

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 8 Mai 1945 Guelma



Faculté des Science et Technologie
Département Génie Civil et Hydraulique

THÈSE

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE DOCTORAT EN SCIENCE

Filière : Génie Civil

Présentée par

Bendjaiche Robila

Intitulée

Modélisation du comportement des bétons en milieux agressif

Soutenue le : 7/7/2025

Devant le Jury composé de :

Mr BENOUIS Abdelhalim

Pr Univ 8 Mai 1945- Guelma

Président

Mr NAFA Zahereddine

Pr Univ. 8 Mai 1945- Guelma

Rapporteur

Mr BOURDJIBA Abdelhak

Pr Univ. Badji Mokhtar-Annaba

Examineur

Mr MEZHOUD Sami

Pr Univ. Constantine 1

Examineur

Année Universitaire : 2024-2025

Remerciements

Je tiens tout d'abord à dédier ce travail - à titre posthume - mes défunts parents à qui je dois aujourd'hui ma réussite et mon succès, sans qui je ne suis pas ce que je suis actuellement.

Je remercie également mon mari le Docteur Boudjehem Rafik pour le support qu'il m'a apporté le long du parcours de cette thèse.

Grand bravo à mon encadreur le Professeur Nafa Zahreddine pour sa patience, ses conseils et ses directives qui m'ont guidé jusqu'à la fin, sans oublier le Docteur Bouteldja Fateh qui ne m'a pas privé de ces services.

Ma gratitude à tout le département de Génie-Civil de notre université que ce soit collègues, administrateurs ou même étudiants pour leurs souhaits de bon courage.

Modélisation du comportement des bétons en milieu agressif

Résumé

Dans cette étude, nous proposons une modélisation du comportement des bétons exposés à des environnements agressifs, en focalisant sur la pénétration des ions de chlorure dans un béton soumis à des contraintes mécaniques, tout en prenant en compte le facteur âge, également appelé effet de vieillissement. L'analyse de la variation du coefficient de diffusion en fonction de l'âge, sous des niveaux donnés de contraintes uni axiales ou bi axiales, et pour différents rapport eau/ciment nous a permis d'évaluer en trois dimensions la concentration en ions de chlorure ainsi que le temps nécessaire à l'initiation de la corrosion à travers la couche d'enrobage. Les résultats du modèle numérique confirment que le processus de corrosion est influencé par la variation du coefficient de diffusion, en lien directe avec le facteur âge et les contraintes mécaniques appliquées au béton. Le modèle met également en lumière la distribution à long terme de la concentration des ions de chlorure en profondeur, en fonction du rapport eau/ciment, du coefficient de diffusion et du niveau de contraintes mécaniques dans les structures vieillissantes.

Mots clés:

-Modélisation, -Béton, -couplage, -contraintes uni axial et bi axiale, -vieillissement, -ions de chlorure, -coefficient de diffusion.

Abstract

In this study, we present a modeling approach to address the behavior of concrete in aggressive environments, with a specific focus on the penetration of chloride ions in concrete subjected to mechanical stresses, while incorporating the age factor, also called the aging effect. By examining the variation of the diffusion coefficient with age under specific level of uniaxial or biaxial stresses and for different water/cement ratios, we were able to conduct a three-dimensional assessment of chloride ion concentration and determine the time required for corrosion initiation through the concrete cover layer. The results from the numerical model reinforce the notion that the corrosion process is influenced by changes in the diffusion coefficient, which are directly linked to the age factor and the mechanical stresses applied to the concrete. Additionally, the model highlights the long-term distribution of chloride ion concentration with depth, which is influenced by the water/cement ratio, the diffusion coefficient, and the level of mechanical stresses in aging structures.

Keywords:

-Modeling, -Concrete, -coupling, -uni-axial and bi-axial stresses, -aging, -chloride ions, -diffusion coefficient.

تلخيص

ننشر في هذا البحث نموذجاً يوضح سلوك الخرسانة في البيئات القاسية من حيث الوسط وخاصة مشكلة اختراق أيونات الكلوريد في الخرسانة المجهدة بضغط ميكانيكية مع الأخذ بعين الاعتبار عامل العمر الذي يسمى أيضاً تأثير الشيخوخة. إن تباین معامل الانتشار مع تقدم العمر للهياكل الخراسانية تحت مستوى معين من الضغوط أحادية المحور أو ثنائية المحور لنسب مختلفة من الماء / الإسمنت سمح لنا بإجراء تقييم ثلاثي الأبعاد لتركيز أيونات الكلوريد بالإضافة إلى الوقت اللازم لبدء التآكل عن طريق عبور طبقة التغليف. وتؤيد نتائج النموذج العددي فكرة أن عملية التآكل تتأثر بتغير معامل الانتشار بارتباط مباشر مع عامل العمر والضغط الميكانيكية المؤثرة على الخرسانة. يسلط النموذج الضوء أيضاً على التوزيع طويل المدى لتركيز أيونات الكلوريد في العمق المرتبط بنسبة الماء إلى الإسمنت كدالة لمعامل الانتشار ومستوى الإجهاد الميكانيكي في الهياكل القديمة.

الكلمات المفتاحية:

-النموذج، -الخرسانة، -الافتتران، -الإجهادات أحادية المحور وثنائية المحور، -الشيخوخة، -أيونات الكلوريد، - معامل الانتشار.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....	1
-----------------------------------	----------

CHAPITRE I

LES BETONS ARMES DANS LES MILIEUX AGRESSIFS

I.1-INTRODUCTION.....	4
I.2-LE BETON ARME	4
I.2.1-Le béton	4
I.2.2-L'acier	6
I.3-LES MILIEUX AGRESSIFS.....	6
I.3.1-Actions des agents agressif.....	8
I.3.1.1-Actions des chlorures.....	10
I.3.1.2-Mécanisme de transport des ions de chlorure.....	11
I.3.1.3-Modèle de pénétration des ions de chlorure.....	13
I.4-LA CORROSION	15
I.4.1-Classes de corrosion	16

I.4.2-Effets de la corrosion.....	20
I.4.3-Les étapes de la corrosion.....	21
I.4.4-La dépassement des aciers dans le béton.....	22
a) Lancement de la corrosion par carbonatation	23
a.1-) Les reactions physico-chimique (carbonatation).....	23
a.2-) Les facteurs influençant la vitesse de carbonatation.....	24
a.3-) Conséquences de la carbonatation sur le béton.....	26
b) Déclenchement de la corrosion par pénétration des ions de chlorure.....	27
b.1-) Les reactions physico-chimique (ions de chlorure).....	28
b.2-) Teneur critique en ions de chlorure.....	29
b.3-) Les facteurs influençant sur la pénétration des ions de chlorure.....	29
I.5-CONCLUSION	33

CHAPITRE II

REVUES SUR LA DIFFUSION DES IONS DE CHLORURE : ESSAIS EXPERIMENTAUX ET MODELISATION

II.1-INTRODUCTION	35
II.2-RECHERCHES BIBLIOGRAPHIQUES	35
a. Approches expérimentales.....	35
b. Approches numériques.....	36
II.2.1:RECHERCHES EXPERIMENTALES.....	36

II.2.1.1 Comportement de diffusion des ions de chlorure dans le béton sous l'influence de la charge et de la carbonatation	36
II.2.1.2 Caractéristiques de durabilité des bétons à haute et à ultra haute performance	39
II.2.1.3 Évolution du taux de pénétration des ions dans les matériaux cimentaires alternatifs	41
II.2.1.4 Étude expérimentale du coefficient de diffusion des chlorures du béton autoplaçant	43
II.2.1.5 Étude expérimentale de la diffusion des ions chlorure dans le béton soumis à des contraintes mécaniques	46
II.2.1.5.1- Matériaux et préparation des échantillons.....	46
A- Dispositions expérimentales de l'essai	47
B-Test de diffusion et détermination de la concentration des ions de chlorure.....	49
II.2.1.5.2- Coefficient de diffusion des ions de chlorure sous différents états de contrainte.....	50
II.2.1.5.3- Fonction de niveau de contrainte sous contrainte soutenue uni axiale	52
II.2.1.5.4- Fonction de niveau de contrainte sous une contrainte de compression soutenue bi axiale.....	53
 II.2.2: RECHERCHES NUMERIQUES	 55
II.2.2.1: Modèle numérique pour la prédiction de la corrosion des armatures en acier dans les structures en béton armé	55
II.2.2.2: Simulations numériques sur le Transport des chlorures dans le béton fissuré des ponts exposés aux sels de déglacage	57
II.2.2.3: Une analyse numérique sur le Transport couplé des ions de sulfate et de chlorure avec effet d'adsorption	60
II.2.2.4: Coefficients de diffusion apparents et effectifs des ions de chlorure dans les mortiers	62
II.2.2.5: Validation numérique du modèle d'initiation de la corrosion du béton avec l'effet de fissure et l'effet de vieillissement.....	64
II.2.2.5.1: Effet du vieillissement du béton.....	64

II.2.2.5.2- Modèle analytique avec l'effet de l'âge.....	64
II.2.2.5.3- Paramètres du modèle de diffusion 2D FEA.....	65
II.2.2.5.4 : Résultats de la validation numérique.....	66
II-3: CONCLUSION.....	69

CHAPITRE III

MODELISATION DE L'INFLUENCE DU VIEILLISSEMENT ET DE LA CONTRAINTE MECANIQUE SUR LA DIFFUSION DES IONS DE CHLORURES

III.1- INTRODUCTION.....	71
III.2- BASES DU MODELE.....	72
III.3- DONNEES EXPERIMENTALES.....	75
III.3.1- Compression du béton.....	75
III.3.2- Diffusion des ions de chlorure.....	76
III.4- RESULTAS ET DISCUSSIONS.....	79
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	89

INTRODUCTION GENERALE

Les structures en béton armé sont conçues pour une durée de vie spécifiquement définie, en tenant compte des conditions environnementales auxquelles elles seront exposées. Pour répondre à ces exigences, les ingénieurs doivent s'appuyer sur des règles de dimensionnement fondées sur la compréhension des mécanismes de dégradation du béton et sur des modèles prédictifs de ces dégradations. Le rôle des chercheurs est de proposer des solutions qui améliorent la résistance des ouvrages face aux agressions environnementales. Garantir une durée de vie adéquate nécessite l'utilisation de matériaux adaptés au contexte, de techniques de mise en œuvre appropriées et d'outils de calcul prenant en compte les dégradations potentielles, tout en assurant un haut niveau de sécurité.

De nos jours, la durabilité des structures en béton est un enjeu majeur dans les domaines du génie civil et industriel. Elle suscite une attention croissante de la part des gestionnaires d'ouvrages, qui exigent des durées de vie prolongées avec un entretien minimal, notamment pour des infrastructures telles que les ponts, les quais et les tunnels. Toutefois, pour répondre à ces exigences supplémentaires, il est essentiel de maîtriser des paramètres tels que le choix du ciment, le rapport eau/ciment, la compacité et l'utilisation d'adjuvants, notamment dans des environnements agressifs (eau de mer, pluie, sulfates, nitrates d'ammonium, etc.).

La corrosion des aciers est l'une des principales pathologies affectant les ouvrages de génie civil, entraînant une dégradation involontaire des métaux sous l'effet d'environnements corrosifs atmosphériques ou de substances chimiques réactives. L'acier peut être dépassivé par deux mécanismes : la carbonatation due au dioxyde de carbone CO_2 ou la pénétration d'ions de chlorure provenant de l'eau de mer, des embruns marins ou des sels de déverglaçage. Parmi ces mécanismes, la corrosion causée par les chlorures est la plus dangereuse en raison de son développement rapide et du risque de rupture soudaine, particulièrement dans les environnements sévères.

La durée de vie d'une structure en béton armé se divise en deux phases : la phase d'initiation et la phase de propagation. La durée de la première phase est influencée par la vitesse de neutralisation du béton de protection ou par la vitesse de pénétration des agents agressifs, tels que les ions de chlorure. Lorsque la concentration en chlorures atteint un seuil critique au niveau des barres d'acier, la phase de propagation débute. L'acier commence alors à se corroder, entraînant une réduction de sa section, ce qui peut finalement compromettre l'intégrité de la structure.

La méthode la plus simple et la plus efficace pour estimer la durée de vie des ouvrages consiste à évaluer la phase d'initiation (ou d'incubation) de la corrosion. Dans le cas de la corrosion par pénétration des ions de chlorure, il s'agit de déterminer le temps nécessaire pour

que la première couche d'armatures perd sa passivation. En plus de fournir une protection chimique aux armatures, l'enrobage joue un rôle de barrière physique, limitant ainsi la pénétration des ions de chlorure.

L'objectif de cette thèse est de modéliser numériquement le comportement des bétons en milieu agressif pour cela le travail est divisé en trois chapitres :

-Dans le premier chapitre « Les bétons armés dans les milieux agressifs », nous présentons une analyse détaillée du comportement du béton armé exposé à des environnements agressifs. Nous abordons les différents types de corrosion, les étapes de leur développement, ainsi que les facteurs déclencheurs. Les conséquences de la corrosion sont également examinées, en lien avec les mécanismes de transport des ions de chlorure dans le béton.

-Dans le deuxième chapitre intitulé « Revues sur la diffusion des ions de chlorures : essais expérimentaux et modélisation », nous présentons une revue bibliographique des travaux récents expérimentaux et numériques, portant sur la pénétration des agents agressifs, tels que les ions de chlorure et le dioxyde de carbone, décrit par divers auteurs. Nous y présentons également deux analyses approfondies qui s'avèrent essentielles pour notre recherche :

Une étude expérimentale a été menée pour analyser les propriétés de diffusivité des ions de chlorures sous des conditions de compression uni axiale et bi axiale, en examinant l'impact direct du rapport eau/ciment sur la diffusion de ces ions dans le béton soumis à des contraintes mécaniques. Parallèlement, une analyse numérique a été développée pour évaluer l'évolution de la concentration des ions de chlorure en fonction du temps, en tenant compte du délai nécessaire à l'initiation de la corrosion dans une structure existante. Cette modélisation intègre un coefficient de diffusion variable, dépendant de l'âge du béton, afin de refléter plus précisément les conditions réelles.

-Dans le troisième chapitre intitulé « Modélisation de l'influence du vieillissement et de la contrainte mécanique sur la diffusion des ions de chlorure », une modélisation numérique est proposée pour étudier le comportement des bétons exposées aux ions de chlorure, en tenant compte du couplage entre l'âge du béton et les contraintes mécaniques uni axiales et bi axiales. L'analyse de la variation du rapport eau/ciment a permis d'évaluer de manière tridimensionnelle la concentration en ions de chlorures ainsi que le temps nécessaire à la corrosion en considérant la traversée de la couche d'enrobage.

CHAPITRE I

LES BETONS ARMES DANS LES MILIEUX AGRESSIFS

I. LES BETONS ARMES DANS LES MILIEUX AGRESSIFS

I.1-INTRODUCTION

Le béton est le matériau de construction le plus répandu dans le monde. Malgré une conception visant à assurer leur durabilité, les structures en béton armé se dégradent progressivement en raison de la corrosion, causée par leur exposition à des environnements agressifs [1]. La corrosion des armatures en acier constitue l'une des principales pathologies affectant les ouvrages de génie-civil [2]. Elle entraîne des coûts de maintenance et de réparation élevés et peut dans certains cas, compromettre la sécurité des structures et des utilisateurs. Tant que le béton assure une protection physique ou chimique des armatures, la corrosion ne se développe pas [3], [4]. Cependant, l'acier peut perdre sa passivation sous l'effet de deux mécanismes principaux : la carbonatation du béton par le dioxyde de carbone CO_2 présent dans l'air [5], ou la pénétration d'ions de chlorure provenant de sources telles que l'eau de mer [6], les embruns marins ou les sels de déverglaçage [7],[8]. Parmi ces deux phénomènes, la corrosion induite par les ions de chlorure est plus préoccupante que celle causée par la carbonatation, en raison de son développement rapide et du risque accru de rupture brutale, particulièrement dans les environnements sévères [9], [10].

I.2-LE BETON ARME:

Depuis l'antiquité jusqu'à aujourd'hui, le béton reste le matériau de construction composite par excellence fabriqué à partir des granulats naturels et artificiels. Associée avec des armatures cette matière connaît un réel essor dans le domaine de génie-civil. La typologie des bétons selon leurs expositions permet d'adapter la formulation, le choix des matériaux, la compacité, l'enrobage,... Afin d'assurer la durabilité des ouvrages en béton armé qui est intrinsèquement liée à celle du matériau lui-même. Ce dernier étant un matériau hétérogène et poreux, interagit avec son environnement (milieu marin, cycle de gel-dégel, exposition à la pluie, etc...). L'étude de sa durabilité implique des interactions complexes entre plusieurs disciplines : la physique, la chimie et la mécanique et ceci à différentes échelles, allant du microscopique au macroscopique. Sachant que le béton est un matériau solide mais sensible à certaines agressions : Il peut se fissurer ou perdre sa résistance avec le gel ou les produits chimiques, Les armatures peuvent rouiller sous l'eau, l'air ou les ions de chlorures ou de sulfates et sans protection un ouvrage en béton peut se dégrader prématurément. Il est essentiel d'adapter une formulation convenable en fonction des agressions existantes

I.2.1-Le béton :

Le béton est un matériau composite constitué d'un mélange de liants (ciment et adjuvants), de granulats (gravier et sable) et d'eau. Après la prise, il se forme une structure composée d'un squelette granulaire, d'une matrice de ciment hydraté et de vides partiellement ou totalement remplis par une solution interstitielle riche en ions alcalins, notamment en calcium Ca^{2+} et en hydroxyde OH^- , conférant au béton un pH basique. La présence de granulats influence les propriétés de transfert du béton par rapport à une pâte de ciment pure. En effet, lors de l'hydratation du ciment, des phénomènes se produisent aux interfaces entre la pâte de ciment et les granulats, créant des zones plus poreuses que le reste de la matrice. Ces parties appelées zones de transition inter granulaires, facilitent les processus de diffusion à l'intérieur du béton. En revanche, les granulats étant généralement imperméables, jouent un rôle d'obstacle et limitent les transferts entre le béton et son environnement extérieur.

Concernant **le ciment**, il existe une très grande variété mais le plus utilisé est le ciment Portland Artificiel (CPA). Il est composé de clinker, de gypse (3 à 5)% et éventuellement d'ajouts (< 5%). Le clinker est obtenu en cuisant vers 1540°C, des mélanges appropriés de calcaire (80%) et d'argile (20%), il se compose de :

En ce qui est du ciment, il existe une grande variété de types, mais la plus couramment utilisé est le Ciment Portland Artificiel (CPA). Celui-ci est principalement composé de clinker, de gypse (entre 3 et 5%) et dans certains cas, d'ajouts (moins de 5%). Le clinker quant à lui est produit par la cuisson à environ 1540°C, d'un mélange précis de calcaire (80%) et d'argile (20%). Sa composition inclut :

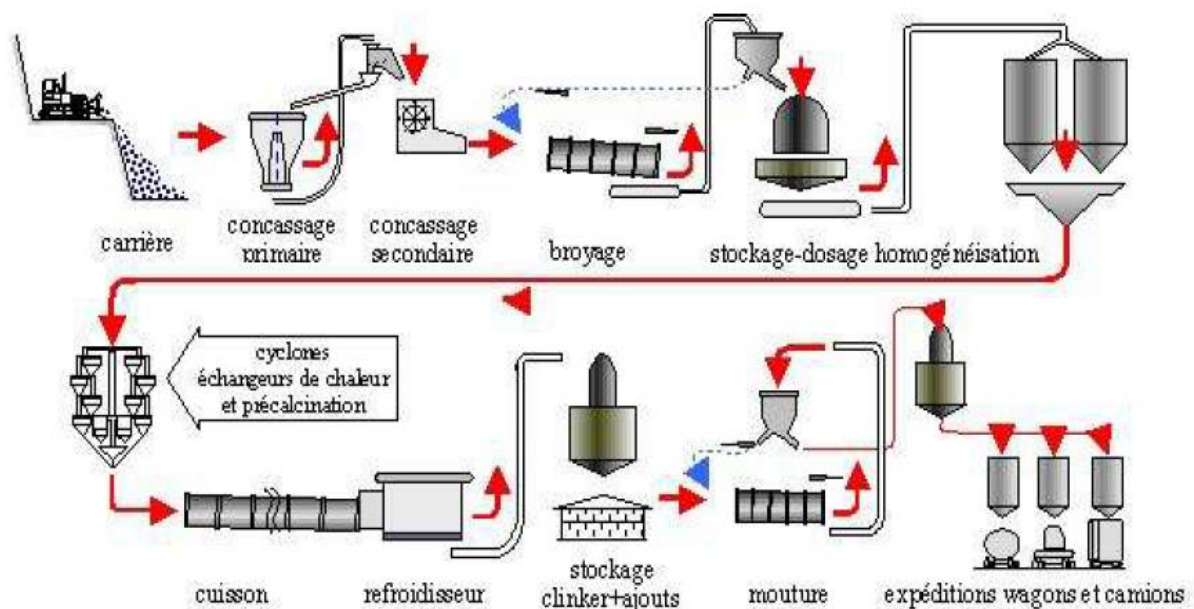


Figure I.1: Fabrication du ciment [28]

- Silicates bi calcique C_2S ou $2CaOSiO_2$.
- Silicates tricalcique C_3S ou $3CaOSiO_2$.
- Aluminate tricalcique C_3A ou $3CaOAl_2O_3$.
- Aluminoferrite tétra calcique C_4AF ou $4CaOAl_2O_3Fe_2O_3$.

L'eau de gâchage intégrée lors de la fabrication du béton est essentielle pour assurer sa maniabilité et son ouvrabilité. Elle déclenche la réaction d'hydratation du ciment, qui joue un rôle important dans le développement de la résistance du béton lors de son durcissement.

Les granulats issus de roches carbonatées ou silicieuses sont liés par la ciment pour former une pierre artificielle. Ils constituent la structure du béton, contribuant à renforcer sa résistance mécanique et à limiter l'apparition de microfissures causées par le retrait.

Les adjuvants se sont des produits ajoutés en pourcentage pour améliorer ou changer certaines propriétés, comme c'est indiqué sur le **tableau I.1**, nous avons principalement : les plastifiants, accélérateurs de prise, retardateurs de prise,...

ADJUVANTS	DOSAGE EN %
Plastifiants	0,15 à 1,2
Superplastifiants	0,6 à 2,5
Accélérateurs de prise	1 à 3
Accélérateurs de durcissement	0,8 à 2
Retardateurs de prise	0,2 à 0,8
Hydrofuge	0,5 à 2
Entraîneurs d'air	0,05 à 3
Rétenteurs d'eau	0,1 à 2

Tableau I.1 : Liste des adjuvants dans le béton

I.2.2-L'acier :

L'acier est principalement composé de fer et de carbone, peut aussi contenir des éléments d'alliage, qui a une parfaite résistance à la traction et aussi à la compression associé avec le béton appelé béton armé utilisé en construction (bâtiments, ouvrage d'art, infrastructures,...). L'acier sert à renforcer les structures en leur conférant une meilleure capacité pour le supporter les différents types de charges et les conditions environnementales difficiles. Afin d'éviter la rupture brutale sous les contraintes l'acier présente une bonne ductilité et une parfaite adhérence avec le béton grâce à ses reliefs à la surface (haute adhérence, ronds lisses, treillis soudés,...).

I.3-LES MILIEUX AGRESSIFS :

La Norme Française **NF P 18-011 [42]** joue un rôle fondamentale dans l'adaptation des règles aux climat et aux spécificités en imposant des prescriptions techniques claires et cohérentes qui définit les milieux agressifs comme suit :

- Milieux gazeux : dont l'agressivité résulte du taux de l'humidité relative comme : le gaz, la vapeur, la pression et la température.
- Milieux liquide : eau de mer, eaux résiduelles, eau douces, les huiles et le pétrole.
- Milieux solides : produits de stockage, agents nocifs, sols.

La norme établit également quatre classes d'agressivité environnementale : faible, modérée, élevée et extrême. Ces catégories, accompagnées de leurs symboles et des niveaux de protection correspondants sont présentées dans **les tableaux I.2 et I.3** ci-dessous:

<i>Environnement</i>	<i>Symbole</i>	<i>Mesure de protection</i>	<i>Niveau de protection</i>
Faiblement agressif	A_1	Pas de mesures particulières. Le béton confectionné suivant les règles de l'art doit être compacte par ses qualités intrinsèques.	1
Moyennement agressif	A_2	Adaption de la composition et de la mise en œuvre au condition du milieu.	2
Fortement agressif	A_3	Adaption de la composition et de la mise en œuvre au condition du milieu avec action spécifique.	3
Très fortement agressif	A_4	Nécessité d'une protection externe ou interne.	4

Tableau I.2 : Définition des classes d'agressivité [42]

<i>a) Agressivité des solutions en fonction de leur concentration en agents et de leur pH : eaux stagnantes ou à faible courant, climat tempéré, pression normale</i>				
<i>Degree d'agressivité</i>	A_1	A_2	A_3	A_4
<i>Agents agressifs</i>	<i>Concentration en mg/ l</i>			

CO ₂ agressif *	15 a 30	30 a 60	60 a 100	> 100
SO ₄ ⁻⁻	250 a 600	600 a 1500(1)	1500 a 6000	> 6000
Cl ⁻	100 a 300	300 a 1500	1500 a 3000	> 3000
Mg ⁺⁺	15 a 30	30 a 60	60 a 100	> 100
pH	6.5 a 5.5	5.5 a 4.5	4.5 a 4	<4
La limite est fixée à 3000 mg/ l pour l'eau de mer				

<i>b) Cas de l'eau douce</i>				
TAC**	< 1mé/l	-	-	-

<i>c) Agressivité des sols en fonction de la teneur en SO₄⁻⁻</i>				
%SO ₄ ⁻⁻ dans le sol sec***	0.24 - 0.6	0.8 - 1.2	1.2 - 1.4	> 2.4
Mg/SO ₄ ⁻⁻ extrait du sol ****	1200 à 2300	2300 à 3700	3100 à 6100	> 6700

Niveau de protection	1	2	3	4
-----------------------------	---	---	---	---

* CO₂ agressif = excès de CO₂ nécessaire au maintien en solution des hydrocarbonates de Ca et Mg

** T A C titre alcalimétrique complet

*** Extraction par acide chlorhydrique à chaud

**** Extraction par l'eau (rapport eau /solution= 2 / 1)

1 mé= 2.8 degrés allemand =5 degrés français

Tableau I.3 : Agressivité des solutions et des sols [42]

I.3.1-Actions des agents agressifs

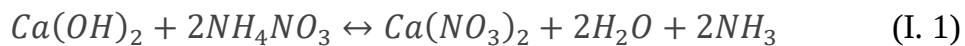
Action de la température

La température constitue un facteur clé dans l'activation des réactions chimiques des ciments. Une élévation thermique exerce une double influence :

- Elle conditionne la cure du béton, nécessitant une gestion rigoureusement maîtrisée pour prévenir l'apparition de fissure de retrait préjudiciable à sa résistance mécanique future.
- Elle accélère la cinétique des réactions, contribuant à la formation des hydrates comme aux processus de dégradations.

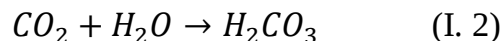
Action des nitrates d'ammonium

Le nitrate d'ammonium, soluble dans l'eau, réagit initialement avec la pâte de ciment par échange ionique, entraînant la formation d'un sel de calcium soluble $Ca(NO_3)$ et un dégagement gazeux d'ammoniac NH_3 . Par la suite, il engendre la synthèse d'un aluminat de calcium nitraté, de formule $(3CaO.Al_2O_3.Ca(NO_3)_2.10H_2O)$. L'action du nitrate d'ammonium dégrade la pâte cimentaire sans générer initialement de phénomènes expansifs [11]. Le matériau perd sa résistance mécanique par la dissolution progressive de chaux (CaO) sans manifestation visible de détérioration, à condition qu'il reste immergé dans la solution comme décrit par l'équation suivante :

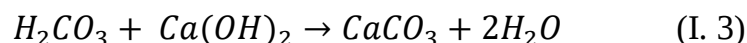


Action du dioxyde de carbone

La carbonatation du béton exposé à l'air résulte de la réaction du dioxyde de carbone CO_2 avec les hydrates du ciment, notamment la portlandite $Ca(OH)_2$. Ce phénomène est optimal sous une humidité relative de 60 à 70 % [12]. L'agent actif de cette réaction est l'acide carbonique H_2CO_3 , formé à partir du CO_2 et n'ont pas le gaz carbonique lui-même.



La réaction entre le dioxyde de carbone CO_2 et la portlandite $Ca(OH)_2$, donne une précipitation du carbonate de calcium en aragonite et calcite. Toutefois, des hydrates peuvent également se décomposer, entraînant la formation de silicates hydratés, d'alumine et d'oxyde de fer selon l'équation suivante :



La carbonatation s'intègre par degrés à partir de la face externe exposée au CO_2 avec une vitesse décroissante qui dépend du degré de saturation en eaux des pores et la porosité de la pâte.

Action des sulfates :

Parmi les principaux mécanismes d'altération chimique du béton, l'action des sulfates joue un rôle central [44], [45], [46]. Ce processus provoque une dégradation chimique du matériau, accompagnée de la formation d'hydrates expansifs, qui ont des conséquences notables sur les propriétés mécaniques [13] : diminution de la résistance et de la rigidité, apparition de fissures et déformation du matériau. Il affecte également les propriétés physico-chimiques du béton notamment en affaiblissant ses capacités liantes, en modifiant sa porosité et en altérant ses propriétés de transport.

L'attaque des sulfates entraîne la précipitation de produits dits « secondaires » qui sont formés après l'hydratation du ciment provoquant une expansion significative et des dégradations chimico-mécaniques. Ces dégradations incluent des modifications des propriétés de transport et de la porosité, l'apparition de fissures ainsi qu'une perte de résistance et de cohésion. En résumé, ce phénomène conduit à la dégradation progressive du matériau cimentaire dont la vitesse dépend de la nature et de la concentration des sulfates en contact, ainsi que du type de ciment et du rapport eau/ciment.

Action des eaux douces :

Action des eaux douces est liée à trois paramètres clés :

Le pH de l'eau qui détermine son caractère acide ou basique. Une eau est considérée comme acide si elle contient du dioxyde de carbone libre, des acides minéraux ou des sels dérivés d'un acide fort et d'une base faible. A l'inverse, elle est basique si elle contient des bicarbonates, des carbonates ou des hydroxydes.

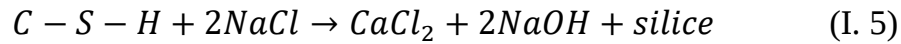
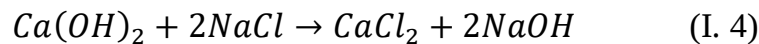
La dureté de l'eau (titre hydrométrique) qui correspond à la somme des concentrations en cations métalliques à l'exception de l'hydrogène et des métaux alcalins.

Le dioxyde de carbone agressif qui présente une fraction du dioxyde de carbone dissous dans l'eau et contribue à son potentiel corrosif.

I.3.1.1-Actions des chlorures

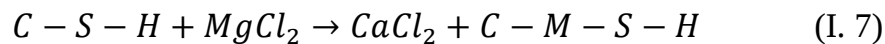
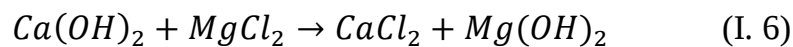
L'affrontement du ciment par l'eau marine donne plusieurs mécanismes physico-chimiques plus au moins simultanés schématiser comme suit [55] :

-Chlorure de Sodium ($NaCl$) il se manifeste par les reactions suivantes :



La création de $CaCl_2$ provoque une infiltration de la chaux et une augmentation de la porosité avec un gonflement et l'ettringite.

-Chlorure de Magnesium ($MgCl_2$) il se manifeste par les reactions suivantes :



Echange de Mg^{2+} en Ca^{2+} accompagné de la précipitation de bruche entraînant un colmatage partiel de la porosité et jouant un rôle d'atténuation.

La pénétration des chlorures au milieu naturel s'effectue principalement par deux processus : l'absorption capillaire et la diffusion [2] :

-L'absorption capillaire se manifeste lorsque le béton sec ou partiellement saturé absorbe une solution saline par capillarité.

-La diffusion quant à elle, résulte d'une différence de concentration en ions de chlorure entre la surface exposée et le béton profond intact. En milieu saturé, cela provoque un déplacement des chlorures de la zone à forte concentration vers celle à faible concentration.

Lorsque des cycles d'humidification et de séchage alternent, les deux mécanismes peuvent agir simultanément comme le cas des zones de marnage des structures partiellement immergées.

I.3.1.2-Mécanisme de transport des ions de chlorure :

Pour mieux appréhender les mécanismes de pénétration des ions de chlorure dans le béton, prenons l'exemple d'un ouvrage situé en milieu marin (voir **figure I.2**). Celui-ci peut être divisé en trois zones distinctes, chacune soumise à des conditions environnementales spécifiques et associée à des processus de transfert différents [10].

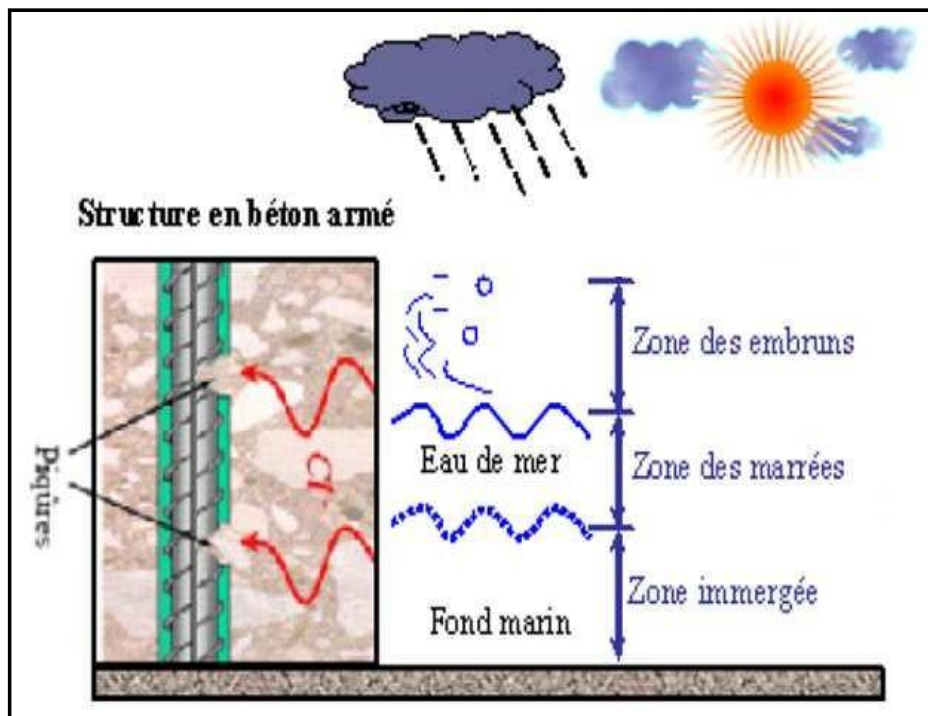


Figure I.2: Mécanisme de transport des ions de chlorure dans un milieu marin [39]

* **Partie totalement immergée** : L'ouvrage est en permanence saturé d'eau et les ions de chlorure pénètrent dans le matériau uniquement par diffusion.

