENOSMAN Ahmed Soufiane	Professeur	E.S.S.A. Tlemcen	Co- Directeur de thèse
M. SENHADJI Yassine	Professeur	Univ. Mascara	Examineur 1
M. CHIHAOUI Ramdane	MCA	E.N.P. Oran	Examineur 2

Dédicaces

A la mémoire de mon père

« YOUSARI Aboubekr »

L'épaule solide, l'œil attentif et compréhensif

La personne la plus digne de mon estime et de mon respect.

Tu as toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager,

Tu es ma précieuse offre de notre Bon Dieu et source de ma réussite.

Mais tu es parti trop tôt.

Où que tu sois, j'espère que tu apprécieras cet humble geste de gratitude de ta
fille, qui a toujours été si fière de toi.

Tu seras toujours présent dans ma vie

et tu participeras toujours dans mes choix et mes réflexions.

Allah yerahmek mon cher papa

اللهم اغفر لأبي وارحمه وعافه واعف عنه وأكرم نزله، ووسع مدخله وأغسله بالماء
والتلج والبرد، ونقه من الخطايا كما ينقى الثوب الأبيض من الدنس، وأبدله دارا خيرا من
داره، وأهلا خيرا من أهله، وأدخله الجنة بغير حساب وأعد له من عذاب القبر

اللهم آمين

A ma Mère

La femme qui a souffert pour m'épargner de la souffrance,
Qui m'a arrosé de tendresse et d'espoir et qui n'a jamais dit non à mes exigences
Aucune dédicace ne saurait exprimer tous le respect et l'amour que j'ai pour elle.

A ma Sœur et ma Deuxième mère Sihem et à son Mari mon Frère Hafid

A mon Cher Frère Ahmed Ryiadh

Pour leurs soutiens et leurs précieux conseils tout au long de mes études.

A ma Nièce Rahma Djana

A mes Neveux Adam Rayan et Marwane Yanis

Que Dieu leurs donne une longue et joyeuse vie

A toute ma Famille

A tous mes Amis (es)

YOUSSARI Fatima Zohra

Remerciements

La réalisation de ce mémoire a été possible grâce à Dieux et au concours de plusieurs personnes à qui je voudrais témoigner toute ma gratitude.

Tout d'abord, une pensée particulière est dédiée au feu **Sidi Mohammed El Amine BOUKLI HACENE**, Professeur à l'Université de Tlemcen avec qui j'ai commencé mes travaux de recherche.

Ensuite, Je voudrais adresser toute ma reconnaissance à mon directeur de thèse et mon idole Monsieur **Omar TALEB**, Maître de Conférences à l'université de Tlemcen, pour sa patience, sa disponibilité et surtout pour ses judicieux conseils qui ont contribué à alimenter ma réflexion, ainsi que pour ses directives, ses remarques, suggestions et ses encouragements dans les moments clés. Je tiens à le remercier aussi pour cette liberté qu'il a permise, sans laquelle le chercheur ne saurait affirmer sa manière de penser et de procéder, sa manière d'être, bref toute sa personnalité.

Je souhaite aussi exprimer mes remerciements respectueux à Monsieur **Ahmed Soufiane BENOSMAN**, co-directeur de cette thèse et Professeur à l'Ecole Supérieure des Sciences Appliquées de Tlemcen (ESSAT), qui m'a beaucoup apporté dans ce projet. Toutes nos conversations aussi bien scientifiques que diverses m'ont énormément apporté et m'ont permis d'avancer en permanence.

Je tiens également à remercier Monsieur **Fouad GHOMARI**, Professeur à l'Université de Tlemcen, qui me fait l'honneur de présider le jury de ma thèse. Je lui suis particulièrement reconnaissante pour ses orientations.

Je présente mes vifs remerciements aux spécialistes, Monsieur **Yassine SENHADJI**, Professeur à l'Université de Mascara et Monsieur **Ramdane CHIHAOUI**, Maître de Conférences à l'Ecole Nationale Polytechnique d'Oran - Maurice Audin, de me faire l'honneur d'accepter d'examiner et d'évaluer mon travail de thèse.

Ce travail a été réalisé en grande partie au sein du laboratoire Eau et Ouvrages dans Leur Environnement (EOLE). Certains essais de microstructure ont été réalisés dans le laboratoire de chimie et d'électrochimie ainsi que dans le laboratoire de catalyse et de synthèse en chimie organique (LCSCO) de l'Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen. De ce fait, j'associe à mes remerciements tous les membres de ces laboratoires en particulier le Professeur **Abdelillah BEZZAR**, pour leurs aides et pour les moyens qui ont été mis à ma disposition.

Je désire en outre adresser mes remerciements les plus distingués à tous les techniciens du laboratoire pédagogique de Génie Civil, en particulier Docteur **Mustapha HENAOUI** et aussi à l'ensemble du personnel du département de génie civil de la Faculté de Technologie.

Mes profonds remerciements, accompagnés par des sentiments les plus dévoués, vont à mon cher père « **YOUSSARI Aboubekr** » et ma chère mère pour tous les efforts colossaux qu'ils ont déployés pour garantir ma réussite dans ce projet professionnel.

Enfin, je ne peux conclure sans remercier le Docteur **Mohammed BENMAMMAR**, **Ahmed Abdelmadjid AIT SALEM**, **ZAOUI Soumia**, **HAROUAT Amina**, **BELAIDI Amina** et **OTMANI Ismahane** pour leurs soutiens, leurs aides et leurs présences à mes côtés durant cette thèse.

YOUSSARI Fatima Zohra

Résumé

La durabilité des ouvrages reste un paramètre clé dans une approche de développement durable. La durée de vie technique des ouvrages dépend non seulement de l'usure liée à l'usage et à l'effet du temps mais aussi de l'environnement de l'ouvrage. Généralement, la question de l'évaluation de la durabilité des constructions tourne surtout autour des matériaux qui les composent. Les spécialistes du domaine visent de façon continue et extensive à améliorer les performances des ouvrages en promouvant l'utilisation de nouveaux constituants.

Dans ce travail, on s'est particulièrement intéressé à l'utilisation des fibres métalliques qui peuvent potentiellement améliorer certaines caractéristiques des bétons. Cependant, le caractère corrosif de ces fibres peut aussi altérer certaines propriétés des bétons surtout s'ils sont en contact permanent avec l'eau ou avec des solutions agressives.

Le premier objectif de cette thèse consiste à étudier le comportement des bétons et des mortiers de bétons équivalents (MBE) avec et sans fibres métalliques exposés pendant 135 jours à trois solutions acides à 5% de concentration : HCl, H₂SO₄ et CH₃COOH.

Le second objectif s'intéresse à l'étude de la lixiviation chimique des mêmes mélanges qui sont immergés dans une solution à 6 moles de NH₄NO₃ pendant une durée de 462 jours. L'intérêt d'étudier simultanément les bétons et les MBE a non seulement pour but de mettre en évidence l'effet des granulats sur la lixiviation et sur les attaques acides mais aussi de trouver des corrélations entre le comportement des bétons et des MBE associés afin de réduire la lourdeur des essais expérimentaux dans le futur.

Toutes les éprouvettes ont été soumises à des essais mécaniques, chimiques et morphologiques qui permettent de suivre les variations intrinsèques des échantillons soumis aux différents milieux. De plus, des tests de perte de masse, de porosité, de conductivité électrique ont aussi été réalisés.

Les résultats ont montré que les fibres permettent de réduire la porosité et améliorer les résistances mécaniques et la durabilité dans un milieu sain. Par contre, dans les milieux agressifs, des dégradations significatives ont été notées surtout après le déclenchement du processus de corrosion des fibres qui facilite la pénétration des solutions agressives dans les pores et rendent ainsi les bétons vulnérables.

Pour les MBE, les pertes des performances mécaniques, physiques et chimiques sont encore plus importantes et sont pratiquement égales à deux (02) fois les pertes recensées sur les bétons, ce qui montre le rôle joué par les graviers dans l'atténuation du processus de diffusion.

Mots clés : Bétons, MBE, fibres, attaques acides, lixiviation, durabilité, microstructure.

Abstract

The durability of structures remains a key parameter in a sustainable development approach. The technical lifespan of structures depends not only on wear and tear related to use and the effect of time, but also on the environment of the structure. Generally, the question of the evaluation of the durability of constructions revolves mainly around the materials that compose them. Specialists in the field continuously and extensively aim to improve the performance of structures by promoting the use of new constituents.

In this work, we were particularly interested in the use of metal fibers which can potentially improve certain characteristics of concretes. However, the corrosive nature of these fibers can also alter certain properties of concrete, especially if they are in permanent contact with water or with aggressive solutions.

The first objective of this thesis is to study the behavior of concretes and concrete equivalent mortars (CEM) with and without metal fibers exposed for 135 days to three acid solutions at 5% concentration: HCl, H₂SO₄ and CH₃COOH.

The second objective concerns the study of the chemical leaching of the same mixtures which will be immersed in a solution of 6 moles of NH₄NO₃ for a period of 462 days. The interest of simultaneously studying concretes and MBEs not only aims to highlight the effect of gravels on leaching and acid attacks but also to find correlations between the behavior of concretes and associated CEMs in order to reduce the burden of experimental tests in the future.

All the specimens were subjected to mechanical, chemical and morphological tests which make it possible to follow the intrinsic variations of the samples subjected to different environments. In addition, mass loss, porosity and electrical conductivity tests were also carried out.

The results showed that the fibers reduce porosity and improve mechanical strength and durability in a healthy environment. On the other hand, in aggressive environments, significant degradation has been noted, especially after the onset of the fiber corrosion process which facilitates the penetration of aggressive solutions into the pores and thus makes the concrete vulnerable.

For CEMs, the losses in mechanical, physical and chemical performance are even greater and are practically equal to two (02) times the losses recorded on concrete, which shows the role played by gravels in mitigating the process of diffusion.

Keywords : Concretes, CEM, fibers, acid attacks, leaching, durability, microstructure.

ملخص

تظل متانة الهياكل معياراً رئيسياً في نهج التنمية المستدامة. لا يعتمد العمر الفني للهياكل على البلى المرتبط بالاستخدام وتأثير الوقت فحسب، بل يعتمد أيضاً على بيئة الهيكل. بشكل عام، تدور مسألة تقييم متانة الإنشاءات بشكل أساسي حول المواد التي تتكون منها. يهدف المتخصصون في المجال بشكل مستمر وعلى نطاق واسع إلى تحسين أداء الهياكل من خلال تعزيز استخدام مكونات جديدة.

في هذا العمل، كنا مهتمين بشكل خاص باستخدام الألياف المعدنية التي يمكن أن تحسن خصائص معينة للخرسانة. ومع ذلك، فإن الطبيعة المسببة للتآكل لهذه الألياف يمكن أن تغير أيضاً خصائص معينة للخرسانة، خاصةً إذا كانت على اتصال دائم بالماء أو مع المحاليل العدوانية.

هدف الأول من هذه الرسالة هو دراسة سلوك الخرسانة والملاط الخرساني المكافئ (MBE) مع وبدون ألياف معدنية مكشوفة لمدة 135 يوماً لثلاثة محاليل حمضية بتركيز 5%: حمض الهيدروكلوريك (HCl) وحمض الكبريتيك (H_2SO_4) وحمض الخل (CH_3COOH).

أما الهدف الثاني فيتعلق بدراسة الترشيح الكيميائي لنفس الخلائط التي سيتم غمرها في محلول مكون من 6 مولات من نترات الأمونيوم NH_4NO_3 لمدة 462 يوماً. لا يهدف الاهتمام بالدراسة المتزامنة للخرسانة والملاط الخرساني المكافئ MBES إلى إبراز تأثير الحصى على عمليات الترشيح والهجمات الحمضية فحسب، بل يهدف أيضاً إلى إيجاد ارتباطات بين سلوك الخرسانة وما يرتبط بها من MBE من أجل تقليل عبء الاختبارات التجريبية في المستقبل.

تم إخضاع جميع العينات لاختبارات ميكانيكية وكيميائية وصرفية مما يجعل من الممكن متابعة الاختلافات الجوهرية للعينات المعرضة لبيئات مختلفة. بالإضافة إلى ذلك، تم إجراء اختبارات فقد الكتلة والمسامية والتوصيل الكهربائي

أظهرت النتائج أن الألياف تقلل المسامية وتحسن القوة الميكانيكية والمتانة في بيئة صحية. من ناحية أخرى، في البيئات العدوانية، لوحظ تدهور كبير، خاصة بعد بداية عملية تآكل الألياف التي تسهل تغلغل الحلول العدوانية في المسام وبالتالي تجعل الخرسانة عرضة للخطر

بالنسبة إلى الملاط الخرساني المكافئ MBES، تكون الخسائر في الأداء الميكانيكي والفيزيائي والكيميائي أكبر وتساوي عملياً ضعف (02) الخسائر المسجلة على الخرسانة، مما يوضح الدور الذي تلعبه الحصى في التخفيف من عملية الانتشار.

الكلمات المفتاحية: خرسانة والملاط الخرساني المكافئ، ألياف، هجوم حمض، ترشيح، متانة، بنية مجهر.

Table des matières

Remerciements.....	I
Résumé	III
Abstract.....	IV
ملخص	V
Table des matières.....	VI
Liste des figures.....	XI
Liste des tableaux	XVI
Abreviations.....	XVII
Introduction générale.....	1
Chapitre I. Analyse bibliographique	
I.1 Introduction.....	5
I.2. Notions sur les matériaux cimentaires.....	5
I.2.1. Microstructure de la matrice cimentaires.....	6
I.2.2. Hydratation de la pâte de ciment.....	7
I.2.3. A l'échelle du béton.....	8
I.3. Mécanisme de fonctionnement des fibres dans les matériaux cimentaire.....	8
I.3.1. Matériaux cimentaires renforcés par des fibres.....	9
I.3.2. Rôle des fibres dans les matériaux cimentaires.....	10
I.3.3. Type des fibres.....	10
i. Les fibres en amiante.....	11
ii. Les fibres en verre.....	11
iii. Les fibres en polypropylène.....	11
iv. Les fibres métalliques.....	12
v. Les fibres naturelles.....	13
I.3.4. Influence du dosage en fibres.....	16
i. Mécanisme d'action sur le plan rhéologique.....	16
ii. Mécanisme d'action sur le plan mécanique.....	16
I.3.5. Influence l'orientation des fibres.....	17
I.3.6. Influence de la longueur des fibres.....	18
I.3.7. Influence de la fibre-matrice.....	19

I.3.8. Comportement mécanique des matériaux cimentaires renforcés.....	19
i. Résistance en compression.....	19
ii. Résistance à la traction.....	21
iii. Résistance à la flexion.....	22
iv. Résistance au cisaillement.....	23
v. Module d'élasticité.....	24
I.3.9. Autres propriétés.....	25
i. Fluage.....	25
ii. Fatigue.....	26
iii. Retrait.....	26
I.4. Dégradation chimiques.....	26
I.4.1. Lixiviation.....	26
I.4.1.1. Processus de lixiviation du béton.....	27
I.4.1.2. Lixiviation accélérée.....	30
i. Dégradation accélérée par augmentation de la température.....	31
ii. Accélération par application d'une pression hydraulique ou champ électrique.....	32
iii. Immersion dans une solution agressive de nitrate d'ammonium.....	33
I.4.1.3. Paramètres influençant le processus de lixiviation.....	35
i. Influence des granulats.....	35
ii. Influence du liant.....	36
iii. Rapport E/C.....	37
iv. Fissures.....	38
I.4.1.4. Comportement mécanique des bétons dégradés.....	40
I.4.2. Attaques acides.....	45
I.4.2.1. Sources des acides.....	45
I.4.2.2. Mécanisme d'attaque.....	46
I.4.2.3. Acides inorganiques.....	48
I.4.2.4. Acides organiques.....	49
I.4.3. Dépassivation et corrosion de barres ou des fibres métalliques.....	49
I.5. Conclusion.....	51

Chapitre II. Matériels et Méthodes

II.1 Introduction.....	54
II.2. Caractérisation des matériaux utilisés.....	54
II.2.1. Ciment.....	54
II.2.2. Granulats.....	56
II.2.3. Eau.....	58
II.2.4. Fibres.....	58
II.3. Formulation des bétons.....	59
II.3.1. Confection des éprouvettes de béton.....	59
II.4. Mortier des bétons équivalents.....	60
II.4.1. Formulation des mortiers MBE.....	61
II.4.2. Confection des éprouvettes de MBE.....	62
II.5. Ouvrabilité des bétons et des MBE.....	62
II.6. Conservation des éprouvettes.....	62
II.7. Procédures d'essai.....	63
II.7.1. Attaques Acides.....	63
II.7.2. Lixiviation.....	65
II.7.3. Essais mécaniques.....	68
II.7.4. Vitesse d'impulsion ultrasonique et module dynamique.....	68
II.7.5. Porosité accessible à l'eau à.....	69
II.7.6. Etude morphologique.....	70
II.8. Conclusion.....	71

Chapitre III. Présentation et interprétations des résultats

III.1 Introduction.....	74
III.2. Etude sur des bétons	74
III.2.1. Environnement sain.....	74
III.2.1.1. Résistance à la compression.....	74
III.2.1.2. Résistance à la flexion.....	75
III.2.1.3. Vitesse ultrasonique et module dynamique.....	76
III.2.2. Environnement agressif.....	77
III.2.2.1. Attaques acides.....	77
i. Examen visuel.....	78

ii. Epaisseur de dégradation.....	80
iii. Influence des solutions agressives sur la perte de masse.....	80
iv. Influence des solutions agressives sur la résistance à la compression	83
v. Influence des solutions agressives sur la résistance la flexion.....	84
vi. Porosité accessible à l'eau.....	85
vii. Influence des solutions agressives sur UPV et Ed.....	86
III.2.2.2. Phénomène de lixiviation.....	87
i. Diffusion des ions de calcium.....	87
ii. Conductivité électrique.....	89
iii. Porosité accessible à l'eau.....	89
iv. Epaisseur dégradation.....	90
III.2.2.3. Microstructure.....	91
i. MEB/EDS.....	91
ii. Spectre DRX.....	94
III.3. Etude des MBE	96
III.3.1. Attaques acides.....	96
i. Epaisseur de dégradation	96
ii. Influence des solutions agressives sur la perte de masse.....	97
iii. Porosité accessible à l'eau.....	99
iv. Vitesse ultrasonique.....	100
v. Résistance à la compression et flexion des MBE.....	101
III.3.2. Phénomène de lixiviation.....	103
i. Diffusion des ions de calcium	103
ii. Conductivité électrique.....	104
iii. Epaisseur dégradation	104
iv. Porosité accessible à l'eau	105
III.4. Corrélations entre les différentes grandeurs des bétons.....	107
III.3.1. Corrélation entre la perte de masse et la porosité.....	107
III.3.2. Corrélation entre la perte de masse et la R.C.....	107
III.3.3. Corrélation entre la porosité et la résistance à la compression.....	108
III.3.4. Corrélation entre la vitesse ultrasonique et la porosité.....	109
III.3.5. Corrélation entre les ions de calcium diffusés et la porosité.....	109
III.5. Corrélations entre les différentes grandeurs MBE.....	110

III.6. Corrélation entre bétons et mortiers MBE.....	111
III.6.1. La perte de masse	111
III.6.2. Epaisseur de dégradation	111
III.6.3. Porosité accessible à l'eau.....	113
III.6.4. Propriétés mécaniques.....	114
III.6.5. Ions calciums lessivés.....	115
III.7. Conclusion.....	116
Conclusion générale et perspectives.....	118

Liste des figures

Figure I.1. Modélisation en 3D du matériau par CEMHYD3D [Kamali, 2003].....	6
Figure I.2. Vue au microscope électronique à balayage de C – S – H dans une Pâte de ciment hydratée [Rego ,1975].....	7
Figure I.3. Étapes de fusionner des fissures et d'action des fibres [Lawler et al., 2003].....	9
Figure I.4. Différents facteurs influant sur le comportement mécanique d'un béton renforcé par des fibres [Meddah, 2014].....	10
Figure I.5. Fibres polypropylène [Source psbi.vcmbat.dz].....	12
Figure I.6. Géométrie des fibres métalliques [Source : betonabq.org].....	13
Figure I.7. Classification des fibres végétales (Dallel 2012).....	14
Figure I.8. Influence de la direction du carottage sur le comportement en traction d'un béton fibré [Casanova ,1996].....	18
Figure I.9. Rôle des fibres sur les bétons fissurés [Chemrouk et al., 2006].....	21
Figure I.10. Comportement en traction directe en fonction du pourcentage en fibres [Taylor et al, 1997].....	22
Figure I.11. Influence du pourcentage des fibres sur le comportement à la flexion des bétons [Pająk et Ponikiewski, 2013].....	23
Figure I.12. Influence du pourcentage des fibres sur le comportement au cisaillement des bétons [Fariboz et al., 2006].....	24
Figure I.13. Évolution de la résistance en compression et du module de Young en fonction de la teneur en fibre [Djebali, 2013].....	25
Figure I.14. Processus de lixiviation d'un matériau cimentaire [Nguyen 2005].....	28
Figure I.15. Diagramme d'équilibre entre le rapport Ca/Si dans la phase solide et la concentration en calcium en solution interstitielle [Tognazzi, 1998].....	29
Figure I.16. Dégradation par lixiviation d'une pâte de ciment [Adenot et Faucon, 1996].....	30
Figure I.17.a. Flux de calcium lixivié en fonction de la température pour des pâtes de CEM I et de CEM V [Peycelon et al., 2004].....	31
Figure I.17.b. Lixiviation d'une pâte de ciment à différentes températures [Torrenti et al 1999]	31
Figure I.18. Profondeur dégradée des échantillons dans la solution de nitrate d'ammonium en Fonction du rapport E/C [Kamali, 2008]	31
Figure I.19. Cellule d'essai accéléré sous champ électrique LIFT [Gérard, 1996].....	33

Figure I.20. Profils en calcium au MEB d'une pâte de ciment CEM I à E/C =0.5) [Carde et al, 1996]	34
Figure I.21. Evolution de l'épaisseur de dégradation en fonction de la racine carrée du temps a) pâte de ciment, b) mortier ,c) béton [Nguyen, 2005].....	36
Figure I.22. Photos des échantillons de pâte de ciment avec E/C = 0,4 lixiviés pendant 114 jours dans l'eau pure [Kamali et al, 2008].....	37
Figure I.23. Profondeur dégradée des échantillons dans la solution de nitrate d'ammonium en fonction du rapport E/C [Kamali, 2008].....	38
Figure I.24. a) Profil de dégradation dans la section droite d'une éprouvette fissurée b) Evolution des épaisseurs dégradées en fond de fissure et en zone non fissurée [Tognazzi, 1998].....	39
Figure I.25. Profil de dégradation dans la section droite d'une éprouvette fissurée [Le Bellégo, 2001].....	39
Figure I.26. Courbes contraintes moyennes - déformation en compression à différents Stades de la dégradation a) pâte de ciment CEM I E/C = 0,45 b) pâte de ciment CEM I + fumée de silice E/C= 0,45, FS/C = 0,3 [Carde, 1996]	40
Figure I.27. Profil des ions calciums dans la phase solide - microsonde (pâte de ciment (a) CEM I (b) pâte de ciment CEM I+ fumée de silice (FS/C =0.3) [Carde et al., 1996].....	41
Figure I.28 a) Evolution du module d'Young en fonction de la concentration de calcium liquide b) Evolution relative de la micro-dureté avec la profondeur de dégradation [Gérard, 1996].....	42
Figure I.29. Essais de traction en fonction du taux de dégradation[Le Bellégo, 2000].....	43
Figure I.30. Evolution de la résistance en compression en fonction du temps [Nguyen 2005].....	43
Figure I.31. Courbes contrainte-déformation sur des éprouvettes pleines à différentes échéances de dégradation chimique [Nguyen, 2005].....	44
Figure I.32. Dissolution et neutralisation de la pâte de ciment. a) Mécanismes de dissolution pour un acide H (x) [Beddoe, 2005, Beddoe, 2016].....	47
Figure I.33. Corrosion de l'acier en milieu acide. Détérioration du béton renforcé de fibres d'aciers exposés aux attaques acides.[Marcos-Meson et al, 2019].....	51
Figure II.1. Distribution granulométrique du ciment utilisé.....	54
Figure II.2. DRX du ciment utilisé.....	56
Figure II.3. Analyse granulométrique des différents granulats.....	57

Figure II.4. Malaxage et Coulage des éprouvettes en béton.....	60
Figure II.5. Comparaison entre MBE et le béton associé	60
Figure II.6. Cône d’Abrams et le mini-cône [Source : theory.labster.com/slump test/].....	62
Figure II.7. Conservation des éprouvettes dans l’eau saturée par la chaux.....	63
Figure II.8. Conservation des éprouvettes dans les solutions agressives.....	63
Figure II.9. Profil d’une éprouvette immergée dans unes solutions agressives pendant 135 jours.....	65
Figure II.10. Essai de dégradation accélérée au nitrate d’ammonium.....	65
Figure II.11. Evolution du pH et de la température au cours de l’essai.....	66
Figure II.12. Titration des solutions.....	67
Figure II.13. Conductimètre.....	67
Figure II.14. Essais de performance mécanique.....	68
Figure II.15. Test de la vitesse d’impulsion ultrasonique des échantillons.....	69
Figure II.16. Dispositif de la porosité accessible à l’eau.....	69
Figure II.17. MEB.....	70
Figure II.18. Dispositif DRX.....	71
Figure II.19. Organigramme du programme expérimental.....	72
Figure III.1. Evaluation des résistances à la compression des bétons à différents âges	75
Figure III.2. Evaluation des résistances à la flexion des bétons.....	76
Figure III.3. Vitesse ultrasonique et module dynamique des bétons ordinaires et fibrés à 135 jours.....	77
Figure III.4 a. Etat des bétons sains et dégradés.....	78
Figure III.4 b. Test à la phénophtaléine sur des bétons sains et dégradés.....	79
Figure III.5. La corrosion des fibres à l’intérieur et à la surface des éprouvettes.....	79
Figure III.6. Variation de l’épaisseur de dégradation des échantillons exposés aux trois solutions chimiques pendant 135 jours.....	80
Figure III.7. Variation de la masse des échantillons immergés dans la solution H ₂ SO ₄ à 135 jours.....	81
Figure III.8. Variation de la masse des échantillons immergés dans la solution HCl . à 135 jours.....	82
Figure III.9. Variation de la masse des échantillons immergés dans la solution CH ₃ COOH 135 jours.....	83

Figure III.10. Résistances à la compression des bétons immergés dans les trois solutions acides.....	84
Figure III.11. Résistances à la flexion des bétons immergés dans les solutions agressives.....	85
Figure III.12 Porosité accessible à l'eau des différents bétons immergés dans la solution de HCl, H ₂ SO ₄ et CH ₃ COOH.....	86
Figure III.13. Vitesse ultrasonore et module dynamique des bétons avant et après Immersion dans les solutions chimiques pendant 135 jours.....	87
Figure III.14. La teneur en calcium lessivé des échantillons.....	88
Figure III.15. Conductivité électrique de la solution.....	89
Figure III.16. Porosité accessible à l'eau des échantillons lixiviés.....	90
Figure III.17. Variation de l'épaisseur de dégradation des échantillons immergés dans 6mol/L NH ₄ NO ₃ pendant 462 jours.....	91
Figure III.18 : Microscopie électronique à balayage (MEB) des échantillons avant... et après attaque des solutions chimiques, G : gypse.....	92
Figure III.19 : (a). Schémas DRX des échantillons immergés dans l'HCl, (b). dans l'H ₂ SO ₄ , (c). dans le CH ₃ COOH, (c). soumis à la lixiviation (e). sous l'eau du robinet	93
Figure III.20. Microscopie électronique à balayage des échantillons (MEB) et analyse élémentaire (EDS) des fibrés sains dégradés.....	95
Figure III.21. Synthèse des résultats obtenus sur les bétons.....	96
Figure III.22. L'évaluation de l'épaisseur de dégradation des MBE avec et sans fibres pendant 135jours.....	97
Figure III.23 a. Variations des masses des MBE dans H ₂ SO ₄	98
Figure III.23 b. Variations des masses des MBE dans HCl.....	98
Figure III.23 c. Variations des masses des MBE dans CH ₃ COOH.....	99
Figure III.24. Variations de la porosité des mortiers équivalents dans les trois solutions agressives.....	100
Figure III.25. Variation de la vitesse ultrasonique et module dynamique des MBE dans les trois solutions agressives.....	101
Figure III.26.a. Variation de la résistance à la compression des MBE dans les trois solutions agressives.....	102
Figure III.26.b. Variation de la résistance à la flexion des MBE dans les trois solutions agressives.....	102

Figure III.27. La teneur en calcium lessivé des mortiers équivalents.....	103
Figure III.28. La conductivité électrique des MBE avec et sans fibres.....	104
Figure III.29. Evaluation de l'épaisseur de dégradation des MBE avec et sans fibres métalliques.....	105
Figure III.30. Evaluation de la porosité accessible à l'eau des MBE avec et sans fibres.....	105
Figure III.31. Synthèse des résultats obtenus sur les MBE	106
Figure III.32. Corrélation entre la porosité et le pourcentage de perte de masse due à l'attaque acide.....	107
Figure III.33. Corrélation entre la résistance à la compression et le pourcentage de perte de masse due à l'attaque acide.....	108
Figure III.34. Corrélation entre la porosité et la résistance à la compression.....	108
Figure III.35. Corrélation entre la vitesse ultrasonique et la porosité.....	109
Figure III.36. Corrélation entre les ions de calcium diffusés et la porosité.....	110
Figure III.37. Relation entre la perte de masse des bétons des MBE	111
Figure III.38. Relation entre l'épaisseur de dégradation des bétons et perte de masse des MBE (a et a') attaques acides, (b et b') phénomène de lixiviation.....	112
Figure III.39. Relation entre porosité accessible à l'eau des bétons et des MBE (a et a') attaques acides, (b et b') phénomène de lixiviation.....	113
Figure III.40. Relation entre des bétons et des MBE (a et a') résistance flexion, (b et b') résistance compression.....	114
Figure III.41. Relation entre les ions de calcium lessivés des bétons et des MBE.....	115
Figure III.42. Synthèse comparative entre les résultats obtenus sur les bétons fibrés et sur les MBE associés	115

Liste des Tableaux

Tableau I.1. Regroupe les principales caractéristiques physiques et mécaniques des fibres les plus utilisées	15
Tableau I.2. Récapitulatif des études sur la résistance à la compression des bétons contenant des fibres métalliques [Abdeliazim et al.,2003].....	20
Tableau I.3. Comparaison des trois essais de dégradation [Tognazzi, 1998].....	35
Tableau I.4. Coefficient de diffusion effectif de tritium en fonction du rapport E/C [Richet ,1992] [Delagrave,1996]	38
Tableau II.1. Composition chimique du ciment.....	55
Tableau II.2. Composition minéralogique du ciment.....	55
Tableau II.3. Composition physique du ciment.....	55
Tableau II.4. Propriétés physiques des granulats minéraux.....	57
Tableau II.5. Composition chimique de l'eau de gâchage (mg/l).....	58
Tableau II.6. Caractéristiques des fibres métalliques.....	58
Tableau II.7. Compositions des Bétons.....	59
Tableau II.8. Compositions des MEB.....	62
Tableau III.1. Corrélations entre les différentes propriétés des MBE.....	110

Abréviations

- B.FM** : Béton à base des fibres métalliques
- B.O**: Béton ordinaire
- Ca⁺²** : Ion de Calcium
- CC** : Calcite
- CH** : Portlandite/ Hydroxyde de calcium
- CH₃COOH** : Acide acétique
- C-S-H** : Silicate de calcium hydraté
- D_i** : Diamètre de la particule moyenne
- DRX** : Diffraction des Rayons X
- E_d** : Module d'élasticité dynamique (GPa)
- EDS** : Spectroscopie à rayons X à dispersion d'énergie
- e_{ph}** : Epaisseur de dégradation mesuré (mm)
- e_t** : Epaisseur de dégradation calculé (mm)
- ETDA** : Éthylènediaminetétraacétique
- H₂SO₄** : Acide sulfurique
- HCl**: Acide chlorhydrique
- M** : Concentration molaire
- MBE**:Mortier de béton équivalent
- M.R** : Mortier de béton équivalent de référence
- M.FM** : Mortier de béton équivalent fibrés
- MEB**: Microscopie électronique à balayage
- NaOH**: Hydroxyde de sodium
- NH₄NO₃** : Nitrate d'ammonium
- N_i** : Nombre de particules moyennes
- P** : Porosité accessible à l'eau (%)
- PM** : Perte de masse (%)
- S_i** : Surface développée de la particule moyenne
- UPV** : Vitesse d'impulsion d'ultrason (Km/s)

v_i : Volume de la particule moyenne

V_i : Volume total de l'ensemble des particules

V_s : Volume de la solution agressive (L)

ρ_{abs} : Masse volumique absolue (Kg/m³)

ρ_{app} : Masse volumique apparente (Kg/m³)

ω : Volume massique de la matrice

Introduction Générale

Contexte de la thèse

La durabilité des bétons est principalement liée aux interactions physico-chimiques entre les composants du ciment hydraté et les espèces agressives contenues dans le milieu environnant qui peuvent facilement pénétrer selon différents processus dans le béton à travers sa porosité.

Il est donc bien connu que des facteurs environnementaux agressifs peuvent sensiblement modifier la durée de vie d'une structure en béton. Ainsi, l'exposition des matériaux cimentaires à des solutions à bas pH favorise la décomposition et la dissolution des principales phases de la pâte de ciment durcie et de certains agrégats à base de calcium, entraînant une perte d'alcalinité et de basicité dans la solution interstitielle, ce qui conduit à l'augmentation de la porosité et donc à la chute des propriétés mécaniques du béton. Ce phénomène est généralement défini comme la « corrosion du ciment ou du béton ».

Parmi les processus de dégradation chimiques des ouvrages en béton en contact avec des solutions, la lixiviation et les attaques acides apparaissent comme des mécanismes courants à moyen et à long terme et qui affectent sérieusement la durabilité des matériaux cimentaires.

En effet, le contact du béton avec de l'eau pure dé-ionisée ou avec une solution agressive crée des gradients de concentration entre la solution interstitielle du matériau cimentaire et l'environnement agressif. Ces gradients de concentration entraînent une décalcification progressive du béton et provoque une augmentation de la porosité favorisant ainsi le phénomène de transport de la matière. Cette dégradation provoque des microfissures qui deviennent, à leurs tours, des facteurs favorisant encore plus la pénétration des produits chimiques et qui peuvent conduire même à la ruine totale de la structure.

L'utilisation des fibres peut potentiellement réduire la propagation des fissures. En effet, les résultats de la littérature ont montré que les bétons fibrés sont généralement caractérisés par une faible porosité et une résistance à la traction par flexion deux à six fois plus grande que celle des bétons non fibrés. Cependant, la nature des fibres, leurs dosages, leurs dimensions, leurs orientations dans la matrice restent des paramètres qui peuvent sensiblement modifier les performances des bétons.

La recherche bibliographique a bien montré que les fibres métalliques, notamment à des taux variant de 1% à 1,5%, sont très utilisées dans les recherches au laboratoire et au niveau des chantiers. Ces fibres permettent d'améliorer la ductilité du béton et colmater les fissures qui peuvent se former dans une matrice fragile du béton à cause des phénomènes de retrait et de confinement ou en raison des sollicitations.

Toutefois, l'incorporation de ce type de fibres dans le béton peut rendre le problème de durabilité vis-à-vis des attaques chimiques plus complexe car ces fibres peuvent aussi être

Introduction Générale

sujettes au phénomène de corrosion et de dégradation et peuvent ainsi modifier complètement le comportement des bétons. A ce titre on peut citer les bétons fibrés utilisés dans la construction des barrages, les piles des ponts, les centrales nucléaires.....ect.

A ce sujet, il convient de noter qu'il existe très peu de recherches qui traitent la durabilité des bétons fibrés exposés aux attaques chimiques surtout en relation avec le phénomène de lixiviation.

Au vu de ce qui précède, nous pouvons conclure que la problématique est pertinente ; par conséquent, pour que les fibres métalliques soient employées avec succès dans des milieux agressifs, il est impératif d'avoir une meilleure compréhension et une connaissance accrue et maîtrisée de la façon dont les fibres affectent la durabilité des bétons dans de tels environnements.

Objectifs de la thèse

Le premier objectif de cette étude était d'étudier la durabilité des bétons renforcés par des fibres métalliques vis-à-vis des attaques acides et de la comparer à celle des bétons ordinaires exposés aux mêmes environnements. Pour ce faire, les échantillons ont été disposés et étudiés sur une période de 135 jours dans trois solutions différentes : l'acide chlorhydrique HCl, l'acide sulfurique H₂SO₄ et l'acide acétique CH₃COOH avec une concentration de 5% pour chaque solution.

Le second objectif était de mieux comprendre le comportement des bétons à base de fibres métalliques soumis au phénomène de lixiviation. Des échantillons ont été placés dans une solution concentrée à 6 mol/l de nitrate d'ammonium NH₄NO₃ pendant 462 jours et suivis sur le plan des résistances mécaniques, de diffusion des ions, de la conductivité électrique et de la microstructure.

Un autre objectif consistait à étudier ces mêmes phénomènes sur des mortiers de bétons équivalents (MBE). L'intérêt d'étudier simultanément les bétons et les MBE avait pour but de mettre en évidence l'effet des granulats sur les deux phénomènes en question et de trouver des relations corrélatives entre le comportement des bétons et des MBE associés qui permettront de réduire la pénibilité des essais expérimentaux dans le futur.

Introduction Générale

Structure de la thèse

Ce travail de thèse comprend trois chapitres précédés par une introduction générale.

Le premier chapitre présente un état de l'art sur les fibres ainsi que sur les bétons fibrés. Les détails sur les phénomènes des attaques acides et de la lixiviation des matériaux cimentaires sont aussi clairement mis en évidence dans ce chapitre.

Le second chapitre est dédié à l'identification et à la caractérisation des différents matériaux utilisés dans notre étude. Les différentes méthodes expérimentales nécessaires à la campagne expérimentale sont aussi distinctement définies dans cette partie.

Le troisième chapitre regroupe tous les résultats expérimentaux relatifs à l'influence des fibres sur le comportement et la performance des bétons et des MBE dans les milieux sains et agressifs. L'analyse microstructurale des bétons est aussi présentée dans cette section. Ensuite, les principales corrélations trouvées à partir des résultats expérimentaux viennent clôturer ce dernier chapitre.

Enfin, les principaux résultats ont été synthétisés dans une conclusion générale suivie par des perspectives pour les futurs travaux toujours dans le domaine de la durabilité des bétons fibrés.

Chapitre I

Analyse bibliographique

I.1. Introduction

Les avancées dans la recherche scientifique et le retour d'expérience ont permis de mettre en évidence l'importance des fibres dans le domaine de la construction. Grâce à la présence de la fibre dans le mélange cimentaire, plusieurs performances ont été améliorées donnant naissance à des éléments plus minces, plus légers, plus résistants et surtout moins exposés au phénomène de la fissuration. En effet, si les barres d'acier jouant le rôle d'armature dans le béton ont pour rôle d'améliorer la résistance à la traction et au cisaillement du béton, l'ajout de fibres discontinues dans la matrice cimentaire a surtout pour fonction de contrôler l'ouverture des fissures et leurs propagations.

Dans la pratique, les fibres introduites dans les mélanges cimentaires sont de nature et de propriétés physico-chimiques très diverses. Elles sont classées selon leurs natures (naturelles, synthétiques ou industrielles), leurs formes (droite, ondulée), leurs dimensions mais aussi par leurs propriétés mécaniques. Il est clair que les différents types de fibres ne peuvent se comporter de manière similaire lorsqu'il s'agit de les incorporer dans un béton. Le choix d'une catégorie de fibres pour une application dans un environnement donné doit être bien réfléchi, en tenant compte non seulement de la compatibilité de la fibre avec la matrice cimentaire mais aussi du mode de performance du composite dans l'environnement en question.

Ce chapitre est consacré à une revue des connaissances principales sur les différentes fibres et leurs influences notamment sur le comportement mécanique du béton. Des rappels et des précisions seront développés sur la base de cette partie qui seront nécessaires à l'interprétation des résultats obtenus dans la partie expérimentale.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous présenterons de manière générale, les mécanismes des attaques chimiques sur le béton telle que la lixiviation accélérée ou les attaques acides. Ensuite les facteurs influençant les attaques chimiques seront présentés d'une manière succincte. L'analyse de cette partie permettra de préciser la problématique de notre travail expérimental.

I.2. Notions sur les matériaux cimentaires

Il existe trois échelles pour décrire les matériaux à matrice cimentaire (figure I.1) : l'échelle microscopique qui représente la pâte de ciment hydraté caractérisée par ses principales phases solides notamment les silicates de calcium hydratés (C-S-H), la portlandite (CH) et les sulfoaluminates de calcium hydratés (ettringite, monosulfoaluminate) ; l'échelle mésoscopique qui peut être représentée par le mortier et l'échelle macroscopique qui représente

l'échelle de la modélisation courante pour l'étude du comportement mécanique des structures en béton.

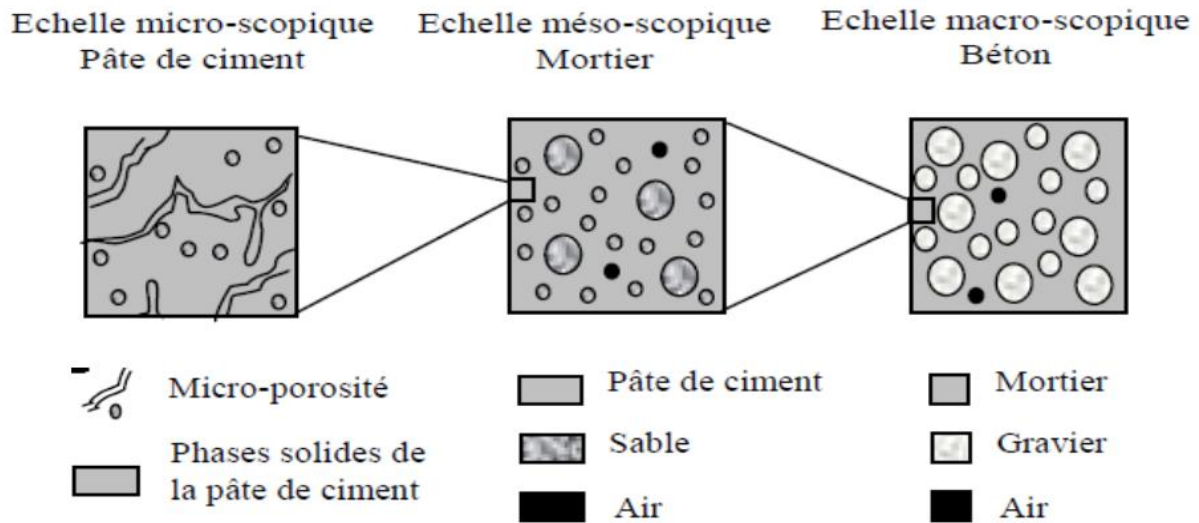


Figure I.1. Modélisation en 3D du matériau par CEMHYD3D [Kamali et al, 2003]

I.2.1. Microstructure de la matrice cimentaire

Le ciment est un composant primordial dans la conception des bétons car une fois hydraté, il apporte la cohésion au squelette granulaire. Il est fabriqué sur la base d'un mélange de roches calcaires et d'argile concassés et mélangés puis décarbonatés et transformés par cuisson dans un four pouvant atteindre 1450°C , pour former le principal composant du ciment à savoir le clinker.

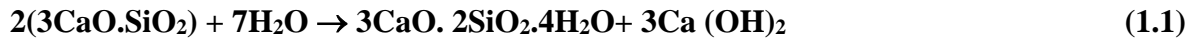
Le clinker est constitué de quatre minéraux principaux :

- Le silicate tricalcique C_3S ($3\text{CaO}.\text{SiO}_2$) : **50 à 70%** en masse
- Le silicate bicalcique C_2S ($2\text{CaO}.\text{SiO}_2$) : **15 à 30%**
- L'aluminate tricalcique C_3A ($3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$) : **5 à 10%**
- L'aluminoferrite tétracalcique C_4AF ($4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$) : **5 à 15%**

D'autres ajouts sont utilisés pour la fabrication du ciment tel que le gypse à une teneur de 3% à 5% et qui servira à réguler la prise ainsi que des constituants secondaires tels que les laitiers de haut fourneau, les fillers calcaires, les cendres volantes ou encore la pouzzolane [Taylor, 1990]

I.2.2. Hydratation de la pâte de ciment

Les mécanismes d'hydratation du C_3S et C_2S sont relativement similaires. L'hydratation du C_3S conduit à la formation de deux produits distincts : les silicates de calcium hydratés (la phase C-S-H) et la portlandite (la phase CH) suivant la réaction :



Dans un premier temps, les C_3S réagissent avec de l'eau pour former les silicates de calcium hydratés, plus communément appelés C – S – H et qui représente 70 % d'une pâte de ciment ordinaire. Ce sont des hydrates de stoechiométrie variable, le rapport entre le nombre de moles de calcium sur celui de silice donne une indication sur cette stoechiométrie. Dans une pâte de ciment hydratée, ce rapport, noté C/S est proche de 1,7 [Guillon, 2004]. Les C-S-H forment la structure de base de la pâte de ciment, participent à la prise du ciment et confèrent au béton sa résistance [Carde, 1996] (figure I.2).

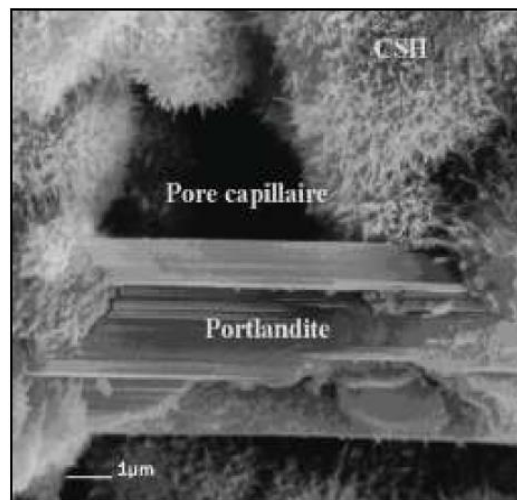
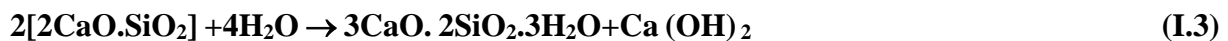


Figure I.2. Vue au microscope électronique à balayage de C – S – H dans une Pâte de ciment hydratée [Rego, 1975]

De plus, la pâte de ciment hydraté contient d'autres cristaux plus grossiers, telle que la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ notés CH qui représente environ 20 % dans une pâte de ciment ordinaire, cristallisée en plaquettes hexagonales.



L'hydratation du C_2S donne les mêmes composants d'hydratation du C_3S , mais avec une cinétique beaucoup plus lente tout en libérant une plus faible quantité de chaux.



Par ailleurs, l'hydratation des aluminates est plus rapide et surtout exothermique. Elle engendre des sulfo-aluminates de calcium telle que l'ettringite (AFt), ainsi que du monosulfoaluminate (AFm) à une teneur de 10% pour une pâte de ciment ordinaire.

I.2.3. A l'échelle du béton

Le béton est un matériau composite constitué d'un mélange de liant (ciment), de granulats (gravillons, sable), d'eau et éventuellement d'additifs. Après la prise, la structure devient hétérogène et complexe composée d'un squelette granulaire, d'une matrice poreuse constituée de la pâte de ciment composée d'une solution interstitielle formée d'eau chargée en ions calcium, hydroxyles et alcalins (K^+ , Na^+) et caractérisée par un pH basique [Nguyen, 2005]. Lorsque le béton est soumis aux attaques chimiques, plusieurs transformations physico-chimiques peuvent se produire. De ce fait, il est nécessaire de comprendre le rôle des différents éléments constitutifs ainsi que leurs comportements dans un milieu agressif.

I.3. Mécanisme de fonctionnement des fibres dans les matériaux cimentaires

Le principe de renforcement des matériaux composites par des fibres a été utilisé depuis des décennies pour améliorer la ductilité et les propriétés mécaniques des matériaux. Le premier travail breveté sur les bétons renforcés par des fibres a été réalisé en 1874 par A. Berard en Californie (USA) [Mimoun F.Z. et Mimoun M., 1994]. Toutefois, les performances des fibres ainsi que leurs utilisations ont évolué au cours de l'histoire.

I.3.1. Matériaux cimentaires renforcés par des fibres

L'idée d'améliorer le type et les caractéristiques des fibres afin d'augmenter leurs contributions est assez ancienne. Les fibres végétales comme la paille ou le bois sont parmi les premières fibres utilisées par nos ancêtres. De nos jours, elles sont encore utilisées dans le domaine de la construction. On peut aussi distinguer les fibres d'acier qui datent du début de 20^{ème} siècle, les fibres organiques qui ont fait leur apparition vers les années soixante du siècle précédent ou encore les fibres de verre qui datent des années soixante-dix de ce même siècle. L'évolution de la fibre était donc nécessaire car le choix d'un tel ou tel type de fibre dépend non seulement de la matrice dans laquelle seront noyées les fibres mais aussi de la destination du matériau.

Les matériaux cimentaires renforcés par des fibres sont constitués d'une matrice cimentaire à laquelle des fibres sont ajoutées. En d'autres termes, il s'agit d'un matériau cimentaire armé à l'échelle locale où les fibres peuvent s'apparenter à de multiples barres d'armatures qui permettent de contrôler la fissuration [Rossi, 1998]. Les fibres permettent donc de « coudre » les fissures et ne prennent alors effet qu'après la fissuration de la matrice cimentaire. En cernant les fissures, les fibres permettent aux matériaux cimentaires renforcés d'atténuer la propagation des ouvertures de fissures pour un chargement donné tout en garantissant une augmentation des propriétés mécaniques post-fissuration par rapport au béton ordinaire (figure I.3

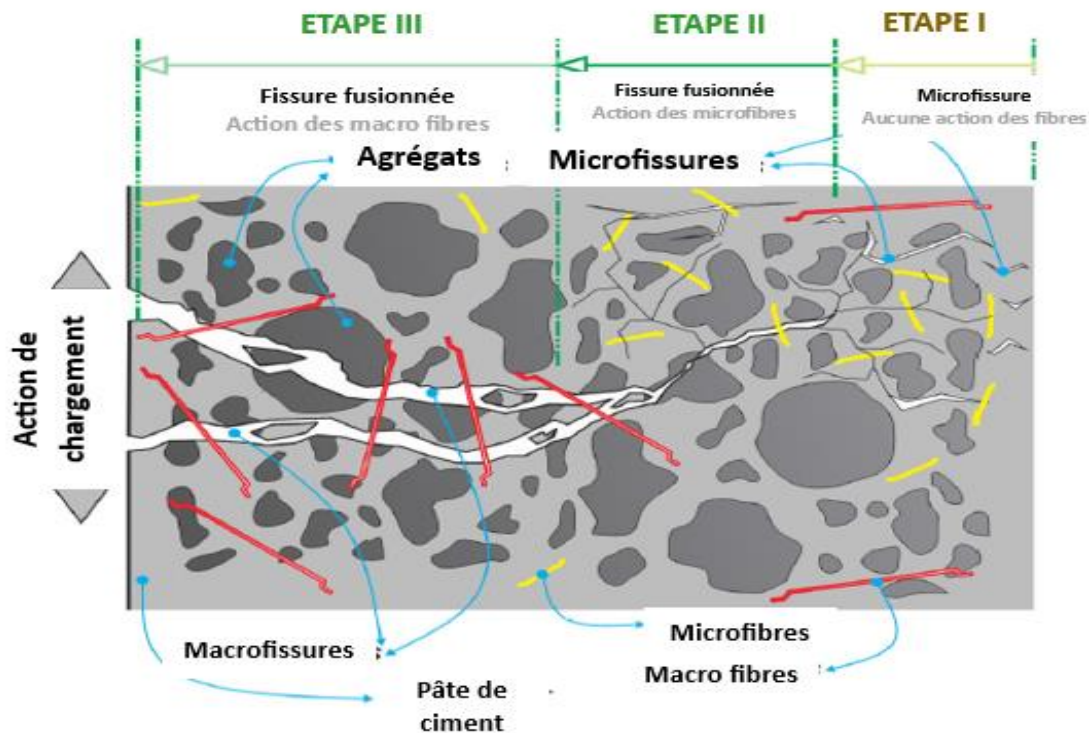


Figure I.3. Étapes de fusionner des fissures et d'action des fibres [Lawler et al., 2003]

I.3.2. Rôle des fibres dans les matériaux cimentaires

Les fibres ont pour rôle de renforcer la structure en s'opposant au développement des fissures et à leur propagation. Selon le type, le dosage et les éléments en béton dans lesquels elles sont noyées, les fibres permettent :

- L'amélioration de la cohésion du béton frais ;
- L'augmentation de la ductilité et le comportement post-fissuration ;
- La réduction de la microfissuration due aux variations dimensionnelles notamment au jeune âge.
- La réduction de la fissuration d'origine mécanique (chargement extérieur).
- L'augmentation de la résistance à la traction par flexion.
- L'amélioration de la tenue au feu et de la résistance aux chocs, à la fatigue, à l'usure, et à l'abrasion.
- La diminution de la formation de fissures suite au retrait initial.
- La protection contre les éclatements provoqués par le gel

La Figure I.4 illustre les différents facteurs influençant le comportement d'un béton renforcé de fibres.

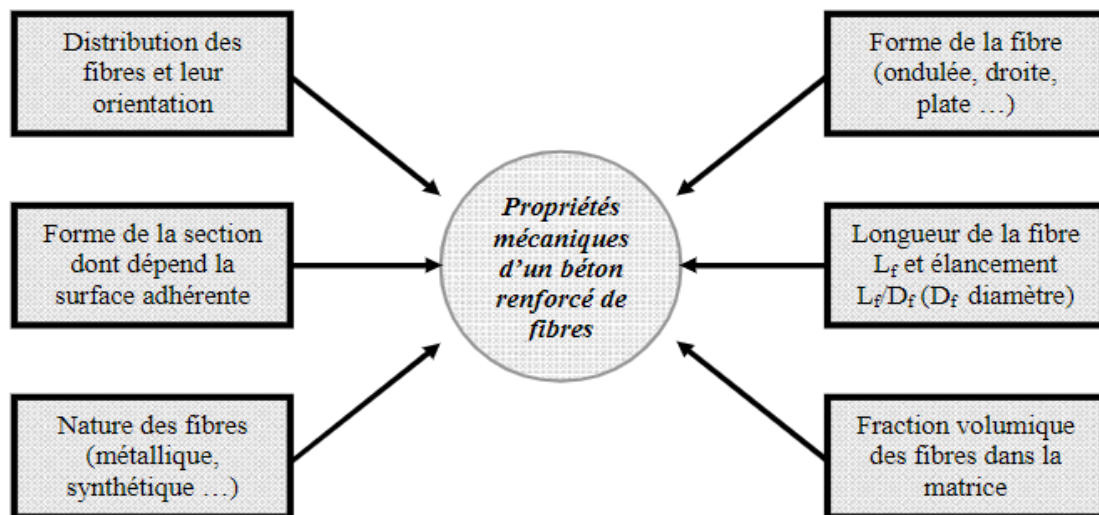


Figure I.4. Différents facteurs influençant le comportement mécanique d'un béton renforcé par des fibres [Meddah, 2014]

I.3.3. Type des fibres

Les fibres sont classées selon leurs origines, leurs formes, leurs dimensions et selon leurs propriétés mécaniques. Cependant pour faire un choix des fibres à utiliser pour une application

donnée, il faut tenir compte de la compatibilité de la fibre avec la matrice de ciment et du mode de performance du composite.

i. Les fibres en amiante

Les fibres en amiante sont des silicates hydratés de magnésium extrait de roches appartenant aux familles de serpentine (chrysolite) et des amphiboles (crocidolites) [Mimoun F.Z. et Mimoun M., 1994].

