



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
Republique Algérienne Democratique Et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة العربي التبسي - تبسة

Université Larbi tébessi – Tébessa –

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Civil

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de Master Académique**

En : Génie Civil

Spécialité : Structures

**Par : HAMZAOUI LAZHAR
MESKI KHALED**

Sujet

MODELISATION DE L'ATTAQUE DES CHLORURES DANS LE BETON EN PRESENCE D'INCERTITUDES EN UTILISANT LE CODE « FIB34 »

Présenté et soutenu publiquement, le 30 / 09 / 2020 , devant le jury composé de :

M. BOULAARES	Said	Maître assistant A	Président
M. HMIDAN	H'mida	Maître assistant A	Rapporteur
M. GOUJIL	faycel	Maître assistant A	Examineur

Promotion : 2019/2020

DEDICACE

Aucun mot ne peut exprimer des sentiments comme la gratitude, l'amour, le respect ou

l'appréciation. Nous dédions cette travail à ...

❖ *À nos chers parents*

❖ *Toute la famille*

❖ *Tous les amis.*

REMERCIEMENTS

Nous voudrions remercier Dieu pour la volonté, la santé et la patience que nous lui avons données durant des ans.

Tout d'abord, Notre sincères remerciements à monsieur HMIDANE H'mida, Docteur à l'Université de LARBI TEBESSI, qui a bien voulu proposer et diriger ce travail et surtout, pour son aide et sa contribution réelle qui ont permis de mener à terme ce mémoire.

Notre remerciements s'adressent aussi aux membres du jury de nous avoir honoré en acceptant de juger ce modeste travail.

Nous exprimons nous profonde gratitude à l'ensemble des enseignants qui ont contribué à notre formation.

Et ne manquez pas de remercier tous les collègues et tous ceux qui nous ont soutenus de près ou de loin.

Nous leur exprimons notre gratitude à tous.

MESKI Khaled et HAMZAOUI Lazhar

ABREVIATIONS

MCS : simulation Monte-Carlo

Pf : probabilité de défaillance

PDF : la fonction de distribution (densité) de probabilité

CDF : la fonctions de distribution cumulative

CEM I : ciment Portland Artificiel (CPA-CEM I)

CEM V : ciments de laitier et aux cendres (CLC – CEM V)

C-S-H : Silicates de calcium hydratés (sulfoaluminates)

C3A : l'aluminate tricalcique (Célite)

FEM : méthode des éléments finis

ANR : Agence Nationale de la Recherche

EC 2 : Eurocodes 2

ELS : États limites service

ELU : États limites ultimes

Fp : facteur de corrosion par piquûre

FIB 34 : Fédération internationale du béton structurel

BRE : Établissement de recherche du bâtiment

CEM III : Ciment de laitier de haut fourneau

E/C : rapport eau/ciment

SYMBOLES

C_{crit} : teneur critique (seuil) en chlorure [wt.-%/c]
C_t : la teneur totale en chlorure [wt.-%/c]
C (x ; t) : la concentration des ions chlorures à une profondeur x et à un instant t [wt.-%/c]
g(X, t) : Fonction d'état limite d'un vecteur de variables X aléatoires
C₀ : teneur initiale en chlorure du béton [wt.-% / c]
C_s : la concentration des chlorures sur la surface [wt.-% / c]
D_{Cl} : le coefficient de diffusion des ions chlorure dans le béton [m²/s]
x : profondeur avec une teneur correspondante en chlorures C (x, t) [mm]
t : temps [années]
C_{S Δx} : teneur en chlorure à une profondeur Δx et à un certain instant t [wt.-% / c]
Δx : profondeur de la zone de convection [mm]
D_{app, c} : coefficient apparent de diffusion du chlorure à travers le béton [mm² / an]
erf : fonction d'erreur
K_e : variable de transfert d'environnement
K_t : paramètre de transfert
b_e : variable de régression [K]
T_{ref} : température standard [K]
T_{real} : température de l'élément structurel ou de l'air ambiant [K]
A (t) : sous-fonction considérant le «vieillissement»
a : exposant de vieillissant
t₀ : Point de référence du temps [années]
D_{RCM, 0} : coefficient de migration des chlorures [mm² / a]
A : Coefficient environnemental [% binder]
a : Le coefficient de temps
s : déviation standard
m : valeur moyenne
G(X) : la fonction d'état limite (la fonction performance)
X : le vecteur aléatoire
Pf(ti) : La probabilité de défaillance
f_x(X) : la fonction de densité de probabilité
P_{fc} : la probabilité de défaillance cible
N : le nombre total de simulations effectuées
X_j : la valeur de la variable aléatoire
F_x () : la fonctions de distribution cumulative de **X**
HR : l'humidité relative (%)
T : température (K)
T_{ini} : temps d'initiation de la corrosion (années)
μ_X : valeur moyenne d'un variable X
σ_X : écart-type d'un variable X
C.V : le Coefficient de Variation

LISTE DES TABLEAUS

Tableau 1.1 : Teneurs critiques en ions chlorures et rapports Cl-/OH- relevés dans la littérature [31]

Tableau 1.2 : Risque de corrosion et la teneur en chlorures total [41]

Tableau 1.3 : Concentrations critiques en chlorures totaux pour un béton de CEM I [8]

Tableau 2.1 : Quantification de $D_{RCM,0}$ pour différents mélanges de béton [38]

Tableau 2.2 : Résultat de la quantification statistique de la variable a [45]

Tableau 2.3 : Quantification de Δx [mm] pour différents types de conditions d'exposition

Tableau 3.1 : Paramètres d'entrée du modèle

Tableau 3.2 : Paramètres étudiée pour la compréhension de leur effet sur la corrosion

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Phases de la corrosion

Figure 1.2 : Formes de la corrosion

Figure 1.3 : Mécanisme de la corrosion des aciers

Figure 1.4 : Formation des produits de corrosion du fer dans un béton sain ou « pollué »

Figure 1.5 : Processus électrochimique de corrosion par les chlorures

Figure 1.6 : Diagramme de Pourbaix potentiel – pH du fer [6]

Figure 1.7 : Les différents types d'expositions de l'environnement marin

Figure 1.8 : Les mécanismes de transport des ions chlorure dans la zone de marnage

Figure 1.9 : Coefficient de perméabilité des gaz en fonction du rapport E/C du béton

Figure 1.10 : Différentes propriétés d'un béton en fonction de sa teneur en laitier

Figure 1.11 : loi de distribution de la concentration critique en chlorures totaux pour un béton CEM I, en immersion, de E/C=0,5

Figure 1.12 : Effet de la corrosion sur le comportement mécanique de structures [32]

Figure 1.13 : diagramme schématique du processus corrosion-fissuration [34]

Figure 1.14 : Variation schématique de la résistance d'adhérence avec le pourcentage de corrosion [42]

Figure 1.15 : Variation de l'allongement à la rupture de barres d'aciers ($\varnothing = 6\text{mm}$) en fonction des charges pour différents degrés de corrosion

Figure 2.1 : Représentation de l'état limite [43]

Figure 2.2 : Échantillonnage Monte Carlo pour deux variables aléatoires [48]

Figure 2.3 : Organigramme pour l'évaluation probabiliste de l'initiation de la corrosion des armatures de béton

Figure 3.1 : Probabilité d'initiation de la corrosion en fonction du temps

Figure 3.2 : Fonction de distribution cumulative CDF pour différents lois de distribution (lognormale, Weibull et exponentielle)

Figure 3.3 : Fonction de densité de probabilité PDF pour différents lois de distribution

Figure 3.4 Variation de la température dans un an (Tébessa)

Figure 3.5 Probabilité d'initiation de la corrosion en fonction du temps (E/C)

Figure 3.6 Probabilité d'initiation de la corrosion en fonction du temps (différents type de liants)

Figure 3.7 Probabilité d'initiation de la corrosion en fonction du temps ($C_{S,0}$ et $C_{S,\Delta x}$)

Figure 3.8 Probabilité d'initiation de la corrosion en fonction du temps (Alger, Tromso, Lagos)

Figure 3.9 Effet des conditions climatiques sur la probabilité d'initiation de la corrosion (CDF approximée par une loi lognormale)

Figure 3.10 Probabilité d'initiation de la corrosion en fonction du temps (enrobage)

Figure 3.11 Effet de l'enrobage sur la probabilité d'initiation de la corrosion (CDF approximée par une loi lognormale)

Résumé :

La corrosion des armatures provoquée par la pénétration des chlorures est une des causes principales de la dégradation des structures en béton armé. L'expérience acquise au cours des dernières décennies a démontré que le béton armé en environnement agressive, se dégrade avec le temps. Il est donc nécessaire d'adopter une approche de conception appropriée qui fournit une base claire et cohérente pour l'évaluation des performances de la structure tout au long de sa durée de vie. Ce mémoire propose un modèle prédictif de la durée de vie des structures en béton armé affectée par la corrosion induite par les ions chlorures selon le code *fib-34* en tenant compte de la présence d'incertitudes inhérentes au paramètres du modèle. L'analyse probabiliste est entretenue en utilisant la méthode de simulation Monte Carlo. Une étude paramétrique a été menée visant à investiguer l'effet des propriétés du matériau, du mécanisme de transport et des conditions environnementales sur le temps d'initiation de la corrosion. Les résultats obtenus ont montré que le modèle est sensible à tous les facteurs influents.

Mots clés : *Béton armé, Corrosion, Chlorures, Approche probabilistes, Simulation Monte-Carlo, Modélisation.*

Abstract

The corrosion of reinforcement induced by the penetration of chlorides is one of the main causes of reinforced concrete structures degradation. The experience gained in recent years shows that reinforced concrete in an aggressive environment deteriorates over time. It is therefore necessary to have an appropriate design approach that provides a clear and consistent basis for evaluating the performance of structures throughout their service life. This dissertation proposes a prediction model of reinforced concrete structures service life affected by chloride induced corrosion according to the *fib-34* service life design code, taking into account the presence of uncertainties inherent to the model parameters. The probabilistic analysis is undertaken using the Monte Carlo simulation method. A parametric study was conducted to investigate the effect of material properties, transport mechanism and environmental conditions on corrosion initiation time. The results obtained showed that the model is sensitive to all influencing factors.

Key words: *Reinforced concrete, Corrosion, Chlorides, Probabilistic approach, Monte-Carlo simulation, Modeling.*

TABLE DES MATIERS

Dédicace	
Remerciement	
Résumé	
Listes des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale	1

Chapitre 01 : Etude bibliographique

1.1 Introduction.....	3
1.2 Aspect physico-chimique de la corrosion induite par les ions chlorures	3
1.2.1 Origine de la présence de Chlorures dans le béton	4
1.2.2 Phases de la corrosion	5
1.2.3 Formes de la corrosion.....	6
1.2.4 Réactions de corrosion des aciers dans le béton	7
1.2.5 Dépassivation des armatures.....	10
1.2.6 Facteurs influençant la corrosion des armatures	12
1.2.6.1 Humidité relative	12
1.2.6.2 Température.....	12
1.2.6.3 Enrobage.....	12
1.2.6.4 Teneur en chlorure	12
1.2.6.5 Oxygène.....	13
1.2.6.6 Agents agressifs autres que les chlorures	13
1.3 La pénétration des ions chlorures	13
1.3.1 Paramètres influençant la pénétration des ions chlorure.....	14
1.3.1.1 Influence de l'environnement	14
1.3.1.2 Influence du rapport eau/ciment	16
1.3.1.3 Influence du traitement thermique et de la cure	16
1.3.1.4 Influence du type de ciment	17
1.3.1.5 Influence des additions	18
1.3.2 Teneur critique en chlorures.....	18
1.4 Les effets de la corrosion sur le comportement mécanique du béton	21
1.4.1 Dégradation du béton.....	22
1.4.2 Détérioration de l'adhérence entre l'acier et le béton.....	23
1.4.3 Diminution de l'allongement à la rupture des sections d'aciers	24

Chapitre 02 : Méthode de modélisation probabiliste de la corrosion induite par les chlorures

2.1 Introduction.....	25
2.2 Approches probabiliste	25
2.2.1 États limites.....	26
2.2.2 Calcul de fiabilité.....	27
2.2.3 Méthode Monte Carlo.....	27
2.3 Prédiction de l'initiation de la corrosion	29
2.3.1 Fonction d'état limite	30
2.3.2 Modélisation de la pénétration des chlorures	31
2.3.3 Quantification probabiliste des paramètres aléatoires	33
2.3.3.1 Teneur critique en chlorure C_{crit}	33
2.3.3.2 coefficient de migration des chlorures	33
2.3.3.3 Teneur en chlorures à la surface de substitution $C_{s, \Delta x}$	34
2.3.3.4 Paramètre de transfert Kt et l'exposant vieillissant a	34
2.3.3.5 Variable de transfert environnemental K_e	35
2.3.3.6 Fonction de transfert Δx	36
2.3.3.7 Teneur initiale en chlorure du béton C_0	36
2.4 Méthode d'estimation du temps d'initiation de la corrosion	37

Chapitre 03 : Application numerique

3.1 Introduction.....	39
3.2 Model étudiée	39
3.3 Temps d'initiation de la corrosion	41
3.4 Étude Paramétrique	43
3.4.1 Effet du Rapport E/C.....	44
3.4.2 Effet du type de liant utilisé.....	45
3.4.3 Effet de la convection des chlorures	46
3.4.4 Effet de la températures Extérieure	47
3.4.5 Effet de l'enrobage	49
Conclusion Générale.....	51
Références bibliographiques.....	52

Introduction
Générale

Introduction générale

Le béton est le matériau de construction le plus utilisé et le plus important au monde dès lors qu'il entre dans la réalisation de diverses structures, en termes de volume et de chiffre d'affaires. Lorsque ce matériau est associé à l'acier pour la construction de structures notamment celles qui se trouvent en zone maritime, (immergées, en zone de marnage, soumises aux éclaboussures, et au brouillard salin) ou celles qui sont soumises au sel de déverglaçage, leur vulnérabilité peut être affectée à cause de présence d'agents agressifs. Ces agents, principalement les ions chlorures sont capables de pénétrer à l'intérieur du béton sous des mécanismes tels que la diffusion, la convection à travers le réseau poreux du matériau. Lorsque la concentration en ions chlorures devient critique, la corrosion des aciers se déclenche, réduisant ainsi la durée de vie des structures. [40]

L'attaque des ions chlorures initiant la corrosion des barres d'armature constitue un problème majeur pour les ouvrages du génie civil. Des efforts de recherche considérable a été consenti afin d'évaluer les effets de la corrosion résultant de l'attaque des ions chlorure. Les conclusions des études réalisées mettent en évidence le fait que la corrosion provoque une dégradation des propriétés mécaniques dans la mesure où les sections, contraintes élastiques et déformations ultimes des barres d'armature sont réduites.

La corrosion apparait après la dépassivation de l'acier, c'est à dire à la fin de la période d'initiation et au début de la période de propagation. l'attaque des chlorures se traduit par une corrosion plus localisée et profonde par piqûres. C'est dans la phase de propagation que les performances mécaniques des structures en béton armé attaquées par la corrosion se dégradent. La section d'acier de renfort sain diminue proportionnellement au taux de corrosion, la production de rouille engendre une expansion interne et donc des contraintes dans le béton. L'insertion de rouille entre les armatures d'acier et le béton, et ces contraintes supplémentaires dans le béton confinant les armatures induisent une diminution de l'adhérence acier-béton.

La prédiction de la durée de vie des constructions vis-à-vis de la corrosion des aciers induite par la pénétration des chlorures, nécessite la compréhension et la prise en compte des principaux mécanismes de transfert. Les mécanismes de prédiction permettent de quantifier la longévité des futures réalisations et d'aider à la formulation des bétons en exigeant des performances sur ses caractéristiques physico-chimiques.