* **Partie soumise aux cycles de marée** : Dans cette zone, le transfert des ions de chlorure est plus complexe. Lors de la montée des marées le matériau s'imbibe d'eau et les ions de chlorure se déplacent sous l'effet de ces deux mécanismes qui sont la diffusion due au gradient de concentration et la convection causée par le mouvement de l'eau. Pendant la descente de la marée, le matériau sèche et le processus devient plus complexe [67], [75]. Les ions se déplacent par diffusion et convection uniquement si la phase liquide reste continue. Cependant, lors du séchage l'eau migre d'abord sous forme liquide, puis lorsque la teneur en eau diminue, la phase liquide devient discontinue et le transfert se fait principalement sous forme de vapeur.

* **Partie exposée aux embruns** : Dans cette zone, le matériau absorbe l'humidité par condensation capillaire et capillarité. Les sels présents proviennent de la zone soumise aux marées et se propagent principalement par diffusion.

Une partie des ions de chlorure qui s'infiltrèrent dans le béton se fixe chimiquement à la pâte de ciment, cependant l'autre reste dissoute dans l'eau. Leur transport à travers la solution interstitielle s'effectue selon deux mécanismes différents [2]:

1-La convection : Les ions de chlorure sont entraînés par les mouvements de l'eau. Dans un environnement saturé partiellement ou soumis à des cycles d'humidification-séchage comme les zones de structures exposées aux marées, aux embruns ou aux sels de déverglaçage, les ions de chlorure peuvent être transportés par convection avec la phase liquide interstitielle. L'absorption de l'eau par capillarité correspond au mécanisme de transport des liquides à

travers un milieu poreux, provoqué par les tensions de surface dans les capillaires [1]. Ce phénomène dépend à la fois de la structure du réseau poreux et du taux de saturation du béton.

Le comportement des bétons sujet à des essais d'imbibition est donné par l'équation suivante [77], [78] :

$$A(t) = C + St^{\frac{1}{2}} \quad (\text{I. 8})$$

$A(t)$: est le coefficient d'absorption capillaire à une échéance donnée de l'essai en Kg/m^2 de surface exposée.

S : la vitesse d'absorption par remontée capillaire ou absorptivité ($\text{Kg}/\text{m}^2\text{s}^{\frac{1}{2}}$).

t : le temps écoulé (s).

C : est l'éventuelle valeur initiale observée par certains chercheurs.

2-La diffusion : les ions de chlorure se déplacent en se dissolvant dans l'eau. Le transport d'une espèce par diffusion est gouverné par le gradient de concentration. Dans une solution idéale, considérée comme infiniment diluée et où les interactions électrochimiques sont négligeables, le flux diffusif des ions peut être décrit par la première loi de Fick exprimée par l'équation suivante :

$$J_x = -D \frac{\partial c}{\partial x} \quad (\text{I. 9})$$

c : la concentration de l'espèce considérée

D : le coefficient de diffusion de l'ion en solution.

Dans un volume élémentaire, où la variation de concentration entre deux instants est égale à la quantité de matière échangée par diffusion, la relation précédente se transforme en :

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\frac{\partial J_x}{\partial x} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (\text{I. 10})$$

Le coefficient de diffusion D dans la solution dépend de la mobilité de l'ion, influencée par son diamètre et la force ionique de la solution. Quand le milieu poreux est considéré comme un volume élémentaire représentatif, d'autres paramètres comme la tortuosité et la connectivité du réseau poreux, affectent également le déplacement des ions à travers ce milieu.

I.3.1.3-Modèle de pénétration des ions de chlorure

La majorité des modèles liés à la pénétration des ions de chlorure sont attachés à une donnée d'entrée principale appelée coefficient de diffusion nécessaire pour la résolution des lois de Fick [13]. Deux types de coefficients de diffusion existent [61] :

- Coefficient de diffusion effectif des ions de chlorure- première loi de Fick :

Si on ne tient pas compte des interactions électriques entre les ions de chlorure et les autres ions présents, le développement de diffusion est décrit selon la première loi de Fick dans un régime stationnaire sans accumulation locale. Lorsque les ions se déplacent dans une direction perpendiculaire à la surface d'entrée d'un milieu homogène [13], le flux massique unidirectionnel J_e en ($Kg.m^{-2}.s^{-1}$) représentant la quantité d'ions traversant une unité de surface de béton par seconde est donnée par :

$$J_e = -D_{eff} \frac{\partial c_j}{\partial x} \quad (I. 11)$$

D_{eff} : le coefficient de diffusion effectif des ions de chlorure dans un milieu poreux.

c_j : Concentration en ions de chlorures libres de la solution interstitielle à une profondeur x et à l'instant t .

Le signe (-) indique que le flux se fait du haut vers le bas de la concentration.

Cette relation nous permet de calculer le flux massique en régime permanent des ions de chlorure, lié à un gradient de concentration. Le coefficient de diffusion dépend des conditions environnementales et des propriétés du matériau.

- Coefficient de diffusion apparent des ions de chlorure- deuxième loi de Fick :

En appliquant la loi de conservation de la masse, on dérive la seconde loi de Fick, elle décrit l'évolution de la concentration d'une substance dans le temps en régime non stationnaire, qui s'exprime dans le cas où le coefficient de diffusion effectif est indépendant de la concentration en ions de chlorure [13] de la manière suivante :

$$\frac{\partial c_l}{\partial t} = D_{app} \frac{\partial^2 c_l}{\partial x^2} \quad (I. 12)$$

D_{app} : le coefficient de diffusion apparent des ions de chlorures ($m^2.s^{-1}$) qui inclut des interactions physiques ou chimiques.

Cette relation est couramment employée pour modéliser la pénétration des chlorures par diffusion dans les bétons saturés, en régime non stationnaire. Lorsque des interactions

électriques entre les ions doivent être prises en compte, l'équation de Nernst-planck peut être utilisée pour décrire plus précisément ce phénomène.

-Relation entre le coefficient de diffusion effectif et apparent des ions de chlorure :

Les coefficients de diffusion D_{app} et D_{eff} sont associés par une relation [13] faisant intervenir la pente de l'isotherme d'interaction chlorures-matrice ainsi que la porosité du matériau :

$$D_{app} = \frac{D_{eff}}{p + \rho \frac{\partial c_{m,f}}{\partial c_l}} \quad (I. 13)$$

p : porosité du matériau accessible aux chlorure.

ρ : masse volumique apparente du matériau à l'état sec (Kg/m^3) .

$c_{m,f}$: masse de chlorures fixés par unité de masse de solide sec (Kg/Kg).

c_l : concentration en chlorures libres de solution interstitielle (Kg/m^3).

$k_d = \frac{\partial c_{m,f}}{\partial c_l}$: pente de l'isotherme d'interaction chlorures/matrice.

I.4-LA CORROSION :

Le terme **corrosion** dérive du latin corrodere qui signifie « ronger » ou plutôt « attaquer ». Ce phénomène touche tous les métaux et résulte d'une interaction physico-chimique entre le métal et son environnement. Cette interaction entraîne des modifications des propriétés du métal, suivies d'une dégradation fonctionnelle (optique, mécanique, électrique, esthétique...) [63].



Figure I.3 : Béton armé en corrosion [29]

I.4.1-Classes de la corrosion : Il existe plusieurs classes de la corrosion décrite dans le **tableau I.4** suivant :

Appelation	Images	Causes
La corrosion chimique [30]		C'est un processus entièrement chimique qui se produit à la surface d'un matériau lorsqu'il entre en contact avec un gaz ou un liquide électrolyte
La corrosion électrochimique [31]		c'est le cas le plus courant en béton armé, définit comme étant une réaction entre les armatures et un liquide électrolyte.
La corrosion biochimique [32]		c'est une modification de l'environnement suite à des bactéries dans le milieu agressif (acide sulfurique).
La corrosion uniforme [33]		c'est une perte de matière généralisée sur toute la surface surtout sur les métaux aux milieux acides.
La corrosion galvanique [34]		résulte de la formation d'une pile électrochimique entre deux métaux en contact ayant des potentiels de corrosion différents.
La corrosion atmosphérique [35]		est une réaction entre l'oxygène de l'air, la température ambiante et la surface humide du métal.

La corrosion caverneuse [36]		se produit lorsqu'une différence d'accessibilité à l'oxygène entre deux zones d'une structure crée une pile électrochimique.
La corrosion par piqures [37]		Certains anions et particulièrement les chlorures provoquent des cavités de micromètre de diamètre.
La corrosion sous contraintes [38]		Elle est due à une contrainte mécanique qui produit une fissuration du métal.

Tableau I.4 : Différents types de corrosion

I.4.2-Effets de la corrosion :

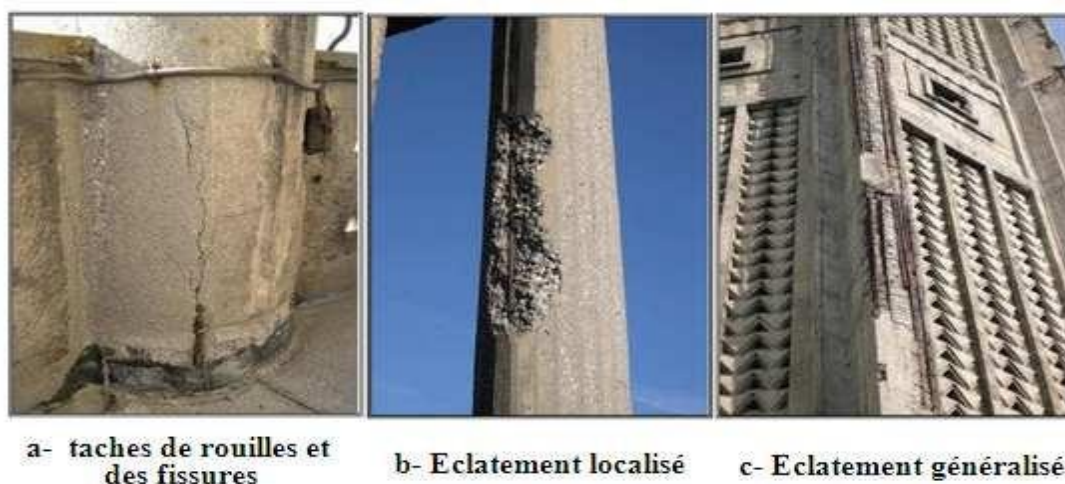


Figure I.13 : Marques perceptibles de la corrosion [39]

La corrosion des aciers d'armature dans un élément en béton armé entraîne une altération progressive des propriétés mécaniques de l'acier et du béton. Ces modifications se développent en plusieurs phases distinctes [2].

Au début du processus de corrosion, l'acier perd une partie de sa section, que ce soit à cause d'une corrosion localisée due à la pénétration des chlorures (corrosion par piqûres) ou d'une corrosion généralisée résultant de la carbonatation. Par ailleurs, la corrosion réduit l'adhérence entre l'acier et le béton. Enfin, l'accumulation des produits de corrosion sur les armatures provoque la fissuration du béton environnant.

Par la suite, la perte de section des armatures peut entraîner une réduction de la ductilité et de la résistance des éléments en béton armé. La diminution de l'adhérence entre l'acier et le béton affaiblit leur interaction mécanique. Les fissures dans le béton d'enrobage favorisent la pénétration des agents agressifs, exposant davantage l'acier à la dépasse. Lorsque la corrosion atteint un certain niveau le béton de recouvrement se fissure et une réduction de la section du béton se produit –voir **Figure I.14** -. Ce phénomène peut se manifester même avec des taux de corrosion très faibles, correspondant à une perte d'acier de l'ordre 10 à 20%. L'ensemble de ces effets contribue à réduire la capacité portante de la structure en béton armé.

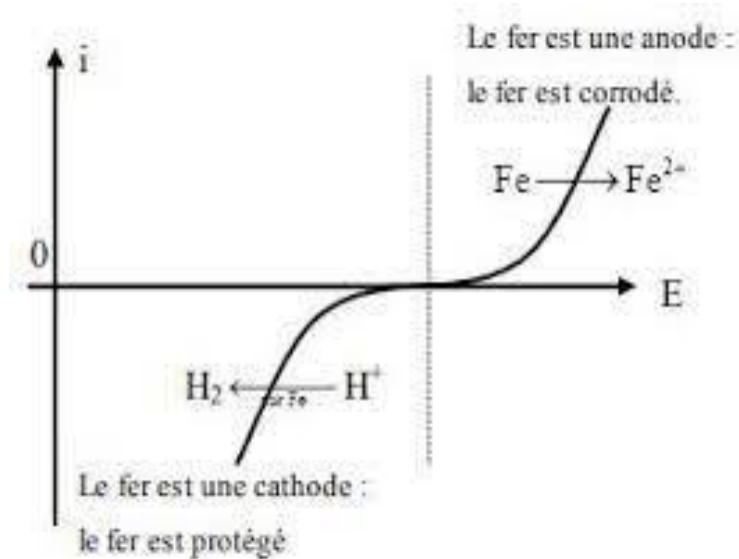


Figure I.14 : Schéma de la cinétique de la corrosion

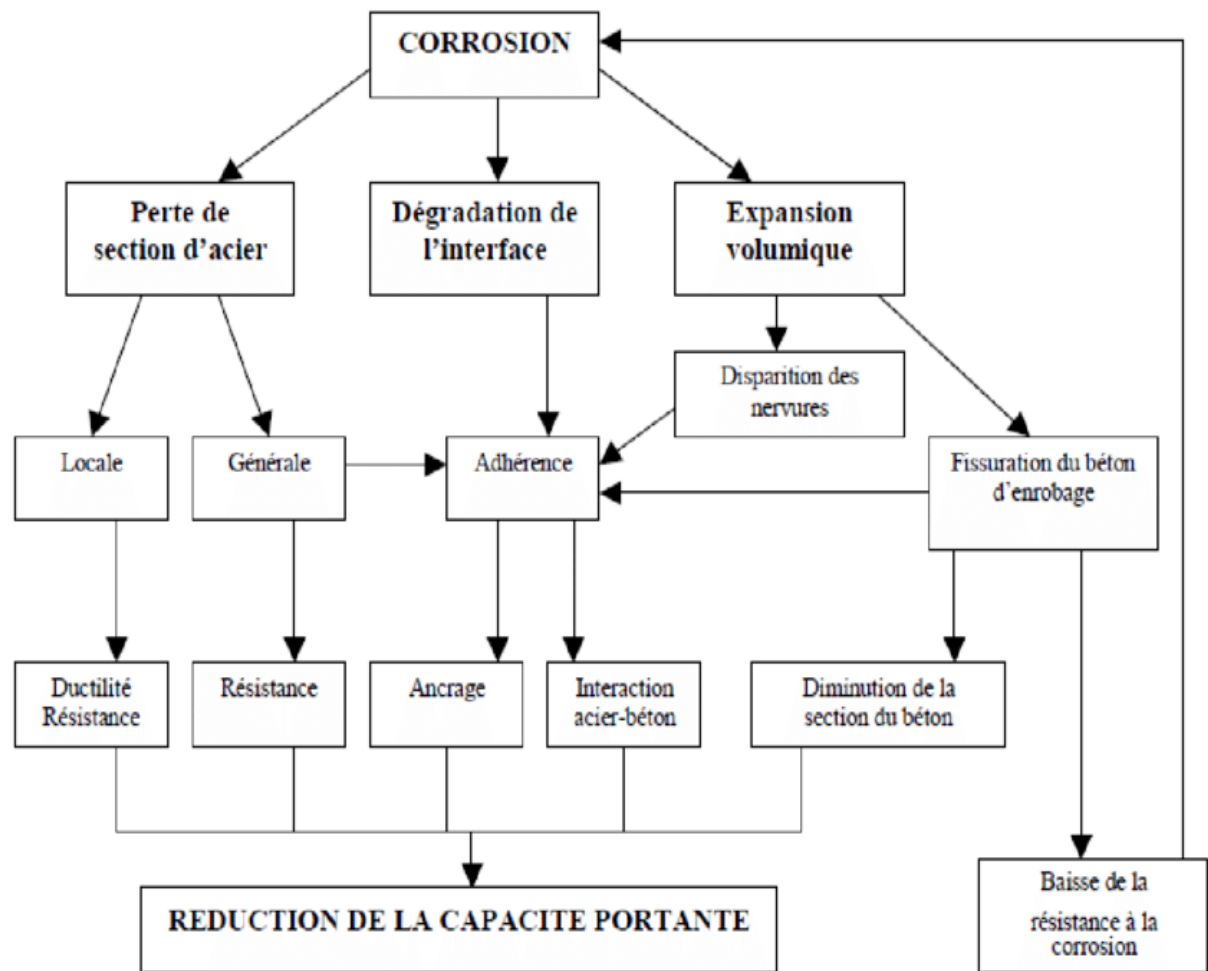


Figure I.15 : Impacts de la corrosion sur le comportement mécanique des structures [40]

I.4.3-Les étapes de la corrosion :

Le déroulement de corrosion des armatures du béton s'effectue généralement en deux phases (voir **figure I.16**) :

Phase 1: Au départ l'acier est protégé par un film passif qui empêche la formation de la rouille. Puis, durant la phase d'incubation, des agents agressifs s'infiltrant dans le béton et attaquent les armatures entraînant leur détérioration progressives. Cette phase correspond au temps nécessaire pour que les aciers perdent leur protection, sans qu'aucun dommage visible, interne ou externe, ne soit encore détectable.

Phase 2: C'est une phase de propagation durant laquelle les réactions d'oxydation à la surface du métal génèrent des oxydes et des hydroxydes. La formation de ces produits de corrosion provoque un gonflement et l'apparition de fissures dans le béton d'enrobage, ce qui à long terme conduit à la dégradation de la structure.

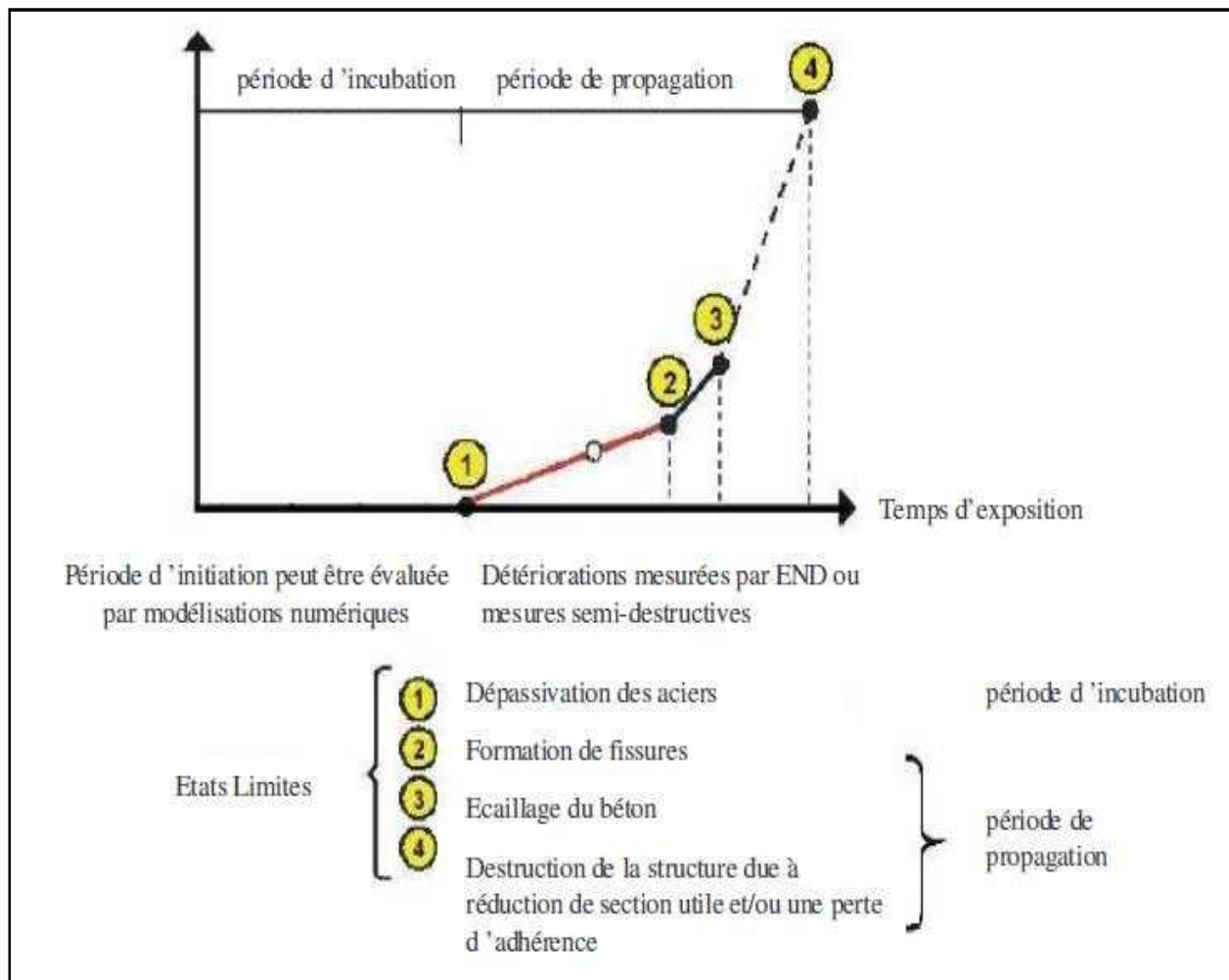


Figure I.16 : Étapes du déroulement de la corrosion [39]

I.4.4-La dépasseivation des aciers dans le béton:

La dépasseivation des aciers correspond à la destruction du film passif qui protège les armatures. Dans le cas des bétons, la corrosion des armatures est principalement déclenchée par deux phénomènes distincts [14] :

1-La pénétration des ions de chlorure provenant de l'environnement, tels que les milieux marins, l'utilisation de sels de déverglaçage ou certains milieux industriels.

2-La carbonatation du béton d'enrobage, provoquée par la réaction avec le dioxyde de carbone CO_2 présent dans l'atmosphère.

a) Lancement de la corrosion par carbonatation :

La carbonatation est un processus de vieillissement du béton qui résulte de la réaction chimique entre les produits hydratés du ciment et le dioxyde de carbone CO_2 atmosphérique dissous dans la solution interstitielle. Ce phénomène entraîne une baisse progressive du pH du béton, pouvant atteindre une valeur d'environ 9 [11] (voir **figure I.17**). La couche protectrice des armatures commence à se dégrader lorsque le pH descend en dessous de 9,5, ce qui conduit à la destruction du film passif et expose les aciers à la corrosion. Par ailleurs, la carbonatation réduit la porosité du béton, car les produits formés lors de cette réaction occupent un volume plus important que celui des réactifs initiaux.

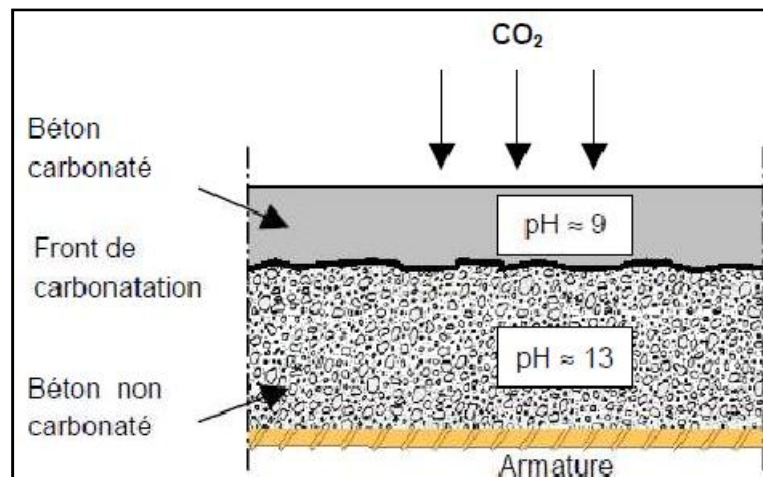
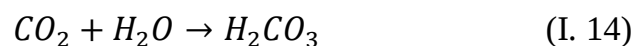


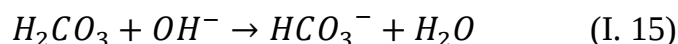
Figure I.17 : Progression de la corrosion par carbonatation [39]

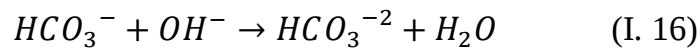
a.1-) Les réactions physico-chimique (carbonatation)

La carbonatation est une réaction de neutralisation des composés basiques, notamment les hydroxydes, par l'acide carbonique CO_2 (voir **figure I.18**). En effet, presque tous les constituants du ciment, qu'ils soient anhydres ou hydratés, peuvent subir une carbonatation, à l'exception du gypse. Les principaux mécanismes impliqués dans ce processus sont la carbonatation de la portlandite $Ca(OH)_2$ et les silicates de calcium hydratés (C-S-H) [5]. La dissolution du dioxyde de carbone (CO_2) dans la solution interstitielle du béton peut être décrite par la réaction suivante :

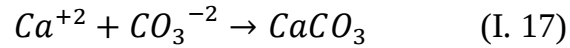


Dans un milieu aqueux, la dissociation de l'acide carbonique (H_2CO_3) a lieu en deux phases désignées par les réactions :

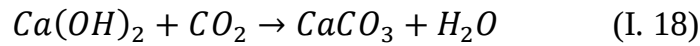




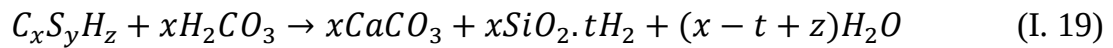
La dissolution de la portlandite se fait suivant la réaction qui suit :



La carbonatation de la portlandite s'écrit alors :



La carbonatation des C-S-H donnent naissance à des carbonates de calcium :



Les C-S-H (silicates de calcium hydratés) représentent la phase hydratée majoritaire dans la pâte de ciment et jouent un rôle clé dans la résistance mécanique du béton. Cependant, leur capacité à tamponner le pH de la solution interstitielle est moins efficace que celle de la portlandite.

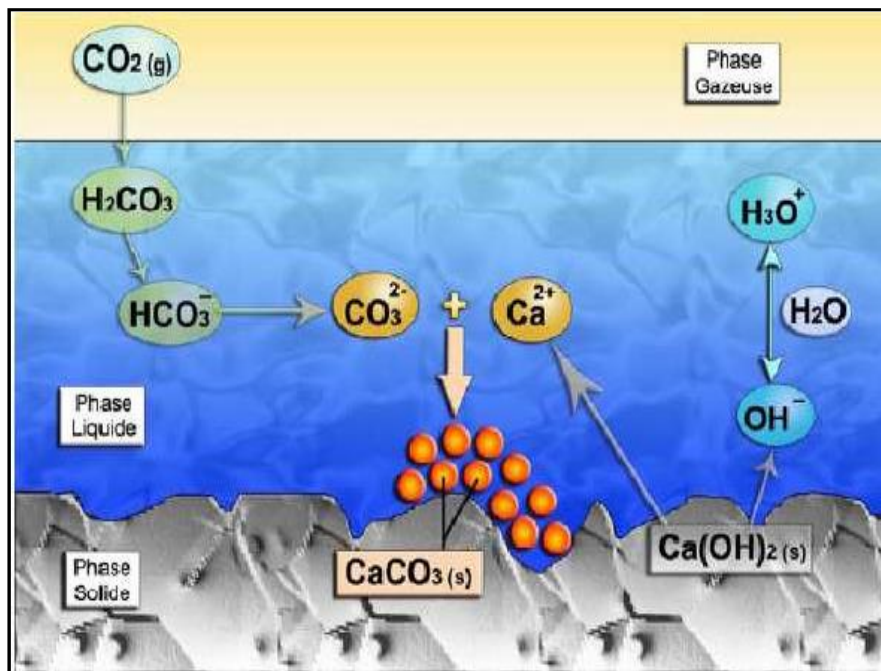


Figure I.18 : Mécanisme de la carbonatation de la portlandite [39]

a.2-) Les facteurs influençant la vitesse de carbonatation

Le rapport E/C (eau/ciment) a un impact majeur sur la porosité des matériaux cimentaires. Un excès d'eau dans le mélange augmente la porosité, ce qui favorise la pénétration des agents agressifs, tels que le dioxyde de carbone CO_2 (voir **figure I.19**).

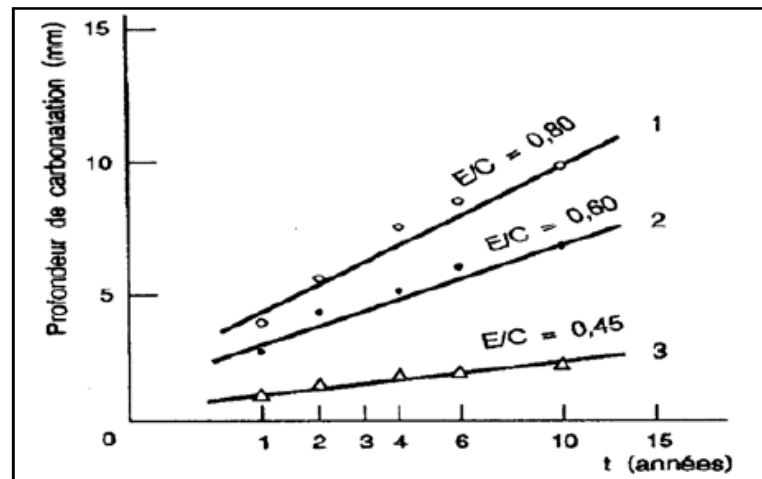


Figure I.19 : Évolution de la profondeur de la carbonatation en fonction du temps pour différents rapport E/C [39]

Le dosage en ciment influence directement la quantité de matière susceptible de subir la carbonatation comme c'est indiqué sur la **Figure I.20**. Un dosage plus élevé en ciment signifie une plus grande quantité de matière disponible pour cette réaction. Comme la carbonatation réduit la porosité du béton, elle ralentit également la pénétration du dioxyde de carbone CO_2 . Par conséquent, augmenter le dosage en ciment retarde la progression de la carbonatation.

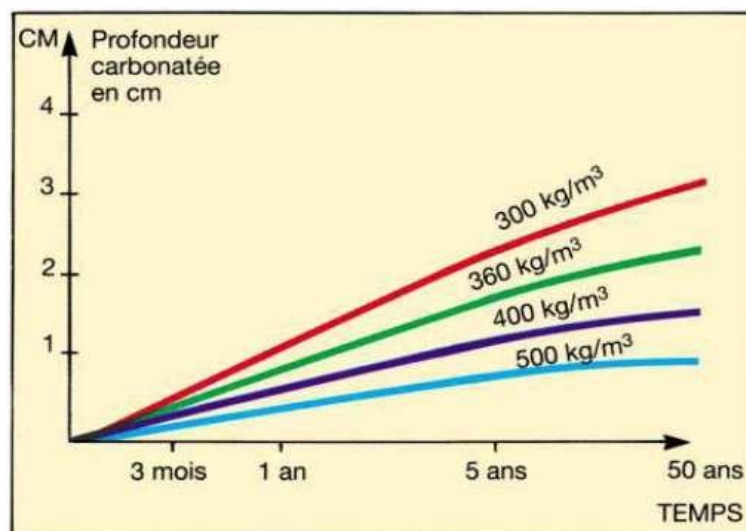


Figure I.20 : Évolution de la profondeur de la carbonatation en fonction du temps pour plusieurs dosages en ciment [39]

Le type de ciment joue un rôle important dans la carbonatation. Les ciments contenant des ajouts, tels que les laitiers, les cendres volantes ou la pouzzolane présentent généralement une teneur en composés carbonatés plus faible que celle du ciment Portland. En conséquence, la profondeur de carbonatation est souvent plus importante pour les ciments avec ajouts que pour les ciments Portland ordinaire.

La concentration en dioxyde de carbone : Le (CO_2) joue un rôle clé dans la vitesse de carbonatation. Une augmentation de la concentration en CO_2 accélère ce processus et les environnements riches en CO_2 comme les tunnels, les garages ou les cheminées, présentent les vitesses de carbonatation les plus élevées [13]. Cependant, l'impact des variations de concentration en CO_2 se limite principalement aux bétons de résistance modéré (≤ 30 MPa environ). Pour les bétons de résistance supérieure, la concentration en CO_2 n'a plus d'influence significative sur la carbonatation.

La résistance à la compression du béton influence directement la profondeur de carbonatation. On observe une relation quasi linéaire entre ces deux paramètres : plus la résistance à la compression augmente, plus la carbonatation diminue. Cela s'explique par la réduction de la porosité du béton qui limite la pénétration du dioxyde de carbone et ralentit le processus de carbonatation.

La température a une influence complexe sur la vitesse de carbonatation. D'un côté, une hausse de la température accélère les réactions chimiques, favorisant ainsi la carbonatation. De l'autre, elle réduit la solubilité du dioxyde de carbone (CO_2), ce qui diminue sa concentration disponible pour réagir [11]. Ces deux effets opposés rendent l'impact de la température sur la carbonatation difficile à prédire simplement.

L'humidité relative joue un rôle crucial dans la cinétique de la carbonatation. La teneur en eau du béton ou l'humidité relative de l'air en équilibre avec celui-ci influence significativement ce processus. La vitesse de carbonatation atteint son maximum lorsque l'humidité relative se situe entre 60% et 80 % [13]. Au-delà de 80 % elle diminue rapidement, devenant très faible lorsque les pores du béton sont saturés d'eau (humidité relative > 90 %) car la diffusion du dioxyde de carbone CO_2 dans l'eau est environ dix mille fois plus lente que dans l'air. De même, dans des conditions très sèches, la cinétique de carbonatation est considérablement réduite en raison du manque d'eau dans les pores du béton nécessaire pour dissoudre le CO_2 .

a.3-) Conséquences de la carbonatation sur le béton

Diminution de la porosité : La carbonatation induit des changements dans la structure poreuse d'une pâte de ciment durcie. Elle modifie la distribution de la taille des pores, entraînant une réduction notable du volume poreux et par conséquent une diminution de la porosité globale.

Augmentation de la résistance mécanique du béton : La carbonatation entraîne une augmentation locale de l'humidité dans les pores du béton, car la transformation de la portlandite et des C-S-H libère une partie de l'eau contenue dans la structure des hydrates. Cette eau libérée peut enrichir la solution interstitielle favorisant ainsi le transport d'agents agressifs. Il est essentiel de noter que la carbonatation de la portlandite constitue la principale source de cette libération d'eau libre.

Évolution des propriétés de transfert : La carbonatation modifie la microstructure des matériaux cimentaires, ce qui influence leurs propriétés de transfert. Cela se traduit par des changements dans les coefficients effectifs de diffusion des ions et des gaz, ainsi que dans la perméabilité aux gaz et à l'eau liquide [13]. Après la carbonatation, le coefficient de diffusion des gaz (comme l'oxygène ou l'hydrogène) diminue, tandis que celui des ions, tels que les chlorures augmente. Ces variations résultent des transformations significatives de la structure des C-S-H induites par la carbonatation.

Retrait de carbonatation : la carbonatation de la portlandite provoque une augmentation du volume des solides, pouvant varier de 3% à 19% selon le produit de réaction formé (calcite ou aragonite) [13]. Bien que cette expansion suggère un gonflement, les observations expérimentales montrent systématiquement un phénomène de retrait. Ce retrait s'explique par la perte d'eau associée à la réaction : l'eau libéré lors de la carbonatation entraîne un retrait comparable à celui causé par l'évaporation d'une quantité équivalente d'eau en l'absence de carbonatation.