Elles sont parmi les plus anciens renforcements des matrices cimentaires utilisées aussi pour leur excellente tenue au feu. Elles sont en fait des bâchettes de microfibrilles extrêmement fines, difficilement fusibles (vers 1500° C) et présentent l'avantage d'avoir un module d'élasticité élevé (80000 jusqu'à 150000 MPa). Elles sont aussi plus résistantes vis-à-vis des agressions chimiques et aux micro-organismes.

Toutefois, l'utilisation des fibres d'amiante est devenue interdite à cause de législation en matière de santé publique [Kenchel et Shah, 1985 ; Pilkington, 1987]. De plus, sur un plan technique [Gilebert, 1983] a montré que les fibres d'amiante sont trop courtes (0,002 mm) et ne conviennent pas en conséquence pour les matériaux cimentaires. Elles nécessitent aussi beaucoup d'eau de gâchage, ce qui peut être néfaste pour le matériau sur un plan mécanique.

ii. Les fibres en verre

Les fibres de verre sont fabriquées à partir de verre fendu. Les fibres de verre sont riches en silice et permettent d'améliorer les caractéristiques mécaniques. Les fibres à forte teneur en bore présentent aussi de bonnes caractéristiques mécaniques, mais sont sensibles aux alcalis libérés par l'hydratation du ciment. Toutefois, Selon [Smaranika et al., 2022] ont montré que l'incorporation de polymères ou autres ajouts au mélange pendant le gâchage permet d'enrober la fibre et de la protéger de l'attaque alcaline.

Les fibres de verre présentent plusieurs avantages, à savoir :

- Amélioration des caractéristiques des matériaux cimentaires au vieillissement [Zhao et al., 2023].
- Une excellente résistance au feu jusqu'à 800C°. [Devi et al., 2022].
- Une résistance à la traction élevée de l'ordre de 3000 MPa [Jihua et al., 2022].

iii. Les fibres en polypropylène

Les fibres en polypropylène sont des produits d'origine pétrolifère, découverts en 1954 [Najaf et Abbasi, 2023]. Grâce à leur prix, elles sont très utilisées sous forme de microfaisceaux (figure 1.5). Elles permettent de renforcer les mortiers ou les bétons et limiter l'ouverture des

fissures engendrant une amélioration des résistances dans des milieux alcalins ou corrosifs. Elles sont utilisées principalement dans les bâtiments, en particulier dans la réalisation des panneaux décoratifs, revêtement de façade, des tuyaux et au niveau des pieux.

Les études réalisées par [Fritih, 2009] montre que les fibres polypropylène sont moins efficaces par rapport aux fibres métalliques. Néanmoins, elles peuvent contribuer au contrôle de la fissuration.



Figure I.5. Fibres polypropylène [Source : psbi.vcmbat.dz]

iv. Les fibres métalliques

Les fibres métalliques sont les plus utilisées dans les constructions. Elles ont fait l'objet de plusieurs recherches. Il existe de nombreuses variétés de fibres qui se différencient les unes des autres par leurs diamètres, leurs sections (ronde, carrée, rectangulaire.....), leurs longueurs et leurs modes d'élaboration. Elles peuvent être rectilignes, ondulées, ou présenter des élargissements aux extrémités, soit coudées ou en crochets (Figure I.6). Les fibres métalliques, caractérisées par un module d'élasticité élevé, permettent d'améliorer la résistance à la traction du matériau où elles sont noyées en augmentant sa ductilité et son pouvoir de résister aux déformations. Elles permettent aussi d'améliorer la ténacité et la résistance au choc du matériau. De plus, leurs formes et leurs dimensions améliorent leurs ancrages et leurs adhérences (fibres, copeaux, fibres tréfilées, ondulées, déformées aux extrémités.) [Khalid et al., 2022].

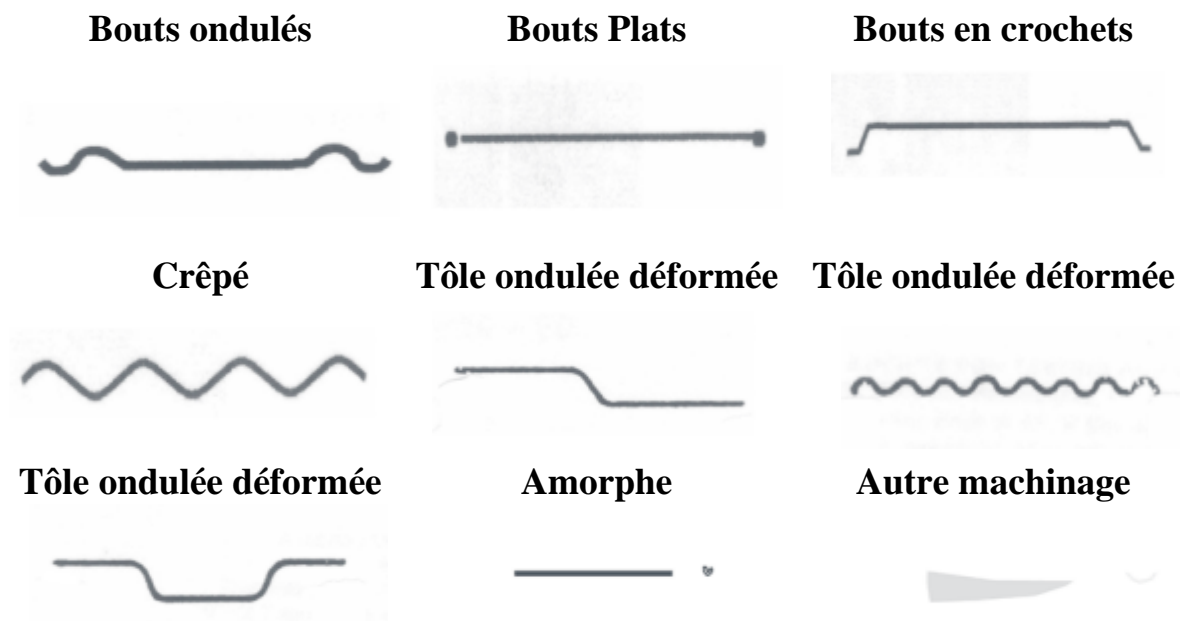


Figure I.6.Géométrie des fibres métalliques [Source : betonabq.org]

v. Les fibres naturelles

De nos jours, l'utilisation des fibres naturelles comme le coton, le lin, le chanvre, le palmier dattier [Haba et al., 2017], le diss (Achour et al., 2017), la paille de sisal [Pan et al., 2022], le jute de noix de coco [Ramali et al., 2013] et l'alfa [Bessadok et al., 2007] dans le domaine du génie civil est devenue fréquente (figure I.7). Ce succès est principalement marqué par certaines propriétés mécaniques et physiques de ces fibres, en plus du bilan carbone nul et de la biodégradabilité qui reste des avantages majeurs par rapport à l'écologie. Cependant, certains points faibles peuvent aussi caractériser l'utilisation de ces fibres tels que le manque d'uniformité de leurs qualités et leur sensibilité à l'humidité et aux rayons UV ou encore leur faible résistance au feu [Lumingkewas, 2015].

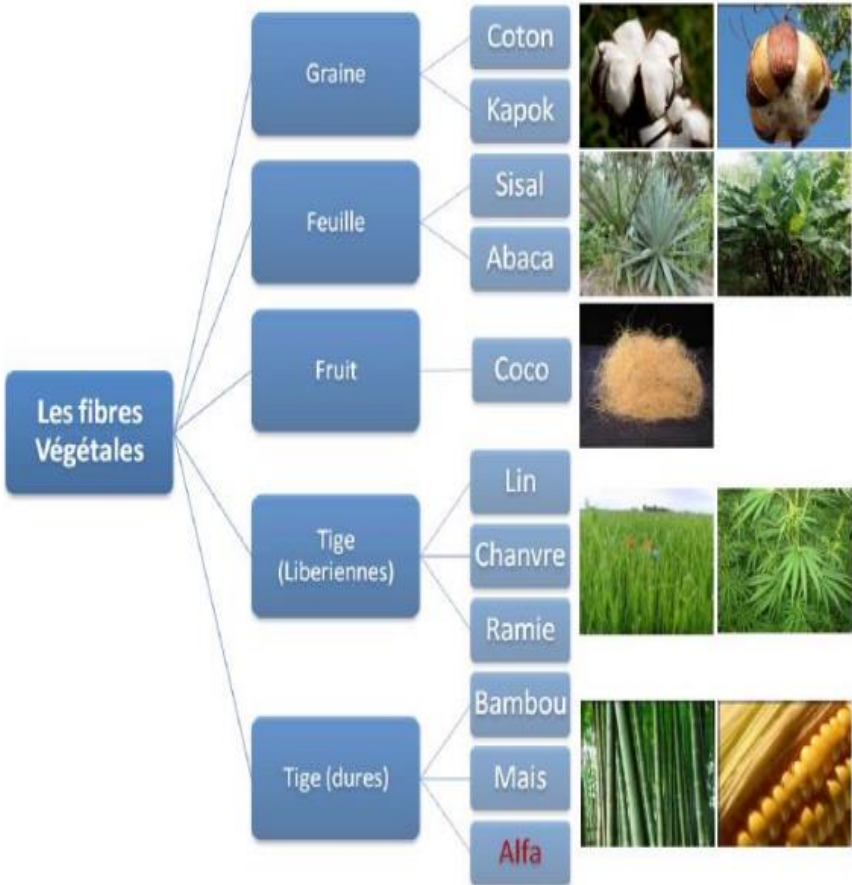


Figure I.7. Classification des fibres végétales [Dallel, 2012]

Le tableau I.1. Regroupe les principales caractéristiques physiques et mécaniques des fibres les plus utilisées.

Tableau I.1. Les principales caractéristiques physiques et mécaniques des fibres les plus utilisées

Fibres	Diamètre (µm)	Long (mm)	Densité	Rt (MPa)	E (GPa)	Allongement à La rupture en%	Coeff. de dilatation (µ / m)	R _{feu} Temp. Max °C
Acier	5 - 500	20 - 80	7.8	1000-3000	200	3-4	11	1500
Fonte (ruban)	36 - 2600	50 - 60	7.8	2500	140	1	-	1500
Verre	5 - 20	40 - 70	2.6	1500-3000	80	2 - 3.5	9	800
Poly-propylène	10 - 2 00	25 - 75	0.9	400-750	5-10	15 - 25	90	150
Polyester	-	-	1.4	700-850	8	11 - 13	-	-
Amiante	0.02 - 20	5	2.5 - 3.5	3000	8-15	2-3	1	1500
Carbone	5 - 9	Variable	1.7-2	2000-3000	250-400	0.5 - 1.5	-	400-1500
Sisal	10 - 50	1.50	1.5		130	3	-	-
Coton	19	35	1.5 - 1.6	287-597	5-19	7 - 8	-	-
Basalte	9 - 17	6-72	2.6	3000-4800	83-110	1.25 - 3.2	-	700
Aramide	12 - 15	50	1.45	3500-6000	70-140	2.8 – 3.6	-	250
Palmier dattier	100-1000	0.4-1.5	0.7–1.55	170–275	5-12	5-10	-	250
Alfa	5-95	5-50	1.51	75-154	12.7	1.6	-	-

I.3.4. Influence du dosage en fibres

i. Mécanisme d'action sur le plan rhéologique

Selon [Fritih, 2009] l'adjonction de fibres à des matériaux cimentaires à l'état frais nécessite de prendre un certain nombre de précautions afin de limiter le risque d'orientation préférentielle ou d'éviter la formation de pelotes.

La durée du malaxage affecte la répartition des fibres au sein du matériau cimentaire. S'il est trop court, les fibres ne seront pas réparties uniformément. S'il est trop long, la distribution deviendra inégale en raison de la ségrégation des fibres.

Certaines études [Brunetaud et al., 2007], [Capmas, 2008], [Carde, 2007], [Castellote, 2004] montrent que la maniabilité des matériaux cimentaires diminue avec l'ajout des fibres.

A ce titre, Prasad M.C. et al (2016) recommande un taux de 1% lorsque des fibres métalliques sont utilisées, 0.6% pour les fibres en polypropylène [Jabbar, 2022], 0.05% pour les fibres en verre [Kumari et al., 2020], 2% des fibres en diss et 1.5% pour les fibres en doum [Achour et al., 2017] et 0.5% les fibres de sisal [Mesbah et al., 2022].

De plus, il est important d'utiliser des fibres de dimensions optimales et d'ajuster la composition de la matrice afin de permettre au béton de conserver une maniabilité adéquate. Selon [Hugues et al., 1994] et [Diedrich, 1989], la fluidité diminue avec l'augmentation de l'élanement (longueur de la fibre/diamètre de la fibre) des fibres.

Par ailleurs, l'utilisation des fibres végétales peuvent conduire à un retard de prise dû à la présence de sucres libres et des hémicelluloses contenus dans ces dernières [Ding et al., 2005].

ii. Mécanisme d'action sur le plan mécanique

[Capmas, 2008] a montré que la distance entre les fibres dans le béton à une incidence directe sur son comportement post-fissuration. En effet, si on considère deux fibres, l'une perpendiculaire au plan de la fissure et l'autre inclinée par rapport à la fissure. Il est clair que si les deux fibres sont suffisamment éloignées, alors leurs effets sur la fissure sont indépendants. Toutefois, les fibres verticales sont plus efficaces par rapport aux fibres inclinées. Le bilan du couple se résume alors à la somme de leurs actions individuelles.

En revanche, si la distance entre les deux fibres est réduite de telle sorte que l'action de la fibre la plus efficace est consolidée par le confinement de la fibre la moins efficace, le bilan devient alors la somme de leurs actions individuelles plus le résultat de leur « entraide », qui peut aussi être décrit comme une synergie positive [Abu Aishehet al., 2022].

Par contre, si les deux fibres sont trop rapprochées alors la quantité de coulis entre elles devient si faible que l'enrobage de chaque fibre devient insuffisant pour assurer le bon fonctionnement de l'interface pâte -fibre. Les fibres fonctionneront donc moins efficacement.

Dans ce cas, le bilan du couple est la somme de leurs actions individuelles, moins le résultat de leur « promiscuité », qui peut aussi être qualifiée de synergie négative. A partir de ce seuil, plus on ajoute de fibres, moins elles seront efficaces.

Ces différents schémas de mécanismes auront une incidence directe sur les propriétés mécaniques des mélanges.

I.3.5. Influence de l'orientation des fibres

L'orientation des fibres à l'intérieur de la matrice est affectée par de nombreux paramètres telle que :

- La géométrie des fibres et les effets d'interactions (fibres-granulats-parois),
- La rhéologie du béton,
- Le mode de mise en place et de vibration du béton,
- La géométrie des moules (surface libre, parois), et leurs dimensions.

Généralement l'orientation préférentielle des fibres est due à la mise en place du béton dans son coffrage. Pendant le coulage, les fibres s'orientent parallèlement à l'axe d'écoulement [Zhanget al., 2023].

La vibration interne des bétons peut aussi mener à une orientation différente des fibres suivant l'axe de vibration [Li et al., 2022]. L'utilisation de l'aiguille vibrante conduit à des orientations différentes des fibres.

Plusieurs études ont été menées dans le but de montrer l'influence de l'orientation des fibres sur le comportement mécanique des bétons vis-à-vis de la traction. [Casanova, 1996] a effectué des carottages suivant trois directions sur un bloc de béton où les fibres étaient orientées verticalement pour étudier leurs effets sur la flexion. Les résultats ont montré que les fibres offrent les meilleures résistances lorsqu'elles sont orientées perpendiculairement à l'effort appliqué (Figure I.8).

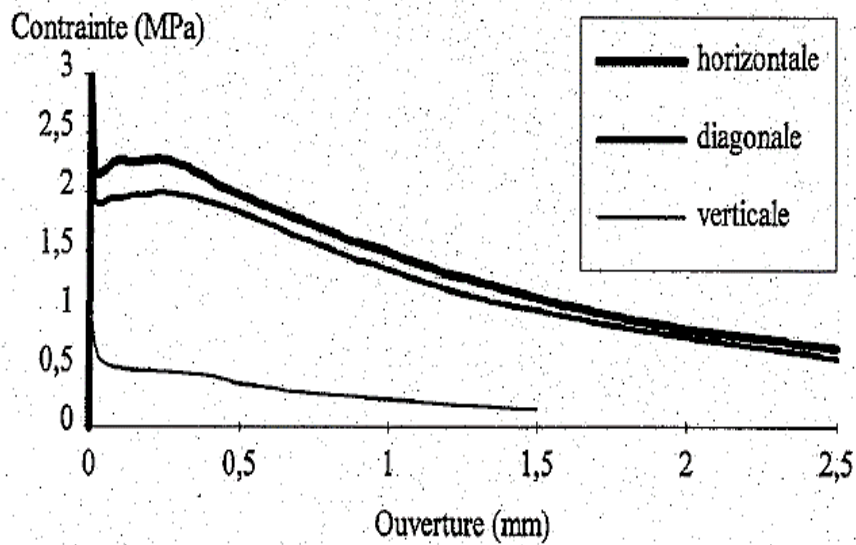


Figure I.8. Influence de la direction du carottage sur le comportement en traction d'un béton fibré [Casanova, 1996]

Selon [Alexandra, 2005], lorsque les fibres sont orientées perpendiculairement au plan de la fissure, elles jouent leur rôle de couture de la fissure et permettent d'obtenir des résistances résiduelles importantes. Par contre, si les fibres sont orientées préférentiellement parallèlement au plan de la fissure, le comportement du béton est alors semblable à celui d'un béton sans aucun renfort de fibres.

Par ailleurs, si les fibres sont orientées diagonalement, elles permettront aussi de couder la fissure et d'avoir un comportement post fissuration intéressant mais moins important que celui des fibres orientées de façon optimale. Pour éviter une orientation préférentielle des fibres, il convient de prendre un maximum de précaution lors du coulage du béton pour bien les répartir dans l'élément.

I.3.6. Influence de la longueur des fibres

Lorsque le pourcentage des fibres est relativement faible dans les mélanges cimentaires, la longueur de la fibre n'a pas une grande influence sur le comportement mécanique. Par contre, l'effet de la longueur des fibres devient plus significatif au fur et à mesure que le taux de fibres augmente dans le mélange. De plus, à pourcentage égal, les plus longues fibres sont plus efficaces pour couder les fissures. Dans ce cas, l'effort nécessaire à l'arrachement des fibres ainsi que l'énergie de rupture sont plus importants [Han et al., 2019].

I.3.7. Influence de la fibre-matrice

L'adhérence fibre-matrice est un facteur très important vis-à-vis de l'efficacité des fibres dans le béton. D'après [Bartos, 1981], elle est assurée par trois types de liaisons

- Une liaison élastique grâce à un collage entre les fibres et la matrice par des liants
- Une liaison due au frottement
- Une liaison due à l'ancrage mécanique dans le cas des fibres non rectilignes (crochets, ondulations ...).

Pour quantifier cette adhérence, l'essai d'arrachement des fibres est fréquemment utilisé. Cette résistance correspond à la contrainte maximale de cisaillement qui se développe à la surface de la fibre lors de l'arrachement de celle-ci.

Généralement, la contrainte d'adhérence pour une fibre droite varie entre 2 et 3 MPa, alors qu'elle peut atteindre 6 à 7 MPa pour une fibre à crochets aux extrémités [Deng et al., 2021].

En effet, les fibres à crochets ou ondulées sont plus efficaces que les fibres droites car elles développent un ancrage supplémentaire en plus de l'adhérence avec la matrice. Cependant, ce type de fibres peut engendrer la formation d'oursins durant la fabrication entraînant une répartition non homogène dans le béton. Dans ce cas, ce sont les fibres droites qui sont généralement utilisées pour pallier à ce problème mais dans ce cas l'efficacité est réduite [Capmas, 2008].

I.3.8. Comportement mécanique des matériaux cimentaires renforcés par des fibres

i. Résistance en compression

[Bentalha et al., 2007], [Belferrag et al., 2007], [Wang et al., 2013] [Ragi, 2015] ,[Dsouza, 2018] et [Kherbache ,2019]montent que l' incorporation des fibres dans bétons à des taux variant entre 1 et 1,5% permettent d'améliorer considérablement les performances mécaniques. Ce constat est renforcé par les travaux de plusieurs autres auteurs [Eduardo et al, 2008], [Wang et al., 2013]et [Khan et Juned, 2015]) qui ont montré qu'un taux de 1% de fibres pourrait améliorer la résistance à la compression de 6 % à 19 % et retarder la propagation des fissures de 22 % à 65 % [Brandt, 2008] et [Koushkbaghi, 2019]. Par ailleurs, [Brandt, 2008] et [Koushkbaghi, 2019] ont montré qu'un taux plus élevé, de l'ordre de 2% pourrait avoir un effet négatif sur les résistances à cause d'une forte anisotropie. D'autre part, l'utilisation de fibres plus longues, quand elles sont uniformément distribuées, permettrait aussi d'améliorer les performances mécaniques [Lee, 1993] et [Luong et al., 2020].

Tableau I.2. Récapitulatif des études sur la résistance à la compression des bétons contenant des fibres métalliques [Abdeliazim et al., 2023]

Référence	Domaine d'utilisation	Proportion de mélange	Fibre Métallique (%)	Résistance à la compression (MPa)		
				7 Jours	28 Jours	90 Jours
Zhao, et al. (2018)	Schiste expansé renforcé de fibres d'acier	1 : 1.52: 1.2: 0.35	0	-	32.5	-
			0.4	-	43.8	-
			0.8	-	45.4	-
			1.2	-	46.6	-
			1.6	-	53.1	-
			2	-	52.9	-
Wu, et al (2021)	Poutres renforcées de fibre d'acier	1 : 1.54: 1.75: 0.3	0	-	44.6	-
			0.3	-	47.8	-
			0.36	-	45.4	-
			0.42	-	40.2	-
Xiang, et al (2022)	Béton léger confiné avec armature en fibres d'acier	1: 1.06: 1.08: 0.46	0.	-	50.4	-
			0.5	-	52.6	-
			1	-	49.9	-
Iqbal, et al (2015)	Béton auto-compactant léger en fibres d'acier à haute résistance	1 : 0.65: 1.12: 0.58	0.5	53	64.03	-
			0.75	51	61.01	-
			1	50	60.94	-
			1.25	49.5	59.74	-
Zhao, et al (2019)	Béton armé de fibre d'acier	1 : 1.46: 1.22: 0.35	0	31.5	38.5	-
			0.5	35	41	-
			1	36.5	45.5	-
			2	36	44	-
Li, et al (2021)	Béton léger autoplaçant	1 : 1.70: 1.83: 0.49	0	35	55	-
			0.25	42	60	-
			0.5	45.5	64.5	-
			0.75	41.5	61	-
			1	43.5	61.5	-
Xiong, et al (2021)	Béton de granulats légers renforcés SF par malaxage vibratoire		0	-	57	-
			0.5	-	62.5	-
			1	-	67.5	-
			1.5	-	66.5	-
			2	-	63	-
Prakash, et al (2022)	Béton fait de coquilles de noix de coco et de fibres d'acier contenant des cendres volantes.	1 : 0.72: 1.6: 0.33	0	36.5	36	40
			0.25	31.5	40.5	47.25
			0.5	32.25	43	50.75
			0.75	34	47	54.5
			1	35	49.75	56.75
Hosen, et al (2022)	Béton léger à haute résistance renforcé de fibres	1 : 1.29: 1.82: 0.45	0	-	54.15	-
			0.5	-	56.8	-
			1	-	64.4	-
			1.5	-	61.2	-

ii. Résistance à la traction

La majorité des chercheurs préfèrent étudier la traction par flexion et évitent par conséquent les essais de traction directe car ils sont délicats et très coûteux.

Selon la littérature, l'influence des fibres sur la résistance à la traction dépend de plusieurs paramètres. D'une manière générale, on peut dire que des améliorations sont constatées même si les résultats dépendent souvent du type d'essai, de la forme des éprouvettes, de la géométrie et du pourcentage des fibres, et bien sûr de la formulation du béton.

[Balaguru, 1994], [Banthia et Trottier, 1994] et [Rossi et al., 1996] ont observé une légère augmentation de la contrainte limite alors que d'autres chercheurs tel que [Johston, 1974] [Subrata et al 2018] ont noté l'inverse. En effet, dans la matrice cimentaire, la fibre peut avoir deux effets contradictoires : d'une, la présence des fibres diminuent la fragilité du matériaux dans la phase post pic en le rendant ductile et d'autre part créer des défauts supplémentaires à l'interface fibres - mortier ce qui peut contribuer à l'endommagement et limiter en conséquence la charge maximale (figure I.9).

L'effet des fibres est donc surtout perceptible en traction. Une fois fissuré, un béton sans renforts ne peut supporter que de faibles efforts à cause de son endommagement. Ceci se traduit par une chute brutale des contraintes reprises comme le montre la figure I.10 [Taylor et al., 1997].

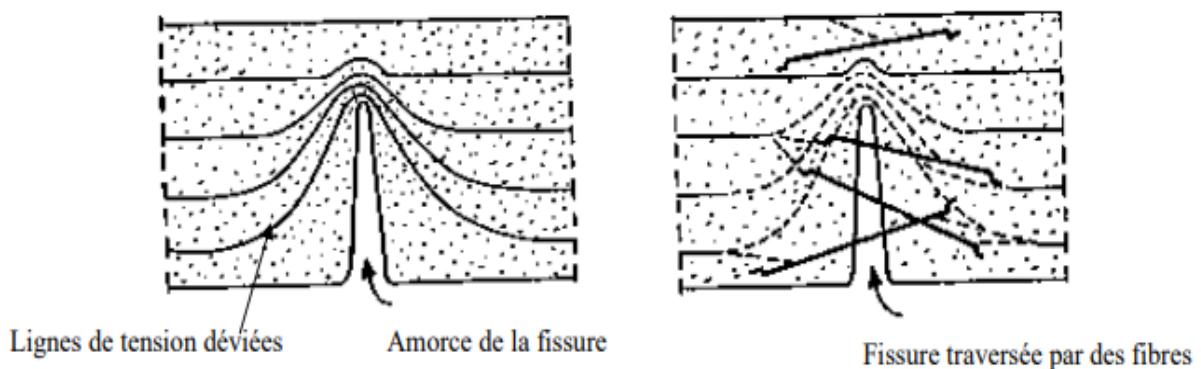


Figure I.9. Rôle des fibres dans les bétons fissurés [Chemrouk et al., 2006]

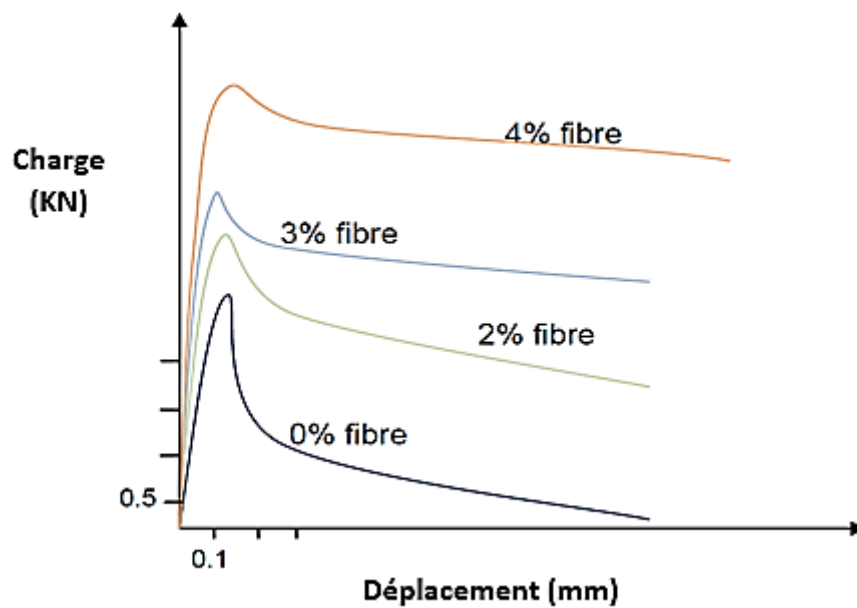


Figure I.10. Comportement en traction directe en fonction du pourcentage en fibres
[Taylor et al. 1997]

iii. Résistance à la Flexion

Le renforcement par des fibres métalliques est utilisé pour améliorer la ductilité et fournir un contrôle du mécanisme de fissuration. On peut dire que les fibres métalliques peuvent jouer le même rôle que les armatures dans un béton armé.

Pour les bétons avec des fibres métalliques, l'amélioration de la résistance vis-à-vis de la première fissuration est ordinairement considérée comme un gain secondaire. En flexion, contrairement à ce qui est généralement observé en traction directe, la structure fissurée peut reprendre des efforts bien supérieurs à ceux relevés lors de l'apparition de la première fissure.

Dans ce contexte, [Ait-Tahar, 2001] a trouvé que l'ajout des fibres métalliques dans la matrice engendre une augmentation de 12,5 à 50% de l'effort qui entraîne la première fissure et une augmentation du moment de 20%.

Une étude effectuée par [Pająk et Ponikiewski, 2013] sur les bétons autoplaçants fibrés a montré l'effet bénéfique de l'augmentation du volume de fibres [0 - 1.5%] sur le comportement mécanique notamment en flexion (Figure I.11).

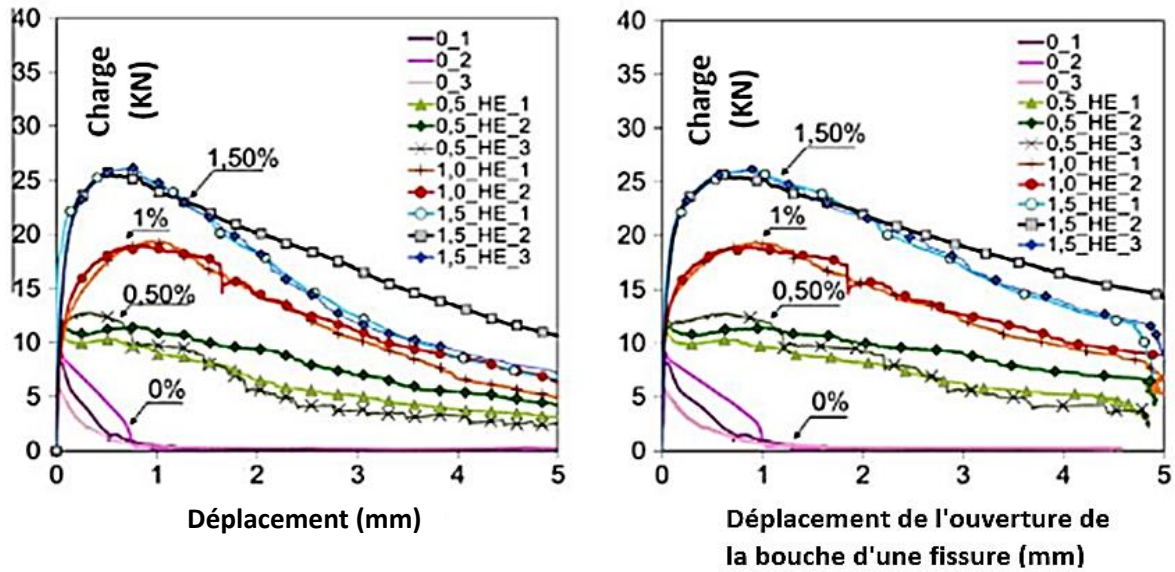


Figure I.11. Influence du pourcentage des fibres sur le comportement à la flexion des bétons [Pająk et Ponikiewski, 2013]

iv. Résistance au cisaillement

De nombreuses études relatives au cisaillement direct ont été réalisées sur des blocs ou des consoles [Mirsayah et al., 2002], [Barragán et al., 2002]. Les auteurs ont montré que les fibres apportent une meilleure ductilité et une augmentation de l'effort maximum de cisaillement. Toutefois la capacité portante du béton n'est pas souvent améliorée surtout si les fibres sont utilisées conjointement avec des armatures transversales. Ceci peut être expliqué par le transfert de l'effort qui était initialement repris par les fibres vers les armatures lorsque l'ouverture de la fissure augmente.

Dans une autre étude, [Fariboz et al., 2006] ont comparé l'efficacité des fibres métalliques par rapport aux fibres synthétiques vis-à-vis de la résistance au cisaillement. Ils ont montré que les deux types de fibres améliorent le comportement au cisaillement du béton par rapport à un béton témoin sans fibres qui a révélé un comportement fragile (figure I.12). Cependant, ils ont constaté que les fibres métalliques améliorent le comportement au cisaillement par rapport aux fibres synthétiques grâce à leur rigidité.

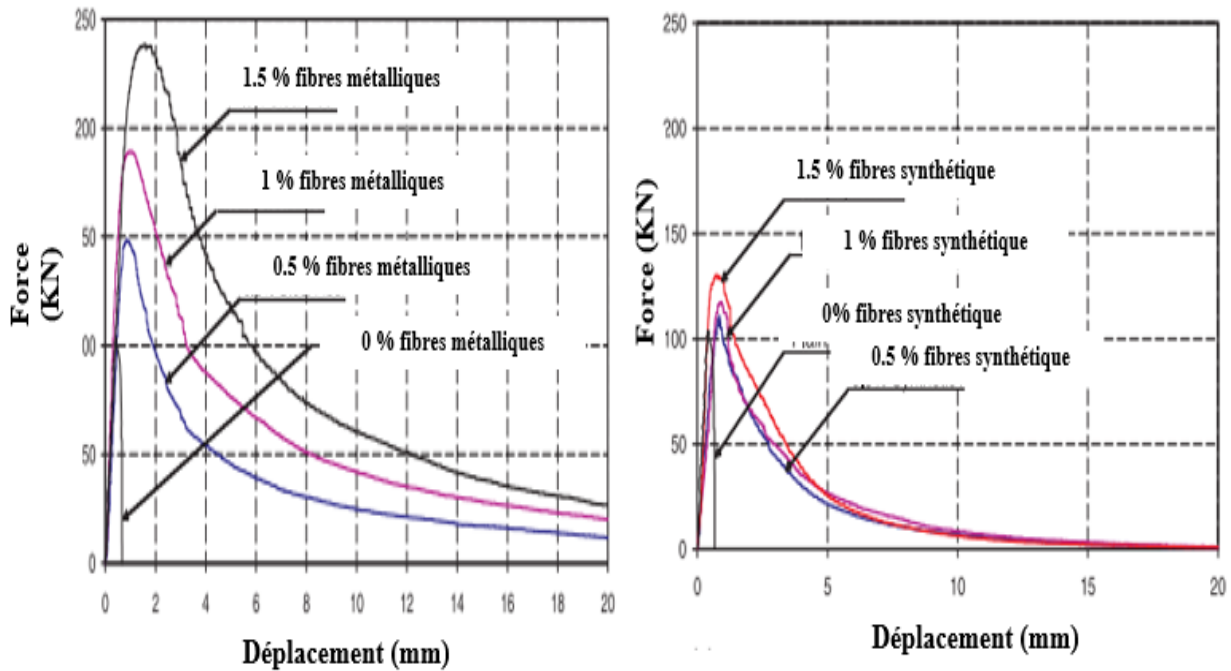


Figure I.12. Influence du pourcentage des fibres spirales sur le comportement au cisaillement des bétons [Fariboz et al., 2006]

v. Module d'élasticité

[Ellouze et al., 2005] ont constaté que le module d'élasticité augmente avec l'ajout des fibres métalliques. Cette augmentation peut s'expliquer par la loi des mélanges [Swann et Mangat, 1974]

Dans une autre étude, [Djebali, 2013] a utilisé des fibres métalliques de forme spirale. Il a trouvé qu'un faible pourcentage en fibres de forme spirale entraîne une augmentation de 3% à 4% de la rigidité. Cependant, le module d'élasticité du béton a tendance à baisser lorsqu'on augmente le volume de ces fibres qui peuvent s'entremêler et affecter la compacité du mélange. Les auteurs recommandent une teneur optimale en fibres spirales de 0.4% pour obtenir un module optimal (Figure I.13).

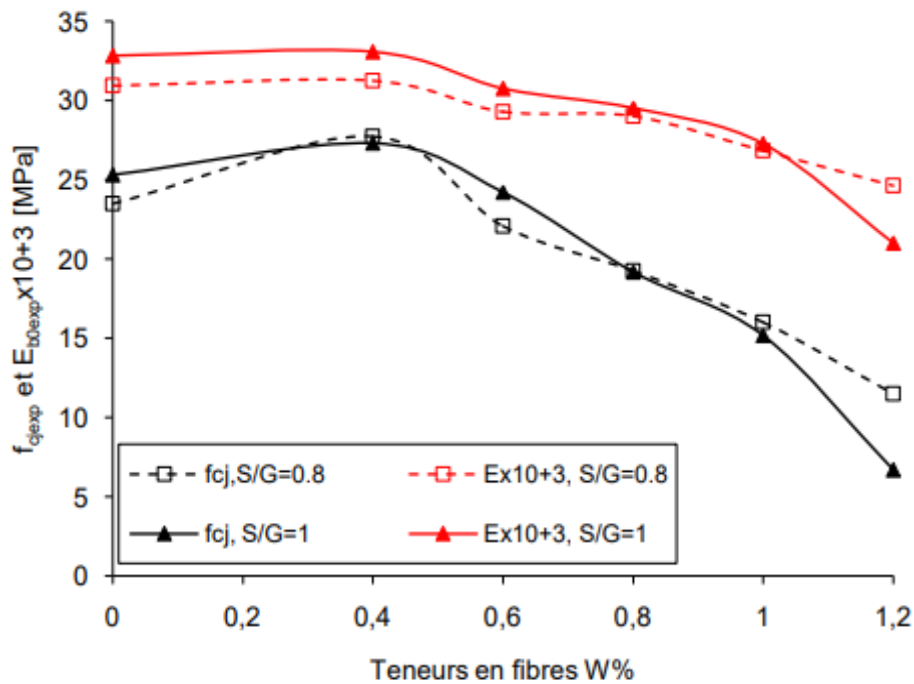


Figure I.13. Évolution de la résistance en compression et du module de Young en fonction de la teneur en fibre [Djebali, 2013]

I.3.9. Autres propriétés

i. Fluage

Le phénomène de fluage engendre une redistribution des efforts au sein d'une structure. Les mécanismes qui en sont à l'origine sont sujets à controverse [Nikola et al 2020] et sont principalement liés à la matrice.

Cependant, le fluage n'a été que peu étudié dans le cas des bétons fibrés. Les conclusions des essais au fluage sur une fibre isolée poussent à dire que les matériaux cimentaires à base de fibres pourraient être susceptibles au phénomène de fluage à condition que les fibres soient soumises à des contraintes de traction permanentes [Ul Islam, 2021].

Dans ce contexte, [Kamen, 2007] a aussi montré que l'augmentation de la quantité des fibres dans les matériaux cimentaires engendre systématiquement une amplification du fluage venant ainsi contredire l'idée que les fibres ont peu d'influence sur ce phénomène [Adams, 1975 et Dehousse, 1975].

ii. Fatigue

La présence des fibres augmente la résistance à la fatigue et améliore le comportement du béton sous sollicitations cycliques [Debora et al., 2019]. Ce constat a aussi été validé par plusieurs recherches [Dehousse et al., 1974], [Ramakrishan et Oberling, 1987] et [Kai et al., 2021].

iii. Retrait

[Mahmoud et al., 2022] ont montré que le renforcement des matériaux cimentaires par des fibres métalliques est l'une des solutions techniques qui permettent de réduire le phénomène du retrait. A ce titre, [Setti et al., 2010] ont trouvé qu'un pourcentage de 1% de fibres conduit à une diminution de 16% du phénomène de retrait et de 27 % lorsque le dosage en fibres est égal à 2 %. Par ailleurs, [El Hachem, 1990] a remarqué que la présence des fibres permet d'améliorer de 28% la résistance vis-à-vis due au retrait.

I.4. Dégradations chimiques

Aujourd'hui, la durabilité des structures en matériaux cimentaires est l'un des paramètres importants à prendre en considération dans le domaine du génie civil. Elle est influencée non seulement par les chargements mécaniques mais aussi par l'environnement (marin, gel - dégel, taux d'humidité...). Ces influences deviennent plus importantes à long terme.

Dans notre étude, on se limitera à la lixiviation et aux attaques acides

I.4.1. Lixiviation

La lixiviation des matériaux cimentaires concerne tous les ouvrages immergés dans l'eau. En effet la solution interstitielle des matériaux cimentaires est fortement basique et chargée en ions calcium et alcalins, à la différence de la plupart des eaux en contact avec des matériaux cimentaires qui imposent donc un fort gradient de concentrations.

Le phénomène de lixiviation est d'autant plus intense que l'eau en contact avec le matériau cimentaire est peu minéralisée et acide. La dégradation se propage à partir de la surface et se traduit par une baisse du pH, suivi d'une dissolution des composés solides, donc d'une augmentation de la porosité et par conséquent d'une dégradation des propriétés mécaniques du matériau et de l'ouvrage.

I.4.1.1. Processus de lixiviation du béton

Lorsque la pâte de ciment est en contact avec l'eau (pure ou faiblement minéralisée) ou avec un acide, les ions se diffusent de la solution des pores vers l'eau entraînant un déséquilibre chimique. En effet, puisque le pH de la solution interstitielle du béton est basique (environ 13), donc la plupart des environnements aqueux naturels auxquels il est exposé lui sont potentiellement agressifs. Dans ce cas, un échange ionique avec l'extérieur peut se produire au sein de la porosité capillaire [Torrenti et al., 1999]

Selon [Adenot et Buil, 1992], les principaux éléments lixiviés sont les ions calcium Ca^{2+} et l'hydroxyde OH^- . Le milieu extérieur provoque deux phénomènes : dissolution et/ou précipitation à cause des variations de concentrations et du phénomène de transport de la matière par diffusion des ions à savoir les alcalins dans un premier temps Na^+ et K^+ , ensuite Ca^{2+} ; OH^- , ... [Jebli, 2016].

Dans le processus de lixiviation, c'est la portlandite (CH) qui est dissoute en premier, puis les monosulfoaluminates et l'ettringite, suivi de la décalcification progressive des silicates de calcium hydratés (C-S-H) qui contrôle l'équilibre du système figure (I.14). [Pavlík, 2000].

Ces phénomènes conduisent à l'augmentation de porosité dans la zone lixiviée. L'augmentation de la porosité accélère la pénétration des agents agressifs et diminue significativement les performances mécaniques. A titre d'exemple, Saito et [Deguchi, 2000] ont trouvé une différence peut atteindre 60% entre les résistances des mortiers dégradés et non dégradés.

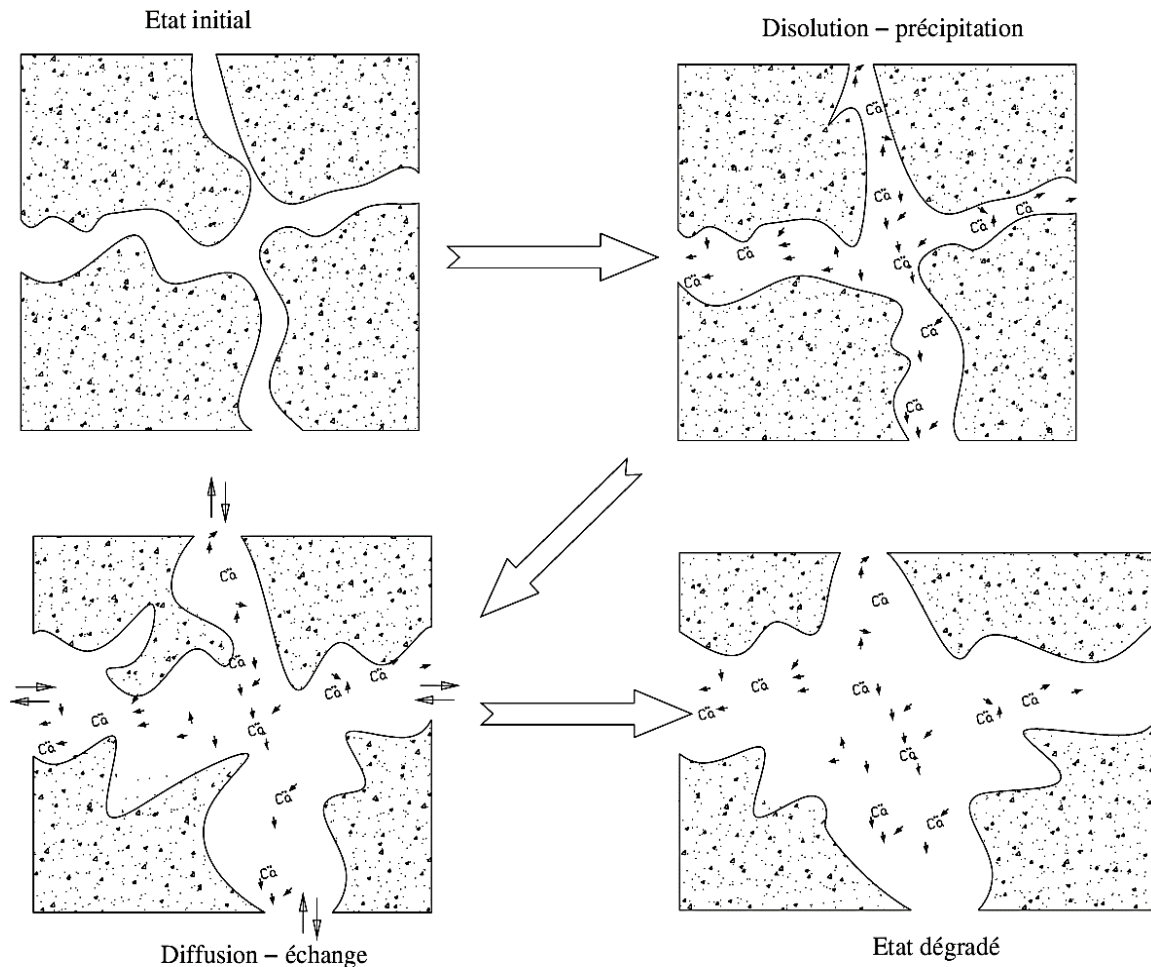


Figure I.14. Processus de lixiviation d'un matériau cimentaire [Nguyen,2005].

La lixiviation de calcium est contrôlée par l'équilibre entre les phases solides de calcium (Portlandite CH et C-S-H) et la concentration en calcium dans la solution des pores.

La figure 1.14 représente le diagramme d'équilibre entre le rapport Ca/Si dans la phase solide et la concentration en calcium en solution interstitielle. On remarque clairement trois zones distinctes qui sont en relation avec les différents éléments hydratés (figure I.15). [Berner, 1992] et [Tognazzi, 1998].

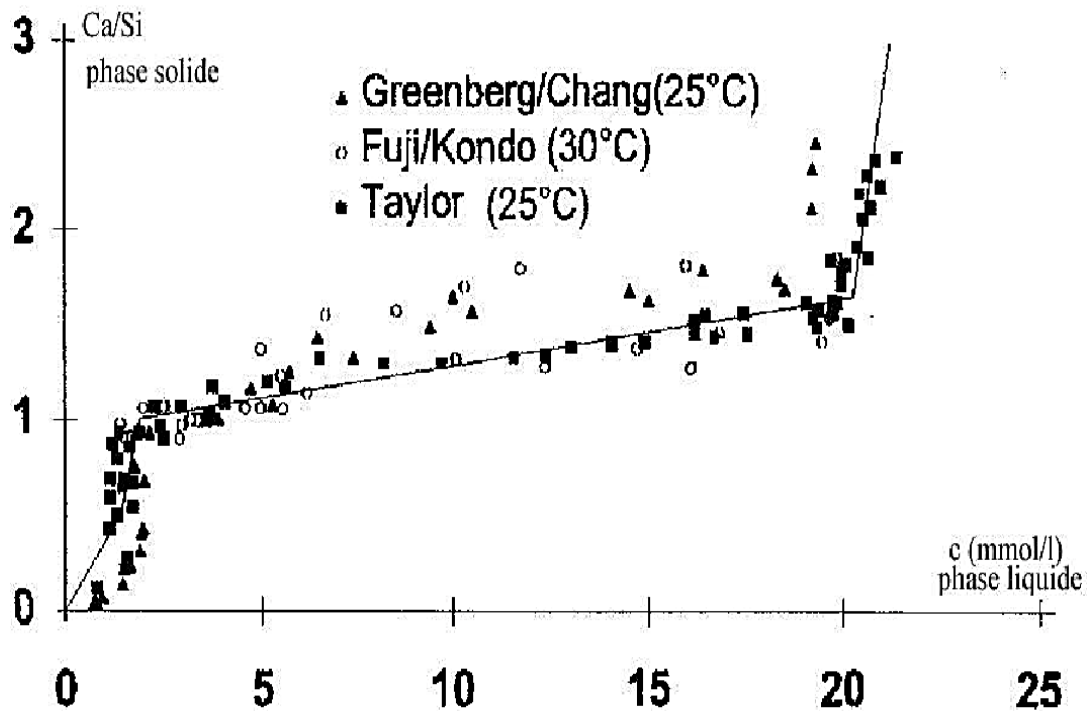


Figure I.15. Diagramme d'équilibre entre le rapport Ca/Si dans la phase solide et la concentration en calcium en solution interstitielle [Tognazzi, 1998]

La première zone correspond à la dissolution de la portlandite où la concentration de calcium dans la solution est initialement élevée (22 mmol/l) et le pH est environ égal à 12,5. La diminution de la concentration en Ca^{2+} implique une réduction rapide du rapport Ca/Si qui passe de 2,5 à 1,5.

La deuxième zone correspond à la dissolution progressive des C-S-H correspondante à la diminution de la concentration des Ca^{2+} de 2 à 1 mmol/l, ce qui implique une diminution du pH de la solution interne de 11 à 9.

Dans la dernière zone, le rapport Ca/Si diminue de 1 à 0,3. Dans cette zone la structure moléculaire est proche de la tobermorite ($\text{Ca}_5\text{Si}_6\text{O}_{16}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) [Taylor, 1990].

Plusieurs études relatives aux dégradations chimiques, réalisées sur pâtes de ciment et sur mortiers ont montré la présence des fronts de dissolution-précipitation dans la zone lixiviée (figure I.16) [Bajza et al., 1986, Adenot, 1992, Adenot et Aspart, 1998, Adenot et Faucon, 1996], [Adenot et al., 1997], [Bourdette, 1994], [Gérard, 1996], [Tognazzi, 1998].

Le processus de diffusion des ions vers l'environnement provoque des perturbations d'équilibre et entraîne le phénomène de dissolution des produits hydratés. La portlandite se dissout totalement, l'équilibre du système est alors assuré par les C-S-H qui sont ensuite soumis

à une décalcification partielle. Une fois les C-S-H totalement décalcifiés, il restera uniquement le gel de silice.

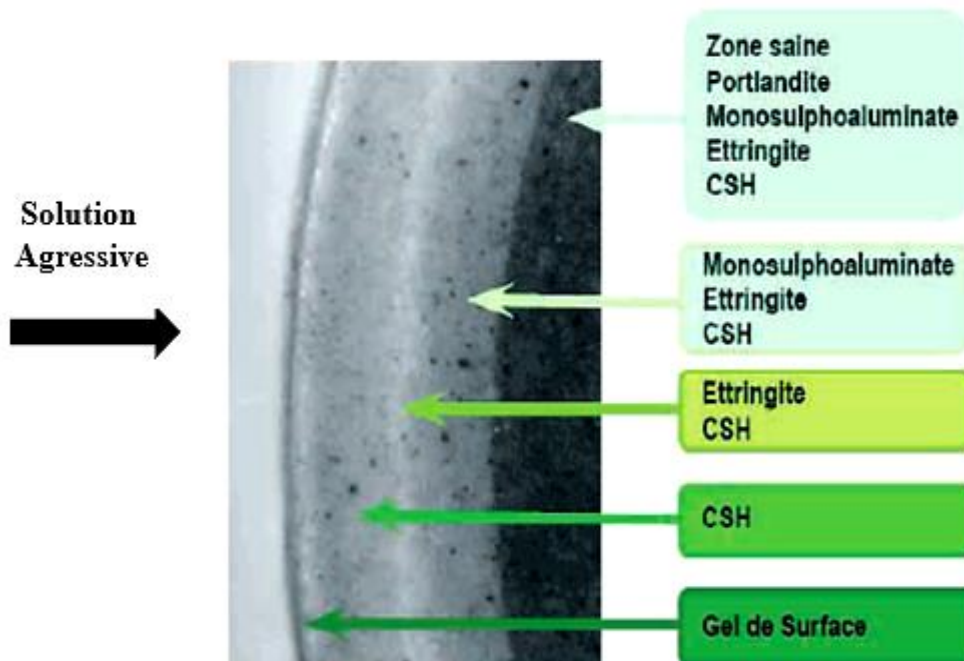


Figure I.16. Dégradation par lixiviation d'une pâte de ciment [Adenot et Faucon, 1996]

I.4.1.2. Lixiviation accélérée

Le processus de lixiviation naturelle en eau pure est très lent Adenot [Adenot et Buil, 1992] a montré que pour une pâte ayant un rapport Eau/Ciment de 0,4, une dégradation sur une profondeur de 4 cm nécessiterait une durée de lixiviation de l'ordre de 300 ans.

Le phénomène de dégradation du béton est encore plus lent à cause des granulats qui gênent le processus de diffusion. De plus, l'épaisseur de dégradation doit être représentative et correspondante au volume élémentaire lorsqu'il s'agit du béton.