L'objectif principal de cette étude de recherche sera d'avoir une meilleure prédiction de la durée de vie des structures en béton armé, Pour cela, on va utiliser une approche probabiliste « **SIMULATION MONTE-CARLO** » pour modéliser la performance des structures en béton armé sous l'attaque des ions chlorures selon le code « **FIB34** ».

Afin d'atteindre nos objectifs, notre étude de recherche a été structurée sur base de quatre chapitres:

Le premier chapitre fait l'objet d'une revue bibliographique des connaissances nécessaires à la mise en place de la méthodologie. A cet effet, l'aspect physico-chimiques de la pénétration des ions chlorures et le mécanisme de transfert des chlorures, les effets de la corrosion sur le comportement mécanique du béton sont rappelés.

La deuxième chapitre concerne la méthode de conception probabiliste pour la corrosion induite par les chlorures.

Le troisième chapitre examine l'analyse et la discussion des résultats obtenus à partir d'une application numérique.

Le quatrième chapitre est une conclusion générale qui tire des conclusions sur les développements et les analyses réalisés dans le cadre de la mémoire.

Chapitre 01

Étude bibliographique

1.1 Introduction

L'étude de la durabilité des ouvrages en béton implique en général l'étude de la corrosion des armatures. En effet, la corrosion des armatures est le principal phénomène de dégradation des structures en béton armé. C'est un phénomène complexe qui dépend de nombreux facteurs comme le matériau béton, l'environnement et également l'état de l'armature.

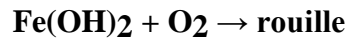
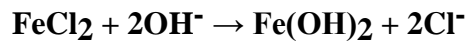
L'effet de la corrosion sur les matériaux est un phénomène connu depuis des milliers d'années. Cependant la science et l'étude de la corrosion ne s'est développé que récemment. La définition donnée par les dictionnaires traditionnels fait référence à la fois à l'action de corroder mais aussi au résultat de cette action. La norme ISO 8044 (1999) « Corrosion des métaux et alliages – Termes principaux et définitions » définit la corrosion comme étant une « interaction physico-chimique entre un métal et son milieu environnant entraînant des modifications dans les propriétés du métal et souvent une dégradation fonctionnelle du métal lui-même, de son environnement ou de son système technique constitué par les deux facteurs. » Précisons que cette interaction est généralement de nature électrochimique.

Ce chapitre présente les données bibliographiques nécessaires pour la mise en contexte de cette étude. Il traite principalement, la corrosion des armatures induites par les ions chlorures dans le béton, en particulier l'aspect physico-chimique de la corrosion, le mécanisme et les paramètres qui influencent la pénétration des ions chlorures, la concentration critique pour la dépassement des armatures, et on finissant le chapitre par Les effets de la corrosion sur le comportement mécanique du béton.

1.2 Aspect physico-chimique de la corrosion induite par les ions chlorures

Des ions chlorures véhiculés par l'eau peuvent être présents dans le béton : ils peuvent être présents dans les composants du béton (granulats marins, ...), être incorporés au moment du malaxage (adjuvants accélérateurs de prise chlorés, ...) ou encore pénétrer dans l'ouvrage au fil du temps par diffusion à partir du milieu extérieur (eau de mer, sels de déverglaçage, ...).

A partir d'une teneur critique en chlorures, une armature peut se corroder localement pour autant qu'elle soit mise en présence d'eau et d'oxygène : des cratères de faible dimension affectent l'acier et s'agrandissent progressivement. En effet, les ions Cl^- réagissent avec les ions Fe^{++} pour former du chlorure de fer. Celui-ci consomme les ions hydroxyle, migre et s'oxyde plus loin en déposant de la rouille. De là, les tâches de rouille en surface du béton, typiques d'une corrosion par les chlorures. Les réactions se déroulent comme suit :



On constate donc que les ions chlorures Cl^- , sont recyclés, ce qui explique que la rouille ne contient pas de chlorures, même si des chlorures ferreux sont formés lors des étapes intermédiaires de la réaction. Ainsi, cette corrosion est susceptible de continuer au même endroit. La corrosion initiée par les chlorures est donc une corrosion localisée par piqûres de l'acier. Elle est extrêmement dangereuse car elle entraîne une réduction locale de la section d'armature. Lorsque celle-ci devient trop petite, elle se rompra brusquement, ce qui peut avoir des conséquences désastreuses.

En ce qui concerne la teneur critique en chlorures, on a constaté qu'il n'existe pas de valeur limite unique. La corrosion des armatures s'amorce dès que la teneur en ions chlorures au niveau des armatures atteint un certain seuil de dépassement. Ce seuil peut varier en fonction de nombreux facteurs (cation associé aux chlorures, teneur en oxygène, humidité relative, température, degré d'hydratation du ciment, teneur en C_3A , porosité, ajouts, composition de l'acier, ...). Toutefois, un rapport $[\text{Cl}^-]_{\text{libre}}/[\text{OH}^-]$ égal à 0,6 est souvent admis. Cette seule teneur en chlorures limite est insuffisante pour déterminer si la corrosion aura lieu. Comme elle dépend du pH, il y a un rapport indirect avec la carbonatation. La corrosion peut se produire dans un béton carbonaté à des teneurs en chlorures plus faibles que pour un béton non carbonaté.

Un rapport $[\text{Cl}^-]_{\text{libre}} / [\text{OH}^-]$ compris entre 0,6 et 1 conduit généralement à une concentration «critique» en ions chlorure totaux de l'ordre de 0,4 % de la masse de ciment pour un béton non carbonaté et donc à des concentrations «critiques» comprises entre 0,04 et 0,1 % par rapport à la masse de béton suivant la formulation.[1]

1.2.1 Origine de la présence de Chlorures dans le béton

Les chlorures peuvent être présents dans les composants du béton dès sa préparation (notamment dans le sable et l'eau). La norme NBN B 15-001 (2004) [3], supplément belge à la norme européenne NBN EN 206-1 (2001) [4], limite le pourcentage d'ions chlorure (en % de la masse du ciment) à 0,4 % dans le béton à armatures ou pièces métalliques noyées, à 0,2%

dans le béton précontraint et à 1 % dans le béton non armé. Cette norme interdit l'utilisation d'adjuvants à base de chlorures en présence d'armatures ou de pièces métalliques dans le béton.

Les chlorures peuvent également s'introduire dans le béton sous forme ionique en phase liquide, contrairement à la carbonatation par le CO_2 , qui pénètre en phase gazeuse. Ce phénomène s'observe surtout sur les constructions à la côte (l'air marin est humide) ou sur le béton exposé à des agents de déverglaçage (p. ex. ponts et chaussées, parkings). Les chlorures peuvent pénétrer par absorption capillaire (sur une surface sèche) ou par diffusion (si le béton est saturé). La pénétration par absorption capillaire est bien plus rapide que la diffusion.

Dans un béton de qualité ordinaire, l'absorption capillaire n'agit que sur les 15 à 20 premiers millimètres de la surface [5]. Un béton de moindre qualité peut quant à lui absorber les liquides sur les 30 premiers millimètres. Lorsque le béton sèche après l'absorption capillaire d'une solution de chlorure, l'eau s'évacue sous forme de vapeur en y abandonnant les chlorures. Chaque cycle d'humidification/ séchage entraîne donc une augmentation de la teneur en chlorures, si bien que la concentration critique peut rapidement être atteinte dans la zone concernée.

Par diffusion, les chlorures pénètrent plus profondément dans le béton. La vitesse de la pénétration est alors proportionnelle à la racine carrée de la durée. [2]

1.2.2 Phases de la corrosion

La durée de vie d'un ouvrage en béton armé vis-à-vis de la corrosion des aciers est souvent décrite à travers les étapes suivantes (Figure 1.1) :

- **phase d'initiation (ou d'incubation)** : c'est le stade durant lequel les agents agressifs, tels que le dioxyde de carbone (CO_2) ou les chlorures (Cl^-), présents dans le milieu environnant, pénètrent dans le béton ;
- **phase de propagation** : cette phase commence lorsque ces agents agressifs se trouvent à des concentrations fortes au niveau des armatures. Cette phase correspond à la croissance de la rouille, qui peut ensuite faire éclater le béton d'enrobage.

Ainsi, pour décrire la corrosion des aciers dans les bétons, il convient de préciser, d'une part, la pénétration des agents agressifs dans le béton et, d'autre part, les conditions de dépassivation de ces armatures, puis la vitesse de dissolution du métal et la croissance de la rouille. L'observation de la dégradation d'un ouvrage en béton armé intervient souvent au cours de la phase de propagation, lorsque les destructions deviennent visibles, c'est-à-dire bien souvent

tardivement. Il devient alors très lourd de réparer l'ouvrage et il convient donc de prévoir les effets à long terme de ces agressions. Cette prévision est fondée sur la définition des investigations à effectuer. Elle doit permettre en particulier d'ajuster une formulation adéquate du béton et de définir les paramètres d'exécution de l'ouvrage en fonction de son environnement. [13]

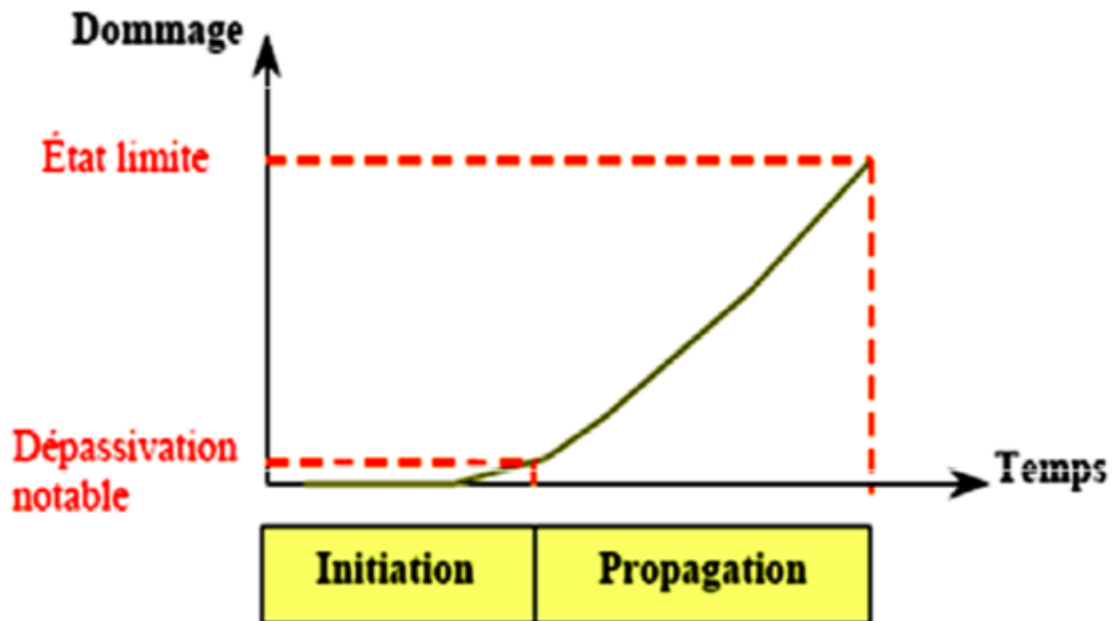


Figure 1.1 Phases de la corrosion.

1.2.3 Formes de la corrosion

La dissolution (anodique) d'un métal se produit en des zones très variables et la localisation de celles-ci détermine l'aspect de la corrosion. Il en résulte que l'aspect d'un métal corrodé est de différents types (**Figure 1.2**) :

- corrosion généralisée : la corrosion a un aspect à peu près uniforme (**Figure 1.2.a**) ; ce type a lieu si la zone de réaction cathodique est loin de celle de dissolution, ou si les zones cathodiques et anodiques sont très petites et à peu près régulièrement alternées ;
- corrosion localisée : ce type de corrosion a lieu si les zones anodiques sont petites et se trouvent à des endroits fixes ; il apparaît alors de petites cuvettes ou piqûres de corrosion (**Figure 1.2.b**). Dans le cas où le matériau métallique a des constituants très différents, il peut apparaître une dissolution sélective (**Figure 1.2.c**), mais ceci ne concerne pas les aciers placés dans le béton ;

- corrosion sous contrainte : celle-ci est induite par l'action simultanée de la corrosion et d'une sollicitation mécanique (**Figure 1.2.d**). Si cette sollicitation est maintenue dans le temps, il s'agit de corrosion sous contrainte. Dans ce cas, une fissure peut se former, se développer au cours du temps et éventuellement provoquer la rupture du métal tendu. Si la sollicitation oscille, alors il s'agit de corrosion par fatigue. Dans ce cas aussi, des fissures peuvent apparaître et se développer jusqu'à provoquer la rupture de l'élément sollicité mécaniquement. [13]

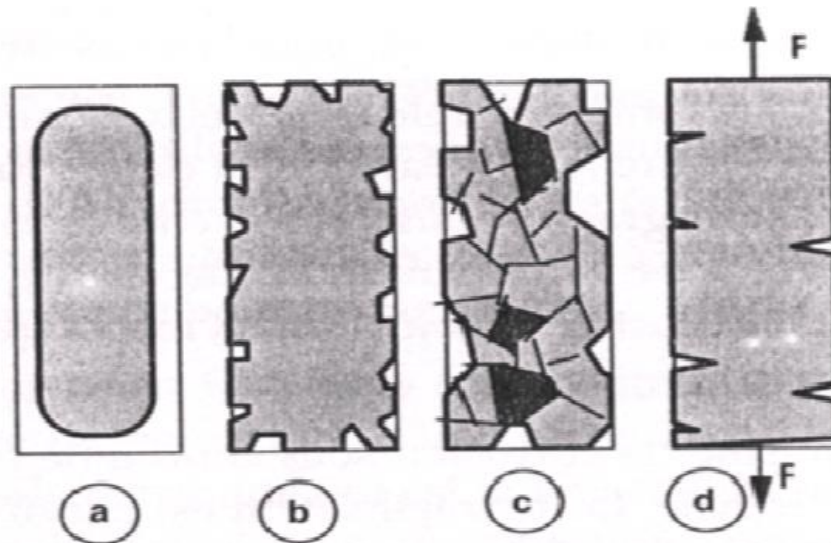


Figure 1.2 Formes de la corrosion.

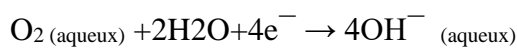
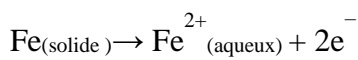
1.2.4 Réactions de corrosion des aciers dans le béton

L'exposition des armatures à l'air permet la formation d'une couche naturelle de rouille. Vue la porosité élevée de cette rouille, l'eau de gâchage du béton frais pénètre par capillarité à travers ses pores et des cristaux de ferrite de calcium hydraté peuvent se former ($4CaO \cdot FeO_3 \cdot 13H_2O$).

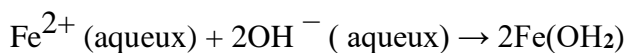
L'hydratation du ciment produit également l'hydroxyde de calcium ($Ca(OH)_2$) qui assure un pH élevé à la solution interstitielle. D'une façon générale, les constituants à base d'alcalins du ciment, notamment de calcium et, dans une échelle moins importante de potassium et de sodium, contribuent à la réserve alcaline du béton [18]. Dans la zone de contact du béton et de la couche de rouille formée pendant le stockage, l'hydratation du béton est perturbée. Ainsi, entre le béton sain et l'acier, des couches superposées peuvent être identifiées. La première est une couche non influencée par les aciers ; la deuxième, qui est une zone intermédiaire entre le béton sain et la couche la plus proche du métal, assure une transition entre les propriétés

mécaniques et la microstructure. Enfin, la troisième, fortement adhérente à l'acier et étanche, est responsable de la protection de l'acier ou, en d'autres termes, de sa passivation.