Chute de pH de la solution interstitielle : Le béton possède une alcalinité élevée (pH >13), ce qui permet la passivation des aciers d'armature. Cependant, la carbonatation du béton réduit progressivement ce pH [11], créant un environnement propice à la corrosion des aciers. Au cours du processus de corrosion, la zone anodique voit sa surface diminuer progressivement, tandis que dans la zone cathodique, une rouille expansive se forme. Cette

rouille exerce une pression sur le béton environnant, conduisant à l'éclatement du béton d'enrobage.

b) Déclanchement de la corrosion par pénétration des ions de chlorure :

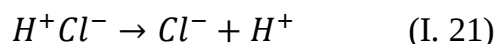
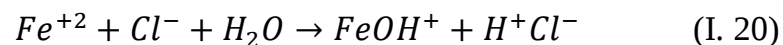
Les ions de chlorure présent dans le béton peuvent provenir de l'eau de gachage, d'agréats contaminés ou de l'environnement extérieure (produit chimiques, atmosphère marine, sels de déverglaçage). Dans le béton, les chlorures peuvent exister sous deux formes principales [13] :

- 1- Les chlorures libres dissous dans la solution interstitielle.
- 2- Les chlorures piégés résultant des réactions chimiques avec les phases hydratées du ciment de combinaisons avec les agrégats ou d'une intégration physique dans les pores du béton.

Les ions de chlorure pénètrent dans le béton et lorsqu'ils atteignent un seuil critique, entrent en contact avec l'acier. Ils attaquent alors localement l'acier initialement passivé. Ces zones localisées deviennent des zones anodiques, où l'acier se dépassive et se dissout, tandis que le reste de la surface, reste passive agit comme des zones cathodiques. La dissolution de l'acier progresse en profondeur plutôt qu'en surface, formant ainsi des piqûres et des cavités. Ce mécanisme est particulièrement complexe, car la composition chimique de la solution à l'intérieur des piqûres diffère de celle de la solution interstitielle environnante.

b.1-) Les reactions physico-chimique (ions de chlorure)

La pénétration des ions de chlorure dans le béton entraîne une réaction chimique avec l'aluminate tricalcique C_3A un composant du ciment pour former des monochloroaluminates hydratés $C_3A, CaCl_2, 10H_2O$ [11]. Au niveau des piqûres de corrosion, les ions de chlorure se combinent avec les ions d'hydrogène de l'eau pour produire de l'acide chlorhydrique qui est constamment recyclé accélérant ainsi le processus de corrosion.



La dissolution du fer et la croissance des piqûres en profondeur s'accompagnent d'une baisse significative du pH qui peut atteindre des valeurs comprises entre 3,8 et 5 [11]. Les ions ferreux libérés diffusent et se combinent avec les ions d'hydroxyde présents dans la solution interstitielle du béton. Par ailleurs, la réaction cathodique reste la même que dans le cas d'une corrosion généralisée (voir **Figure I.21**).

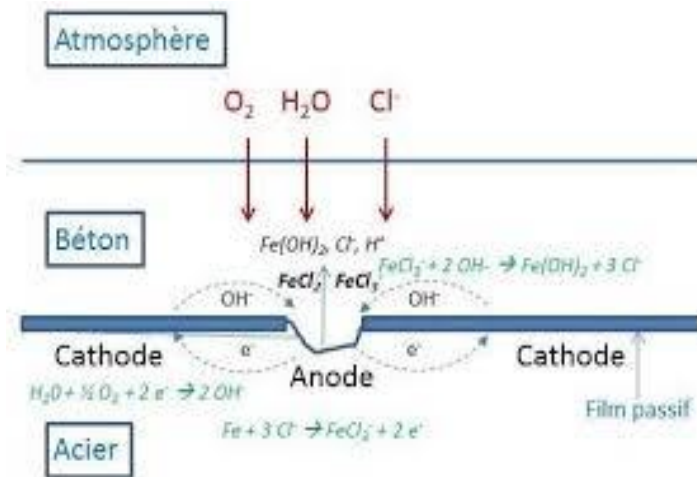


Figure I.21 : Mécanisme de dissolution de l'acier en présence des ions de chlorure [41]

b.2-) Teneur critique en ions de chlorure

Si la solution interstitielle contient une faible concentration en ions de chlorure, la dépassement des armatures ne se produit pas. Cela indique qu'il existe une teneur critique en ions de chlorure nécessaire pour initier à la corrosion. Dans la littérature, plusieurs expressions de C_{cr} (teneur critique) sont proposées. Elle peut être définie par le rapport Cl^-/OH^- c'est-à-dire le rapport entre les ions de chlorure activant Cl^- et les ions d'hydroxyde passivant (OH^-) [15],[6]. Elle peut également être exprimée en fonction de la teneur totale en chlorures (libres et liés) par rapport au poids du ciment, avec une référence couramment utilisée de 350 kg/m³. D'autres études [16] suggèrent que seuls les chlorures libres jouent un rôle dans la dépassement des armatures. Dans ce cas, le seuil critique est exprimé en termes de teneur en chlorures libres par rapport au poids du ciment, une valeur qui dépend également du pH, de l'humidité du béton, de la teneur en oxygène et d'autres facteurs environnementaux.

b.3-) Les facteurs influant sur la pénétration des ions de chlorure

Les facteurs les plus importants qui sont liés la mise en œuvre, à l'environnement ou à la composition du matériau :

Le rapport E/C :

Le transfert des ions de chlorure dans le béton dépend étroitement de ses propriétés et de perméabilité. Une réduction significative de la perméabilité de la pâte de ciment est observée lorsque le rapport E/C (eau/ciment) diminue [15] (voir **Figure I.22**). En revanche, pour des rapports E/C plus élevés, le réseau de capillaire reste interconnecté même après une hydratation complète du ciment.

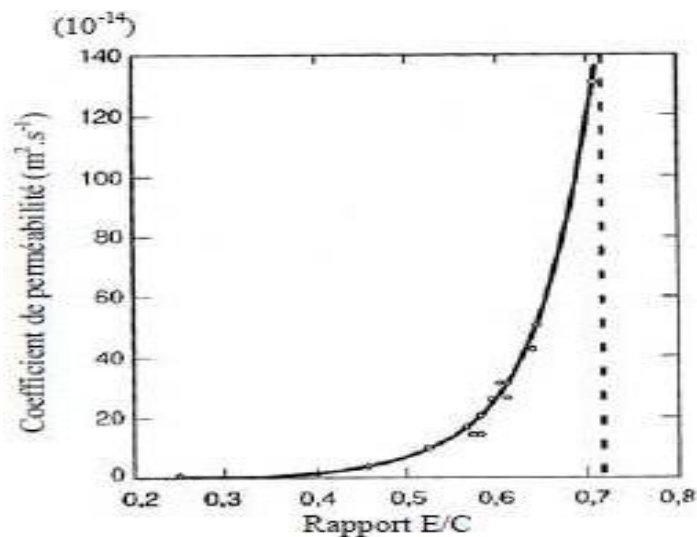


Figure I.22 : Influence de la perméabilité à l'eau des pâtes de ciment hydraté à plusieurs rapports E/C [39]

La nature du ciment :

La composition du béton joue un rôle capital dans la fixation des ions de chlorure. Ces derniers peuvent être adsorbés sur les C-S-H (silicates de calcium hydratés) ou fixés par les aluminates (C_3A) en fonction de la composition chimique du ciment (voir **Tableau I.5**). Une étude [39] a examiné la fixation des chlorures dans deux mortiers fabriqués à partir de ciments de compositions différentes- voir tableau suivant- :

<i>Mortier</i>	<i>Type de ciment</i>	<i>Composition de Bogue (%)</i>				
		C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF	$CaSO_4, H_2O$
M1	CEM I	67,2	16,4	4,5	6,5	4,5
M2	CEM II	58,8	14,7	11,3	6,6	4,5

Tableau I. 5 : Analyse chimique des ciments [39]

L'influence de la teneur en aluminates du ciment sur les chlorures est représentée sur la **figure I.23** suivante :

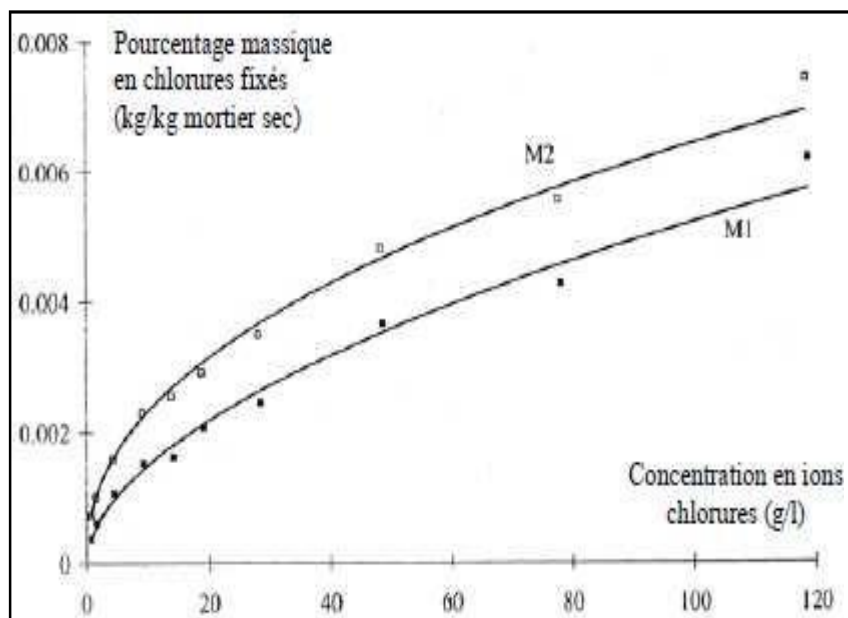


Figure I.23 : Fixation des chlorures dans deux compositions de mortiers [39]

Nous observons que le mortier M2 avec la teneur en aluminates du ciment est au-dessus de celle du ciment M1 avec une capacité de fixation environ 30% supérieure à celle du mortier M1 pour le rapport $E/C = 0.5$ identique qui fait que l'augmentation de la teneur en (C_3A) conduit à une augmentation de la teneur en ions de chlorure.

La teneur en chlorures :

Les ions de chlorure peuvent provenir soit de l'environnement extérieur soit de l'eau de gâchage lorsque leur concentration atteint ou dépasse une valeur critique (seuil), la couche protectrice de l'acier se dépassive [11]. A ce stade, l'enrobage du béton ne peut plus assurer la protection des armatures et la corrosion débute si des conditions suffisantes en eau et en oxygène sont réunies.

Les ajouts et les additions minérales :

Les ajouts minéraux et les adjuvants influencent la résistance à la compression du béton, laquelle peut servir d'indicateur de durabilité. Les fillers calcaires n'ont pas d'impact significatif sur la perméabilité ou la diffusivité du béton. Cependant, d'autres ajouts minéraux, comme les laitiers, les cendres volantes ou la fumée de silice, altèrent la composition et la texture des hydrates. Ils réduisent également la quantité de portlandite dans ces hydrates. Cette diminution s'accompagne généralement d'un affinement des pores et des capillaires, conduisant ainsi à une baisse de la perméabilité [3], [4].

La teneur en eau :

La capacité du matériau à fixer les ions de chlorure est liée à la surface spécifique en contact avec la solution interstitielle, qui diminue avec la réduction de l'humidité interne. Pourtant, même lorsque la teneur en eau diminue, les parois des pores restent recouvertes d'une fine couche d'eau adsorbée, entraînant une augmentation de la concentration de la solution au voisinage de ces pores [2]. Ainsi, à faible teneur en eau les chlorures se retrouvent attraper dans cette pellicule d'eau et peuvent être assimilés à des chlorures fixés, ce qui réduit la mobilité des ions de chlorure (voir **Figure I. 24**).

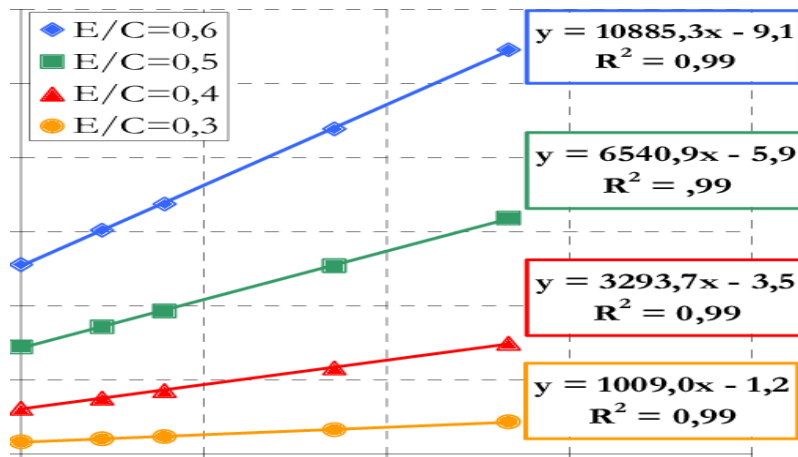


Figure I.24 : Influence de la perméabilité en fonction de la surface spécifique

Le flux liquide :

Les déplacements de l'eau peuvent réduire la capacité de rétention des ions de chlorure. Des tests d'absorption capillaire réalisés sur les deux mortiers mentionnés précédemment, utilisant une solution saline décrite dans [39], qui montrent que les ions de chlorure sont véhiculés par l'eau (**figure I.25**). Par ailleurs, un temps d'absorption trop court empêche d'atteindre l'équilibre de fixation des chlorures.

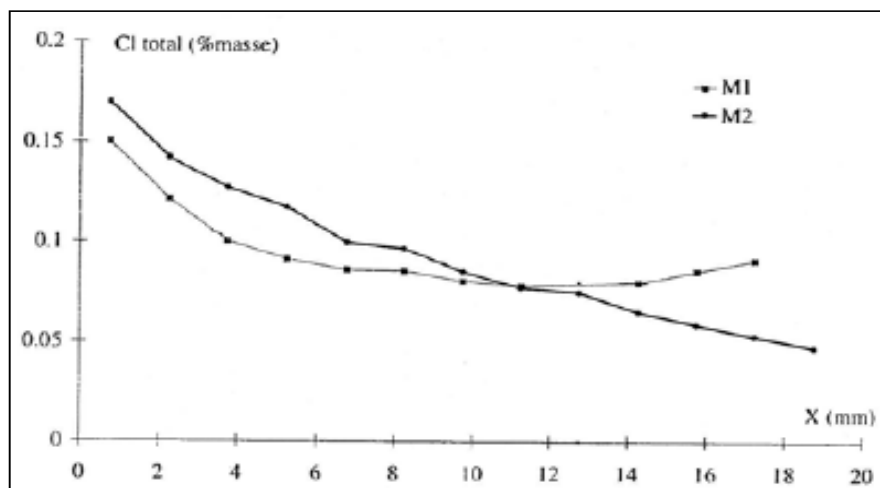


Figure I.25 : Profil en chlorures après imbibition dans des solutions de 20g/l en Na CL [39]

- Dans les pores de grande taille, les ions de chlorure transportés par l'eau ne peuvent pas interagir instantanément avec les hydrates de la matrice.
- Une vitesse élevée des ions réduit la fréquence des collisions avec les parois des pores, limitant ainsi l'efficacité de leur rétention.
- L'énergie cinétique importante des ions de chlorure dans les pores peut induire un phénomène de désorption plutôt qu'une fixation durable.
- Un matériau sec présente des hydrates incapables de fixer immédiatement les chlorures : un flux convectif rapide perturbe leur ancrage dans la matrice cimentaire.

I.5- CONCLUSION :

Nous venons de voir que la présence des agents agressifs comme le dioxyde de carbone ou plus fréquemment les ions de chlorure dans les ouvrages en béton armé est un phénomène critique qui compromet leur durabilité et leur sécurité structurelle provoquant ainsi la corrosion. Elle peut également résulter de la fissuration ou de la dégradation du béton d'enrobage, qui perd son rôle protecteur. Ce phénomène entraîne une réduction de la section des armatures, une diminution de la capacité portante de la structure et des dommages visibles, l'éclatement du béton par exemple. Pour prévenir ou limiter ce problème, il est essentiel d'adopter des mesures préventives telle que : l'utilisation de bétons de haute qualité bien compactés et à faible perméabilité, le contrôle rigoureux de la perméabilité du béton et l'application de revêtements protecteurs sur les armatures ou les surfaces exposées. En outre, des essais et des recherches approfondies dans ce domaine sont fondé pour résoudre le problème de la durabilité des structures vis avis de l'attaque des ions de chlorure qui fera l'objet du prochain chapitre.

CHAPITRE II

**REVUES SUR LA DIFFIUSION DES IONS DE
CHLORURE : ESSAIS EXPERIMENTAUX ET
MODELISATION**

II. REVUES SUR LA DIFFUSION DES IONS DE CHLORURE : ESSAIS EXPERIMENTAUX ET MODELISATION

II.1-INTRODUCTION :

Nous rappelons que la corrosion due à la diffusion des ions de chlorure est un phénomène naturel complexe qui affecte les matériaux, notamment les métaux, en les dégradant sous l'effet de leur environnement [1]. Ce processus est principalement dû à des réactions chimiques et électrochimiques qui présentent un défi majeur pour de nombreuses industries, telles que l'aéronautique, l'automobile, la construction et les infrastructures marines [6], [16]. Le raisonnement et la maîtrise de ce phénomène sont fondamentales pour améliorer la durabilité des matériaux [61], prédire la durée de vie des ouvrages en béton armé à différents échelles en fonction des conditions environnementales [14], [5], réduire les coûts de maintenance grâce à l'optimisation des stratégies d'intervention et garantir la sécurité des structures. Cette démarche repose sur une approche dynamique et systématique incluant : une conception adéquate, l'utilisation de matériaux résistants [3],[4], une surveillance continue, des stratégies de maintenance efficaces et l'emploi de modèle prédictifs [17],[9],[18]. L'objectif de ce chapitre est de présenter des modèles de calcul basés soit sur des courbes et formules issues de mesures réalisées in situ ou en laboratoire des ouvrages en béton, soit sur des simulations numériques des phénomènes de diffusion des chlorures à l'aide de logiciels spécialisés. La relation entre les données empiriques et les simulations est fondamentale dans les domaines scientifiques et techniques, notamment dans l'ingénierie, l'environnement, et l'analyse des structures. Cette relation se résume en :

1. **Complémentarité** : Les données empiriques (issues d'expériences, de mesures sur le terrain ou en laboratoire) servent de base de validation pour les modèles numériques ou simulations. Ces dernières permettent d'explorer des scénarios complexes ou extrêmes difficiles ou coûteux à reproduire expérimentalement.
2. **Validation et calibration** : Les modèles de simulation doivent être calibrés à partir de données empiriques (ajustement des paramètres pour refléter la réalité). La validation consiste à comparer les résultats des simulations aux données empiriques pour juger de leur précision.
3. **Réduction du coût expérimental** : Une fois validée, une simulation peut réduire le besoin d'expérimentations nombreuses ou dangereuses, tout en permettant de tester différents cas de figure.

4. **Amélioration de la compréhension :** La simulation permet de comprendre les mécanismes internes d'un phénomène observé empiriquement, en explorant des variables difficiles à mesurer directement.
5. **Limites et ajustements :** Les inexactitudes dans les données empiriques peuvent fausser les simulations. De même, les hypothèses simplificatrices des modèles peuvent limiter la fidélité par rapport aux résultats réels.

II.2-RECHERCHES BIBLIOGRAPHIQUES :

Les recherches récentes sur la diffusion des chlorures s'accroissent dans deux directions : les approches expérimentales et les approches numériques :

a. Approches expérimentales :

Les recherches expérimentales demeurent essentielles pour valider les modèles numériques et obtenir des données fiables sur le mécanisme de diffusion des ions de chlorure dans un béton. Ces travaux comprennent :

- Les tests en laboratoire par exposition des matériaux à des environnements agressifs simulés de manière contrôlée (eau salée, atmosphère humides ou acides).
- les caractérisations physiques par l'utilisation des techniques telles que la microscopie électronique à balayage, la diffraction des rayons X ou la spectroscopie pour examiner les produits.
- Les essais en conditions réelles en évaluant les matériaux dans des environnements réels afin d'étudier leurs comportement à long terme.

b. Approches numériques :

Les méthodes numériques offrent la possibilité de modéliser et de simuler les mécanismes complexes de la diffusion des ions de chlorure dans des ouvrages en béton grâce à des outils informatiques et des modèles mathématiques. Ces approches comprennent :

- La mécanique des fluides par l'analyse de l'influence de l'écoulement des fluides dans des environnements marins ou industriels.
- Les modèles d'évolution de la microstructure par simulation des interactions entre les structures cristallines et les milieux agressifs.

- l'intelligence artificielle (IA) par exploitation d'algorithmes pour interpréter les données expérimentales et anticiper le comportement des matériaux sous différentes conditions.

Ces outils numériques permettent d'explorer une multitude de scénarios, de diminuer les coûts liés aux expérimentations et d'optimiser les matériaux en fonction des environnements spécifiques.

II.2.1 RECHERCHES EXPERIMENTALES:

Les approches mentionnées dans la littérature reposent sur des modèles décrivant l'impact des ions de chlorure associé à la carbonatation, permettant de calculer la concentration pour différents types de béton avec ou sans actions mécaniques [19], [3]. Par ailleurs, des études comparatives ont été menées pour analyser les variations de porosité, de perméabilité, de coefficient de diffusion apparent, de concentration de surface et de profondeur de pénétration des ions de chlorure sur des ouvrages réels [20],[6]. Enfin, une étude expérimentale a été réalisée pour évaluer la diffusion des ions de chlorure dans le béton soumis à des contraintes mécaniques [15].

II.2.1.1 Comportement de diffusion des ions de chlorure dans le béton sous l'influence de la charge et de la carbonatation :

Un modèle amoindri de poutre-caisson en béton a été développé par Yinglong Liu and al [19] en 2020 pour des recherches expérimentales. En revoyant la formule existante de calcul de la concentration en ions de chlorure et en intégrant plusieurs facteurs tels que la charge, les ions de chlorure et l'influence de la carbonatation, une nouvelle approche a été proposée et validée par des tests expérimentaux. Les résultats révèlent que la concentration en ions de chlorure sur une même section transversale de la poutre-caisson n'est pas uniformément répartie en raison de l'effet de cisaillement et de la forme spatiale. Après avoir pris en compte l'influence de la carbonatation, l'écart observé par rapport au modèle amélioré proposé est généralement réduit (voir figures II.1- II. 4)

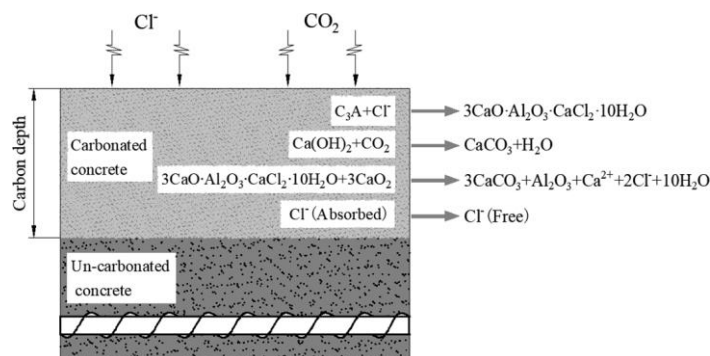


Figure II.1 : Attaque des chlorures et du dioxyde de carbone [19]

La loi de Fick dans le cas bidimensionnelle

$$\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} = \frac{1}{D} \frac{\partial C}{\partial t} \quad (\text{II. 1})$$

L'expression de la concentration

$$C_f = C_0 + (C_s - C_0) \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \operatorname{erf} \left(\frac{y}{2\sqrt{Dt}} \right) \right) \quad (\text{II. 2})$$

Figure II.2 : L'emplacement des jauges de déformation dans les poutres-caissons [19]

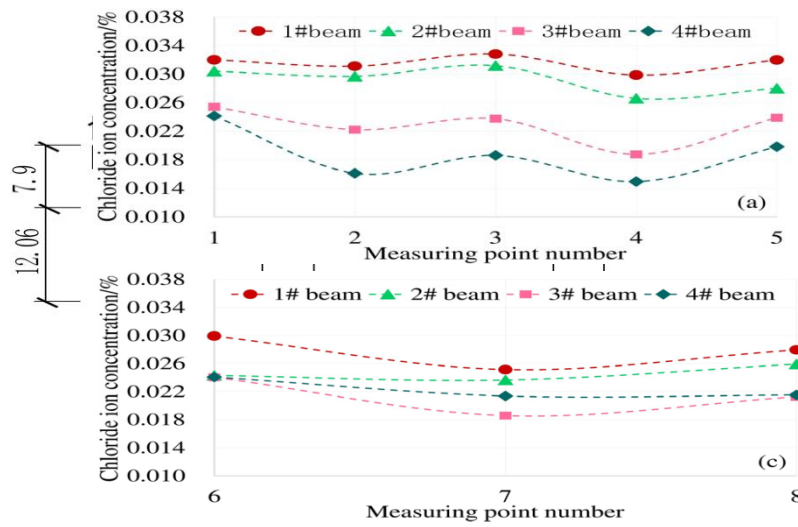


Figure II.3 : La concentration en chlorures dans les points de mesure supérieurs et inférieurs [19]

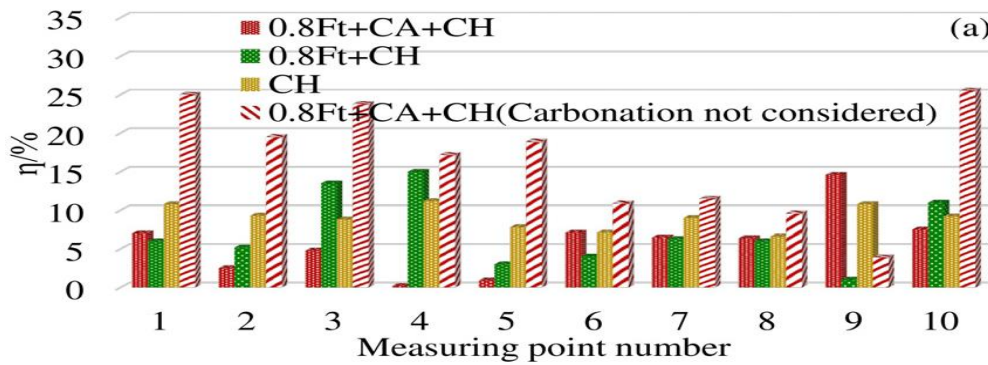


Figure II.4 : Le taux de cumule du coefficient spécifique dans les points de mesure [19]

Ce travail s'est structuré autour de deux axes principaux. Tout d'abord, une analyse quantitative a été menée pour évaluer l'impact de la carbonatation sur la diffusion des ions de chlorure. Pour ce faire, la formule initiale de calcul de la concentration en ions chlorures a été ajustée en introduisant un coefficient spécifique qui prend en compte l'effet de la carbonatation. Cette modification a permis d'établir une nouvelle formule intégrant cet effet. Ensuite, un modèle en béton à l'échelle d'une poutre-caisson a été développé. Ce qui a permis d'analyser la dégradation de la durabilité de la poutre-caisson sous l'effet combiné de la charge mécanique, de la carbonatation et des ions de chlorure. Les résultats obtenus ont mis en évidence l'importance pratique de l'influence de ces trois facteurs (carbonatation, charge et ions de chlorure) sur le comportement de la poutre-caisson en béton.

II.2.1.2 Caractéristiques de durabilité des bétons à haute et à ultra haute performance :

Dans cette étude Muazzam G.S and al. [3] en 2021 examinent les caractéristiques de durabilité du béton à haute performances (HPC) et du béton à ultra-hautes performances (UHPC), en les comparant à celles du béton à résistance normale (NSC). Les propriétés évaluées incluent la résistivité, la perméabilité aux chlorures, la porosité, ainsi que la résistance à la migration des chlorures et à la carbonatation pour ces trois types de béton. La microstructure et les produits d'hydratation sont analysés à l'aide de techniques telles que la microscopie électronique à balayage et la diffraction des rayons X [62]. Les résultats révèlent que le coefficient de diffusion des chlorures dans les bétons à haute performances est au moins mille fois inférieur à celui du béton normal, ce qui retarde significativement l'amorçage de la corrosion des armatures en acier. Grâce à ces propriétés améliorées, ces bétons sont de plus en plus recommandés pour des structures nécessitant des résistances à la compression allant jusqu'à 160 MPa. Par ailleurs, dans des conditions climatiques sévères, un enrobage de 30 mm et une réduction des pores interconnectés semblent constituer une meilleure protection contre la corrosion (voir figures II. 5- II. 9).

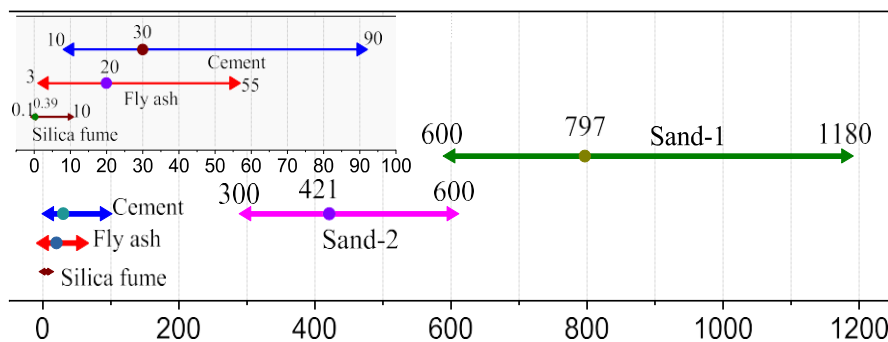


Figure II.5 : Taille des particules des ingrédients utilisés dans les UHPC. Les flèches représentent le minimum et le maximum, tandis que le point indique la taille médiane des particules [3]

Le temps d'initiation à la corrosion

$$T_i = \frac{c_c^2}{4D_c \left(\text{erf}^{-1} \left(1 - \frac{c_t}{c_s} \right) \right)^2} \quad (\text{II. 3})$$

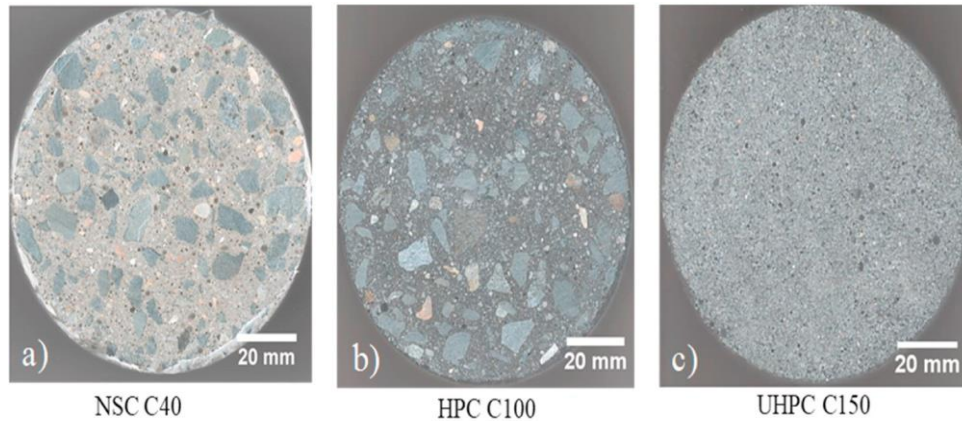


Figure II.6 : Sections transversales des échantillons cylindriques de béton a) NSC, b) HPC et c) UHPC [6]

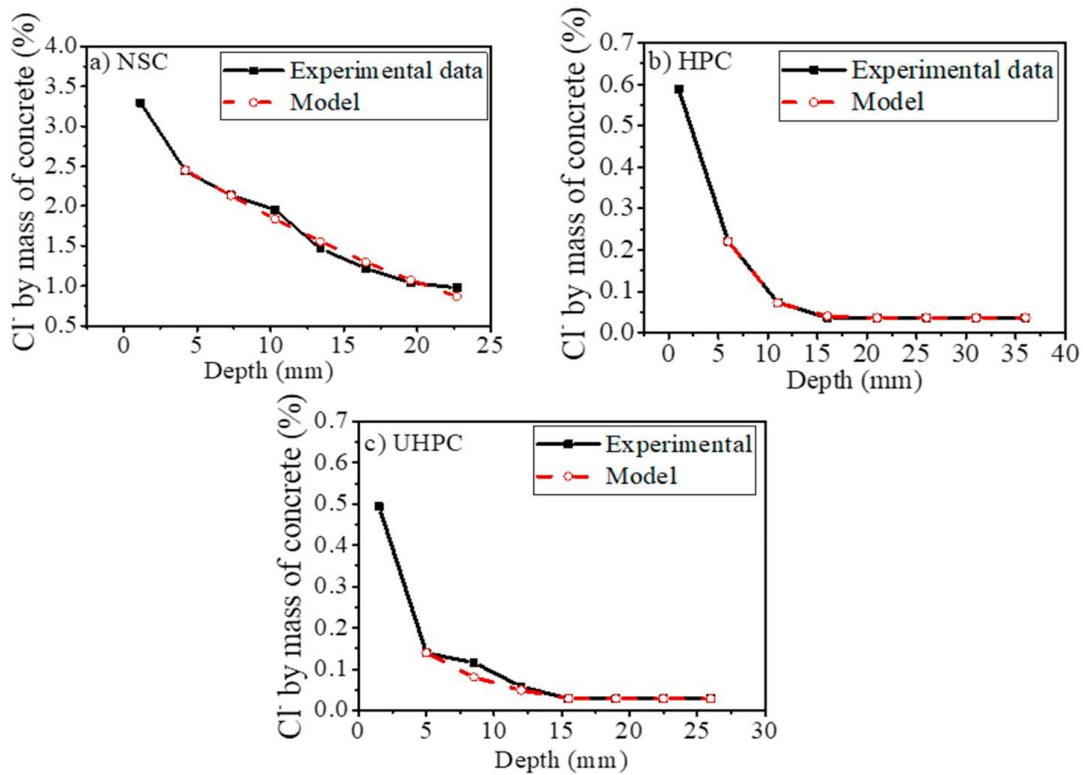


Figure II.7 : Profils des chlorures en fonction de l'enrobage pour les trois bétons a) NSC, b) HPC et c) UHPC [3]

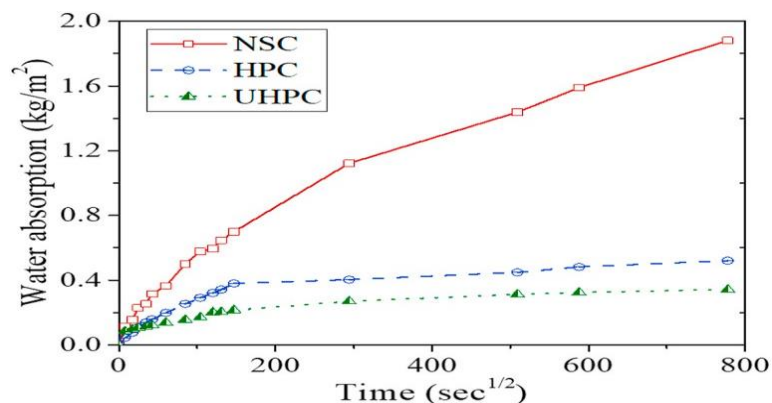


Figure II.8 : L'absorption des trois bétons a) NSC, b) HPC et c) UHPC [3]

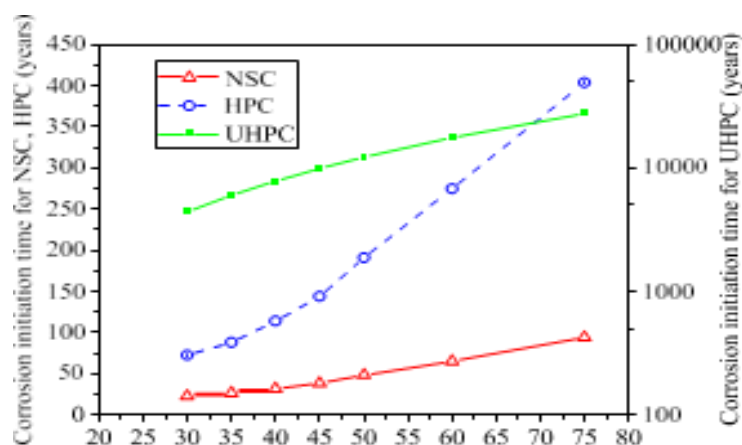


Figure II. 9 : Temps d'initiation de la corrosion de NSC et HPC et UHPC pour différentes profondeurs de l'enrobage [3]

Cette recherche a révélé que le (HPC) le béton à haute performance et le (UHPC) le béton à ultra haute performance constituent des solutions parfaites pour répondre aux problèmes de durabilité dans les conditions climatiques extrêmes. Ces matériaux cimentaires peuvent être fabriqués à partir des ingrédients facilement accessibles, en utilisant des méthodes de mélange et de durcissement conventionnelles, tout en offrant une résistance à la compression élevée. L'analyse des propriétés de durabilité de ces matériaux a permis de dégager les conclusions principales suivantes : les coefficients de diffusion des chlorures pour le HPC et le UHPC se sont avérés respectivement bien inférieurs à ceux du béton à résistance normale (NSC). De plus, pour une épaisseur d'enrobage de 30 mm, le temps d'initiation à la corrosion est multiplié par 3 pour le HPC et par 78 pour le UHPC, par rapport au NSC.