Comme nous l'avons vu précédemment, la cinétique de lixiviation dépend essentiellement des équilibres chimiques et de la diffusion des espèces chimiques. Donc, pour avoir une accélération, il faut accélérer soit le processus de dissolution soit le processus de diffusion. Il y a trois pistes que l'on peut suivre :

- Transport des ions par l'application d'une pression hydraulique ou d'un champ électrique [Gérard, 1996] et [Cai et al., 2016].
- L'accélération de la diffusion des ions par augmentation des gradients de concentration entre la solution interstitielle et l'environnement [Heukamp et al., 2003] et [Kurumisawa, 2021].

- L'augmentation de la température de la solution agressive qui accélère le processus diffusion. [Kamali et al., 2003] et [Dujian et al., 2022].

i. Dégradation accélérée par augmentation de la température

Plusieurs campagnes expérimentales ont déjà été menées pour montrer l'influence de la température sur la dégradation des matériaux cimentaires (Vaissière (cité [Torrenti et al, 1999], [Le Bellégo, 2000], [Peycelon, 2004], [Perlot, 2005]). Des essais sur pâtes de CEM I et de CEM V à des températures croissantes de 25 à 85°C montrent une accélération de la dégradation (figure I.17 a et b).

[Peycelon et al., 2004] ont constaté que l'augmentation de la température engendre plus de calcium lixivié. Leurs résultats montrent aussi que l'effet de la température est nettement plus important lorsque le CEM I est utilisé. Les auteurs ont remarqué que la zone dégradée du CEM I aurait perdu 70% de calcium présent initialement alors que celle du CEM V en aurait perdu 50%. Par ailleurs, il apparait que la zone dégradée du CEM I est chimiquement plus dégradée.

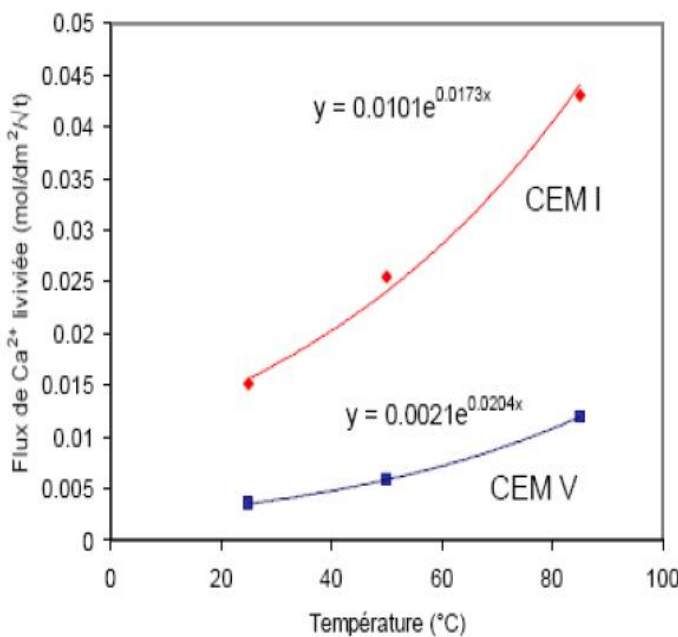


Figure I.17.a. Flux de calcium lixivié en fonction de la température pour des pâtes de CEM I et de CEM V [Peycelon et al., 2004]

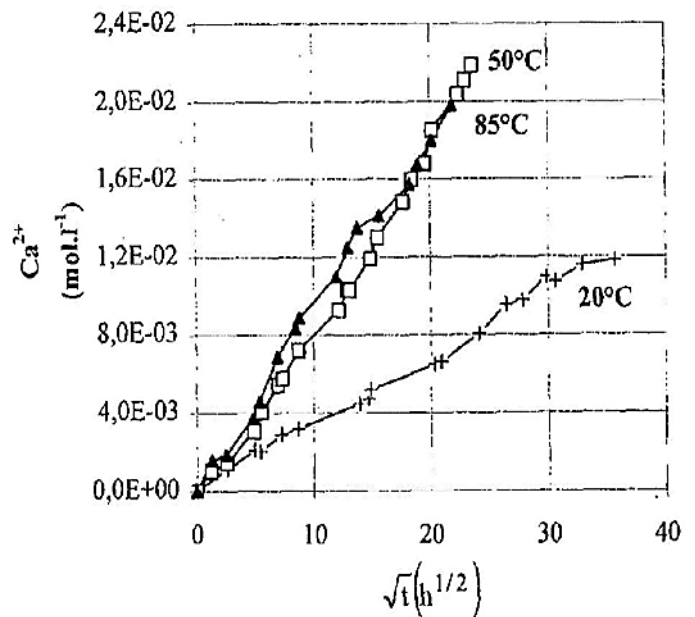


Figure I.17.b. Lixiviation d'une pâte de ciment à différentes températures [Torrenti et al., 1999]

Les travaux effectués par [Kamali, 2008] et [Dujian et al., 2022] ont confirmé les résultats obtenus par [Peycelon et al., 2004].

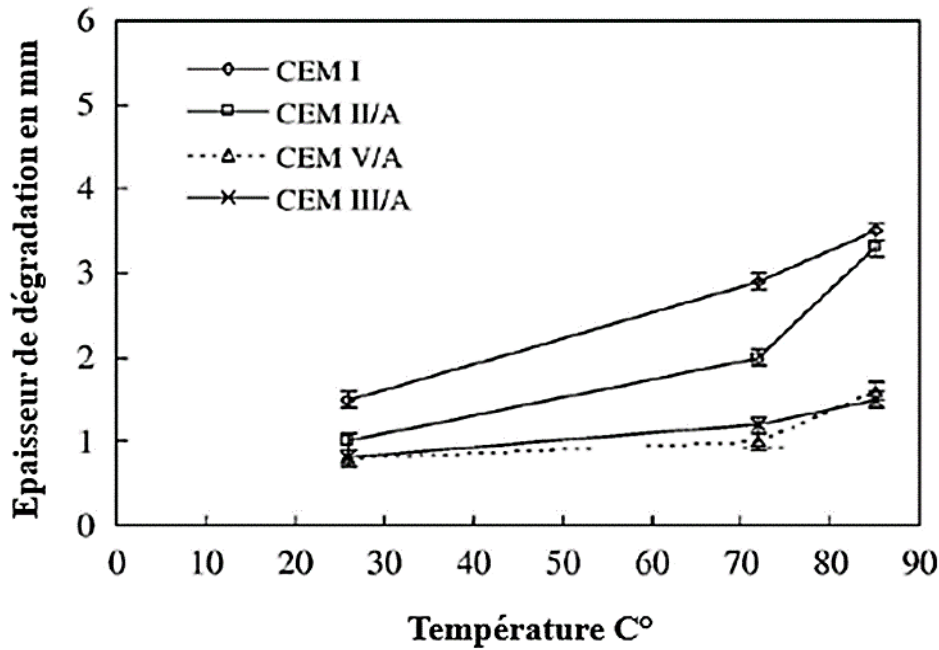


Figure I.18. Profondeur de dégradation des pâtes dans de l'eau pure en fonction de la température et du type de ciment [Kamali et al., 2008]

ii. Accélération par application d'une pression hydraulique ou d'un champ électrique

Le procédé de transport des ions forcé par l'application d'une pression hydraulique a été mis en œuvre par [Abdelghafour Mohamed, 1989]. Le procédé consiste à injecter de l'eau sous pression dans les matériaux cimentaires. Ceci entraîne une diffusion ionique très faible si la pression est suffisante. Cependant, l'application expérimentale de cette méthode est complexe car il est difficile d'assurer une grande pression sur des matériaux cimentaires ayant de faibles propriétés de perméation.

La méthode d'accélération du transport des ions en utilisant un champ électrique a été souvent exploitée dans les recherches [Saito et al., 1992] [Gérard, 1996] et [Le Maréchal et al., 1998]. Elle consiste à utiliser un champ électrique en appliquant une différence de potentiel aux bornes d'un échantillon. En appliquant ce principe, [Gérard, 1996] a effectué une dégradation accélérée des pâtes de ciment (procédé LIFT : Leaching Induced by Forced Transport) (figure I.19). Le facteur d'accélération et donc la durée de l'essai dépend du choix du potentiel électrique par unité d'épaisseur. Toutefois, l'application d'un champ électrique peut conduire à une accélération du phénomène de lixiviation de 50 à 100 fois [Cai et al, 2016].

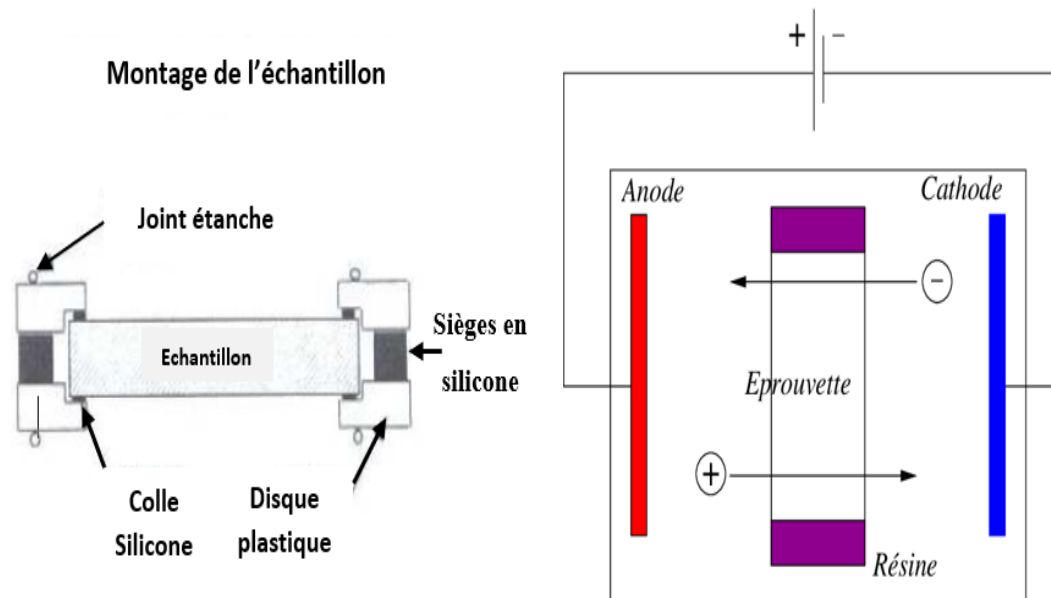


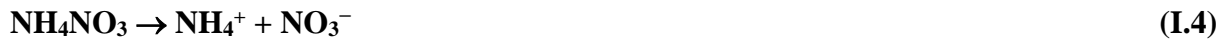
Figure I.19. Cellule de l'essai accéléré sous champ électrique LIFT [Gérard, 1996]

iii. Immersion dans une solution agressive de nitrate d'ammonium

Le principe de l'utilisation d'une solution de nitrate d'ammonium NH_4NO_3 pour étudier le phénomène de lixiviation sur le béton est connu depuis le début du 20^{ème} siècle. [Morh, 1925] a été parmi les premiers à utiliser cette solution pour étudier son effet sur le béton et sur la chaux. [Lea, 1965] a étudié aussi la réaction des ions Ca^{2+} issus de la dissolution de la portlandite et des C-S-H avec la solution de NH_4NO_3 .

Plusieurs travaux de recherche ont aussi montré la pertinence de l'utilisation de ce type de solution comme accélérateur de la lixiviation du béton [Bajza et al 1986], [Tognazzi, 1998], [Le Bellégo et al, 2000], [Heukamp, 2003], [Kamali, 2003] ou encore [Nguyen, 2005] et [Kurumisawa, 2021].

Le principe de la dégradation par la solution concentrée de NH_4NO_3 consiste d'abord à la diffusion de l'ammonium à travers les pores du matériau. Le nitrate d'ammonium en milieu basique se dissocie en ammonium NH_4^+ et nitrate NO_3^- (eq I.4) qui réagissent avec les ions Ca^{2+} issus de la dissolution de la portlandite et le C-S-H. La consommation des ions Ca^{2+} par réaction avec NO_3^- (eq I.5) modifie l'équilibre chimique entre la phase solide et la phase liquide du matériau et accélère non seulement le processus de dissolution de la portlandite mais aussi le processus de diffusion du calcium vers l'environnement. Ainsi, la réaction des ions OH^- avec NH_4^+ (eq I.6) provoque une diminution du pH du béton.



Dans le cas d'une lixiviation au nitrate d'ammonium, il faut avoir une concentration en calcium importante pour avoir un équilibre dissolution-précipitation avec une solution de NH_4NO_3 de concentration égale à 6 mol/g. On obtient l'équilibre chimique quand la concentration de calcium en solution interstitielle atteint 2,730 mol/l [Tognazzi, 1998] et [Heukamp, 2003]. Ces réactions s'opèrent à pH basique, les gels de surface qui se dissolvent très lentement à pH neutre ne vont donc pas être altérés. Comme dans le cas d'une agression naturelle, on a une dégradation limitée par la diffusion dans la partie altérée du matériau, accompagnée d'équilibres chimiques locaux. Il faudra donc déplacer ces équilibres pour accélérer le processus de dégradation naturelle.

[Carde et al., 1996] ont démontré expérimentalement qu'il y a une grande similitude entre la dégradation par l'eau pure et par la solution de NH_4NO_3 (figure I.20). De surcroît, il a aussi trouvé que la solution NH_4NO_3 de 6,25 mol/l permet de réduire de cent fois le temps nécessaire pour obtenir la même épaisseur dégradée d'une pâte de ciment durcie par rapport à l'eau pure.

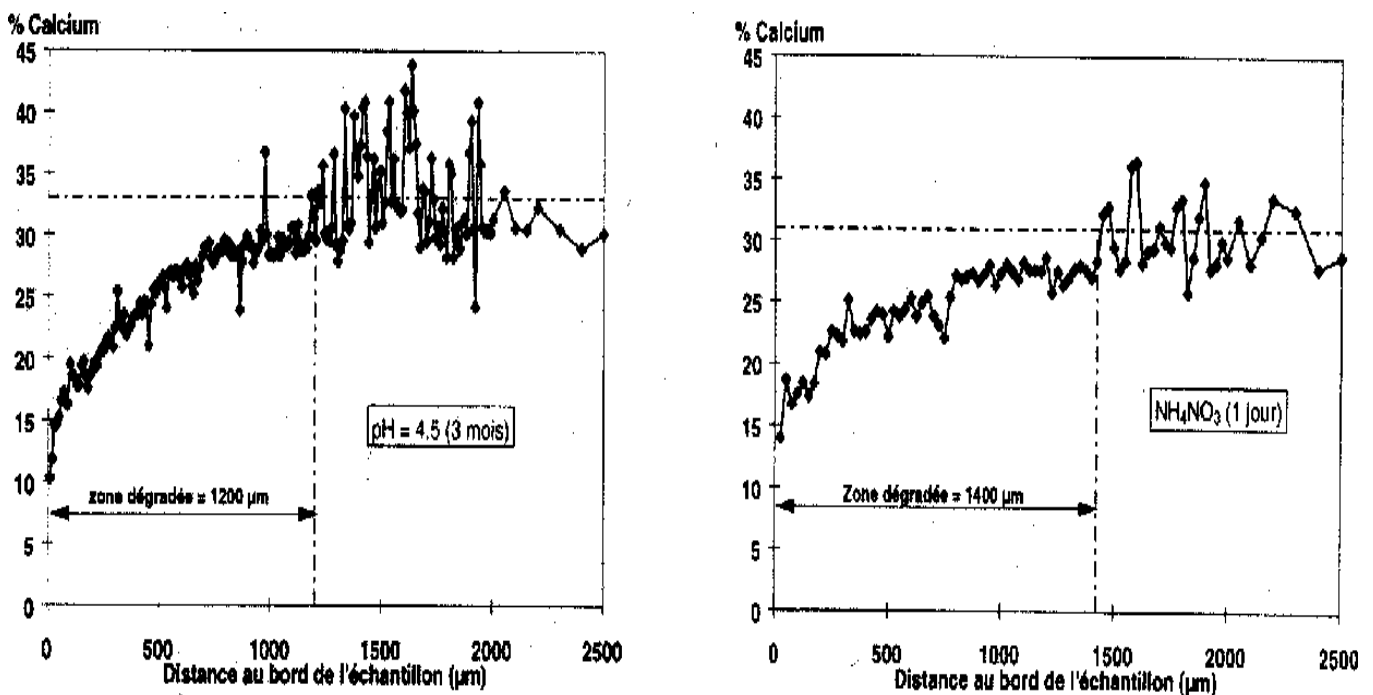


Figure I.20. Profils en calcium d'une pâte de ciment (CEM I, E/C = 0.5)

(a) avec l'eau (b) avec le nitrate d'ammonium [Carde et al, 1996]

Le tableau I.3 présente une comparaison entre différents modes de dégradation accélérée [Tognazzi, 1998]. Il montre que la dégradation par immersion du béton dans du nitrate d'ammonium reste la plus efficace. Dans ce cas, la profondeur de dégradation obtenue est de 4 mm pour une durée de 4 jours alors qu'elle est de 1,2 mm pour une durée de 21 jours quand un champ électrique est appliqué. Il est clair que la lixiviation simple nécessite des mois pour obtenir des profondeurs de dégradation beaucoup plus faibles.

Tableau I.3. Comparaison des trois essais de dégradation [Tognazzi, 1998]

Méthode de lixiviation	Lixiviation simple	NH ₄ NO ₃ 6M	LIFT 5V/cm
Type de cinétique	Proportionnelle \sqrt{t}	Proportionnelle \sqrt{t}	Proportionnelle \sqrt{t}
Evolution de l'épaisseur dégradée	= 0.14mm/jour ^{0.5}	= 2mm/jour ^{0.5}	= 1.2mm/jour ^{0.5}
Evolution de la quantité de calcium	= 0.6 m ² /jour ^{0.5}	= 10 m ² /jour ^{0.5}	= 0.55 m ² /jour ^{0.5} à la cathode
Durée effective de l'essai	210 jours	4 jours	21 jours
Epaisseur dégradée	2mm	4mm	2.5mm (cathode)

I.4.1.3. Paramètres influençant le processus de lixiviation

i. Influence des granulats

Les conditions locales d'hydratation au voisinage de l'interface pâte-granat sont modifiées dès le début des réactions à cause de la présence d'un excès d'eau dû, soit à l'effet de paroi, soit au ressuage, qui conduit à une augmentation locale du volume des pores dans lequel les hydrates peuvent se développer [Nguyen,2005]. Cette zone accélère les transports de matière, par le fait de sa porosité plus élevée. Par ailleurs, la présence des granulats influence la vitesse de diffusion, les granulats ralentissent le transport de la matière suite à l'augmentation de la tortuosité [Jebli et al., 2018].

De plus, l'effet de paroi introduit par les granulats sur les grains de ciment conduit à une densification dans la zone de la pâte extérieure aux auréoles de transition ; cet effet va dans le sens d'un ralentissement des transports dans cette zone [Camps,2008].

La présence du granulat constitue aussi un obstacle et s'interpose sur le cheminement du transport de matière dans la pâte de ciment, ce qui empêche le processus de diffusion des ions dans les pores vers l'environnement. Dans un béton, ce facteur amène à réduire la vitesse de

transport. A ce titre, [Nguyen, 2005] a effectué des essais de lixiviation accélérés sur pâte de ciment, mortier et béton pour mettre en évidence l'effet de granulat sur la cinétique de lixiviation. Le dépouillement de ces résultats a montré que la présence des granulats constitue un obstacle sur le cheminement du transport de matière dans la pâte de ciment (figure I.21). Toutefois, [Bentz et al., 1992] ont trouvé que l'épaisseur de la zone de transition (ITZ), généralement de l'ordre de 10 à 30 micromètres, dépend uniquement de la finesse des grains de ciment et non pas de la taille des granulats.

D'un autre côté, les granulats sont moins déformables que la matrice cimentaire. Il en résulte une concentration de contraintes dans la zone d'interfaces, avec pour conséquence un risque de microfissuration plus élevé.

[Lobet, 2003] a démontré que le coefficient de diffusion effectif du béton diminue avec la teneur en granulat jusqu'à ce qu'il atteigne 50%. Au-delà de ce seuil, le coefficient de diffusion effectif semble être indépendant de la teneur en granulat.

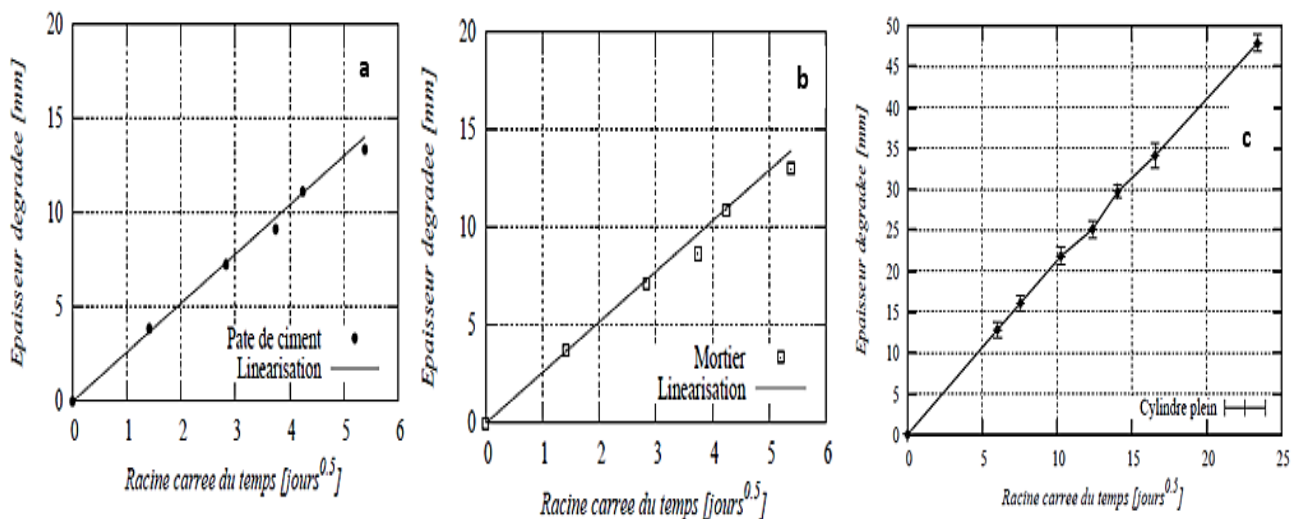


Figure I.21. Evolution de l'épaisseur de dégradation en fonction de la racine carrée du temps
a) pâte de ciment, b) mortier, c) béton [Nguyen, 2005]

ii. Influence du liant

La nature du liant peut avoir une influence significative sur les matériaux cimentaires. Les liants pauvres en CaO sont souvent préconisés car ils interviennent à deux niveaux dans le mécanisme de lixiviation. D'une part, ils génèrent une teneur plus faible en portlandite – dont la dissolution engendre une augmentation de la porosité – et des C-S-H plus denses et stables.

D'autre part, à porosité globale identique, la morphologie du réseau poreux serait différente, et cela se traduirait globalement par une porosité capillaire et des coefficients de diffusion plus

faibles [Kamali et al., 2003]. De ce fait, les liants comprenant des additions pouzzolaniques font preuve d'une meilleure résistance à la lixiviation [Badoz et al., 2006].

Par ailleurs, les additions minérales diminuent la diffusivité ionique elles contiennent moins de porosité capillaire que la pâte de ciment portland [Cheng et al., 2013]. A ce sujet, [Kamali et al, 2008] et Hannawi [Hannawi et al, et al, 2010] ont trouvé que le coefficient de diffusion de chlorure dans la pâte à base de ciment CEM I est 7,5 fois supérieur à celle à base de CEM II / A (figure I.22)

De plus, les additions minérales diminuent la quantité de la portlandite dans la pâte de ciment, suite à la réduction du clinker et la consommation de la portlandite par la réaction pouzzolanique. Cela s'avère intéressant car la lixiviation de la portlandite augmente la porosité de la zone dégradée qui accroît en conséquence la diffusivité ionique dans cette zone, ce qui contribuera à accélérer la cinétique de lixiviation.

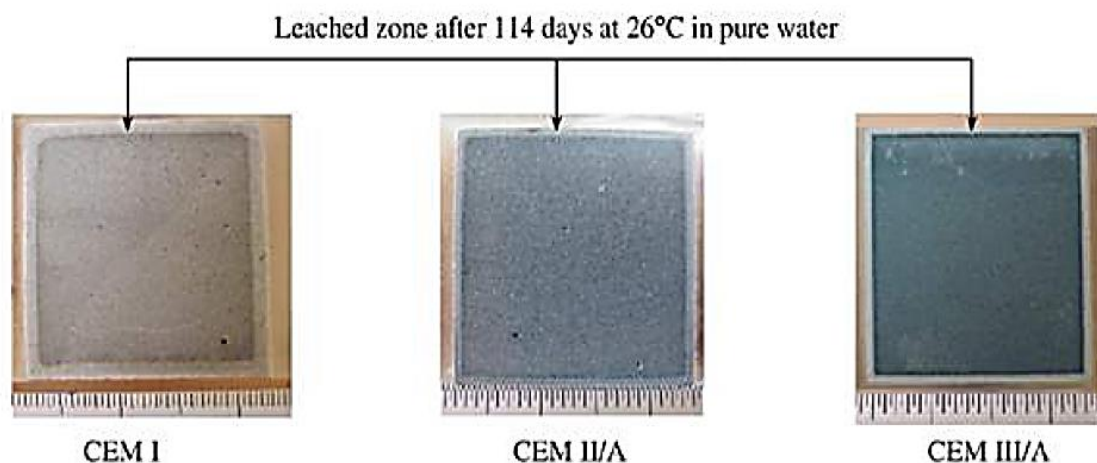


Figure I.22. Photos des échantillons de pâte de ciment avec $E/C = 0,4$ lixiviés pendant 114 jours dans l'eau pure [Kamali et al., 2008].

iii. Rapport E/C

Plusieurs auteurs ont étudié l'effet du rapport E/C sur les propriétés physiques des matériaux cimentaires et sur la cinétique de lixiviation. [Delagrave, 1996, Richet, 1992 et Kamali et al., 2008] ont montré que la cinétique de lixiviation augmente avec l'augmentation du rapport E/C à cause d'une porosité plus élevée, ce qui a pour conséquence d'augmenter la diffusion ionique. Généralement, l'augmentation de l'épaisseur de dégradation et la diffusion ionique deviennent assez importantes pour les pâtes lorsque le rapport E/C est supérieur à 0,4 (figure I.23) (tableau I.4)

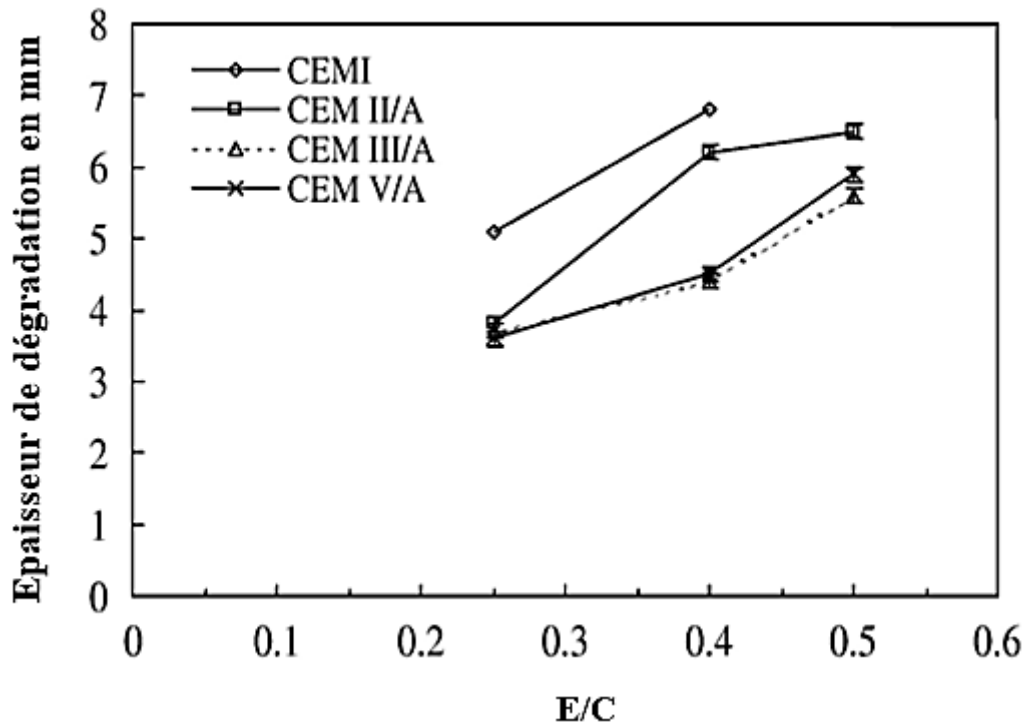


Figure 1.23. Profondeur dégradée des échantillons dans la solution de nitrate d'ammonium en fonction du rapport E/C [Kamali, 2008]

A titre d'exemple, le tableau I.4 montre l'amplification de la valeur du coefficient de diffusion effectif de tritium en fonction de l'augmentation du rapport E/C

Tableau I.4. Coefficient de diffusion effectif de tritium en fonction du rapport E/C [Richet, 1992] [Delagrave, 1996]

E/C	Coefficient de diffusion effectif de tritium m^2/s
0,45	$9,8 \cdot 10^{-12}$
0,40	$5,0 \cdot 10^{-12}$
0,25	$5,4 \cdot 10^{-13}$
0,25	$6,3 \cdot 10^{-13}$

iv. Fissures

[Danese, 1997] a effectué des essais de dégradation au nitrate d'ammonium sur des éprouvettes en pâte de ciment fissurées. Il a observé que l'épaisseur dégradée de la zone non fissurée est plus grande que celle du fond de la fissure. Ce résultat s'explique par la formation dans la zone de fissure d'un gradient de concentration plus faible (concentration en calcium

plus élevée) qui réduit la vitesse de dégradation. Par ailleurs, il a aussi montré que la dégradation atteint le fond de la fissure très rapidement dès le début de l'attaque.

D'un autre côté, [Tognazzi, 1998] a étudié la profondeur dégradée en surface et en fond de fissure. Il a constaté que la profondeur de la dégradation en fond de fissure est moins importante qu'en zone non fissurée (figure I.23).

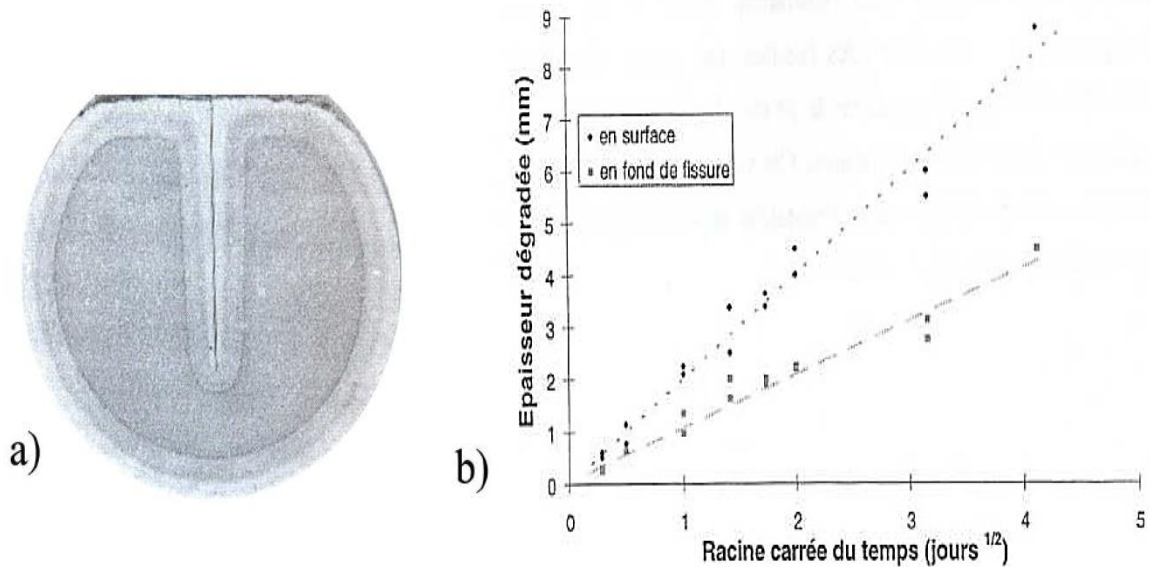


Figure I.24.a) Profil de dégradation dans la section droite d'une éprouvette fissurée

b) Evolution des épaisseurs dégradées en fond de fissure et en zone non fissurée [Tognazzi, 1998].

Par ailleurs, [Le Bellégo, 2001] a montré qu'en présence de la fissure, une dégradation supplémentaire peut se développer sur les lèvres des fissures (figure I.25) et augmente avec l'ouverture de la fissure. En conséquence, l'ouverture des fissures reste un paramètre important qui gouverne la cinétique de dégradation sur les lèvres de la fissure.



Figure I.25. Profil de dégradation dans la section droite d'une éprouvette fissurée

[Le Bellégo, 2001]

I.4.1.4. Comportement mécanique des bétons dégradés

Pour clarifier ce point, il est nécessaire d'imaginer des essais qui permettent d'établir le comportement des matériaux cimentaires qui ont subi une dégradation chimique contrôlée donc quantifiable. Ceci permet de caractériser l'influence du facteur d'altération chimique, ou encore l'influence de la durée de dégradation sur le comportement mécanique de la structure.

[Goncalves, 1991] a étudié l'influence de la dégradation au nitrate d'ammonium avec des solutions à concentrations différentes (0 ; 0,0625 ; 0,625 ; 6,25 mol/l) sur des mortiers de rapport E/C de 0,5. Il a remarqué que plus la concentration de la solution agressive est élevée, plus la résistance résiduelle de l'échantillon va diminuer, que ce soit en compression ou en flexion (figure I.26).

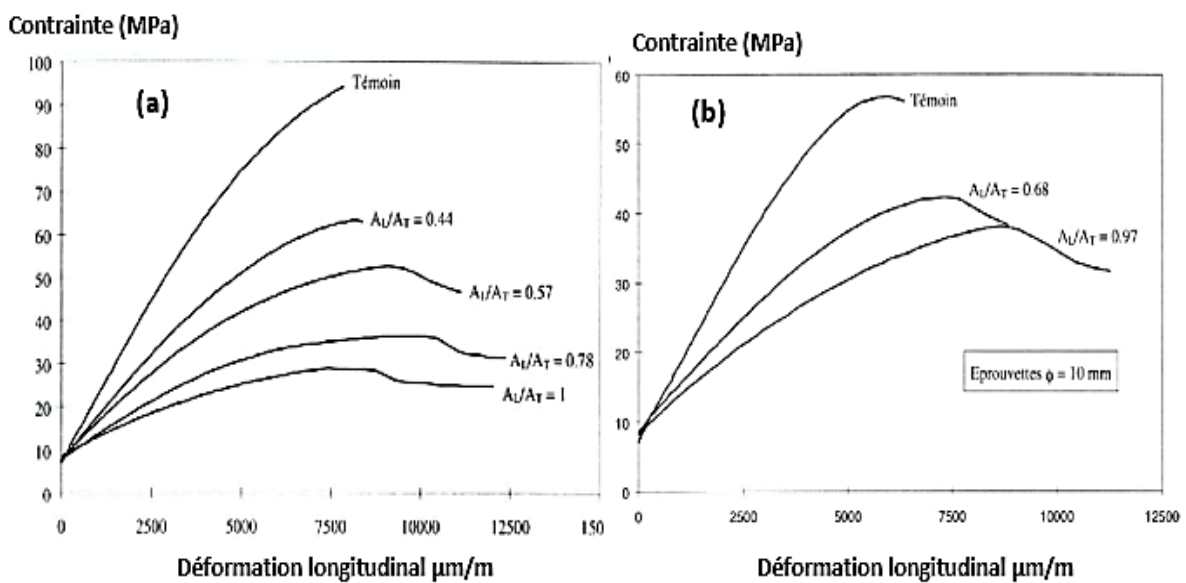


Figure I.26. Courbes contraintes moyennes - déformation en compression à différents stades de la dégradation a) pâte de ciment CEM I b) pâte de ciment CEM I + fumée de silice [Carde, 1996]

[Carde, 1996] a étudié la lixiviation au nitrate d'ammonium sur des pâtes de ciment (figure I.27). Il a utilisé deux types de liants pour caractériser la lixiviation des différents hydrates (CH, C-S-H) sur l'altération des propriétés mécaniques : des liants à base de CEM I et d'autres composés de 70% de CEM I et 30% de fumée de silice qui consommatrice de la portlandite.

Les résultats ont montré que les échantillons à base de CEM I perdent 80% de leurs résistances mécaniques en compression quand ils sont totalement dégradés alors que ceux contenant de la fumée de silice ne perdent que 40%.

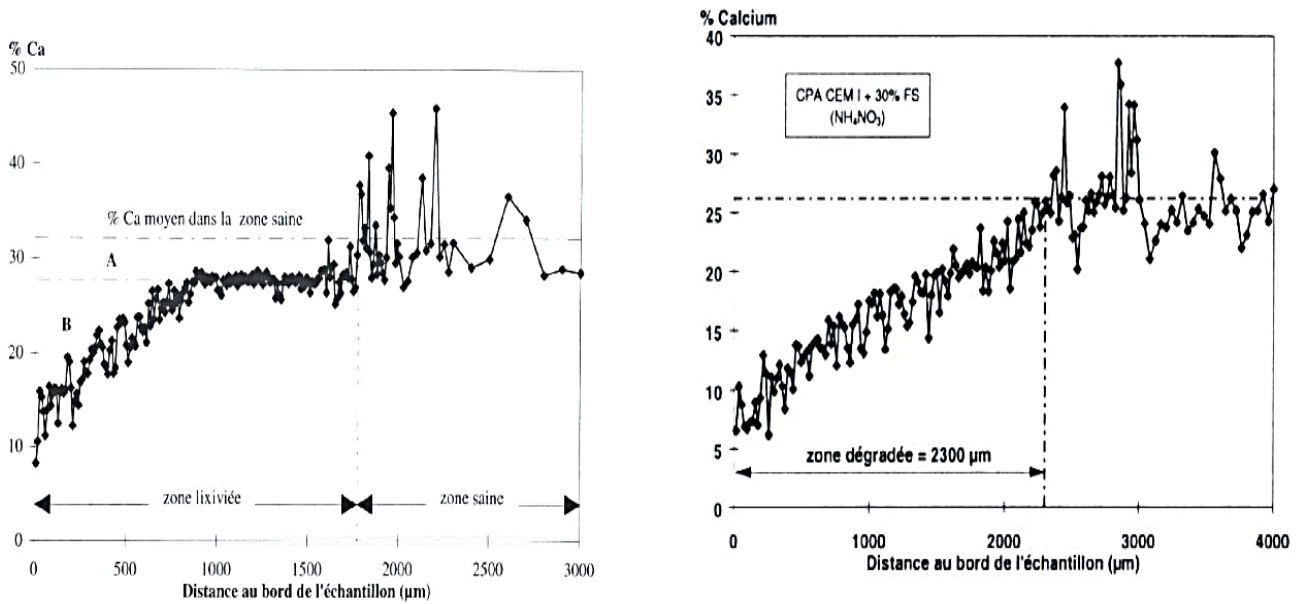


Figure 1.26. Profil des ions calciums dans la phase solide - microsonde (pâte de ciment (a) CEM I (b) pâte de ciment CEM I+ fumée de silice (FS/C =0.3) [Carde et al., 1996]

[Gérard, 1999] a étudié la perte de micro-dureté d'un matériau lixivié en la reliant à la perte de calcium en phase solide. Il a ensuite établi la relation entre le module de Young et la concentration de calcium en solution grâce à l'évolution des mesures de micro-dureté. Une chute importante du module de Young due à la dissolution de la portlandite puis une atténuation de cette diminution due à la décalcification progressive des C-S-H ont ainsi été constatées.

De plus, [Gérard, 1996] a constaté que la résistance à la compression chute de 70 % environ après la dissolution de la portlandite et que la dissolution progressive des C-S-H qui se manifeste après la dissolution de la portlandite est responsable d'une perte supplémentaire de la résistance à la compression égale à 6% (figure I.28) [Gérard, 1996].

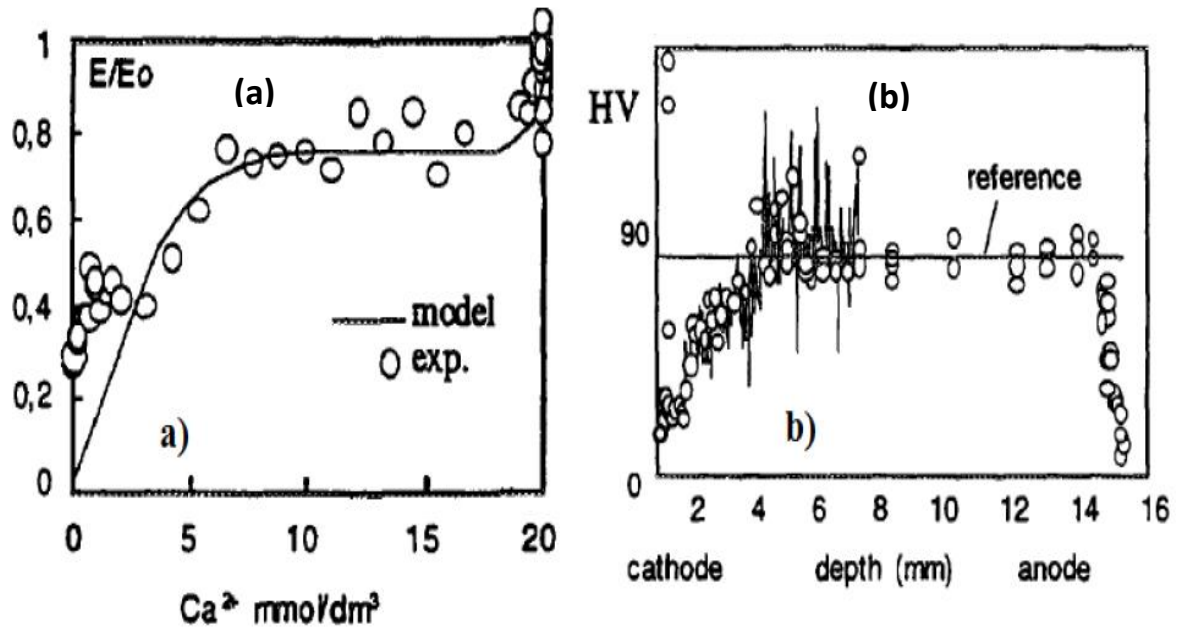


Figure 1.28. a) Evolution du module d'Young en fonction de la concentration de calcium liquide b) Evolution relative de la micro-dureté avec la profondeur de dégradation [Gérard, 1996]

Dans le même contexte, [Le Bellégo, 2000] a effectué des essais de compression et de traction simple sur des éprouvettes de mortier à différents niveaux de dégradation. Ses résultats ont montré que le module d'élasticité a diminué de 23, 36 et 53% respectivement pour des taux de dégradation de l'ordre de 48, 59 et 74% engendrant une diminution de la ténacité et la limite élastique du matériau comme le montre la figure I.29.

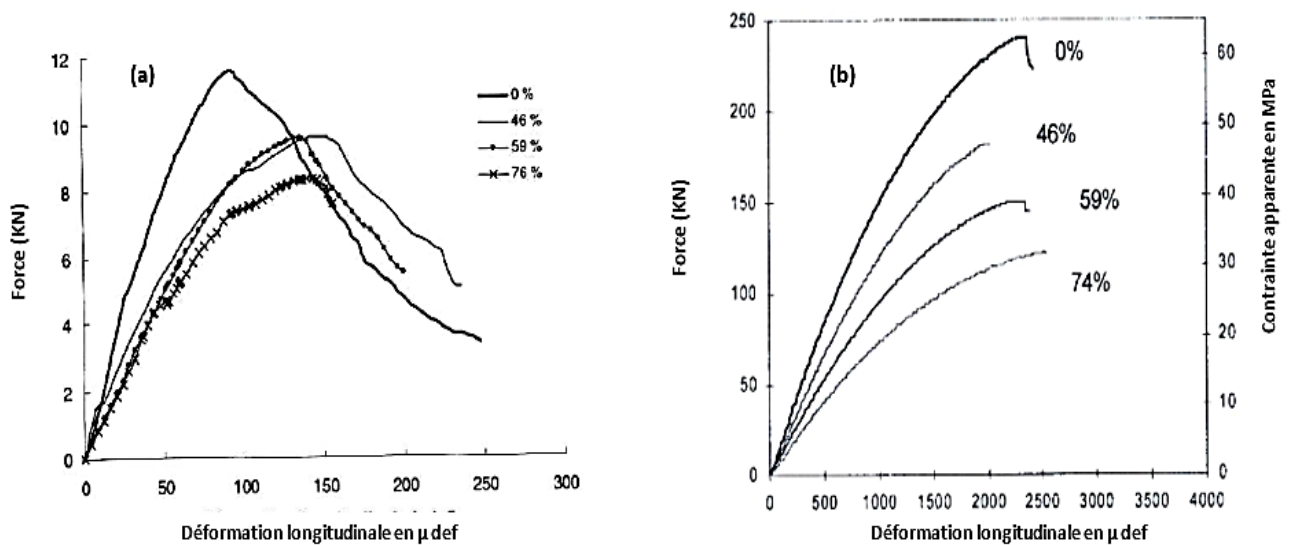


Figure I.29. a) Essai de traction en fonction du taux de dégradation b) essai de compression en fonction du taux de dégradation [Le Bellégo, 2000].

[Nguyen, 2005] a déterminé l'évolution de la rigidité en fonction du taux de dégradation pour des éprouvettes pleines attaquées sur les surfaces extérieures et sur d'autres éprouvettes creuses attaquées sur les surfaces extérieures et intérieures. Il a remarqué que les bétons dégradés subissent une perte de résistance rapide et égale à 24% impliquant une diminution du module d'élasticité (figure I.30).

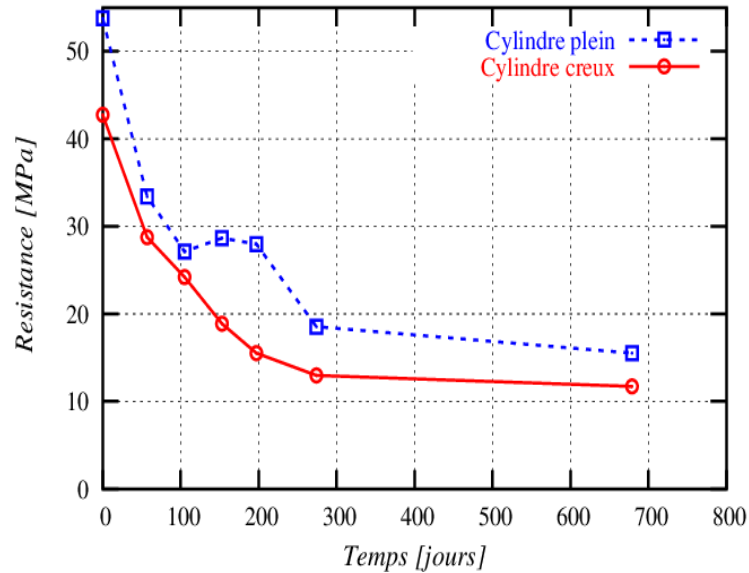


Figure I.30. Evolution de la résistance en compression en fonction du temps [Nguyen, 2005]

Toutefois, le même auteur a constaté une augmentation des déformations sur ses échantillons dégradés et un changement dans le comportement de ces bétons qui deviennent de plus en plus ductiles lorsque la dégradation continue, car le phénomène de lixiviation engendre une augmentation de la porosité dans le béton et une diminution de la cohésion entre les granulats (figure I.31).

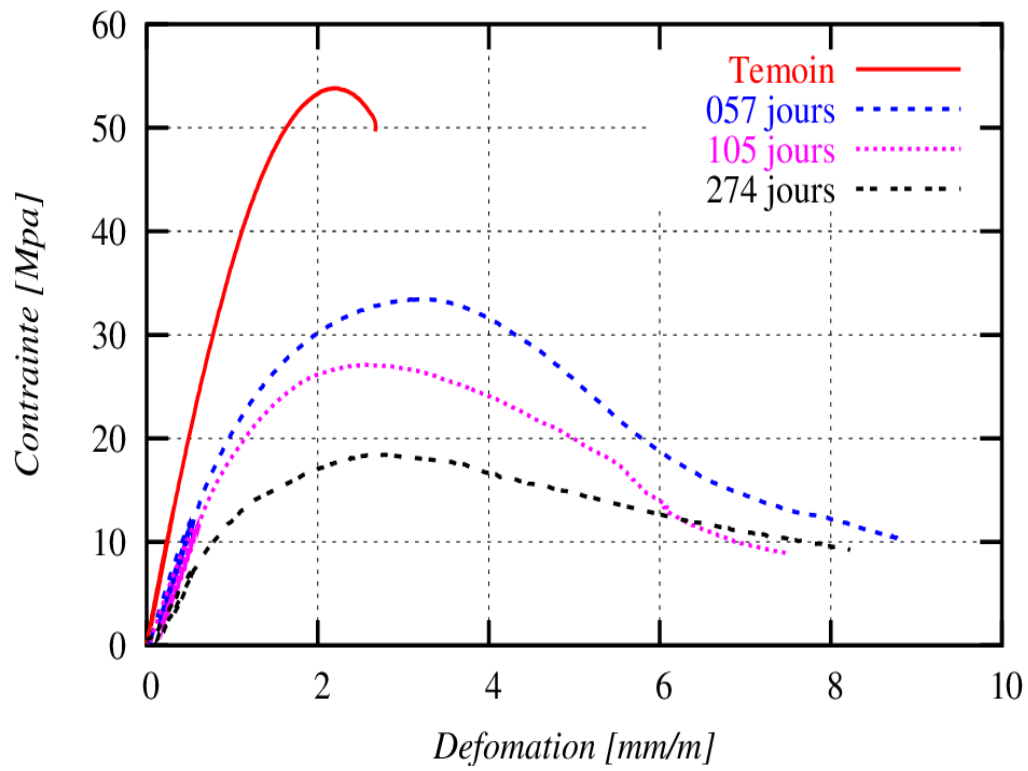


Figure I.31. Courbes contrainte-déformation sur des éprouvettes pleines à différentes échéances de dégradation chimique [Nguyen, 2005]

I.4.2. Attaques acides

Un acide est un composé chimique généralement défini par ses réactions avec des produits chimiques complémentaires. Les réactions entre un acide et une base sont nommées « réactions acido-basiques » ou « réactions acide-base ». Le pH caractérise l'acidité ou la basicité d'un produit ou d'un milieu. Plus le pH est bas, plus l'acidité est forte. Une solution ou un produit est dit acide si son pH est inférieur à 7, basique ou alcalin s'il est supérieur à 7 et neutre si son pH est égal à 7.

Les acides peuvent être forts ou faibles. Les acides forts se dissocient totalement dans l'eau. Parmi eux, on retrouve l'acide chlorhydrique (HCl), l'acide nitrique (HNO₃), l'acide sulfurique (H₂SO₄). Par contre, un acide faible ne se dissocie pas totalement dans l'eau. De ce fait, une augmentation de la concentration d'un tel acide ne conduit pas automatiquement à une diminution du pH. C'est le cas de l'acide carbonique (H₂CO₃), de l'acide acétique (CH₃COOH), de l'acide lactique (C₂H₅OCOOH). Pour atteindre une valeur de pH donnée, il est clair qu'une concentration plus élevée est nécessaire pour les acides faibles par rapport aux acides forts. Le pH ne dépend donc pas uniquement de la concentration de l'acide, mais aussi du type d'acide [Benosman et al., 2017].

I.4.2.1. 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 : spécialement 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 une fois combiné à l'humidité atmosphérique, se condense sous forme d'acide sulfurique qui attaque 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, et qui peuvent provoquer la dégradation de la surface exposée du béton.

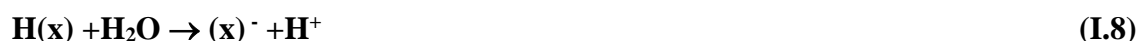
I.4.2.2. Mécanisme d'attaque

L'attaque des matériaux cimentaires par les acides comprend un ensemble de processus complexes qui entraînent une réduction des propriétés structurelles du matériau, telle que la résistance en compression.

En effet, le béton, de nature basique (pH supérieur à 12,5), est susceptible d'être attaqué par les acides qui réagissent avec les composés calciques pour former du sel de calcium de l'acide corrodant. Si l'acide circule suffisamment pour éliminer ce dépôt de sel, l'attaque se renouvelle indéfiniment. La mobilité du liquide acide est donc un facteur capital du degré d'agressivité (figure I.32).

Le contact d'un acide pur ou d'une eau acide avec un composite cimentaire favorise la dissolution et la neutralisation de la pâte de ciment. Le processus d'érosion chimique (c'est-à-dire la dégradation de la matrice cimentaire) se produit selon la combinaison des trois mécanismes suivants : [Beddoe, 2005, 2016, Kaid et al., 2010, Foenig et al., 2016].

- 1) L'entrave de l'acide dans la solution de pores en raison du contact entre deux environnements très différenciés. L'entrée de l'acide ($H(x)$) et des ions H^+ (c'est-à-dire en raison de la dissociation de la molécule acide et de l'hydratation de son aqueux stable pour former H_3O^+ comme indiqué dans les équations I.8 et I.9) est régi par l'équilibre des espèces (c'est-à-dire la diffusion) et de l'électro-neutralité dans la structure des pores du ciment, comme le montre la figure I.31, entraînant une diminution progressive du pH dans la solution interstitielle [Beddoe, 2005, Beddoe, 2016].



- 2) La lixiviation du calcium dissous, de l'hydroxyle, de l'alcali et d'autres ions présents dans la solution de pores, en raison du gradient de concentration des espèces ioniques. L'OH libre et l'alcali (c'est-à-dire $(a)^+$) sont progressivement consommés en neutralisant les ions H^+ (c'est-à-dire stables en solution comme H_3O^+) et les radicaux acides (c'est-à-dire (x)) qui diffusent dans la solution de pores, produisant ainsi des molécules d'eau et sels comme indiqué dans les équations I.10, I.11 et I.12, réduisant donc le pH de la solution de pores aux couches les plus externes en dessous de la neutralité et progressant plus profondément dans la microstructure. Dans le cas du ciment Portland, la lixiviation du calcium aux couches les plus externes favorise la formation de sels lorsqu'il réagit avec les molécules acides, formant par ex. $CaCO_3$ (H_2CO_3), $CaSO_4$ (H_2SO_4) ou $CaCl_2$ (HCl). [Glasser et al., 2008].