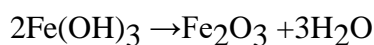
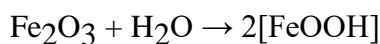
Tant que le microfilm protecteur dû au ciment sain existe, l'acier dans le béton reste intact. Les ions chlorures en contact avec le béton pénètrent dans l'ouvrage par l'intermédiaire de l'enrobage. La nature du produit formé à la surface de l'acier est modifiée par les chlorures. Il apparaît une réaction de dissolution (appelée anodique ou d'oxydation) dans laquelle les ions ferreux dissous sont formés (anode). Les électrons libres réagissent à la surface de la barre d'acier dans la zone dite cathodique. Ces électrons réduisent l'oxygène gazeux dissous dans l'eau, de façon à générer les ions hydroxydes. Les deux réactions élémentaires d'oxydation et de réduction sont simultanées :



Dans les cas les plus courants, les ions ferreux dissous se combinent avec les ions hydroxydes de façon à former les hydroxydes :



Cet hydroxyde ($\text{Fe}(\text{OH})_2$) peut continuer à s'oxyder et former de la rouille anhydre (Fe_2O_3) ou de la rouille hydratée ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) et du FeOOH , sachant que [14] :



En l'absence de chlorure, les produits formés à la surface de l'acier protègent celui-ci : c'est la passivation. Une représentation schématique du mécanisme de corrosion induite par les chlorures est présentée sur la **Figure 1.3**.

Si des ions chlorures arrivent au contact de l'acier et que leur teneur atteint un seuil critique, la couche n'est plus protectrice et la corrosion peut commencer. En conséquence, les ions chlorures pénétrés dans le béton contribuent à l'activation de la surface des armatures de façon

à former l'anode, la surface encore passivée fonctionnant comme cathode. Si on ne tient pas compte de la rouille verte, les réactions dans l'anode se déroulent comme suit :

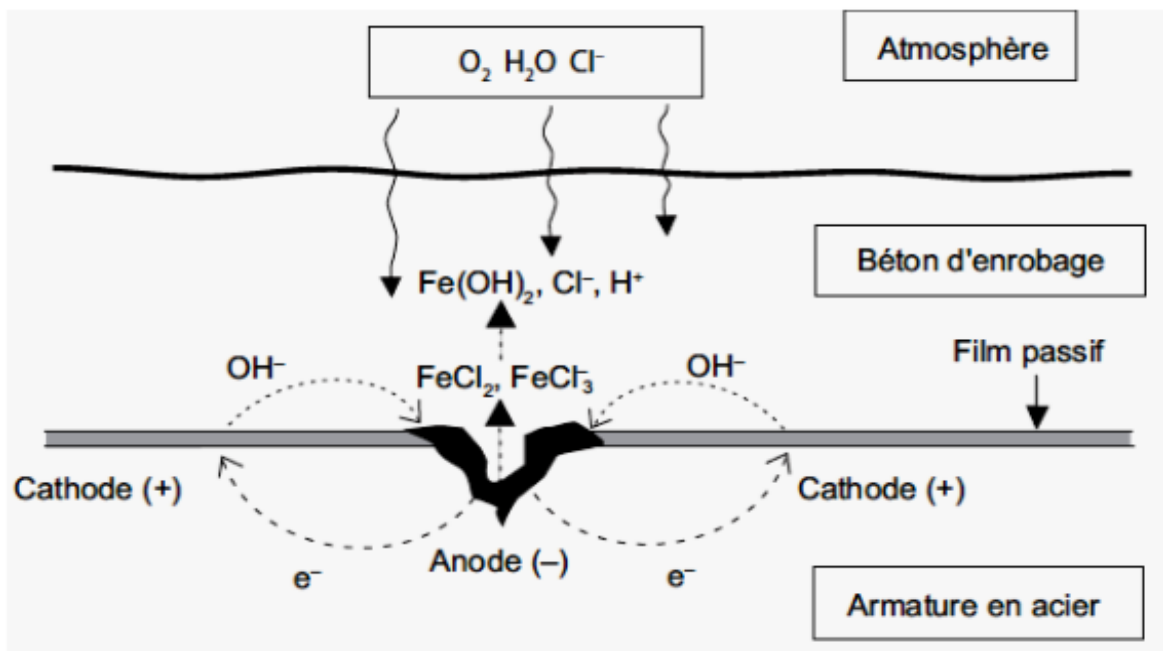
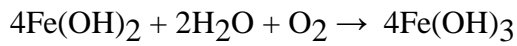
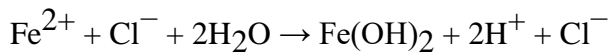


Figure 1.3 Mécanisme de la corrosion des aciers.

Les états du béton correspondants à la formation de chacun des produits de corrosion sont représentés sur la Figure 1.4.

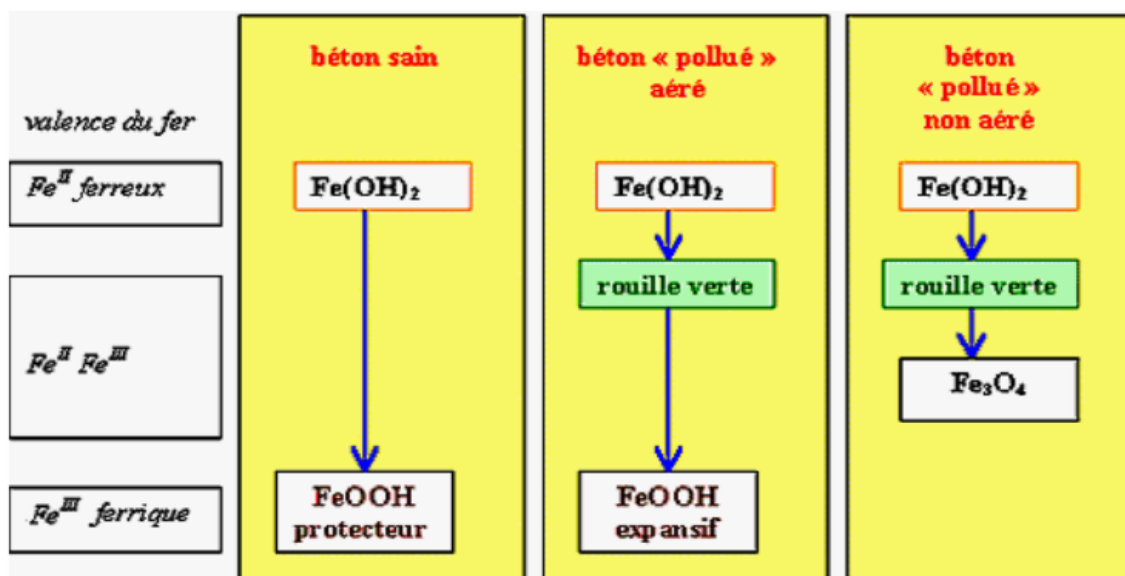


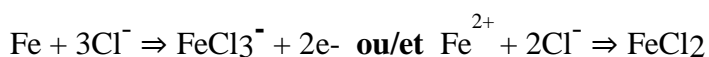
Figure 1.4 Formation des produits de corrosion du fer dans un béton sain ou « pollué ».

On note aussi que, dans les réactions liées à la corrosion, les ions chlorures ne sont pas présents dans la rouille, même si on les trouve dans les étapes intermédiaires de la réaction. On remarque encore que la porosité de la pâte de ciment est un facteur de grande influence dans la corrosion, puisque le pont entre l'anode et la cathode se fait à partir de la solution interstitielle d'une part et de l'armature, d'autre part. Les principaux paramètres qui ont une influence sur la résistivité électrique du béton sont l'humidité, le système poreux de la pâte de béton durci et la composition ionique de la solution interstitielle. [13]

1.2.5 Dépassivation des armatures

Les ions chlorures constituent un facteur important de risque pour le béton armé : ils pénètrent, en effet, dans le béton et peuvent provoquer la corrosion des armatures. Ces chlorures, d'origine externe, sont présents dans les ouvrages en environnement marin ou lorsque des sels de déverglaçage sont utilisés. Les conditions d'exposition de la structure sont des éléments prépondérants dans le mécanisme de dégradation.

Dans des conditions normales, les armatures enrobées de béton sont protégées de la corrosion par un phénomène de passivation qui résulte de la création, à la surface du métal, d'une pellicule de ferrite Fe_2O_3 . En effet, grâce aux réactions d'hydratation du ciment, le pH de la solution interstitielle du béton sain est de l'ordre de 13 à 13,5, ce qui maintient l'acier dans un état de passivation. La passivation des armatures s'illustre par le diagramme de Pourbaix (figure.1.6) pour le système Fe-H₂O. Trois domaines thermodynamiques sont présents en fonction du potentiel électrochimique de l'acier et du pH environnant : immunité, corrosion (formation des ions Fe^{2+}) et passivation (correspondant à un film passif de Fe_3O_4 ou Fe_2O_3). En présence de trop d'ions chlorures dans le béton, la corrosion des aciers est observée (Figure 1.5) [7]. Ils modifient la morphologie de la couche passive en donnant des ions $FeCl_3^-$ ou $FeCl_2$:



qui consomment les ions OH^- présents :



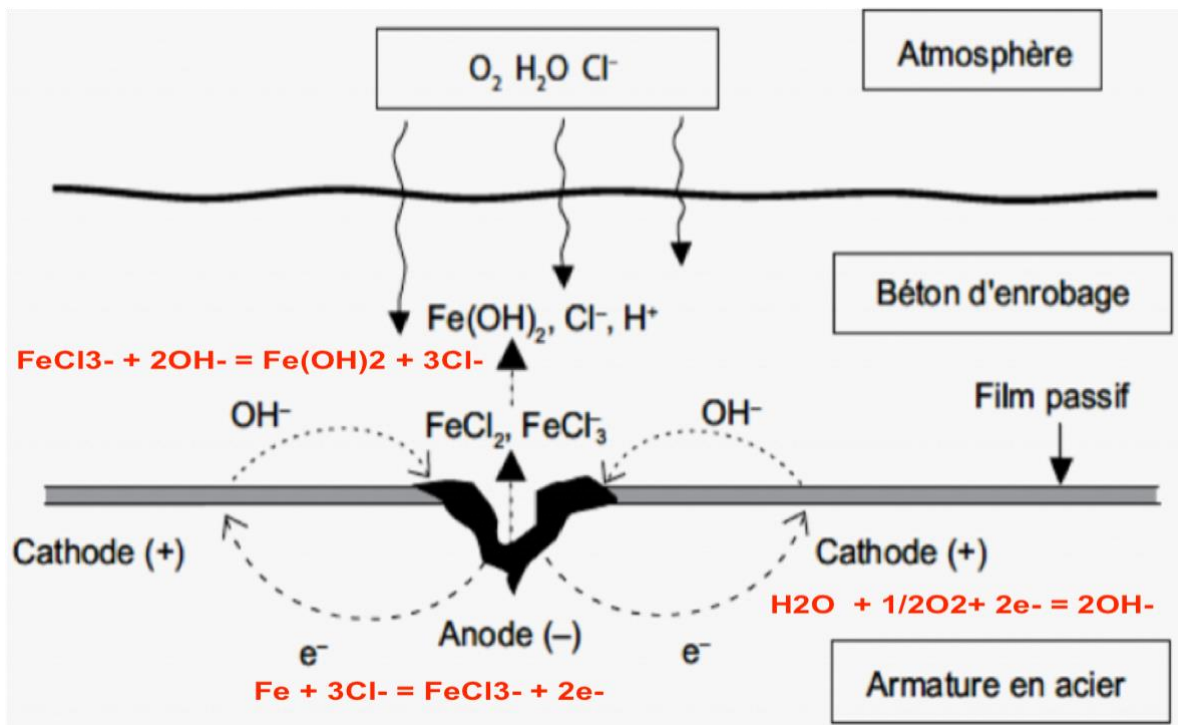


Figure 1.5 Processus électrochimique de corrosion par les chlorures.

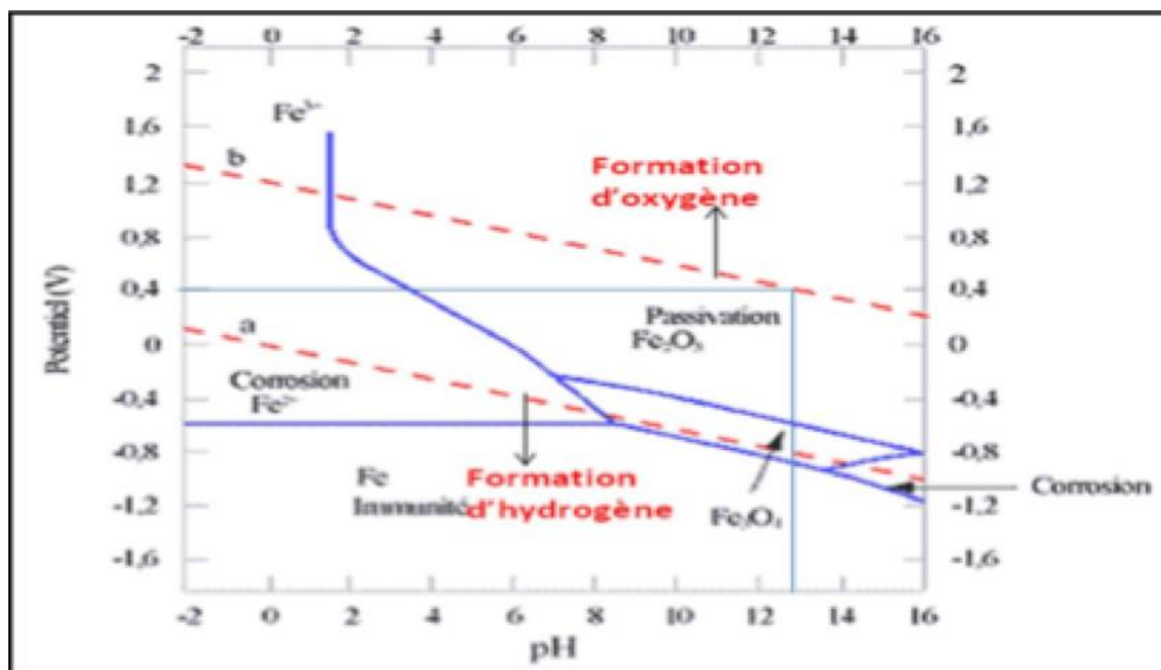


Figure 1.6 Diagramme de Pourbaix potentiel – pH du fer. [6]

Les produits de corrosion occupent un volume plusieurs fois supérieur au volume initial de l'acier. Leur formation, lorsqu'elle a atteint un volume suffisant, peut alors entraîner une fissuration du béton (généralement, un faciès caractéristique est observé, parallèlement à la direction du lit d'armatures) puis son éclatement ou son feuilletage. En termes de caractéristiques mécaniques, la corrosion crée une diminution de la section d'acier mais surtout une perte d'adhérence acier béton. [6]

1.2.6 Facteurs influençant la corrosion des armatures

La corrosion dépend de plusieurs facteurs dont certains sont liés au milieu environnant et d'autres aux caractéristiques du béton. Une description des différents facteurs contribuant à la corrosion est présentée par [14]. On présente ci-dessous les facteurs prépondérants. [13]

1.2.6.1 Humidité relative

Les réactions de corrosion (dissolution métallique ou passivation) ne se produisent qu'en présence d'une solution qui est ici contenue dans les pores du béton durci. Cette solution peut s'évaporer puis rentrer dans le béton dans les zones proches de la surface. Par contre, à cœur (à une profondeur supérieure à 35 mm en général), le béton reste saturé d'eau. Par ailleurs, la composition de cette solution dépend fortement des agents qui ont pu entrer dans le béton et l'altérer. La pénétration des gaz est plus rapide si le béton n'est pas saturé de liquide. Ainsi l'humidité du béton influe de deux façons sur la corrosion ou la passivation des armatures. Lorsque l'humidité du béton est faible, la pénétration de certains gaz est facilitée ; par contre, la corrosion ne se produit qu'en présence de liquide. [13]