II.2.1.3 Évolution du taux de pénétration des ions dans les matériaux cimentaires alternatifs :

Dans ce travail Amir Behravan and al. [20] en 2021 comparent les variations de plusieurs paramètres clés pour trois matériaux cimentaires, notamment la porosité perméable, le coefficient de diffusion apparent, la concentration en surface et la profondeur de pénétration alternatifs (MCA) différents et du ciment Portland, sur un an. Une stagnation avec une solution d'iodure de potassium, les matériaux cimentaires étudiés (ACM) comprennent le ciment d'aluminate de calcium (CAC3), le ciment sulfoaluminate de calcium (CSA2) et le ciment sulfoaluminate de calcium enrichi d'un additif réducteur de pores (CSA2B) et un liant activé par les bases liés à des cendres volantes de classe C(AA1). Le coefficient de diffusion apparent des échantillons ainsi que la porosité sont indépendants et variables avec le temps (voir figure II. 10- II. 11).

L'expression de la porosité

$$Porosity = \frac{W_{sa} - W_d}{W_{sa} - W_{su}} \times 100 \quad (II. 4)$$

La concentration s'écrit :

$$C_{(x,t)} = C_s (1 - erf(\frac{x}{2\sqrt{D_{ac}t}})) \quad (II. 5)$$

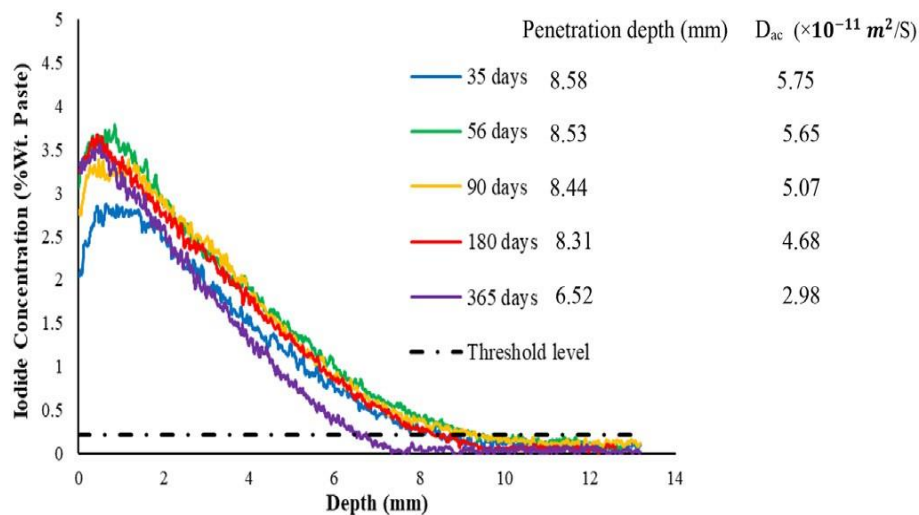


Figure II.10 : Profils de concentration en iodure du liant OPC en profondeur [20]

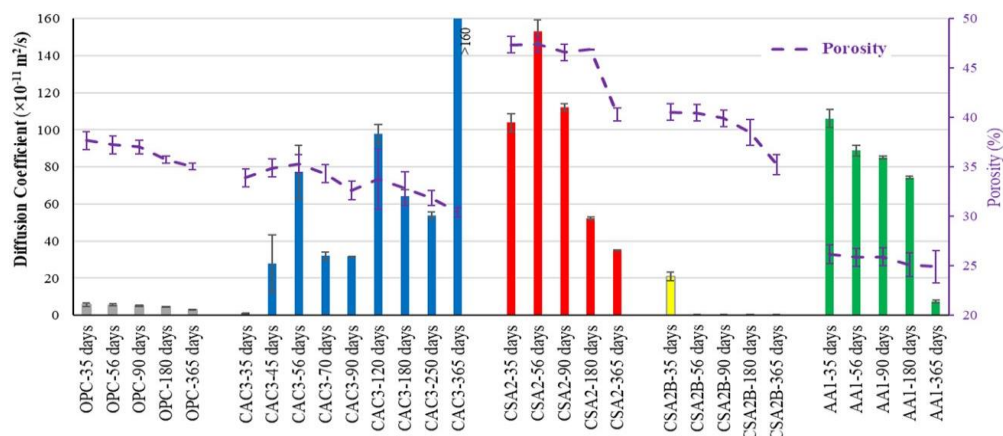


Figure II.11 : Coefficients de diffusion apparent et porosité à différents âges [20]

Les auteurs de cet article étudient l'évolution temporelle de la porosité, du coefficient de diffusion apparent, de la concentration en surface et de la profondeur de pénétration des ions des pâtes cimentaires à base de Ciment Portland Ordinaire (OPC) et de plusieurs matériaux cimentaires alternatifs (ACM), avec un rapport eau/ciment (W/C) de 0.40. Les ACM analysés comprennent le ciment d'aluminate de calcium (CAA3), le ciment sulfoaluminate de calcium (CSA2), le ciment sulfoaluminate de calcium avec un additif réducteur de pores (CSA2B), ainsi qu'un liant activé par les alcalis à base de cendres volantes de classe C (AA1). Ce travail apporte des informations clés sur l'évolution des propriétés de transport de masse dans ces systèmes au fil du temps, tout en proposant des mécanismes explicatifs possibles pour leur comportement. Le coefficient de diffusion de l'échantillon de sulfoaluminate de calcium spécialement s'est détérioré au fil du temps. Cela est probablement dû à la conversion des produits d'hydratation. Le travail montre également pour ces matériaux que la porosité perméable n'est pas un bon indicateur du coefficient de diffusion apparent.

II.2.1.4 Étude expérimentale du coefficient de diffusion des chlorures du béton autoplaçant:

La pénétration des ions de chlorure est un facteur déterminant influençant la durabilité des structures en béton, en particulier dans des environnements agressifs. Des recherches menées par Naser Nostratzei and al. [6] en 2020 ont mis en évidence une corrosion sévère due aux chlorures dans les structures en béton armé de la région méridionale de l'Iran, le long du littoral de la mer d'Oman. Cette étude examine l'impact des différentes conditions environnementales de cette région sur la pénétration des chlorures ainsi que sur les propriétés mécaniques du béton autoplaçant (SCC) et du béton conventionnel (NC) [76]. Pour ce faire, plusieurs échantillons prismatiques ont été exposés à divers environnements, tel que la zone de marée, l'immersion et les conditions atmosphériques. La concentration en ions de chlorure en surface ainsi que le coefficient de diffusion des chlorures dans le SCC ont été calculés à l'aide de la deuxième loi de Fick aux âges 28, 90 et 150 jours, puis comparés à ceux du NC. Sur la base des résultats obtenus, des relations ont été établies pour la perméabilité et la

concentration en chlorures en surface du béton autoplaçant dans ces environnements agressifs à des différents âges. L'analyse de la durée avant corrosion, déterminée à partir de ces relations, montre que pour un même rapport eau /ciment, le SCC présente une durabilité supérieure à celle du béton conventionnel (NC) – voir Figures II .12 – II. 16.

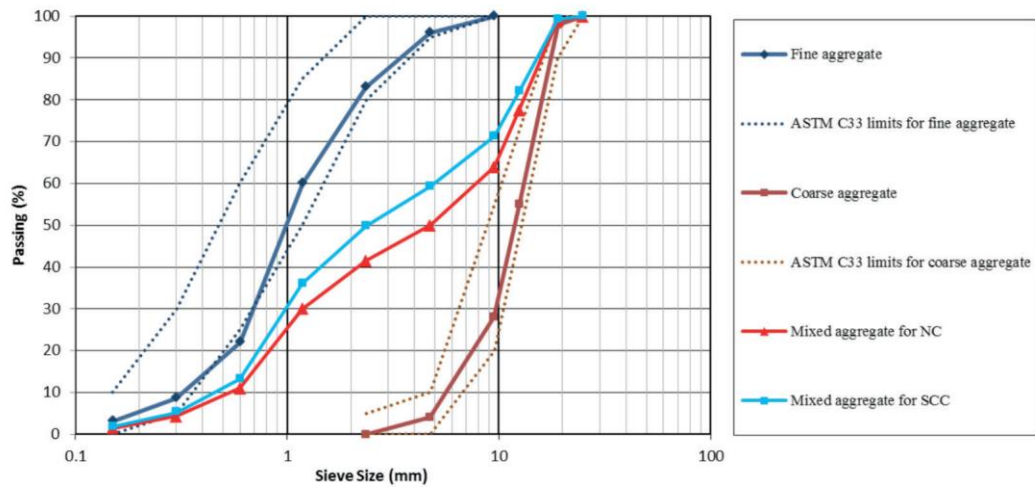


Figure II. 12 : Classement des agrégats et comparaison avec ASTM [6]

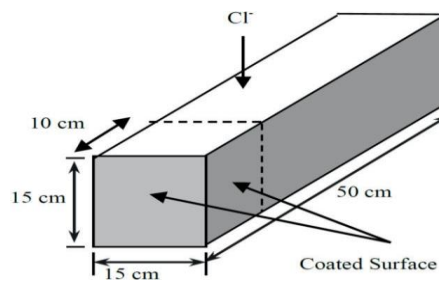


Figure II.13 : Échantillon typique de prisme en béton NC et SCC [6]

La seconde loi de Fick et le coefficient de diffusion s'écrivent :

$$C(x, t) = C_s \left[1 - \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_c t}} \right) \right] \quad (\text{II. 6})$$

L'expression du coefficient de diffusion est donnée par :

$$D_0 = D_{c,ref} \left(\frac{t_{ref}}{t} \right)^m \quad (\text{II. 7})$$



Figure II.14 : Localisation du site de recherche sur la durabilité du béton, la mer d'Oman (Port de Chabahar) [6]

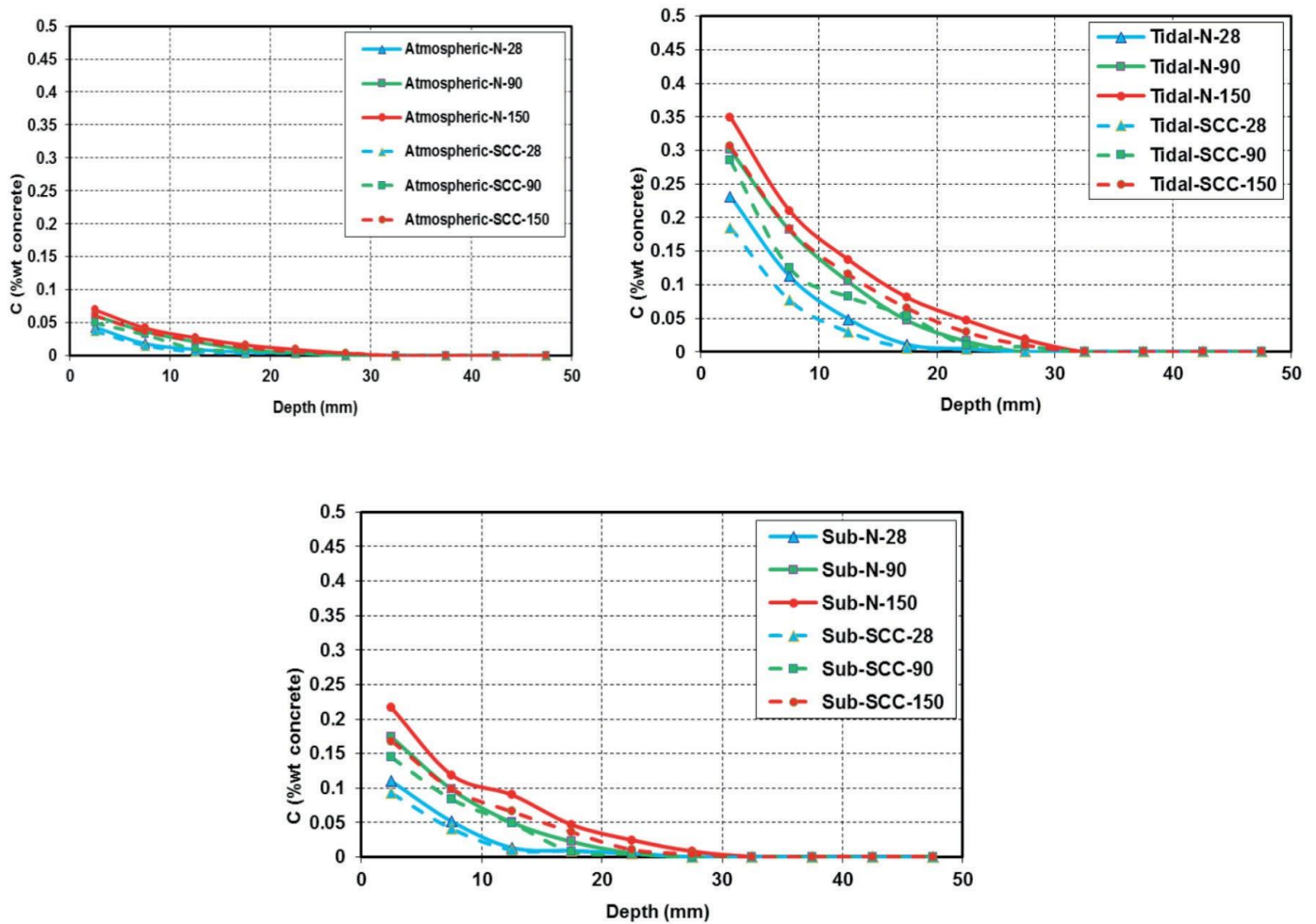


Figure II.15 : Profils des ions de chlorure de NC et SCC pour différentes conditions d'exposition : (a) atmosphérique ; (b) immersion ; (c) marée [6]

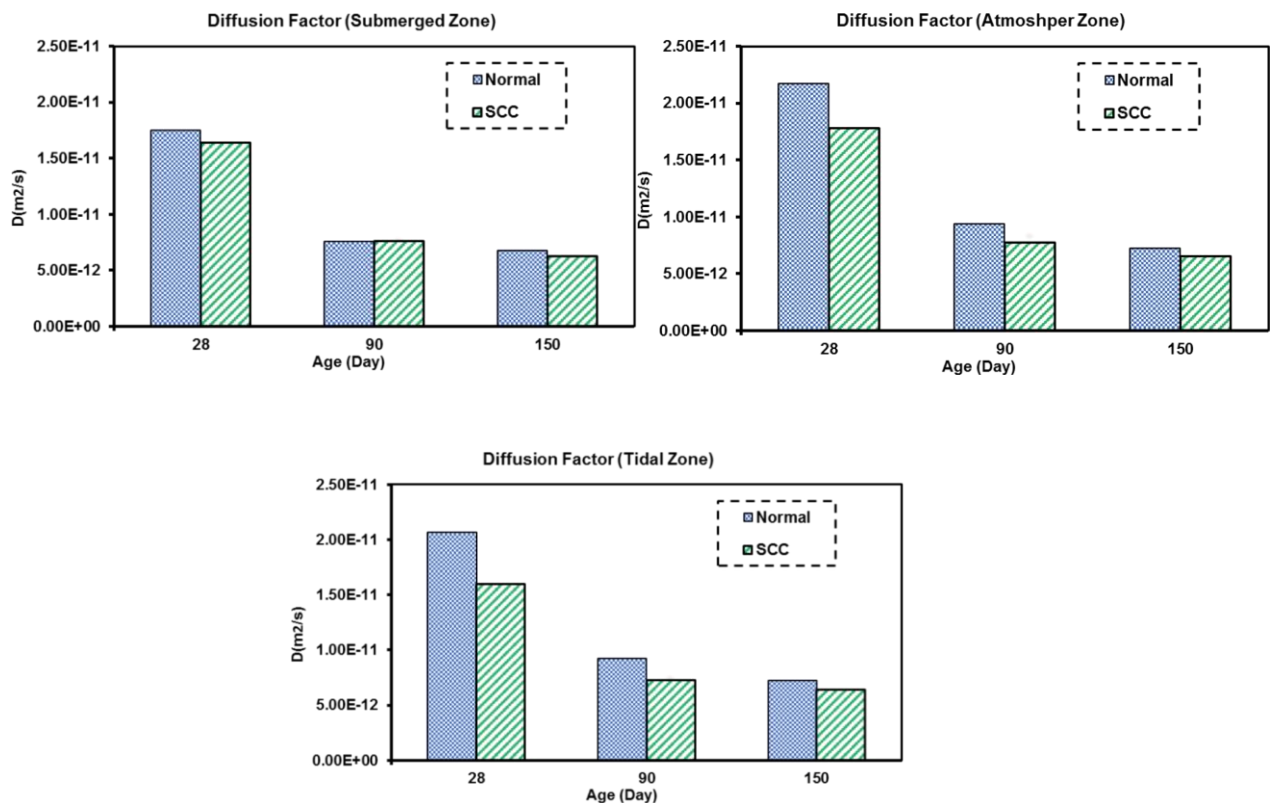


Figure II.16 : Profils comparatif de la diffusion des ions de chlorure de NC et SCC pour différentes conditions d'exposition atmosphérique, immersion et marée [6]

L'analyse des trois environnements agressifs de la mer d'Oman, étudiés par les auteurs et de leurs effets sur la pénétration des ions de chlorure dans le béton a permis de tirer les conclusions suivantes : les tests indiquent que la zone de marée est la plus agressive en termes de pénétration des ions de chlorure, aussi bien pour le béton conventionnel (NC) que pour le béton autoplaçant (SCC). De plus, l'examen des profils de concentration en ions de chlorure révèle que le béton autoplaçant offre de performances supérieures à celles du béton conventionnel dans cet environnement marin. Les résultats de l'étude sur le temps d'initiation de la corrosion montrent que béton autoplaçant présente une durée avant corrosion plus longue que le béton classique. Dans les conditions de marée, d'immersion et atmosphériques, le temps de corrosion du béton autoplaçant est deux fois plus élevé que celui du béton conventionnel. Dans l'ensemble, ces résultats démontrent que l'utilisation du béton autoplaçant dans les structures marines de la région de Chabahar réduit la perméabilité, améliore la résistance à la pénétration des ions de chlorure et renforce ainsi la durabilité des structures.

II.2.1.5 Étude expérimentale de la diffusion des ions chlorure dans le béton soumis à des contraintes mécaniques :

Dans cet article Xiaokang Cheng and al. [15] en 2020 décrivent la méthodologie adoptée pour analyser la corrosion dans un cadre expérimental utile pour notre travail. Les techniques utilisées, telles que les essais mécaniques, les analyses de surface sont détaillées, ainsi que les équipements et protocoles mis en œuvre. L'objectif principal est de reproduire les conditions de corrosion réalistes ou contrôlées afin d'obtenir des résultats fiables et reproductibles. Ces données serviront ensuite de base pour une interprétation approfondie et une comparaison avec les résultats théoriques. Cette étude s'est concentrée sur les propriétés de diffusion des ions de chlorure pour divers types de béton avec des rapports E/C (eau /ciment) variés, soumis à des contraintes de compression uni axiale et bi axiale maintenues. Par conséquent, il est essentiel de mieux comprendre le temps de diffusion des chlorures dans les structures en béton présentant différents rapports E/C, en tenant compte de l'effet des contraintes de compression.

Conformément aux travaux antérieurs sur la diffusion, l'objectif de cette étude est d'analyser la loi de diffusion des ions de chlorure dans le béton sous différentes conditions de contrainte de compression. Une série d'expériences a été menée pour étudier la pénétration des ions de chlorure dans le béton soumis à des contraintes de compression uni axiale et bi axiale et la variation de la concentration en fonction du temps a été analysée. Ensuite, le coefficient de diffusion apparent des chlorures sous contraintes a été calculé à l'aide de l'équation de diffusion de la deuxième loi de Fick. De plus, les variations du coefficient de diffusion apparent des ions de chlorure sous contraintes ont été examinées. Enfin, l'applicabilité des modèles de diffusion a été vérifiée à l'aide de données expérimentales issues d'articles publiés, qui serviront de base de données pour cette recherche.

II.2.1.5.1- Matériaux et préparation des échantillons

Le plan expérimental est comme suit :

Les spécimens de béton sont réparties en trois catégories, à savoir les catégories D, E et F. Les catégories D et E sont utilisées afin de savoir l'impact de la charge mécanique de compression sur la diffusion des ions de chlorure or les catégories F sont considérer comme des échantillons témoin. Le ciment Portland a une résistance caractéristique à la compression de 42,5 MPa, fournie par Changsha. Le gravier d'une taille maximale de 20 mm et d'une densité de 1550 kg/m³ disponible dans la ville de Liu yang, province de Hunan en Chine est utilisé comme agrégat grossier. Le sable de rivière naturel a été utilisé comme agrégat fin avec un module de finesse compris entre 2,3 et 3,1. Tous les échantillons de béton sont additionnés de super plastifiant à base d'éthers poly carboxyliques (SP). Après la conception des éprouvettes, leur durcissement s'effectue dans des conditions contrôlées : une température de $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ et une humidité relative de $90 \pm 5\%$ et ceci pendant 28 jours. Certain spécimens de

béton ont été testés pour déterminer leurs résistance à la compression. Les valeurs mesurées pour des rapports E/C de 0.44, 0.40 et 0.36 sont respectivement de 47.21 MPa, 52.68 MPa et 56.78 MPa. Les autres éprouvettes ont été soumises à une contrainte de compression soutenue dans le cadre de l'expérience visant à étudier la diffusion des ions de chlorure.

A- Dispositions expérimentales de l'essai

Afin d'inspecter la loi de diffusion des ions de chlorure unidimensionnelle dans le béton sous une contrainte mécanique de compression, en appliquant une couche de résine époxy sur les cinq autres surface des échantillons, sauf la surface de pénétration. La pression uniforme appliquée sur les deux surfaces de l'échantillon de béton est exprimée comme σ_{cx} et σ_{cy} , respectivement. Pour le chargement unidimensionnel les catégories D, les éprouvettes de béton sont placées proprement dans la direction axiale du dispositif de chargement et la contrainte de compression est surveillée et contrôlée par les relevés de pression du vérin à vis comme le montre **la figure II.17**. Pour les chargements bidimensionnel catégories E, sauf que la direction axiale est conforme à celle des catégories D, chaque éprouvette de béton est équipée d'une plaque de transfert de force sur le côté latéral comme le montre **la figure II.18**. Un anneau de compression de la même taille que la longueur latérale de l'échantillon de béton est placé sur la plaque de transfert de force. Un côté de la plaque de chargement est en contact avec le vérin à vis et l'autre côté est placé sur l'anneau de pression. En ajustant le vérin à vis pour réguler les valeurs des anneaux de pression, celles-ci deviennent égales et atteignent la valeur de conception de la contrainte. Le rapport de la contrainte de compression bi axiale est fixé à $\sigma_{cx}/\sigma_{cy} = 1:0,25$. Les échantillons de groupe de contrôle (catégorie F) n'ont pas été sollicité a aucune contrainte. Le béton avec un rapport W/C de 0,44, 0,4 et 0,36 a été exprimé par les paramètres Fd0, Fe0 et Ff0, respectivement. Les détails de l'état de contrainte de toutes les éprouvettes avec leurs définitions sont représentés dans **les tableaux II.1 et II.2**.

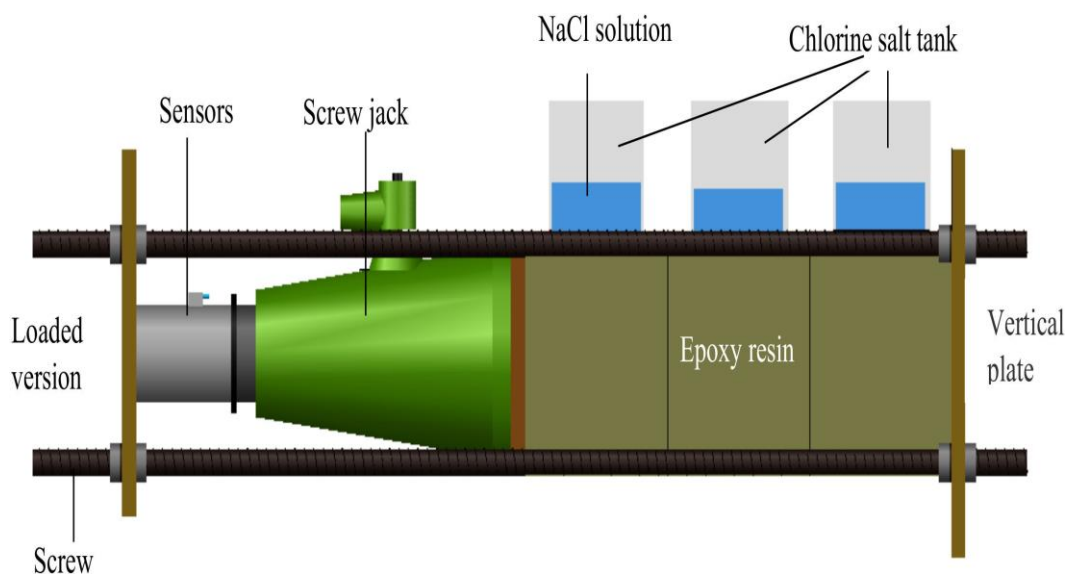


Figure II.17 : Chargement uni axial [15]

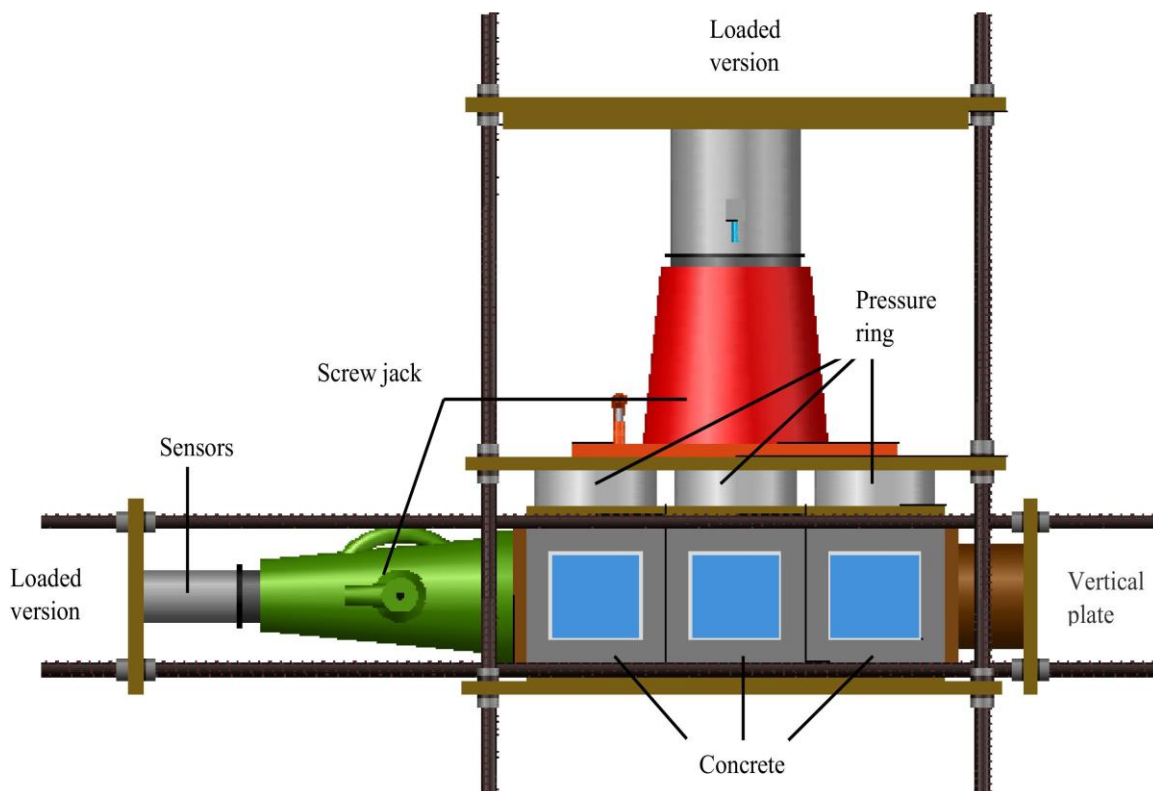


Figure II.18 : Chargement bi axial [15]

Tableau II.1 : Échantillons d'essai sous contrainte uni axiale [15]

<i>Spécimen</i>	<i>w/c</i>	<i>f_c (MPa)</i>	<i>σ_{CX} (MPa)</i>
DCd1	0.44	47.21	7.08 (0.15 <i>f_c</i>)
DCd2	0.44	47.21	14.16 (0.30 <i>f_c</i>)
DCd3	0.44	47.21	21.24 (0.45 <i>f_c</i>)
DCd4	0.44	47.21	28.33 (0.60 <i>f_c</i>)
DCE1	0.40	52.68	7.08 (0.13 <i>f_c</i>)
DCE2	0.40	52.68	14.16 (0.27 <i>f_c</i>)
DCE3	0.40	52.68	21.24 (0.40 <i>f_c</i>)
DCE4	0.40	52.68	28.33 (0.54 <i>f_c</i>)
DCF1	0.36	56.78	7.08 (0.12 <i>f_c</i>)
DCF2	0.36	56.78	14.16 (0.25 <i>f_c</i>)
DCF3	0.36	56.78	21.24 (0.37 <i>f_c</i>)
DCF4	0.36	56.78	28.33 (0.50 <i>f_c</i>)

Tableau II.2 : Échantillons d'essai sous contrainte bi axiale [15]

Spécimen	w/c	σ_{cx}/σ_c y	f_c (MPa)	σ_{cx} (MPa)	σ_{cy} (MPa)
ECd1	0.44	1:0.25	47.21	14.16 (0.30 f_c)	3.54 (0.075 f_c)
ECd2	0.44	1:0.5	47.21	14.16 (0.30 f_c)	7.08 (0.150 f_c)
ECd3	0.44	1:0.75	47.21	14.16 (0.30 f_c)	10.63 (0.225 f_c)
ECd4	0.44	1:1	47.21	14.16 (0.30 f_c)	14.16 (0.300 f_c)
ECe1	0.40	1:0.25	52.68	14.16 (0.27 f_c)	3.54 (0.067 f_c)
ECe2	0.40	1:0.5	52.68	14.16 (0.27 f_c)	7.08 (0.134 f_c)
ECe3	0.40	1:0.75	52.68	14.16 (0.27 f_c)	10.63 (0.201 f_c)
ECe4	0.40	1:1	52.68	14.16 (0.27 f_c)	14.16 (0.270 f_c)
ECf1	0.36	1:0.25	56.78	14.16 (0.25 f_c)	3.54 (0.063 f_c)
ECf2	0.36	1:0.5	56.78	14.16 (0.25 f_c)	7.08 (0.126 f_c)
ECf3	0.36	1:0.75	56.78	14.16 (0.25 f_c)	10.63 (0.189 f_c)
ECf4	0.36	1:1	56.78	14.16 (0.25 f_c)	14.16 (0.250 f_c)

B-Test de diffusion et évaluation de la concentration des ions de chlorure

Après avoir fixé la contrainte de compression, une auge contenant une solution de chlorure de sodium (NaCl) à 3.5 % a été placée sur la surface perméable du béton et collée aux échantillons à l'aide d'un adhésif. L'expérience de pénétration des ions de chlorure a été réalisée dans une chambre climatique à une température comprise entre 20 et 22°C. La durée d'exposition des échantillons de béton dans la solution saline a été de 2 mois et pour garantir la stabilité de la concentration en chlorure, la solution a été renouvelée chaque semaine. Un appareil de forage a été positionné verticalement sur la surface perméable du béton et six points de mesure ont été définis en perçant des trous à des profondeurs de 0-5 mm, 5-10 mm, 10-15 mm, 15-20 mm, 20-25 mm et 25-30 mm pour collecter la poudre de béton. Pour minimiser les erreurs, trois mesures ont été effectuées pour chaque profondeur de forage. Les poudres ensuite ont été séchées dans un four à 105°C pendant 2 heures, puis refroidies à température ambiante dans un dessiccateur. Enfin, la concentration en ions de chlorure des échantillons de poudre de béton a été mesurée. Le niveau de contrainte μ a été utilisé pour décrire la distribution de la diffusion des ions de chlorure induite par une contrainte soutenue.

$$\mu_{1,2} = \frac{\sigma_{c(x,y)}}{f_c} \quad (\text{II. 8})$$

f_c : est la résistance à la compression mesurée du béton en MPa.

σ_c : est la valeur de la contrainte de compression appliquée en MPa, dans laquelle les contraintes σ_{cx} et σ_{cy} correspondent respectivement à μ_1 et μ_2 .

II.2.1.5.2- Coefficient de diffusion des ions de chlorure sous différents états de contrainte

Lorsque le béton est exposé aux ions de chlorure, ceux-ci se diffusent depuis la surface du béton, ou leur concentration est élevée, vers l'intérieur du béton, où leur concentration est plus faible. Ce processus de diffusion peut être décrit par la deuxième loi de Fick, comme illustré dans l'équation (II.9) :

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = D_c \left(\frac{\partial^2 C(x,t)}{\partial x^2} \right) \quad (\text{II. 9})$$

$C(x,t)$: étant la concentration en ions de chlorure à la profondeur x au temps d'exposition t .

D_c : est le coefficient de diffusion des ions de chlorure en m^2/s .

t : est le temps d'exposition en chlorures en s.

D'une manière théorique l'équation (II.9) est une équation aux dérivées partielles qui ne possède pas de solution analytique directe. Une solution peut être obtenue en supposant que la diffusion des ions de chlorure dans le béton se produit dans un milieu semi-infini unidimensionnel et que la concentration des ions de chlorure à la surface reste constante. Si l'on suppose que la concentration initiale en ions de chlorure dans le béton est nulle, il est alors possible d'obtenir une fonction d'erreur comme solution de l'équation (II.9). Cela permet de dériver l'équation (II.10).

$$C(x,t) = C_s \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_c t}} \right) \right] \quad (\text{II. 10})$$

Avec C_s : est la concentration à la surface du béton.

$\operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_c t}} \right)$: est la fonction erreur qui s'exprime par l'équation suivante

$$\operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_c t}} \right) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{x}{2\sqrt{D_c t}}} e^{-\eta^2} d\eta \quad (\text{II. 11})$$

Le coefficient de diffusion apparent des ions de chlorure est résolu par les équations (II. 10) et (II. 11). Les résultats de la solution sont présentés dans **les tableaux II.3 et II. 4**.