3) La dissolution des produits d'hydratation qui est principalement gouvernée par trois facteurs :

- La réduction du pH dans la solution des pores est entraînée par certains produits d'hydratation ainsi que par la dissolution de la Portlandite (CH) et la décalcification du C-S-H (figure I.32).
- La concentration décroissante des ions calcium (Ca^{+2}) dans la solution des pores due à la lixiviation favorise également la dissolution du CH par rapport au C-S-H et au CC, qui commencera à se dissoudre au fur et à mesure que le tampon de la CH diminue ;
- La réaction de l'alcali dissous (par exemple CaOH, NaOH) avec l'acide, consomme des molécules d'hydrogène pour former l'eau et les sels (par exemple CaSO_4 , Na_2SO_4), les molécules alcalines et acides sont reconstituées par les mécanismes mentionnés précédemment.

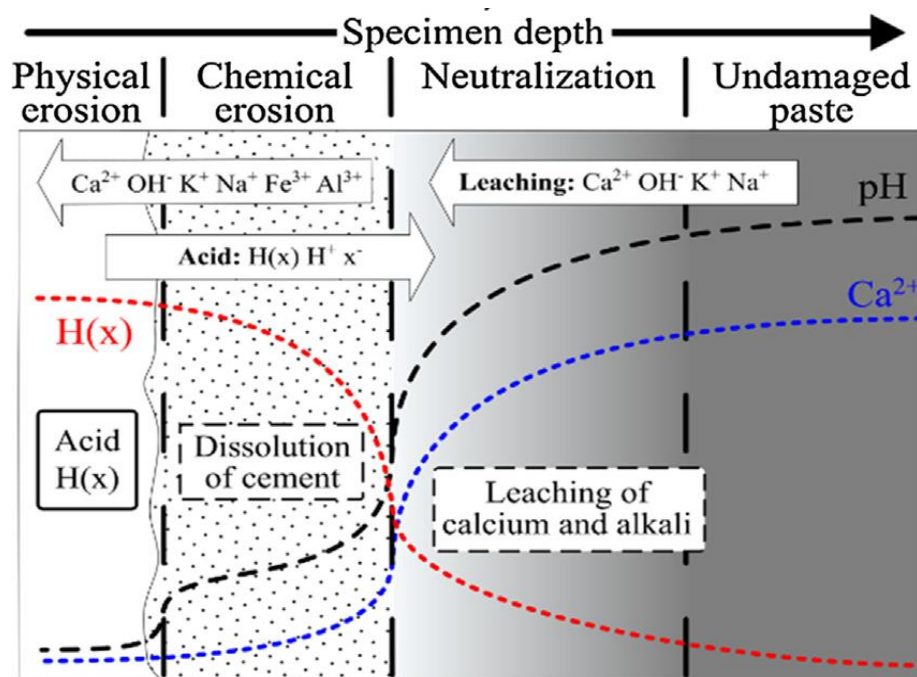


Figure I.32. Dissolution et neutralisation de la pâte de ciment. a) Mécanismes de dissolution pour un acide H(x) [Beddoe, 2005, Beddoe, 2016]

La réaction des acides avec les corps composés à base de calcium entraîne finalement une dissolution de la structure du ciment durci. Selon la littérature, la vitesse de l'attaque est influencée par différents facteurs [Belas et al, 2003]:

- Facteurs liés à la solution acide : concentration, pH, mobilité, type de l'acide et solubilité du sel de calcium de l'acide
- Facteurs liés au matériau à base de ciment (composition, rapport E/C, teneur en ciment, type de ciment, alcalinité du matériau cimentaire, ...), perméabilité du béton qui est aussi fonction de la géométrie des pores et de leur distribution, ...
- D'autres facteurs comme la température, les conditions d'attaque, le mécanisme d'attaque (qui est intensifié lorsque le béton est soumis à des cycles d'immersion et de séchage).

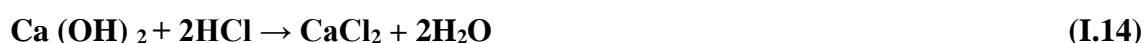
I.4.2.3. Acides inorganiques

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 matériau cimentaire tel que le gonflement (dû aux sulfates).



L'acide sulfurique réagit donc avec la chaux libre dans le béton pour former du gypse. Cette réaction est associée à une augmentation du volume du béton. Une deuxième réaction bien plus nuisible se produit entre l'aluminate de calcium et les cristaux formés de gypse pour former l'ettringite ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) qui est moins soluble dans l'eau [Benosman et al., 2011] et [Senhadji et al., 2019].

L'acide chlorhydrique fait partie des substances très agressives car le sel correspondant (chlorure de calcium) est très facilement soluble dans l'eau. L'équation I.14 décrit la réaction entre l'acide chlorhydrique et la portlandite [Omrane et al., 2015] [Kumar, 2021].



Un acide devient plus nuisible dès que les sels de calcium formés sont plus facilement solubles. 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 calcaïques, aluminiques ou ferriques, ainsi que des acides siliciques colloïdaux (gels de silice).

I.4.2.3. Acides organiques

Les acides organiques attaquent également les matériaux cimentaires, en transformant le Ca(OH)_2 en sels qui peuvent être facilement ou difficilement solubles.

L'acide acétique est un acide organique qui forme avec l'hydroxyde de calcium de l'acétate de calcium très difficilement soluble dans l'eau [Benosman et al., 2011] et [Witkowska-Dobrev et al., 2021].



Hydroxyde de calcium + acide acétique \rightarrow acétate de calcium + eau

I.4.3. Dépassivation et corrosion des barres ou des fibres métalliques

L'inspection des matériaux cimentaires constitués d'une barre d'acier dans divers environnements propices à la corrosion montre que ces matériaux présentent un bon risque pour le déclenchement de la rouille au niveau des surfaces des barres. Toutefois, la discontinuité du renforcement empêche la propagation de la corrosion. Si la rouille éventuelle est gênante, la surface du béton peut être imprégnée d'un matériau plastique ou recouvert d'une couche de protection appropriée (béton projeté par exemple) [Djebali, 2013]. Il est à noter que peu d'études ont été réalisées sur le phénomène de la corrosion de la fibre métallique [Marcos-Meson et al., 2019].

La perte d'alcalinité et de basicité dans la solution interstitielle à cause de la diffusion des alcanes (K^+ , Na^+) et du Ca^{+2} vers la surface (c'est-à-dire le front de neutralisation à l'intérieur du béton, le pH de la solution de pores diminue progressivement en raison de la diffusion d' OH^- et de H^+ vers la matrice non affectée) conduit à la dépassivation des barres d'acier (figure I.33). Ce processus peut conduire à une corrosion uniforme, similaire à la corrosion induite par la carbonatation pour le béton non fissuré [Idriss et al., 2001 et Gerengi et al., 2013] ; ou à la formation de macro-cellules de corrosion localisées en présence de fissures atteignant la barre d'acier, comme observé pour la corrosion induite par la carbonatation dans le béton fissuré [Miyazato et al., 2010], [Ji et al., 2001], [Brixi et al., 2020], [Harouat et al., 2023].

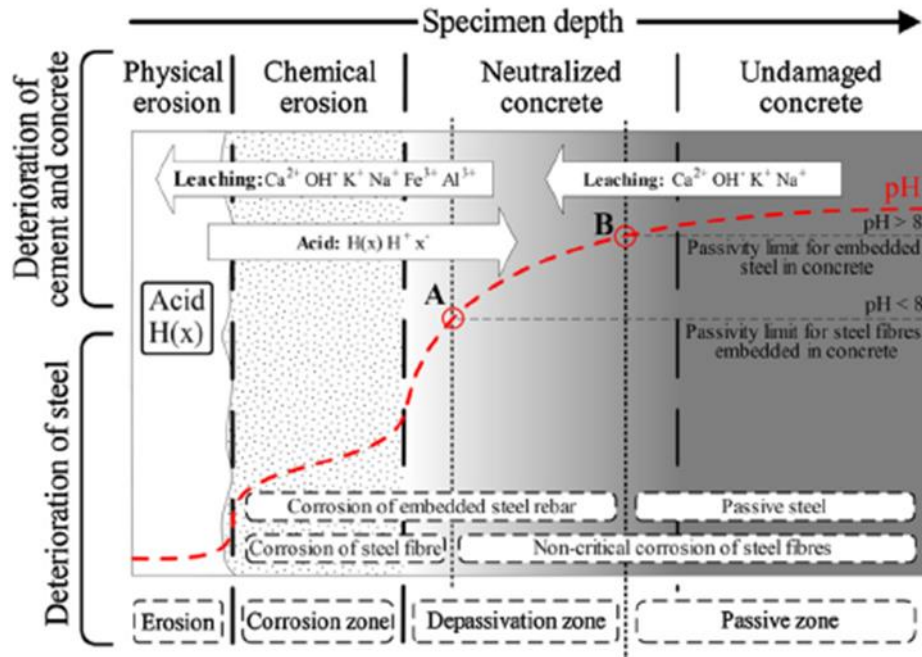


Figure I.33. Corrosion de l'acier en milieu acide. Détérioration du béton renforcé de fibres d'acier exposées aux attaques acides [Marcos-Meson et al., 2019]

Dans le cas des barres d'acier, la pression générée en raison de l'expansion des produits de corrosion entraîne la fissuration de la matrice et la propagation supplémentaire du processus de corrosion et de l'attaque acide. Pour cette raison, comme présenté sur la figure 1.32, la profondeur critique de corrosion pour l'acier de renforcement serait plus proche de la limite de dépassement (point B de la figure I.33), autrement dit plus proche du bord du béton non endommagé. Cependant, des recherches traitant ces phénomènes et l'épaisseur de la couche de béton neutralisée varie en fonction du type et de la qualité du béton et de l'agressivité de l'exposition: une zone de neutralisation très mince (1 à 5 mm) pour des expositions agressives (par exemple attaque acide sulfurique) et des qualités de béton élevées [Jahani et al., 2001]; ou une zone de neutralisation plus épaisse pour les qualités des bétons et les acides plus faibles (exemple acide carbonique ou acide acétique) [Chen et al., 2012 et kim et al., 2015].

Les fibres métalliques se sont avérées stables lorsqu'elles sont incorporées dans du béton non fissuré à des valeurs de pH dans la solution interstitielle de la matrice cimentaire en dessous de la région de stabilité pour le fer (c'est-à-dire $\text{pH} < 8$), comme observé dans les bétons fibrés carbonaté [Marcos-Meson et al., 2019].

Des recherches suggèrent que les petites dimensions des fibres empêchent la fissuration induite par la corrosion, qui est responsable de la plus grande part de la détérioration due à la corrosion uniforme des fibres métalliques [Ferrara et al., 2004 et Cangiano et al., 2005]. Lorsque

le front d'érosion chimique atteint la fibre métallique, la porosité au niveau de la pâte de ciment augmente significativement et le pH baisse encore ($\text{pH} < 4-6$), initiant la dissolution de la Zone de Transition Interfaciale (ITZ) et favorisant finalement la propagation de la corrosion de la fibre métallique.

Il existe des connaissances scientifiques sur une détérioration plus importante des propriétés mécaniques résiduelles (c'est-à-dire la résistance à la traction résiduelle) des bétons fibrés fissurés exposés à des acides par rapport à d'autres expositions agressives, telles que l'exposition au chlorure ou à la carbonatation [Kaufmann, 2014 et Kim et al., 2015]. Or, selon les auteurs, cette perte des performances mécaniques résiduelles ne peut être uniquement liée à la corrosion des fibres ; étant donné que la lixiviation et la dissolution supplémentaires des phases solides à l'interface fibre-matrice peuvent avoir un impact significatif sur la liaison fibre-matrice, ce qui correspond à l'analyse précédente [Camps et al., 2009 et Oh et al., 2011].

I.5. Conclusion

Dans ce chapitre, une synthèse bibliographique sur l'état des connaissances concernant les fibres et les matériaux cimentaires fibrés a été exposée.

Plusieurs études ont montré que les fibres métalliques restent parmi les plus utilisées dans les bétons. De plus, plusieurs études recommandent un taux variant entre 1 et 1,5%. Ce taux permet de retarder la propagation des fissures et d'améliorer considérablement les performances mécaniques et certains indicateurs de durabilité. Cependant, un taux plus élevé, de l'ordre de 2%, pourrait avoir un effet négatif sur les résistances à cause d'une forte anisotropie.

Par ailleurs, les matériaux cimentaires, exposés aux attaques chimiques, subissent des transformations microstructurales. Dans ce chapitre, les différentes attaques chimiques qui peuvent altérer les matériaux cimentaires sont commentées. Ces attaques chimiques conduisent à dissolution de la portlandite et à la décalcification des C-S-H. Ce phénomène de transport de la matière entraîne une augmentation de la porosité et de la perméabilité engendrant ainsi une perte des performances mécaniques.

De plus, l'incorporation des fibres métalliques dans les bétons peut rendre le problème de durabilité vis-à-vis des attaques acides et du phénomène lixiviation plus complexe car les fibres sont sujettes au phénomène de corrosion et de dégradation. Malheureusement, la recherche bibliographique a montré que très peu d'études se sont penchées sur les attaques acides des bétons fibrés et pratiquement aucune étude n'a traité le phénomène de la lixiviation des bétons fibrés ou des mortiers fibrés.

Le chapitre suivant sera réservé à la présentation des matériaux utilisés et des formulations testées. Les méthodes d'essais utilisés dans notre programme expérimental seront aussi exposées dans cette partie.

Chapitre II

Matériels et Méthodes

II.1 Introduction

La première partie de ce chapitre a pour objectif de regrouper tous les résultats de caractérisation relatifs aux matériaux utilisés pour la formulation des bétons et des MBE étudiés. Les formulations des mélanges cimentaires étudiés sont ensuite dévoilées.

De plus, la démarche utilisée pour la formulation des MBE est aussi exposée dans ce chapitre.

Dans la deuxième partie, tous les protocoles d'essais utilisés dans notre campagne expérimentale sont présentés.

II.2 Caractérisation des matériaux utilisés

Dans notre étude, nous avons travaillé avec des matériaux locaux couramment utilisés dans le marché algérien pour la formulation des bétons en général et des bétons fibrés en particulier (ciment CEM II, granulats et fibres métalliques).

II.2.1. Ciment

Le ciment CEM II/A-P 42.5 N est utilisé dans cette recherche. Il est caractérisé par une finesse de $3085.6 \text{ cm}^3/\text{g}$ et une densité de 3.08 selon les protocoles d'essais des normes NF- EN 196-6 (2010) et NF- EN 15-435 (2021). L'analyse granulométrique du ciment est représentée sur la figure II.1. Les compositions chimiques et minéralogiques du ciment sont définies respectivement dans les tableaux II.1, II.2 et II.3.

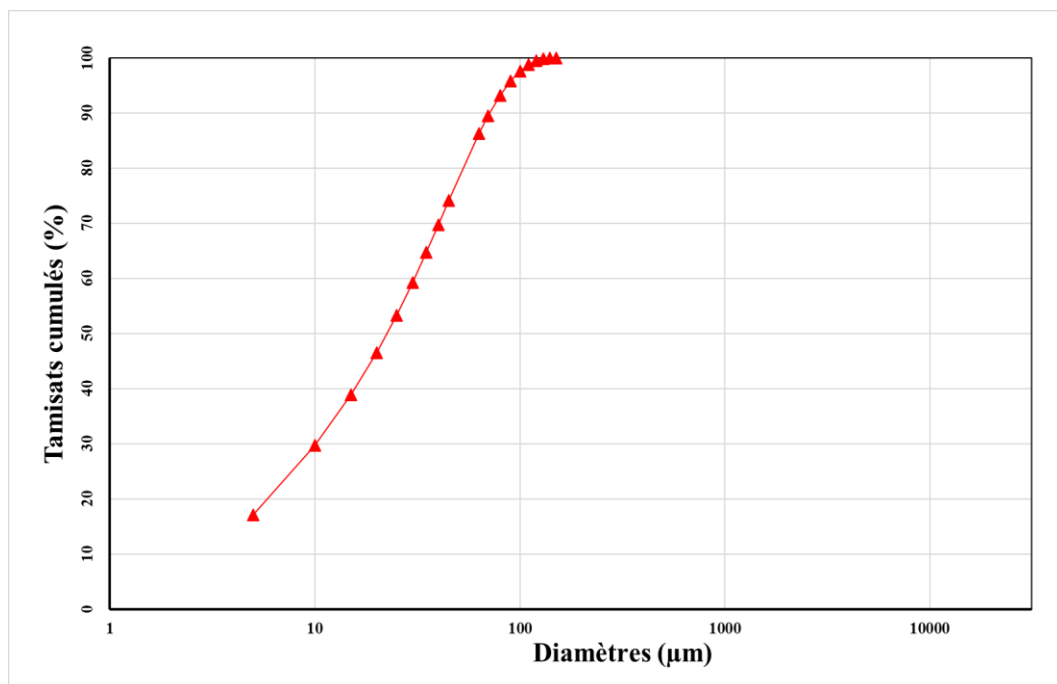


Figure II.1. Distribution granulométrique du ciment utilisé

Tableau II.1. Composition chimique du ciment

Compositions	SiO ₂	Al ₂ O ₃	F ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	P ₂ O ₅	TiO ₂	Lol	PF%
Pourcentage	19.24	5.11	4.76	55.99	1.51	0.42	0.59	2.05	0.16	0.41	2.06	4.42

Tableau II.2. Composition minéralogique du ciment

C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
41.20	31.25	10.72	14.48

Tableau II.3. Caractéristiques physiques du ciment utilisé

ρ_{App} (kg/m ³)	ρ_{Abs} (kg/m ³)
1030	3080

La caractérisation morphologique du clinker, illustrée sur la figure II.2, a montré que la bélite (C₂S) est présente généralement sous forme de cristaux arrondis alors que les cristaux d'alite (C₃S) sont plutôt de forme prismatiques ou pseudo-hexagonaux tout en ayant souvent des visages bien définis. La phase interstitielle est principalement composée de ferrite C₄AF et d'aluminate C₃A. De plus, l'analyse par diffraction X représentée sur la même figure a bien montré que l'ensemble de ces phases sont cristallisées.

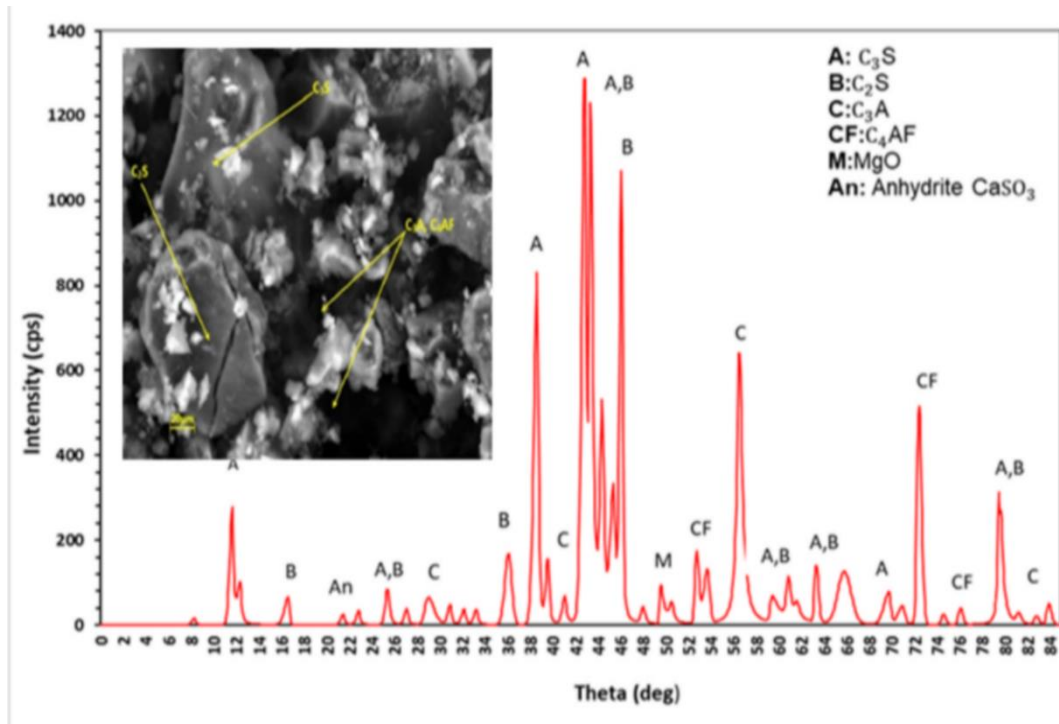


Figure II.2. DRX du ciment utilisé

II.2.2. Granulats

Les granulats utilisés proviennent d'une grande carrière de la région de Tlemcen, située à Sidi Abdelli. Il s'agit de l'Entreprise Nationale des Granulats (ENG). Quatre granulats concassés sont utilisés pour la préparation du mélange : du sable 0-4 mm et des graviers 4 -8 mm (G4/8), 8-16 mm (G8/16) et 16-25 mm (G16/25).

Le sable présente un taux de 11.51% de particules fines dont le diamètre est inférieur à 80 μ m et un module de finesse de 2.63 définis selon la norme Afnor P 18- 541. Les masses volumiques apparentes et absolues des graviers ont été déterminées conformément BS EN 1097-3, 1998 et BS EN 1097-6, 2013. Le tableau II.4 regroupe les caractéristiques des quatre classes granulaires concassées utilisées tandis que leurs analyses granulométriques sont illustrées sur la figure II.3 et réalisées conformément à la norme EN 933-2.

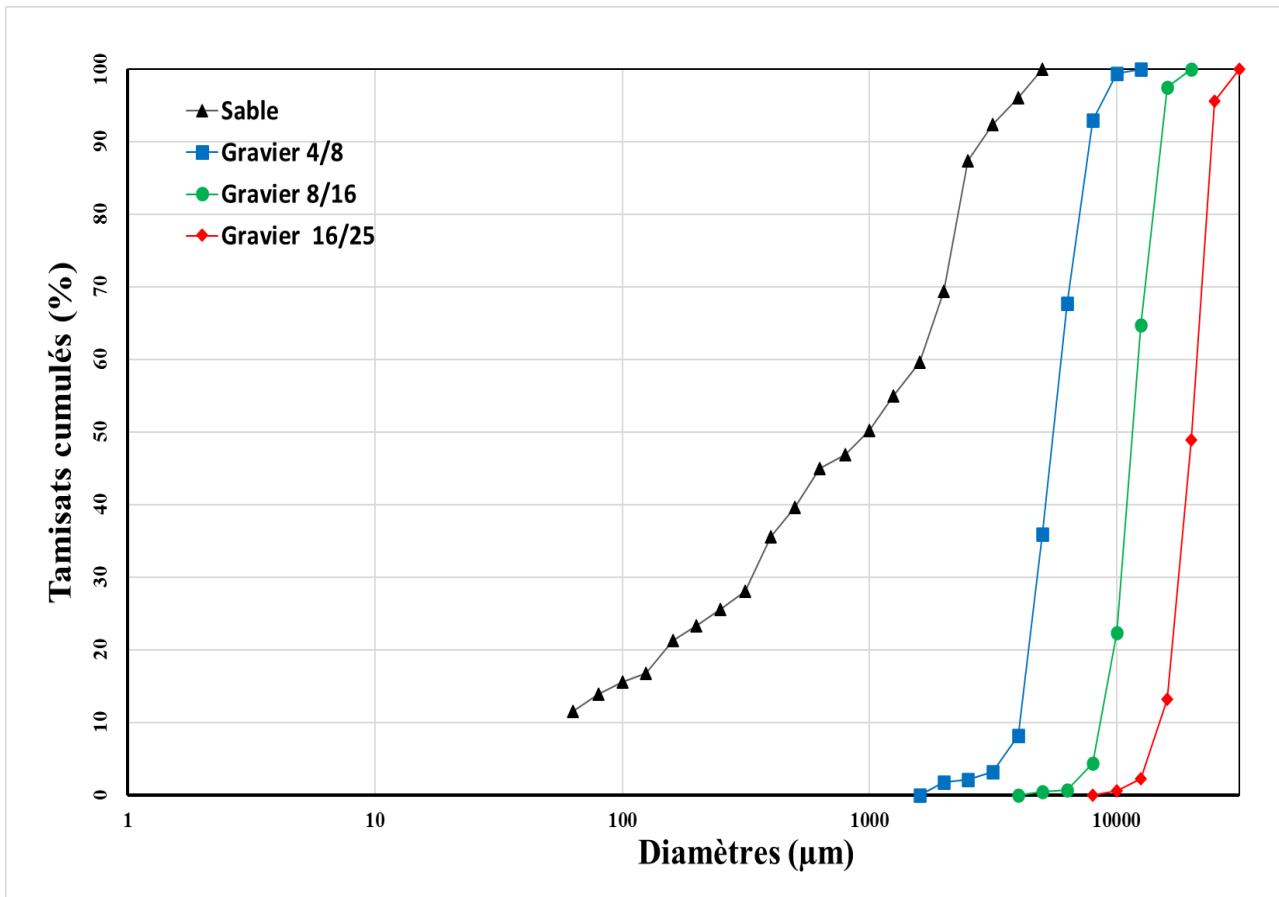


Figure II.3. Analyse granulométrique des différents granulates

Tableau II.4. Propriétés physiques des granulates minéraux

Caractéristiques Physiques	Masse Volumique Apparente (kg/m ³)	Masse Volumique Absolue (kg/m ³)	Coefficient d'absorption %
Sable	1500.00	2650.92	1.69
Gravier 4/8	1355.13	2600.06	1.40
Gravier 8/16	1395.07	2501.23	1.10
Gravier 16/26	1313.93	2500.00	0.80

II.2.3. Eau

L'eau de gâchage est potable et présente une composition chimique conforme aux recommandations de la norme NF EN 1008, 2003 (tableau II.5).

Tableau II.5. Composition chimique de l'eau de gâchage (mg/l).



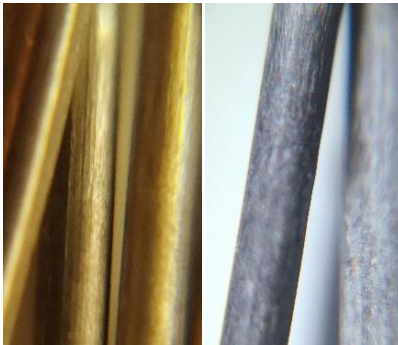
Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₂ ⁻	pH (-)
110,62	42,28	-	-	99,40	473,51	312,74	8.00

II.2.4. Fibres

Pour cette étude, nous avons choisi d'utiliser des fibres métalliques à cause de leur géométrie d'un côté et parce qu'elles peuvent avoir une influence sur les bétons lorsqu'ils sont exposés à des milieux agressifs. De plus, les fibres métalliques agissent dès l'apparition des plus faibles ouvertures de fissures en attribuant au matériau des résistances à la traction et à la flexion améliorées. Ces fibres se présentent sous forme de bâtonnets métalliques avec des crochets aux extrémités qui facilitent l'adhérence à la matrice cimentaire.

Les propriétés des fibres métalliques utilisées sont regroupées dans le tableau II.6

Tableau II.6. Caractéristiques des fibres métalliques.

MATIÈRE PREMIÈRE	GÉOMÉTRIE MACROSCOPIQUE	GÉOMÉTRIE MICROSCOPIQUE
<p>Allongement à la rupture <4%</p>  <p>Résistance à la traction =1100-2700 MPa</p>	 <p>L=50 mm+10, T=1mm ±10%</p>	 <p>D=300 µm</p>

II.3. Formulation des bétons

Les bétons sont dosés à 350 Kg de ciment par mètre cube avec un rapport E/C = 0,5. Le squelette granulaire a été optimisé. Une compacité optimale a été trouvée pour un rapport Gravier/Sable égale à 1,6. La composition du béton de référence a été déterminée par la méthode de Dreux-Gorisse, puis optimisée en utilisant la méthode de Baron-Lesage [Boukli, 2010]

Concernant le taux des fibres, un pourcentage de 1% par rapport au volume total du mélange a été choisi sur la base des résultats de la littérature [Bentalha et al., 2007] [Belferrag et al., 2007], [Wang et al., 2013], [Ragi, 2015] et [Dsouza, 2018] et aussi grâce à des essais préliminaires englobant des tests de maniabilité et de résistance mécanique.

Pour la formulation de nos bétons, nous avons préféré ne pas utiliser d'adjuvant afin d'éviter tout risque d'interaction chimique.

Les formulations des bétons fibrés et non fibrés étudiés sont consignées dans le tableau II.7.

Tableau II.7. Compositions des bétons

Mélanges	Ciment (Kg /m ³)	Fibres métalliques (Kg /m ³)	Sable 0/4 (Kg /m ³)	Gravier 4/8 (Kg /m ³)	Gravier 8/16 (Kg /m ³)	Gravier 16/25 (Kg /m ³)	Eau (L)
B.O	350	-	620	144	432	533	175
B.FM	350	78.5	620	144	432	533	175

II.3.1 Confection des éprouvettes de béton

Le malaxage du béton a été réalisé avec un malaxeur à tête verticale de capacité 30 litres. Le processus de confection répond à une procédure normalisée. Deux types de moules sont utilisés : cylindriques de dimension (110×220) mm selon la norme NF P 18-400 et prismatiques (100×100×400) mm selon la norme NF EN 12390-1. Le remplissage des éprouvettes a été fait par vibration à l'aide d'une table vibrante car les bétons présentaient des affaissements de l'ordre de 8 cm.

Pour le malaxage, les constituants (gravier, sable, ciment) ont été mélangés dans un premier temps à sec pendant une minute. Par la suite le tier de l'eau a été introduit dans le malaxeur durant 30 secondes pour mouiller les granulats. L'opération de malaxage a encore continué pendant 4 minutes supplémentaires après avoir introduit l'eau restante ainsi que les fibres métalliques.

La figure II.4 montre les photos de malaxage et de remplissage des éprouvettes.



Figure II.4. Malaxage et Coulage des éprouvettes en béton

II.4. Mortier des bétons équivalents

La formulation d'un mortier de béton équivalent (MBE) peut être calculée à partir d'une composition de béton. Le MBE présente des propriétés rhéologiques corrélables à celles du béton associé [Belaidi et al., 2021] [Assaad et Khayat, 2004], [Assaad et Yehia, 2016].

La formulation du MBE se base sur la substitution des graviers du béton par du sable souvent lavé et dont la surface développée par ses grains est égale à celle des graviers ôtés [Schwartzentruber et Catherine, 2000] (figure I.5).

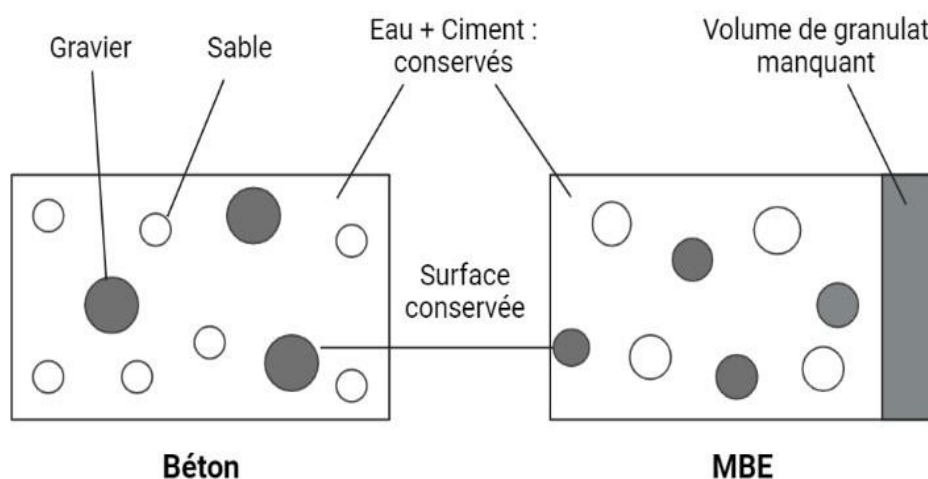


Figure I.5. Comparaison entre le MBE et le béton associé

II.4.1. Formulation des mortiers de béton équivalent (MBE)

La composition du MBE est déterminée sur la base des formulations des bétons. Les gravillons G4/8, G8/16 et G16/25 de chaque mélange ont été remplacés par du sable lavé ayant la même surface développée. Le calcul des surfaces développées des granulats passe par les étapes suivantes :

1. Définition des tranches granulaires
2. Calcul de la masse de chaque tranche granulaire (Refus)
3. Calcul du diamètre de la particule moyenne pour chaque tranche

$$d_i = \frac{(T_{Mi} - T_{mi})}{2} \quad (\text{II.1})$$

4. Calcul du volume de la particule moyenne pour chaque tranche

$$v_i = \frac{(\pi \times d_i^3)}{6} \quad (\text{II.2})$$

5. Calcul de la surface développée de la particule moyenne pour chaque tranche

$$S_i = \pi \times d_i^2 \quad (\text{II.3})$$

6. Calcul du volume massique de la matrice

$$\omega = \frac{1}{\text{masse volumique réelle}} \quad (\text{II.4})$$

7. Calcul du volume total de l'ensemble des particules pour chaque tranche granulaire

$$V_i = \frac{\omega}{\text{masse volumique réelle}} \quad (\text{II.5})$$

8. Calcul du nombre de particules moyennes pour chaque tranche granulaire

$$N_i = \frac{V_i}{v_i} \quad (\text{II.6})$$

9. Calcul de la surface développée par les particules moyennes pour chaque tranche granulaire

$$S_i = \frac{N_i}{s_i} \quad (\text{II.7})$$

10. Calcul de la somme de l'ensemble des surfaces calculées pour chaque tranche granulaire du mélange de gravillon

$$SD = \sum S_i \quad (\text{II.8})$$

Les détails de calcul du MBE sont présentés en "Annexe A." Le choix de remplacer les gravillons par le sable lavé est dicté par le fait d'éviter tout artefact dû aux fines présentes dans le sable. Les formulations des MBE sont mentionnées dans le tableau II.8

Tableau II.8. Compositions des MEB

Mélanges	Ciment (Kg /m ³)	Fibres métalliques (Kg /m ³)	Sable 0/4 (Kg /m ³)	Sable lavé (Kg /m ³)	Eau (L)
M.R	622	-	1269	50.72	311
M.FM	622	72.58	1269	50.72	311

II.4.2. Confection des éprouvettes de MBE

Le malaxage des mortiers a été réalisé à l'aide d'un malaxeur à mortier d'une capacité de 5 litres. Toutefois, il fallait s'assurer de la bonne dispersion des fibres et de l'homogénéité des mélanges. Des moules 40×40×160 mm sont utilisés pour la préparation des éprouvettes.

II.5. Ouvrabilité des bétons et des MBE

L'ouvrabilité des bétons a été évaluée grâce à l'essai d'affaissement au cône d'Abrams alors qu'un mini-cône a été utilisé pour déterminer la maniabilité des MBE (Figure II.6)

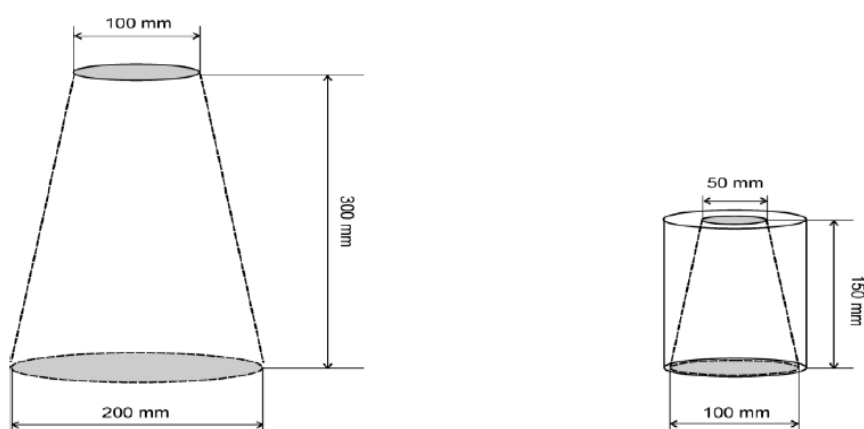


Figure II.6. Cône d'Abrams et le mini-cône [Schwartzentruber et Catherine, 2000]

II.6. Conservation des éprouvettes

Les éprouvettes ont été conservées dans l'eau saturée en chaux à une température ambiante de 20°C pendant 28 jours (Figure II.7).



Figure II.7. Conservation des éprouvettes dans l'eau saturée par la chaux

II.7. Procédures d'essai dans les milieux agressifs

II.7.1. Attaques acides

La durabilité des échantillons a été étudiée sur une durée de 135 jours de conservation dans trois solutions acides : l'acide chlorhydrique, l'acide sulfurique et l'acide acétique avec une concentration de 5%. La correction par la solution mère s'effectuait à chaque fois que la valeur du pH de la solution s'approchait de 6. Trois échantillons sont utilisés pour chaque formulation (figure II.8).

En total, 330 éprouvettes de bétons et 264 éprouvettes de mortier de bétons équivalents (MBE) ont été étudiés.

La durabilité des échantillons noyés dans les solutions acides a été évaluée visuellement et à travers plusieurs essais.

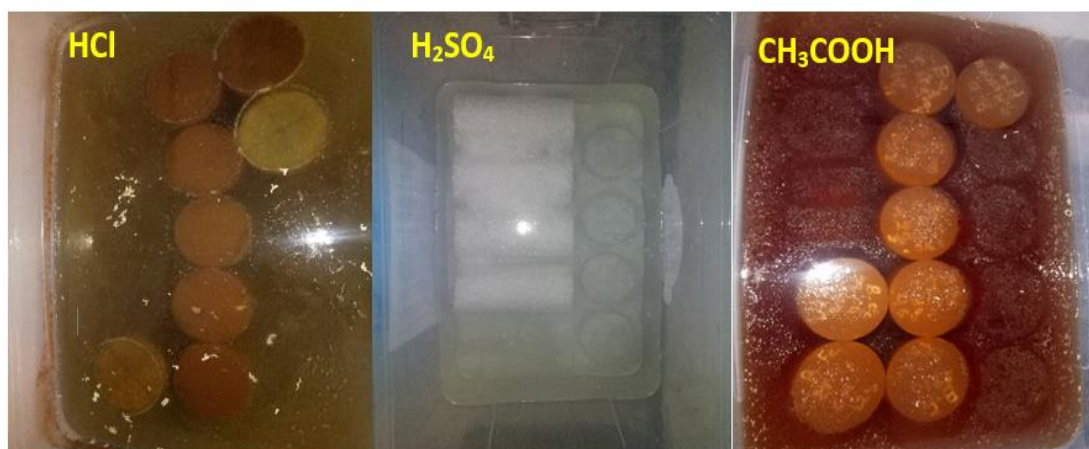


Figure II.8. Conservation des éprouvettes dans les solutions agressives

i. Perte de masse

Pour évaluer le degré de l'attaque, un suivi de la perte de masse a été réalisé d'une façon hebdomadaire pendant 135 jours selon ASTM C 267-20 sur les éprouvettes cylindriques (110×220) mm et prismatiques (40×40×160) mm immergés dans les trois solutions agressives citées ci-dessus.

Les éprouvettes sont nettoyées 3 fois avec de l'eau douce pour éliminer la partie altérée du béton, puis elles sont laissées à l'air libre pendant 30 mn avant de procéder à leurs pesées.

$$PM = \left(\frac{M_t - M_i}{M_i} \right) \times 100 \quad (\text{II.9})$$

Où

PM : perte de masse (g) ;

M_t : masse (g) à l'instant « t » après exposition au milieu agressif ;

M_i : masse (g) initiale après 28 jours de cure et avant exposition aux milieux agressifs ;

ii. Epaisseur de dégradation chimique

Les indicateurs colorés permettent de distinguer entre les environnements acides et basiques. Cela nous permet de caractériser l'état de dégradation chimique de l'éprouvette. Deux types d'indicateurs colorés courants peuvent être utilisés : la phénolphtaléine et la thymol-phtaléine. La phénolphtaléine prend un teint rose si le pH dans la solution interstitielle est supérieur à 9 et reste incolore dans le cas contraire (figure II.9).

Dans notre étude, un test a été effectué sur les échantillons à différentes échéances en utilisant la phénolphtaléine.

Le Bellégo (2001) a effectué des tests sur plusieurs éprouvettes à différents stades de dégradation en utilisant deux méthodes de caractérisation : les indicateurs colorés et la microsonde électronique. A travers les résultats trouvés, l'auteur a pu mettre en place une relation corrélative (II.10) permettant de déduire l'épaisseur dégradée chimique réelle e_t à partir de celle mesurée avec la phénolphtaléine e_{ph} .

$$e_t = 1.17 \times e_{ph} \quad (\text{II.10})$$

Pour chaque mesure, trois (03) disques de 50 mm de hauteur ont servi pour la détermination l'épaisseur de dégradation chimique.

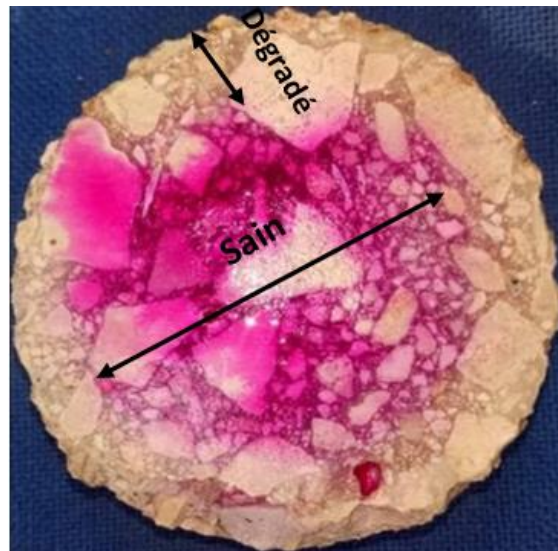


Figure II.9. Profil d'une éprouvette immergée dans une solution agressive pendant 135 jours

II.7.2. Lixiviation

Après une maturation de 28 jours des échantillons dans l'eau saturée en chaux et à température ambiante, ils sont ensuite immergés dans un bac contenant une solution de nitrate d'ammonium (NH_4NO_3) de concentration égale à 6 mol / litre pendant 64 semaines (Figure II.10). Cette démarche a été choisie sur la base des protocoles d'essais des travaux antérieurs [Nguyen, 2005], [De Larrard, 2010]. La solution est renouvelée lorsque le pH devient supérieur à 9,25



Figure II.10 Essai de dégradation accélérée au nitrate d'ammonium

Le volume de la solution agressive est calculé en fonction de la teneur en ciment dans le matériau, de la teneur en calcium dans le ciment et de la quantité du volume à dégrader V_d [Le Bellégo, 2001]

$$V_s = 0,048 \cdot C \cdot \gamma \cdot V_d \quad (\text{II.11})$$

Où

V_s : Le volume de la solution agressive

C : la teneur en ciment dans le mélange (Kg/m^3),

γ : teneur en % de CaO dans le ciment

V_d : le volume de matériau à dégradé (m^3).

En total la durabilité de 132 éprouvettes de bétons et 94 éprouvettes de mortier de bétons équivalents (MBE) ont été étudiés au phénomène de lixiviation .

Un suivi du pH et de la température des solutions se faisait régulièrement (figure II.11.)

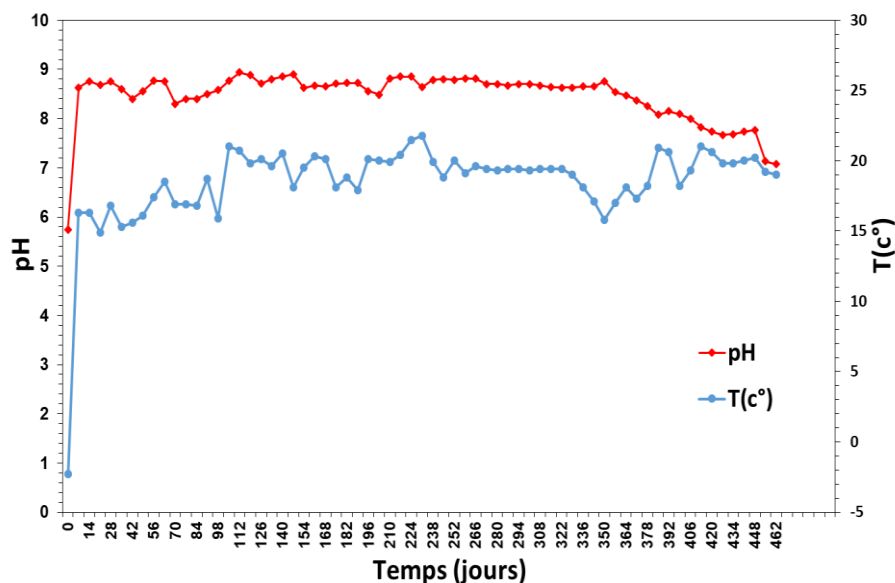


Figure II.11. Evolution du pH et de la température en fonction du temps

i. Titration des ions de calcium

Le prélèvement des échantillons pour la détermination des ions calciums se faisait tous les jours pendant les quatre premiers mois, ensuite hebdomadairement pendant les 12 mois restants.

L'indicateur Murexide a été utilisé pour la détermination des ions Calcium Ca^{2+} . Dans un

premier temps le Murexide donnait une couleur rouge-violette aux solutions. Une fois le pH régulé avec la solution tampon (NaOH), on procédait à la titration en utilisant l'éthylènediaminetetraacetic (EDTA) jusqu'au virement de la couleur vers un bleu qui révélait la formation du complexe Ca-EDTA (figure II.12).

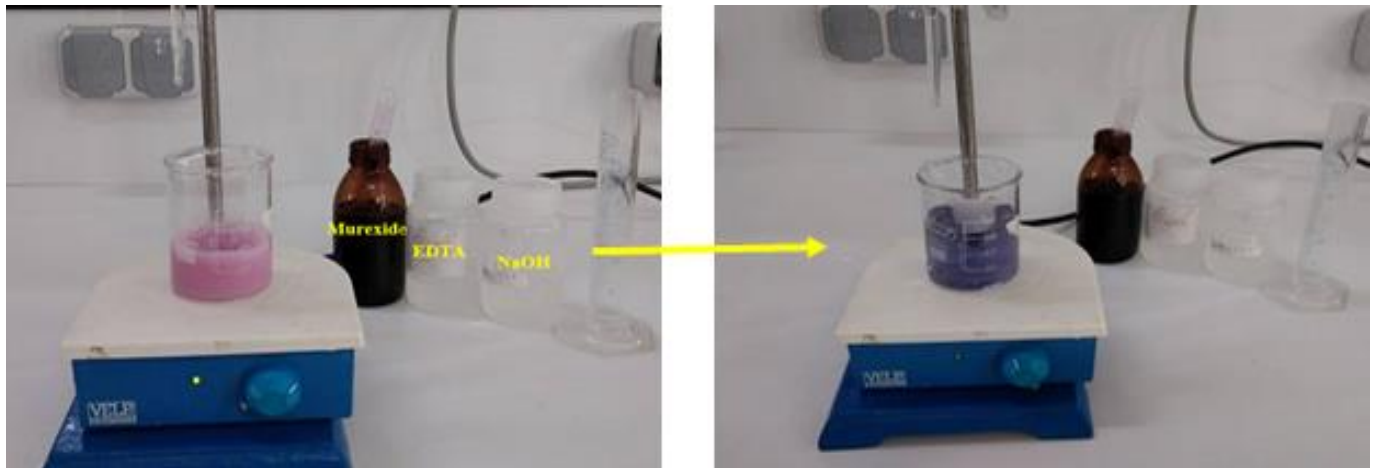


Figure II.12. Titration des solutions

ii. Conductivité électrique

La conductivité électrique est directement proportionnelle à la quantité de solides (les sels minéraux) dissous dans la solution. Les ions de calcium (Ca^{2+}) sont porteurs de charges électriques et autorisent ainsi le passage du courant dans la solution. De ce fait, une solution plus minéralisée implique qu'il y a plus d'ions Ca^{2+} , donc la concentration en minéraux dissous sera plus importante et la conductivité électrique sera plus élevée. Un conductimètre a été utilisé pour la mesure de conductivité électrique (Figure II.13).

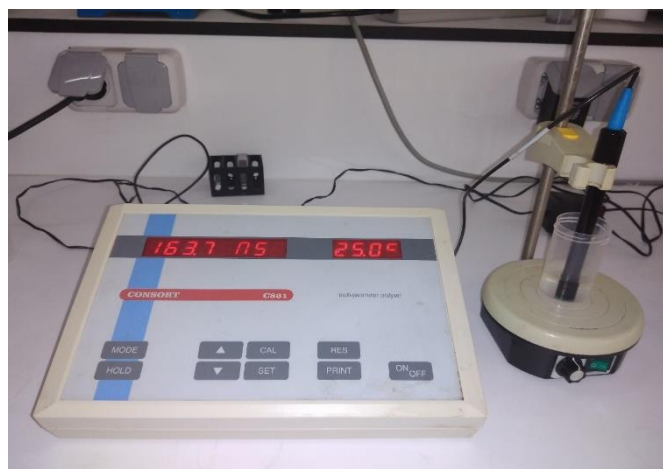


Figure II.13. Conductimètre

II.7.3. Essais mécaniques

Les essais de compression sur des bétons sains et dégradés ont été réalisés selon la norme ASTM C39 à différents âges sur des éprouvettes cylindriques (110×220) mm. En parallèle, des essais de flexion ont été réalisés selon la norme BS EN 12390-5 sur des éprouvettes prismatiques de dimension (100×100×400) mm et (40×40×160) mm (figure II.14).

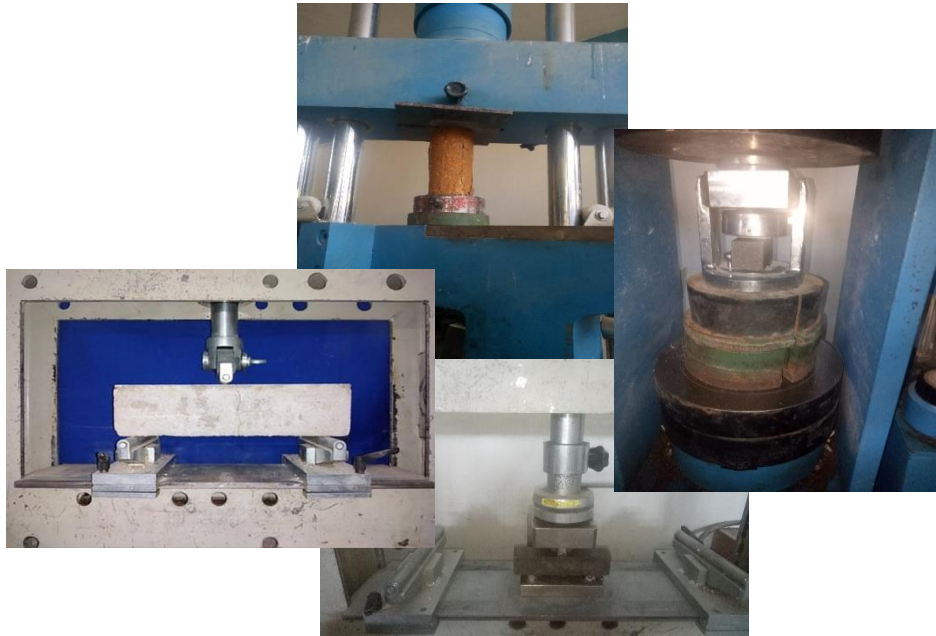


Figure II.14. Essais de performance mécanique

II.7.4. Vitesse d'impulsion ultrasonique et module dynamique

L'essai à l'ultrason a été utilisé pour vérifier l'homogénéité du béton et sa durabilité en identifiant les défauts ou les vides. La vitesse de propagation ultrasonique a été déterminée en utilisant le dispositif Pundit Lab sur des éprouvettes (110×220) mm selon la norme ASTM C597 2016 (Figure II.15)

Le module d'élasticité dynamique (E_d) a été déduit des résultats de l'UPV selon la norme ASTM C 215-02 2003

$$E_d = \frac{v^2 \rho (1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \quad (\text{II.12})$$

ρ : masse volumique du béton [Kg/m^3]

ν : coefficient de Poisson du béton

V : vitesse du son [km/s]

E_d : module d'élasticité dynamique, exprimé en MPa



Figure II.15. Test de la vitesse d'impulsion ultrasonique des échantillons

II.7.5. Porosité accessible à l'eau

Les porosités des mélanges ont été déterminées sur des disques cylindres (110×50) mm en suivant le protocole d'essai de l'AFPC (AFREM 1997). Les échantillons ont été d'abord étuvés à une température de 60°C jusqu'à la stabilisation de la masse (M_{sec}) pour être ensuite placés dans un dessiccateur où on procède à un dégazage à l'aide d'une pompe à vide. Des pesées à l'air (M_{air}) et des pesées hydrostatiques (M_{eau}) sont ensuite effectuées (figure II.16).

$$P = \left(\frac{M_{\text{air}} - M_{\text{sec}}}{M_{\text{air}} - M_{\text{eau}}} \right) \times 100 \quad (\text{II.13})$$



Figure II.16. Dispositif pour la mesure de la porosité accessible à l'eau

II.7.6. Etude morphologique

La morphologie des bétons sains et dégradés ainsi que la surface des fibres métalliques ont été étudiées à l'aide d'un microscope à balayage électronique (SEM) de marque Hitachi TM1000 (figure II.17). Les analyses au microscope ont principalement été utilisées pour évaluer l'état des surfaces dégradées, l'ITZ entre les fibres et la matrice et pour identifier les nouveaux composants développés au cœur du béton.



Figure II.17. MEB

En parallèle, les essais par diffraction des rayons X (XRD) ont été menés avec un diffractomètre de marque Rigaku Miniflex 600 sur tous les échantillons dégradés et non dégradés. Cette technique permet de caractériser des matériaux cristallisés, qu'ils soient massifs sous forme de poudre ou de dépôts (figure II.18).

La diffraction par rayons X permet aussi de distinguer des produits ayant la même composition chimique avec des arrangements atomiques différents.



Figure II.18. Dispositif DRX

II.8. Conclusion

Les caractéristiques physico-chimiques des matériaux utilisés dans notre étude sont largement concluantes pour réaliser le programme expérimental.

Des fibres métalliques ont été sélectionnées pour être utilisées dans cette étude car elles peuvent avoir une influence significative sur le comportement des bétons une fois immergés dans des milieux agressifs. Un pourcentage de 1% de fibres a été considéré sur la base d'essais préliminaires et des résultats de la littérature.

L'étude expérimentale a été menée sur des bétons ordinaires optimisés et sur des mortiers de bétons équivalents en remplaçant les classes granulaires 4/8, 8/16 et 16/25 par du sable lavé ayant la même surface développée.

L'étude de durabilité aux attaques acides a été étudiée sur une durée de 135 jours de conservation dans trois solutions acides à 5% de concentration : l'acide chlorhydrique, l'acide sulfurique et l'acide acétique. Pour le phénomène de lixiviation, la solution de nitrate d'ammonium (NH_4NO_3) de concentration égale à 6 mol / litre a été utilisée. Les échantillons ont été suivis pendant 64 semaines. Les essais de caractérisation des mélanges granulaires ont été réalisés **selon des** protocoles normalisés ou recommandés. Les résultats obtenus sont présentés et discutés dans le chapitre suivant.