1.2.6.2 Température

Les réactions chimiques sont accélérées avec l'augmentation de la température. Par ailleurs, une élévation de température augmente la solubilité des gaz (oxygène, etc.) et des sels dans l'eau. [13]

1.2.6.3 Enrobage

L'enrobage de béton autour des armatures a pour rôle principal d'assurer une transmission des forces par adhérence entre le béton et l'acier. En outre l'enrobage de béton protège les aciers de deux façons : par une protection physique, le béton constituant une barrière vis-à-vis des agents agressifs et par une protection chimique, grâce au pH élevé de la solution interstitielle du béton, lequel maintient stable la couche protectrice formée sur les aciers. [13]

1.2.6.4 Teneur en chlorure

Les chlorures présents dans le béton peuvent soit être introduits lors du gâchage, soit provenir du milieu environnant. Lorsque la teneur en chlorure atteint ou dépasse une valeur critique ou

valeur seuil [Glass et al., 1997 [15] ; Brime, 2001 [16] ; Petterson, 1993 [17]], on dit qu'il y a dépassivation de la couche protectrice de l'acier, l'enrobage ne peut plus protéger les armatures et la corrosion s'amorce si les quantités d'eau et d'oxygène sont suffisantes. [13]

1.2.6.5 Oxygène

L'oxygène dissous dans un liquide ou dans une phase aqueuse joue un rôle primordial dans la réaction, dite cathodique, de corrosion des aciers ($O_2 + 2H_2O + e^- \rightarrow 4OH^-$). Ainsi, plus la teneur en oxygène est élevée, plus grande est la vitesse de réaction de dissolution du métal. Parallèlement, plus la teneur en oxygène est élevée, plus le potentiel mixte du métal se rapproche de la valeur correspondant à la réduction de l'oxygène. En d'autres termes, ce potentiel mixte se déplace vers les valeurs positives. [13]

1.2.6.6 Agents agressifs autres que les chlorures

L'eau qui entoure le béton ou qui pénètre par intermittence dans celui-ci (pluie, etc.) peut contenir divers sels. Ceux-ci contribuent à la formation des produits de corrosion de l'acier enrobé. C'est ainsi, par exemple, que les sulfates réagissent comme les chlorures, au niveau qualitatif. Une rouille verte peut se former en l'absence d'oxygène. Celle-ci peut ensuite se transformer en produits classiques en relâchant des sulfates solubles. Mais, au niveau quantitatif, l'effet des sulfates reste négligeable. En pratique, sauf en cas de pollution d'origine industrielle, seuls les chlorures et le dioxyde de carbone sont les facteurs de dépassivation des aciers dans le béton. [13]

1.3 La pénétration des ions chlorures

Les chlorures présents dans le béton peuvent provenir de deux sources différentes. Soit ils sont présents au moment du gâchage : utilisation d'eau contenant des chlorures ou agrégats contaminés ou parfois de certains adjuvants. Soit ils proviennent le plus souvent de l'environnement extérieur : atmosphère marine ou sels de déverglaçage, qui diffusent dans le béton.

Les chlorures existent sous deux formes dans le béton : les chlorures libres qui sont dissous dans la solution interstitielle et les chlorures piégés ou liés qui sont combinés à des hydrates de ciment ou adsorbés sur les parois des pores. Cependant les chlorures qui ne sont pas fixés aux

hydrates c'est-à-dire les chlorures libres peuvent migrer à travers la structure poreuse du béton, sous l'effet des variations d'humidité consécutives aux alternances de cycle de séchage/mouillage ou sous l'effet de gradients de concentration entre la structure interne du matériau et l'eau de mer, par exemple.

Le transport des ions chlorures libres s'effectue par deux mécanismes distincts :

- par la convection : les ions chlorures sont entraînés par les mouvements de l'eau ;
- par la diffusion : les ions chlorures se dissolvent dans l'eau pour égaliser le gradient de concentration.

En conséquence, ce sont les ions libres qui sont les plus nocifs en ce qui concerne la corrosion des armatures.

Ainsi la cinétique de pénétration ou plutôt de migration de ces ions est relié à la perméabilité du béton. Elle décroît avec le rapport E/C et en fonction de la concentration en sels de la solution interstitielle. [19]

1.3.1 Paramètres influençant la pénétration des ions chlorure

1.3.1.1 Influence de l'environnement

Les ions chlorure peuvent pénétrer de différentes façons dans la matrice cimentaire selon le type d'exposition de la structure en béton. En particulier pour les environnements marins, on distingue quatre zones différentes (figure 1.7). La manière dont les ions chlorure pénètrent dans le béton a une grande influence sur le temps de dépassivation pour deux bétons identiques mais différemment exposés.

Dans la zone submergée, les chlorures pénètrent par diffusion sous gradient de concentration dans la matrice cimentaire car le béton est saturé en eau. Dans les zones soumises à des cycles humidification/séchage (marnage, éclaboussures et atmosphérique), les ions chlorure pénètrent dans le béton partiellement saturé par absorption capillaire (10 - 20 mm) puis par convection (via la phase liquide) et diffusion. [21]

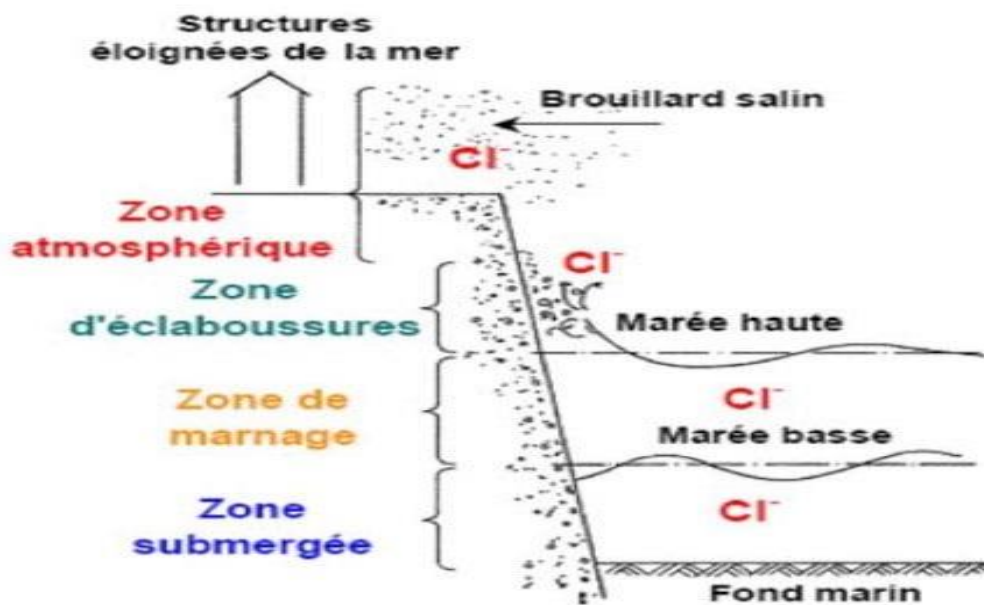
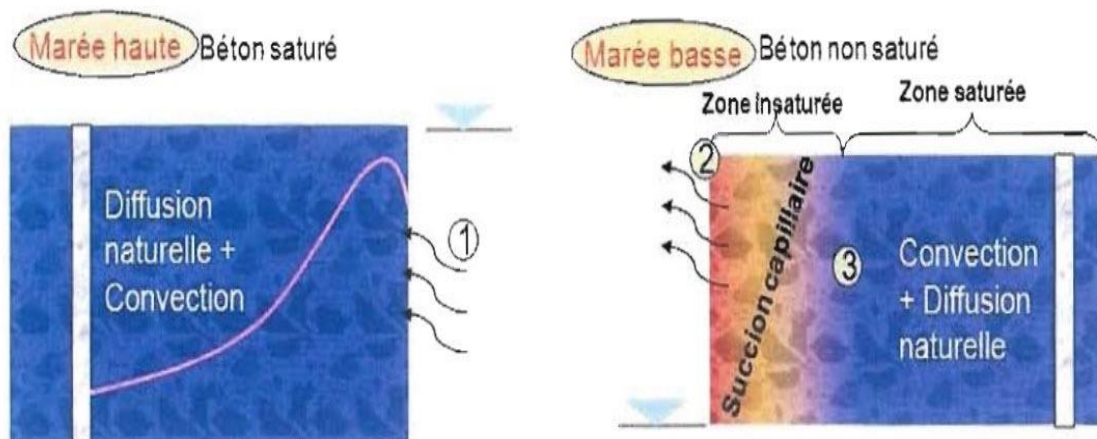


Figure 1.7 Les différents types d'expositions de l'environnement marin.

Dans la partie saturée du béton, les ions se déplacent par diffusion. Lors du séchage du béton (marée basse), l'eau s'évapore du béton et les ions chlorure s'accumulent alors dans le béton (Figure 1.8).



- ① Transport de l'eau et des ions dû à la pression hydraulique et à l'adsorption capillaire
- ② Evaporation de l'eau ③ Cristallisation des chlorures

Figure 1.8 Les mécanismes de transport des ions chlorure dans la zone de marnage.

Les cycles humidification/séchage favorisent la pénétration des ions chlorure dans le béton ainsi que celle d'autres gaz comme l'oxygène. [20,21]

1.3.1.2 Influence du rapport eau/ciment

La migration des ions chlorure dans le béton est étroitement liée aux propriétés de transfert du béton et donc à sa formulation. Le rapport E/C du béton influence fortement sa porosité et donc ses propriétés de transfert. Plus le rapport E/C est faible, plus la pénétration des espèces agressives est ralentie [22]. ont montré que la perméabilité de la pâte cimentaire ne suit pas une évolution linéaire en fonction du rapport E/C mais plutôt de type exponentielle (Figure 1.9).

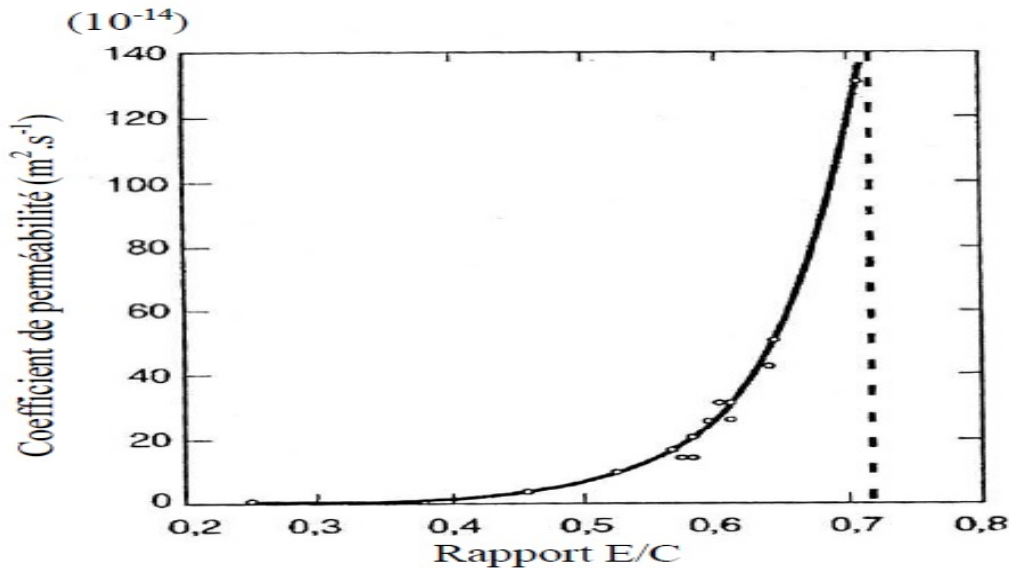


Figure 1.9 Coefficient de perméabilité des gaz en fonction du rapport E/C du béton.

La concentration C_{crit} nécessaire à l'amorçage de la corrosion est plus importante si le rapport E/C du béton est plus faible. [20]

1.3.1.3 Influence du traitement thermique et de la cure

Le traitement thermique modifie la microstructure du béton et donc modifie sa capacité à répondre aux agressions chimiques [23]. Une hydratation du ciment à 20 °C conduit à la formation de C-S-H de faible densité tandis qu'une hydratation à 60 °C favorise la formation de C-S-H ayant une structure de forte densité (couche d'hydrates formés autour des grains de ciment plus dense) ce qui peut réduire la capacité de fixation des chlorures. De plus le traitement thermique conduit à une augmentation de la porosité entre les grains de ciment. Les pores des bétons ayant subi un traitement thermique seront en moyenne plus gros. En règle générale, plus la cure est longue et dans un environnement humide plus le ciment sera hydraté et meilleure sera la résistance du béton aux attaques extérieures, en particulier pour les liants autres que le CEM I. [20]

1.3.1.4 Influence du type de ciment

La teneur en aluminates du ciment influence fortement la capacité de fixation des ions chlorure. À teneur en chlorures totaux dans le béton équivalente, les chlorures libres seront moins nombreux dans un béton à base de ciment riche en C3A, ces derniers ayant la capacité de fixer les chlorures. [23]

Un ciment de type CEM V résistant aux sulfates ne favorise pas la protection du béton vis-à-vis de la pénétration des ions chlorure car la quantité de C3A formé avec ce type de ciment sera très inférieure à celle formée avec un CEM I. [24]

D'après Yigiter et al [25]. pour un même rapport E/C et un même dosage en ciment, le béton contenant du laitier de haut fourneau sera bien plus résistant à la pénétration des ions chlorure. Non seulement le front de pénétration des ions chlorure est moins important pour un béton à base de laitier de haut fourneau mais la quantité de chlorures qui pénètre est aussi moins importante. Dhir et al [26]. ont montré que la capacité de fixation des ions chlorure d'un béton à base de laitier de haut fourneau peut être jusqu'à cinq fois supérieure à celle d'un béton à base de ciment portland et que son coefficient de diffusion des ions chlorure est lui largement inférieur (Figure 1.10).

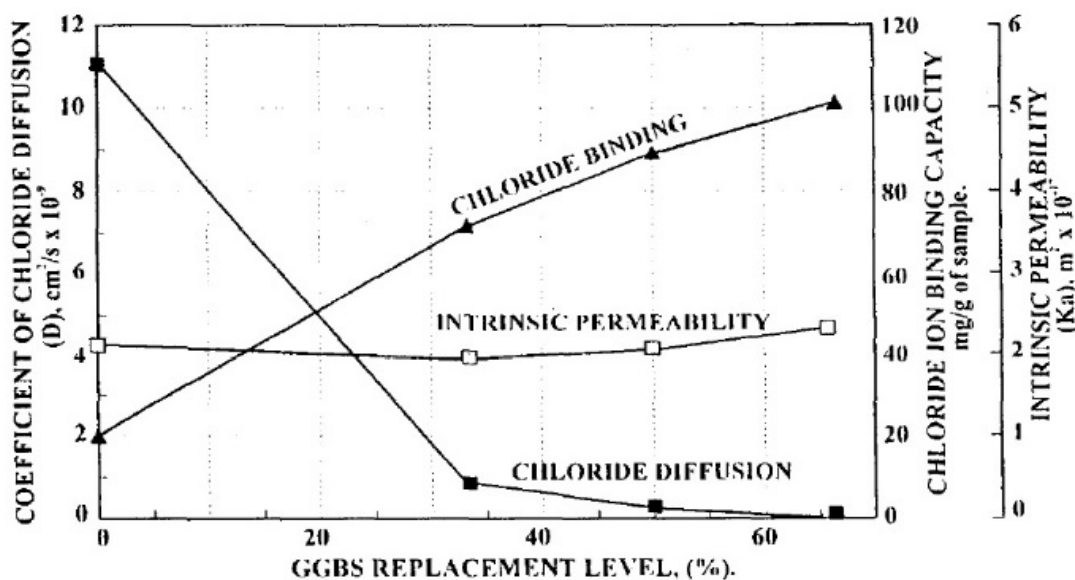


Figure 1.10 Différentes propriétés d'un béton en fonction de sa teneur en laitier.