La résolution des équations (II.10) et (II.11) donnent les valeurs du coefficient de diffusion qui sont représentés dans **les tableaux II.3 et II.4**.

Tableau II.3 : Coefficient de diffusion des chlorures sous contrainte uni axiale [15]

Spécimen	$D_c (\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s})$	Spécimen	$D_c (\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s})$	Spécimen	$D_c (\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s})$
Fd0	8.05	Fe0	6.52	Ff0	5.25
DCd1	7.95	DCE1	6.42	DCf1	5.15
DCd2	7.86	DCE2	6.30	DCf2	5.10
DCd3	8.07	DCE3	6.49	DCf3	5.18
DCd4	8.50	DCE4	6.69	DCf4	5.32

Tableau II.4 : Coefficient de diffusion des chlorures sous contrainte bi axiale [15]

Spécimen	$D_c (\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s})$	Spécimen	$D_c (\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s})$	Spécimen	$D_c (\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s})$
Fd0	8.05	Fe0	6.52	Ff0	5.25
ECd1	7.08	ECe1	5.73	ECf1	4.70
ECd2	6.87	ECe2	5.41	ECf2	4.43
ECd3	7.54	ECe3	5.81	ECf3	4.61
ECd4	8.08	ECe4	6.28	ECf4	5.00

Une relation pratique entre le coefficient de diffusion des chlorures et le niveau de contrainte comme c'est montré dans les tableaux II.3 et II.4. Là, nous introduisons f la fonction de contrainte pour représenter la relation entre les coefficients de diffusion des chlorures comme suit:

$$f = \frac{D_{c(ij)}}{D_{c(i0)}} \quad (\text{II. 12})$$

Avec $D_{c(i0)}$: étant le coefficient de diffusion des ions de chlorure à l'état non sollicité et i se réfère aux spécimens de béton avec différents rapports W/C, avec $i = 1, 2$ et 3 .

$D_{c(ij)}$: est le coefficient de diffusion des ions de chlorure sous différents états de contrainte de compression, et j se réfère à quatre types d'états de contrainte de compression, avec $j = 1, 2, 3$ et 4 . Dans les cas de compression uni axiale ou bi axiale, f est exprimé dans les deux cas $f(\mu_1)$ ou $f(\mu_1, \mu_2)$.

II.2.1.5.3- Fonction de niveau de contrainte sous chargement uni axiale

Le niveau de contrainte μ_1 et la fonction de contrainte $f(\mu_1)$ sont liés par une relation approximativement cubique (voir figure II.19) :

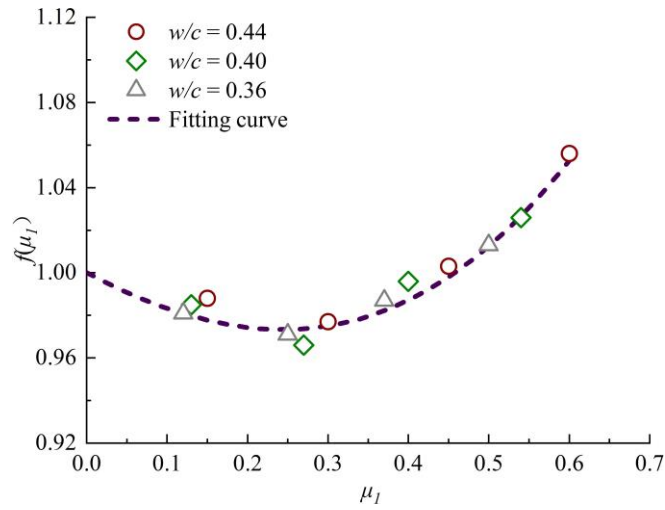


Figure II.19 : Fonction de contrainte en fonction du niveau de contrainte μ_1 [15]

L'équation suivante a été régressée à partir des données d'essai, avec un coefficient de corrélation R^2 de 0.95 et une valeur du pas inférieur à 0.0001. Cela indique que la valeur de μ_1 a une influence significative sur la valeur de $f(\mu_1)$.

$$f(\mu_1) = 1 - 0.2\mu_1 + 0.3\mu_1^2 + 0.3\mu_1^3 \quad (\text{II. 13})$$

Donc le coefficient de diffusion des ions de chlorure pour une contrainte uni axiale s'écrit comme suit :

$$D(\mu_1) = D_0(1 - 0.2\mu_1 + 0.3\mu_1^2 + 0.3\mu_1^3) \quad (\text{II. 14})$$

La variation du coefficient de diffusion dans le cas de contraintes uni axiale en fonction du niveau de contraintes μ_1 pour différents rapports E/C est donnée dans la figure qui suit :

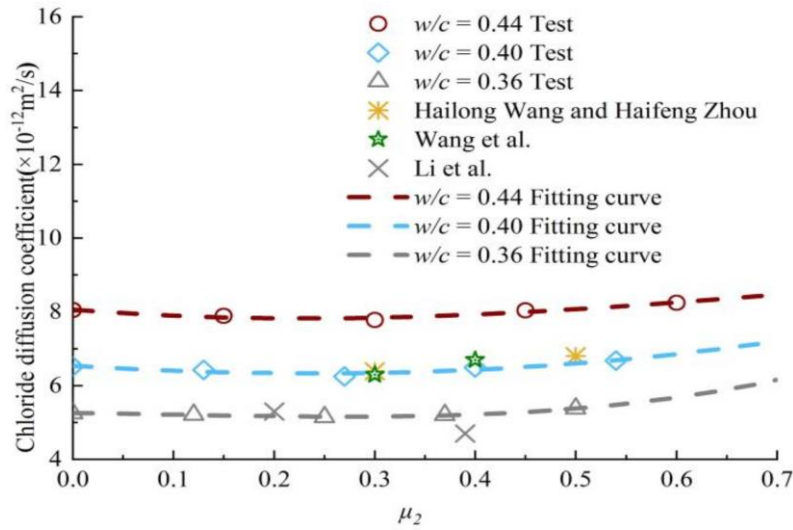


Figure II.20 : Variation de la Diffusion avec le niveau de contraintes μ_1 pour E/C=0.44,0.40 et 0.36

II.2.1.5.4- Fonction de niveau de contrainte sous une contrainte de compression soutenue bi axiale

La capacité de diffusion des ions de chlorure du béton est attribuée par μ_1 et μ_2 en même temps sous une charge de compression bi axiale. Le coefficient de diffusion des ions de chlorure varie en fonction du rapport entre μ_1 et μ_2 . Par conséquent, la relation entre $f(\mu_1, \mu_2)/f(\mu_1)$ et μ_2 doit être établie. Pour déterminer la liaison entre le niveau de contrainte de compression latérale soutenue et l'accumulation de chlorure en surface, une courbe $f(\mu_1, \mu_2)/f(\mu_1)$ est tracée en fonction du niveau de contrainte de compression latérale soutenue μ_2 dans **la Figure II. 21**.

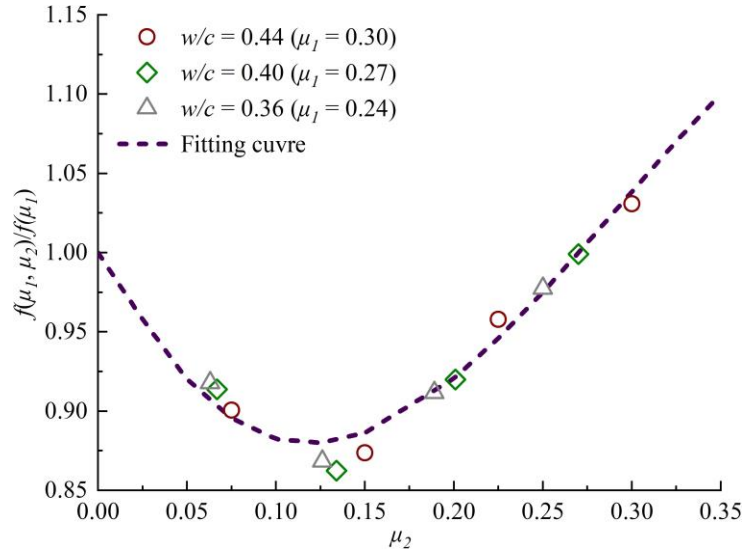


Figure II. 21 : Relation entre $f(\mu_1, \mu_2)/f(\mu_1)$ et μ_2 [15]

À partir de la régression des données pratiques, l'équation qui suit a été obtenue avec un coefficient de corrélation R^2 de 0.96 et une valeur du pas inférieure à 0.0001. Cela montre que la valeur de μ_2 a une influence significative sur la valeur de $f(\mu_1, \mu_2)/f(\mu_1)$. L'équation décrivant l'influence de la contrainte bi axiale est donc la suivante :

$$f(\mu_1, \mu_2)/f(\mu_1) = 1.01 - 2.39\mu_2 + 12.59\mu_2^2 - 14.36\mu_2^3 \quad (\text{II. 15})$$

Le modèle du coefficient de diffusion des ions de chlorure sous une contrainte de compression bi axiale, par association du niveau de contrainte μ_1 et μ_2 utilisé pour décrire la distribution de la diffusion des ions de chlorure induite par une contrainte soutenue est noté comme suit :

$$D(\mu_1, \mu_2) = D_0(1.01 - 2.39\mu_2 + 12.59\mu_2^2 - 14.36\mu_2^3)(1 - 0.2\mu_1 + 0.3\mu_1^2 + 0.3\mu_1^3) \quad (\text{II. 16})$$

La variation du coefficient de diffusion dans le cas de contraintes bi axiale en fonction du niveau de contraintes μ_2 pour différents rapports E/C est donnée dans la figure qui suit :

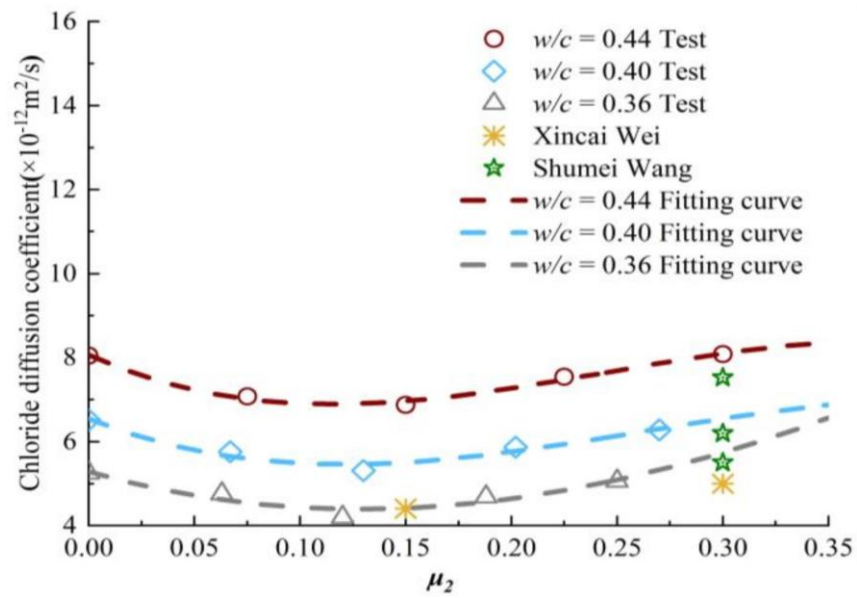


Figure II.22 : Variation de la Diffusion avec le niveau de contraintes μ_2 pour E/C=0.44,0.40 et 0.36

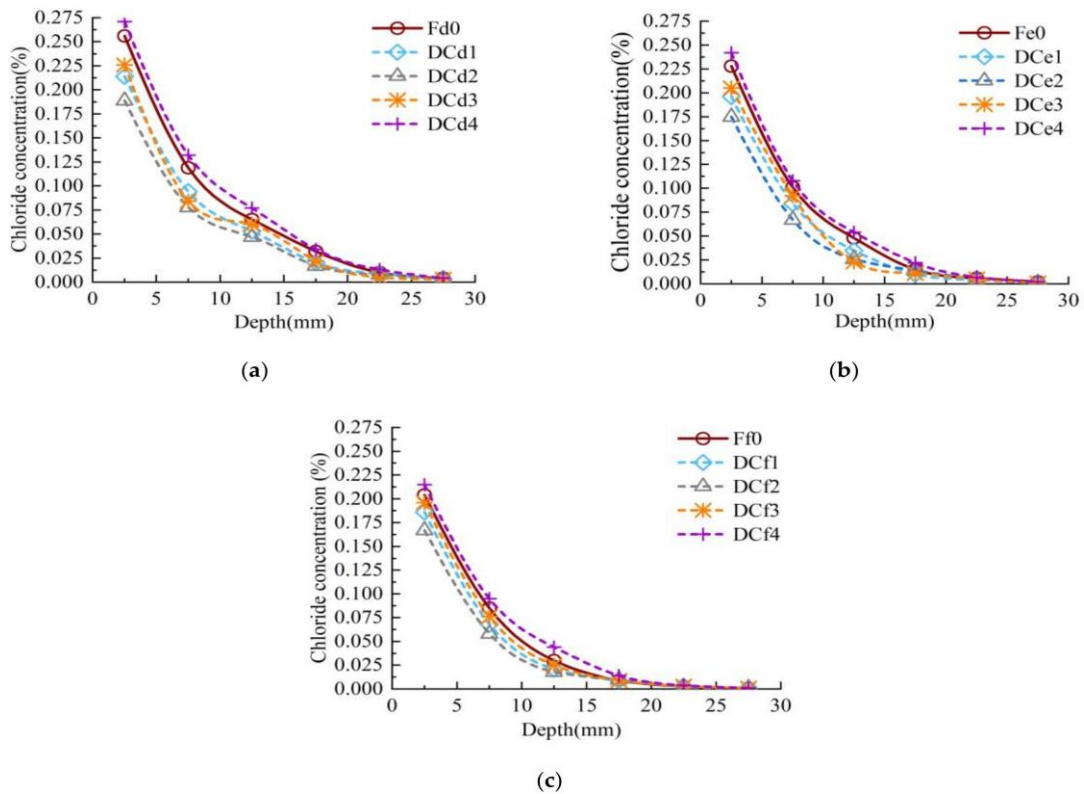


Figure II.23 : Distribution de la concentration en ions de chlorure du béton pour trois rapports W/C sous contrainte uni axiale soutenue : (a) W/C = 0,44; (b) W/C = 0,4; (c) W/C = 0,36 [15]

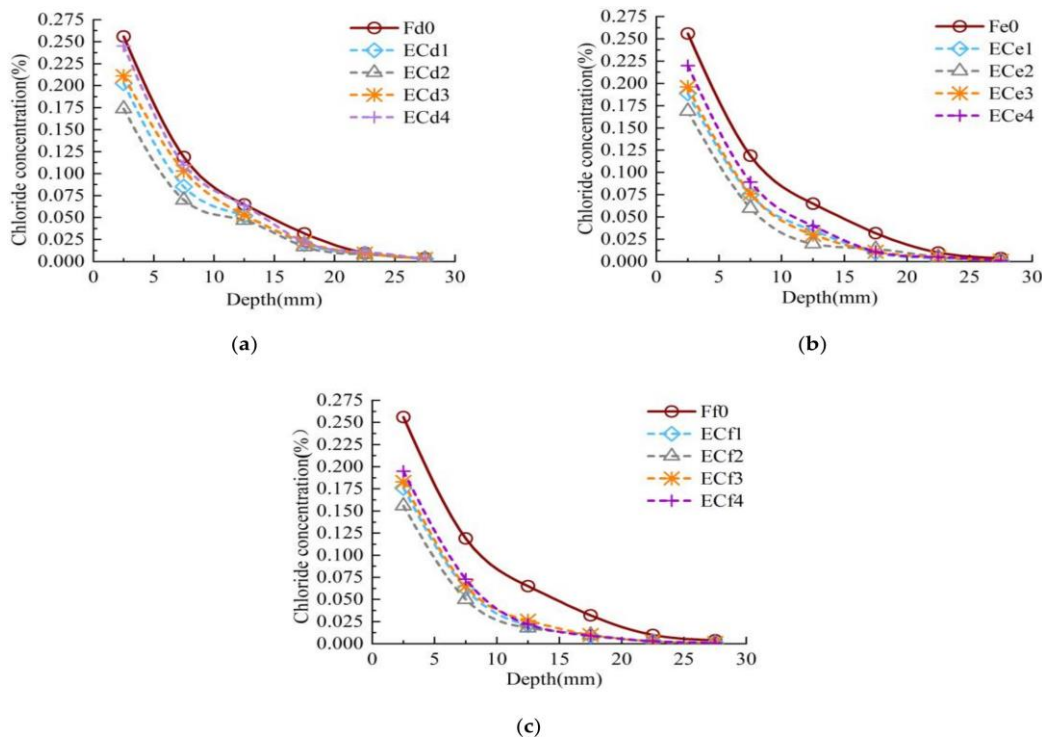


Figure II.24 : Distribution de la concentration en ions de chlorure du béton pour trois rapports W/C sous contrainte bi axiale soutenue : (a) W/C = 0,44 ; (b) W/C = 0,4 ; (c) W/C = 0,36 [15]

Les résultats expérimentaux sont intéressants et permettent de tirer les conclusions suivantes :

- 1- D'une part, la présence d'une contrainte de compression soutenue modifie de manière significative le processus de diffusion des ions de chlorure de la solution environnementale dans le béton. Plus la contrainte de compression soutenue augmente, plus la distribution de diffusion des ions de chlorure s'améliore.
- 2- D'autre part, nous observons que les spécimens de béton avec un rapport E/C plus élevé présentent une perméabilité accrue.

Un modèle de coefficient de diffusion des chlorures a été établi en prenant en compte l'effet des contraintes de compression uni axiale et bi axiale sur le béton. Ce travail est utile pour notre recherche et sert de point de départ pour prédire la durabilité des structures en béton exposées à un environnement riche en ions de chlorure.

II.2.2: RECHERCHES NUMERIQUES :

Les modèles numériques jouent un rôle essentiel dans l'étude de la durabilité des matériaux et des structures, notamment face aux phénomènes de vieillissement, corrosion, fatigue, dégradation chimique, ou environnementale. Voici les principales utilités :

- 1. Analyse prédictive du comportement à long terme :** Les modèles numériques permettent de simuler l'évolution des matériaux ou structures dans le temps, sous l'effet de facteurs comme : la corrosion des armatures dans le béton armé, la pénétration des chlorures ou des sulfates, la carbonatation, ou encore la fatigue thermique et mécanique.
- 2. Réduction du besoin d'expérimentation longue :** Les tests expérimentaux de durabilité peuvent durer plusieurs mois ou années. Les modèles numériques permettent d'anticiper rapidement les effets d'un phénomène dégradant sans attendre l'apparition réelle des pathologies.
- 3. Aide à la conception durable :** En intégrant les modèles dès la phase de conception, on peut optimiser l'épaisseur des couches de béton, choisir les matériaux les plus résistants à un environnement donné et évaluer l'effet des choix de formulation (rapport E/C, adjuvants, etc.) sur la durabilité.
- 4. Évaluation de scénarios de dégradation :** Les modèles permettent de tester des **scénarios extrêmes** tel que l'humidité élevée, cycles gel/dégel, atmosphères marines, pollution, etc. Ils permettent également de quantifier l'impact de l'entretien ou du renforcement des structures existantes.
- 5. Gestion du patrimoine bâti et maintenance préventive :** Grâce aux modèles numériques, les gestionnaires d'infrastructures peuvent établir des plannings de maintenance optimisés, détecter les zones à risque avant défaillance et justifier les besoins d'intervention de manière scientifique.

Pour notre cas de nombreux modèles numériques sont utilisés pour calculer le temps d'initiation de la corrosion, déclenchée à la fois par la carbonatation et la pénétration des ions de chlorure. Ces modèles sont appliqués à des études de cas, comme celle d'une poutre en T en béton armé d'un pont et servent d'outils pour planifier des stratégies de réhabilitation et d'entretien des structures existantes [18].

D'autres modèles tridimensionnels couplés chimico – hygro – thermo - mécaniques, simulent les deux phases de la corrosion : l'initiation et la propagation [7]. Parallèlement, un modèle de diffusion-réaction a été proposé pour décrire le transport et la fixation des ions de chlorure dans les matériaux à base de ciment [21], [22].

En outre, des chercheurs ont utilisé une modélisation numérique basée sur des modèles 2D FEA (analyse par éléments finis) pour calculer la concentration des ions de chlorure en différents points d'une structure réelle, en tenant compte de l'effet de vieillissement [16]

II.2.2.1: Modèle numérique pour la prédiction de la corrosion des armatures en acier dans les structures en béton armé :

Ce travail réalisé par Kheira Ouzaa and al. [18] en 2019 repose sur l'utilisation d'un programme interne, intégré à un logiciel développé de réhabilitation. La recherche est faite sur le calcul du temps d'initiation à la corrosion due à la pénétration des ions de chlorure et la carbonatation. L'étude est appliquée à un cas de poutre en T en béton armé d'un pont et sert d'outil pour planifier des stratégies de réhabilitation et d'entretien des structures existantes. L'environnement (C) se révèle le plus agressif, entraînant un début de fissuration rapide lors de la phase d'amorçage, tandis que l'environnement (B) induit une plus grande

ouverture des fissures en raison d'une concentration en ions de chlorure (voir Figure II. 25 – II. 26).

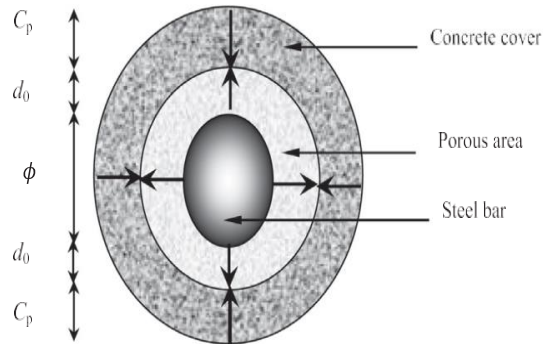


Figure II.25 : Illustration de la distribution uniforme de la pression autour de la barre d'acier[18]

Le temps d'initiation à la corrosion :

$$T_i = \left(\frac{C_p}{K}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{II. 17})$$

$$\text{avec} \quad K = \sqrt{\frac{2D_{CO_2}[CO_2]}{[Ca(OH_2)]}}$$

Le coefficient entre la densité des armatures et la corrosion produite :

$$\gamma = \frac{(\rho-1)\pi\phi}{\left(\frac{\phi}{2}\right)^{\frac{\phi}{2}+1}C_p} \quad (\text{II. 18})$$

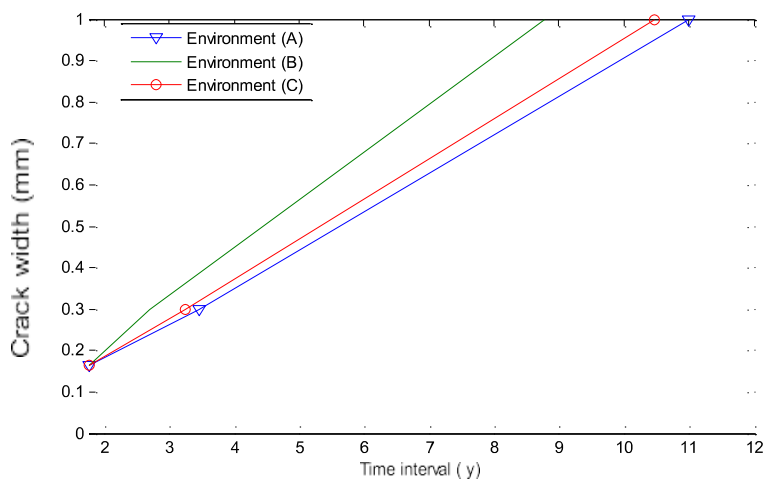


Figure II.26 : Le temps de fissuration selon les environnements [18]

<i>Beam cracking phase</i>	<i>Beam environment</i>	<i>Time interval Δt (y)</i>	<i>Cracking time (y)</i>	<i>Crack opening width W(mm)</i>
Initiation	A	1.76	23.02	0.163
	B	1.77	70.77	0.212
	C	1.77	2.95	0.173
Service	A	3.46	26.48	0.30
	B	2.71	73.48	0.30
	C	3.25	6.20	0.30
Écaillage	A	11	37.48	1
	B	8.77	82.25	1
	C	10.47	16.67	1

Tableau II.5 : Temps de fissuration depuis l'initiation jusqu'à l'écaillage de la poutre [18]

Le fruit du modèle numérique établit a montré que la pénétration des ions de chlorure encourage une corrosion rapide des armatures, déclenchant une fissuration importante dans le béton. Alors, la principale cause de la corrosion c'est la pénétration des ions de chlorure dans une étude de cas menée sous différentes conditions environnementales (A), (B), (C). Il a été démontré que l'environnement (C) est le plus agressif, provoquant un temps de fissuration très court dès la phase initiale de fissuration. En revanche, l'environnement (B), caractérisé par une faible concentration en chlorure de surface, entraînant une largeur de fissure plus importante.

II.2.2.2: Simulations numériques sur le transport des chlorures dans le béton fissuré des ponts exposés aux sels de déglacage :

Le modèle tridimensionnel proposé par Marija Kušter Maric and al. [7] en 2020 est couplé chimico – hygro – thermo - mécanique (CHTM) qui simule les deux phases de la corrosion : l'initiation et la propagation. Cette recherche vise à décrire les mécanismes de transport dans le béton, qu'il soit fissuré ou non, avant la rupture de la couche d'oxyde des armatures sur un ouvrage d'art présentant entre 11-14 ans de service. Les conditions environnementales considérées sont réalistes, incluant les cycles d'humidification-séchage ainsi que l'application de sels de déglacage (voir Figure II. 27- II. 29).

le déplacement des chlorures en corrélation du taux de consolidation :

$$\frac{\partial C_{ab}}{\partial t} = K_t(\alpha C_c - C_{cb}) \quad (\text{II. 19})$$

L'équation gouvernant le comportement mécanique du déplacement s'écrit :

$$\nabla [D_m(u, \theta_w, T) \nabla u] + \rho_b = 0 \quad (\text{II. 20})$$

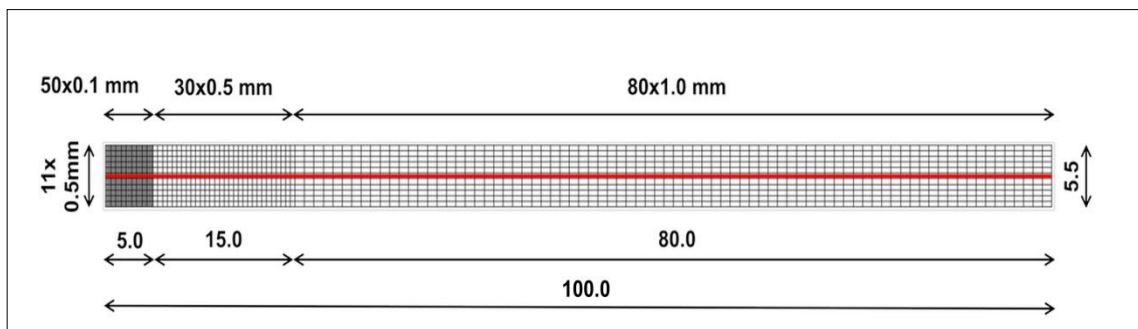


Figure II.27 : La géométrie de la discrétisation par des éléments 3D a 8 noeuds [7]

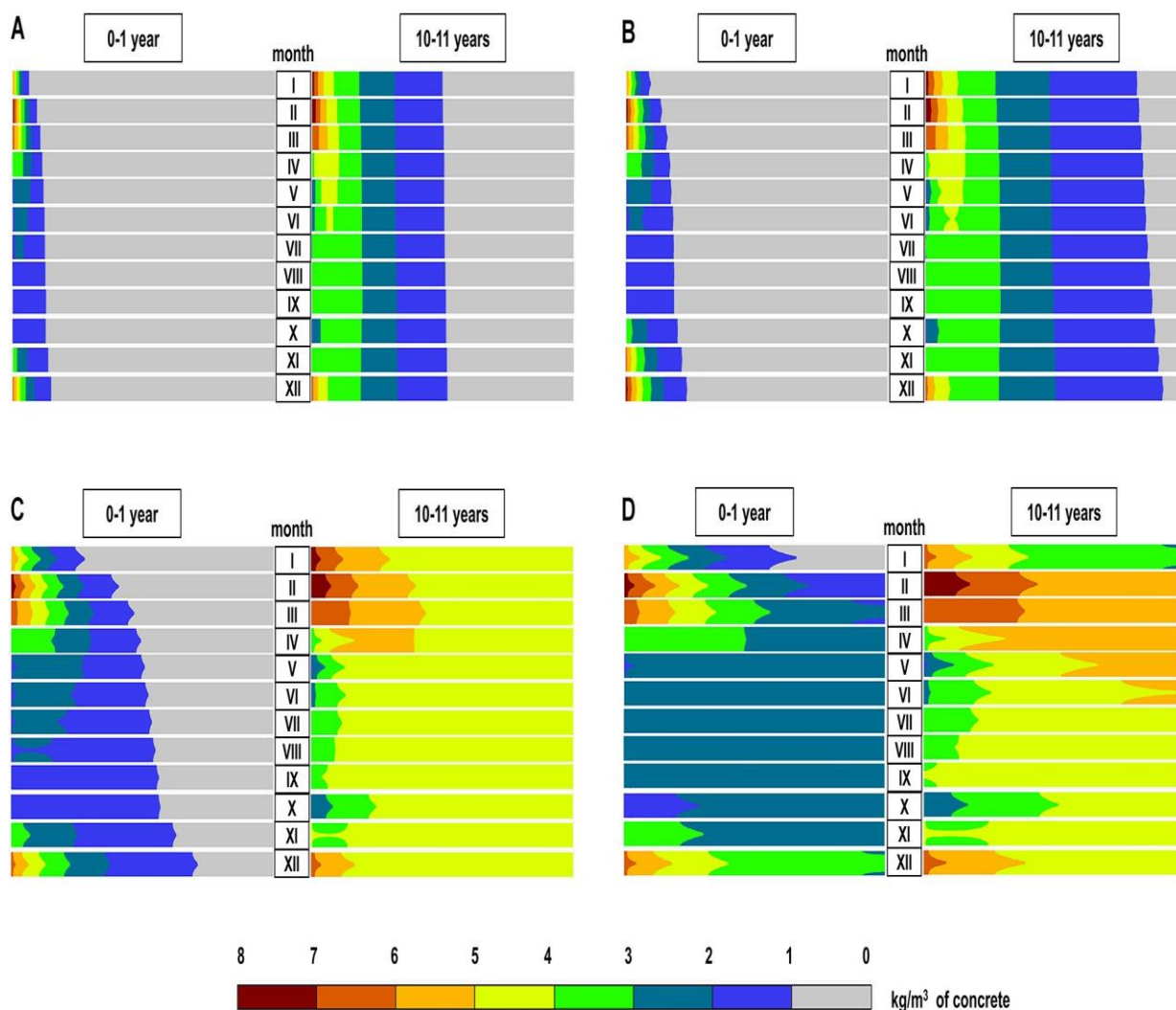


Figure II.28.A : La distribution des ions de chlorure dans le béton avec humidification-séchage de 1 – 10 ans pour différentes largeurs de fissures (cw) : A $cw \leq 0,05$ mm, B $cw = 0.10$ mm, C $cw = 0.15$ mm, et D $cw = 0,20$ mm [7]

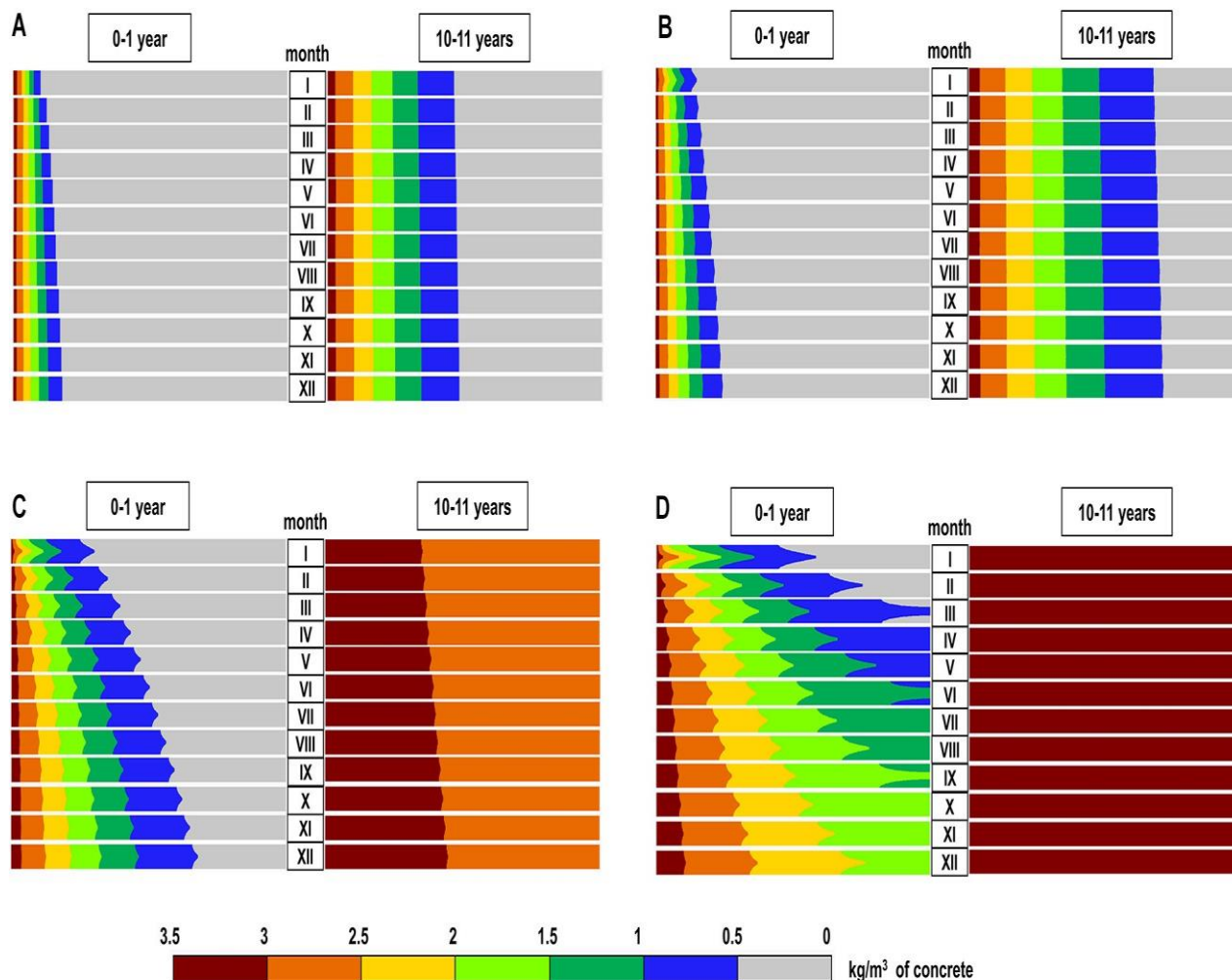


Figure II.29.B : La distribution des ions de chlorure dans le béton sans humidification-séchage de 1 – 10 ans pour différentes largeurs de fissures (cw) : A $cw \leq 0,05$ mm, B $cw = 0,10$ mm, C $cw = 0,15$ mm, et D $cw = 0,20$ mm [7]

Les résultats numériques exposés dans ce travail correspondent bien avec les valeurs mesurées sur les ponts ce qui confirme que les conditions limites sont correctement définies et que les simulations numériques des processus de transport dans le béton, qu'il soit fissuré ou non sont réalistes. L'intégration des cycles de mouillage- séchage dans le modèle d'infiltration des ions de chlorure permet une bonne simulation des processus du transport continu dans le béton. En prenant compte ces cycles ainsi que la variation annuelle non uniforme de la concentration de chlorure en surface, la teneur en chlorures à une profondeur de 30 à 50 mm dans la couche du béton est double par rapport à un modèle qui ignore ces cycles et suppose une concentration en chlorures et en eau constante dans le temps. L'utilisation intensive de sels de déglçage sur les autoroutes, en particulier sur les ponts, a entrainé une accumulation significative de chlorures dans le béton fissuré, dépassant jusqu'à 10 fois la valeur du seuil de concentration critique.