L'organigramme représenté par la figure II.19 résume la démarche expérimentale définie pour notre étude.

Les différents résultats bétons et mortiers étudiés seront présentés et discutés dans le chapitre qui suit.

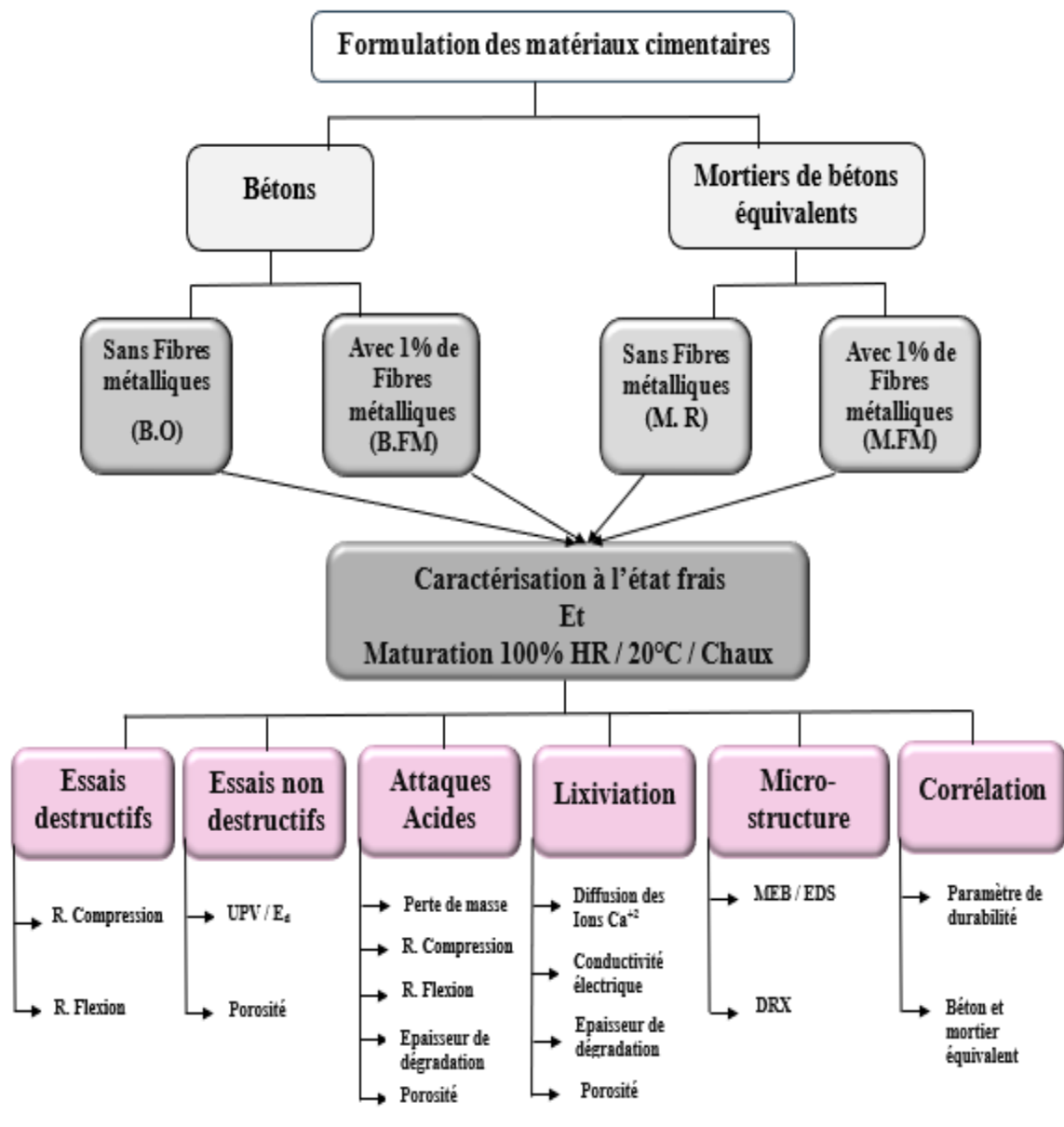


Figure II.19. Organigramme du programme expérimental

Chapitre III

Présentation et Interprétation des Résultats

III.1. Introduction

La performance des bétons et des mortiers qu'ils soient fibrés ou non fibrés a toujours suscité l'intérêt des chercheurs. L'objectif de ce chapitre est de présenter les résultats des bétons et mortiers à base de 1% des fibres métalliques noyées dans différents milieux sains et agressifs.

Une démarche expérimentale a été utilisée pour étudier la durabilité de ces matériaux cimentaires dans deux environnements agressifs.

Le premier milieu est un environnement simulant les attaques acides. Les échantillons ont été immergés sur une période de 135 jours dans trois solutions différentes : l'acide chlorhydrique HCl, l'acide sulfurique H₂SO₄ et l'acide acétique CH₃COOH avec une concentration de 5% pour chaque solution.

Le second environnement est réservé au phénomène de lixiviation où les spécimens ont été plongés dans une solution concentrée à 6 mol/l de nitrate d'ammonium NH₄NO₃ pendant 462 jours.

Tous les spécimens ont été suivis sur le plan des résistances mécaniques, de certains indicateurs de durabilité, de diffusion des ions, de la conductivité électrique et de la microstructure. De plus, un suivi visuel des échantillons a été effectué à l'aide de la phénolphthaléine.

Enfin, plusieurs relations corrélatives ont été développées entre les différentes propriétés de performance.

III.2. Etude sur bétons

III.2.1. Environnement sain

Ce milieu est caractérisé par une température de 20°C±2, un pH égal à 14 et une humidité relative de 49% HR.

III.2.1.1. Résistance à la compression

Les résistances mécaniques des bétons ordinaires B.O et fibrés B.FM ont été déterminées à 28, 56, 107 et 135 jours comme illustré sur la figure III.1. Il faut mentionner que les valeurs obtenues représentent la moyenne des résistances de trois échantillons testés pour chaque échéance. Il est clair que la résistance à la compression augmente en fonction de l'âge du béton. Les spécimens de bétons fibrés ont présenté une résistance de 43, 48, 54 et 61 MPa respectivement à 28, 56, 107 et 135 jours alors que les résistances du béton de référence sont égales à 32, 36, 41, 46 MPa au cours des mêmes échéances. Nos résultats montrent que l'utilisation des fibres a permis d'augmenter les résistances de 20 à 25 %. Ce constat est

principalement dû à la forte liaison créée entre les fibres métalliques et la matrice cimentaire, qui s'est traduite par une augmentation significative de la résistance à la compression. Ces résultats sont en accord avec ceux trouvés par [Gopalaratnam et al. ,1985] [Ramli et al. ,2011] [Ammari et al. ,2020].

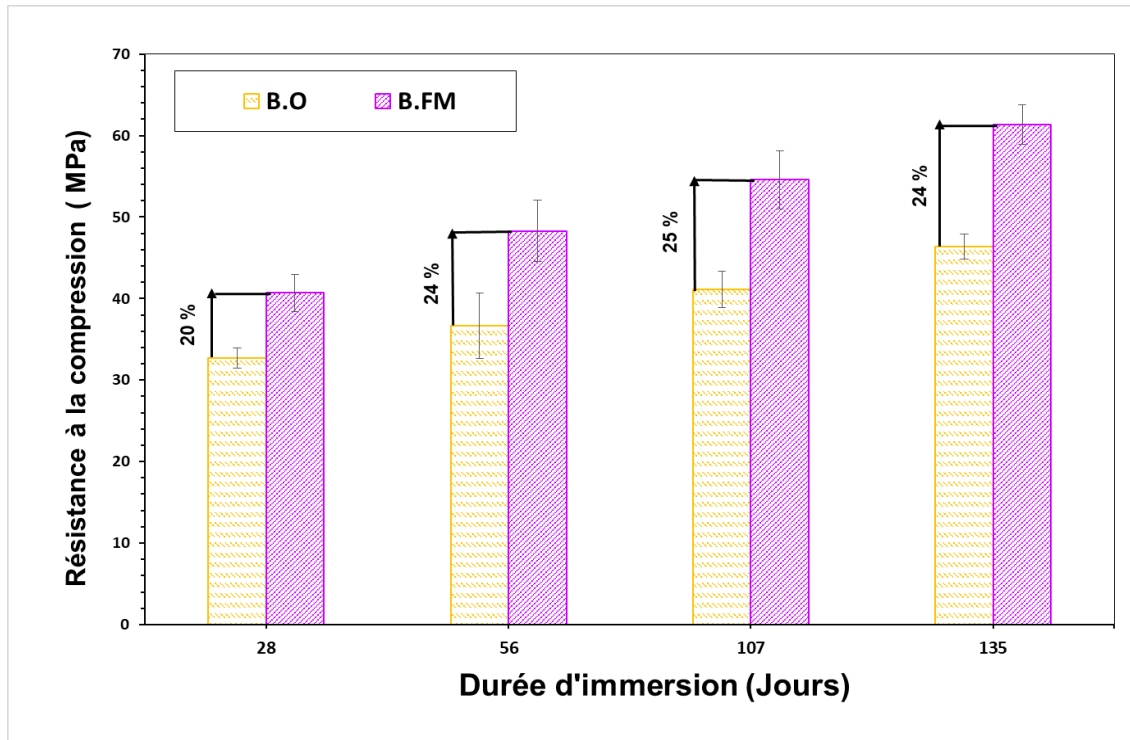


Figure III.1. Evaluation des résistances à la compression des bétons étudiés en fonction de l'âge

III.2.1.2. Résistance à la flexion

Les résultats présentés par la figure III.2 montrent que les bétons fibrés ont présenté des résistances à la flexion plus élevées de 43 à 57% par rapport à celles du béton de référence. En effet, les fibres confèrent à la matrice une certaine ductilité et modifie considérablement le comportement fragile en limitant le phénomène de propagation rapide et instable de la rupture (figure III.2.). Ce résultat est en accord avec la littérature [Olivito et al., 2009] et [Meddah et al., 2017]

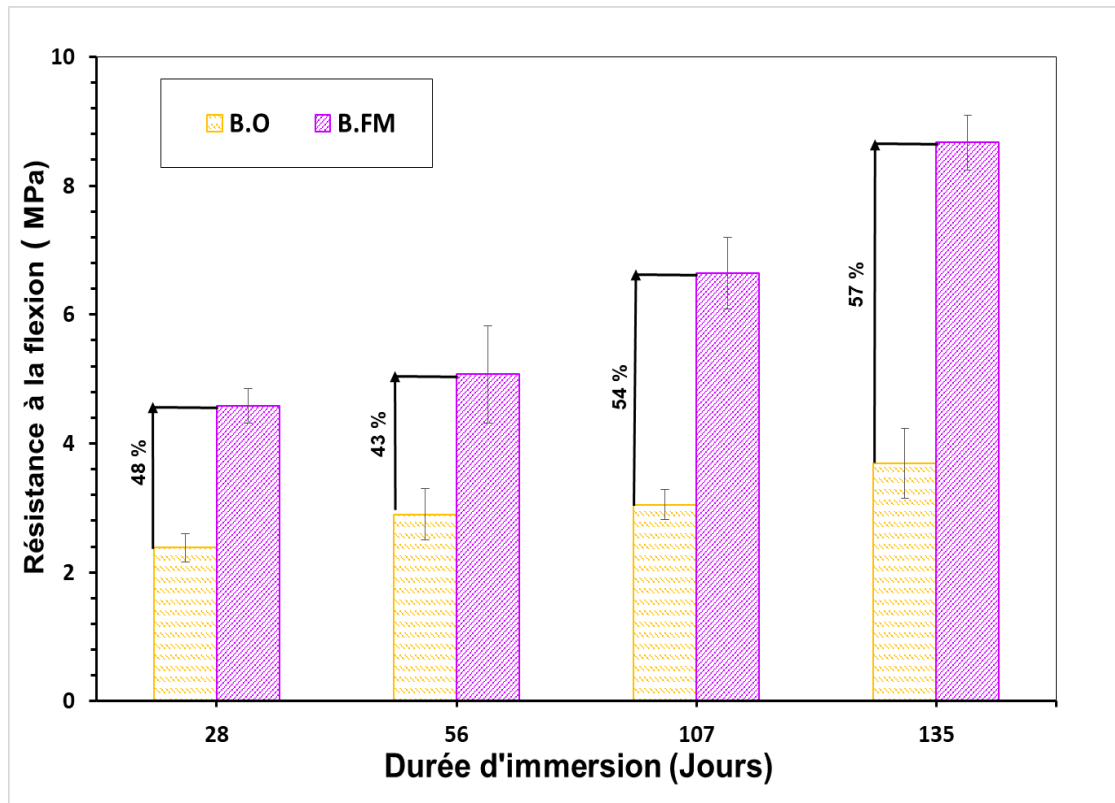


Figure III.2. Evaluation des résistances à la flexion des bétons

III.2.1.3. Vitesse ultrasonique et module dynamique

Les résultats de l'UPV et du module dynamique (E_d) sont clairement corrélatifs avec ceux des résistances mécaniques. Une tendance haussière et presque linéaire de l'UPV et de l' E_d a été remarquée en fonction de l'âge du béton (figure III.3).

De plus, les UPV des bétons fibrés fluctuant entre 4.3 à 5.05 km/s étaient toujours supérieures à celles des B.O qui variaient entre 3.9 à 4.4 km/s. Ces deux valeurs sont supérieures à celles recommandées par [Rohit et al., 2012]. Ces différences peuvent être expliquées par le rôle joué par les fibres dans la formation d'un milieu plus dense responsable de la réduction du temps de propagation de l'onde. Le même constat peut être fait pour le module dynamique. Des différences de 13 à 21% ont été trouvés entre le module dynamique du béton fibré et celui du béton de référence.

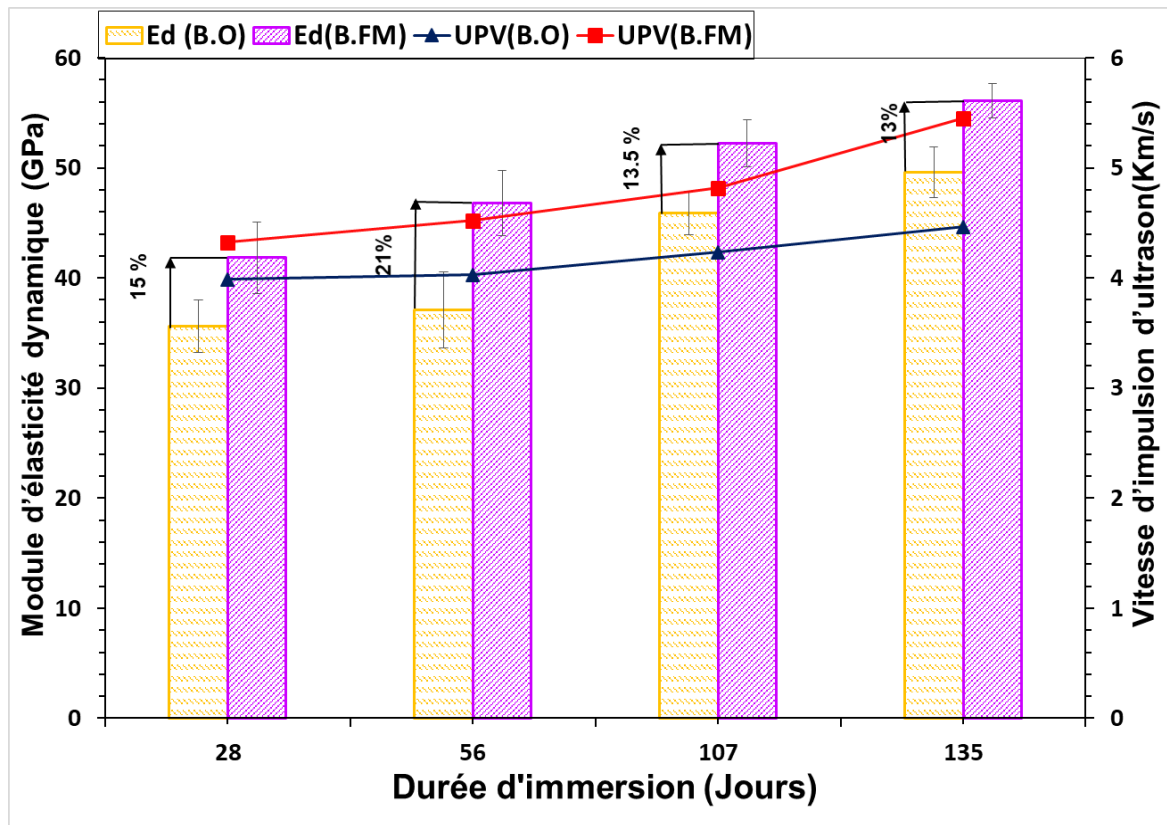


Figure III.3. Vitesse ultrasonique et module dynamique des bétons ordinaires et fibrés à 135 jours

III.2.2. Environnement agressif

III.2.2.1. Attaques acides

i. Examen visuel

L'examen visuel des échantillons en contact avec les acides est un moyen qui permet d'évaluer la détérioration des propriétés physiques et les dégradations de l'aspect extérieur des éprouvettes (figure III.4).

Après conservation des spécimens du B.O et B.FM dans les trois milieux acides (HCl, H₂SO₄ et CH₃COOH), on a remarqué une réduction du poids due au fait que le ciment après hydratation libère une partie considérable d'hydroxyde de calcium libre qui peut être lixiviée à l'intérieur. [Benosman et al., 2017]. Les surfaces des éprouvettes sont devenues rugueuses et altérées (Figure III.4 a). On a aussi constaté que les échantillons immergés dans H₂SO₄ ont formé une couche blanchâtre qui est due à la présence du gypse CaSO₄ qui va réagir avec la phase d'aluminate de calcium dans le ciment pour former le sulfoaluminate de calcium hydraté (ettringite) qui, après cristallisation, peut causer l'expansion des bétons.

Par ailleurs, une couche rouille de couleur jaunâtre a été formée sur les spécimens noyés dans la solution acétique et chlorhydrique et qui peut être expliquée par la formation d'hydroxyde de fer Fe_2O_3 mal cristallisé. De plus, les acides chlorhydrique et sulfurique ne réagissent pas uniquement avec l'hydroxyde de calcium ; ils attaquent également les autres composants de la pâte de ciment durcie en formant des sels calciques, aluminiques ou ferriques, ainsi que des acides siliciques colloïdaux (gels de silice) entre les grains des granulats.



Figure III.4 a. Etat des bétons sains et dégradés

L'utilisation de la phénolphthaléine a permis d'observer deux zones distinctes : une zone colorée en rose correspondant à la partie saine et une zone non colorée correspondant à la partie dégradée (figure III.4 b). L'évolution de l'épaisseur de dégradations peut être expliquée par la dissolution totale de la portlandite et la dissolution progressive du silicate de calcium hydraté C-S-H, comme rapporté par [Perlot et al., 2006].

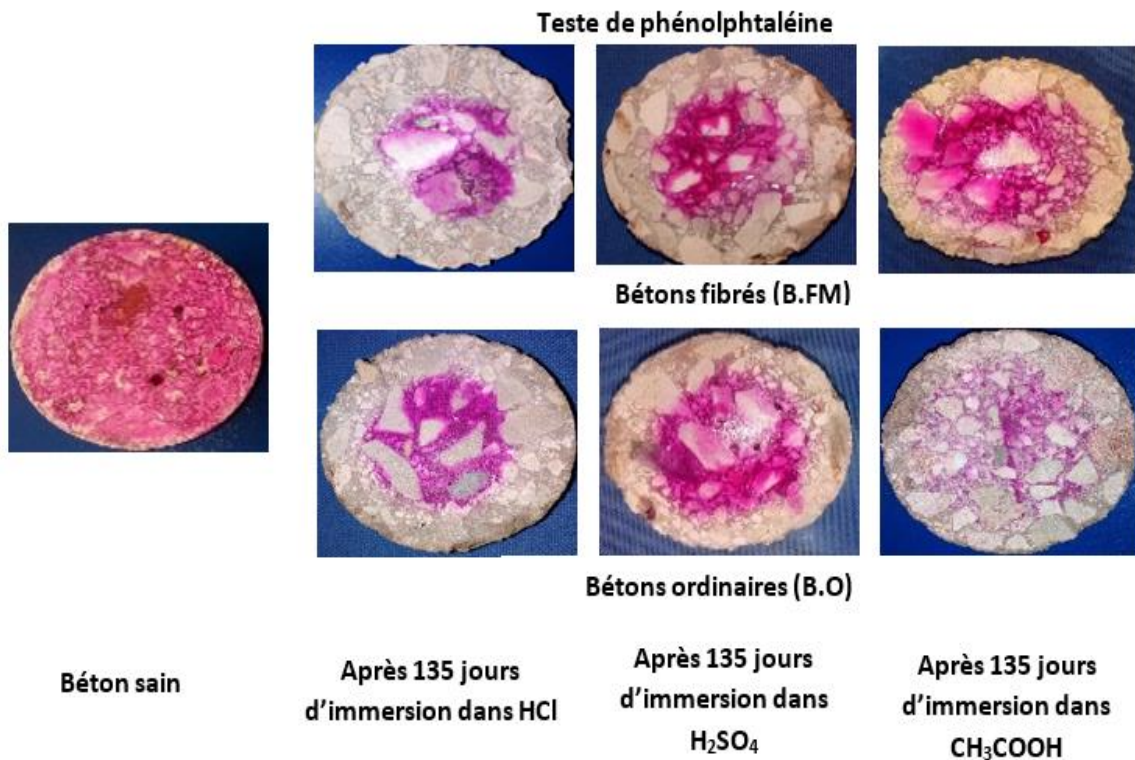


Figure III.4 b. Test à la phénolphthaléine sur des bétons sains et dégradés

Le contrôle visuel représenté par la figure III.5 a montré que la corrosion et la dégradation des fibres à l'intérieur et sur la surface des éprouvettes sont importantes. La corrosion des fibres métalliques a eu lieu principalement suite à la pénétration des solutions agressives qui conduit à dissolution de fer. Par la suite, les électrons libérés par la réaction entre la solution et la fibre métallique se déplacent à travers le métal jusqu'aux sites cathodiques. Les produits de corrosion formés sur la surface des fibres métalliques ont la particularité d'avoir un volume plus important que celui des fibres à l'état initial, ce qui amène à des fissures dans les bétons.

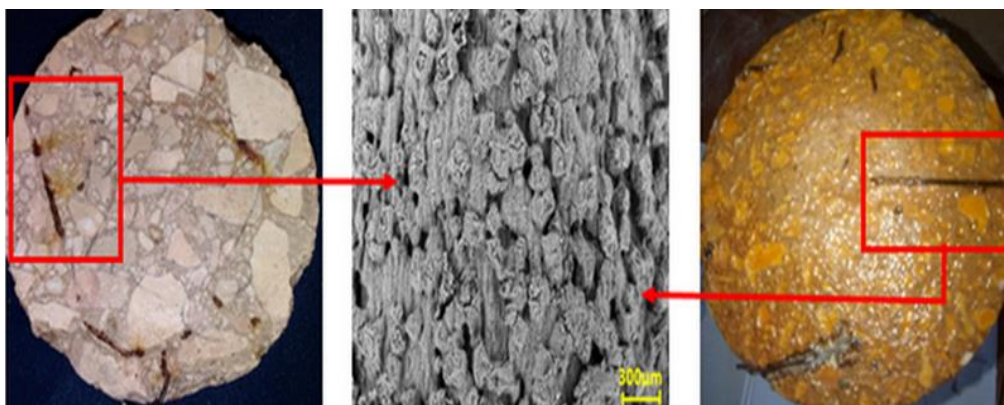


Figure III.5. La corrosion des fibres à l'intérieur et à la surface des éprouvettes

ii. Epaisseur de dégradation

Les épaisseurs dégradées sont déterminées à l'aide d'un pied à coulisse, après avoir aspergé les surfaces des disques étudiés avec de la phénolphthaléine. Les résultats présentés sur la figure III.6 montre clairement que l'épaisseur dégradée augmente presque linéairement en fonction du temps. La tendance de dégradation est plus importante pendant les 21 premiers jours d'immersion à cause de la dissolution du (CH). Par contre au-delà de 21 jours, la décalcification progressive des C-S-H continue à causer des dégradations mais de manière légèrement moins significative. De plus, on remarque que les parties dégradées sont plus faibles lorsque les bétons sont immergés dans la solution CH_3COOH par rapport aux solutions HCl et H_2SO_4 . Cela est expliqué par la nature organique du CH_3COOH qui est plus faible par rapport à celles du HCl et du H_2SO_4 qui sont connus par une nature inorganique et nuisible pour les bétons.

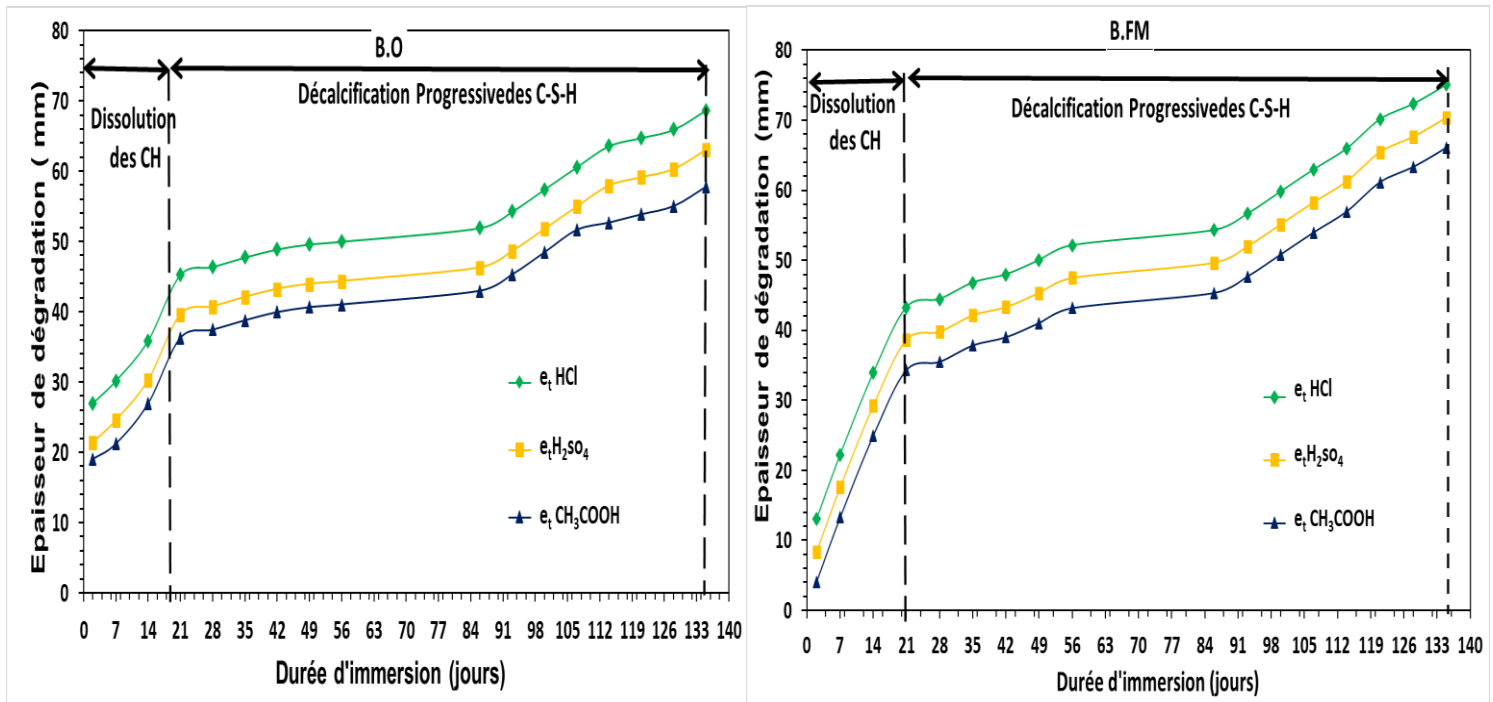


Figure III.6. Variation de l'épaisseur de dégradation des échantillons exposés aux trois solutions chimiques pendant 135 jours

iii. Influence des solutions agressives sur la perte de masse

La figure III.7 présente les résultats de perte de masse concernant les échantillons des bétons ordinaires et bétons fibrés immergés dans la solution H_2SO_4 pendant 135 jours où nous pouvons constater un gain de masse de 0.82% pour le B.FM et 1.2% pour le B.O à 7 jours ; et de 2% et

3% de gain respectivement pour le B.FM et le B.O à 14 jours. Ce constat est dû à la réaction de portlandite (CH) avec l'acide sulfurique qui forme du gypse CaSO_4 (eq III.1).



Après deux semaines, on a constaté un début de perte de masse moins important chez le B.FM car les fibres métalliques ont tendance à coudre les microfissures qui minimiser les interconnexions entre les vides.

Cependant, après 35 jours, la perte de masse devient plus élevée pour le B.FM à cause des nouvelles microfissures déclenchées par l'expansion de l'ettringite secondaire et du gypse formé à jeune âge. La porosité des bétons amplifiée conduit à l'acheminement des solutions agressives vers les fibres déclenchant ainsi la corrosion de ces derniers (figure III.7), et engendrant des pertes de masse plus élevées pour le B.FM par rapport au B.O

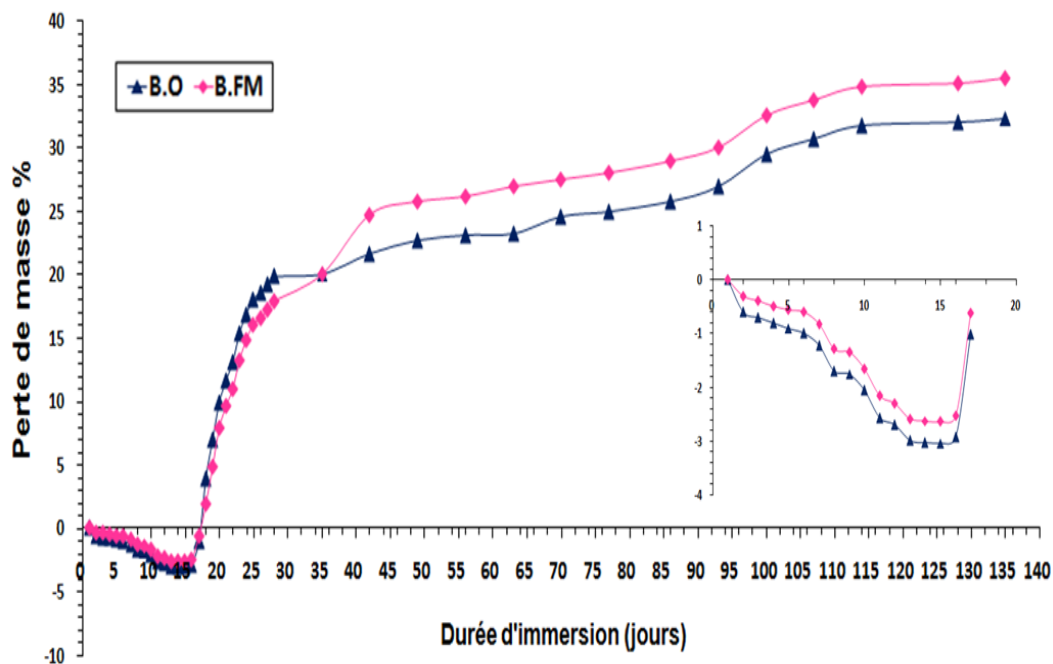


Figure III.7. Variation de la masse des échantillons immergés dans la solution H_2SO_4 à 135 jours

Les figures III.8 et III.9 montrent l'évolution de la perte de masse des bétons étudiés dans les autres solutions acides, à savoir l'HCl et le CH_3COOH . Aucun gain de masse n'a été noté pendant toute la période d'exposition. On a remarqué que le B.O a perdu 43% de son poids à 135 jours quand il est immergé dans l'HCl et 26% quand il est noyé dans CH_3COOH . Quant au B.FM., la perte de poids est de 47% et 30% à 135 jours respectivement dans les solutions HCl

et CH_3COOH . Ce résultat consolide les conclusions des travaux de [Benosman et al., 2011], et peut être clarifié par la nature acide plus agressive du HCl par rapport au CH_3COOH .

L'acide chlorhydrique réagit avec l'hydroxyde de calcium pour former le chlorure de calcium (eq III.2) [Benosman et al., 2017].



L'acide acétique forme des sels facilement solubles dans l'eau et nuisent donc au béton (eq III.3) [Benosman et al., 2017].

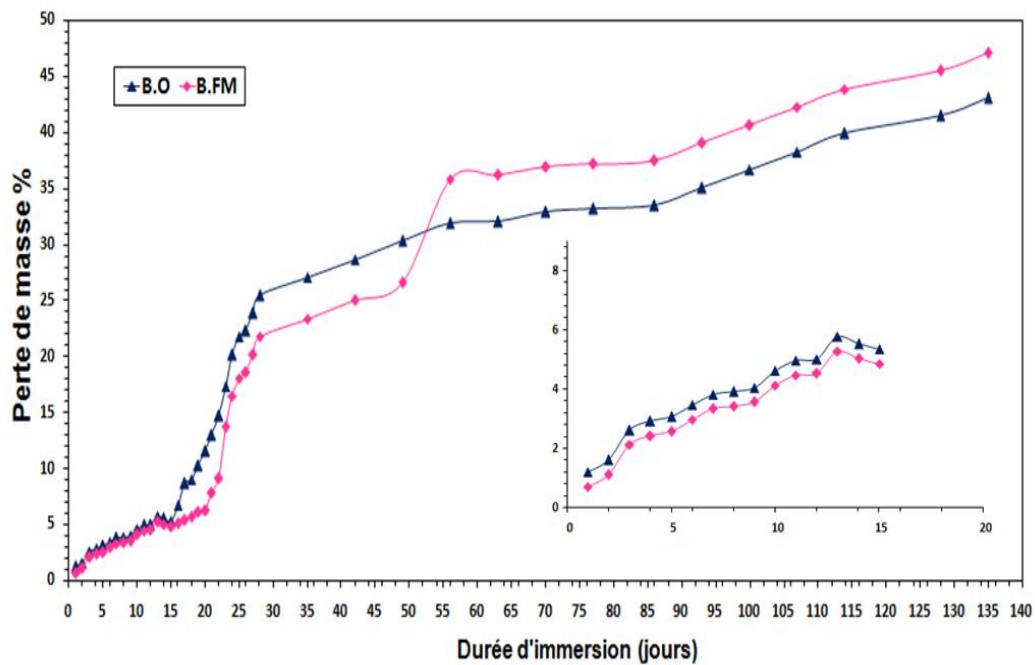


Figure III.8 : Variation de la masse des échantillons immergés dans la solution HCl à 135 jours

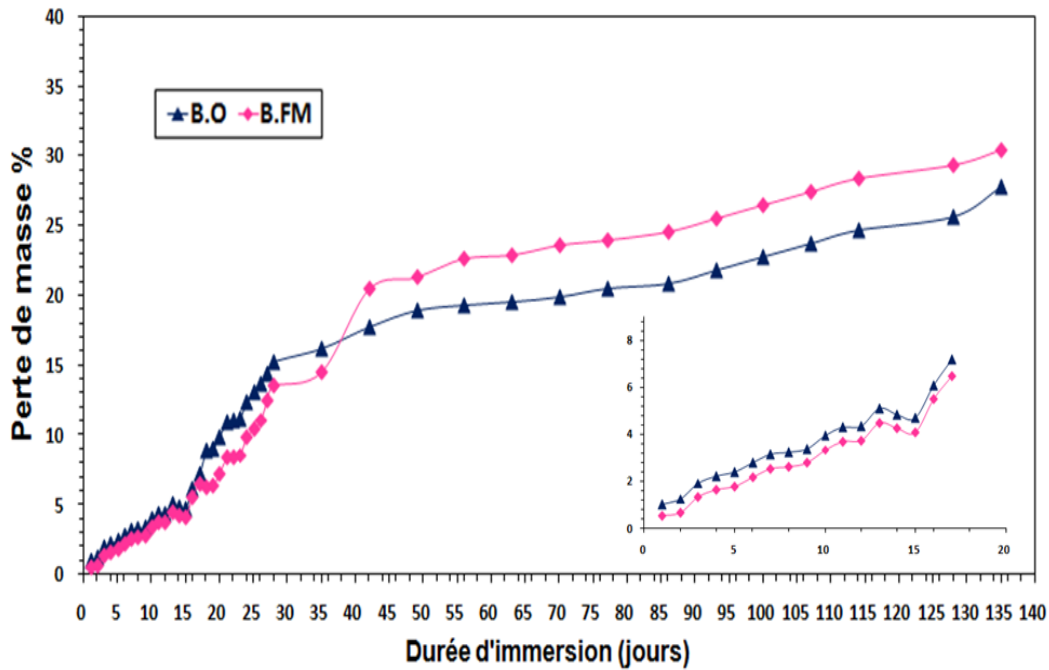


Figure III.9 : Variation de la masse des échantillons immergés dans la solution CH_3COOH à 135 jours

iv. Influence des solutions agressives sur la résistance mécanique

Les résultats illustrés sur la figure III.10, montrent que les résistances à la compression des bétons conservés dans les 3 milieux agressifs (HCl , H_2SO_4 et CH_3COOH) diminuent en fonction du temps à cause de l'augmentation de la porosité des bétons, la dissolution de la portlandite (CH) et la décalcification progressive des C-S-H.

Les résultats des essais de compression consolident ceux de la perte de masse. On note qu'à 28 jours, le B.FM résiste mieux aux attaques acides par rapport au B.O avec des différences respectives de 10 %, 16% et 21% dans les trois solutions : HCl , H_2SO_4 et CH_3COOH . A partir de 56 jours, la pénétration des solutions agressives amorce la corrosion des fibres qui modifie progressivement l'état des bétons fibrés. Ainsi les B.O deviennent plus résistants par rapport aux B.FM avec une différence qui peut atteindre 19% quand les bétons sont placés dans l' HCl , 14% pour les bétons immergés dans H_2SO_4 et 10% si les bétons sont noyés dans CH_3COOH .

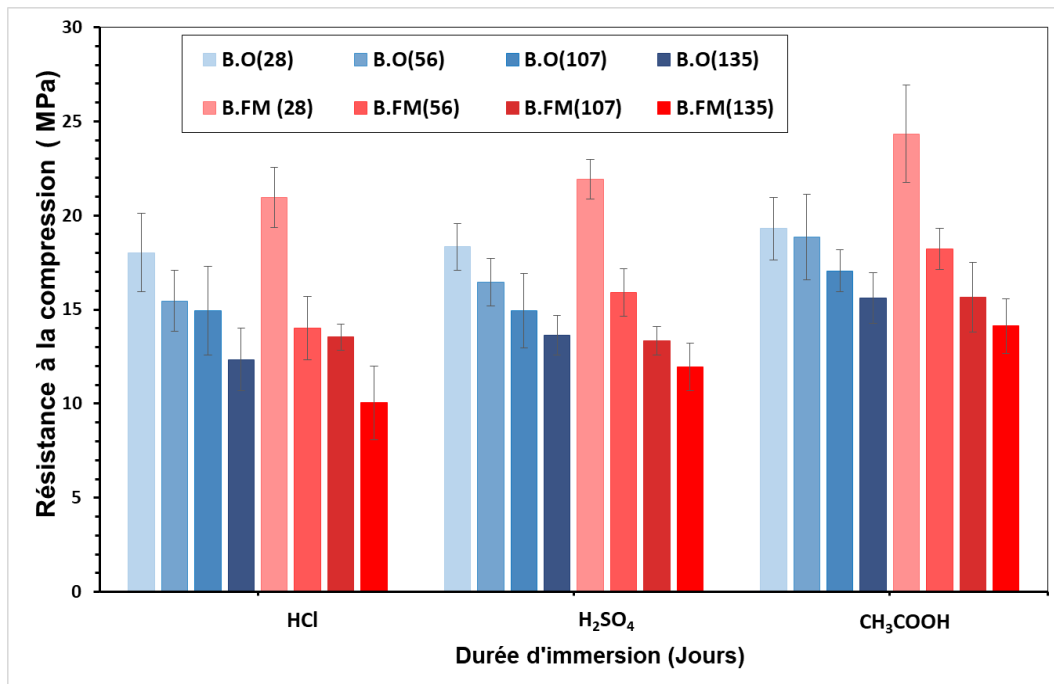


Figure III.10. Résistances à la compression des bétons immergés dans les trois solutions acides.

v. Influence des solutions agressives sur la résistance à la flexion

D'après la figure III.11 on observe que le béton renforcé par les fibres métalliques (B.FM) est plus résistant aux attaques acides (HCl, H₂SO₄, CH₃COOH) que le béton ordinaire (B.O) à l'âge de 28 jours.

Après 135 jours d'immersion dans les solutions acides une diminution de la résistance à la flexion a été observée dans les échantillons (B.FM). Cette baisse est de l'ordre de 48%, 33.6% et 14% respectivement dans les solutions HCl, H₂SO₄, CH₃COOH, et de 30%, 18% et 11 % pour les B.O. dans les mêmes conditions précédentes. Ce constat est la conséquence de la pénétration des solutions agressives ; la couche protectrice du béton est ainsi dépassivée conduisant à la corrosion des fibres qui provoque des fissures et conduit à une chute de la résistance du béton vis-à-vis de la flexion.

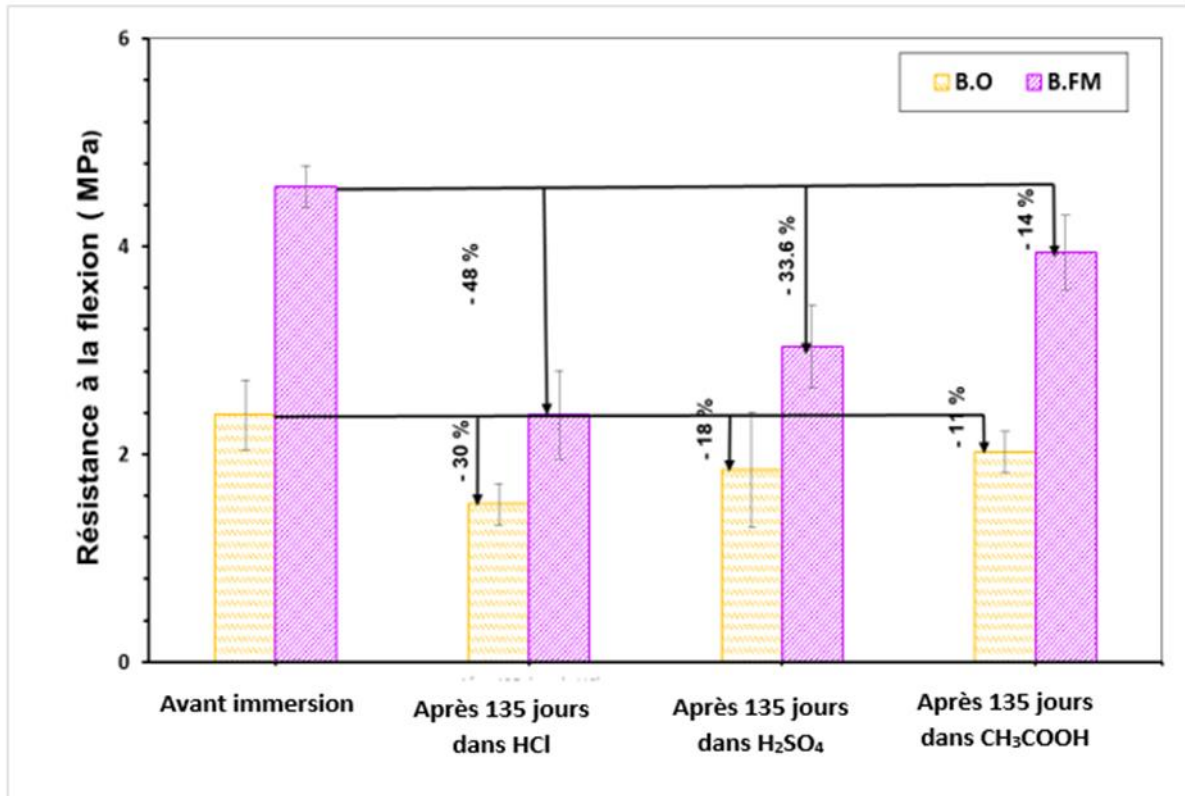


Figure III.11. Résistances à la flexion des bétons immergés dans les solutions agressives

vi. Porosité accessible à l'eau

La porosité accessible à l'eau des bétons est un indicateur essentiel de la durabilité. Dans un milieu sain, les pores des bétons ont tendance à se colmater avec la formation des C-S-H. Les fibres métalliques jouent aussi un rôle important sur la porosité car elles confèrent au béton une microstructure plus homogène et plus dense. Par contre, lorsque les bétons sont immergés dans les solutions acides, la porosité se retrouve affectée. Le HCl reste inexorablement l'acide le plus néfaste spécialement sur les bétons fibrés dont la porosité est passée de 11,3% avant immersion à 21,8% après 135 jours d'exposition. L'utilisation des solutions H₂SO₄ et CH₃COOH ont respectivement conduit à des porosités de 20,65% et 19,06% pour les mêmes bétons à 135 jours (figure III.12). Ce résultat est attribué à la corrosion des fibres par les trois solutions acides qui modifie les propriétés physico-chimiques de la matrice et engendre une augmentation du réseau poreux, ce qui génère une accélération du processus de transport des matières et la dissolution des hydrates.

Par ailleurs, les B.O. ont présenté une augmentation de porosité de 12,2% avant immersion à 19,35%, 18,06% et 17,18% après immersion respectivement dans les trois milieux agressifs HCl, H₂SO₄ et CH₃COOH.

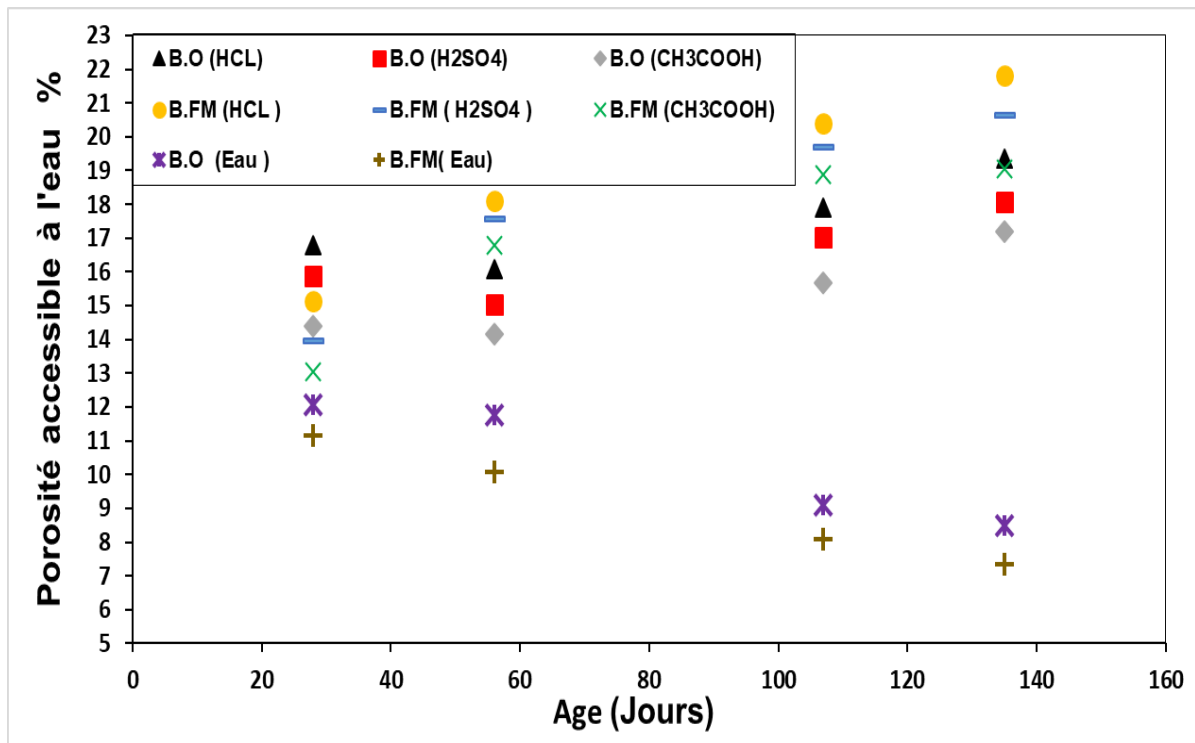


Figure III.12 Porosité accessible à l'eau des différents bétons immergés dans la solution de HCl, H₂SO₄ et CH₃COOH

vii. Influence des solutions agressives sur la vitesse ultrasonique et sur le module dynamique

Les essais non destructifs ont bien montré que les fibres augmentent la vitesse d'impulsion ultrasonique et le module dynamique E_d si on compare les résultats obtenus avant l'immersion des bétons dans les solutions agressives, ce qui prouve l'effet bénéfique des fibres sur la densité des bétons. On a trouvé que la valeur d'UPV est passée de 3.9 km/s pour les B.O. à 4.3 km/s pour les B.FM tandis que la valeur de l' E_d est passée de 35.6 GPa pour les B.O à 41 GPa pour les B.FM à 28 jours dans un milieu sain. On note aussi que l'UPV des bétons étudiés à long terme est plus importante qu'à court terme (Figure III.13).

Après 135 jours d'immersion, on a remarqué une diminution de l'UPV de 30%, 25.5% et 21% pour les B.FM immergés respectivement dans les solutions HCl, H₂SO₄ et CH₃COOH alors que cette diminution est de l'ordre de 18 %, 15% et 8% pour les B.O soumis aux mêmes conditions. La même tendance a été notée pour l'Ed vu que ce paramètre est directement corrélé à l'UPV. Ces diminutions sont justifiées par les précédents résultats relatifs à la porosité qui signifient une augmentation du temps de propagation.

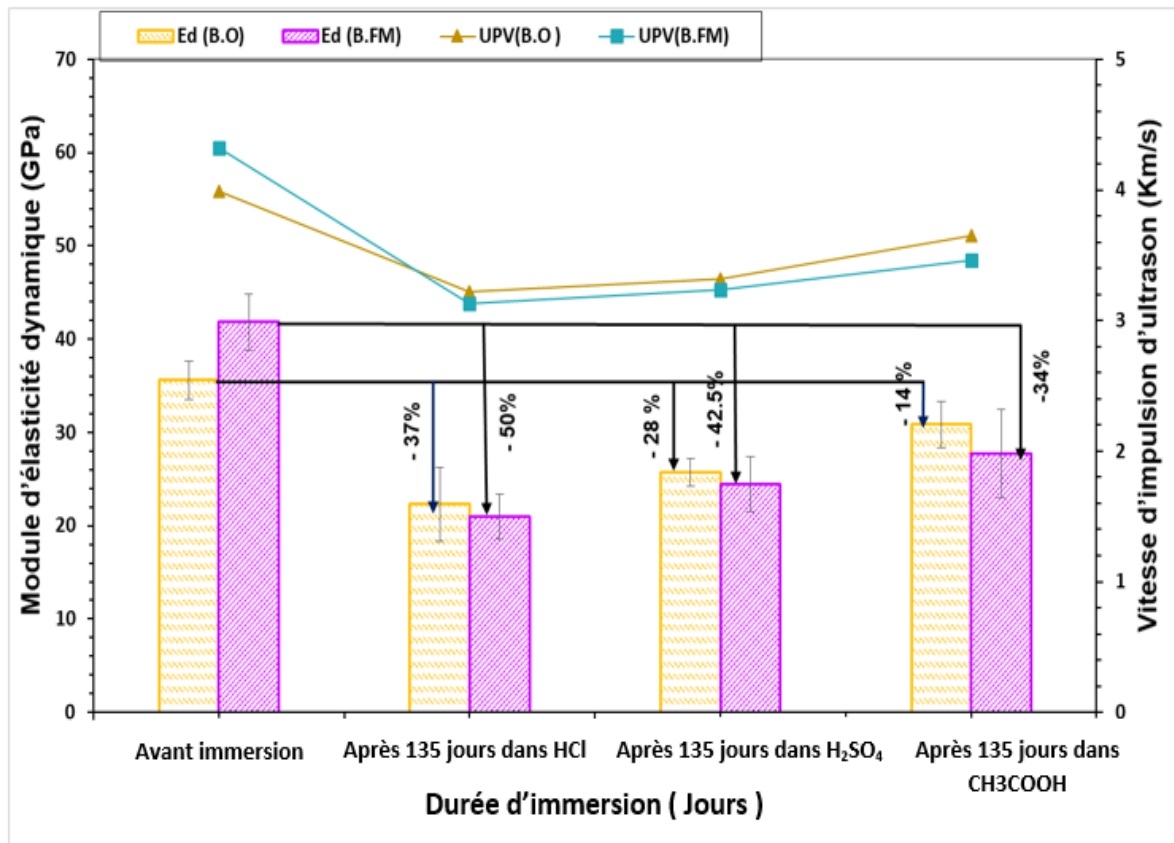


Figure III.13 : Vitesse ultrasonore et module dynamique des bétons avant et après immersion dans les solutions chimiques pendant 135 jours

III.2.2.2. Phénomène de lixiviation

i. Diffusion des ions de calcium

La lixiviation des bétons par nitrate d'ammonium conduit à une augmentation de la porosité à cause du phénomène de transport de la matière conduisant une dégradation des propriétés mécaniques. Les résultats obtenus montrent clairement que les quantités de calcium lessivé suivent une évolution presque similaire chez les deux types de bétons étudiés (figure III.14). Cette évolution peut être expliquée par la diffusion de l'ammonium à travers les pores du

matériau. En effet, le nitrate d'ammonium en milieu basique se dissocie en ammonium NH_4^+ et en nitrate NO_3^- qui réagit avec les ions Ca^{2+} issus de la dissolution de la portlandite et des C-S-H. La consommation des ions Ca^{2+} par réaction avec NO_3^- modifie l'équilibre chimique entre la phase solide et la phase liquide du matériau et accélère non seulement le processus de dissolution de la portlandite mais aussi le processus de diffusion du calcium vers la solution. En parallèle, on remarque une diminution de la diffusion des ions de calcium dans le temps à cause de l'accumulation de ce dernier à l'interface échantillon - solution ou encore en raison du dégagement du NH_3 . Ces résultats sont en accord avec ceux de [Rozière et al, 2009] et [Tasnim et al, 2020].