Luo et al. [27] montrent également que la capacité du béton au laitier à fixer les chlorures est plus importante que celle d'un béton à base de ciment portland. Ceci peut être expliqué par le

fait que le béton à base de laitier de haut fourneau peut former plus de sels de Friedel lors de la pénétration des ions chlorure. Le laitier de haut fourneau a donc un impact important sur la fixation chimique des ions chlorure.

En revanche, l'introduction de sulfates dans la pâte cimentaire réduit cette capacité de fixation des ions chlorure du laitier. Les C3A de la pâte cimentaire vont réagir avec les sulfates et donc moins de C3A seront ensuite disponibles pour fixer les chlorures et former des sels de Friedel. Toutefois, la faible quantité de sulfates contenue dans le laitier ne suffit pas à altérer sa capacité à fixer les ions chlorure. [20]

1.3.1.5 Influence des additions

Les additions calcaires ne contribuent pas au développement des C-S-H dans le béton. Une substitution de 15 % du ciment par ce type d'addition peut conduire à une augmentation du coefficient de diffusion des ions chlorure allant jusqu'à 30% [28]. Les additions pouzzolaniques (cendres volantes, fumée de silice, laitier de haut fourneau) peuvent, quant à elles, avoir plusieurs rôles dans le comportement du béton vis-à-vis de la pénétration des ions chlorure [29]. Ce type d'addition a notamment une influence sur le type de produits formés lors de l'hydratation. Elles peuvent conduire à une réduction de la diffusion des ions chlorure (et une augmentation de la capacité de fixation des ions chlorure) dans la matrice cimentaire grâce à la formation de C-S-H par réaction pouzzolanique. La réduction de la teneur en pentlandite des hydrates formés lors de l'ajout de ce type d'additions conduit à un affinement des pores ce qui induit une réduction de la perméabilité (et donc une réduction de la diffusion des ions chlorure). Certains auteurs [30] ont montré que les liants ternaires (mélange de ciment, cendres volantes et fumée de silice par exemple) pouvaient considérablement réduire la taille des pores par rapport à un béton à base de CEM I uniquement, ce qui a un impact direct sur la pénétration des ions chlorure dans la matrice cimentaire. [20]

1.3.2 Teneur critique en chlorures

Le processus de dépassivation des aciers est amorcé lorsque le front de pénétration des chlorures à traverser le béton d'enrobage et atteint le premier lit d'armatures : la corrosion devient alors possible lorsque leur concentration dépasse un certain seuil, appelé concentration critique (Ccr). [8]

Dans la littérature, il existe plusieurs expressions de C_{cr} , la teneur critique peut s'exprimer par le rapport Cl^-/OH^- (c'est le rapport des ions activant Cl^- sur les ions passivant OH^-), ou bien par la teneur en chlorures (libres+liés) par rapport au poids du ciment. Les données publiées par différents auteurs montrent que ce seuil peut varier de façon importante, de l'ordre de 0,35 à 3 % de chlorures totaux par rapport à la masse de ciment [9] [10], et selon d'autres études, on considère que seuls les chlorures libres participent à la dépassivation des armatures et le seuil critique est exprimé en termes de la teneur en chlorures libre par rapport au poids de ciment [31]. L'influence de différents facteurs comme la composition du béton, la teneur en C_3A , le rapport E/C, l'humidité relative, la température, la microstructure en contact avec l'acier et l'état de surface de l'acier sont autant de facteurs à cette variabilité. [8]

Concentration en chlorures	Référence
0,2% de Cl^- solubles à l'acide en masse de ciment	Clear et al., 1973
0,4 à 0,8% de Cl^- totaux en masse de ciment	Locke et al., 1980
0,15% de Cl^- solubles à l'eau en masse de ciment	Building Research Etablissement, 1982
0,2% de Cl^- en masse de ciment (béton armé) 0,08% de Cl^- en masse de ciment (béton précontraint)	Holden et al.1983 [33] Popovics et al., 1983
0,06 à 1% de Cl^- totaux en masse de ciment	ACI 222R-89-, 1989
0,1% de Cl^- totaux en masse de béton sec	ACI 318-89-, 1992
0,1% de Cl^- totaux en masse de béton sec	Stoltzner et al., 1997
0,60 à 3,04% de Cl^- totaux en masse de ciment selon les conditions expérimentales	Gouda et Halaka, 1970
0,45 à 1,15% de Cl^- libres en masse de ciment selon le type de béton	Kayyali et Haque, 1995
0,097 à 0,19% de Cl^- totaux en masse de ciment	Hope et Ip, 1987
0,14 à 0,22% de Cl^- libres en masse de ciment 0,35 à 1% de Cl^- totaux en masse de ciment selon la Quantité en C_3A	Hussain et al., 1995
Rapport Cl^-/OH^-	Référence
0,6	Hausman, 1967
0,35	Gouda, 1970
0,29 - 0,30	Diamond, 1986
0,25 - 0,8	Goni et Andrade, 1990
3,00	Lambert et al., 1991

Tableau 1.1 Teneurs critiques en ions chlorures et rapports Cl^-/OH^- relevés dans la littérature. [31]

L'autre critère d'amorçage de la corrosion utilisé est le rapport $[Cl^-] / [OH^-] \geq 0.6$ [12]. Plus ce rapport est élevé, plus la vitesse de corrosion est grande. Un rapport compris entre 0,6 et 1 conduit généralement à la concentration critique en chlorures. Cette relation permet de prendre en compte les interactions entre la carbonatation (diminution du pH) et la pénétration des chlorures (augmentation de la concentration en chlorures libres). D'un point de vue statistique, un coefficient de variation de 30 % est estimé [11] pour ce dernier critère. Des lois de distribution pour les concentrations limites en chlorures ont été également proposées. En immersion par exemple, pour un béton CEM I et un rapport E/C de 0,5, une loi log-normale de valeur moyenne 1,5 % (chlorures totaux en masse de ciment) et de coefficient de variation 35 % est présentée sur la Figure 1.11. Ces résultats ont été obtenus par simulation de Monte-Carlo sur une loi empirique identifiée entre le potentiel électrochimique des armatures et la concentration critique en chlorures totaux dans des mortiers. [8]

Ces seuils ne sont pas fixes car ils dépendent du pH, de l'humidité du béton, de sa teneur en oxygène, etc. [31]

La valeur limite de la teneur en chlorures, $C_t = 0.4\%$ par masse de ciment est fréquemment utilisée lors d'études de corrosion (ex. prévision durée de vie, etc.). [41]

Des études menées par le "Building Research Establishment" ont établi les directives suivantes (BRE Digest 263, 1982) (Tableau 1.2).

Total Chlorures (%-masse de ciment)	Risque de corrosion
< 0.2	Négligeable
0.2 to 0.4	Bas
0.4 to 1.0	Modéré
> 1.0	Élevé

Tableau 1.2 Risque de corrosion et la teneur en chlorures total. [41]

Compte tenu de ces observations, l'utilisation de la borne inférieure (0,4 % de chlorures totaux par rapport à la masse de ciment) est la plus souvent retenue. Cependant, pour une approche plus fine, différentes valeurs de concentrations critiques ont été également proposées, grâce à une large revue bibliographique, en fonction des conditions environnementales et du type de béton [11]. Ainsi, une concentration critique plus importante est obtenue en immersion (1,5 % pour un béton CEM I de E/C=0,5) qu'en condition aérienne ou avec l'utilisation de sels de déverglaçage (0,5 % pour le même béton). [8]

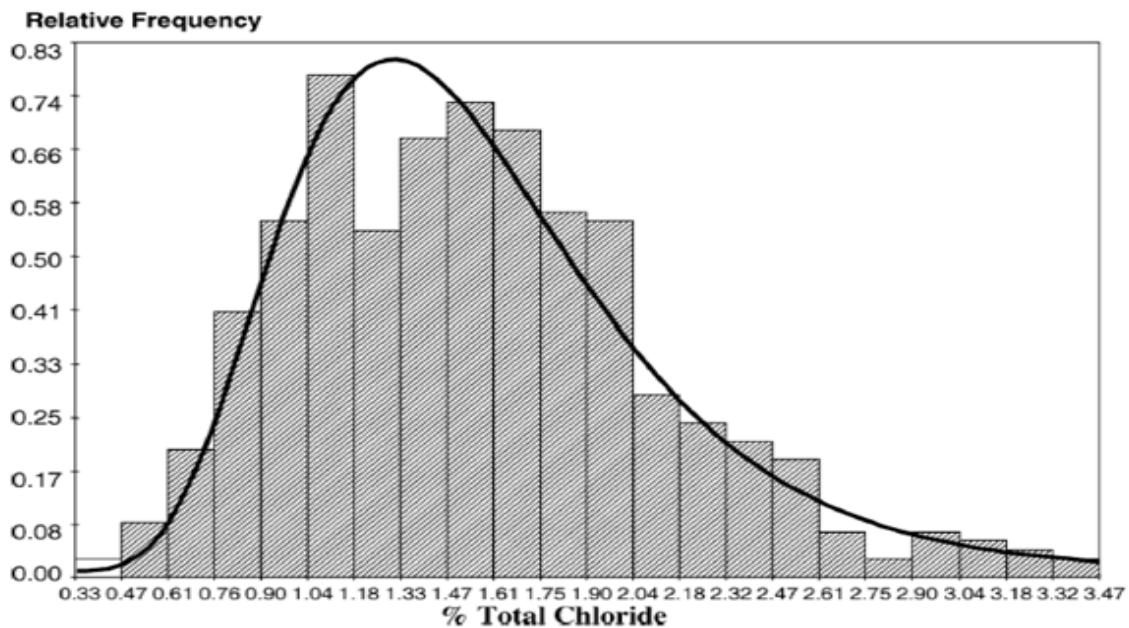


Figure 1.11 loi de distribution de la concentration critique en chlorures totaux pour un béton CEM I, en immersion, de $E/C=0,5$ [8]

Ces mêmes traitements statistiques de mesures potentiostatiques ont permis un classement en fonction de l'environnement et de la composition de matériaux de CEM I. [8]

Les lois de distribution sont récapitulées dans le tableau I.1.

Environnement	E/C	Moyenne (% de ciment)	Coefficient de variation (%)	Distribution
Immersion	0,5	1.5	35	Log-normale
Immersion	0,4	2.0	35	Log-normale
Immersion	0,3	2.2	35	Log-normale
Autres	0,5	0.5	30	Log-normale
Autres	0,4	0.6	30	Log-normale
Autres	0,3	0.8	30	Log-normale

Tableau 1.3 Concentrations critiques en chlorures totaux pour un béton de CEM I. [8]

1.4 Les effets de la corrosion sur le comportement mécanique du béton

La corrosion des aciers d'armature d'un élément en béton armé s'accompagne de plusieurs changements des caractéristiques mécaniques de l'acier et du béton. Ces changements évoluent par étapes.

Au début du phénomène de corrosion, il y a une perte de section d'acier qui est due soit à la corrosion par piqûre (locale) engendrée par pénétration des chlorures, soit à la corrosion

généralisée provoquée par la carbonatation. De plus, la corrosion provoque une diminution de l'adhérence acier-béton. Enfin, l'augmentation des produits de corrosion formés sur l'armature engendre la fissuration du béton de recouvrement.

Dans un second temps, les pertes de section peuvent mener à une diminution de la ductilité et de la résistance des éléments armés. La diminution d'adhérence peut causer une réduction de l'interaction acier-béton. La fissuration du béton d'enrobage facilite la pénétration des agents agressifs et rend l'acier exposé à la dép passivation. Lorsque la corrosion atteint un certain niveau, le béton de recouvrement éclate et il y a diminution de la section de béton. Ce phénomène peut se produire à des degrés de corrosion très faibles d'environ 1 à 2% de perte d'acier [32]. Toutes ces conséquences réduisent la capacité portante du béton armé (Figure.1.12). [31]

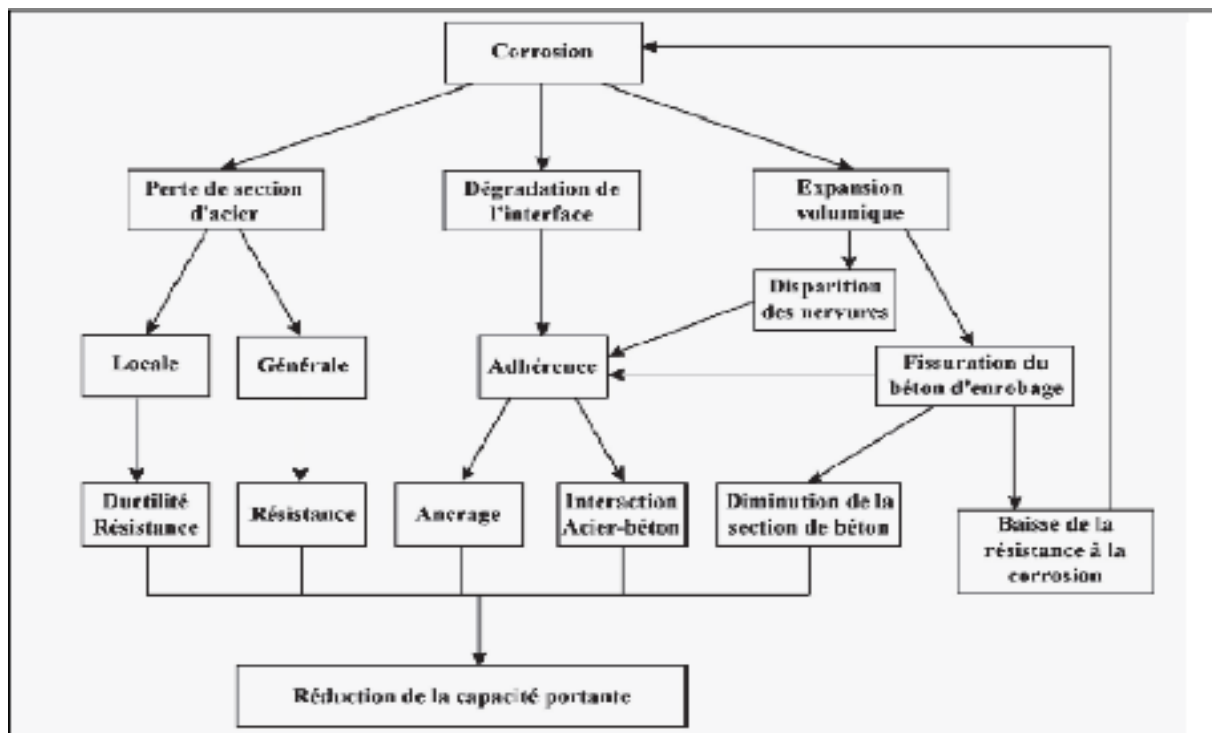


Figure 1.12 : Effet de la corrosion sur le comportement mécanique de structures.