II.2.2.3: Une analyse numérique sur le transport couplé d'ions de sulfate et de chlorure avec effet d'adsorption:

Cette étude menée par Jun Xu and al. [21] en 2020 repose sur la loi de conservation de la masse, intégrée dans la relation entre la porosité et le temps d'hydratation ainsi que sur l'affaiblissement de la liaison chimique entre les ions de sulfate et les ions de chlorure modélisé mathématiquement. Un modèle de transport couplé des ions de sulfate et de chlorure a été développé et sa validité a été vérifiée par une comparaison avec des données expérimentales. L'étude analyse ensuite de manière quantitative l'adsorption physique et la liaison chimique des ions de chlorure sous l'influence des ions de sulfates. Les résultats montrent que la liaison chimique est prédominante et que les ions de sulfates réduisent l'effet de liaison des ions de chlorure. Par ailleurs, une diminution du rapport eau /ciment initial entraîne une réduction de la profondeur de diffusion des ions de chlorure libres (voir Figure II. 30 – II. 32).

La loi de Fick

$$\varepsilon_{tot} \frac{\partial C_{cl}}{\partial t} + \text{div} J_{cl} = 0 \quad (\text{II. 21})$$

Le coefficient de diffusion

$$D_f = R_g T \frac{\Delta_{cl-}}{Z_{cl}^2 - F^2} \quad (\text{II. 22})$$

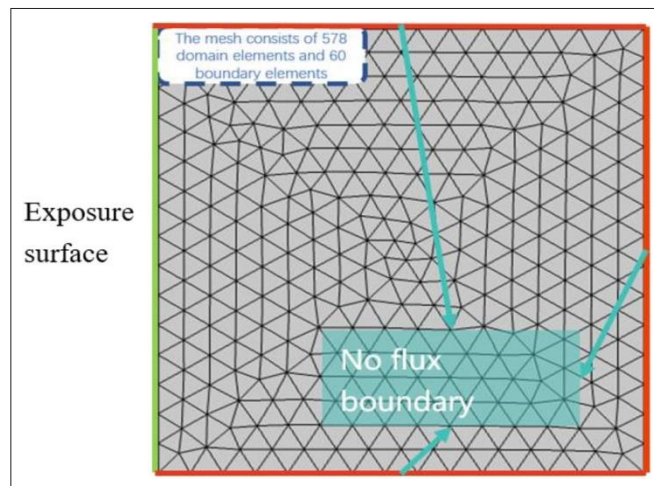


Figure II.30 : Le maillage de la section exposée aux ions chlorure [21]

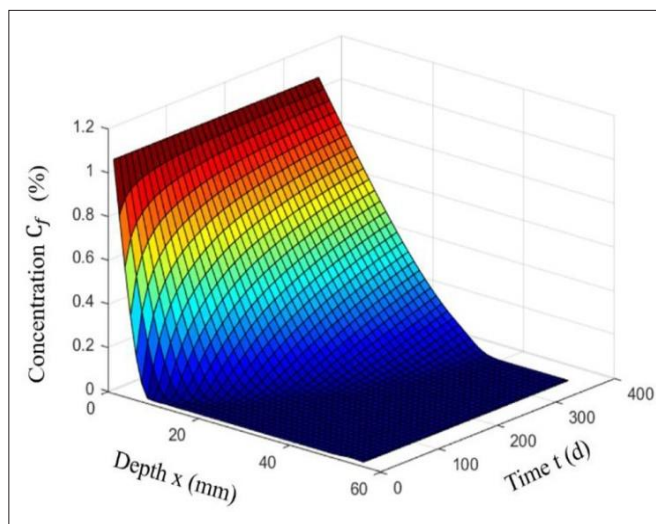


Figure II.31 : La répartition tridimensionnelle de la concentration en ions de chlorure en fonction du temps et de la profondeur [21]

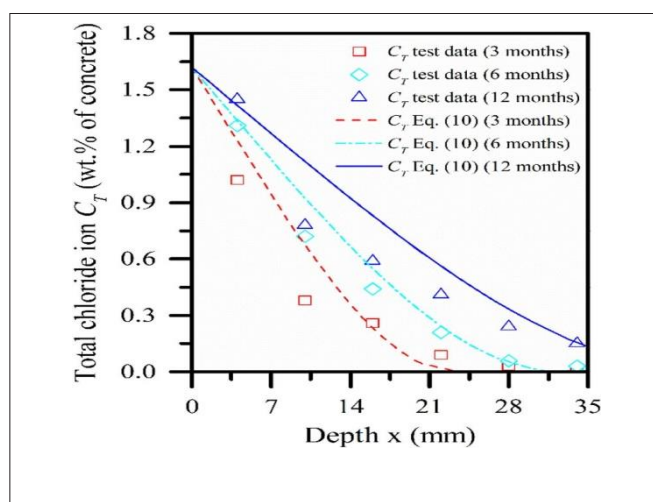


Figure II.32 : La concentration en ions de chlorure en fonction de la profondeur pour 3, 6 et 12 mois d'exposition [21]

Ce travail démontre que les interactions entre les ions de chlorure et les ions de sulfates jouent un rôle fondamental dans les mécanismes de dégradation du béton armé. Les ions de sulfate réduisent la capacité de liaison chimique des ions de chlorure, augmentant ainsi la proportion de chlorures libres disponibles pour la diffusion. Cette interaction devient particulièrement significative lorsque la concentration en ions de sulfate dépasse un seuil critique (1.7%), modifiant le profil de diffusion des chlorures dans la matrice du béton. Cette influence combinée accroît le risque de corrosion des armatures en acier, car les chlorures libres associés à la dégradation causée par les sulfates, accélèrent le processus de détérioration. Ces résultats soulignent l'importance d'une modélisation précise de ces interactions pour

prédire le temps d'initiation de la corrosion et la répartition de la concentration en fonction de la profondeur de l'enrobage.

II.2.2.4: Coefficients de diffusion apparents et effectifs des ions de chlorure dans les mortiers :

Un modèle de diffusion-réaction a été proposé par Jerzy J. Jasielec and al. [22] en 2020 pour décrire le transport et la fixation des ions de chlorure dans les matériaux à base de ciment. Une solution numérique à ce problème de transport non linéaire avec réaction a été obtenue grâce à la méthode des éléments finis. Les coefficients de diffusion effectifs des chlorures ainsi que les paramètres de fixation ont été déterminés en appliquant une méthode inverse, basée sur le modèle de diffusion-réaction et sur des concentrations de chlorure mesurées expérimentalement. Cette étude se concentre sur deux types de mortiers distincts : l'un à base de Ciment Portland Ordinaire CEM I 42.5 R et l'autre à base de ciment de haut fourneau CEM III 42.5 N (voir Figure II. 33).

L'expression de la concentration en fonction de la porosité est donnée par :

$$C_{tot}(x, t) = \frac{\varphi C_f(x, t) + (1 - \varphi) \rho_s C_b(x, t)}{\rho_c} \quad (II. 23)$$

La relation entre les coefficients de diffusion apparent et effective

$$D_{app} = \frac{D_{eff}}{1 + K} \quad (II. 24)$$

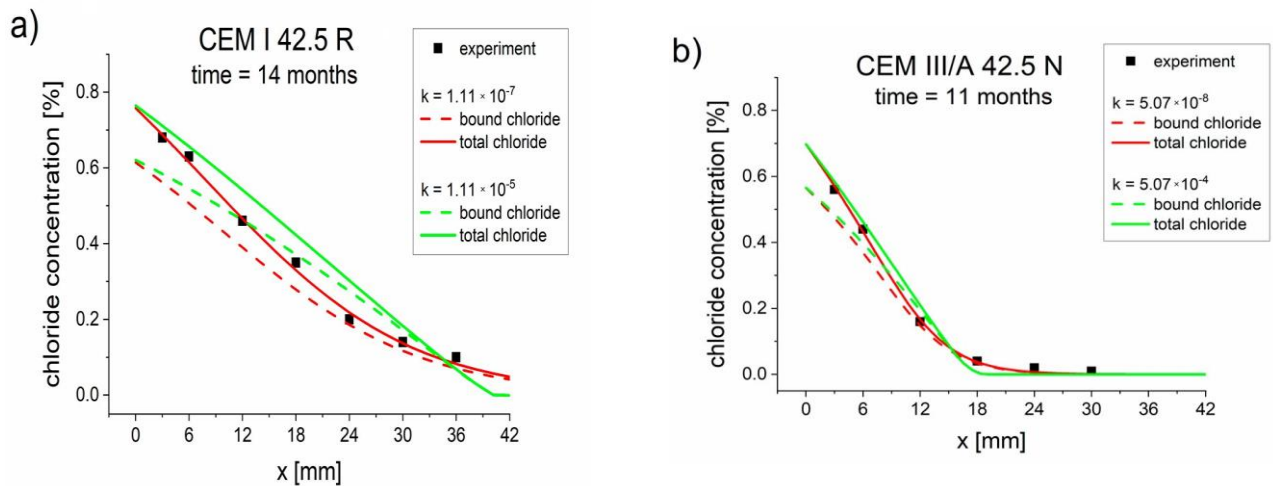


Figure II.33 : La concentration des chlorures en profondeur pour deux constante K de la vitesse de reaction pour le ciment CEM III 42.5 N et CEM I 42.5 R pour 11 mois et 14 mois [22]

TYPE OF CEMENT	POROSITY (%)	$D_{eff}(m^2/s)$	$K(s^{-1})$	$K_b(m^3/kg)$	Goal function
CEM I 42.5 R	16.8	5.92×10^{-12}	5.92×10^{-7}	3.93×10^{-4}	5.76×10^{-7}
	33.6	5.76×10^{-12}	5.92×10^{-7}	3.34×10^{-4}	5.86×10^{-7}
	50.4	5.46×10^{-12}	5.92×10^{-7}	2.52×10^{-4}	6.47×10^{-7}
	67.2	5.65×10^{-12}	5.92×10^{-8}	1.82×10^{-4}	6.09×10^{-7}
CEM III 42.5 N	15.5	1.62×10^{-12}	5.92×10^{-7}	3.85×10^{-4}	4.96×10^{-7}
	31.0	1.60×10^{-12}	5.92×10^{-7}	3.32×10^{-4}	4.74×10^{-7}
	46.5	1.56×10^{-12}	5.92×10^{-7}	2.72×10^{-4}	4.69×10^{-7}
	62	1.58×10^{-12}	5.92×10^{-7}	1.95×10^{-4}	4.72×10^{-7}

Tableau II.6 : Paramètres optimisés D_{eff} , k et K_b pour les échantillons CEM I 42,5 R et CEM III/A 42,5N [22]

Les concentrations totales en ions de chlorure ont été mesurées expérimentalement et calculées théoriquement pour deux types d'échantillons de mortier soumis à deux durées d'exposition dans une solution aqueuse de NaCl à 3 %. Les profils obtenus expérimentalement ont été comparés aux résultats théoriques. Un modèle numérique intégrant à la fois la diffusion et les réactions de liaison des ions de chlorure a été formulé, distinguant clairement les ions de chlorure libres des ions liés. Ce modèle a également servi de base pour définir un problème inverse, résolu à l'aide de la méthode d'optimisation par recherche de coordonnées. Cette approche a permis de déterminer le coefficient de diffusion effectif ainsi que les paramètres cinétiques associés à la liaison des ions de chlorure. L'utilisation de la porosimétrie par intrusion de mercure (MIP), qui est la technique bien établie et largement utilisée pour les mesures de porosité, malgré ses limites bien connues lorsqu'elle est appliquée à des matériaux à géométrie de pores irrégulière du béton. La MIP est largement utilisée pour étudier des diamètres de pores allant de 360 μm à moins de 100 nm, mais ne peut pas fournir d'informations sur les pores de gel (qui restent non intrusés et ne sont pas quantifiés) ou les pores fermés (non connectés).

II.2.2.5: Validation numérique du modèle d'initiation de la corrosion du béton avec l'effet de fissure et l'effet de vieillissement :

Pour compléter notre étude, nous avons identifié une recherche numérique pertinente pour notre travail, portant sur les modèles 2D FEA (analyse par élément finis) utilisés par utilisés par Petr Lehner and al. [16] en 2017. Ces modèles permettent de calculer la concentration des ions de chlorure en différents points choisis, en intégrant l'effet du

vieillissement du béton à l'aide d'un outil informatique compatible avec Matlab et du logiciel commercial ANSYS.

Les modèles analysent le transport des ions de chlorure à travers un tablier de pont en béton armé présentant une fissure transversale. Trois positions de l'armature en acier ont été étudiées : sous la fissure, à une certaine distance de la fissure et au bord de la dalle de béton ou l'effet de fissure est absent.

L'attaque des chlorures a été simulée sur une zone rectangulaire, avec des conditions limites appliquées sur deux bords adjacents. Les résultats obtenus sont encourageants, notamment grâce à la comparaison du modèle 1D avec des formules analytiques. De plus, la capacité de simulation en 2D pour les éléments influencés par la géométrie a été évaluée en exploitant l'effet de symétrie.

II.2.2.5.1: Effet du vieillissement du béton

Suite à la maturation du béton, la valeur du coefficient de diffusion diminue au fil du temps. L'équation (II. 25) est utilisée pour calculer la valeur nominale du coefficient de diffusion en fonction du temps. Sa variation temporelle va être obtenue à partir du coefficient de vieillissement et des valeurs de référence :

$$D_{c,t} = D_{c,ref} \left(\frac{t_{ref}}{t} \right)^m \quad (II. 25)$$

Dans l'équation (1) nous avons:

$D_{c,t}$: Coefficient de diffusion pour l'âge choisi (m^2/s),

$D_{c,ref}$: Coefficient de diffusion obtenu à partir d'une ancienne structure de référence (m^2/s).

t : temps d'exposition au chlorure [s],

t_{ref} : Période de référence pour la mesure [s],

m : facteur d'âge [-].

II.2.2.5.2- Modèle analytique avec l'effet du vieillissement :

L'équation analytique permettant de calculer la concentration des ions chlorure en fonction du temps, en tenant compte de l'effet du vieillissement, est présentée ci-dessous :

$$C_{x,t} = C_0 \left(1 - erf \left(\frac{x}{\sqrt{4 \frac{D_{c,t}}{1-m} t^{(1-m)}}} \right) \right) \quad (II. 26)$$

$C_{x,t}$: Concentration des ions de chlorures [%] à une profondeur x au temps t [s].

C_0 : Concentration à la surface en ions de chlorures en [%].

t : temps d'exposition en chlorure en [s].

x : la profondeur en [m].

$D_{C,1}$: Coefficient de diffusion des ions de chlorures dans le béton pendant une seconde (m^2/s).

m : facteur d'âge.

II.2.2.5.3- Paramètres du modèle de diffusion 2D FEA

Dans le modèle du béton ordinaire OPC, le coefficient de diffusion référentiel $D_{c,28}$ après 28 jours de bétonnage est de $5.85 \times 10^{-12} m^2/s$ [16]. Le facteur d'âge m est de 0.284 et la concentration initiale en ions de chlorure à la surface du béton C_0 est fixée à 0.6% (en poids du matériau basé sur les propriétés du ciment). La concentration critique en ions de chlorure, à laquelle l'initiation de la corrosion commence est de 0.2% [16]. La distance de couverture minimale entre la surface du béton et la couche supérieur des armatures est de 0.05 m (voir **figure II.34**).

La profondeur du tablier est de 0,23 m et sa largeur est de 1 m et le maillage comprend 23 éléments dans la direction verticale et 100 éléments dans la direction horizontale. Le pas de temps adopté est d'un an et le modèle Matlab utilise des éléments finis 2D isoparamétriques à trois nœuds. En revanche, le modèle ANSYS emploie des éléments planes à quatre nœuds, chacun avec un seul degré de liberté (la concentration) par nœud.

Une fissure est modélisée ici comme une réduction des propriétés du matériau, en particulier par un coefficient de diffusion diminué. Cette méthode permet de simuler l'évolution progressive de la concentration en chlorures au sein de la fissure au cours du temps. Le maillage par éléments finis (MEF) régulier est adapté pour intégrer la dimension et la localisation des fissures.

Dans les cas étudiés concernant la pénétration des ions de chlorure dans une fissure, le coefficient de diffusion, D_{cr} est ajusté en fonction du coefficient de diffusion de référence $D_{c,28}$, pour un béton âgé de 28 jours. Un autre aspect important à considérer est la précision du modèle, qui dépend notamment du coefficient de diffusion, de la taille de la grille de maillage et du pas de temps utilisé pour les simulations. Lorsque les largeurs des fissures sont inférieures à 30 μm , le coefficient de diffusion $D_{c,28}$ du béton est utilisé pour la fissure, tandis que pour une fissure supérieure à 80 μm , le coefficient de diffusion du milieu dans la fissure est utilisé $D_{c,crack,max} = 14 \times 10^{-10} (m^2/s)$ [16]. Comme exemple, la fissure modélisée est située au milieu de largeur du modèle qui est de 1 m. La fissure à une profondeur de 0.025 m et une largeur de 0.3 mm. En raison de cette largeur modélisée de 0.3 mm (300 μm), le coefficient de diffusion au niveau de la fissure est réduit pour refléter l'effet de la fissure sur la diffusion des chlorures à $D_{c,crack} = 14 \times 10^{-10} (m^2/s)$.

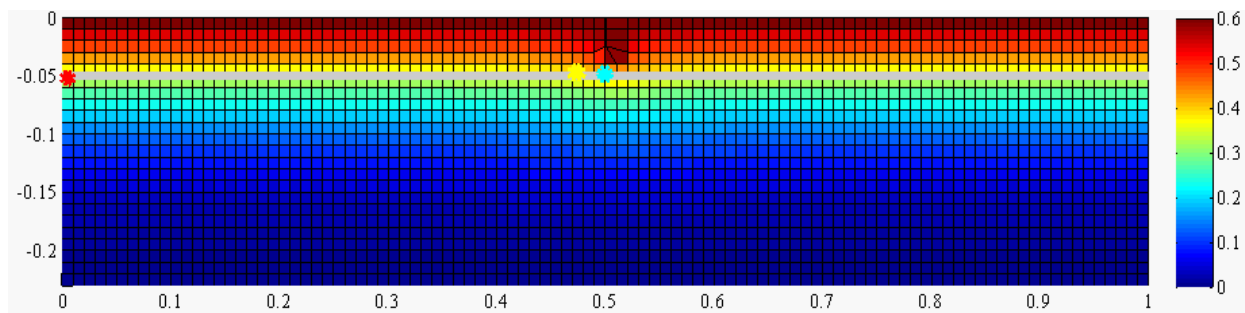


Figure II. 34 : Courbe de contour de la concentration d'ions de chlorure dans un tablier de pont en béton fissuré [16]

II.2.2.5.4 : Résultats de la validation numérique

Les résultats graphiques de la concentration en ions de chlorures et du temps d'initiation de la corrosion, obtenus à partir de l'analyse Matlab, de l'analyse ANSYS et de l'équation analytique, sont présentés dans la **figure II.35**. L'effet des fissures, qui facilitent le mouvement des ions de chlorure à la fois verticalement et horizontalement est illustré par une sortie graphique de l'analyse par élément finis (MEF). Les ions de chlorures peuvent atteindre plus rapidement les armatures dans les zones fissurées, tandis que le comportement près du bord du tablier reste similaire à celui d'un état sans fissures.

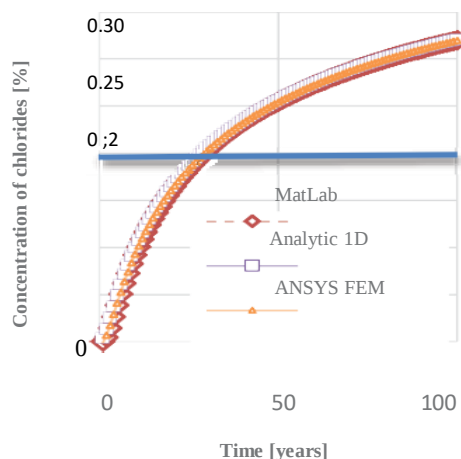


Figure II. 35 : Concentration des ions de chlorure au niveau de l'armature d'un tablier de pont en béton [16]

Les trois solutions des modèles se concordent bien avec le temps d'initiation à la corrosion obtenu avec le modèle analytique pour le béton OPC, soit $t = 28,5$ ans et les deux résultats MEF ont donnés 29,4 ans. L'apparition de la corrosion et le code basé sur ANSYS a donné un temps d'initiation de la corrosion inférieur de 6,4 ans (voir **tableau II. 12**).

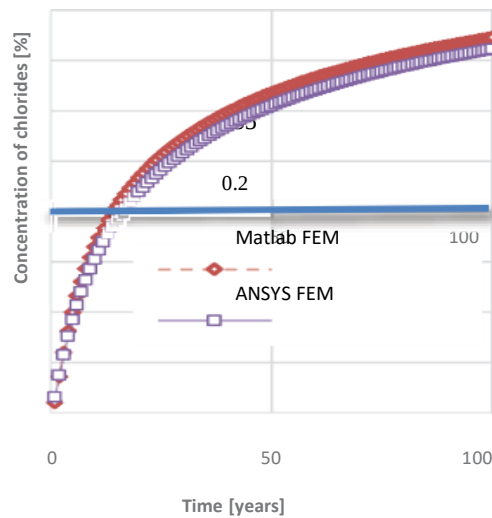


Figure II. 36 : Concentration des ions de chlorure au niveau de l'armature d'un tablier de pont en béton à 2,5 cm à gauche de la position de la fissure [16]

Des observations particulièrement pertinentes liées aux valeurs de la concentration directement sous la fissure (point bleu clair sur la **Figure II. 34**) et à 2,5 cm de la fissure (point jaune sur la **Figure II. 34**). On constate une diffusion notable des chlorures dans les directions horizontale et verticale : les valeurs à 2,5 cm de la fissure sont plus élevées que celles en provenance du bord du tablier, tandis que sous la fissure, les valeurs sont plus basses (voir **Figure II. 35** et **Figure II. 36**). Les temps estimés jusqu'au début de la corrosion pour une solution déterministe sont présentés dans le **Tableau II.7**.

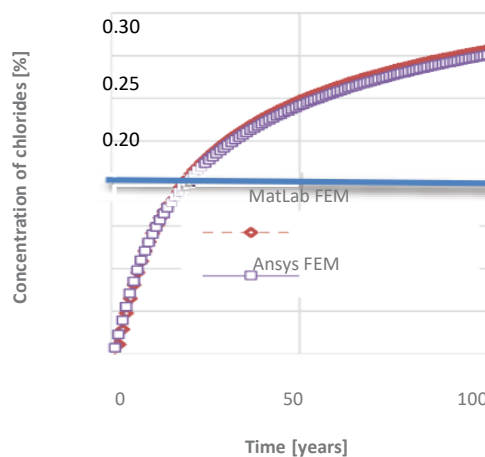


Figure II. 37 : Concentration des ions de chlorure au niveau de l'armature d'un tablier de pont en béton sous la fissure [16]

Si l'on considère l'OPC pour les cas d'analyse 2D, sous la fissure et à proximité de celle-ci, la différence entre le code basé sur Matlab et ANSYS ajoute environ 20 ans à la durée de vie estimée par rapport au code FEM. Dans le cas de l'analyse, la différence est d'environ un an, avec ANSYS fournissant une estimation de durée de vie légèrement plus longue. Cette tendance dans le cas de l'effet de fissure en 2D contraste avec la situation en 1D, où ANSYS avait donné un temps d'initiation de la corrosion plus court (voir **Tableau II.7**).

<i>The crack Mixture</i>			<i>The crack Mixture</i>		<i>2.5 cm next to the crack</i>		<i>under</i>	
	<i>Time [years]</i>	<i>Analytical</i>	<i>MatLab</i>	<i>ANSYS</i>	<i>MatLab</i>	<i>ANSYS</i>	<i>MatLab</i>	<i>ANSYS</i>
(OPC)	10	0.0996	0.0918	0.0928	0.1317	0.1308	0.1648	0.1523
	50	0.2561	0.2544	0.2542	0.2979	0.2909	0.3181	0.3046
	100	0.3204	0.3197	0.3195	0.3572	0.3505	0.3730	0.3613

Tableau II. 7 : La concentration des chlorures en (%) au niveau de l'armature d'un tablier de pont en béton [16]

Après avoir analysé la progression de la pénétration des ions de chlorure jusqu'à l'armature au point de concentration maximale, la concentration obtenue est comparée au seuil critique de chlorure. Les temps estimés jusqu'au début de la corrosion, dans le cadre d'une approche déterministe, sont présentés dans le **tableau II.8**.

<i>The crack Mixture</i>		<i>On the site of deck</i>		<i>2.5 cm next the deck</i>		<i>Under</i>	
	<i>Analytique</i>	<i>Matlab</i>	<i>ANSYS</i>	<i>Matlab</i>	<i>ANSYS</i>	<i>Matlab</i>	<i>ANSYS</i>
(OPC)	28.50	29.40	29.41	15.20	16.43	18.93	19.88

Tableau II. 8 : Résumé des résultats de l'initiation de la corrosion [16]

La fiabilité des estimations fournies par le modèle par élément finis (FEA) de l'initiation temps de naissance de la corrosion au bord du modèle est satisfaisante dans le cas d'un mélange OPC. Si l'on prend en compte la fissure, la différence entre le code basé sur MatLab et le code commercial ANSYS est aussi raisonnable. Il est également important de noter que les écarts de concentration entre les modèles reflètent des variations dans le temps d'initiation à la corrosion, influencée par le gradient de concentration.

II-3 : CONCLUSION

La relation entre les modèles numériques et les essais expérimentaux est essentielle dans le domaine de l'ingénierie et de la recherche scientifique. Les essais expérimentaux permettent d'obtenir des données réelles sur le comportement des matériaux ou des structures dans des conditions spécifiques. Ces données servent à valider, calibrer et affiner les modèles numériques.

Les modèles numériques, quant à eux, permettent de simuler des phénomènes complexes difficilement mesurables expérimentalement, d'évaluer des scénarios variés et de réduire le nombre de tests physiques nécessaires. Lorsqu'ils sont bien validés, ces modèles deviennent de puissants outils de prévision et d'optimisation.

Ainsi, les essais expérimentaux apportent la réalité physique, tandis que les modèles numériques offrent la capacité de généraliser et de prédire. Leur interaction permet une meilleure compréhension des phénomènes étudiés et une amélioration continue de la fiabilité des résultats.

Finalement nous avons ciblé une étude expérimentale de la diffusion des ions de chlorure dans le béton soumis à des contraintes mécaniques qui servira comme un point de départ de données expérimentales pour notre travail dans le but de proposer un modèle qui introduit le facteur âge dans les structures sollicitées à des contraintes mécaniques dans les milieux agressifs.

Pour la modélisation des structures en béton armé dans les milieux agressifs riches en ions de chlorure, elle contribue à la prolongation de la durée de vie des ouvrages, renforcer la sécurité, optimiser les coûts et assurer leur conformité aux normes en vigueur. Elle constitue un outil précieux pour notre recherche en durabilité des ouvrages ce qui fera l'objet de notre prochain chapitre.

CHAPITRE III

MODELISATION DE L'INFLUENCE DU VIELLISSEMENT DU BETON ET DE LA CONTRAINTE APPLIQUEE SUR LA DIFFUSION DES IONS DE CHLORURE

III. MODELISATION DE L'INFLUENCE DU VIELLISSEMENT DU BETON ET DE LA CONTRAINTE APPLIQUEE SUR LA DIFFUSION DES IONS DE CHLORURE

III.1- INTRODUCTION

Dans le chapitre précédent nous avons exposé des recherches expérimentales et numériques et nous avons ciblé deux recherches, l'une expérimentale qui présente le passage des ions de chlorures en présence des contraintes mécaniques, et l'autre numérique qui tient compte du facteur âge dans les vieilles structures exposés à des ions de chlorures à ce moment nous pensons à élaborer un modèle couplé qui rassemble les contraintes mécaniques au facteur âge. Sachant que la durée de vie des structures en béton armé dépend de leur capacité à résister aux agressions, en particulier à la protection des matériaux constitutifs contre les attaques, notamment celles des ions de chlorure [51], [52]. Les facteurs influençant la corrosion sont multiples et complexes [2]. Ce phénomène résulte de l'interaction physique et ou chimique entre le matériau et son environnement, où des paramètres tels que l'agressivité du milieu, l'âge de la structure, la fissuration, le rapport eau/ciment et le niveau de contraintes dans la matrice cimentaire jouent un rôle crucial.

Les ouvrages en béton armé sont conçus pour durer [1], mais avec le temps, ils se dégradent sous l'effet de la corrosion, provoquée par l'agressivité de l'environnement auquel ils sont exposés [21], [14]. L'acier, initialement protégé par la couche d'enrobage du béton, peut être dépassivé soit par la carbonatation due au dioxyde de carbone [5], soit par la pénétration des ions de chlorure provenant de l'eau de mer [6], des embruns marins ou des sels de déverglaçage [7]. Ce phénomène devient encore plus critique lorsque l'ouvrage est soumis à des contraintes mécaniques [15], [23], qui s'aggravent avec le temps provoquant des fissurations [8], [24].

L'influence du niveau de contraintes et du facteur âge entraîne une variation du coefficient de diffusion, ce qui accélère les processus de dégradation mécanique ou physico-chimique pouvant affecter les bétons.

Au cours de la durée de vie d'une structure en béton armé, on peut distinguer deux phases principales [1] :

1. La période d'initiation : Déterminée par la vitesse de neutralisation du béton d'enrobage.
2. La période de propagation : Caractérisée par la corrosion des armatures, conduisant à la dégradation progressive de la structure.

La manière la plus simple et la plus efficace pour prédire la durée de vie des ouvrages consiste à utiliser des modèles fiables décrivant l'évolution des ions de chlorure et définissant le temps nécessaire pour que les armatures soient dépassivées. Selon la nature des milieux, on distingue deux types de pénétration [1] :

1-En milieu saturé (structures exposées à l'eau de mer) : Les ions de chlorure pénètrent par diffusion sous gradient de concentration, favorisant l'initiation de la corrosion.

2-En milieu cyclique d'humidification-séchage (zone de marnage) : Les ions de chlorure pénètrent d'abord par absorption capillaire, puis par diffusion dans les zones saturées [8].

L'objectif de ce travail est de développer un modèle numérique décrivant avec précision le phénomène de propagation des ions de chlorure, en tenant compte du niveau de contraintes pris à partir des essais expérimentaux [9] et du facteur âge (effet de vieillissement) . Ce modèle permettra de déterminer plusieurs grandeurs clés :

- La concentration en ions de chlorure.
- Le temps d'initiation à la corrosion.
- L'épaisseur d'enrobage.
- Le niveau de contraintes.

Une représentation tridimensionnelle sera réalisée pour visualiser ces paramètres. La fiabilité du modèle sera confirmée par sa capacité à décrire la concentration en fonction de l'épaisseur de l'enrobage et du temps d'initiation à la corrosion.

III.2- BASES DU MODELE

La plupart des modèles décrivant la pénétration des ions de chlorure dans le béton reposent sur la deuxième loi de Fick, une approche largement utilisée et reconnue dans la littérature scientifique [19], [3], [4] et [15].

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = D_c \frac{\partial^2 C(x,t)}{\partial x^2} \quad (\text{III. 1})$$

ou, $C(x,t)$ est la concentration des ions de chlorure à une profondeur x et à un temps t , D_c est le coefficient de diffusion effectif des ions de chlorure ($\frac{m^2}{s}$).

En principe l'équation (III.1) est une équation aux dérivées partielles qui ne possède pas de solution analytique. Elle peut être obtenue en supposant que la diffusion des ions de chlorure dans le béton se produit dans un milieu semi-infini unidimensionnel, avec une concentration de surface en chlorure constante. En considérant une concentration initiale de chlorures nulle dans le béton, une solution basée sur la fonction d'erreur de l'équation (III.1) a été proposée par X.Cheng et al. [15].

$$C(x, t) = C_s \left[1 - \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_c t}} \right) \right] \quad (\text{III. 2})$$

ou, C_s étant la concentration des ions de chlorure à la surface en %.

Pour les conditions aux limites nous avons pris une concentration à la surface C_s est de 0.20% proposées par Lehner et al. en 2017 [16], un facteur d'âge $m = 0.284$ pour un béton ordinaire [16]

x la profondeur de l'enrobage en (mm).

$$\operatorname{erfc}(x) = 1 - \operatorname{erf}(x) \quad (\text{III. 3})$$

avec

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-\mu^2} d\mu$$

Afin de calculer l'intégrale de GAUSS de $\int_0^x e^{-\mu^2} d\mu$:

on pose :

$$(I(x)^2) = \left(\int_0^x e^{-\mu^2} d\mu \right)^2 = \left(\int_0^x (e^{-\mu^2} d\mu) \right) \left(\int_0^x (e^{-v^2} dv) \right) = \iint_0^x e^{-(\mu^2+v^2)} d\mu dv \quad (\text{III. 4})$$

(Intégrale indépendante)

le terme $(\mu^2 + v^2)$ nous invite à passer en polaire :

$$\text{si } \mu = r \cos \theta \text{ donc } \mu^2 = r^2 \cos^2 \theta$$

$$\text{et } v = r \sin \theta \text{ donc } v^2 = r^2 \sin^2 \theta$$

$$\text{alors } (\mu^2 + v^2) = r^2 (\cos^2 \theta + \sin^2 \theta)$$

$$(\mu^2 + v^2) = r^2$$

Le domaine d'intégration est :

$$x \geq 0 \text{ et } 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$$

Nous avons $\mu \leq x \rightarrow \mu^2 \leq x^2$

$$v \leq x \rightarrow v^2 \leq x^2$$

donc

$$r^2 = (\mu^2 + v^2) \leq 2x^2 \rightarrow 0 \leq r \leq \sqrt{2x}$$

$$\text{car le Jacobien } J = \begin{bmatrix} \frac{d\mu}{dr} = \cos\theta & \frac{d\mu}{d\theta} = -r \sin\theta \\ \frac{dv}{dr} = \sin\theta & \frac{dv}{d\theta} = r \cos\theta \end{bmatrix} = r \cos^2\theta - (-r \sin^2\theta) = r \quad (\text{III. 5})$$

$$(I(x)^2) = \int_0^x \int_0^x e^{-\mu^2 - v^2} dv d\mu = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\sqrt{2x}} e^{-r^2} r dr d\theta \quad (\text{III. 6})$$

$$(I(x)^2) = \int_0^x r e^{-r^2} dr \int_0^{\frac{\pi}{2}} d\theta$$

$$(I(x)^2) = \frac{\pi}{4} (1 - e^{-2x^2})$$

$$\text{D'où } \int_0^x e^{-\mu^2} d\mu = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \sqrt{(1 - e^{-2x^2})}$$

$$\text{et } erf(x) = \sqrt{(1 - e^{-2x^2})}$$

$$erfc(x) = 1 - \sqrt{(1 - e^{-2x^2})} \quad (\text{III. 7})$$

Après avoir déterminé l'expression de la fonction erreur on revient sur l'équation (III. 2)

$$C(x, t) = C_s \left[1 - e^{-2 \left(\frac{x}{\sqrt{\frac{D_c t (m-1)}{(m-1)}}} \right)^2} \right] \quad (\text{III. 8})$$

$$\frac{C(x,t)^2}{C_s^2} = \left[1 - e^{-\frac{x^2}{2\frac{D_c t^{(m-1)}}{(m-1)}}} \right]$$

$$\frac{C(x,t)^2}{C_s^2} = \left[1 - e^{\frac{-x^2}{2D_c t^{(m-1)}/(m-1)}} \right]$$

$$\ln \left[1 - \left(\frac{C(x,t)}{C_s} \right)^2 \right] = -\frac{x^2}{2\frac{D_c t^{(m-1)}}{(m-1)}}$$

$$\frac{t^{(m-1)}}{(m-1)} = \frac{-1}{2D_c \ln \left[1 - \left(\frac{C(x,t)}{C_s} \right)^2 \right]} x^2$$

$$t = \left[\frac{-(m-1)x^2}{2D_c \ln \left[1 - \left(\frac{C(x,t)}{C_s} \right)^2 \right]} \right]^{\frac{1}{(m-1)}} \quad (\text{III. 9})$$

À cause de l'effet à long terme de la maturation du béton, le coefficient de diffusion évolue avec le temps. Ainsi, un béton plus ancien offre une résistance moindre à la pénétration des chlorures. L'équation (III.10) permet de calculer la valeur nominale du coefficient de diffusion en fonction du temps. Son évolution temporelle peut être déterminée à partir des valeurs de référence et du coefficient de vieillissement, initialement introduit par Lehner et Konecny en 2017 [16], puis reformuler par Xiaoxian et al. en 2022 [25] et par Hornakova et al. la même année [4], en tenant compte du facteur âge :

$$D_c = D_{c,ref} \left(\frac{t_{ref}}{t} \right)^m \quad (\text{III. 10})$$

$D_{c,ref}$: Étant le coefficient de diffusion de référence des ions de chlorure $\left(\frac{m^2}{s} \right)$.