De plus, les B.FM caractérisés par une microstructure plus dense à cause de la présence des fibres, ont eu une meilleure résistance envers la lixiviation. En effet la modification de la matrice cimentaire entourant la fibre, due à la dissolution progressive des principales phases de calcium, à savoir CH et CSH, implique ainsi une diminution de la basicité dans la solution des pores. De plus une réduction de la capacité tampon de la solution interstitielle près du front de fibres (diffusion Ca^{2+} vers la surface), conduit à la dépassivation des fibres métalliques noyées et cause par la suite la corrosion des fibres engendrant ainsi une diminution de la résistance envers la lixiviation.

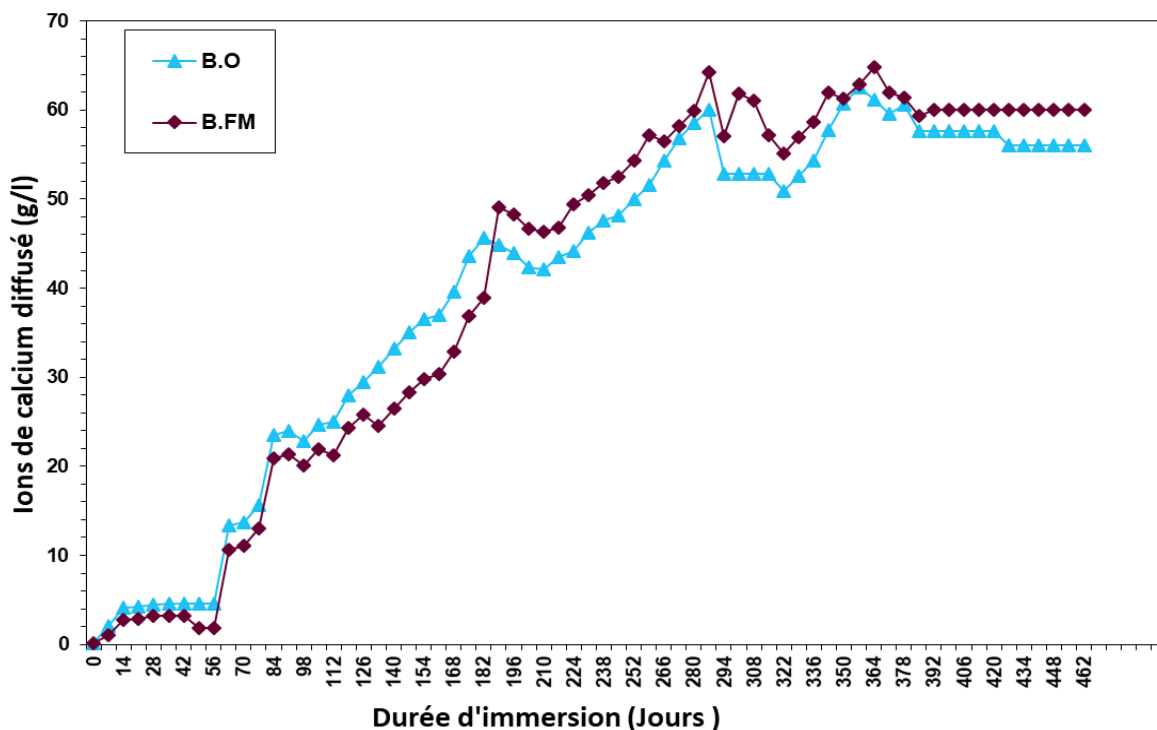


Figure III.14. La teneur en calcium lessivé des échantillons

ii. Conductivité électrique

La figure III.15 montre la cinétique de la conductivité électrique dans la solution du nitrate d'ammonium après immersion des bétons. Si on se base sur les conclusions de [Bush et al, 2021], on peut dire que la conductivité électrique devient plus importante lorsque la diffusion des ions Ca^{2+} est élevée. La figure 3.15 montre que la conductivité est directement proportionnelle à la quantité des ions de calcium (Ca^{2+}) qui sont porteurs de charges électriques, ce qui implique que la conductivité électrique est plus élevée.

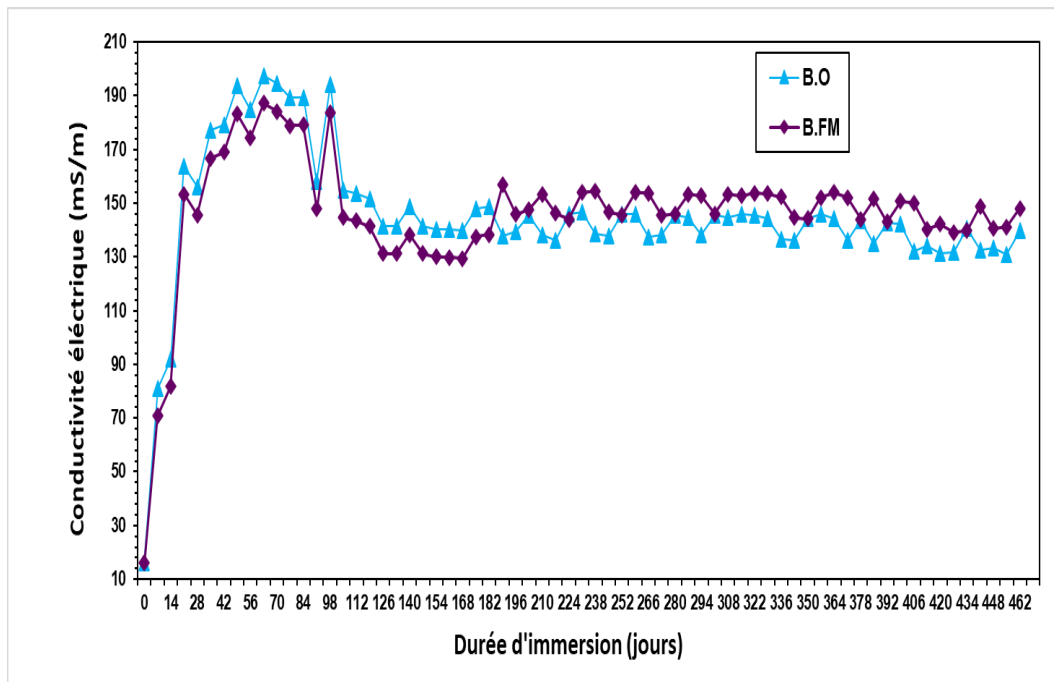


Figure III.15. Conductivité électrique de la solution

iii. Porosité accessible à l'eau

Les résultats illustrés sur la figure III.16 montrent que le réseau poreux s'amplifie avec le temps c'est-à-dire avec la diffusion des ions calcium qui sont les principaux responsables de la dissolution des cristaux de portlandite et à la décalcification partielle des C-S-H. Toutefois, l'évolution du réseau capillaire a tendance à se stabiliser à la fin de la diffusion des ions calcium. Cette augmentation du réseau poreux provoque une modification des propriétés physico-chimiques et mécaniques des bétons et une accélération de processus de transport de matières. De plus, la porosité des bétons fibres B.FM devient supérieure à celle des bétons ordinaires avec l'amorce de la corrosion des fibres.

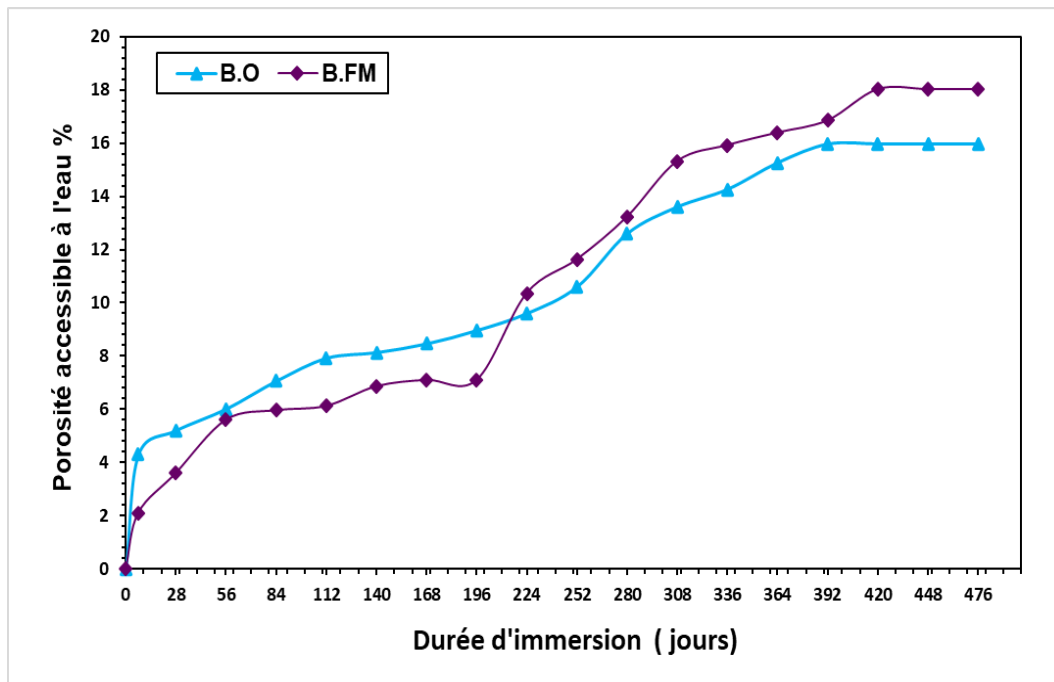


Figure III.16. Porosité accessible à l'eau des échantillons lixiviés

iv. Epaisseur de dégradation

L'épaisseur du béton dégradé est mesurée à une échéance de 64 semaines. Les éprouvettes sont retirées du bac, et une tranche d'une épaisseur de 50 mm est sciée de chaque éprouvette pour mesurer l'épaisseur dégradée. Le reste des éprouvettes est remis dans la solution pour la poursuite de l'expérience. Après l'aspersion de phénolphthaléine, la zone dégradée des échantillons prend la coloration du béton, alors que la zone saine prend une coloration rose. D'après la représentation graphique III.17, on remarque qu'au cours des premières semaines, les bétons ordinaires subissent une dégradation importante par rapport à celle des bétons à base de fibres métalliques. Cependant après 40 semaines, la tendance s'inverse et on observe que l'épaisseur dégradée des bétons fibrés devient plus grande que celle des bétons ordinaires à cause de la pénétration de la solution de nitrate d'ammonium dans le béton impliquant ainsi la diffusion d' OH^- , H^+ et Ca^{2+} vers la surface qui réduit la capacité tampon de la solution interstitielle du béton près du front des fibres, corrodent les fibres et provoquent des fissures où se manifeste une dégradation supplémentaire. Nos résultats corroborent ceux de la littérature [Torrenti et al., 1998] et [Torrenti et al., 1999].

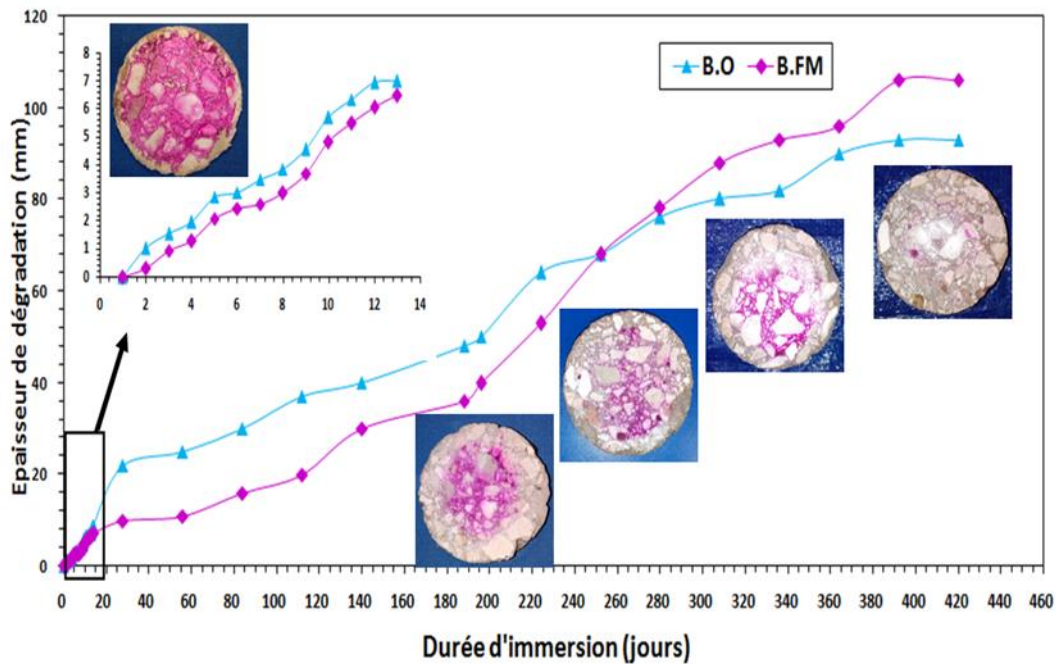


Figure III.17. Variation de l'épaisseur de dégradation des échantillons immergés dans 6mol/L NH_4NO_3 pendant 462 jours

III.2.2.3. Microstructure

i. Microscopie à balayage électronique MEB/EDS

La figure III.18 a-j regroupe les différents SEM réalisés sur les bétons. Dans un milieu sain, l'utilisation des fibres dans les bétons permet d'améliorer l'adhérence avec la matrice cimentaire et réduit les épaisseurs des auréoles de transition qui sont égales à $8.5 \mu\text{m}$ environ (figure III.18 -f) alors qu'elles sont de l'ordre de $10\text{-}30 \mu\text{m}$ à l'interface ciment – granulats selon [Kim et al., 2015].

Toutefois, l'exposition du béton à une solution acide génère systématiquement une amplification importante du réseau poreux et la propagation des microfissures. En effet, la pénétration de la solution agressive dans les interstices provoque la corrosion des fibres métalliques et augmente l'ITZ (matrice cimentaire -fibre) de 10 fois pour les bétons exposés à l' HCl , de 7 fois pour les bétons noyés dans l' H_2SO_4 et de 6 fois pour les bétons conservés dans les autres solutions (figure III.18g-j), ce qui favorise la diffusion des ions et multiplie les fissures.

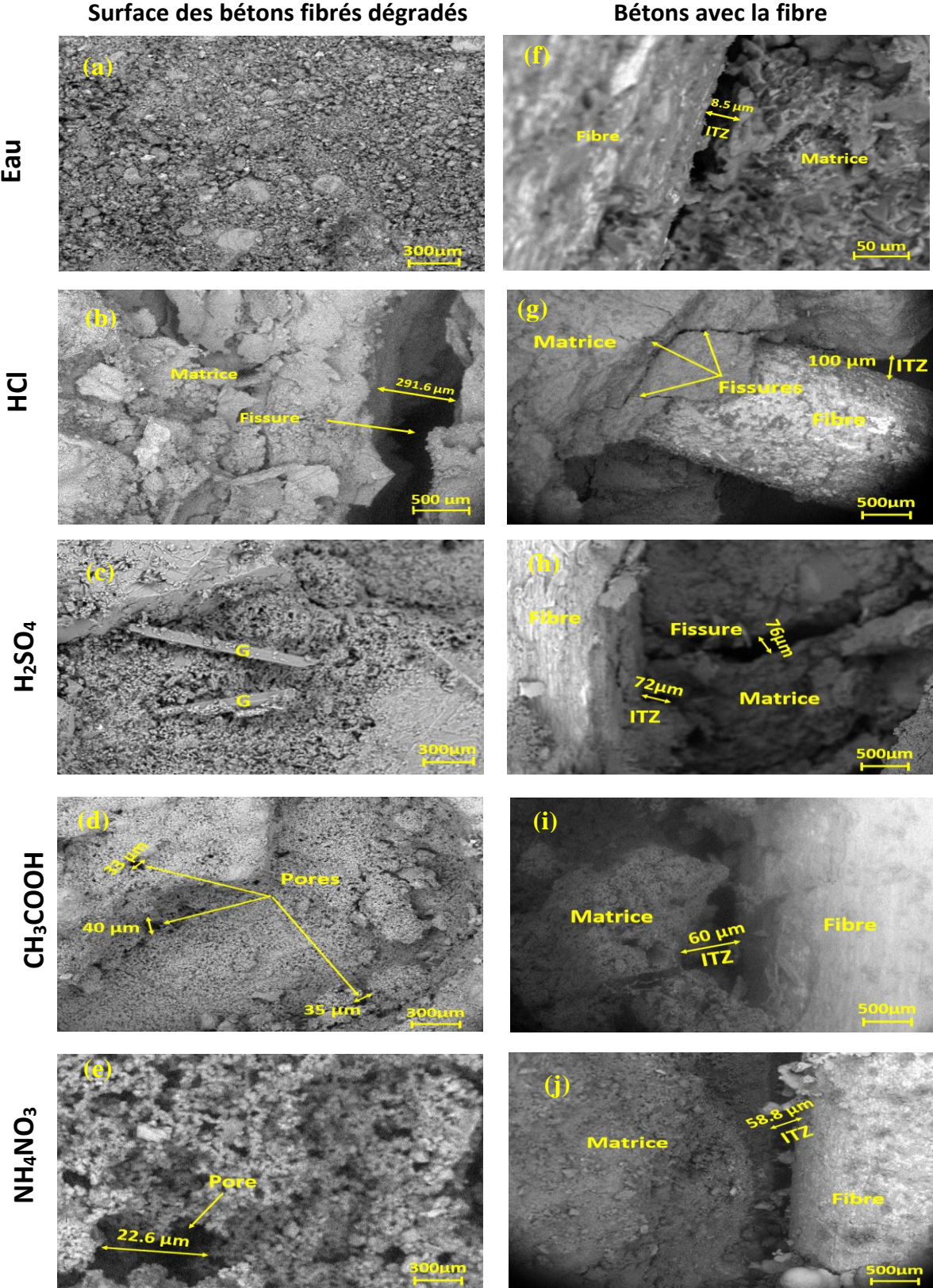


Figure III.18 : Microscopie électronique à balayage (MEB) des échantillons avant et après Attaque des solutions chimiques, G : gypse

La figure III.19 a-o présente les SEM micrographie et analyse élémentaire (EDS) des fibres seules saines et dégradées incorporées dans les différents bétons testés dans l'eau et dans les solutions agressives. Les résultats obtenus ont révélé une dégradation importante des fibres pour les bétons immergés dans l'HCl, H₂SO₄ et CH₃COOH (figure III.19 g-i) et une faible dégradation des fibres de bétons immergés dans la solution NH₄NO₃ (figure III.19.j). Ce résultat montre l'influence du degré d'acidité des solutions (pH) sur la dégradation des fibres.

De plus, on a constaté la formation de cristaux de gypse (CaSO₄.2H₂O) de section hexagonale piquée sur la surface des fibres pour les bétons immergés dans l'acide sulfurique (figure III.19.h et figure III.19.m) et la formation de chlorure de calcium hydraté (CaCl₂.4H₂O) sous forme de troncature de cubes sur les fibres des échantillons immergés dans l'acide chlorhydrique (figure III.19.g et figure III.19.l). Concernant les bétons noyés dans l'acide acétique, on a remarqué la formation des cristaux d'acétate de calcium (Ca (CH₃COO)₂.H₂O) de forme spongieuse sur les fibres (figure III.19.i et figure III.19.n). Par ailleurs les fibres des bétons noyés dans un milieu sain avaient une apparence pratiquement lisse (figure III.19.f).

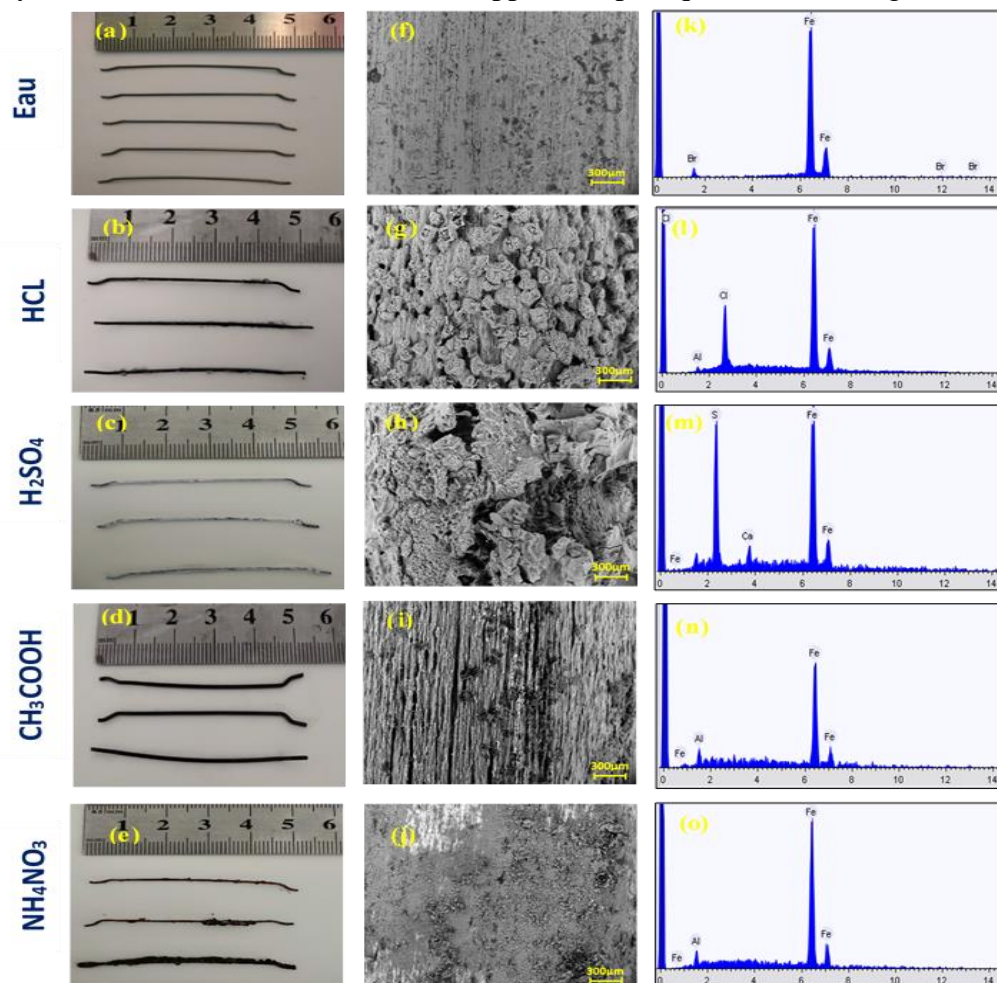


Figure III.19. (a). Microscopie électronique à balayage des échantillons (MEB) et analyse élémentaire (EDS) des fibres saines et dégradées

ii. Diffractométrie de rayons X (DRX)

Le suivi de la microstructure de tous les échantillons dans les différents milieux sains et agressifs était nécessaire pour mieux visualiser les conséquences du phénomène de la dégradation.

Les spectres DRX représentés sur la figure III.20 montrent des changements perpétuels dans les phases cristallines hydratées. On constate la formation du chlorure de calcium hydraté ($\text{CaCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) sur les bétons immergés dans l'acide chlorhydrique (figure III.20.a), la formation du gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) et de l'ettringite secondaire sur les échantillons noyés dans l'acide sulfurique (figure III.20.b) ainsi que la formation de l'acétate de calcium hydraté ($\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) sur les bétons plongés dans l'acide acétique (figure III.20.c). Les spectres ont aussi révélé la formation du nitrate de calcium $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ sur les bétons lixiviés (figure III.20.d). De plus, l'analyse par diffractométrie a clairement mis en évidence que la diminution de la quantité de portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ est nettement plus importante pour les bétons dégradés.

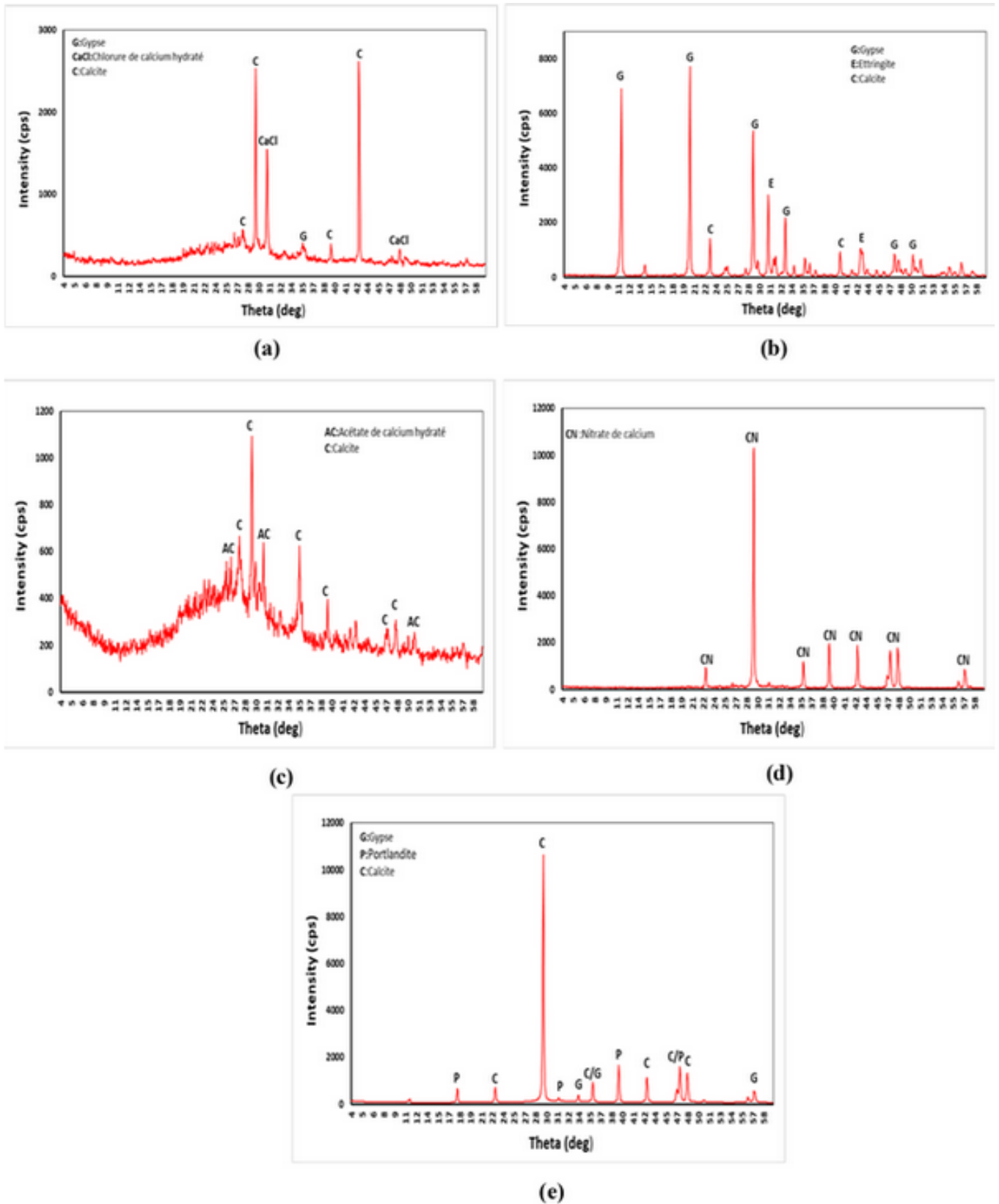


Figure III.20. (a). Schémas DRX des échantillons immergés dans l’HCl, (b). dans l’H₂SO₄, (c). dans le CH₃COOH, (d). Soumis à la lixiviation (e). sous l'eau du robinet

Les principaux résultats peuvent être regroupés sur la figure III.21.

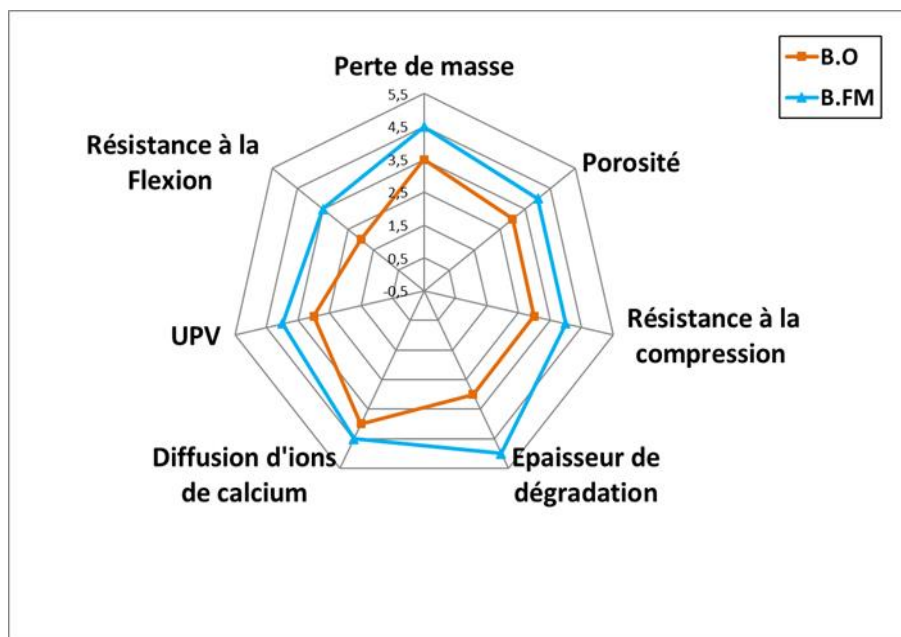


Figure III.21. Synthèse des résultats obtenus sur les bétons

III.3. Etude sur MBE

III.3.1. Attaques acides

i. Epaisseur de dégradation

La figure III.22 illustre l'évolution de l'épaisseur de dégradation des MBE. Pour une durée de 135 jours d'exposition, l'épaisseur dégradée des MBE sans fibres augmente 82%, de 79% et de 75% respectivement dans les solutions HCl, H₂SO₄ et CH₃COOH et de 93%, 90% et de 89% pour les MBE fibrés dans les mêmes conditions.

Ces résultats peuvent être attribués au phénomène de transport des matières qui est très important dans ces échantillons et qui peut être scindé en deux phases : une très forte variation dans la première phase suivie d'une stabilisation. L'évolution de la zone dégradée s'explique par la décalcification de la portlandite qui conduit à la microporosité et par la décalcification des hydrates C-S-H qui conduit à la macroporosité.

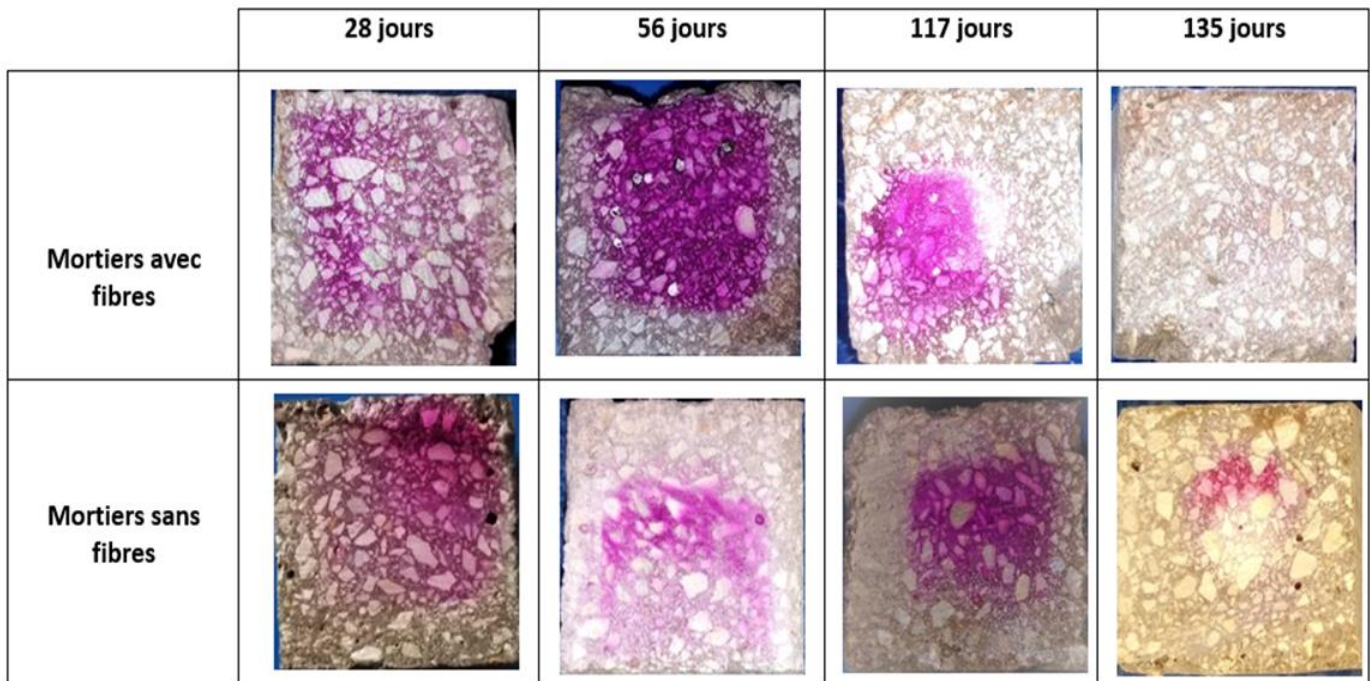
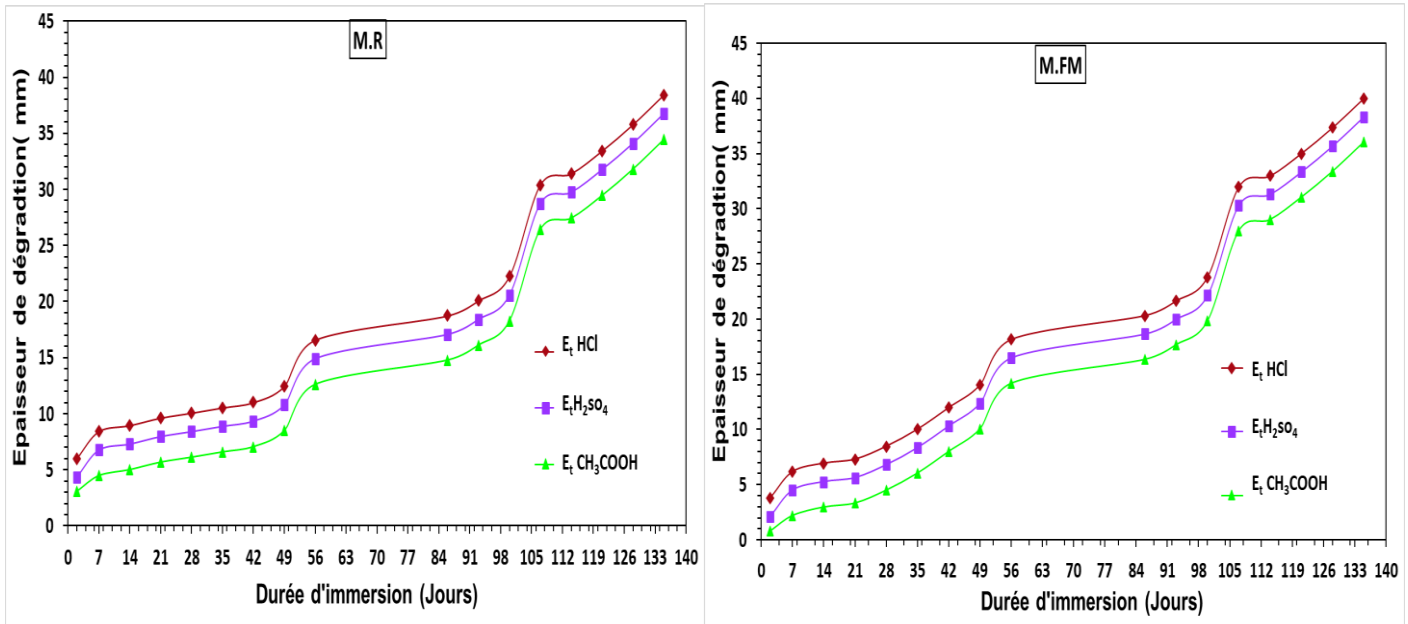


Figure III.22. L'évaluation de l'épaisseur de dégradation des MBE avec et sans fibres pendant 135 jours.

iii. Perte de masse

Le suivi de la perte de masse des MBE étudiés (figure III.23 a, b et c), avant et après les avoir noyé dans les trois solutions acides, a permis de confirmer les résultats obtenus sur les bétons. En effet, un gain de masse a été remarqué pour les échantillons immergés dans l'acide sulfurique (H₂SO₄) à cause de la formation de l'ettringite secondaire. Nos résultats corroborent parfaitement avec ceux de [Perlot et al, 2006] et [Benosman et al, 2017].

Par ailleurs, une perte de masse a été systématiquement enregistrée pour les éprouvettes plongées respectivement dans les deux solutions HCl et CH₃COOH en raison de la dissolution des hydrates de la matrice cimentaire.

Toutefois, en comparant les résultats obtenus sur les bétons et sur les MBE, il est clair que les graviers diminuent le processus de dégradation car ils ralentissent la vitesse de transport rapportée au volume de pâte.

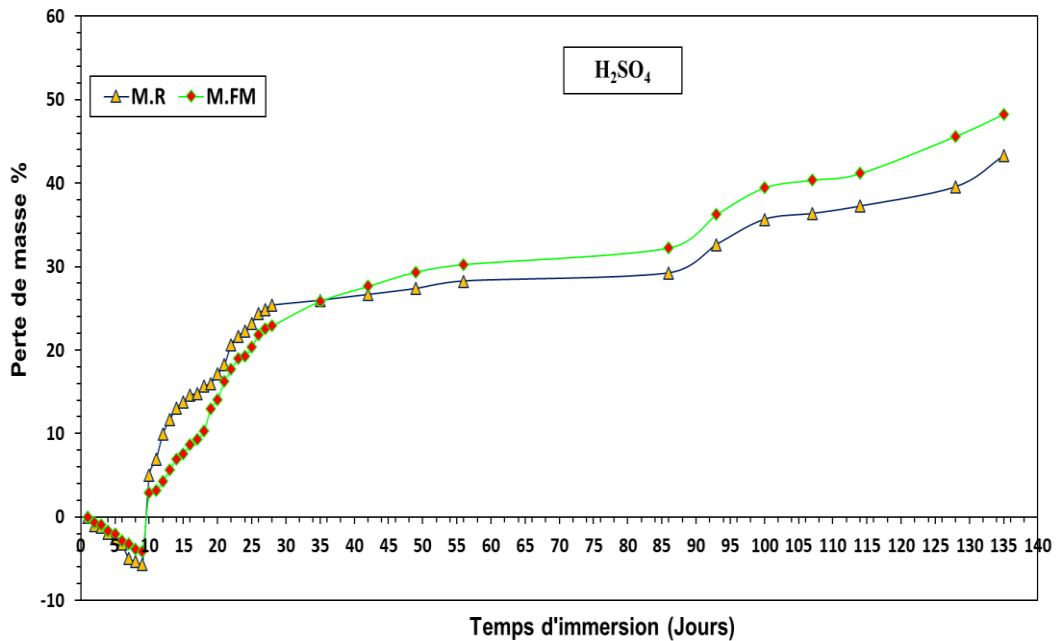


Figure III.23.a. Variation des masses des MBE dans H₂SO₄

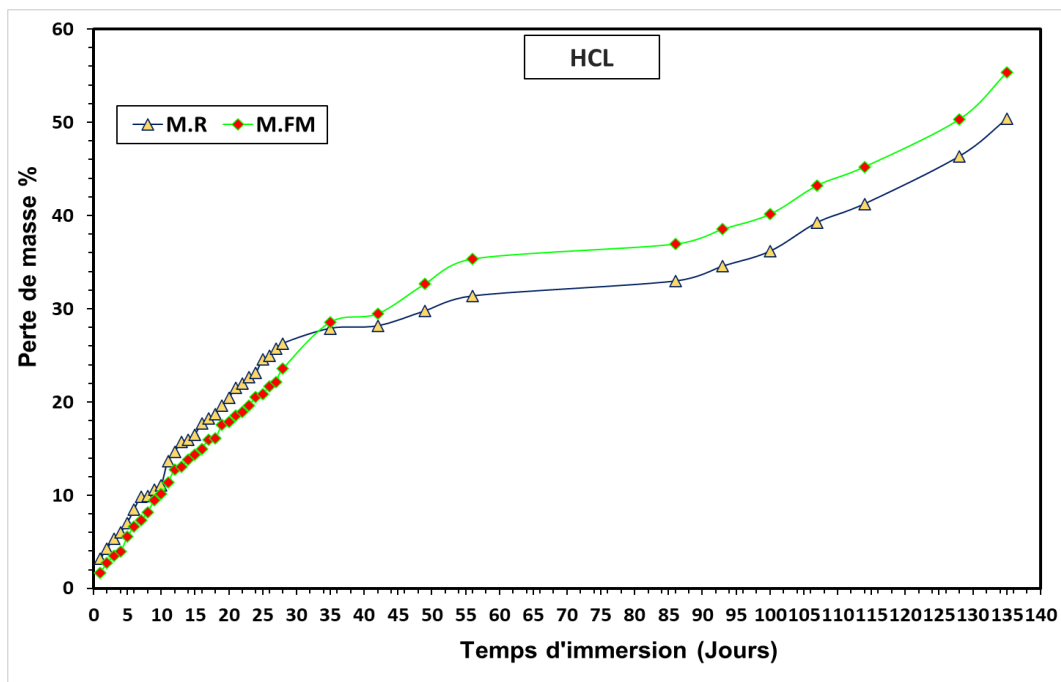


Figure III.23.b. Variation des masses des MBE dans HCl

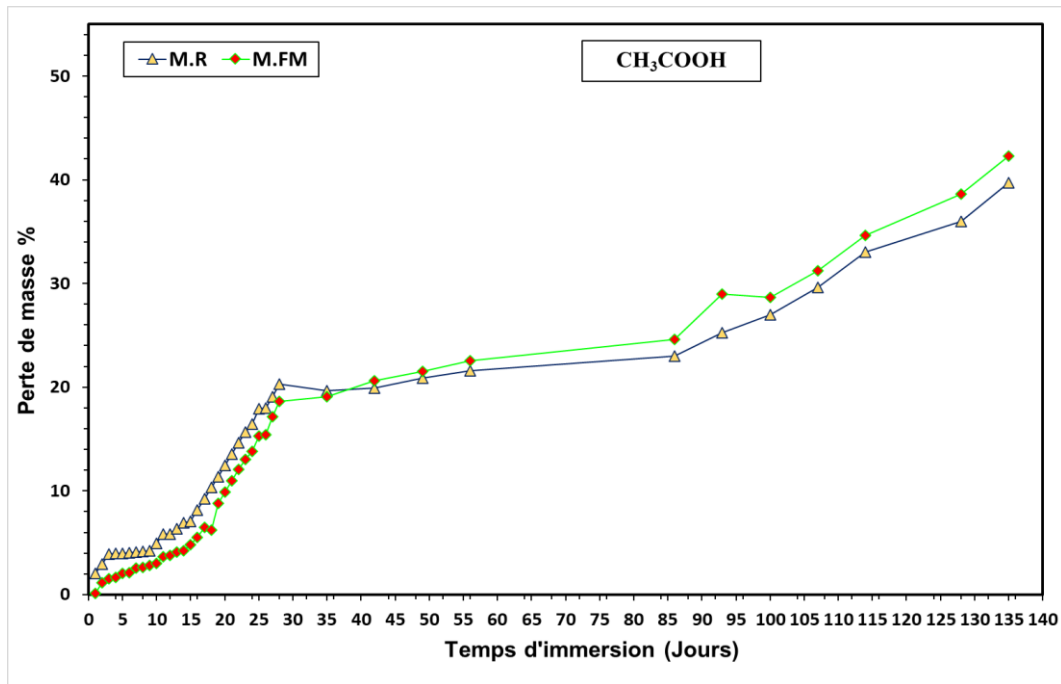


Figure III.23.c. Variation des masses des MBE dans CH_3COOH

iii. Porosité accessible à l'eau

Les résultats obtenus ont mis en évidence le rôle bénéfique joué par les fibres qui ont permis de colmater les vides et réduire en conséquence la porosité des MBE dans un milieu sain.

Toutefois, la porosité des MBE immergés dans les solutions acides a tendance à augmenter d'une manière presque linéaire dans le temps à cause du phénomène de transport des espèces solides notamment la portlandite et les CSH, ce qui provoque une augmentation du coefficient de diffusion et du réseau poreux. Sur une durée de 135 jours d'immersion, on a enregistré une augmentation de la porosité des MBE fibrés de 56 %, 42 % et de 40% respectivement dans les solutions HCl , H_2SO_4 et CH_3COOH ; et de 31%, 23% et de 21% pour les MBE non fibrés dans les mêmes conditions, ce qui dévoile l'effet néfaste de la corrosion des fibres sur l'augmentation la porosité (figure III.24).

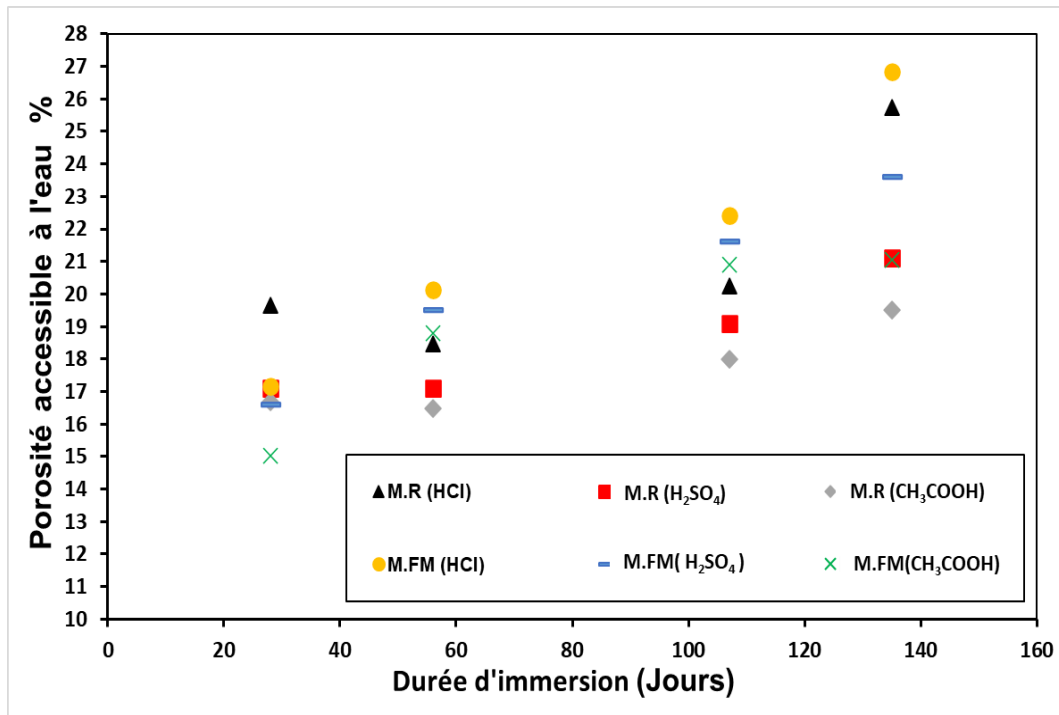


Figure III.24. Variation de la porosité des MBE dans les trois solutions agressives

iv. Vitesse ultrasonique

Les résultats représentés sur la figure III.25 montrent nettement que l'UPV diminue lorsqu'on expose les MBE à des solutions acides. Si la valeur de l'UPV d'un MBE fibré est égale à 4156.3 m/s avant immersion dans un milieu acide, elle passe à 2956 m/s, 3303 m/s et 3315.33 m/s une fois que les échantillons sont placés respectivement dans les trois solutions HCl, H₂SO₄ et CH₃COOH.

Pour les MBE non fibrés, la même tendance est notée. La moyenne de l'UPV passe de 3958.6 m/s à 3055.1 m/s, 3100 m/s et 3525.2 m/s après immersion des échantillons respectivement dans les trois milieux suscités.

Dans un milieu sain, on remarque aussi que l'UPV du MBE fibré est plus grand de 12% par rapport à celui d'un mortier non fibré. Par contre, cet avantage est rapidement perdu une fois que les MBE sont exposés à des milieux acides et plus particulièrement à l'HCl où on a noté une réduction de 40% de la valeur l'UPV pour le MBE fibré.

Par ailleurs, les résultats du module d'élasticité dynamique se corrént parfaitement avec les résultats des UPV. Le module d'élasticité dynamique a diminué de 44%, 36 % et de 16% pour le M. R et de 69%, 61 % et de 49% pour le M.FM lorsque les MBE sont noyés respectivement dans HCl, H₂SO₄ et CH₃COOH.

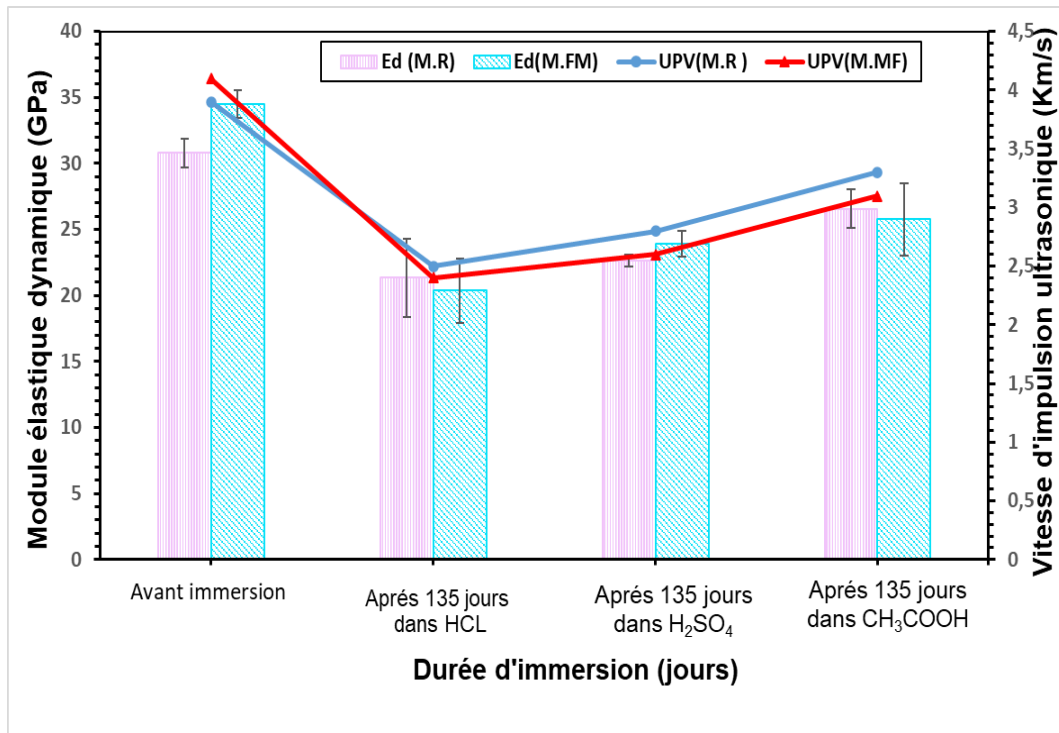


Figure III.25. Variation de la vitesse ultrasonique et du module dynamique MBE dans les trois solutions agressives

v. Résistance mécanique

Les résultats de la résistance à la compression obtenus après 135 jours d'immersion dans les trois acides HCl, H₂SO₄ et CH₃COOH sont illustrés dans la figure III.26.a. On peut remarquer que l'allure de la variation de la résistance des MBE dans les milieux acides est similaire à celle des bétons mais avec des taux de perte de résistances bien plus élevés. En effet, si la résistance à la compression des bétons fibrés a diminué de 73%, 63% et 60% respectivement dans les solutions HCl, H₂SO₄ et CH₃COOH, elle a cependant chuté de 86%, 74% et 67% dans le cas des MBE fibrés exposés respectivement aux mêmes solutions ; et si la résistance des bétons non fibrés a diminué de 62%, 58% et 52%, celle des mortiers non fibrés a baissé de 73%, 69% et 58% dans les trois solutions agressives. Ces résultats peuvent être en partie liés à la présence des graviers dans le béton qui jouent le rôle d'obstacle contre le phénomène de transport des matières et contre la propagation des fissures.

De plus, les MBE exposés à l'acide chlorhydrique (HCl) subissent la plus forte dégradation, suivis de ceux exposés à l'acide sulfurique (H₂SO₄) et à l'acide acétique (CH₃COOH).

La figure III.26.b fournit les résultats de la résistance à la flexion des MBE en fonction de la durée de leurs immersions dans les trois solutions agressives (HCl, H₂SO₄ et CH₃COOH). Ces résultats montrent que la résistance à la flexion des M.FM dégradés a diminué de 55%, 40% et

18% alors que celle des M.R. dégradés a baissé de 46%, 30% et 14% dans les mêmes conditions. Encore une fois, la corrosion des fibres par les acides semble sérieusement affecter la résistance des mortiers.