1.4.1 Dégradation du béton

Lorsque la corrosion se développe autour de l'armature, les produits générés vont avoir tendance à augmenter le volume global de l'armature. Ce ci aura pour effet l'apparition de fissures longitudinales le long de la barre d'acier ainsi que l'éclatement de l'enrobage. Certaines études [33] suggèrent que les produits de corrosion n'exercent pas dans leur totalité une pression sur le béton. Car une partie de ces produits remplit les pores autour de la barre et peut migrer à l'extérieur de l'interface acier-béton. Une fois la zone poreuse aux alentours de

la barre remplie, les produits de corrosion commencent à exercer une pression sur le béton, provoquant dans la suite sa fissure. La figure 1.13 présente le diagramme schématique du processus corrosion-fissuration. [31,34]

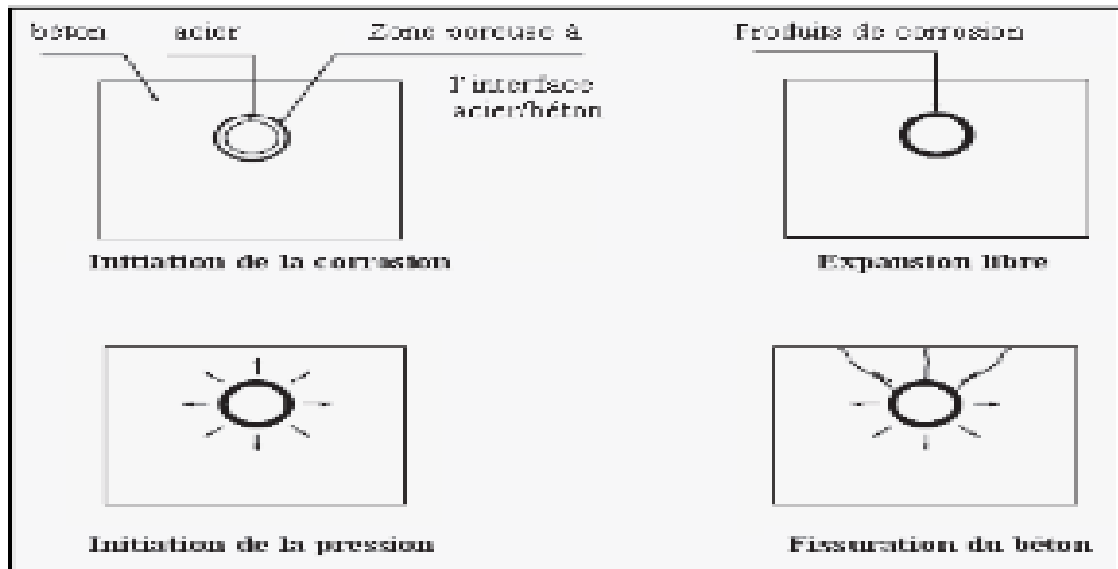


Figure 1.13 diagramme schématique du processus corrosion-fissuration [34]

1.4.2 Détérioration de l'adhérence entre l'acier et le béton

Suite à l'accumulation des produits de corrosion autour de la barre d'acier, il y a dégradation de l'adhérence entre l'acier et le béton. Des études expérimentales réalisées par ANDRADE et al. [35] ont permis de déterminer de façon qualitative la variation de l'adhérence avec le degré de corrosion (Figure 1.14); elles montrent une augmentation initiale de l'adhérence pour les faibles niveaux de corrosion suivie par une réduction considérable (supérieure à 50 %).

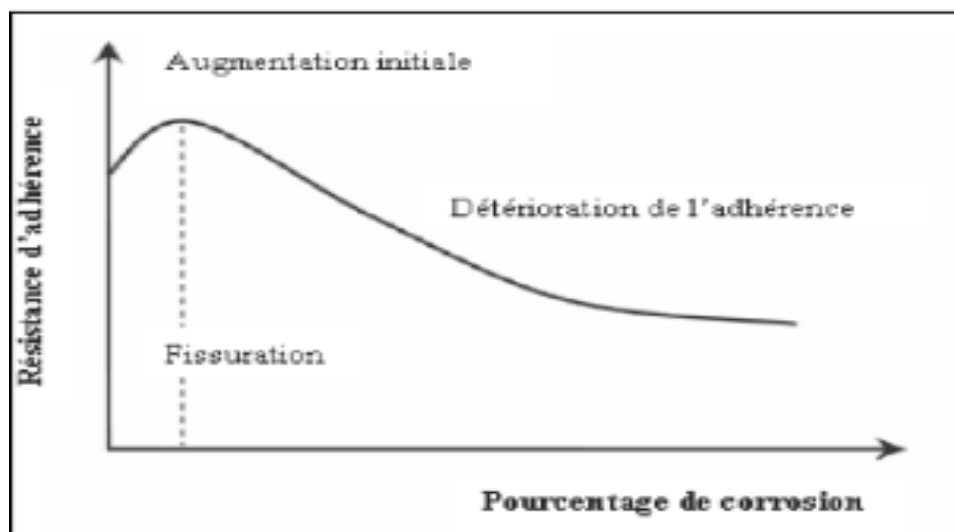


Figure 1.14 Variation schématique de la résistance d'adhérence avec le pourcentage de corrosion [34]

Dans le cas de la corrosion par piquûre, la perte d'adhérence est localisée au niveau des piquûres et une bonne adhérence existe sur le reste de l'armature. Pour cette raison, l'hypothèse d'une adhérence parfaite dans le calcul de la résistance de l'élément demeure appropriée et est en bon accord avec les résultats expérimentaux. [31,36]

1.4.3 Diminution de l'allongement à la rupture des sections d'aciers

La corrosion des armatures provoque une diminution de la surface d'acier conduisant à la diminution de la résistance en flexion [37] ainsi qu'à la réduction de la ductilité de la section. [38]

Quant à la ductilité, plusieurs essais réalisés ont montré une réduction considérable de l'allongement à la rupture avec la diminution de la section d'acier. Une réduction de l'allongement à la rupture de 30 % pour une perte de 15 % de la section d'acier et une réduction de 50% pour une perte de 28 % [35]. D'autres essais réalisés par ALMUSALLAM [38] ont permis de tracer (figure 1.15) la variation de l'allongement à la rupture des barres en fonction du chargement et du degré de corrosion (c'est-à-dire en fonction de la proportion de réduction de la section d'acier). La réduction de la section des armatures provoque aussi une réduction de la limite d'élasticité de l'acier. [31,39]

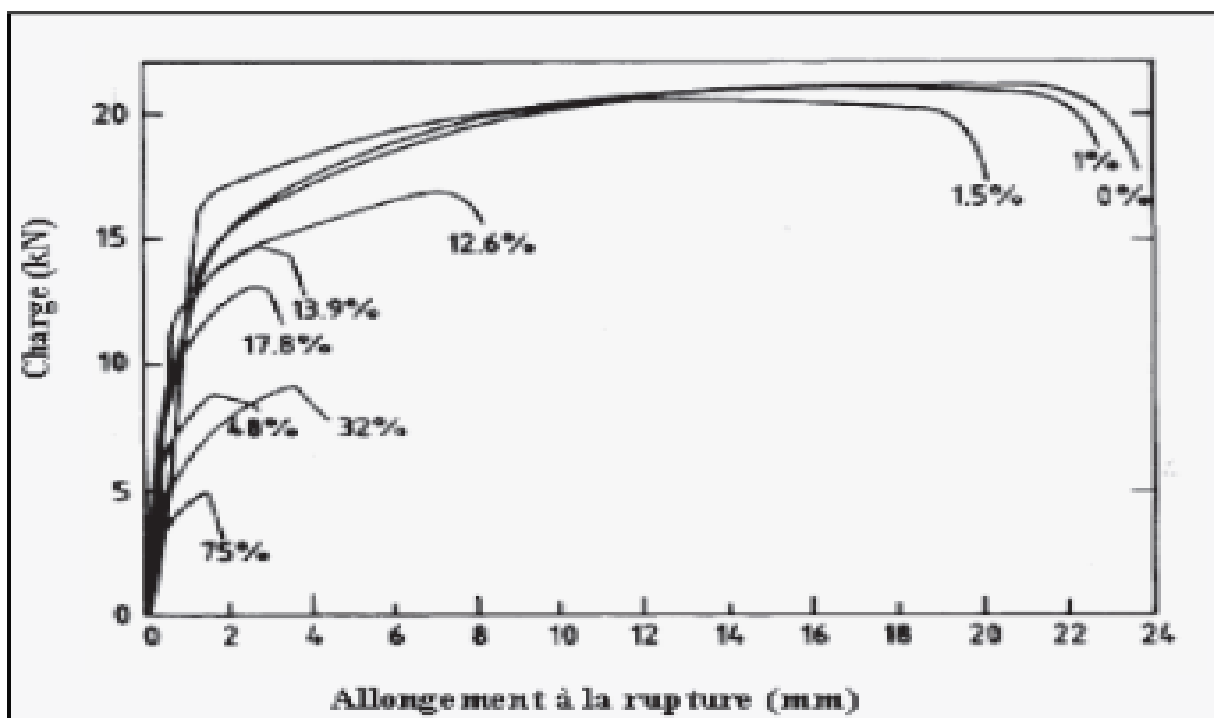


Figure 1.15 Variation de l'allongement à la rupture de barres d'aciers ($\varnothing = 6\text{mm}$) en fonction des charges pour différents degrés de corrosion.

Chapitre 02

Méthode de

modélisation

probabiliste pour la

corrosion induite par

les chlorure

2.1 Introduction

La durée de vie peut être définie comme le temps pendant lequel une structure est censée être en mesure de répondre à ses exigences avec une fiabilité suffisante avec ou sans inspection et entretien périodiques et sans coûts élevés inattendus de maintenance et de réparation. Le concept d'état limite basé sur des critères de performance est associé à la définition de la durée de vie [38].

La détermination de la durée de vie restante sur une base probabiliste nécessite d'abord l'estimation de la probabilité de dépassivation a priori. Le code *fib* pour la conception de la durée de vie présente un modèle permettant de tenir compte de la résistance du béton à la pénétration des chlorures par rapport à la sévérité des conditions d'exposition [38].

Après avoir présenté dans le premier chapitre les données bibliographiques de la corrosion induite par les ions chlorures des structures en béton armé, nous nous intéressons ici à l'aspect probabiliste permettant de prendre en compte la variabilité des phénomènes. En effet, nous présentons certains outils théoriques bien connus qui nous seront utiles tout au long de ce mémoire. Nous commençons avec une brève présentation de la modélisation par les méthodes probabilistes en générale et la simulation Monte-Carlo en particulier, puis une brève description du modèle de prédiction du transport des chlorures et finalement la méthode d'estimation du temps d'initiation de la corrosion.

2.2 Approches probabiliste

L'utilisation de modèles prédictifs avec comme données d'entrée les valeurs moyennes des paramètres variables, sans prise en compte de leurs inévitables incertitudes, constitue l'approche déterministe. L'estimation de durée de vie obtenue par une telle approche présente autant de chances d'être dépassée que de ne pas être atteinte. Pour couvrir les incertitudes de toutes natures, liées aux données mais aussi aux hypothèses associées au dimensionnement, les recommandations et codes ont peu à peu évolué vers des approches plus précises et plus rationnelles, avec aujourd'hui un format semi-probabiliste partagé par la très grande majorité au niveau mondial. Ce dernier découle d'une simplification pratique de l'approche probabiliste dont l'intérêt majeur peut être de définir une durée de vie selon une probabilité choisie à l'avance qu'elle ne soit pas atteinte. C'est une approche plus complète que l'approche déterministe mais dont la mise en œuvre est plus complexe car elle nécessite de quantifier la

variabilité des données d'entrée des modèles utilisés, et de recourir à des méthodes mathématiques d'estimation de la fiabilité.

L'état d'une structure peut être représenté par deux domaines (défaillance ou sûreté) séparés par une frontière (surface d'état limite ou de défaillance) [43] (figure 2.1).

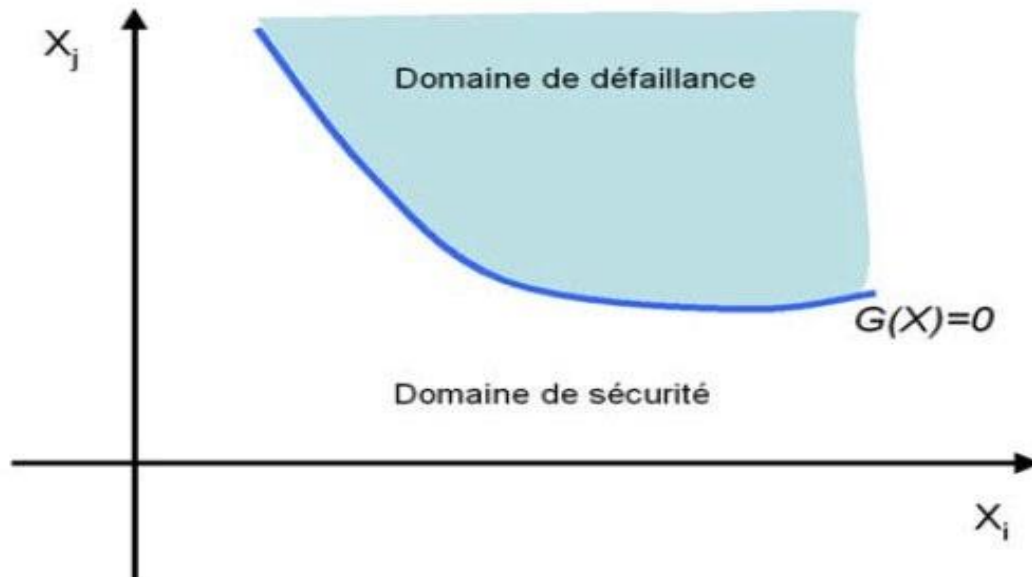


Figure 2.1 Représentation de l'état limite [43]

2.2.1 États limites

Les états de défaillance correspondent à des situations considérées comme inacceptables. L'évaluation de ces situations dépend de l'état limite pris en compte. Les réglementations et recommandations s'appuyant sur la notion d'état limite, comme les Eurocodes [44], le Model code *fib*, définissent deux types d'états limites :

- États limites de service (ELS) : les conséquences d'un dépassement sont en général économiques (esthétique, confort ...);
- États limites ultimes (ELU) : les conséquences d'un dépassement peuvent être graves vis-à-vis de la sécurité (corrosion, effondrement progressif, mécanisme de plastification, instabilité, fatigue...).

Pour chaque mode de défaillance, une fonction d'état limite (ou fonction de défaillance) $G(x)$ est définie dans l'espace des variables aléatoires, représentées par le vecteur X . La fonction

$G(x)$ est une fonction déterministe dont les variables sont aléatoires. Les valeurs prises par cette fonction permettent de délimiter deux domaines séparés par une surface d'état limite [13] :

- $G(x) = 0$: surface d'état limite
- $G(x) > 0$: domaine de sûreté
- $G(x) \leq 0$: domaine de défaillance

2.2.2 Calcul de fiabilité

Dans un contexte probabiliste, le dimensionnement d'une structure est acceptable si la probabilité de défaillance P_f , pour un état limite donné, est inférieure à la probabilité de défaillance cible P_{fc} requise pour la sûreté d'une structure qui dépend du niveau de risque acceptable dans le domaine de son utilisation [46].