D_c : correspond au coefficient de diffusion initiale des ions de chlorure en l'absence de sollicitations $\left(\frac{m^2}{s} \right)$.

t : représente le temps d'exposition aux chlorures (s).

t_{ref} : est le temps de référence mesuré (s).

m : désigne le facteur âge.

Le facteur âge est donc essentiel pour modéliser avec précision la pénétration des agents agressifs et la durée de vie utile des structures. Il intègre à la fois le vieillissement naturel du matériau et les modifications de son comportement vis-à-vis de la diffusion, de la perméabilité ou de la corrosion. IL dépend aussi du type de ciment et matériaux liants, du rapport Eau/Ciment (E/C), des conditions de cure et d'exposition, du temps d'hydratation et évolution de la microstructure, des contraintes mécaniques et des caractéristiques de la solution d'exposition (chlorures, CO₂, sulfates...).

III.3- DONNEES EXPERIMENTALES

III.3.1- Compression du béton

Afin d'analyser expérimentalement la loi de diffusion des ions de chlorure dans le béton soumis à des contraintes de compression, X. Cheng et al. ont réalisé des essais en 2020 [15]. Les éprouvettes ont été fabriquées à partir du ciment Portland avec une résistance caractéristique à la compression de 42.5 MPa, un gravier de 20 mm de dimension et d'une densité de 1550 kg/m³, ainsi qu'un sable fin de granulométrie comprise entre 2 et 3 mm et un super plastifiant d'éthers poly carboxyliques. Puis, les éprouvettes sont placées dans le dispositif de chargement uni axiale ou bi axiale selon X. Cheng et al. [9]. Les échantillons de béton ont été divisés en trois classes avec des contraintes de compression d'une manière respective de 47.21Mpa, 52.68Mpa et 56.78Mpa, a des rapports eau/ciment (E/C) par ordre décroissant (0.44-0.4-0.36). Les niveaux de contraintes proposés par X. Cheng et al. [15] sont donnés par la formule suivante:

$$\mu_{1,2} = \frac{\sigma_{c(x,y)}}{f_c} \quad (\text{III. 11})$$

ou, $\mu_{1,2}$ représente les niveaux de contraintes l'indice 1 pour l'uni axial et 2 pour le bi axial, $\sigma_{c(x,y)}$ est la contrainte mécanique de compression appliquée dans les deux directions en MPa, f_c est la résistance à la compression mesurée à 28 jours (voir figure III. 1).

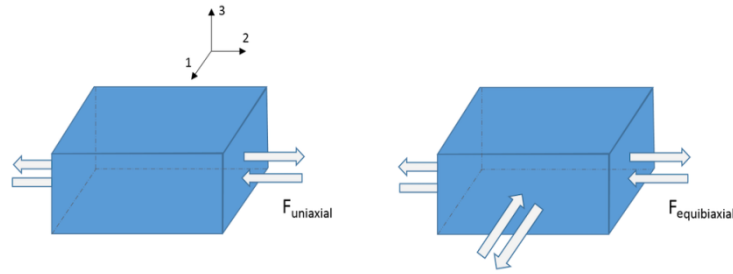


Figure III. 1 : Chargement uni et bi axiale des éprouvettes cubiques

III.3.2- Diffusion des ions de chlorure

Une chambre climatique artificielle est utilisée pour simuler la pénétration des ions de chlorure dans le béton à une température contrôlée (20°-22°) C avec exposition aux sels de chlorure pendant 2 mois Hornakova et al. en 2020 [4], trois valeurs ont été prises pour la profondeur de forage de la même couche pour être analysé.

Le modèle du coefficient de diffusion apparent des ions de chlorure sous une contrainte uni axiale continue proposé par X Cheng [15], peut être obtenu comme suit :

$$Dc(\mu_1) = D_0(1 - 0.2\mu_1 + 0.3\mu_1^2 + 0.3\mu_1^3) \quad (\text{III. 12})$$

ou, D_0 est le coefficient de diffusion des ions de chlorure initiale sans sollicitations($\frac{m^2}{s}$), $Dc(\mu_1)$ est le coefficient de diffusion des ions de chlorure avec sollicitations($\frac{m^2}{s}$).

Le temps nécessaire exprimé dans l'équation (II. 9) en tenant compte du coefficient de diffusion avec sollicitations uni et bi axiale s'écrivent comme ceci :

$$\text{*Cas de contrainte uni axiale : } t = \left[\frac{-(m-1)x^2}{2D_c(\mu_1) \ln \left[1 - \left(\frac{C(x,t)}{C_s} \right)^2 \right]} \right]^{\frac{1}{(m-1)}} \quad (\text{III. 13})$$

$$*\text{Cas de contrainte bi axiale : } t = \left[\frac{-(m-1)x^2}{2D_c(\mu_1, \mu_2) \ln \left[1 - \left(\frac{C(x,t)}{C_s} \right)^2 \right]} \right]^{\frac{1}{(m-1)}} \quad (\text{III. 14})$$

La Figure III.1 montre la relation entre le niveau de contrainte (μ_1) et la fonction de contrainte uni axiale $f(\mu_1)$ pour différents rapports (E/C) 0.40, 0.36, 0.44 présenté par X Cheng) [15] qui est approximativement une courbe cubique.

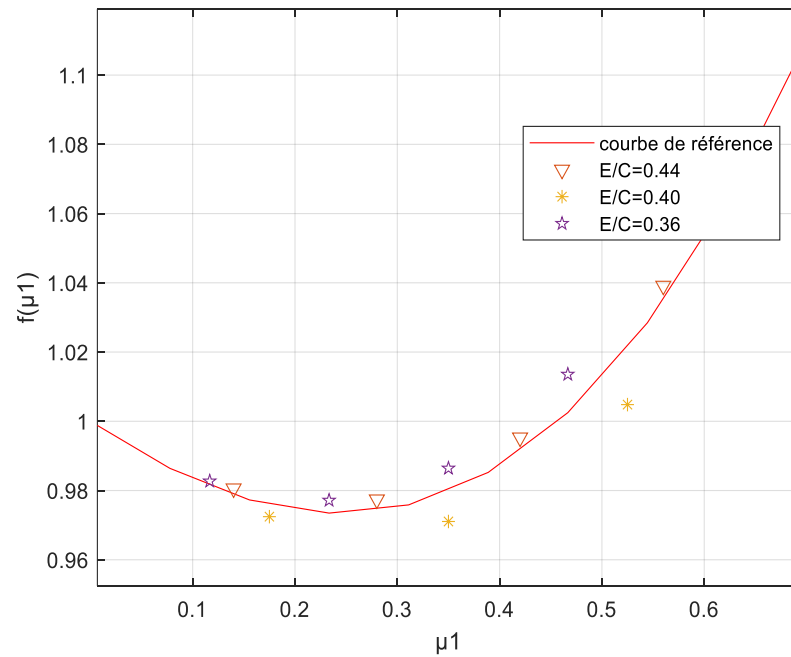


Figure III.1 : Relation entre le niveau de contrainte μ_1 et la fonction de contrainte uni axiale $f(\mu_1)$ pour différents rapports (E/C) 0.40, 0.36, 0.44

La capacité de diffusion des ions de chlorure dans le béton est influencée simultanément par μ_1 et μ_2 sous une charge de compression bi axiale. La figure III.2 présenté par X. Cheng [15] illustre la relation entre le niveau de contrainte μ_2 et la fonction de contrainte $f(\mu_1, \mu_2)$ avec μ_1 maintenue constante pour chaque rapport E/C (0.44, 0.40 et 0.36).

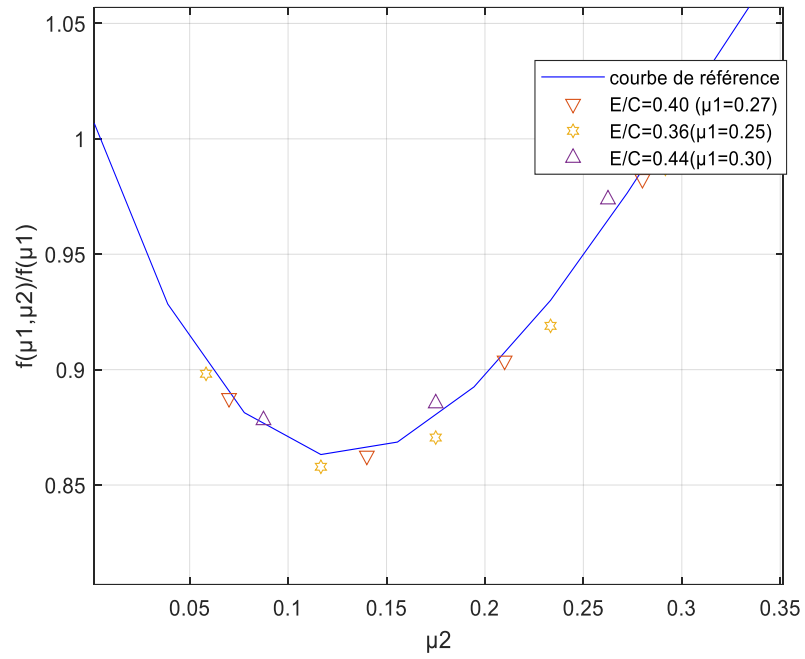


Figure III.2 : Relation entre le niveau de contrainte μ_2 et la fonction de contrainte $f(\mu_1, \mu_2)$ avec μ_1 maintenue constante pour chaque rapport (E/C) 0.44, 0.40 et 0.36

Pour le coefficient de diffusion des ions de chlorure apparent sous un niveau de contrainte bi axiale continue proposé par X Cheng [15], peut aussi être obtenu comme suit :

$$D_c(\mu_1, \mu_2) = D_0(1.01 - 2.39\mu_2 + 12.59\mu_2^2 - 14.36\mu_2^3)(1 - 0.2\mu_1 + 0.3\mu_1^2 + 0.3\mu_1^3) \quad (\text{III. 15})$$

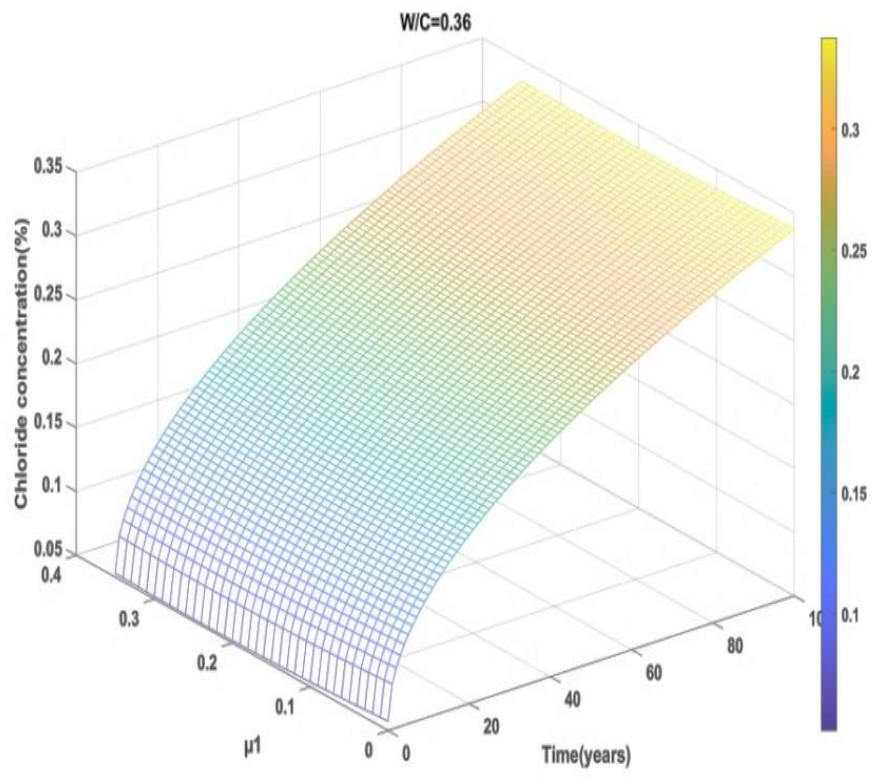
Les valeurs calculées par les équations précédentes pour une concentration à la surface C_s est de 0.20% proposées par Lehner et al. en 2017 [16], un facteur d'âge $m = 0.284$ pour un béton ordinaire [16] et un coefficient de diffusion de référence égale à $D_{c,ref} = 5.585 \times 10^{-12} (\frac{m^2}{s})$ [9] ont donné des coefficients de diffusion en ions de chlorure calculé par notre modèle voir (Tableau III.1).

Tableau III.1: Valeurs calculées des coefficients de diffusion en ions de chlorure

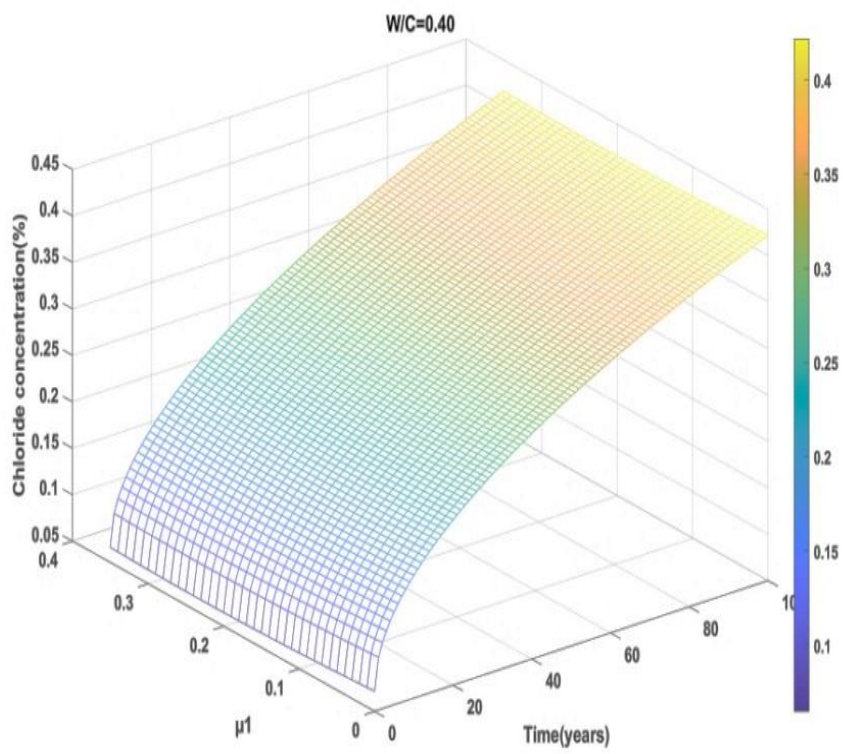
Contraintes uni axiale				Contraintes bi axiale			
$E/C=0.44$				$E/C=0.44$			
$f_c = 47.21 \text{ Mpa}$				$f_c = 47.12 \text{ Mpa}$			
Échantillon	$\sigma_{c(x)} \text{ (Mpa)}$	$\mu 1$	Coefficient de Diffusion $D_c(\mu 1) \text{ (m}^2/\text{s)}$	Échantillon	$\sigma_{c(x)} \text{ (Mpa)}$	$\sigma_{c(y)} \text{ (Mpa)}$	$\mu 2$ Coefficient de Diffusion $D_c(\mu 1, \mu 2) \text{ (m}^2/\text{s)}$
1	7.08	0.15	7.55×10^{-12}	1	14.16	3.54	0.07 6.72×10^{-12}
2	14.16	0.30	7.47×10^{-12}	2	14.16	7.08	0.15 6.52×10^{-12}
3	21.24	0.45	7.66×10^{-12}	3	14.16	10.63	0.22 7.16×10^{-12}
4	28.33	0.60	8.07×10^{-12}	4	14.16	14.16	0.3 7.67×10^{-12}
$D_0 = 7.65 \times 10^{-12} \left(\frac{\text{m}^2}{\text{s}}\right)$				$\mu 1 = 0.3 \quad D_0 = 7.65 \times 10^{-12} \left(\frac{\text{m}^2}{\text{s}}\right)$			
Contraintes uni axiale				Contraintes bi axiale			
$E/C=0.40$				$E/C=0.40$			
$f_c = 52.68 \text{ Mpa}$				$f_c = 52.68 \text{ Mpa}$			
Échantillon	$\sigma_{c(x)} \text{ (Mpa)}$	$\mu 1$	Coefficient de Diffusion $D_c(\mu 1) \text{ (m}^2/\text{s)}$	Échantillon	$\sigma_{c(x)} \text{ (Mpa)}$	$\sigma_{c(y)} \text{ (Mpa)}$	$\mu 2$ Coefficient de Diffusion $D_c(\mu 1, \mu 2) \text{ (m}^2/\text{s)}$
1	7.08	0.13	6.10×10^{-12}	1	14.16	3.54	0.06 5.44×10^{-12}
2	14.16	0.25	5.98×10^{-12}	2	14.16	7.08	0.13 5.14×10^{-12}
3	21.24	0.27	6.16×10^{-12}	3	14.16	10.63	0.20 5.52×10^{-12}
4	28.33	0.40	6.35×10^{-12}	4	14.16	14.16	0.27 5.97×10^{-12}
$D_0 = 6.19 \times 10^{-12} \left(\frac{\text{m}^2}{\text{s}}\right)$				$\mu 1 = 0.27 \quad D_0 = 6.19 \times 10^{-12} \left(\frac{\text{m}^2}{\text{s}}\right)$			
Contraintes uni axiale				Contraintes bi axiale			
$E/C=0.36$				$E/C=0.36$			
$f_c = 56.78 \text{ Mpa}$				$f_c = 56.78 \text{ Mpa}$			
Échantillon	$\sigma_{c(x)} \text{ (Mpa)}$	$\mu 1$	Coefficient de Diffusion $D_c(\mu 1) \text{ (m}^2/\text{s)}$	Échantillon	$\sigma_{c(x)} \text{ (Mpa)}$	$\sigma_{c(y)} \text{ (Mpa)}$	$\mu 2$ Coefficient de Diffusion $D_c(\mu 1, \mu 2) \text{ (m}^2/\text{s)}$
1	7.08	0.12	4.89×10^{-12}	1	14.16	3.54	0.06 4.46×10^{-12}
2	14.16	0.25	4.84×10^{-12}	2	14.16	7.08	0.13 4.21×10^{-12}
3	21.24	0.37	4.92×10^{-12}	3	14.16	10.63	0.19 4.38×10^{-12}
4	28.33	0.50	5.05×10^{-12}	4	14.16	14.16	0.25 4.75×10^{-12}
$D_0 = 4.98 \times 10^{-12} \left(\frac{\text{m}^2}{\text{s}}\right)$				$\mu 1 = 0.25 \quad D_0 = 4.98 \times 10^{-12} \left(\frac{\text{m}^2}{\text{s}}\right)$			

III.4- RESULTATS ET DISCUTIONS

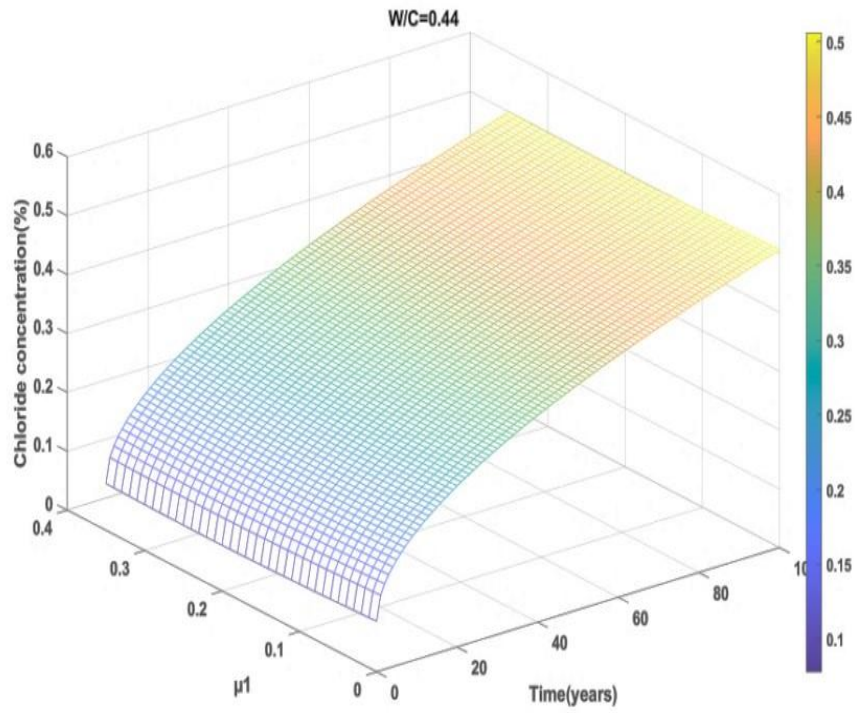
En s'appuyant sur les valeurs du coefficient de diffusion fournies dans le tableau III.1, les résultats de la distribution de la concentration en ions de chlorure à une profondeur de 30 mm en fonction du temps d'initiation à la corrosion et des niveaux de contraintes uni axiales $\mu 1$ pour différents rapport eau/ciment (E/C) sont illustrés dans la figure III.3 (a, b, c).



(a)



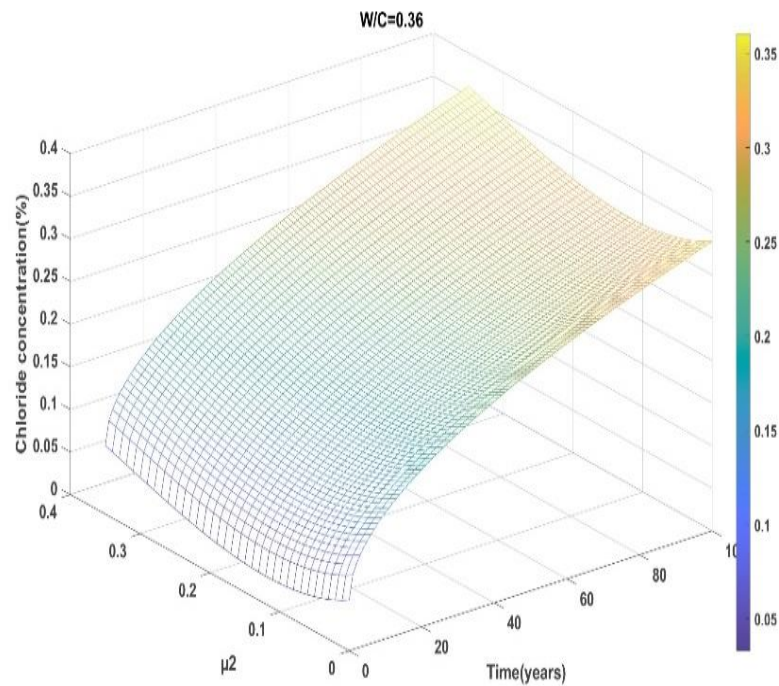
(b)



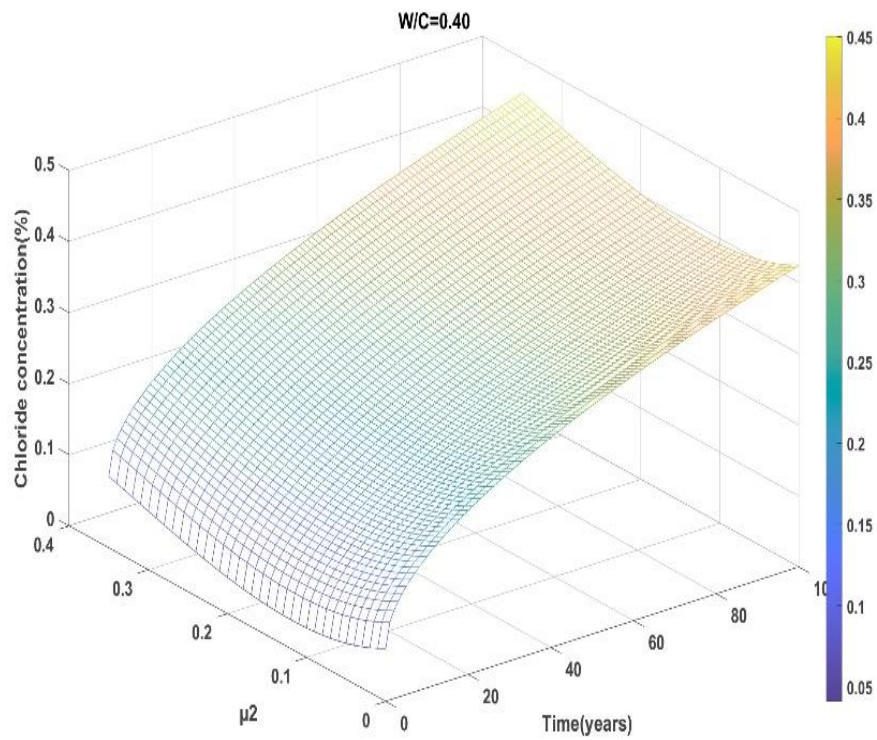
(c)

Figures III.3 : Résultats de la distribution de la concentration en ions de chlorure à une profondeur de 30 mm en fonction du temps d'initiation à la corrosion

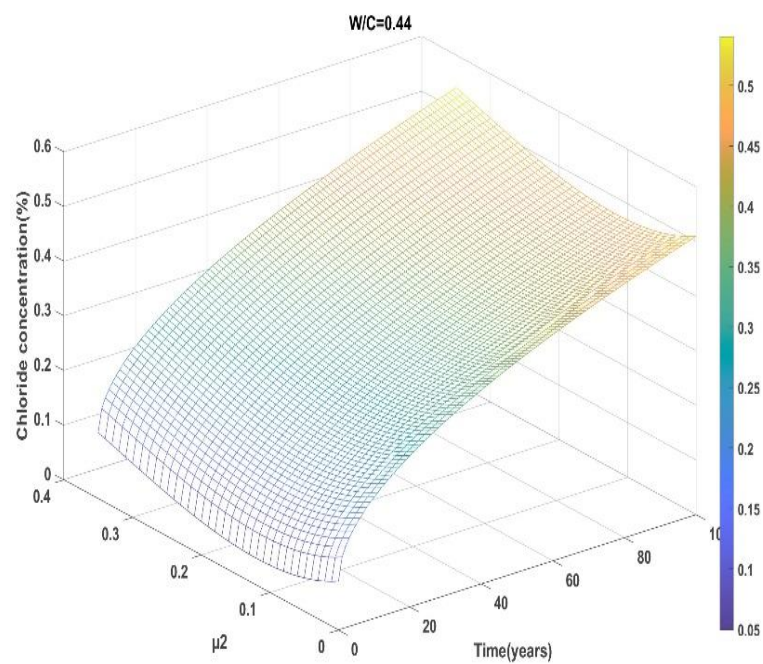
Les résultats de la distribution de la concentration en ions de chlorure avec le temps d'initiation à la corrosion sous différents niveaux de contraintes bi axial (μ_2) pour des rapports eau sur ciment (E/C) sont représentés sur la Figure III.4 (a, b, c).



(a)



(b)



(c)

Figure III.4 : Résultats de la distribution de la concentration en ions de chlorure en fonction du temps d'initiation à la corrosion avec les niveaux de contraintes bi axial μ_2

Nous représentons dans le Tableau III.2 les valeurs numériques des concentrations en fonction du temps d'initiation à la corrosion dans les cas uni axiale et bi axiale.

<i>E/C</i>	<i>Contraintes uni axiale</i>			<i>Contraintes bi axiale</i>			
0.44	<i>T (ans)</i>	$\mu 1$	<i>C% Matlab</i>	<i>T (ans)</i>	$\mu 2$	<i>C% Matlab</i>	$\mu 1$
	20	0.15	0.211	20	0.07	0.202	0.30
	40	0.30	0.241	40	0.15	0.231	0.30
	60	0.45	0.270	60	0.22	0.263	0.30
	80	0.60	0.304	80	0.30	0.321	0.30
0.40	<i>T (ans)</i>	$\mu 1$	<i>C% Matlab</i>	<i>T (ans)</i>	$\mu 2$	<i>C% Matlab</i>	$\mu 1$
	20	0.13	0.213	20	0.07	0.206	0.27
	40	0.27	0.243	40	0.13	0.234	0.27
	60	0.40	0.267	60	0.2	0.26	0.27
	80	0.54	0.289	80	0.27	0.298	0.27
0.36	<i>T (ans)</i>	$\mu 1$	<i>C% Matlab</i>	<i>T (ans)</i>	$\mu 2$	<i>C% Matlab</i>	$\mu 1$
	20	0.12	0.222	20	0.06	0.203	0.25
	40	0.25	0.242	40	0.12	0.234	0.25
	60	0.37	0.264	60	0.19	0.262	0.25
	80	0.50	0.292	80	0.25	0.287	0.25

Tableau III.2 : Valeurs des concentrations en fonction du temps pour les cas uni axiale et bi axiale

En prenant en considération le niveau de contraintes et le facteur âge (vieillessement) nous pouvons observer selon la Figure III.3 (a, b, c) et les valeurs du Tableau III.2 tenus à compter des figures que l'augmentation de la concentration au-delà de 0.20% en fonction du temps d'initiation à la corrosion a plusieurs pas (20, 40, 60 80) ans dans la couche d'enrobage d'un béton ordinaire âgé lorsque le niveau de contraintes est uni axiale pour des rapports progressifs de E/C (0.36, 0.40 et 0.44) est compatible à comparer avec celle proposé par Petr Lehner [16].

La corrosion des armatures dans le béton est déclenchée lorsque la concentration en ions chlorures au niveau de l'acier dépasse un seuil critique (0.4 – 0.6)% par rapport à la masse du ciment. Avant ce seuil, le béton protège l'acier grâce à son environnement alcalin. Le temps nécessaire pour atteindre cette concentration critique à la profondeur de l'armature

1. Phase de diffusion progressive : en couleur bleu dans les figures. Dès que le béton comprimé est exposé à un environnement contenant des chlorures, ces ions commencent à pénétrer lentement dans le béton par diffusion. Cette diffusion est influencée par la porosité, la microstructure, le facteur âge, et les conditions environnementales.
2. À Proximité de la profondeur des armatures : en couleur verte. À mesure que les chlorures diffusent, ils approchent la profondeur d'enrobage où se trouvent les armatures. La concentration en chlorures à cette profondeur augmente avec le temps.

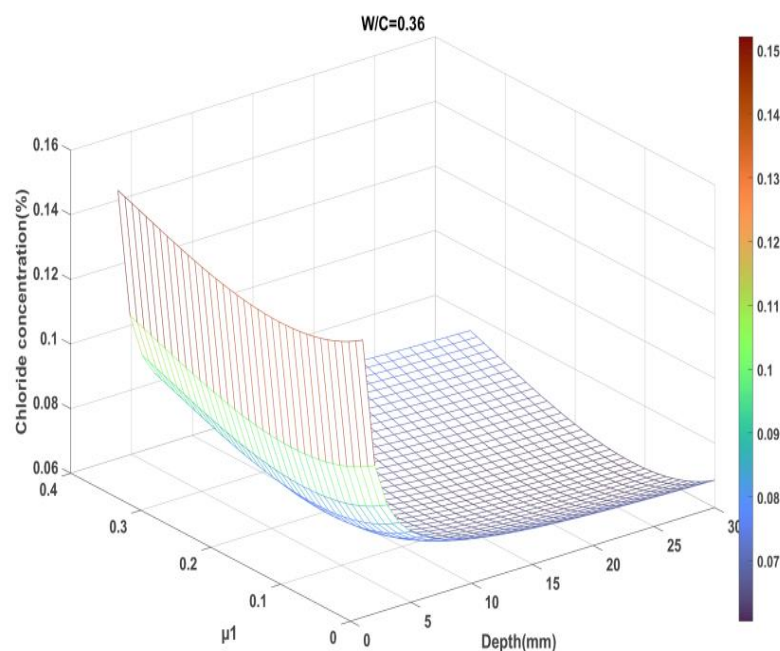
3. Atteinte du seuil critique : en couleur jaune Une fois que la concentration atteint, le passif protecteur autour de l'acier est détruit. À ce moment précis, on considère que l'initiation de la corrosion commence.

La concentration en ions de chlorure a une influence directe sur le temps d'initiation à la corrosion des armatures métalliques dans le béton qui présente un vieillissement. Plus la concentration est élevée plus les temps d'initiation à la corrosion sont accélérés que ce soit pour les niveaux de contraintes uni axial ou bi axial.

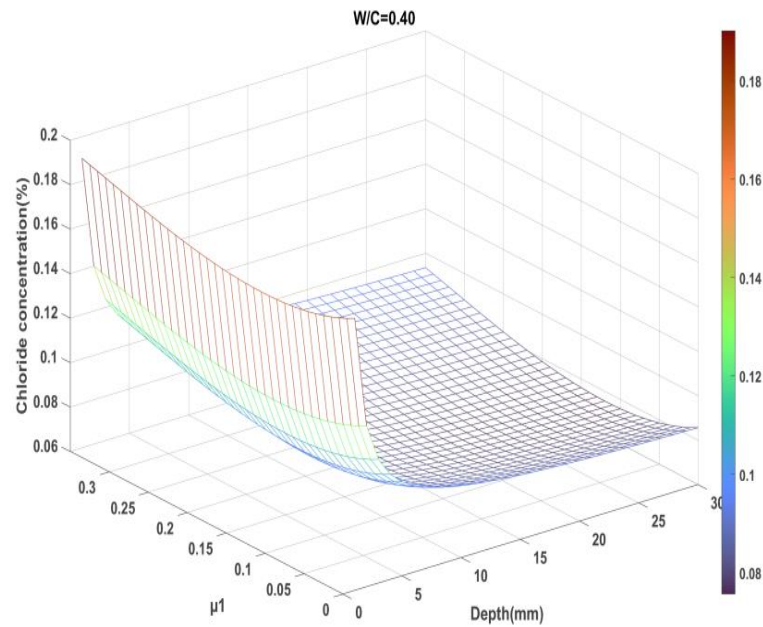
Le rapport eau/ciment (E/C) constitue un paramètre clé dans l'estimation de la durée de vie des ouvrages en béton armé vieillissants, soumis à des contraintes uni axiales et bi axiales, en influençant la répartition de la concentration en ions de chlorure et en accélérant le temps d'initiation à la corrosion. Ceci est clairement illustré par les figures III.3 et III.4 ainsi que le tableau III.2.