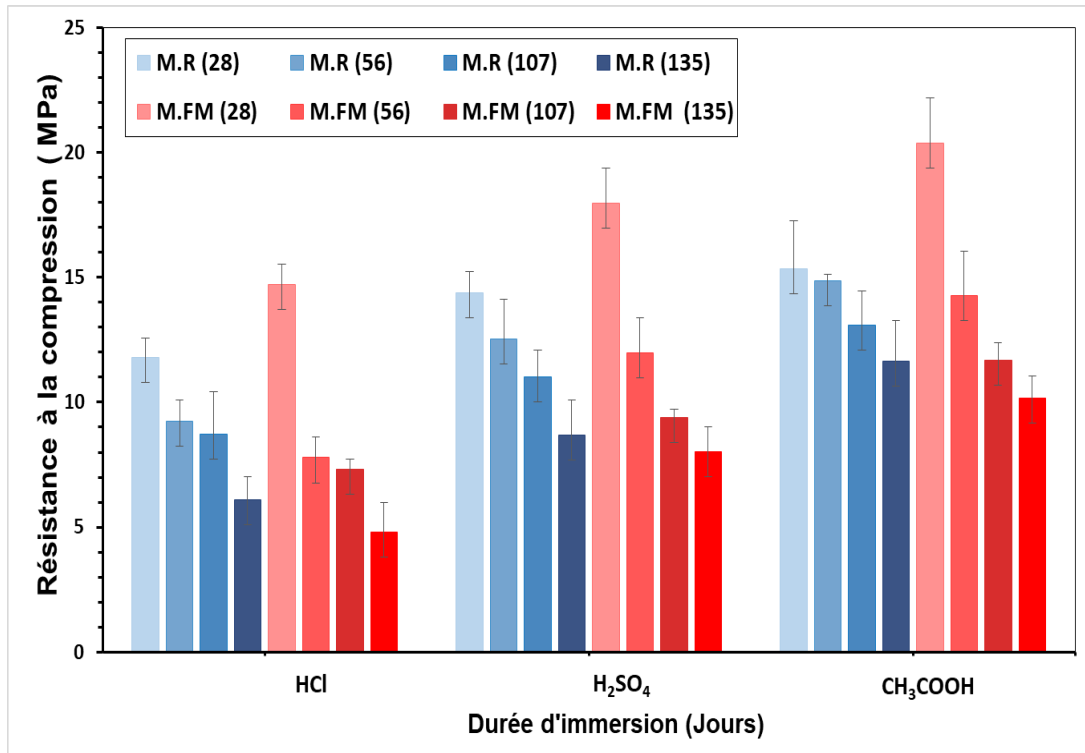


Figure III.26.a. Variation de la résistance à la compression des MBE dans les trois solutions agressives

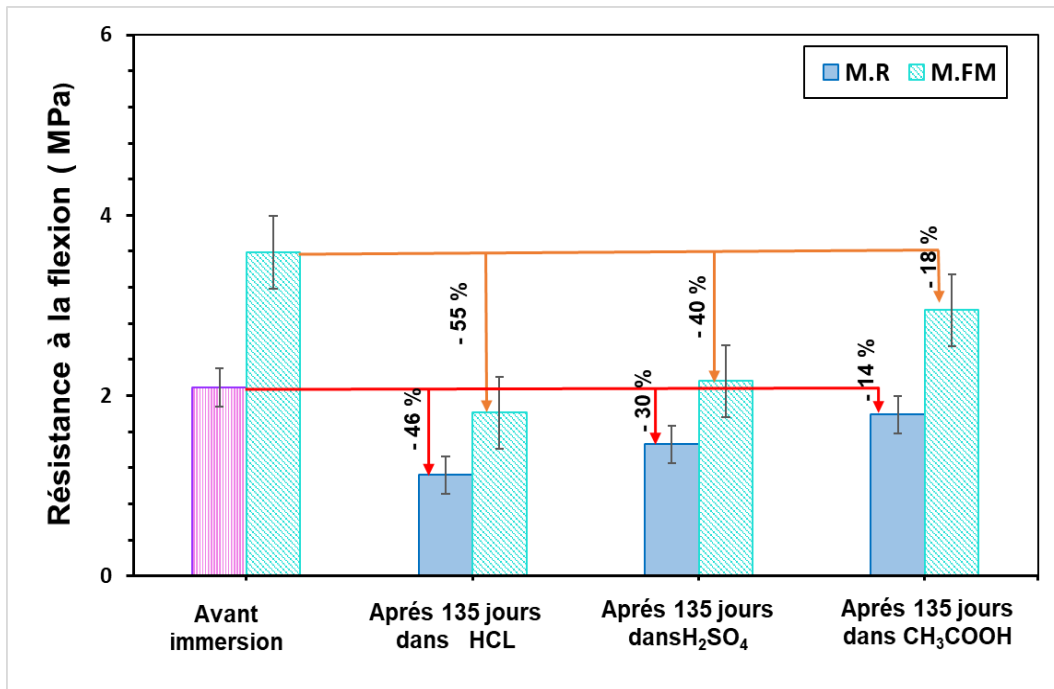


Figure III.26.b. Variation de la résistance à la flexion des MBE dans les trois solutions agressives

III.3.2. Lixiviation

i. Diffusion des ions de calcium

Les résultats représentés par la figure III.27 montrent que les composés solides riches en calcium se dissolvent à cause du gradient de concentration entre la solution de nitrate ammonium (pH = 5.9) et la solution interstitielle des MBE (pH supérieur à 12). La teneur en calcium des produits solides décroît avec la diminution de la concentration en calcium dans la solution porale.

La comparaison entre les résultats obtenus sur les bétons et sur les mortiers équivalents prouve encore une fois que la présence des graviers constitue un obstacle sur le cheminement du transport de la matière vers la pâte de ciment, ce qui ralentit le processus de diffusion des ions du calcium des pores vers l'environnement extérieur suite à l'augmentation de la tortuosité.

Par ailleurs, on remarque une stabilité de diffusion après 399 jours à cause de la cristallisation du nitrate de calcium dans les pores du matériau, ce qui empêche le processus de dissolution de la matrice cimentaire.

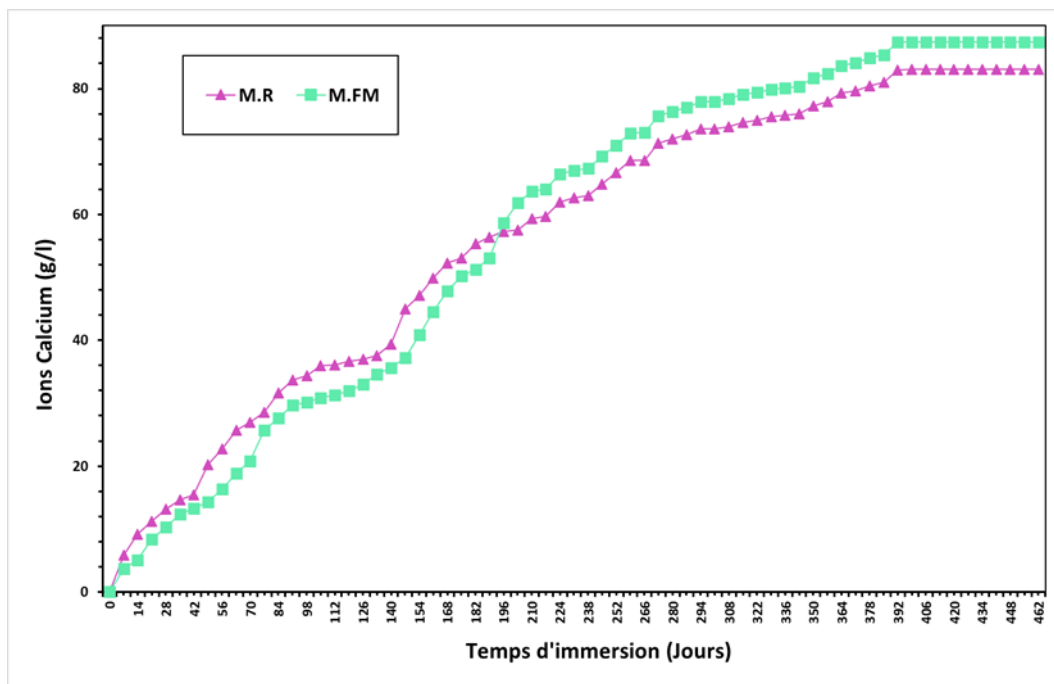


Figure III.27. La teneur en calcium lessivé des mortiers équivalents

ii. Conductivité électrique

La figure III.28 montre que l'évolution de la conductivité électrique passe par trois phases. Tout d'abord, elle augmente au cours des premiers jours jusqu'à une certaine limite où la tendance s'inverse et finit par se stabiliser. L'augmentation de la conductivité électrique est principalement régie par la concentration ionique et la mobilité des ions dissous dans la solution (Ca^{2+}). Par contre, la conductivité électrique s'est stabilisée après la consommation totale des hydrates de la matrice cimentaire. Nos résultats sont accord avec ceux de [Bush et ,2021].

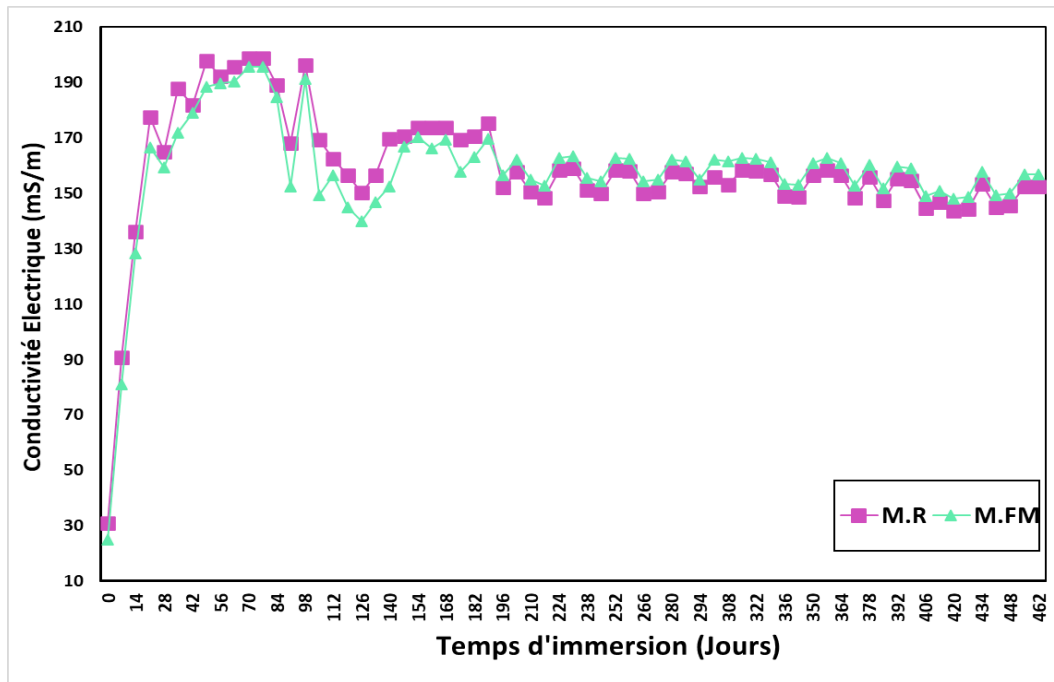


Figure III.28. La conductivité électrique des MBE avec et sans fibres

iii. Epaisseur de dégradation des MBE

La figure III.29 représente l'épaisseur de dégradation des différents mortiers de bétons équivalents noyés dans les solutions de nitrate ammonium en fonction de temps. Comme pour les bétons, les résultats montrent que les épaisseurs dégradées des mortiers des bétons fibrés équivalents (M.FM) sont plus faibles au cours des six premiers mois d'exposition par rapport aux mortiers de bétons équivalents de référence (M. R) à cause de la nature dense des M.FM et de l'apport des fibres qui provoque un retard de dissolution de la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Après 196 jours d'exposition, les M.FM sont devenus moins résistants à cause de la corrosion des fibres.

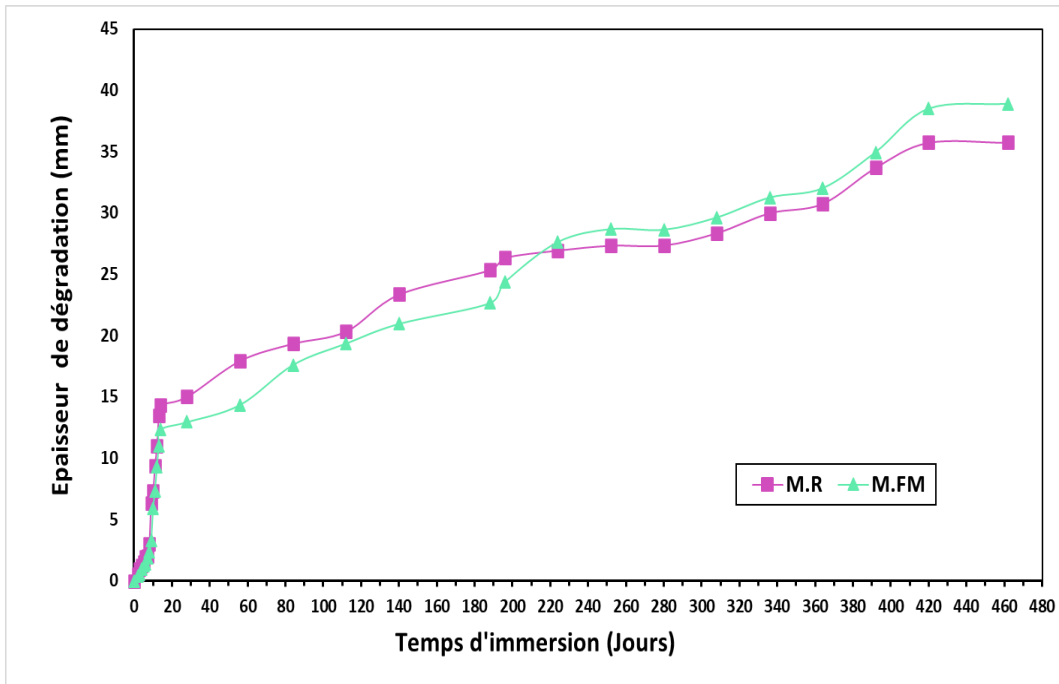


Figure III.29. Evolution de l'épaisseur de dégradation des MBE avec et sans fibres métalliques

v. Porosité accessible à l'eau

Les résultats de porosité sur les MBE sont en adéquation avec ceux obtenus sur des bétons. Il est clair que dans un premier temps, les MBE fibrés ont présenté des porosités plus faibles par rapport aux MBE non fibrés comme la montre la figure III.30. Après 196 jours, la porosité des MBE fibrés s'est amplifiée pour dépasser finalement celle des MBE de référence à cause de la corrosion des fibres.

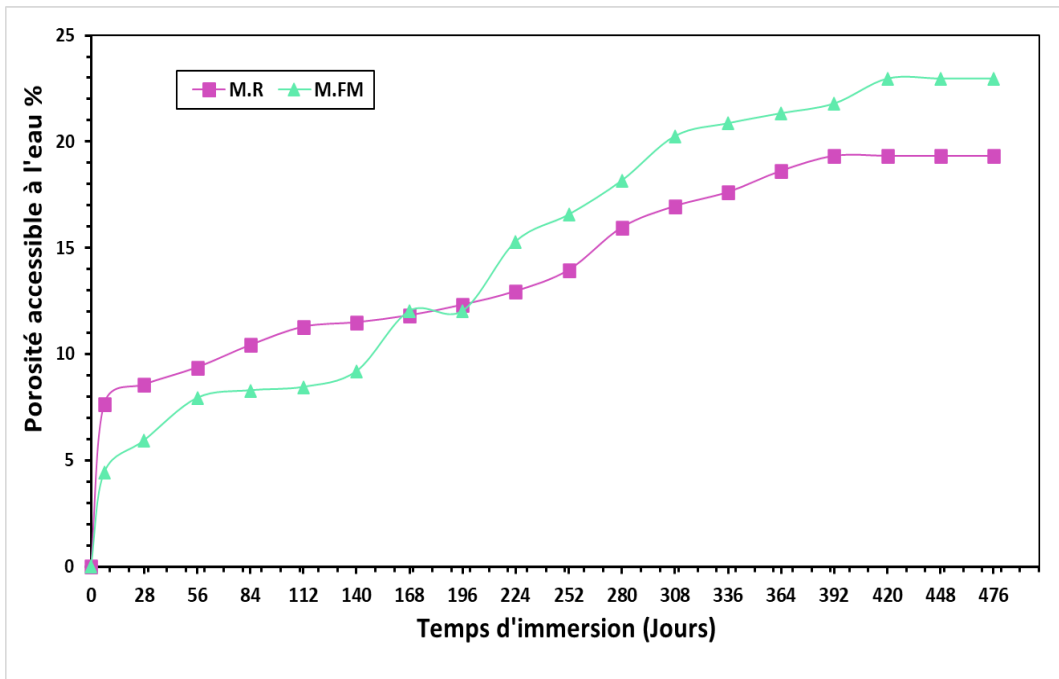


Figure III.30. Evolution de la Porosité accessible à l'eau des MBE avec et sans fibres

Les principaux résultats obtenus sur les MBE peuvent être regroupés sur la figure III.31

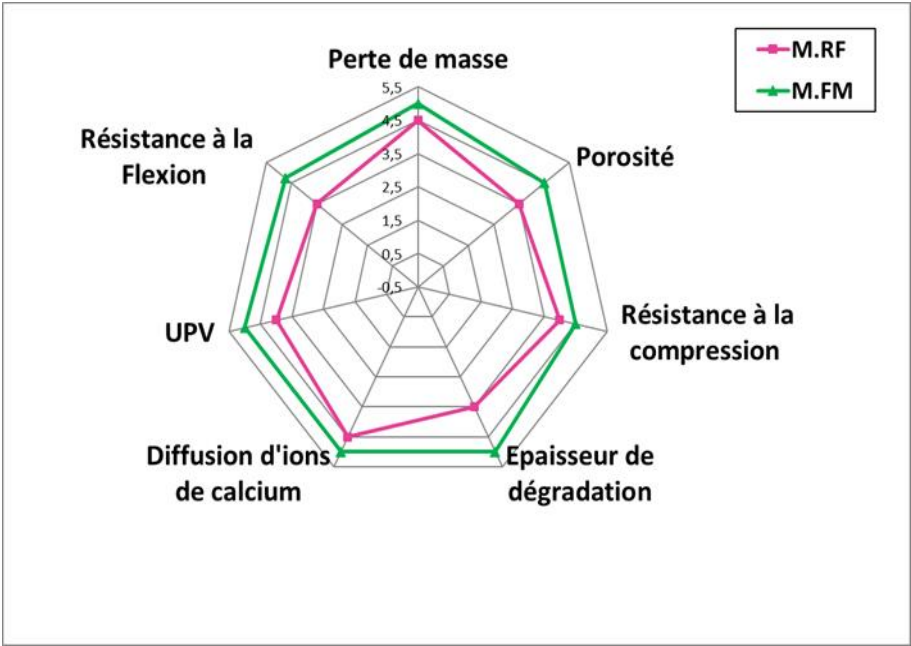


Figure III.31. Synthèse des résultats obtenus sur les MBE

III.4. Corrélations entre les différentes grandeurs des bétons

III.4.1. Corrélacion entre la perte de masse et la porosité

La figure III.32 montre que la corrélation entre la porosité et la perte de masse due aux attaques acides est parfaitement linéaire, avec des coefficients de détermination (R^2) assez intéressants de l'ordre de 0,72 pour le B.O et de 0.90 pour le B.FM. Cette corrélation est justifiée car les deux paramètres se basent sur la connectivité des pores et la perméabilité de la microstructure de la matrice. L'existence des pores conduit dans un premier temps à la dissolution du $\text{Ca}(\text{OH})_2$ suivi par les CSH, ce qui entraîne des résistances aux acides plus faibles et des pertes de masse plus élevées .

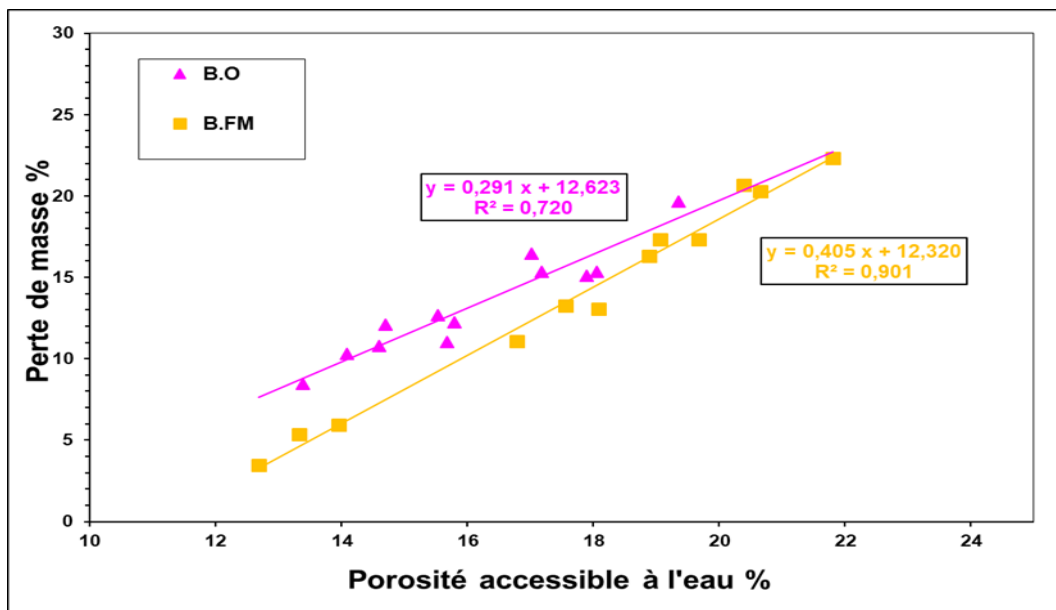


Figure III.32. Corrélacion entre la porosité et le pourcentage de perte de masse due à l'attaque acide.

III.4.2. Corrélacion entre la perte de masse et la résistance à la compression

Les résultats illustrés sur la figure III.33 montrent qu'il existe une autre corrélation significative entre la perte de masse et la résistance mécanique qui suit une tendance linéaire. Cette relation peut s'expliquer par le fait que l'augmentation de la perte de masse provoque la diminution des performances mécaniques des bétons.

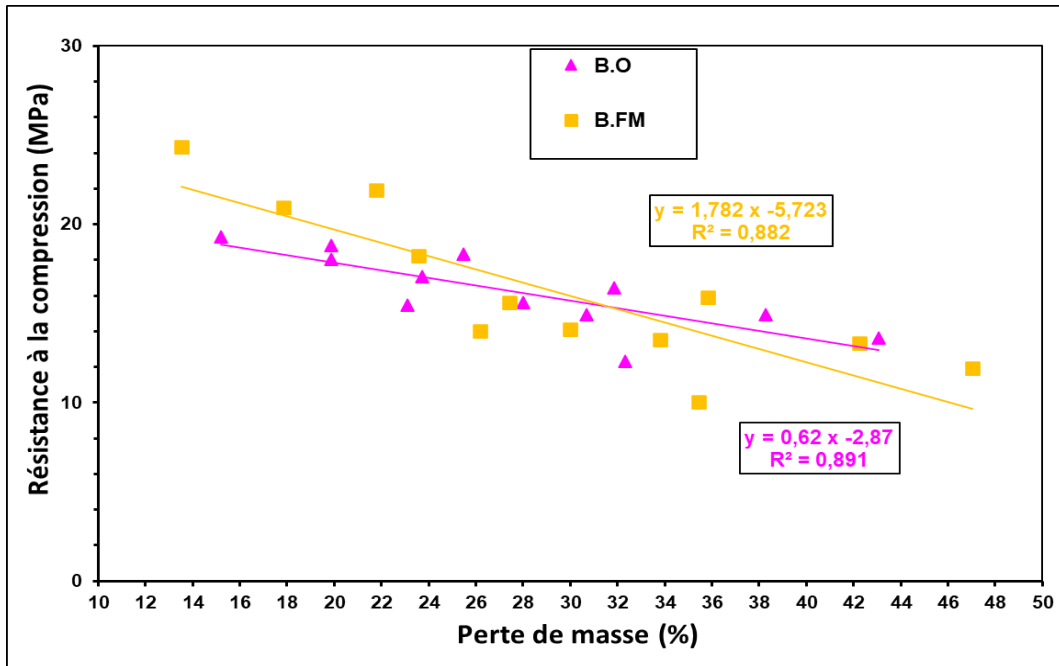


Figure III.33. Corrélation entre la résistance à la compression et le pourcentage de perte de masse due à l'attaque acide.

III.4.3. Corrélation entre la porosité et la résistance à la compression

La relation entre la résistance à la compression et la porosité accessible à l'eau est représentée sur la figure III.34. La résistance à la compression est inversement proportionnelle à la porosité. En effet, ce résultat assez connu montre que la résistance à la compression est fortement liée par le volume des pores et la distribution de la taille des pores.

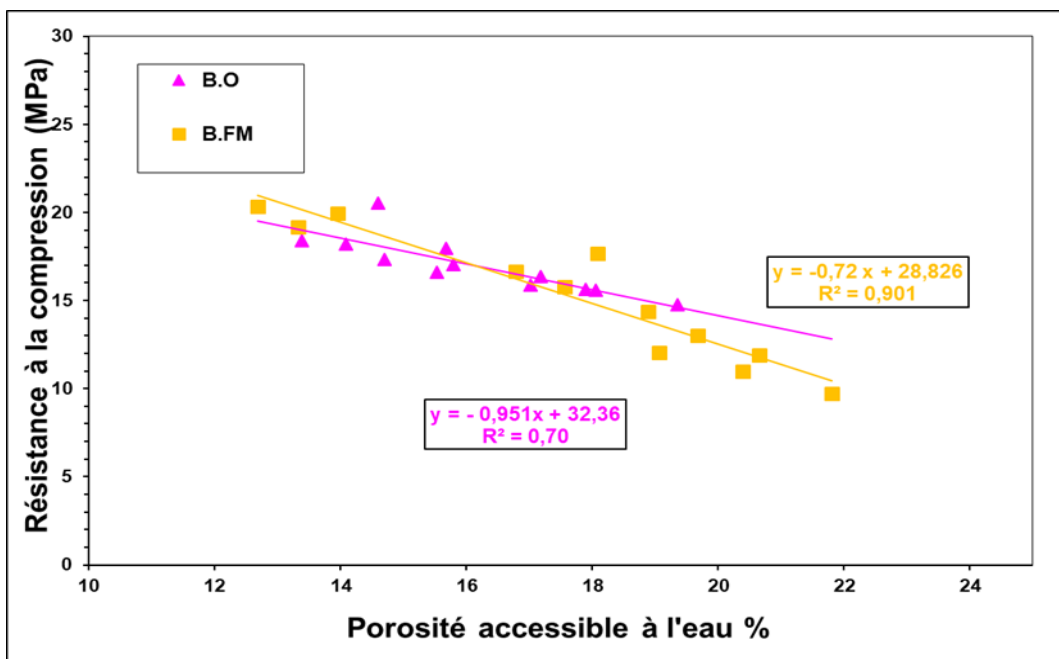


Figure III.34. Corrélation entre la porosité et la résistance à la compression

III.4.4. Corrélation entre la vitesse ultrasonique et la porosité

La relation entre la vitesse ultrasonique avec la porosité est représentée sur la figure III.35. La relation linéaire indique que la transmission des ondes sonores est inversement proportionnelle à la porosité.

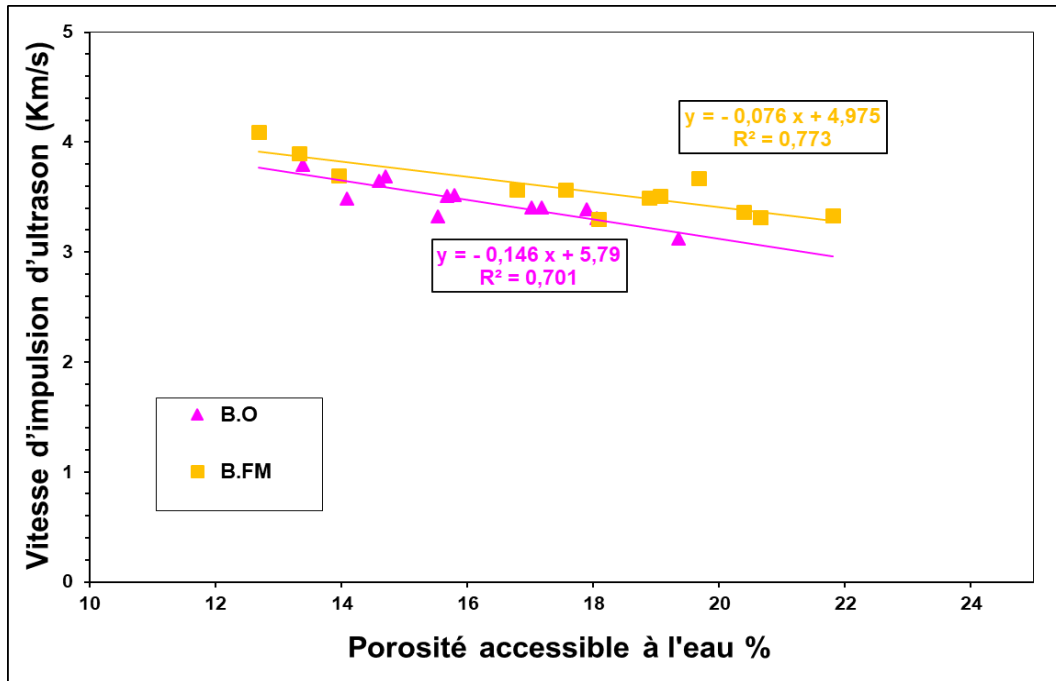


Figure III.35. Corrélation entre la vitesse ultrasonique et la porosité.

III.4.5. Corrélation entre les ions de calcium diffusés et la porosité

La figure III.36 illustre la relation entre la diffusion des ions de calcium et la porosité des bétons. Les coefficients de corrélation de 0.88 et 0.89 respectivement pour les bétons fibrés et non fibrés indiquent qu'il existe bel et bien une relation linéaire entre les ions de calcium diffusés et la porosité. Il apparaît que la quantité des ions de calcium diffusés augmente systématiquement avec la porosité.

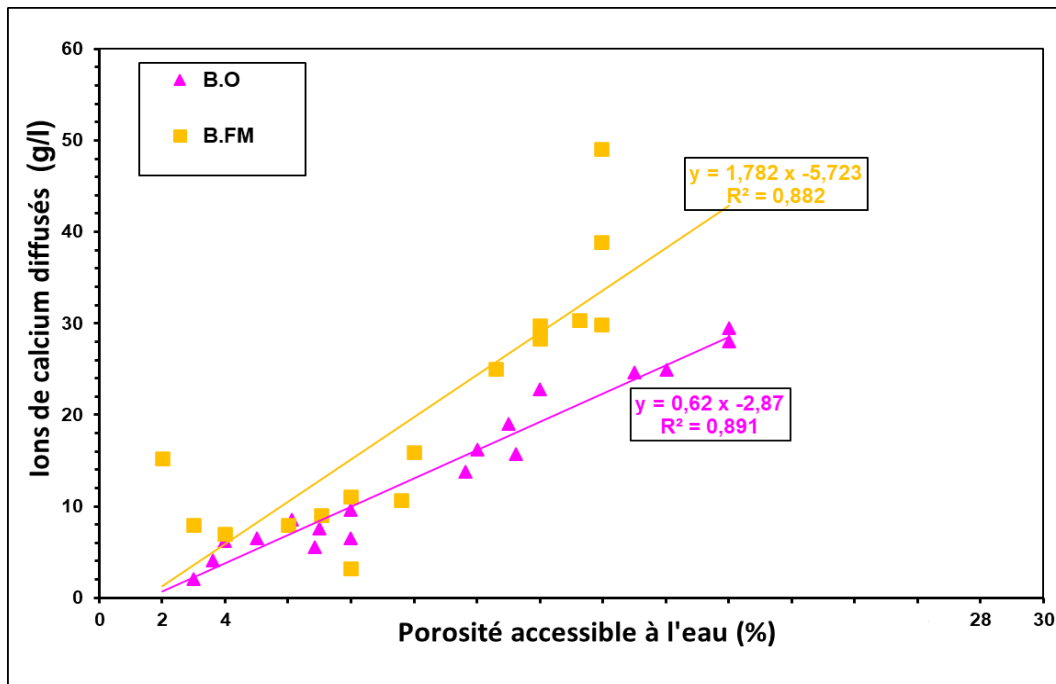


Figure III.36. Corrélation entre les ions de calcium diffusés et la porosité

III.5. Corrélations entre les différentes grandeurs des MBE

Le tableau III.1 résume les principales corrélations développées entre les différentes grandeurs des mortiers.

Tableau III.1. Corrélations entre les différentes propriétés des MBE

Propriétés	Mortiers de bétons équivalents (M.R)	Mortiers de bétons équivalents avec fibres (M.FM)
Perte de masse - Porosité	$y = 0.384x + 10.02$ $R^2 = 0.930$	$0.420x + 11.06$ $R^2 = 0.951$
Perte de masse – résistance à la compression	$y = -0.475x + 19.94$ $R^2 = 0.894$	$-0.536x + 20.14$ $R^2 = 0.927$
Porosité - UPV	$y = -0.152x + 2.850$ $R^2 = 0.873$	$-0.248x + 3.610$ $R^2 = 0.731$
Ions de calcium _ porosité	$y = 2.781x - 3.289$ $R^2 = 0.910$	$0.120x - 2.010$ $R^2 = 0.901$

III.6. Corrélation entre les propriétés des bétons avec les MBE associés

III.6.1. Perte de masse

L'analyse des résultats montre qu'il existe une relation de type polynomiale de degré 3 qui relie la perte de masse des bétons avec celle de leurs mortiers associés (Figure III.37).

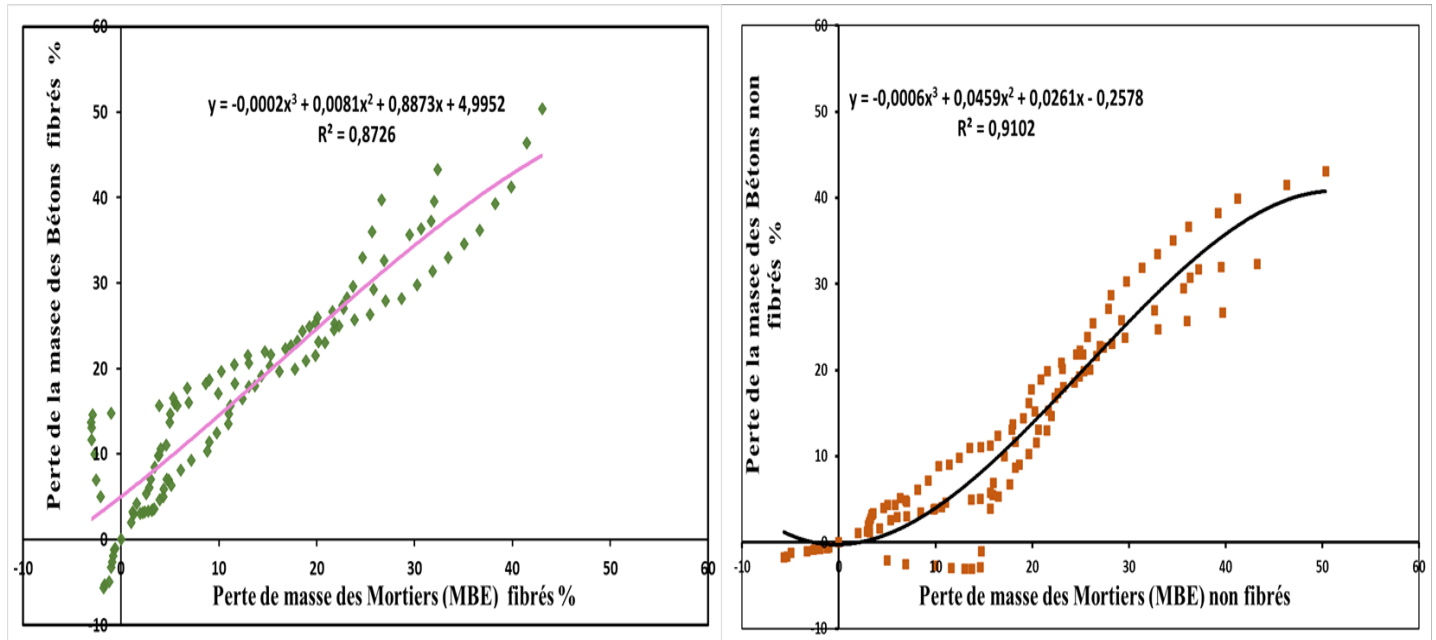


Figure III.37. Relation entre la perte de masse des bétons et des MBE

III.6.2 Epaisseur de dégradation

Les figures III.38 (a et a') et III.38 (b et b') présentent les relations entre l'épaisseur de dégradation des bétons et celle des mortiers MBE associés (attaques acides et lixiviation). On constate qu'il existe une corrélation significative qui relie les épaisseurs de dégradations quelques soit le type d'exposition.

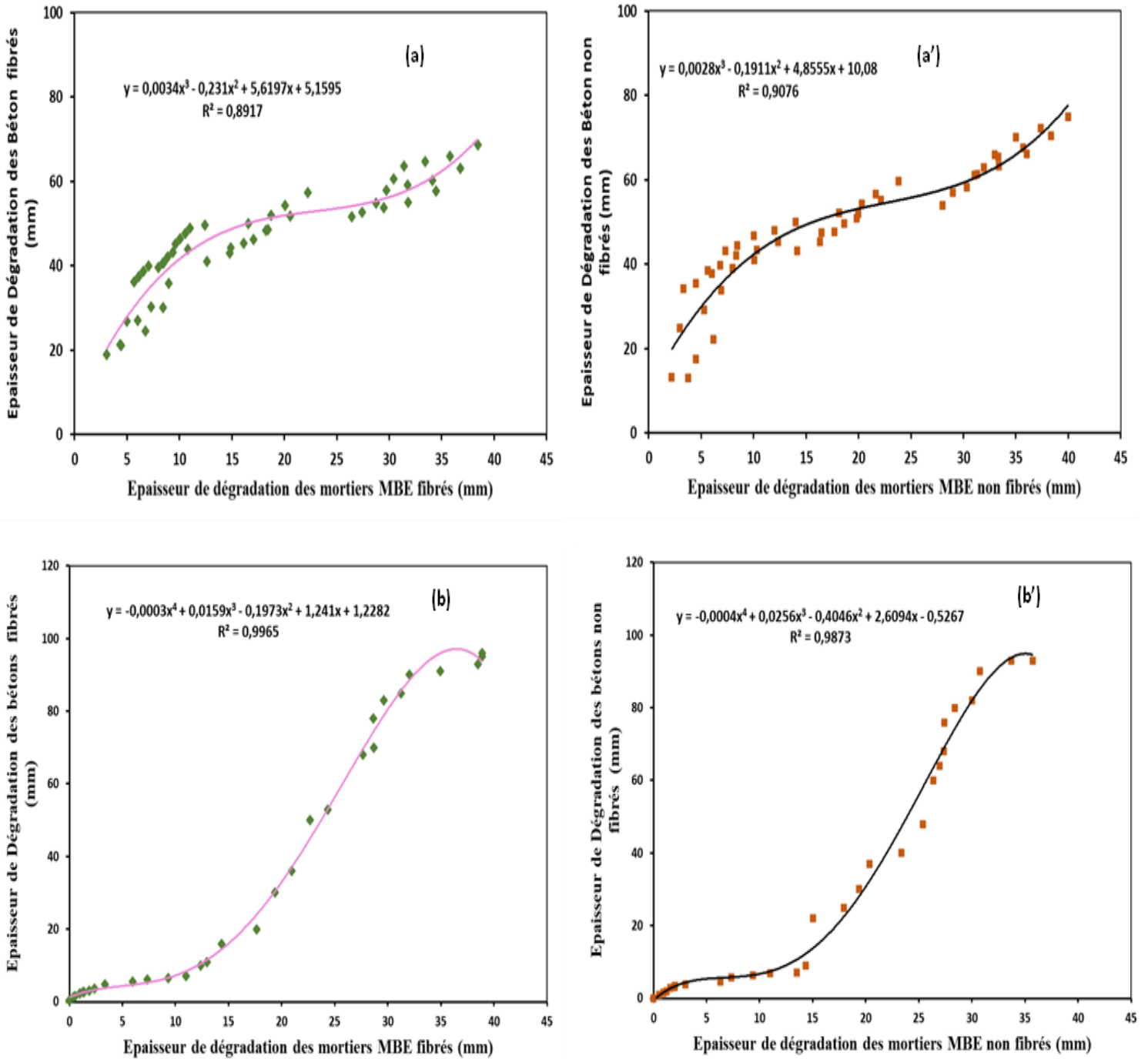


Figure III.38. Relation entre l'épaisseur de dégradation des bétons et perte de masse des MBE (a) et (a') attaques acides, (b) et (b') phénomène de lixiviation

III.6.3. Porosité accessible à l'eau

Les figures III.39 (a et a') et III.39 (b et b') montrent qu'il existe une relation parfaitement linéaire entre la porosité des bétons avec celle de leurs mortiers associés quel que soit la nature de l'exposition.

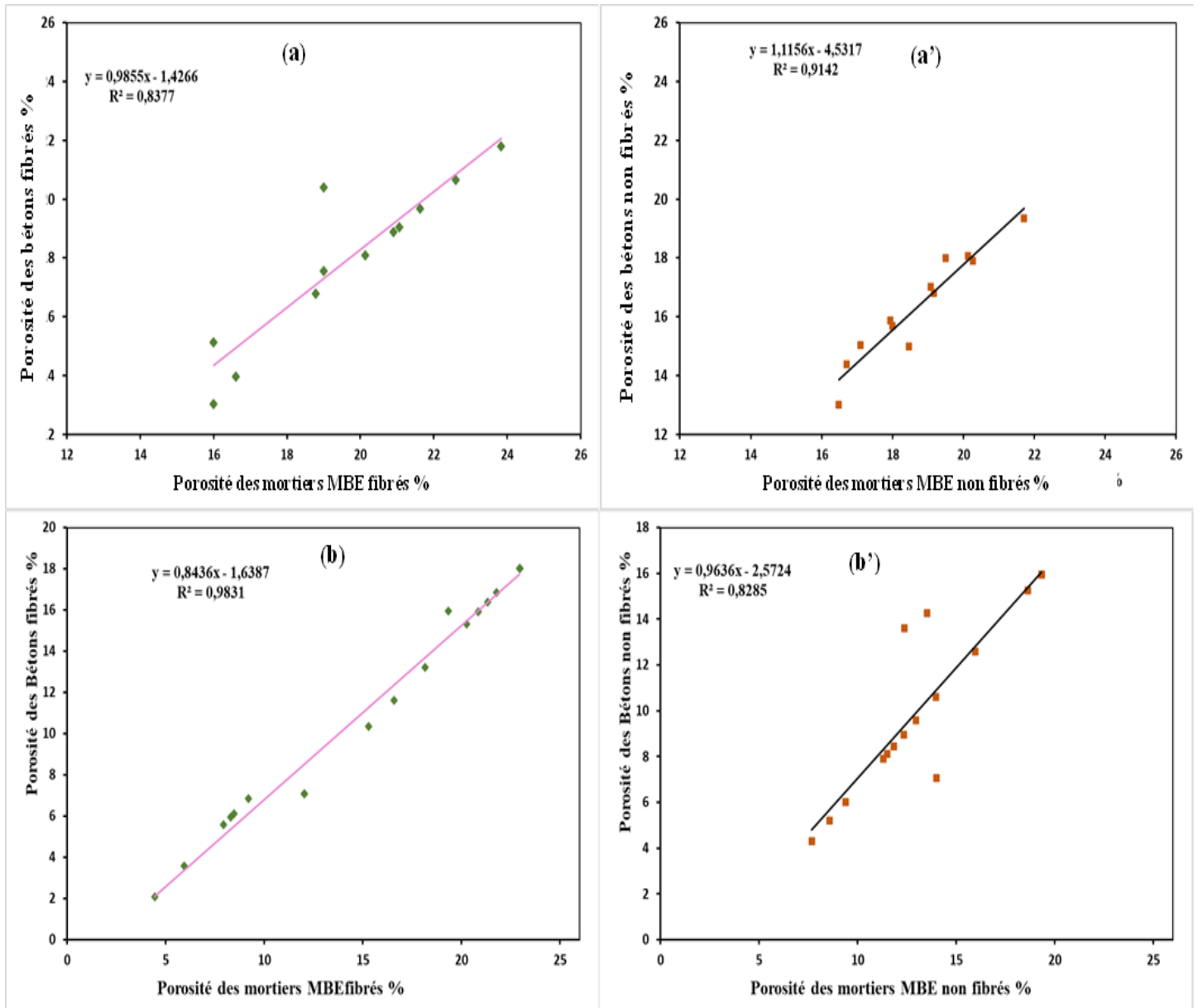


Figure III.39. Relation entre porosité accessible à l'eau des bétons et des MBE (a et a') attaques acides, (b et b') phénomène de lixiviation

III.6.4. Propriétés mécaniques

Une autre corrélation significative est distinguée entre les propriétés mécaniques des bétons avec celles de leurs mortiers équivalents (R^2 entre 0.80 et 0.96 et pour la résistance à la compression entre 0.90 et 0.96 pour la résistance à la flexion) (figures III.40 (a et a') et (b et b')).

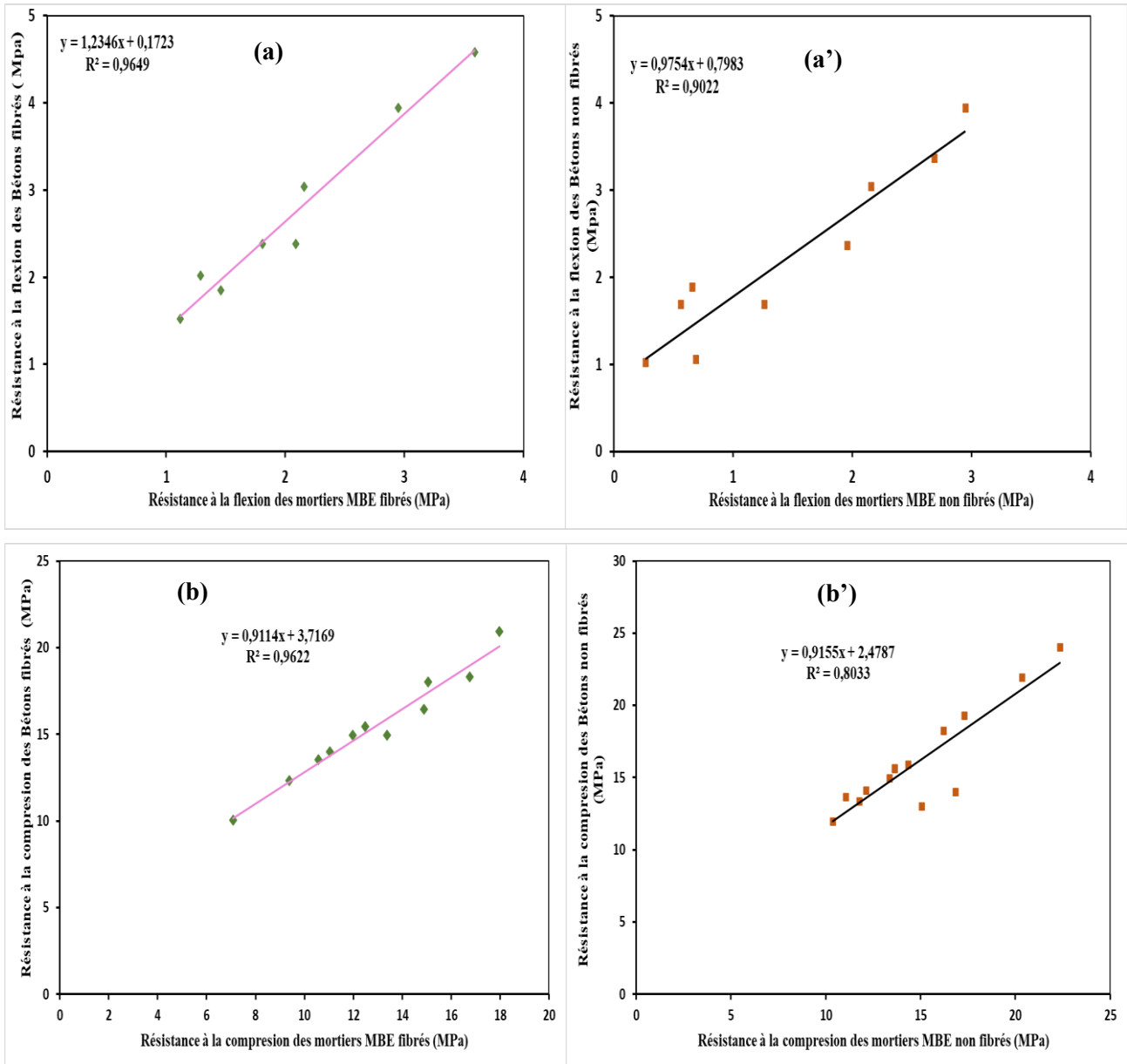


Figure III.40. Relation entre des bétons et des MBE (a et a') résistance flexion, (b et b') résistance compression

III.6.5 Ions calciums lessivés

La figure III.41 montre qu’il existe une corrélation révélatrice entre le taux des ions calciums lessivés dans les bétons avec ceux lessivés dans les MBE. Ceci montre bien que le transport de la matière dans les bétons et dans les mortiers est presque identique.

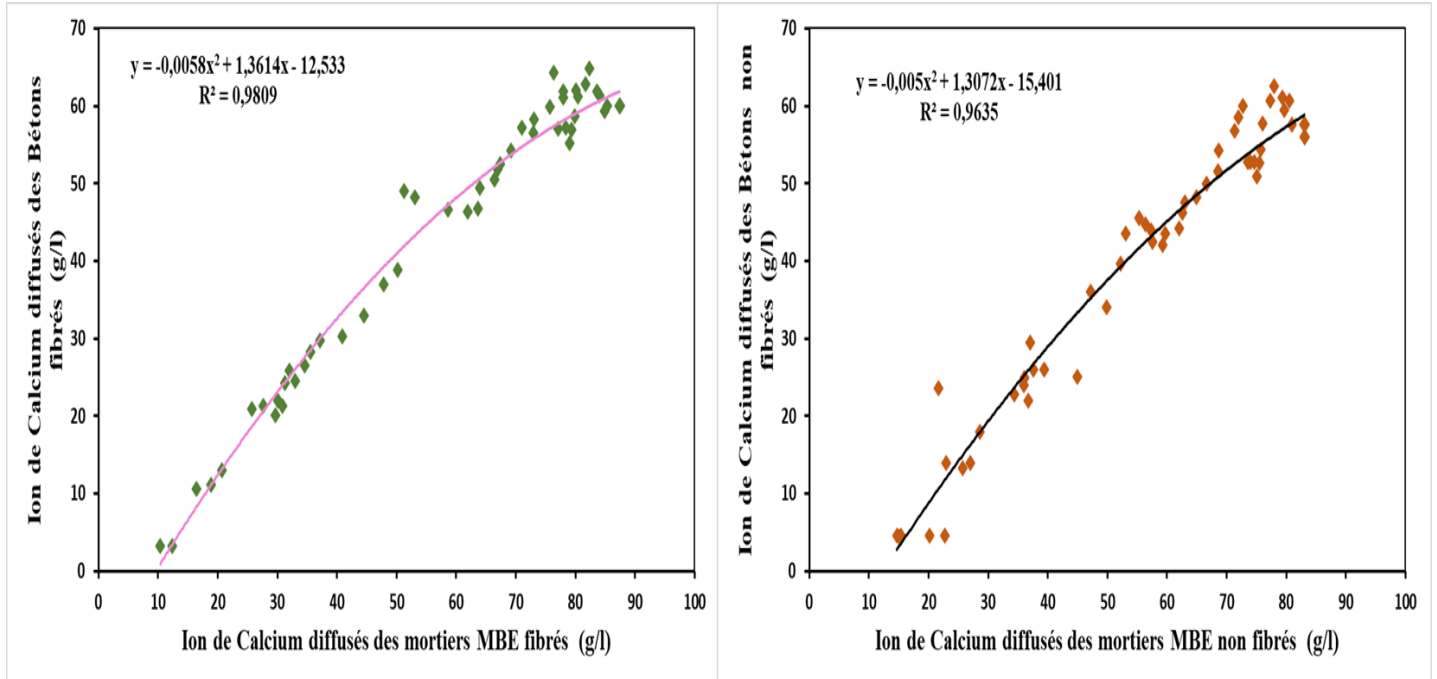


Figure III.41. Relation entre les ions de calcium lessivés des bétons et des MBE

La figure III.42 présente une synthèse comparative entre les résultats obtenus sur les bétons et sur les MBE.

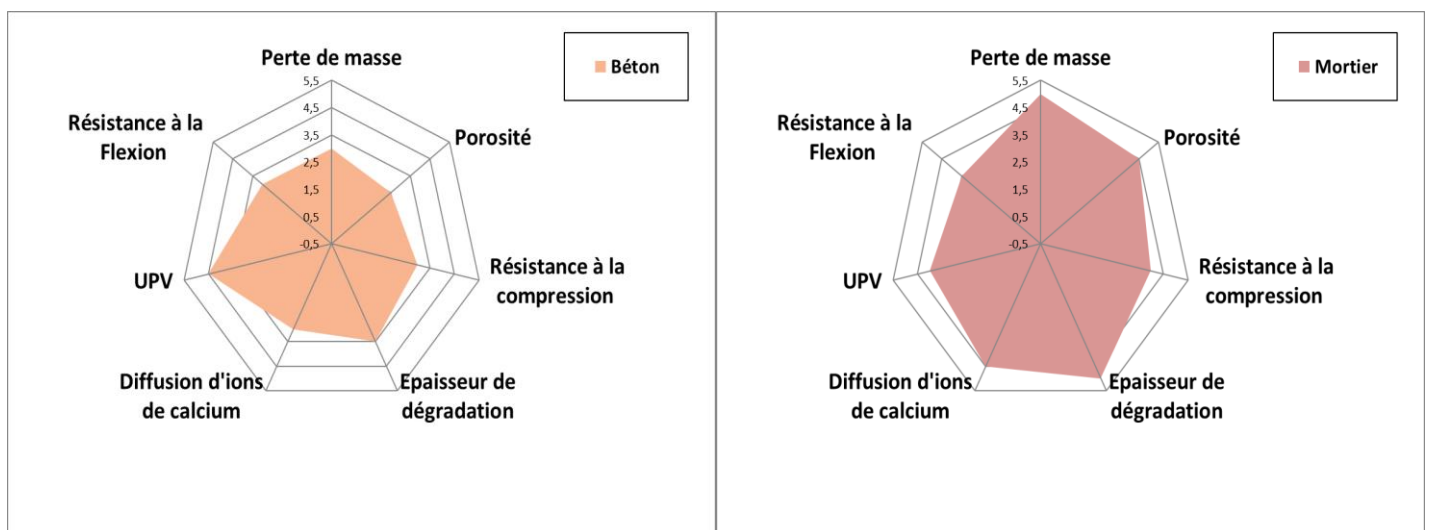


Figure III.42. Synthèse comparative entre les résultats obtenus sur les bétons fibrés et sur les MBE associés

III.7. Conclusion

Une étude expérimentale de la durabilité vis-à-vis des attaques acides et au phénomène de la lixiviation a été menée sur des bétons et sur leurs mortiers associés (MBE). L'objectif consistait aussi à mettre en évidence l'effet des fibres métalliques et trouver des relations corrélatives entre les caractéristiques des bétons avec celles de leurs mortiers équivalents. Les principaux résultats obtenus sont résumés comme suit :

- Dans un environnement sain, un taux de 1% de fibres métalliques dans le béton permet de réduire la porosité de 14% et d'améliorer la résistance à la compression de 20 à 25 % et la résistance à la flexion de 43 à 57 % après 135 jours. Ce même taux de fibres génère une augmentation de 13 à 21% du module d'élasticité dynamique (Ed).
- Après 135 jours d'immersion, l'accroissement de la porosité des bétons sans fibres peut avoisiner 16%, 14% et 12% respectivement dans les solutions HCl, H₂SO₄ et CH₃COOH, et peut atteindre jusqu'à 44%, 38% et 36% pour les bétons fibrés noyés respectivement dans ces mêmes solutions.
- Après 135 jours d'immersion dans les trois solutions choisies dans notre étude, la dégradation chimique par les acides provoque une diminution de la résistance à flexion de l'ordre de 30%, 18% et 11% pour les bétons sans fibres et de l'ordre de 48%, 35% et 14% pour les bétons fibrés.
- Les résultats montrent que le module d'élasticité dynamique diminue toujours après une immersion de 135 jours des bétons dans un milieu acide. Cette diminution est plus conséquente pour les bétons exposés à l'HCl d'une part et pour les bétons fibrés d'une autre part.
- Dans un milieu fortement acide, le béton fibré commence à perdre de son efficacité au bout d'un mois et demi environ en raison de la corrosion des fibres et du phénomène de transport de la matière.
- Le caractère acide des solutions agressives est fortement responsable de la dégradation des bétons. De plus, les bétons exposés à l'acide chlorhydrique (HCl) subissent la plus forte dégradation, suivis de ceux exposés à l'acide sulfurique (H₂SO₄) et à l'acide acétique (CH₃COOH).
- Les solutions acides augmentent considérablement la porosité du béton. En effet, il a été constaté par analyse au microscope à balayage électronique que l'ITZ des bétons fibrés exposés à l'HCl augmentait d'environ 10 fois par rapport à l'ITZ des bétons stockés dans un

environnement sain. En parallèle, l'ITZ des bétons fibrés immergés dans la solution H_2SO_4 a augmenté de 7 fois ; et de 6 fois pour les échantillons conservés dans CH_3COOH .