La conception, la requalification des structures et la prévision de leur bon fonctionnement nécessitent de vérifier des scénarii potentiels de défaillance et d'évaluer correctement et exhaustivement les variables qui y participent. Un scénario de défaillance est représenté par une ou plusieurs fonctions de performance délimitant deux domaines [47] : un domaine de défaillance lorsque la fonction de performance est négative et un domaine de sûreté lorsque la fonction de performance est positive. La frontière entre ces deux domaines est appelée surface d'état limite ou de défaillance [13]. La fiabilité est définie comme étant le complément de la probabilité de défaillance :

$$\text{fiabilité} = 1 - P_f = \int_{G(x) > 0} f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x}) \, d\mathbf{x}_1 \dots d\mathbf{x}_n \quad \text{Eq 2.1}$$

2.2.3 Méthode Monte Carlo

La méthode de Monte Carlo est une approche de simulation numérique largement utilisée dans les problèmes de fiabilité [49]. Dans cette méthode, un échantillonnage de variables aléatoires est utilisé pour construire un ensemble de valeurs visant à décrire la défaillance et les espaces sûrs. L'échantillonnage est construit sur la base des distributions statistiques attribuées pour chaque variable aléatoire introduite dans le problème. Comme cette méthode traite des simulations de la fonction d'état limite, plus l'échantillonnage adopté est grand, plus la description des espaces et la probabilité de défaillance obtenue seront précises [48]. Dans de nombreuses applications de Monte Carlo, le processus physique est simulé directement, et il

n'est même pas nécessaire d'écrire les équations différentielles qui décrivent le comportement du système. La seule exigence est que le système physique (ou mathématique) soit décrit par des fonctions de densité de probabilité (PDF), et c'est l'avantage de la méthode MCS mais elle nécessite un nombre de calculs important pour obtenir une probabilité de défaillance avec un coefficient de variation satisfaisant, c'est-à-dire suffisamment réduit. La technique de simulation de Monte Carlo comporte sept éléments essentiels [50] :

1. Définition du problème : définition du problème en fonction de toutes les variables aléatoires ;
2. Fonctions de densité de probabilité (PDF): quantification des caractéristiques probabilistes de toutes les variables aléatoires en fonction de leurs PDF et des paramètres correspondants ;
3. Générateurs de nombres aléatoires : générant les valeurs de ces variables aléatoires ;
4. Règles d'échantillonnage : évaluer le problème de manière déterministe pour chaque ensemble de réalisations de toutes les variables aléatoires, c'est-à-dire l'expérimentation numérique ;
5. Notation : extraire des informations probabilistes de N de telles réalisations ;
6. Estimation d'erreur : détermination de la précision et de l'efficacité de la simulation ;
7. Techniques de réduction de la variance : méthodes de réduction de la variance de la solution estimée afin de réduire le temps de calcul pour la simulation de Monte Carlo.

Toutes les variables aléatoires sont considérées comme non corrélées.

Le noyau de cette méthode est la construction d'un échantillonnage pour chaque variable aléatoire impliquée dans le problème. Ensuite, le domaine de sécurité et les points de défaillance sont prospectés en simulant l'équation (2.2), comme décrit dans la figure 2.2. La probabilité de défaillance est calculée, pour la simulation de Monte Carlo, en utilisant l'expression suivante [48] :

$$Pf = \int_{G \leq 0} f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x}_i) d\mathbf{x}_i = \int_{G \leq 0} I(\mathbf{x}_i) f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x}_i) d\mathbf{x}_i = E[I(\mathbf{x}_i)]. \quad \text{Eq 2.2}$$

La fonction $I(\mathbf{x}_i)$ peut s'écrire:

$$I(x_i) = \begin{cases} 1 & \rightarrow G \leq 0 \\ 0 & \rightarrow G > 0 \end{cases} \quad \text{Eq 2.3}$$

En simulant la fonction d'état limite pour une plage d'échantillonnage commode, la valeur moyenne de $I(x_i)$ sera un estimateur de la probabilité de défaillance. Ensuite:

$$Pf = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N I[g(X_j) \leq 0] \quad \text{Eq 2.4}$$

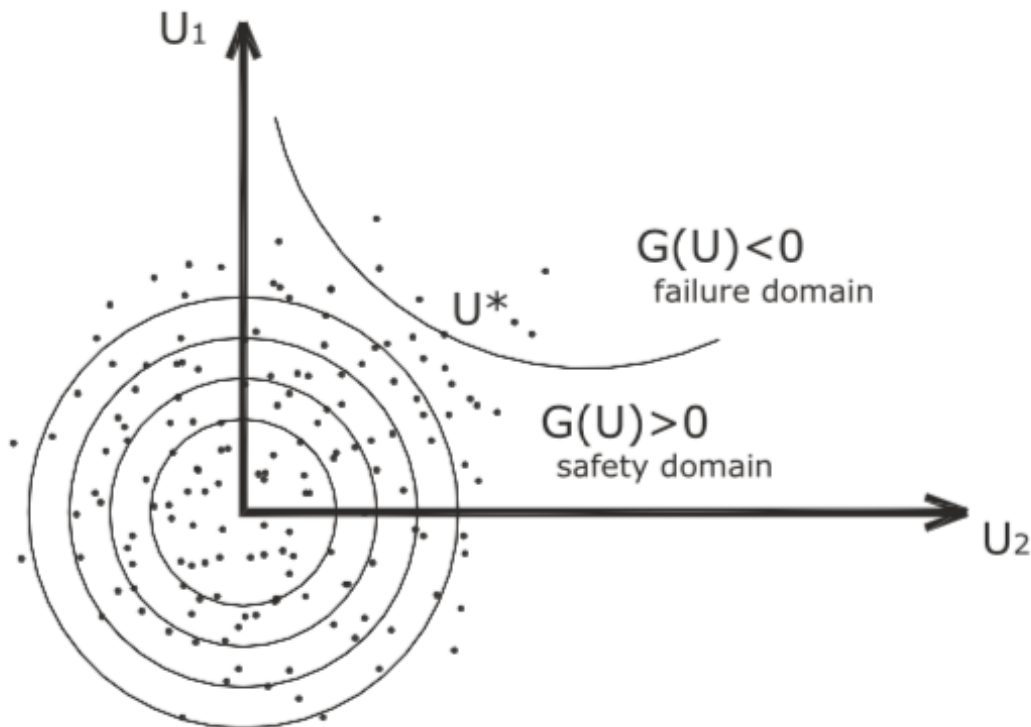


Figure 2.2 Échantillonnage Monte Carlo pour deux variables aléatoires [48]

Dans cette application de Monte Carlo, le processus physique est simulé directement par l'utilisation des modèles de description du phénomène de corrosion induite par les chlorures.

2.3 Prédiction de l'initiation de la corrosion

Le temps d'initiation de la corrosion (t_{ini}) est un facteur clé dans la prédiction de la durée de vie d'un élément en béton, car le risque de corrosion de l'acier dépend fortement de la vitesse de pénétration des ions chlorures dans le béton et de la nature du béton qui représente la barrière physique contre les agents agressifs externes.

Le présent travail vise à prédire le temps d'initiation de la corrosion (t_{ini}) des structures en béton dans des environnements chlorés en utilisant une approche de variabilité spatiale. Cette approche prend en compte la variabilité spatiale des différents paramètres de la structure tels

que, la concentration superficielle de chlorure (C_s), le seuil de concentration (C_{th}), le coefficient apparent de diffusion ($D_{app,c}$) et le température (T) apparaissant dans le modèle.

La méthodologie de simulation de Monte Carlo (MCS) est utilisée pour calculer la fonction de distribution des probabilités (PDF) du temps d'initiation de la corrosion et la probabilité de défaillance de la réponse du système au moment de l'initiation de la corrosion [51].

2.3.1 Fonction d'état limite

Le principe de base du calcul probabiliste est la détermination de la probabilité de défaillance d'une structure. Pour qu'un ouvrage soit dit « sûr » vis-à-vis de la corrosion induite par les chlorures, il faut que sa concentration critique de chlorure C_{crit} soit supérieure à la teneur en chlorures $C(x,t)$ dans le béton à une profondeur x et à l'instant t (Eq 2.5). On va alors calculer la fonction d'état limite $G(X)$ (Eq 2.6) qui est déterministe et dans laquelle les variables sont aléatoires. Lorsque $G(X) > 0$, on se situe dans le domaine de sécurité, sinon on se trouve dans le domaine de défaillance. Lorsque la fonction vaut 0, on se situe sur la surface d'état limite.

$$C_{crit} > C(X) \quad \text{Eq 2.5}$$

$$G(X) = C_{crit} - C(X) \quad \text{Eq 2.6}$$

La probabilité de défaillance P_f (Eq 2.3) est alors la probabilité que la fonction $G(X)$ soit négative.

$$P_f(t) = P(G(X, t) < 0) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I[g(X_i, t) \leq 0] \quad \text{Eq 2.7}$$

Où G représente la fonction d'état limite, X est le vecteur des variables aléatoires et N le nombre total des échantillonnage de Monte Carlo.

Pour calculer la probabilité de défaillance, il faut tenir compte de la variabilité des paramètres d'entrée des modèles et elles sont multiples [53,54] :

- propriétés matériaux
- dimensionnement de l'ouvrage
- environnement et charges subies par l'ouvrage
- distance par rapport au sens de coulage
- modèles utilisés pour concevoir l'ouvrage.

La variabilité des paramètres liés à l'environnement est toutefois plus difficile à prévoir et à quantifier, tout comme les défauts de dimensionnement ou d'exécution [20].

2.3.2 Modélisation de la pénétration des chlorures

Les modèles numériques sont considérés comme un outil qui permet de réduire le temps et le coût des expériences. De nombreux modèles de prédiction de la corrosion des armatures d'acier du béton induite par les chlorures ont été développés. classés en trois catégories [55] :

- Modèles empiriques : L'approche empirique se base sur l'observation du processus de corrosion et sur la mise en place de relations mathématiques entre la profondeur de corrosion et divers facteurs explicatifs.
- Modèles semi-empiriques : utilisent des données ajustées sur des résultats expérimentaux afin de simplifier les calculs, et permettent de prévoir à long terme.
- Modèles mécanique (physico-chimiques) : Des modèles mécanistes des processus de corrosion ont été développés pour incorporer une gamme de réactions chimiques et électrochimiques avec les interactions complexes des détails de diffusion et de migration.

Dans cette étude, nous utilisons le modèle proposé par la *fib* dans son Bulletin 34 pour la prédiction de la durée de vie d'un béton susceptible de subir une corrosion des armatures induite par des ions chlorures. Il se base sur la solution analytique de la seconde loi de Fick mais en lui apportant de nombreux compléments, pour remédier à ses limitations (valable pour un béton en conditions saturées, coefficient de diffusion constant et concentration constante des chlorures en surface) :

$$C(x; t) = C_{crit} = C_0 + (C_{s-\Delta x} - C_0) \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \frac{x-\Delta x}{2 \cdot \sqrt{D_{app} \cdot c \cdot t}} \right] \quad \text{Eq 2.8}$$

L'équation 2.8 a été développé dans le cadre du projet de recherche DuraCrete [52] et légèrement révisé dans le projet de recherche DARTS [45]. Avec D_{app} le coefficient de diffusion apparent des ions chlorure (mm^2/an), Δx la profondeur jusqu'à laquelle on considère que le transport des ions n'est pas que diffusif mais aussi convectif appelée zone de convection (mm) et $C_{s,\Delta x}$ la concentration en ions chlorure à la profondeur Δx (%). La zone de convection n'existe pas pour des bétons complètement immergés car les ions chlorure se déplacent

uniquement par diffusion dans un béton saturé. Le coefficient de diffusion apparent est donné par :

$$D_{app,c} = K_t \cdot K_e \cdot D_{RCM,0} \cdot \left(\frac{t_0}{t}\right)^a \quad \text{Eq 2.9}$$

Le coefficient de diffusion apparent (Eq 2.9) dépend de paramètres de transfert (K_t), de la température (K_e), du vieillissement du matériau (a), du temps de cure t_0 et du coefficient de diffusion mesuré par un essai accéléré ($D_{RCM,0}$).

Le paramètre de température est exprimé par :

$$K_e = \exp\left[b_e \cdot \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_{real}}\right)\right] \quad \text{Eq 2.10}$$

Les valeurs de la variable de régression b_e varient entre $b_e = 3500 \text{ K}$ et $b_e = 5500 \text{ K}$, et la température de référence $T_{ref} = 293 \text{ K}$ (20C°), T_{real} la température de l'élément structurel et le paramètres de transfert $K_t = 1$

Le coefficient a ou facteur de vieillissement (Eq 2.9) est un facteur particulièrement important du modèle du bulletin 34 de la *fib* [45] car il tient compte de l'évolution de la microstructure du béton pendant toutes ses années de service. Il est d'autant plus influent sur le résultat que le béton contient des liants binaires ou ternaires qui présentent une cinétique d'hydratation plus faible que les bétons à base de CEM I.

Les variables de la modélisation et de la conception sont traitées comme des variables aléatoires probabilistes afin de tenir compte de leur variabilité. Par conséquent, au lieu de valeurs ou de fonctions uniques, chaque variable est représentée par un type de distribution avec une certaine valeur moyenne et un écart type / coefficient de variation; à des fins de calcul, la distribution est générée par échantillonnage aléatoire de Monte Carlo. Le choix du type de distribution et des paramètres est basé sur les sources existantes de la littérature (*fib* 34) [45].

Ce modèle est intéressant car il tient compte d'un certain nombre de paramètres aussi bien matériaux qu'environnementaux. De plus il est assez simple d'utilisation notamment pour les bétons à base de CEM I que l'on connaît bien. Toutefois, de plus en plus de nouveaux liants sont utilisés et le retour d'expérience manque parfois quant à la définition de certains paramètres comme le facteur de vieillissement, la concentration en ions chlorure $C_{s,\Delta x}$ ou la

zone de convection pour utiliser correctement le modèle du bulletin 34 de la *fib* [45]. Le projet ANR Modevie [56] en cours en France, vise à proposer un modèle ingénieur de durabilité des bétons permettant de mieux prendre en compte ces aspects. Ce modèle est directement inspiré du Model code *fib* [*fib* 34] [45, 20].

2.3.3 Quantification probabiliste des paramètres aléatoires

La modélisation de la corrosion induite par les chlorures peut utiliser des variables aléatoires, des paramètres déterminés expérimentalement et quantifiés à l'aide de mesures structurelles réelles. Aussi, seuls les paramètres pertinents sont considérés comme aléatoires afin de simplifier les calculs. La plage de valeurs pour chacune de ces variables relatives aux propriétés géométriques, aux caractéristiques des matériaux, aux chargements et aux facteurs environnementaux, utilisées dans l'analyse est donnée dans le bulletin 34 de la *fib* [45].

2.3.3.1 Teneur critique en chlorure C_{crit}

Dans le contexte [*fib* 34], la teneur critique en chlorure C_{crit} est définie "La teneur totale en chlorure qui conduit à la dépassivation de la surface de renfort et à l'amorçage de la dissolution du fer, qu'elle conduise à des dommages visibles par corrosion sur la surface du béton. » [45].

La teneur critique en chlorure C_{crit} . Peut-être quantifiée comme suit:

C_{crit} [wt.-% / cement]: beta distribué, $m = 0.6$, $s = 0.15$, $a = 0.2$, $b = 2.0$.

Où s est l'écart type, m la valeur moyenne.

2.3.3.2 coefficient de migration des chlorures

Le coefficient de migration du chlorure est l'un des paramètres déterminants pour la description des propriétés du matériau dans le modèle de corrosion induite par les chlorures. Des données appropriées pour $D_{RCM,0}$ peuvent être obtenues à partir de la littérature pour être utilisées comme variables de départ dans un calcul de conception de durée de vie. Parmi les différentes méthodes de test rapide, la méthode de migration rapide du chlorure (RCM) s'est révélée être théoriquement claire, expérimentalement simple et liée à un outil prometteur de précision (répétabilité) [45].

$D_{RCM,0}$ est une variable normalement distribuée (distribution normal) avec une valeur moyenne montré dans le tableau 2.3. L'écart type de $D_{RCM,0}$ peut être calculé selon l'équation (2.11).

$$s = m \cdot 0,2$$

Eq 2.11

Où s est l'écart type, m la valeur moyenne.

Type de ciment	E/C _{eqv.} ¹					
	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60
CEM I 42.5 R	n.d. ²	8.9·10 ⁻¹²	10.0·10 ⁻¹²	15.8·10 ⁻¹²	19.7·10 ⁻¹²	25.0·10 ⁻¹²
CEM I 42.5 R + FA (k = 0.5)	n.d. ²	5.6·10 ⁻¹²	6.9·10 ⁻¹²	9.0·10 ⁻¹²	10.9·10 ⁻¹²	14.9·10 ⁻¹²
CEM I 42.5 R + SF (k = 2.0)	4.4·10 ⁻¹²	4.8·10 ⁻¹²	n.d. ²	n.d. ²	5.3·10 ⁻¹²	n.d. ²
CEM III/B 42.5	n.d. ²	1.4·10 ⁻¹²	1.9·10 ⁻¹²	2.8·10 ⁻¹²	3.0·10 ⁻¹²	3.4·10 ⁻¹²

Tableau 2.1 : Quantification de $D_{RCM,0}$ pour différents mélanges de béton [45]

2.3.3.3 Teneur en chlorures à la surface de substitution $C_{s, \Delta x}$

Pour utiliser la 2ème loi de diffusion de Fick, les effets dans la zone de convection sont négligés par la surface de substitution Δx et la teneur en chlorure de surface de substitution $C_{s, \Delta x}$. La teneur en chlorure à la surface de substitution $C_{s, \Delta x}$ est déterminée par les conditions matérielles, géométriques et environnementales. Ce contenu peut varier dans une large mesure. Ces variations sont dues aux variations temporelles et spatiales de l'humidité du béton, de la fréquence d'application des sels de déglçage, des variations de la teneur en chlorure de la solution ambiante, etc [58].