Les résultats de la distribution de la concentration en ions de chlorure en fonction de l'épaisseur d'enrobage du béton, sous un niveau de contrainte uni axiale ($\mu 1$) pour les trois rapports E/C (0.44, 0.40 et 0.36) sont représentés dans la figure III.5 (a, b, c). Nous observons que le niveau de contrainte ($\mu 1$) influence sur la répartition des ions de chlorure dans le béton, entraînant une diminution de la concentration variant entre 0.14 % et 0.13 %.

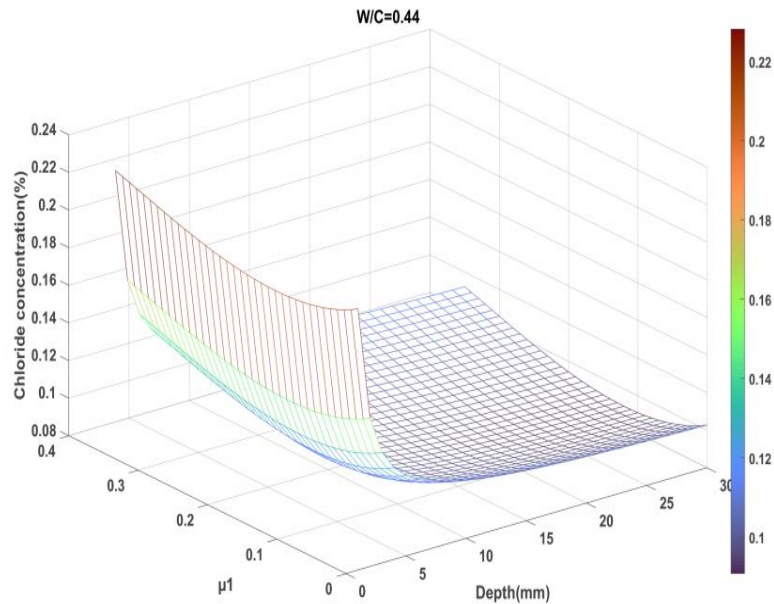
La diffusion des ions de chlorure dans l'enrobage sur une épaisseur de 0 à 30 mm pour les différents rapports E/C étudiés, est en accord avec les travaux de X.Cheng et al. [15] et suit une loi exponentielle jusqu'à atteindre les armatures.



(a)



(b)



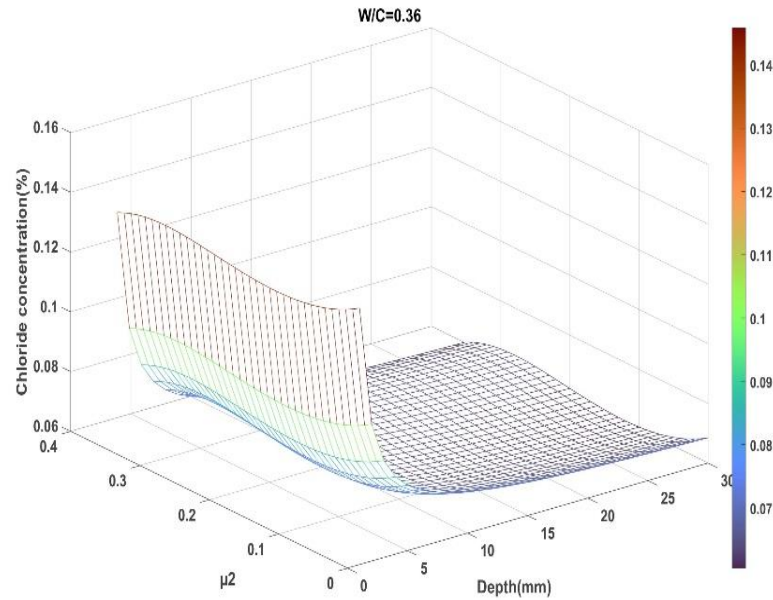
(c)

Figures III.5 : Résultats de la distribution de la concentration en ions de chlorure en fonction de l'épaisseur d'enrobage du béton avec le niveau de contrainte uni axial μ_1 pour trois rapports eau sur ciment (E/C)

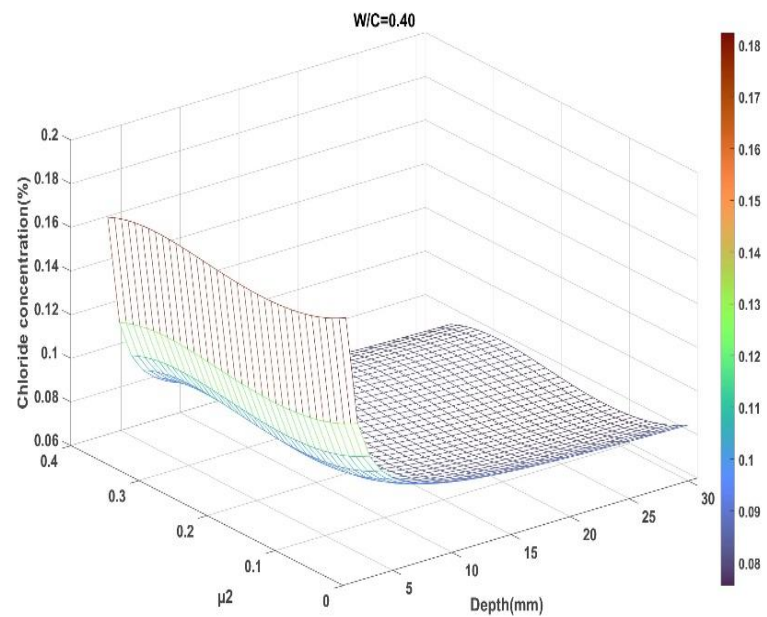
Les figures III.6 (a, b, c) présentent les résultats de la distribution de la concentration en ions de chlorure en fonction de l'épaisseur de l'enrobage du béton, avec un niveau de contrainte bi axiale (μ_2), pour trois rapport eau/ciment (E/C). On observe que l'influence du

chargement mécanique sur la répartition de la concentration des ions est encore plus prononcée dans le cas des contraintes bi axiales (μ_2).

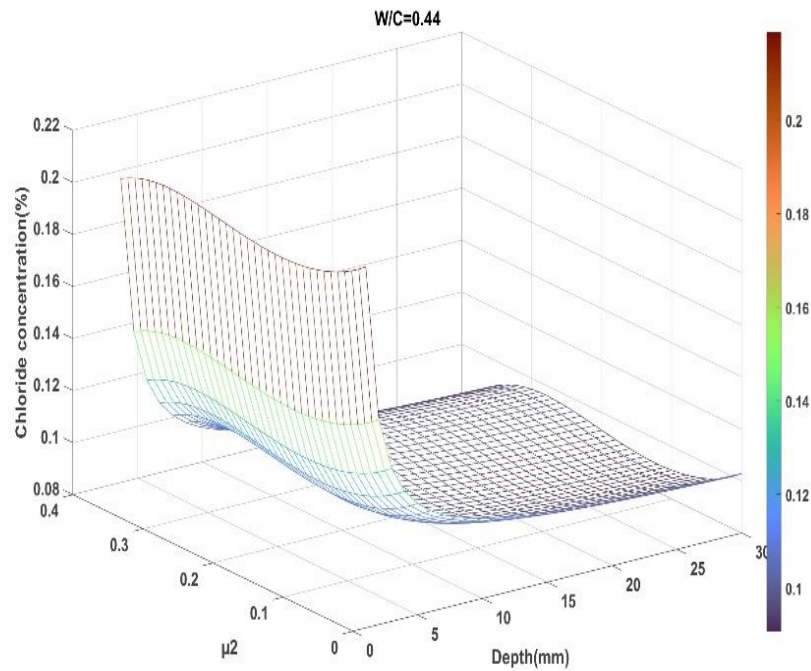
La diffusion des ions de chlorure dans l'épaisseur de l'enrobage (0 à 30 mm) pour les rapports E/C de 0.44, 0.40 et 0.36 est cohérente avec les résultats proposés par X.Cheng et al. [15] et Jun Xu et al. [21].



(a)



(b)



(c)

Figure III.6 : Résultats de la distribution de la concentration en ions de chlorure en fonction de l'épaisseur d'enrobage du béton avec un niveau de contrainte bi axial pour trois rapports eau sur ciment (E/C)

Les valeurs des concentrations à partir des figures sont représentées dans le Tableau III.3. La diminution de concentration en ions de chlorure entre (0.12 – 0.16) % dans un milieu agressif a un impact significatif sur la valeur de l'enrobage du béton jusqu'à 30 mm, en particulier lorsqu'on prend en compte l'effet de vieillissement. Bien que le facteur âge réduise initialement la perméabilité du béton et que la diffusion soit le principal vecteur de transport des chlorures, leur interaction dans le temps est non linéaire et fortement influencée par l'environnement réel. La simulation montre aussi que l'augmentation du rapport (E/C) de 0.36 – 0.44 a une influence importante sur la répartition libre de la concentration, ce rapport augmente indirectement la porosité et favorise le transport des ions de chlorure à travers l'épaisseur de l'enrobage des ouvrages anciens dans un réseau poreux, en accélérant le processus de diffusion en profondeur vers les armatures métalliques. La présence des niveaux de contraintes dans les deux cas uni et bi axial entre (0.1 – 0.4) modifie fortement le comportement diffusif du béton vis-à-vis des chlorures en se référant aux figures (III.5) et (III.6).

Nous représentons dans le Tableau III.3 les valeurs numériques des concentrations en fonction de l'enrobage dans les cas uni axiale et bi axiale :

La pénétration des ions chlorure dans l'enrobage (0- 30) mm du béton est fortement influencée par plusieurs paramètres clés.

-Le rapport Eau/Ciment (E/C) [0.36 0.40 0.44] : Un rapport élevé augmente la porosité du béton, facilitant la diffusion des chlorures et réduisant la durabilité. À l'inverse, un rapport E/C plus faible améliore la compacité du béton et ralentit la pénétration des chlorures (0.12 – 0.16)%.

-Le facteur âge m : Avec le temps, le béton devient plus dense en raison de l'hydratation continue du ciment. Cela entraîne une diminution progressive du coefficient de diffusion des chlorures, retardant leur progression vers les armatures.

-La contrainte mécanique uni axial ou bi axial : Les niveaux de contraintes $\mu 1$ (0.15- 0.5) et $\mu 2$ (0.07 – 0.0.27) peuvent altérer la microstructure du béton en réduisant la porosité, tandis que des contraintes excessives augmentent la perméabilité, favorisant la diffusion des chlorures.

L'interaction de ces facteurs modifie la vitesse d'atteinte de la concentration critique au niveau des armatures, conditionnant ainsi le temps d'initiation de la corrosion.

<i>E/C</i>	<i>Contraintes uni axiale</i>			<i>Contraintes bi axiale</i>			
0.44	<i>e (mm)</i>	<i>$\mu 1$</i>	<i>C%</i>	<i>e (mm)</i>	<i>$\mu 2$</i>	<i>C%</i>	<i>$\mu 1$</i>
	5	0.15	0.142	5	0.07	0.125	0.30
	10	0.30	0.137	10	0.15	0.127	0.30
	20	0.45	0.139	20	0.22	0.138	0.30
	30	0.60	0.142	30	0.30	0.163	0.30
0.40	<i>e (mm)</i>	<i>$\mu 1$</i>	<i>C%</i>	<i>e (mm)</i>	<i>$\mu 2$</i>	<i>C%</i>	<i>$\mu 1$</i>
	5	0.13	0.141	5	0.07	0.124	0.27
	10	0.27	0.138	10	0.13	0.127	0.27
	20	0.40	0.136	20	0.20	0.133	0.27
	30	0.54	0.140	30	0.27	0.141	0.27
0.36	<i>e (mm)</i>	<i>$\mu 1$</i>	<i>C%</i>	<i>e (mm)</i>	<i>$\mu 2$</i>	<i>C%</i>	<i>$\mu 1$</i>
	5	0.12	0.142	5	0.06	0.124	0.25
	10	0.25	0.137	10	0.12	0.128	0.25
	20	0.37	0.134	20	0.19	0.132	0.25
	30	0.50	0.139	30	0.25	0.140	0.25

Tableau III. 3: Valeurs des concentrations en fonction de l'enrobage et les niveaux de contraintes

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Dans cette étude, nous avons développé un modèle numérique permettant de décrire le comportement des structures face à la corrosion induite par l'attaque des ions de chlorure. Ce modèle prend en compte la variation du coefficient de diffusion en intégrant trois paramètres clés : le niveau de contrainte en compression, le facteur âge (vieillessement) et le rapport eau/ciment (E/C).

Les résultats obtenus par notre modèle montrent une bonne correspondance avec les études expérimentales existantes, qui ont généralement analysé ces paramètres de manière isolée. Le modèle confirme que la vitesse de pénétration des ions de chlorure augmente avec la hausse du rapport E/C, ainsi qu'avec l'intensité des contraintes, qu'elles soient uni axial ou bi axial. De plus, il met en évidence l'influence de l'âge du béton sur la diffusion des ions de chlorure, démontrant qu'un béton plus ancien favorise davantage leur propagation qu'un béton récent.

L'intégration de plusieurs paramètres dans un même modèle permet une meilleure compréhension de l'influence de chacun sur le processus de corrosion, objectif centrale de cette étude. Bien que d'autres facteurs puissent également jouer un rôle dans la pénétration des ions de chlorure et l'initiation de la corrosion des armatures, ce modèle offre une estimation pertinente de la vitesse de diffusion et de la durabilité du béton en tenant compte de ces trois paramètres essentiels.

Les perspectives sont prometteuses grâce aux avancées en modélisation en matériaux en outils numériques et en régulation. Toutefois, les défis persistent notamment en ce qui concerne : L'harmonisation des modèles et des normes à l'échelle internationale, l'accès à des données fiables à long terme et à la validation expérimentale des approches numériques

Enfin, des améliorations peuvent être envisagées, notamment en généralisant la modèle à d'autres types de chargement ou en intégrant des aspects supplémentaires, tels que l'impact de la fissuration, qui peut également influencer le processus de corrosion des structures en béton armé.

Bibliographies

- 1 O.A. Hodhod ^a, H.I. Ahmed ^{b,*} **Modeling the corrosion initiation time of slag concrete using the artificial neural network** HBRC Journal (2014) 10 231-234
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S168740481300103X>
- 2 Petr Lehner^{a,*}, Petr Konečný^a **Numerical Validation of Concrete Corrosion Initiation Model Considering Crack Effect Model and Aging Effect** Procedia Engineering 190 (2017) 154-116
<https://www.sciencedirect.com>
- 3 Marie Horňáková ^{1,*}, Petr Lehner ¹, Tuan Duc Le ¹ Petr Konečný ¹ and Jacek Katzer ² **Durability Characteristics of Concrete Mixture Based on Red Ceramic Waste Aggregate** Sustainability 2020,
<https://www.mdpi.com/2071-1050/12/21/8890>
- 4 Wenzheng HE, Linsheng XU*, Lili WANG* **Numerical Simulation of the Ion Transport Behavior in Concrete under Coupled Axial Loading and Sulfate Attack** Tehnicki vjesnik 27 6 (2020)
<https://doi.org/10.17559/TV-20200530041557>
- 5 Kheira Ouzaa ^{a,†}, Chahmi Oucif ^b **Numerical model for prediction of corrosion of steel reinforcements in reinforced concrete structures** ScienceDirect 4 2019 72-73
<https://www.researchgate.net/publication/326526242>
- 6 Marija Kušter Maric' ^{1*}, Joško Ožbolt^{2,3}, Gojko Balabanic' ³, Olesya Zhychkovska⁴ and Serena Gambarelli⁵ **Chloride Transport in Cracked Concrete Subjected to Wetting – Drying Cycles: Numerical Simulations and Measurements on Bridges Exposed to De-Icing Salts** Frontiers in Built Environment October 2020
<https://www.frontiersin.org/journals/builtenvironment/articles/10.3389/fbuil.2020.561897/>
- 7 Jun Xu ^{1,2}, Rui Mo ³, Penggang Wang ³, Jiguo Zhou ⁴, Xiaojin Dong ⁵ and Wei She ^{1*} **Coupled Transport of Sulfate and Chloride Ions With Adsorption Effect: A Numerical Analysis** Frontiers in Built Environment September 2020
<https://www.frontiersin.org/journals/materials/articles/10.3389/fmats.2020.536517/full>
- 8 Xiaoxian Wang ^{a,b}, Zuquan Jin ^{b,†}, Jiaping Liu ^a, Fanxiu Chen ^b, Pan Feng ^a, Jinhui Tang ^a **Research on internal monitoring of reinforced concrete under accelerated corrosion, using XCT and DIC**

technology Construction and Building Materials 266 (2021) 121018 <https://www.mdpi.com/2076-3417/14/23/11453>

9 P.J. Sánchez ^{a,c,*}, A.E. Huespe ^a, J. Oliver ^b, S. Toro ^c **Mesoscopic model to simulate the mechanical behavior of reinforced concrete members affected by corrosion** International Journal of Solids and Structures 47 (2010) 559-570 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020768309004259>

10 Muazzam Ghous Sohail ^a, Ramazan Kahraman ^{b,*}, Nasser Al Nuaimi ^a, Bora Gencturk ^c, Wael Alnahhal ^d **Durability characteristics of high and ultra-high performance concretes** Journal of Building Engineering 33 (2021) <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710220311797>

11 Martina Šomodíková¹| Alfred Strauss²| Ivan Zambon² **fib models for modeling of chloride ion ingress and concrete carbonation: Levels of assessment of input parameter** Structural Concrete. 2020 21:1377–1384. <https://onlinelibrary.wiley.com/journal/17517648?journalRedirectCheck=true>

12 Faqiang Yu¹, Weiwei Gao¹, Wenchao Liu¹ **Mechanism analysis and model calculation of chloride ion diffusion in reinforced concrete structure** ISCEG 2020 https://www.e3sconferences.org/articles/e3sconf/abs/2020/58/e3sconf_isceg2020_01035/e3sconf_isceg2020_01035.html

13 Jerzy J. Jasielec ^{*}, Jakub Stec, Krzysztof Szyszkiewicz-Warzecha, Artur Łagosz, Jan Deja, Andrzej Lewenstam and Robert Filipiek **Effective and Apparent Diffusion Coefficients of Chloride Ions and Chloride Binding Kinetics Parameters in Mortars: Non-Stationary Diffusion–Reaction Model and the Inverse Problem** Materials 2020, 13, 5522 <https://www.mdpi.com/1996-1944/13/23/5522>

14 Xiaokang Cheng ¹, Jianxin Peng ^{1,*}, C.S. Cai ² and Jianren Zhang ¹ **Experimental Study on Chloride Ion Diffusion in Concrete under Uniaxial and Biaxial Sustained Stress** Materials 2020, 13, 5717 <https://www.mdpi.com/1996-1944/13/24/5717>

15 Naser Nosratzehi¹, Mahmoud Miri^{1*} **Experimental Investigation on Chloride Diffusion Coefficient of Self-compacting Concrete in the Oman Sea** Civil Engineering, 64(3), pp. 647–657, 2020. <https://doi.org/10.3311/PPci.15335>

16 Ollivier J.P, Vichot a, **La Durabilité des Bétons**. Association Technique de l'Industrie des Liants Hydrauliques Ponts et Chaussées Ecole thématique « matériaux cimentaires » septembre 2008 <https://www.eyrolles.com/BTP/Livre/la-durabilite-des-betons-9782859784348/>

- 17 Bensaada S, **Cours de Corrosion**. Office des Publications Universitaires édition 2.09.5267 (2011)
<https://opu.dz/fr/livre/mines-et-m%C3%A9tallurgie/cours-de-corrosion>
- 18 Tomasz Krykowski , Adam Zybura **Modelling of Reinforced Concrete Element Damage as a Result of Reinforcement Corrosion** Procedia Engineering 57 (2013) 614-623
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705813008114>
- 19 Nele Pollmann ^a, Fredrik Larsson ^a, Kenneth Runesson ^a, Karin Lundgren ^b, Kamyab Zandi ^b, Ralf Jänicke ^{a,†} **Modeling and computational homogenization of chloride diffusion In three-phase meso-scale concrete** Construction and Building Materials 271 (2021) 121558
<https://www.researchgate.net/publication/347932144>
- 20 Mukhtar Oluwaseun Azeez ¹ and Ahmed Abd El Fattah ^{2,*} **Service Life Modeling of Concrete with SCMs Using Effective Diffusion Coefficient and a New Binding Model** Crystals 2020, 10, 967
<https://www.researchgate.net/publication/346423088>
- 21 Yinglong Liu, Pengzhen Lin * and Junjun Ma **Diffusion Behavior of Chloride Ions in Concrete Box Girder under the Influence of Load and Carbonation** Materials 2020 13 2117
<https://www.mdpi.com/1996-1944/13/9/2117>
- 22 Yongqin Liang¹ and Licheng Wang^{2,*} **Uncertain Factors Relating to the Prediction of Corrosion-induced Cracking of Concrete Cover** Journal of Advanced Concrete Technology Vol. 18, 699-715, November 2020 https://www.jstage.jst.go.jp/article/jact/18/11/18_699/_pdf
- 23 In-Seok Yoon ¹ and Chun-Ho Chang ^{2,*} **Time Evolution of CO₂ Diffusivity of Carbonated Concrete** Appl. Sci. 2020, 10, 8910 <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/24/8910>
- 24 Amir Behravan ^{a,*}, M. Tyler Ley ^a, Anna Rywelski ^a, Neal Berke ^b **Changes in the rate of ion penetration of alternative cementitious materials with time** Materials and design 197(2021)109236 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127520307711>
- 25 Hossein M. Shodja ^{*}, Keivan Kiani, Alireza Hashemian **A model for the evolution of concrete deterioration due to reinforcement corrosion** Mathematical and Computer Modelling 52(2010)
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0895717710002621>

26 Jin-xia XU^{*1, 2}, Lin-hua JIANG², Qi WANG² **Finite element model of reinforcement corrosion in concrete** j.issn.1674-2370.2009.02.008

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S167423701530065X>

27 Jun Lai ¹ , Jian Cai ^{1,2}, Qing-Jun Chen ^{1,2,*}, An He ³ and Mu-Yang Wei ¹ **Influence of Crack Width on Chloride Penetration in Concrete Subjected to Alternating Wetting–Drying Cycles** *Materials* 2020 <https://www.mdpi.com/1996-1944/13/17/3801>

28 Les ciments <https://forum-btp.blogspot.com/2014/04/les-ciments.html>

29 Protection-corrosion-structures <https://www.freyssinet.fr/solution/protection-corrosion-structures/>

30 Corrosion <https://fr.wikipedia.org/wiki/Corrosion>

31 Reparation des ouvrages en beton arme degrades par corrosion des armatures <https://www.infociments.fr/autres-ouvrages-de-genie-civil/reparation-des-ouvrages-en-beton-arme-degrades-par-corrosion-des-armatures>

32 Analyse de corrosion <https://www.aquatycia.fr/analyse-corrosion.php>

33 Uniform Corrosion https://www.researchgate.net/figure/Figure-2-2-Uniform-Corrosion-10_fig1_293817799

34 Principaux types de corrosion <https://sodiags.fr/5-principaux-types-de-corrosion/>

35 Corrosion atmospherique https://fr.wikipedia.org/wiki/Corrosion_atmosph%C3%A9rique

36 Corrosion caverneuse aciers inoxydables definitions <https://afth.asso.fr/pdfs/corrosion-caverneuse-aciers-inoxydables-definitions.pdf>

37 Sometimes it is too late <https://www.cedinox.es/en/publicaciones/Sometimes-it-is-too-late>

38 Paut stress corrosion cracking scc damage detection and analysis specific level
<https://altair.academy/paut-stress-corrosion-cracking-scc-damage-detection-and-analysis-specific-level-ii/>

39 Durabilité des éléments en béton armé en milieu agressif Corrosion des armatures Mémoire de Magister Amarni lynda 2012 <https://fr.scribd.com/document/763115828/Amarni-Lynda>

40 Effets-de-la-corrosion-sur-le-comportement-mecanique-de-structures-corrodees
https://www.researchgate.net/figure/Effets-de-la-corrosion-sur-le-comportement-mecanique-de-structures-corrodees-64-I627_fig5_360297071

41 Corrosion armatures interet inhibiteur corrosion <https://www.cerib.com/wp-content/uploads/2017/05/276-e-corrosion-armatures-interet-inhibiteur-corrosion.pdf>

42 Fascicule NFP 18-011 environnements agressifs des bétons armés ou précontraints
<https://www.infociments.fr/fascicule-de-documentation-fd-p-19-011>

43 Guo, Y. X., Wang, P., Feng, G. R., Qi, T. Y., & Li, Q. D.(2020). Experimental study on diffusion process of sulfateion in cemented gangue backfill material. *Advances in Civil Engineering*, 2020(4), 1-14. <https://doi.org/10.1155/2020/5846397>

44 Stawiski, B. & Kania, T. (2019). Examining the distribution of strength across the thickness of reinforced concrete elements subject to sulphate corrosion using the ultrasonic method. *Materials*, 12(16), 2519-2535. <https://doi.org/10.3390/ma12162519>

45 Ikumi, T., Cavalaro, S. H., Segura, I., & Aguado, A. (2014). Alternative methodology to consider damage and expansions in external sulfate attack modeling. *Cement and concrete research*, 63, 105-116. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.05.011>

46 Ikumi, T., Cavalaro, S. H., Segura, I., de la Fuente, A., & Aguado, A. (2016). Simplified methodology to evaluate the external sulfate attack in concrete structures. *Materials & Design*, 89, 1147-1160. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.10.084>

- 47 Ikumi, T. & Segura, I. (2019). Numerical assessment of external sulfate attack in concrete structures. A review. *Cement and Concrete Research*, 121, 91-105.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.04.010>
- 48 Zuo, X. B., Sun, W., & Yu, C. (2012). Numerical investigation on expansive volume strain in concrete subjected to sulfate attack. *Construction and Building Materials*, 36, 404-410.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.05.020>
- 49 Multon, S. & Sellier, A. (2019). Expansion modelling based on cracking induced by the formation of new phases in concrete. *International Journal of Solids and Structures*, 160, 293-306.
<https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2018.11.001>
- 50 Islam, M. A., Golrokh, A. J., & Lu, Y. (2019). Chemo mechanical Modeling of Sulfate Attack-Induced Damage Process in Cement-Stabilized Pavements. *Journal of Engineering Mechanics*, 145(1), 1-11. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0001545](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001545)
- 51 Gouder, C. & Saravanan, U. (2016). Modeling diffusion of sulfate through concrete using mixture theory. *Acta Mechanica*, 227(11), 3123-3146. <https://doi.org/10.1007/s00707-015-1539-4>
- 52 Gouder, C. & Saravanan, U. (2018). Modeling diffusion and reaction of sulfates with cement concrete using mixture theory. *Acta Mechanica*, 229(3), 1353-1385. <https://doi.org/10.1007/s00707-017-2035-9>
- 53 Yin, G. J., Zuo, X. B., Tang, Y. J., Ayinde, O., & Wang, J. L. (2017). Numerical simulation on time-dependent mechanical behavior of concrete under coupled axial loading and sulfate attack. *Ocean Engineering*, 142, 115-124. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.07.016>
- 54 Yin, G. J., Zuo, X. B., Sun, X. H., & Tang, Y. J. (2019). Macro-microscopically numerical analysis on expansion response of hardened cement paste under external sulfate attack. *Construction and Building Materials*, 207, 600-615.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.159>
- 55 Zhao, Y. X., Wang, C. K., Jin, W. L., & Xu, C. (2010). Experimental analysis on time-dependent law of surface chloride ion concentration of concrete. *Journal of Civil Architectural & Environmental Engineering*, 032(3), 8-13. <https://doi.org/10.1002/9781119204831.ch6>

- 56 Sarkar, S., Mahadevan, S., Meeussen, J. C. L., Van der Sloot, H., & Kosson, D. S. (2010). Numerical simulation of cementitious materials degradation under external sulfate attack. *Cement and Concrete Composites*, 32(3), 241-252.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.12.005>
- 57 M.G. Sohail, R. Kahraman, N.G. Ozerkan, N.A. Alnuaimi, B. Gencturk, M. Dawood, et al., Reinforced concrete degradation in the harsh climates of the Arabian Gulf: Field study on 30-to-50-year-old structures, *J. Perform. Constr. Facil.* 32 (1–12) (2018), 04018059, [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cf.1943-5509.0001204](https://doi.org/10.1061/(asce)cf.1943-5509.0001204).
- 58 M.N. Haque, H. Al-Khaiat, Carbonation of concrete structures in hot dry coastal regions, *Cem. Concr. Compos.* 19 (1997) 123–129, [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(96\)00047-9](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(96)00047-9).
- 59 M.G. Sohail, B. Wang, A. Jain, R. Kahraman, N.G. Ozerkan, B. Gencturk, et al., Advancements in concrete mix designs: High-performance and ultrahigh- performance concretes from 1970 to 2016, *J. Mater. Civ. Eng.* 30 (2018), 04017310, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002144](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002144).
- 60 K. Wille, A.E. Naaman, S. El-Tawil, G.J. Parra-Montesinos, Ultra-high performance concrete and fiber reinforced concrete: Achieving strength and ductility without heat curing, *Mater. Struct.* 45 (2012) 309–324, <https://doi.org/10.1617/s11527-011-9767-0>.
- 61 B. Graybeal, J. Tanesi, Durability of an ultrahigh-performance concrete, *J. Mater. Civ. Eng.* 19 (2007) 848–854, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2007\)19:10\(848\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:10(848)).
- 62 R. Yu, P. Spiesz, H.J.H. Brouwers, Development of ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC): Towards an efficient utilization of binders and fibres, *Constr. Build. Mater.* 79 (2015) 273–282, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.050>.
- 63 C. Andrade, C. Alonso, Corrosion rate monitoring in the laboratory and on-site, *Constr. Build. Mater.* 10 (1996) 315–328, [https://doi.org/10.1016/0950-0618\(95\)00044-5](https://doi.org/10.1016/0950-0618(95)00044-5).
- 64 R. Polder, C. Andrade, B. Elsener, Ø. Vennesland, J. Gulikers, R. Weidert, et al., Test methods for on site measurement of resistivity of concrete, *Mater. Struct.* 33 (2000) 603–611, <https://doi.org/10.1007/BF02480599>.

- 65 C.P. Vernet, Ultra-durable concretes: Structure at the micro- and nano scale, *MRS Bull.* 29 (2004) 324–327, <https://doi.org/10.1557/mrs2004.98>.
- 66 S. Abbas, M.L. Nehdi, M.A. Saleem, Ultra-high performance concrete: Mechanical performance, durability, sustainability and implementation challenges, *Int. J. Concr. Struct. Mater.* 10 (2016) 271–295, <https://doi.org/10.1007/s40069-016-0157-4>.
- 67 H. Yu, K.K. Chiang, L. Yang, Threshold chloride level and characteristics of reinforcement corrosion initiation in simulated concrete pore solutions, *Constr. Build. Mater.* 26 (2012) 723–729, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.079>.
- 68 Choinska, M., Khelidj, A., Chatzigeorgiou, G., and Pijaudier-Cabot, G. (2007). Effects and interactions of temperature and stress-level related damage on permeability of concrete. *Cement Concrete Res.* 37, 79–88. [doi: 10.1016/j.cemconres.2006.09.015](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.09.015)
- 69 Geng, J., Easterbrook, D., Li, L. Y., and Mo, L. (2015). The stability of bound chlorides in cement paste with sulfate attack. *Cement Concrete Res.* 68, 211–222. [doi: 10.1016/j.cemconres.2014.11.010](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.11.010)
- 70 Ghazy, A., and Bassuoni, M. T. (2017). Resistance of concrete to different exposures with chloride-based salts. *Cem. Concr. Res.* 101, 144–158. [doi: 10.1016/j.cemconres.2017.09.001](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.09.001)
- 71 Jin, Z., Sun, W., Zhao, T., and Li, Q. (2019). Chloride binding in concrete exposed to corrosive solutions. *J. Chin. Ceramic Soc.* 37, 1068–1072. [doi: 10.1109/CLEOE-EQEC.2009.5194697](https://doi.org/10.1109/CLEOE-EQEC.2009.5194697)
- 72 Montoya, R., and Nagel, V. (2020). Capillary water absorption and chloride transport into mortar samples: a finite element analysis. *Front. Mater.* 7:28. [doi: 10.3389/fmats.2020.00028](https://doi.org/10.3389/fmats.2020.00028)
- 73 Neville, A. (2004). The confused world of sulfate attack on concrete. *Cement Concrete Composit.* 34, 1275–1296. [doi: 10.1016/j.cemconres.2004.04.004](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.04.004)
- 74 Akita, H., Fujiwara, T., and Ozaka, Y. (1997). A practical procedure for the analysis of moisture transfer within concrete due to drying. *Magaz. Concrete Res.* 179, 129–137. [doi: 10.1680/mac.1997.49.179.129](https://doi.org/10.1680/mac.1997.49.179.129)

- 75 Bentz, D. P., Garboczi, E. J., Lu, Y., Martys, N., Sakulich, A. R., and Weiss, W. J. (2013). Modeling of the influence of transverse cracking on chloride penetration into concrete. *Cement Concrete Composit.* 38, 65–74. [doi: 10.1016/j.cemconcomp.2013.03.003](https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.03.003)
- 76 Castaldo, P., Palazzo, B., and Mariniello, A. (2017). Effects of the axial force eccentricity on the time-variant structural reliability of aging r . c . cross- sections subjected to chloride-induced corrosion. *Eng. Struct.* 130, 261–274. [doi: 10.1016/j.engstruct.2016.10.053](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.10.053)
- 77 Djerbi, A., Bonnet, S., Khelidj, A., and Baroghel-bouny, V. (2008). Influence of traversing crack on chloride diffusion into concrete. *Cement Concrete Res.* 38, 877–883. [doi: 10.1016/j.cemconres.2007.10.007](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.10.007)
- 78 Gu, C.-P., Ye, G., and Sun, W. (2015). A review of the chloride transport properties of cracked concrete: experiments and simulations *. *J. Zhejiang Univ. Sci. A* 16, 81–92. [doi: 10.1631/jzus.A1400247](https://doi.org/10.1631/jzus.A1400247)
- 79 Hájková, K., Šmilauer, V., Jendele, L., and Červenka, J. (2018). Prediction of reinforcement corrosion due to chloride ingress and its effects on serviceability. *Eng. Struct.* 174, 768–777. [doi:10.1016/j.engstruct.2018.08.006](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.08.006)
- 80 Jang, S. Y., Kim, B. S., and Oh, B. H. (2011). Effect of crack width on chloride diffusion coefficients of concrete by steady-state migration tests. *Cement Concrete Res.* 4, 9–19 [doi:0.1016/j.cemconres.2010.08.018](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.08.018)