- Le béton fibré exposé au nitrate d'ammonium (NH_4NO_3) présente une meilleure résistance par rapport à un béton non fibré car le processus de diffusion des ions calcium dans le cas de la lixiviation est beaucoup plus lent par rapport aux attaques acides.

- La corrosion des fibres amplifie la quantité des ions calcium lessivés et rend les bétons fibrés vulnérables.

- Les cinétiques de dégradation des MBE et des bétons sont presque identiques.

- Les pertes des performances mécaniques, physico-chimiques sont deux (02) fois plus importantes chez les MBE par rapport aux bétons. Il est clair que les graviers permettent d'atténuer le processus de diffusion.

- Plusieurs corrélations significatives ont été trouvées entre les propriétés des bétons et celles des mortiers MBE associé

Conclusion générale

Conclusion générale et perspectives

Les bétons fibrés sont de plus en plus utilisés dans les ouvrages en bétons, notamment dans la réalisation des dalles, des tunnels, des chaussées des routes bétonnées et des pistes d'atterrissage des aéroports, dans les appuis des ouvrages d'art, dans les éléments préfabriqués, et très souvent dans le renforcement des ouvrages dégradés tel que les barrages, les piles des ponts, centrales nucléaires.....ect.

Cependant des problèmes subsistent encore et exigent des études appropriées surtout si la durabilité est remise en question.

La présente recherche s'inscrit dans ce cadre et vise à évaluer l'importance des ajouts de fibres sur le comportement des bétons exposés à des attaques acides et au phénomène de lixiviation.

L'analyse bibliographique a montré que fibres métalliques restent parmi les plus utilisées dans les bétons. De plus, plusieurs études recommandent un taux variant entre 1 et 1,5%. Un taux plus élevé pourrait avoir un effet négatif sur la résistance et sur la porosité des mélanges à cause d'une forte anisotropie.

Sous la lumière des résultats expérimentaux obtenus, les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- Dans un milieu sain, les fibres métalliques permettent d'augmenter la résistance à la compression de 25 %, et la résistance à la flexion d'environ 50% et le module d'élasticité dynamique (E_d) d'environ 15%.
- Après 135 jours dans un milieu acide, les bétons fibrés commencent à perdre leurs efficacités seulement après quelques semaines à cause de la corrosion des fibres métalliques, les résistances à la compression ont chuté d'une moyenne de 70 %, et de 32% pour les résistances à la flexion, alors que le module E_d a diminué de 43%.
- Toutefois, le pourcentage de dégradation est particulièrement gouverné par la nature de l'acide. L'acide chlorhydrique (HCl) reste le plus redoutable, suivi par l'acide sulfurique (H_2SO_4) ensuite de l'acide acétique (CH_3COOH). On remarque qu'après 135 jours d'exposition des bétons fibrés à ces trois acides, le taux de dégradation est respectivement de l'ordre de 84%, 79% et 72%.
- L'étude de la microstructure a révélé que l'ITZ des bétons fibrés exposés à l'HCl a décuplé, et a pratiquement septuplé pour les bétons fibrés immergés dans les autres solutions agressives.

Conclusion générale

- Concernant le phénomène de lixiviation, la quantité des ions calcium lessivés augmente significativement quand les fibres s'oxydent impliquant une porosité accrue.
- Sur une durée de 135 jours, les épaisseurs de dégradation des échantillons exposés au nitrate d'ammonium (NH_4NO_3) sont deux fois plus petites que celles des spécimens exposés aux acides. Ce constat montre clairement que le processus de lixiviation est nettement plus lent que celui des attaques acides.
- La chronologie de dégradation des MBE s'apparente à celle des bétons, sauf que les pertes de leurs performances sont deux fois plus importantes. Ce constat montre que les graviers jouent un rôle très important dans le ralentissement du phénomène de transport de la matière.
- Les relations corrélatives développées dans ce travail restent un outil efficace pour prédire le comportement des bétons à l'égard des attaques chimiques uniquement à partir d'essais sur des mortiers de bétons équivalents. Elles permettent ainsi de réduire la pénibilité des essais au niveau du laboratoire.
- Enfin, il est recommandé d'utiliser des inhibiteurs de corrosion, ou encore utiliser des résines de protection pour les bétons fibrés, et ceci dans le but d'assurer une meilleure durabilité vis-à-vis des attaques chimiques.

Les perspectives de cette recherche sont nombreuses et peuvent s'exprimer comme suit :

- Étudier des bétons fibrés vis-à-vis des attaques chimiques en incorporant des inhibiteurs de corrosion dans les mélanges,
- Étudier l'effet hybride des fibres sur le comportement des bétons envers les attaques chimiques.
- Étudier le phénomène de lixiviation au niveau de l'ITZ : matrice cimentaire – fibres,
- Étudier l'influence de la solution interstitielle des bétons sur le comportement des fibres.

Références

- Abdelghafour M. (1989), Réalisation et mise au point d'un test de lixiviation sous pression, application à la stabilisation des boues et d'épuration d'eaux industrielles. Thèse de doctorat INSA de Lyon, France .
- Abdeliazim M.M., Bassam A. Tayeh , Yazan I. Abu Aisheh ,Musab Nimir A.S(2023),Exploring the performance of steel fiber reinforced lightweight concrete: A case study review, Case Studies in Construction Materials 18,e01968 . <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01968>
- Abu Aisheh Y.I., Atrushi D.S., Akeed M.H.,Qaidi S., Tayeh B.A.(2022), Influence of polypropylene and steel fibers on the mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced geopolymer concrete, Case Studies in Construction Materials17, e01234. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01234>
- Achour A., GhomariF. Belayachi N.(2017), Properties of cementitious mortars reinforced with natural fibers, Journal of Adhesion Science and Technology ,31(17),1-25,1938–1962. doi:10.1080/01694243.2017.1290572 <http://dx.doi.org/10.1080/01694243.2017.1290572>
- Adams M. (1975), Behaviour of steel fibre concrete under different loading conditions, RILEM, comm. 4.11, 527-53.
- Adenot F. et Buil M. 1992, Modeling of the corrosion of the cement by deionized water. Cement and Concrete research, 22(4).
- Adenot F., Faucon P., Bournazel J. P. et Malier Y.(1996),Modélisation du comportement à long terme des bétons utilisés dans le stockage des déchets radioactifs. In International RILEM Conference on Concrete: from Material to Structure, RILEM Publications SARL, 277–288.
- AFPC-AFREM (2007), Durabilité des bétons : Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité. <https://scholar.google.com/scholar?q=méthodes+recommande+>
- Alexandra M. (2005), Etude et modélisation de l'orientation de fibres dans des thermoplastiques renforcés, Thèse de doctorat, Ecole des mines de Paris, France.
- Ammari M.S, Belhadj B. , Bederina M., Ferhat A., Quéneudec M.(2020),Contribution of hybrid fibers on the improvement of sand concrete properties: Barley straws treated with hot water and steel fibers, Construction and Building Materials,233,117374 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117374>
- Assaad, J., Khayat, K.H. (2004), Assessment of thixotropy of self- consolidating concrete and concrete-equivalent-mortar – Effect of binder composition and content,ACI Materials Journal, 101(5), 400 – 408.

Assaad, J., Yehia, D. (2016), Use of the Equivalent Mortar Phase to Assess Thixotropy of Fresh SCC – Prediction of Interfacial Bond Strength between Successive Placement Lifts, *Applied Rheologie*, 26, 42759. <https://doi.org/10.3933/applrheol-26-42759>

ASTM C39-12(2013), Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. American Society for Testing and Materials. Annual Book of ASTM Standards (pp. 23–29).

ASTM C597-16 (2016), Standard Test Method for Pulse Velocity through Concrete.

ASTMC215-02 (2003), Standard test method for fundamental transverse, longitudinal and torsion .

Badoz C., Francisco P., Rougeau P.(2006), A Performance Test to Estimate Durability of Concrete Products Exposed to Chemical Attacks, In: Proceedings of the second International congress of FIB, June 5 -8,

Bajza A., Rousekva I. et Vrana O.(1986), Corrosion of hardened cement paste by ammonium nitrate. In 8th International Congress of the chemistry of cement, Rio de Janeiro, 5, 99–103.

Balaguru P. (1994), Fiber Reinforced Concrete for structural Components. A state of art, Workshop on Fiber Reinforced cement & concrete, Sheffield, U.K.

Baley C., (2006), Propriétés des fibres extraites de phanérogames marines (zostera marina), Renforcement des polymères par des fibres végétales, journée scientifique technique – AMAC, 16 (1), 41-48.

Banthia N. et Trottier J.F.(1994), Concrete Reinforced with Deformed Steel fibers, Part I: Bond-slip mechanisms. *ACI Materials Journal*, 61(5), 435-446.

BARRAGÁN B. (2002), Failure and toughness of steel fiber reinforced concrete under tension and shear. PhD thesis, Universitat Politecnica de Catalunya, Spain.

Bartos P. (1981), Revue paper Bondin fiber reinforced cement and concret, *USA Inst J of cem. Compos* 3 ,31-37.

Beddoe R.E. (2005), Modelling acid attack on concrete: part I. The essential mechanisms, *Cement and concrete research*. 35, 2333–2339. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.04.002>.

Beddoe R.E. (2016), Modelling acid attack on concrete: part II. A computer model, *Cement and concrete research*. 88, 20–35, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.10.01>

Belaidi A, Boukli Hacene M.A., Kadri E.H., Taleb O. (2021) Tribological behavior of concrete with different mineral additions, *Advances in Concrete Construction*, 11(3), 231-238 <https://doi.org/10.12989/acc.2021.11.3.231>

Belas Belaribi N., Semcha A., Laoufi L.(2003),Influence of the Beni-Saf pozzolana on the mechanical characteristics of the concretes,Canadian Journal of Civil Engineering, 30(3),5804.<https://doi.org/10.1139/103-029>

Belferrag A.,Kriker A., Khenfer E.(2007),Valorisation des fibres métalliques issues des déchets pneumatiques dans les matériaux de constructions en zones sahariennes, Annales de la Faculté des Sciences et des Sciences de l'Ingénieur,1 (2). <https://journals.univ-ouargla.dz>

Benosman A.S. , Mouli M. , Taibi H. , Belbachir M..Senhadj Y.(2011), Resistance of Polymer (PET) - Mortar Composites to Aggressive Solutions, International Journal of Engineering Research in Africa 5 ,1-15. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JERA.5.1>

Benosman A.S., Mouli M., Hamed T., Belbachir M., Senhadji Y., Bahlouli I., Houivet D.(2017) Chemical, mechanical and thermal properties of mortar composites containing waste, Environmental Engineering and Management Journal,16(7), 1489-1505.
<http://omicron.ch.tuiasi.ro/EEMJ/>

Bentalha M., Houari H.(2007), Etude du comportement des matrices cimentaires renforcées de fibres métalliques sous chargement monotone croissant., sciences & technologie b (25), 51-58.<http://revue.umc.edu.dz/index.php/b/article/view/204>

Bentz D.P., Garboczi E.J. (1992), Modelling the leaching of calcium hydroxide from cemenpaste : effect on pore space percolation and diffusivity. Materials and Structures, 25, 73-79.

Berner U. R. (1992), Evolution of pore water chemistry during degradation of cement in aradioactive waste repository environment. Waste Management, 12(2),201–219.

Bessadok A., Marais S., Gouanvé F., Colasse L., Zimmerlin I., Roudesli S., Métayer M.(2007) , Effect of chemical treatments of Alfa (Stipa tenacissima) fibres on water-sorption properties ; Composites Science and technology, 67,685-697.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.compscitech.2006.04.013>

Boukli Hacene S. M. A (2010), Contribution à l'étude de la résistance caractéristique des bétons de la région de Tlemcen, Thèse de doctorat, Tlemcen, Algérie.

Bourdette B. (1994), Durabilité du mortier : prise en compte des auréoles de transition dansla caractérisation et la modélisation des processus physiques et chimiques d'altération. Thèse de doctorat, Institut national des sciences appliquées de Toulouse,France.

Brandt M.(2008), Fiber reinforced cement-based (FRC) composites after over40 years of development in building and civil engineering. Compos Structure , 86, 3–9.

Brixi N.K., Sail L., Bezzar A. (2022), Application of ascorbic acid as green corrosion inhibitor of reinforced steel in concrete pore solutions contaminated with chlorides, *Journal of Adhesion Science and Technology*,36,11. [https://doi.org/ 10.1080/01694243.2021.1962090](https://doi.org/10.1080/01694243.2021.1962090).

Brunetaud X., R., Divet L., Duragrin D.(2007), Damidot D., Effect of curing conditions and concrete mix design on the expansion generated by delayed ettringite formation, *Materials and Structures*, 40 (6), .567-578. <https://doi.org/10.1617/s11527-006-9163-3>

BS EN 1097-3 (1998), Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 3: Determination of loose bulk density and voids, British Standard Institution.

BS EN 1097-6 (2013), Tests for mechanical and physical properties of aggregates. Part 6: Determination of particle density and water absorption.

BS EN 12390-5 (2009), Testing hardened concrete. Part 5: Flexural strength of test specimens.

BS EN 196-6 (2018), Methods of testing cement. Part 6 Determination of fineness.

BSEN 933-1 (2012), Tests for geometrical properties of aggregates. Part 1: Determination of particle size distribution – Sieving method.

Bush J.A,Vanneste J.,Leavitt D.,BergidaJ.,Krzmarzick M.,Kim S.J,Ny C.,CathT.Y. (2021) ,Membrane distillation crystallization of ammonium nitrate solutions to enable sustainable cold storage: Electrical conductivity as an in-situ saturation indicator, *Journal of Membrane Science*Vol 631, 119321. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2021.119321>

Butschi P. Y.(2004), Utilisation du chanvre pour la fabrication d'éléments de construction, Thèse de Maitrise en Sciences Appliquées, Thèse de doctorat, Université de Moncton, Canada.

Cai X., He Z., Shao Y ., Sun H.(2016) ,Macro- and micro-characteristics of cement binders containing high volume fly ash subject to electrochemical accelerated leaching. *Construction and Building Materials*, 116, 25–35,<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.059>.

Camps G., Sellier A., Turatsinze A., Escadeillas G., Bourbon X. (2009), Modelling of leaching effects on fibre-reinforced concrete properties Toulouse, FR, in: *Concr. Aggress. Aqueous Environ. Performance, Test. Model*, 179–186

Cangiano S., Plizzari G.A., Cadoni E., Frigeri G., Teruzzi T. (2005), On durability of steel fibre reinforced concrete, in: R.K. Dhir, T.A. Harrison, M.D. Newlands (Eds.), *international conference cement combustion. Durable concret*, 477–486, [https://doi.org/ 10.1680/ccfdc.34013](https://doi.org/10.1680/ccfdc.34013)

Capmas A.(2008), Béton et développement durable, LA DURABILITE DES BETONS, Thèse de doctorat de l'Ecole des Ponts et Chaussées.

Carde C. (2007), Pthologie : L'Ettringite, *Laboratoire d'Etudes et de Recherches sur les Matériaux*,9.

Carde C. et Francois R.(1997) ,Effect of the leaching of calcium hydroxide from cement paste on mechanical and physical properties. Cement and Concrete Research, 27(4).

[https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(97\)00042-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(97)00042-2)

Carde C.,(1996.),François R. et Torrenti J. M. : Leaching of both calcium hydroxide and csh from cement paste : Modeling the mechanical behavior. Cement and concrete research. 26,(8) 1257-1268.[https://doi.org/10.1016/0008-8846\(96\)00095-6](https://doi.org/10.1016/0008-8846(96)00095-6)

Casanova P. (1995), Bétons Renforcés de fibres métalliques du matériau à la structure, ENPC
Castellote M., Alonson C., Andrade C., Tirillas X., Campo J.(2004), Composition and microstructural changes of cement pastes upon heating - as studied by neutron diffraction, Cement and Concrete Research, 34, 1633-1644. <http://worldcat.org/issn/00088846>

Cement test methods - Part 1 (2011), Determination of strengths - Cement test methods.

Chen M.C., Wang K., L. Xi (2013), Deterioration mechanism of cementitious materials under acid rain attack, Engineering Failure Analysis 27 272–285.

<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2012.08.007>.

Cheng A., Chao S.J.,Lin W.L.(2013), Effects of Leaching Behavior of Calcium Ions on Compression and Durability of Cement-Based Materials with Mineral Admixtures Materials , 6, 1851-1872; [10.3390/ma6051851](https://doi.org/10.3390/ma6051851)

Comby-Peyrot L., Bernard F., Bouchard P.O., Bay F., Garcia-Daz E. (2009), Development and validation of a 3D computational tool to describe concrete behaviour at mesoscale. Application to the alkali-silica reaction, Computational Materials Science 46 ,1163- 1177.

<https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2009.06.002>

Dallel M. (2012),Evaluation du potentiel textile des fibres d'Alfa - (Stipa Tenacissima L.) : Caractérisation physico-chimique de la fibre au fil, Thèse de doctorat, Université de Haute Alsace.

Dame K. (2014), Etude du béton à l'échelle mesoscopique : simulation numérique et tests de microindentation, Thèse de doctorat Rennes, France.

Danèse S. (1997), Etude du couplage fissuration dégradation chimique des bétons : fissure modèle sur pâte de ciment. End-of-Studies Project, Ecole Nationale Supérieure des Arts et Industries de Strasbourg,

De Larrard T. (2010), Variabilité des propriétés du béton : caractérisation expérimentale et modélisation probabiliste de la lixiviation, Thèse de doctorat, LMT-Cachan Paris France.

Debora M., Carlessoaa A. F.,Sergio H., Pialarissi C. (2019), Fatigue of cracked high performance fiber reinforced concrete subjected to bending, Construction and Building Materials , 220(30) , 444-455.

Dehousse N. (1975), Méthode d'essais et caractéristiques mécaniques des bétons armés de fibres métalliques, RJLEM Symposium, 4, 119-136.

Dehousse, N., Lejeune, A., Kuykens, T. (1974) Les mortiers et bétons renforcés de fibres d'acier, Bruxelles, C.S.T.C., 2.

Delagrave A. (1996), Mechanisms of chloride ion penetration of normal and high performance cement based systems. Thèse de doctorat, Université de Laval, Canada.

Deng Y., Zhang Z., Shi C., Wu Z., Zhang C. (2021), Steel fiber–matrix interfacial bond in ultra-high performance concrete: A review, Engineering, <https://doi.org/10.1016/j.eng.2021.11.019>

Diedrichs U., Jumppanen U., Pentalla V. (1989), Behaviour of high strength concrete at elevated temperatures, Helsinki University of Technology, Department of Structural Engineering, report 92,7.

Ding Q., Tian Y., Wang F., Zhang F., Hu S. (2005), Autogenous shrinkage of high strength lightweight aggregate concrete, Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Science. Ed., 20 (40), 23-125. <https://doi.org/10.1007/BF02841302>

Devi CH., Vijayan D.S., Nagalingam R., Arvindan S. (2022), A review of the implementations of glass fiber in concrete technology, Materials Today: Proceedings, 62(4), 2010-2015. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.293>

Djebali S. (2013), Caractérisation des éléments de structures en béton de fibre métalliques, Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou, Algérie.

Dsouza N. (2018), Strength and durability aspects of steel fibre reinforced concrete, International Journal of Civil Engineering and Technology, 9, 948–957. <http://iaeme.com/Home/issue/IJCIET?Volume=9&Issue=7>

Dujian Z., Ming Z., Shanshan Q., Tiejun L., Wenhao T., Ao Z., Andrey J. (2022) Calcium leaching from cement hydrates exposed to sodium sulfate solutions, Construction and Building Materials, 351, 128975. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128975>

Eduardo N. B., Pereira, A.O., Joaquim, C., Barros Aires (2008), Steel Fiber-Reinforced Self-Compacting Concrete: Experimental Research and Numerical Simulation, Journal of Structural Engineering, 134, 8, 1310-1321. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2008\)134:8\(1310\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2008)134:8(1310))

Ellouze A., Ben Oueddou M., Karra Y. M. A., Beddey A. (2005), Étude des Bétons à Fibres renforcés par des Fibres Métalliques à Base de Matériaux Locaux. Colloque CMEDIMAT 06 et 07 Décembre 2005.

Fariborz M., Soleimani S.M., Banthia N., (2006), Shear strength of reinforced concrete beams with a fiber concrete matrix. Canadian Journal of Civil Engineering, 33(6), 726-734. <https://doi.org/10.1139/105-118>

- Ferrara L., Fratesi R., Signorini S., Sonzogni F. (2004), Durability of steel fibre reinforced concrete precast elements: experiments and proposal of design recommendations, in: M. Di Prisco, R. Felicetti, G.A. Plizzari (Eds.), 6th RILEM Symp. Fibre-Reinforced Concrete - BEFIB 2004, RILEM Publications SARL, Varenna, Italy. 565–574.
- Fritih Y. (2009), Apport d'un comportement d'élément en béton autoplaçant armé. Thèse de doctorat université de Toulouse, France.
- Gérard B. (1996), Contribution des couplages mécanique-chimie-transfert dans la tenue à long Terme des ouvrages de stockage de déchets radioactifs. Thèse de doctorat, Ecole normale supérieure, Cachan.
- Gerengi H., Kocak Y., Jazdzewska A., Kurtay M., Durgun H. (2013), Electrochemical investigations on the corrosion behaviour of reinforcing steel in diatomite and zeolite-containing concrete exposed to sulphuric acid, *Construction of Building Engineering* 49, 471–477, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat>.
- Le Maréchal J., Gérard B., Marchand J., Didry O. et Gagnon A. (1998), New accelerated leaching experiment : the LIFT procedure. Fourth CANMET/ACI International Conference on recent advances in concrete technology. Japon.
- Li H., Li L., Li L., Zhou J., Mu R., Xu M. (2022) Influence of fiber orientation on the microstructures of interfacial transition zones and pull-out behavior of steel fiber in cementitious composites, *Cement and Concrete Composites* 128, 104459. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104459>
- Lumingkewas, R.H. (2015). Development of materials for construction with low environmental Impact made with low content of cement and with natural fibers Thèse de doctorat Ecole doctorale SICMA BRETAGNE SUD.
- Gilebert G.T. (1983), Extrait de revue « Béton de fibres » travaux de laboratoire des bétons et structures, Institut National des Sciences Appliquées, Lyon, France. <https://doi.org/10.1002/adma.19930051032>
- Glasser F.P., Marchand J., Samson E. (2008), Durability of concrete — degradation phenomena involving detrimental chemical reactions, *Cement and concrete research*, 38, 226–246, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.09.015>.
- Goncalves A. et Rodrigues X. (1991), The resistance of cements to ammonium nitrate attack. Durability of Concrete. 2nd International Conference, Monreal, Canada.
- Gopalaratnam V.S., Shah S.P. (1985), Softening response of plain concrete in direct tension, *Journal Proceedings*, 82 (3) ,310–323.

Guermi L. (2013), contribution à l'amélioration de certaines caractéristiques du béton de structure à base de sable de dune corrigé et renforcé par des fibres métalliques, Thèse de magister, université Kasdi Merbah Ouargla, Algérie.

Haba B., Agoudjil B., Boudenne A., Benzarti K. (2017). Hygric properties and thermal conductivity of a new insulation material for building based on date palm concrete, *Construction and Building Materials*. 154, 963–971.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.025>

Han J., Zhao M., Chen J., Lan X. (2019), Effects of steel fiber length and coarse aggregate maximum size on mechanical properties of steel fiber reinforced concrete, *Construction and Building Materials*, 209, (10)577-591. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.086>

Harouat A., Bezzar A., Sail L. (2023) Pomegranate peel extract as a sustainable corrosion inhibitor on steel in a simulated concrete pore solution and mortar: Experimental and theoretical studies, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 27, 9.

<https://doi.org/10.1080/19648189.2023.2220788>

Heukamp F.H., Ulm F.J., Germaine Jonh T. (2003), Poroelastic properties of calcium-leached cement-based materials. *Cement and Concrete Research*, 33, 1155-117.

[10.1016/S00088846\(03\)00024-3](https://doi.org/10.1016/S00088846(03)00024-3)

Hosen M.A., Shamma M.I., Shill S.K., Al-Deen S., Jumaat M.Z., Hashim H. (2022), Ductility enhancement of sustainable fibrous-reinforced high-strength lightweight concrete, *Polymers* 14(4), 727. <https://doi.org/10.3390/polym14040727>

Idriss A.F., Negi S.C., Jofriet J.C., Hayward G.L. (2001), Corrosion of steel reinforcement in mortar specimens exposed to hydrogen sulphide, part 1 : impressed voltage and electrochemical potential tests, *Journal of Agricultural Engineering Research*, 79, 223–230.

<https://doi.org/10.1006/jaer.2001.0701>.

Iqbal S., Ali A., Holschemacher K., Bier T.A. (2015), Effect of change in micro steel fiber content on properties of High strength Steel fiber reinforced Lightweight Self- Compacting Concrete (HSLSCC), *Procedia Eng.* 122, 88–94. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.10.011>

Jahani F., Deviny J., Mansfeld F., Rosen I.G, Sun Z. Wang, C. (2001), Investigations of sulfuric acid corrosion of concrete. II: electrochemical and visual observations, *Journal of Environmental Engineering*, 127, 580–584, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2001\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2001)).

Jebli M. (2016), Caractérisation à l'échelle locale des propriétés mécaniques de l'interphase pâte de ciment-granulat : application à la lixiviation, Thèse de doctorat, Montpellier, France.

Jebli M., Jamin F., Pelissou C., Malachanne E, Garcia-Diaz, E. ElYousoufia M.S.(2018), Leaching effect on mechanical properties of cement-aggregate interface, *Cement and Concrete Composites*, 187, 10-19.

<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.11.018>

Ji Y.S., Shen J.L., Wang L., Xu C.Y.(2001), Corrosion characteristics and corrosion current distribution of steel bar in carbonated concrete, *Advanced Materials Research*. 239(242), 3371–3376, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.239-242.3371>.

Jihua Z., Yangjian D. , Piyu C., Gang W., Hongguang M. ,Wujun F. (2022), Prediction of Long-Term Tensile Properties of Glass Fiber Reinforced Composites under Acid-Base and Salt Environments ,*Polymers* , 14, 3031. <https://doi.org/10.3390/polym14153031>

Johston C.D.(1974) ,Steel fiber reinforced mortar and Concrete. A review of mechanical properties. *International symposium*, SP, 44(7), 127-142.

Kai C. Lihua X., Xuefeng L., Xuan H., Le H., Fangqian D., Yin C.(2021), Fatigue life analysis of polypropylene fiber reinforced concrete under axial constant-amplitude cyclic compression, *Journal of Cleaner Production* ,319 (15),128610. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128610>

Kaid N., Ayed K., Abidelah A., Khelafi H., Kerdal D.(2010), Etude de la durabilite des mortiers pouzzolaniques face aux milieux agressifs, *Symposium International sur la Construction en Zone Sismique Université Hassiba Benbouali de Chlef (Algérie)*.

Kamali S. (2003), Comportement et simulation des matériaux cimentaires en environnement agressifs : Lixiviation et température. Thèse : ENS – Cachan.

Kamali S., Gérard B, et Moranville M.(2003), Modelling the leaching kinetics of cement-based materials influence of materials and environment ,*Cement and Concrete Composites*, 25(4),451–458, [http://dx.doi.org/10.1016%2FS0958-9465\(02\)00085-9](http://dx.doi.org/10.1016%2FS0958-9465(02)00085-9)

Kamali S., Moranville M. et Leclercq S. (2008), Material and environmental parameter effects on the leaching of cement pastes : experiments and modelling. *Cement and Concrete Research*, 38(4),575–585.

Kamen .A (2007), Comportement Au Jeune Age Et Différé D'un BFUP Ecrouissant Sous Les Effets Thermomécaniques, *École Polytechnique Fédérale De Lausanne*

Kaufmann J.P. (2014), Durability performance of fiber reinforced shotcrete in aggressive environment, in: A. Negro, W. Bilfinger, M.O. Cecilio (Eds.), *WTC 2014 – Tunnels a Better Life*, ITA-AITES, Iguazu, Brazil, 1–7.

Kenchel H., Shah S.,(1985), Applications de polypropylène fibres in Scandinavia ,*Concrete international design and construction*, 7 (3), 32-34.

Khalid M.Y., Arif Z.U., Arshad H. (2022), Evaluation of tensile properties of fiber metal laminates under different strain rates, *The Institution of Mechanical Engineers*, 236, 2. <https://doi.org/10.1177/09544089211053063>

Khan F., Ahmad J. (2015), "To Study the Properties of Latex Modified Steel Fibre Reinforced Concrete" *International Journal of Recent Research in Civil and Mechanical Engineering (IJRRCME)*, 2(1), 261-267. <http://www.paperpublications.org/>

Kherbache S., Tahakourt A., Moussaceb K., Bouzidi N. (2019), Study of the durability of Concretes and Mortars reinforced by industrial waste (Metallic Fibers), *Anales de Edificación*, 5, (3), 15-26. [10.20868/de.2019.4364](https://doi.org/10.20868/de.2019.4364)

Kim B., Boyd A.J., Kim H.S., Lee S.H. (2015), Steel and synthetic types of fibre reinforced concrete exposed to chemical erosion, *Construction and Building Materials*, 93, 720–728, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.023>

Koenig A., Dehn F., (2016), Main considerations for the determination and evaluation of the acid resistance of cementitious materials, *Structural Materials*. 49, 1693–1703, <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0605-7>.

Koushkbaghi M., Jafar Kazemi M., Mosavi H., Mohseni E. (2019), Acid resistance and durability properties of steel fiber-reinforced concrete incorporating rice husk ash and recycled aggregate, *Construction and Building Materials*, 202, 266–275. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.224>

Kumari Ganta J., Seshagiri Rao M.V., Sina Mousavi S., Srinivasa Reddy V., Bhojaraju C. (2020), Hybrid steel/glass fiber-reinforced self-consolidating concrete considering packing factor: Mechanical and durability characteristics, *Structure*, 28, 956-972. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.09.042>

Kumar N.V.S. (2021), Effet des solutions d'acide sulfurique et chlorhydrique sur le béton de poussière de roche concassée, *Materials Today: Proceedings*, 46(1) 509-513. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.691>

Kurumisawa K., Haga K., Shibata M., Hayashi D. (2021), Effect of calcium leaching on diffusivity of blended cement paste and mortar, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 19, 426-432. [10.3151/jact.19.426](https://doi.org/10.3151/jact.19.426)

Lapointe V. (2009), Initiation et propagation de la corrosion dans un élément de béton armé, thèse de doctorat de l'Université Laval, Québec.

Le Bellégo C. (2001) : Couplages chimie-mécanique dans les structures en béton attaquées par l'eau : étude expérimentale et analyse numérique. Thèse de doctorat, École normale supérieure de Cachan.

- Le Bellégo, C., Gérard B., et G. Pijaudier- Cabot G. (2001) Mechanical analysis of concrete structures submitted to aggressive water. *Fracture Mechanics of Concrete Structures*, 239-246. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01005860>
- Lea F. M. (1965), The action of ammonium salts on concrete. *Magazine of concrete research*, 17(52):115–116.
- Lee S. (1993), *Handbook Composites Reinforcements*, Wiley-VCH.
- Li J., Zhao E., Niu J., Wan C.(2021), Study on mixture design method and mechanical properties of steel fiber reinforced self-compacting lightweight aggregate concrete, *Constr. Build. Mater.* 267,121019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121019>
- Lobet A. (2003), Influence des paramètres de composition des matériaux cimentaires sur les propriétés de transfert. Thèse de doctorat, Institut national des sciences appliquées de Toulouse, France.
- Luong P.,Tran P., Sanjayan J.(2020) ,Steel fibres reinforced 3D printed concrete: Influence of fibre sizes on mechanical performance, *Concrete Construction and Building Materials*, 250, 118785.<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118785>
- Mahmoud H.A. ,Shaker Q., Hemn U.A., Emadd W., Rabar H.F.,Ahmed S.M.,Bassam A.T.,Afonso R.G.A.(2022), Ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. Part III: Fresh and hardened properties, *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01265. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01265>
- Marcos-Meson V., Fischer G., Edvardsen C., Skovhus T.L., Michel A.(2019), Durability of Steel Fibre Reinforced Concrete (SFRC) exposed to acid attack – A literature review, *Construction and Building Materials*, 200,490–501. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.051>
- Meddah, A., & Merzoug, K. (2017),Feasibility of using rubber waste fibers as reinforcements for sandy soils. *Innovative Infrastructure Solutions*, 2(1), 1-8. doi.org/10.1007/s41062-017-0053-z
- Meddah H. (2014), L'apport Mécanique Des Fibres Métalliques Dans Le Renforcement D'un Tablier D'un Pont Caisson », Magister, Université Abdelhamid Ibn Badis – Mostaganem,
- Mimoun F.Z. Et Mimoun M., (1994) Les renforts fibreux utilisés dans les matériaux de construction, *Revue Algérie Equipement*,15, 2-7
- Mirsayah A., Banthia N. (2002), Shear Strength of Steel Fiber-Reinforced Concrete. *ACI Materials Journal*, 99 (5), 473-479.
- Miyazato S., Otsuki N.((2010), Steel corrosion induced by chloride or carbonation in mortar with bending cracks or joints, *J. Adv. Concr. Technol.* 8,135– 144,

<https://doi.org/10.3151/jact.8.135>.

Mohr A.(1925), Über die einwirkung von ammoniumsazlosungen auf beton. Der Bauingenieur, 6(8),284–293.

Mourad Y., Jabbar H.A. (2022), Shear behavior of RC beams prepared with basalt and polypropylene fibers, Case Studies in Construction Materials, 16., e00835. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00835>

Najaf E., Abbasi H, (2023), Impact resistance and mechanical properties of fiber-reinforced concrete using string and fibrillated polypropylene fibers in a hybrid form,Structural Concrete,24,10. <https://doi.org/10.1002/suco.202200019>

NF EN 1008 (2003), Eau de gâchage pour bétons - Spécifications d'échantillonnage, d'essais et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi, y compris les eaux des processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton.

NF EN 15-435 (2021),méthode d'essai des ciments-déterminer de la masse volumique

NF EN 12390-1 (2012),Essais pour béton durci - Partie 1 : forme, dimensions et autres exigences aux éprouvettes et aux moules

NF18-400 (1981),Bétons - Moules pour éprouvettes cylindriques et prismatiques

Nguyen V.H. (2005), Couplage dégradation chimique - comportement en compression du béton. Thèse : l'école nationale des ponts et chaussée – France.

Nikola T., Stanislav A. Albert de la Fuente (2020), Systematic Review on the Creep of Fiber-Reinforced Concrete, Materials, 13(22), 5098. <https://doi.org/10.3390/ma13225098>

Oh B.H., Kabele P. (2011), Durability under chemical loads, in: F. Wittmann, G. Van Zijl (Eds.), Durab. Strain-Hardening Fibre-Reinforced Cem. Compos, first ed., Springer, Netherlands, Dordrecht, 152, <https://doi.org/10.1007/978-94-007-0338-4>.

Olivito R.S. ,Zuccarello F.A(2009), An experimental study on the tensile strength of steel fibre reinforced concrete, Composites Part B,41,246-55
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2009.12.003>

Ohma Y.,1994,Proprieties of concrete-polymer composites,Advanced Cement Based chap.1,CRC Press.

Omrane M.,Mouli M. ,Benosman A.S. ,Senhadji Y. (2015), Deterioration of Mortar Composites in Acidic Environment, Advanced Materials Research .
[1064https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1064.3](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1064.3)

Pająk, et Ponikiewski. (2013), Flexural behavior of self-compacting concrete reinforced with different types of steel fibers. Construction and Building Materials, 47, 397-408.

Pan Y., Ling Deng L. Li S. Wang J., Zhang F. (2022), A study using a combined method of scientometric and manual analysis to review the present research of plant fibres reinforced concrete, *Construction and Building Materials*,341,127551.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127551>

Pavlík V(2000), Effect of carbonates on the corrosion rate of cement mortars in nitric acid, *Cement and Concrete Research* ,30,481-489.[https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00201-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00201-5)

Perlot C. (2005), Influence de la décalcification de matériaux cimentaires sur les propriétés de transferts : application au stockage profond des déchets radioactifs. Thèse de doctorat, Université de Toulouse (France) et de Sherbrooke (Canada).

Perlot,C., Verdier J., Carcassès M.(2006), Influence of cement type on transport properties and chemical degradation: Application to nuclear waste storage. *Materials and structures* 39(5),511-23.<https://doi.org/10.1617/s11527-005-9020-9>

Peycelon H., Mazoin C. (2004), Comportement à long terme des bétons : influence de la température et du matériau sur la dégradation (décalcification/hydrolyse) en milieu saturé, Notes technique CEA NT SCCME 03-245-A.

Pilkington J. (1987), Une nouvelle plaque ondulée sans amiante obtient un agrément officiel. *Cem – Fil News*, 39, 1.

Powers T. C. et Brownyard T. L. (1946), Studies of the physical properties of hardened Portland cement paste. *ACI*, 22:101–132.

Prakash R., Fediuk R.(2022), Effect of steel fiber on the strength and flexural characteristics of coconut shell concrete partially blended with fly ash, *Materials*,15 ,12, 4272.

<https://doi.org/10.3390/ma15124272>

Prasad Guru M.C., K.Tanuja K., N.Vasu Deva Naidu N.(2016), Experimental Study & Strength Of Concrete By Using Steel & Glass Fibers, *International Research Journal Of Engineering And Technology*, 03,09.

Ragi S.(2015),A comparative and experimental study on the mechanical properties of various steel and glass fibre reinforced high strength concrete,*International research journal of engineering and technology*,03 129-133.<https://www.irjet.net/archives/V2/i4/Irjet-v2i423.pdf>

Ramakrishan, V. Oberling, G., Tatnal, P.C. (1987), Flexural fatigue strength of steel fiber reinforced concrete. Rapport de recherché.

Ramli M., Dawood E. (2011), High-strength flowable mortar reinforced by steel fiber,*Slovak J. Civ. Eng.* Vol 19 (3) ,10–16..[10.2478/v10189-011-0013-0](https://doi.org/10.2478/v10189-011-0013-0)

- Ramli M., Kwan W.H., Abas N.F (2013), Strength and durability of coconut-fiber-reinforced concrete in aggressive Environments, *Construction and Building Materials*, 38,554–566. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.002>
- Regourd, M., Hornain, H., (1975) Applications de la microscopie électronique à balayage, *Revue des Matériaux de Construction*, 693, 73-87.
- Richet C. (1992), Etude de la migration des radioéléments dans les liants hydrauliques. Influence du vieillissement des liants sur les mécanismes et la cinétique des transferts. Thèse de doctorat, Université de Paris 11, Orsay.
- Rohit M., Patel I. and Modhera C. (2012), Comparative Study on Flexural Strength of Plain and Fibre Reinforced HVFA Concrete by Destructive and Non-Destructive Techniques. *International Journal of Engineering and Science* 1(2),42-48.
- Rossi P et al. (1996), Compressive behaviour of concrete: physical mechanisms and modeling. *J. Eng. Mech, ASCE*, 122, (11), 1038-1043.
- Rossi, P. (1998), Les bétons de fibres métalliques, Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- Rozière E., Loukili A., El Hachem, R. Grondin F. (2009), Durability of concrete exposed to leaching and external sulphate attacks, *Cement and Concrete Research*, 39, 1188–1198. [10.1016/j.cemconres.2009.07.021](http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.07.021)
- Saito H., Deguchi A. (2000), Leaching tests on different mortar using accelerated electrochemical method. *Cement and Concrete Research*, 30(1), 1815–1825, [10.1016/S0008-8846\(00\)00377-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00377-X)
- Schwartzentruber A. Et Catherine C. (2000), La méthode du mortier de béton équivalent (MBE)—Un nouvel outil d'aide à la formulation des bétons adjuvantés, *Materials and structures*, 33, 475-482. <https://doi.org/10.1007/BF02480524>
- Senhadji Y. , Siad H., Escadeillas G , Benosman A.S. , Chihaoui R. , Mouli M., Lachemi M. (2019), Physical, mechanical and thermal properties of lightweight composite mortars containing recycled polyvinyl chloride, *Construction and Building Materials* 195 , 198–207, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.070>.
- Setti B., Hammoudi S., Taazount M., Achit-Henni M, (2010), Etude de la ductilité des noeuds de structures poteaux - poutres en béton de fibres métalliques, *Symposium international sur la construction en zone sismique*, Université Hassiba Benbouali de Chlef (Algérie), 26 –27.
- Smaranika N, Dipak K.J., Subhrajyoti S., Jatin S. (2022) , Assessment of impact and hardness property of natural fiber and glass fiber hybrid polymer composite, *Materialstoday:proceeding*, 49(2), 497-501. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.079>

Subrata C.D. , Debasree P. , Mir M.F, Mithun K.D,GM Shafiur Rahman , Mubarak A.K.(2018) ,Effet de la charge de fibres sur les propriétés mécaniques des composites de polypropylène renforcé de fibres de jute, *Advances in Chemical Engineering and Science*,8(4), 215-224. <https://doi.org/10.4236/aces.2018.84015>

Swamy R. N. et Mangat P.S.(1974),Compatibility of steel fibre reinforced concrete, 8(5), 34-35.

Tasnim S., Du Y., Ekhlaur Rahman M. , BintiAhmadi R. , Ing Doh S.(2020) ,Effect of using palm oil fuel ash on the durability of cement paste in ammonium nitrate solution,*Construction and Building Materials* 257,119597..<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119597>

Taylor H. F. W. (1990),*Cement chemistry*, london,.

Taylor H.F.W. (1990), *Cement Chemistry*, Academic Press, New York.

Taylor M., Lydon F.D., Barr B.I.G. (1997) Toughness measurements on steel fibre-reinforced high strength concrete. *Cement and Concrete Composites*, 9, 329-340. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(97\)00036-X](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(97)00036-X)

Tognazzi C. (1998), *Couplage fissuration- dégradation chimique dans les matériaux cimentaires: caractérisation et modélisation*. Thèse de doctorat, Institut national des sciences appliquées de Toulouse.

Torrenti J.M., Adenot F. , Tognazzi C., Danese S., Poyet S. (1999) , Application of the concrete degradation model to the case of cracked media and coupling with mechanics,*In Material science and concrete*.

Torrenti J.-M., Dantec P., Boulay C. et Semblat J.-F. (1999)Projet de processus d'essai pour la détermination du module de déformation longitudinale du béton. *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, 220.

Torrenti J. M. (2002), *Propriétés des bétons*. Hermés.

Ul Islam M.M.(2021),Investigation of tensile creep for Ultra-High-Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) for the long-term, *Construction and Building Materials*,305, (25), 124752. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124752>.

Vakili S.E., Homami P.,Esfahani M.R. (2019),Effect of fibers and hybrid fibers on the shear strength of lightweight concrete beams reinforced with GFRP bars. *Structures*, 290–297. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.04.006>

Venuat M. (1976), *Les bétons armés de fibres*. *Le moniteur*, 3, 55-58.

Wang H.T, Wnag L.C.(2013), Experimental study on static and dynamic mechanical properties of steel fibre reinforced lightweight aggregate concrete, *Construction and BuildingMaterials*, 38,1146-51.<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.016>.

Witkowska-Dobrev J., O Szlachetka O., Dohojda M. (2021)., Effet de l'acide acétique sur la résistance à la compression et la texture géométrique de la surface du béton de classe C20/25, *Sustainability*13(9), 5136.<https://doi.org/10.3390/su13095136>

Wu T., Sun Y., Liu X., Cao Y., (2021),Comparative study of the flexural behavior of steel fiber-reinforced lightweight aggregate concrete beams reinforced and prestressed with CFRP tendons, *Eng. Struct.* 233, 111901. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.111901>

Zhao K. ,Zhao K. ,Yan Y. ,YangJ. , Wu J ,Lai Y.,Liu L., Zeng X.(2023), Influence of different fibers on compressive toughness and damage of early age cemented tailings backfill, *Environmental Science and Pollution Research* 30, 37449–37461.
<https://doi.org/10.1007/s11356-022-24830-8>

Xiong G., Wang C, Zhou S., Zheng,Y.(2022), Study on dispersion uniformity and performance improvement of steel fibre reinforced lightweight aggregate concrete by vibrational mixing, *Case Stud. Constr. Mater.* 16, e01093. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01093>

Xiang Z., Zhou J., Niu J.(2022), Compressive behavior of CFRP-confined steel fiber-reinforced self-compacting lightweight aggregate concrete in square columns, *Journal of Building Engineering* ,59 105118. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105118>

Zhao M., Zhao M.,Chen M, Li J., Law D. (2018) ,An experimental study on strength and toughness of steel fiber reinforced expanded-shale lightweight concrete, *Construction and Building Materials.* 183 ,493–501. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.178>

Zhang X., He F, Chen J. Yang C., Xu F. (2023), Orientation of steel fibers in concrete attracted by magnetized rebar and its effects on bond behavior, *Cement and Concrete Composites*,138, 104977.

Publications

Fatima Zohra YOUSSEARI, Omar TALEB, Ahmed Soufiane BENOSMAN (2023), Towards understanding the behavior of fiber-reinforced concrete in aggressive environments: Acid attacks and leaching, *Construction and Building Materials* 368,130444.

Communications

YOUSSEARI Fatima Zohra, BOUKLI HACENE Sidi Mohammed El Amin et TALEB Omar, Durability of concretes with regard to leaching: From literature to choosing a test protocol. First International Conference on Materials Environment, Mechanical and Industrial Systems, 29-30 Juin 2019, Djelfa.

YOUSSEARI Fatima Zohra, BOUKLI HACENE Sidi Mohammed El Amin et TALEB Omar, Protocoles d'essai pour le mécanisme de lixiviation, 1 ère Conférence Nationale sur la Chimie des Matériaux, 02-03 Juillet 2019, Boumerdes, Algérie.

Fatima Zohra YOUSSEARI Omar TALEB , Ahmed Soufiane BENOSMAN, Amina BELAIDI, BARKA Mohammed, Mechanical behavior and durability of concrete with and without additions to acid attacks, 4th international conference on scientific research ,ankara-turkey, 12-13 february 2021.

Fatima Zohra YOUSSEARI, Omar TALEB, Ahmed Soufiane BENOSMAN Amina BELAIDI, Leaching of mortars in ammonium nitrate solution, 2nd International Scientifique Moderne Congrès de recherche -II, Istanbul, Turkey,23-25 decembre 2021.

Fatima Zohra YOUSSEARI, Omar TALEB, Ahmed Soufiane BENOSMAN Amina BELAIDI, Comportement des bétons à base de fillers calcaires dans des environnements agressifs, 1st International Conference : New Trends on Innovative Construction Materials ESSA - Tlemcen (Algeria) – 13, 14 December, 2021.

Fatima Zohra YOUSSEARI, Omar TALEB, Ahmed Soufiane BENOSMAN Amina.BELAIDI, Effet des additions minérales sur la lixiviation des mortiers, Le 1er Séminaire National de Génie Civil et des Travaux Publics “ SNGCTP-1” 15& 16 Février 2022 Khenchela, Algérie.

Annexe A

Surface développée pour 1kg de sable

	Tmi	0	0,08	0,16	0,315	0,63	1,25	2,5	3,15	4	5	6,3	8	10	12,5	
	TMi	0,08	0,16	0,315	0,63	1,25	2,5	3,15	4	5	6,3	8	10	12,5	16	
	di	0,04	0,12	0,2375	0,4725	0,94	1,875	2,825	3,575	4,5	5,65	7,15	9	11,25	14,25	
Pour 1Kg	Mui (kg)	0,1295	0,0588	0,1366	0,151	0,1092	0,2775	0,052	0,032	0,0403	0	0	0	0	0	0,9869
	vi	3,4E-14	9E-13	7E-12	6E-11	4,35E-10	3,5E-09	1,18E-08	2,39E-08	4,77E-08	9,44E-08	1,91E-07	3,82E-07	7,46E-07	1,52E-06	
	si	5E-09	5E-08	1,8E-07	7E-07	2,78E-06	1,1E-05	2,51E-05	4,02E-05	6,36E-05	0,0001	0,000161	0,000254	0,000398	0,000638	
	ωi	0,00038	0,0004	0,00038	0,0004	0,000377	0,00038	0,000377	0,000377	0,000377	0,000377	0,000377	0,000377	0,000377	0,000377	
	Vi	4,9E-05	2E-05	5,2E-05	6E-05	4,12E-05	0,0001	1,96E-05	1,21E-05	1,52E-05	0	0	0	0	0	
	Ni	1,5E+09	2E+07	7346232	1E+06	94720,47	30329,4	1661,7	504,576	318,6194	0	0	0	0	0	
	Si	7,32764	1,109	1,30179	0,7233	0,262936	0,33498	0,041662	0,020259	0,02027	0	0	0	0	0	
	SD (m ²)	11,14190963														

Surface développée pour 1,6 Kg de gravier 4/8

	Tmi	0	0,08	0,16	0,315	0,63	1,25	2,5	3,15	4	5	6,3	8	10	12,5	
	TMi	0,08	0,16	0,315	0,63	1,25	2,5	3,15	4	5	6,3	8	10	12,5	16	
	di	0,04	0,12	0,2375	0,4725	0,94	1,875	2,825	3,575	4,5	5,65	7,15	9	11,25	14,25	
pour 1,6Kg	Mui (kg)	0	0	0	0	0	0,01555	0,022	0,0515	0,4455	0,274	0,186	0,003	0	0	0,9976
	vi (E-09 m ³)	3,4E-14	9E-13	7E-12	6E-11	4,35E-10	3,5E-09	1,18E-08	2,39E-08	4,77E-08	9,44E-08	1,91E-07	3,82E-07	7,46E-07	1,52E-06	
	si	5E-09	5E-08	1,8E-07	7E-07	2,78E-06	1,1E-05	2,51E-05	4,02E-05	6,36E-05	0,0001	0,000161	0,000254	0,000398	0,000638	
	ωi	0,00038	0,0004	0,00038	0,0004	0,000385	0,00038	0,000385	0,000385	0,000385	0,000385	0,000385	0,000385	0,000385	0,000385	
	Vi	0	0	0	0	0	6E-06	8,46E-06	1,98E-05	0,000171	0,000105	7,15E-05	1,15E-06	0	0	
	Ni	0	0	0	0	0	1732,78	716,7791	827,9366	3591,106	1115,895	373,7772	3,022816	0	0	
	Si	0	0	0	0	0	0,01914	0,017971	0,033243	0,228456	0,11191	0,060031	0,000769	0	0	
	SD (m ²)	0,471518579														

Annexe A

Surface développée pour 2 Kg de gravier 8/16

	Tmi	0	0,08	0,16	0,315	0,63	1,25	2,5	3,15	4	5	6,3	8	10	12,5	16	
	TMi	0,08	0,16	0,315	0,63	1,25	2,5	3,15	4	5	6,3	8	10	12,5	16	20	
	di	0,04	0,12	0,2375	0,4725	0,94	1,875	2,825	3,575	4,5	5,65	7,15	9	11,25	14,25	18	
Pour 2,5Kg	Mui (kg)	0	0	0	0	0	0	0	0	0,011	0,369	0,6752	0,6582	0,4898	0,2058	0,0342	2,4432
	vi (E-09 m ³)	3,4E-14	9E-13	7E-12	6E-11	4,35E-10	3,5E-09	1,18E-08	2,39E-08	4,77E-08	9,44E-08	1,91E-07	3,82E-07	7,46E-07	1,52E-06	3E-06	
	si	5E-09	5E-08	1,8E-07	7E-07	2,78E-06	1,1E-05	2,51E-05	4,02E-05	6,36E-05	0,0001	0,000161	0,000254	0,000398	0,000638	0,001	
	ωi	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	
	Vi	0	0	0	0	0	0	0	0	4,4E-06	0,000148	0,00027	0,000263	0,000196	8,23E-05	1E-05	
	Ni	0	0	0	0	0	0	0	0	92,21817	1562,94	1411,158	689,75	262,7983	54,33281	4,4799	
	Si	0	0	0	0	0	0	0	0	0,005867	0,156743	0,226641	0,17552	0,104491	0,034661	0,0046	
	SD (m ²)	0,708482308															

Annexe A

Surface développée pour 3 Kg de gravier 16/25

	Tmi	0	0,08	0,16	0,315	0,63	1,25	2,5	3,15	4	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	
	TMi	0,08	0,16	0,315	0,63	1,25	2,5	3,15	4	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	31,5	
	di	0,04	0,12	0,2375	0,4725	0,94	1,875	2,825	3,575	4,5	5,65	7,15	9	11,25	14,25	18	22,5	28,25	
Pour 3Kg	Mui (kg)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0008	0,0108	0,275	0,9754	1,5086	0,2246	1,262
	vi (E-09 m ³)	3,4E-14	9E-13	7E-12	6E-11	4,35E-10	3,5E-09	1,18E-08	2,39E-08	4,77E-08	9,44E-08	1,91E-07	3,82E-07	7,46E-07	1,52E-06	3E-06	5,9641E-06	1,1805E-05	
	si	5E-09	5E-08	1,8E-07	7E-07	2,78E-06	1,1E-05	2,51E-05	4,02E-05	6,36E-05	0,0001	0,000161	0,000254	0,000398	0,000638	0,001	0,00159043	0,00250719	
	oi	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	
	Vi	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3,2E-07	4,32E-06	0,00011	0,0004	0,00060344	0,00008984	
	Ni	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,838347	5,794655	72,60215	127,77	101,178426	7,61054511	
	Si	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000213	0,002304	0,046316	0,1301	0,16091733	0,01908106	
	SD (m ²)	0,358885																	