2.3.3.4 Paramètre de transfert Kt et l'exposant vieillissant a

L'exposant de vieillissement a introduit la diminution du coefficient de diffusion du chlorure D_{app} au cours du temps et, dans un contexte mathématique, il présente une pente dans un diagramme double logarithmique. C'est un paramètre considéré comme dépendant à la fois des conditions matérielles et environnementales. On pense que le type de ciment influence la diffusion du chlorure à la fois par le coefficient de migration du chlorure $D_{RCM,0}$ et par l'exposant de vieillissement a [58]. L'exposant de vieillissement a pour trois types de ciment différents est illustré dans le tableau 2.2 [45].

Pour effectuer la quantification de a , la variable de transfert kt a été fixée à $kt = 1$.

Le point de référence dans le temps a été choisi comme étant $t_0 = 0,0767$ ans (28jours).

Béton	l'exposant de vieillissement a^5 [-]
Béton de ciment Portland CEM I; $0.40 \leq w/c \leq 0.60$	Beta ($m^1=0.30$; $s^2= 0.12$; $a^3= 0.0$; $b^4= 1.0$)
Béton de ciment Portland de cendre volante $f \geq 0.20 \cdot z$; $k = 0.50$; $0.40 \leq w/c_{eqv.} \leq 0.62$	Beta ($m^1=0.60$; $s^2= 0.15$; $a^3= 0.0$; $b^4= 1.0$)
Béton de ciment de laitier de haut fourneau CEM III/B; $0.40 \leq w/c \leq 0.60$	Beta ($m^1=0.45$; $s^2= 0.20$; $a^3= 0.0$; $b^4= 1.0$)

Tableau 2.2 : Résultat de la quantification statistique de la variable a [45].

2.3.3.5 Variable de transfert environnemental K_e

La variable de transfert d'environnement K_e a été introduite afin de prendre en compte l'influence de T_{real} sur le coefficient de diffusion $D_{Eff, C}$. Afin de déterminer mathématiquement la variable de transfert environnemental K_e (Eq 2.12), T_{real} , T_{ref} (température d'essai standard, $T_{ref} = 293$ K (20 ° C)) et le paramètre doivent être déterminés [45].

$$K_e = \exp \left[b_e \cdot \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_{real}} \right) \right] \quad \text{Eq 2.12}$$

Les valeurs de la variable de régression varient entre $b_e = 3500$ K et $b_e = 5500$ K. b_e peut être décrite comme suit :

b_e [K]: distribution **normal**, $m = 4800$, $s = 700$.

Où s est l'écart type, m la valeur moyenne.

La température de l'élément structurel ou de l'air ambiant est décrite au moyen de la variable T_{real} . T_{real} peut être déterminée en utilisant les données disponibles d'une station météo à proximité.

T_{real} [K]: distribution normale, $m =$ données évaluées de la station météorologique

$s =$ données évaluées de la station météorologique

Où s est l'écart type, m la valeur moyenne.

2.3.3.6 Fonction de transfert Δx

Si des éléments structurels sont exposés par intermittence à une solution de concentration de chlorure constante ou variable, des fonctions de transfert doivent être formulées. Élément de structure chargé par intermittence d'une solution contaminée aux chlorures, interrompu par des périodes sèches de stockage d'air pendant lesquelles s'évapore l'eau du béton proche de la surface, toute réhumidification ultérieure provoque un processus d'aspiration capillaire. Par rapport aux processus de diffusion, l'action capillaire conduit à un transport rapide des chlorures dans le béton jusqu'à une profondeur Δx où les chlorures peuvent s'accumuler avec le temps jusqu'à créer une concentration de saturation $C_{s, \Delta x} = C_s, 0$ [45].

Pour résumer, pour les différents types de conditions d'exposition, Δx peut être quantifié comme suit:

distribution	valeur	conditions
beta distribué	$s = 5.6$ $m = 8.9$ $a = 0.0$ $b = 50.0$	<ul style="list-style-type: none"> • Pour les conditions d'éclaboussures
Paramètre constante	0	<ul style="list-style-type: none"> • pour les structures marines immergées • ou fuite due à l'eau de mer et au niveau constant de la nappe phréatique • pour les conditions de pulvérisation
beta distribué	m, s, a et b être déterminé	<ul style="list-style-type: none"> • pour les fuites dues à la variation du niveau des eaux souterraines • pour les conditions de marée

Tableau 2.3 : Quantification de Δx [mm] pour différents types de conditions d'exposition [45]

2.3.3.7 Teneur initiale en chlorure du béton C_0

La teneur en chlorure du béton n'est pas seulement causée par la pénétration de chlorure de la surface, mais peut également être due à des agrégats, des ciments ou de l'eau contaminés au chlorure utilisés pour la production de béton. Surtout lors de la construction en milieu marin, la teneur en chlorure des agrégats fins et grossiers et de l'eau peut être considérable.

Contrairement aux profils de chlorure résultant de la pénétration de chlorure de la surface, la distribution de la teneur initiale en chlorure peut être supposée uniforme sur toute la section transversale, en effet, dans notre travail, nous considérons $C_0 = 0$ [45].

2.4 Méthode d'estimation du temps d'initiation de la corrosion

Pour la dégradation de béton, le modèle semi-empirique développé est utilisé; Ce modèle est basé sur la détermination du temps nécessaire pour générer la quantité critique de produits de corrosion (temps d'initiation). La méthode utilisées pour l'estimation du temps d'initiation de la corrosion induite par les chlorures sont basée sur la fonction d'état limite mentionné précédemment et la probabilité de défaillance, L'évaluation de ces fonctions peut être effectuée par la simulation de Monte-Carlo qui convient à ce type de problème, car elle donne directement la probabilité de défaillance variant dans le temps et décrit toute la fonction de distribution des temps considérés.

L'organigramme de la procédure numérique est représenté sur la figure 2.3 Sur la base des distributions de probabilité des variables structurelles et environnementales, la probabilité de défaillance a été calculée dans la boucle intérieure avec 100000 simulations de Monte Carlo, afin de fournir les paramètres d'entrée pour le modèle de corrosion (C_s , C_{th} , D_{app} , T_{ref} , T_{real} , x , a , $D_{RCM, 0}$,). Pour une durée $T_{max}=200$ ans et un incrément considérée comme 0.25 ans , le coefficient de diffusion est calculé en termes de température, Le rapport $E/C=0.5$, L'enrobage est fixée d'une valeur de 60 mm. Lorsque le chlorure atteint le seuil à la position de l'acier, le processus de piqûre est activé. Une fois la distribution de la probabilité de défaillance est obtenue, la fonction de densité cumulative (cdf) et la fonction de densité de probabilité (pdf) peuvent être déterminées.

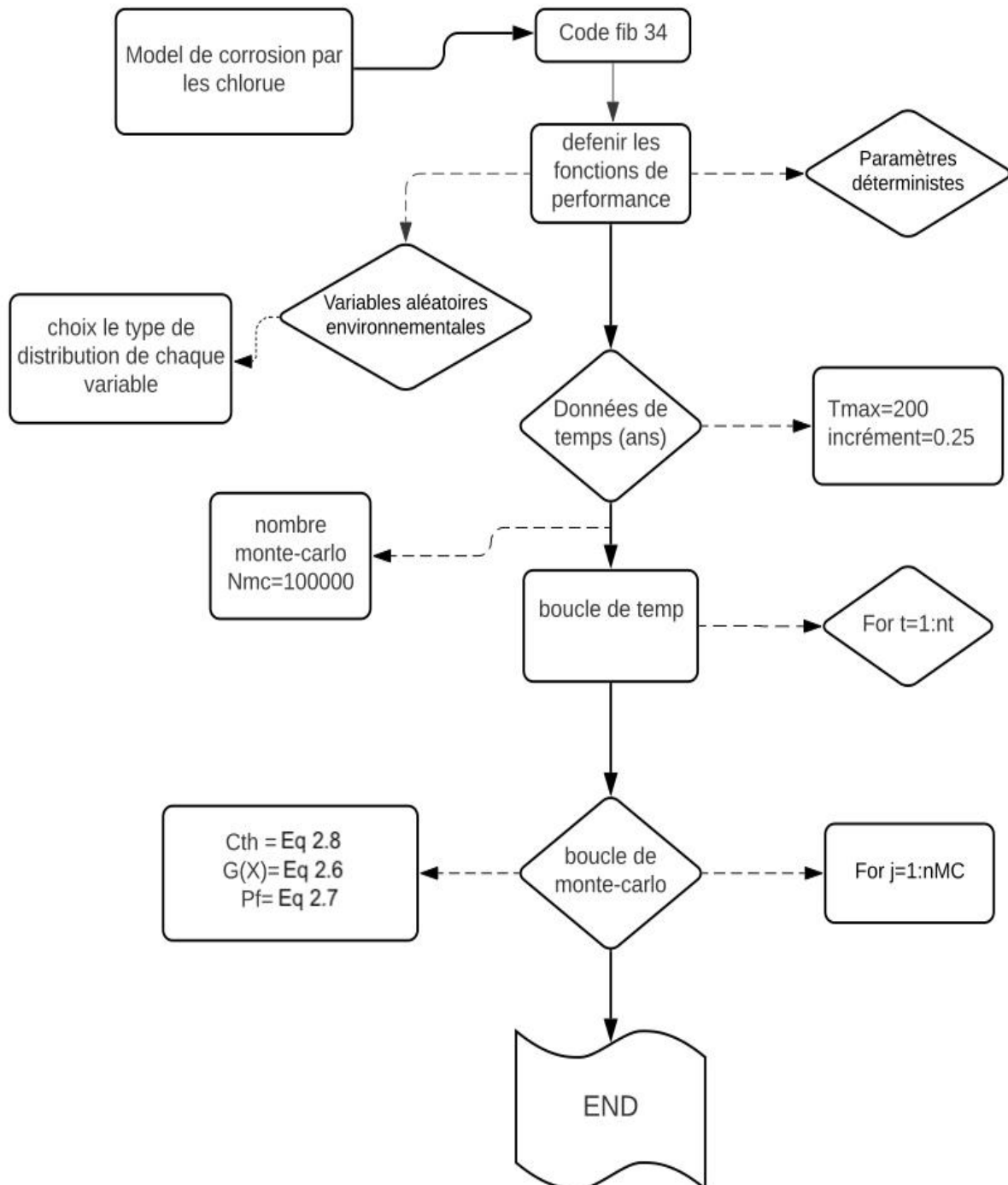


Figure 2.3 : Organigramme pour l'évaluation probabiliste de l'initiation de la corrosion des armatures de béton.

Chapitre 03

Application numérique

3.1 Introduction

Au chapitre 2, nous avons décrit la méthodologie de la simulation Monte-Carlo pour une analyse probabiliste de la durée de vie des bétons sujets à la corrosion induite par les chlorures. Le modèle nécessite une représentation probabiliste sous forme de variables aléatoires d'un certain nombre de paramètres d'entrée. Les caractéristiques de cette représentation (loi de distribution, moyenne, écart type) ont été déterminée sur la base d'essais et de cumul d'expérience pendant plusieurs années de recherche.

Ce chapitre est consacré à la présentation des résultats du modèle de corrosion induite par les chlorures proposé dans ce travail. Nous commençons par un exemple de prédiction de la durée de vie vis-à-vis de la corrosion des armatures d'une structure en béton armé. Ensuite, nous investiguons l'impact de divers facteurs et paramètres sur les performances et la durabilité des structures en béton armé sujettes à l'attaque des chlorures.

3.2 Model étudiée

Dans cet étude, la méthode de Monte Carlo a été appliquée par logiciel « Matlab R2016b » selon le code *fib* 34 , pour obtenir le temps d'initiation de corrosion par les chlorures. Pour notre model, Le nombre d'échantillonnage ou le nombre de Monte Carlo était de 100000, La durée de simulation totale était de 200 ans et a été divisée en huit cent (800) parties égales et chaque période (incrément) était de 0.25 ans. À chaque période, toutes variables non-déterministes ont été générées aléatoirement selon la distribution indiquée dans le tableau 3.1. Ensuite, le temps d'initiation de la corrosion et d'autres valeurs concernées peuvent être calculés. Le calcul ci-dessus a été répété 100000 fois à chaque instant. Une fois les données évaluées ont été collectées, le model est utilisé pour évaluer la probabilité de défaillance en fonction du temps. Puis, une approximation des fonctions de densité de probabilité (pdf) et de distribution cumulative (cdf) a été proposée par des distributions de type Lognormal, Weibull et Exponentielle.

Dans ce modèle, l'originalité de notre travail est de prendre en compte la nature non-déterministe des paramètres d'entrée et son importance dans l'estimation de la durée de service. Dans ce qui suit, un ciment de type CEM I 42,5 R a été choisi, un rapport Eau/Ciment de valeur $E/C = 0,5$. La température a été déterminée en utilisant les données disponibles d'une station

météorologique de la ville considérée (Tébessa). Il est trouvé a une valeur maximal $T_{max}=41^{\circ}\text{C}$ et une valeur minimal $T_{min} = 11^{\circ}\text{C}$, et la température Reference $T_{ref} = 20^{\circ}\text{C}$.

Les autres paramètres et les variables aléatoires considérée sont présentée dans le Tableau 3.1.

Paramètre	Symbole	Unité	Distribution	Moyenne	Écart-type
Concentration critique en chlorure	C_{crit}	% wt of cement	Log-Normal	0.6	0.15
concentration des chlorures en profondeur Δx	$C_{S,\Delta x}$	% wt of cement	Normal	3.25	1.23
concentration des chlorures en $\Delta x=0$	$C_{S,0}$	% wt of cement	-	2.78	-
profondeur de la zone de convection	Δx	mm	Beta	8.9	5.6
L'enrobage	x	mm	Log-Normal	60	10
Variable de régression	be	k	Normal	4800	700
L'exposant de vieillissant	a	-	Normal	0.3	0.12
coefficient de migration des chlorures	$D_{RCM,0}$	$\text{mm}^2/\text{années}$	Normal	498.3	99.66
Coefficient environnemental	A	%	Normal	17	0.0374
teneur initiale en chlorure	C_0	% wt of cement	-	0	-
Point de référence du temps	t_0	ans	-	0.0767	-
paramètre de transfert	Kt	-	-	1	-
coefficient du temps	a	-	-	1.38	-

Tableau 3.1 Paramètres d'entrée du modèle.

3.3 Temps d'initiation de la corrosion

Sur la base des paramètres statistiques présentés précédemment, l'évolution de la probabilité d'initiation de la corrosion au cours du temps, pour l'attaque des ions chlorures considérées dans cette application, est présentée dans la figure (3.1). La probabilité de défaillance (initiation de la corrosion) augmente au fur et à mesure que la structure vieillisse. Cela est dû à la pénétration des chlorures dans le béton et leur accumulation au voisinage des armatures jusqu'à atteinte de la teneur critique. Selon le type et l'importance de la structure, la durée de vie cible varie de 50 à 100 ans. Pour une durée de vie cible de 50 ans, pour le cas d'un bâtiment, la probabilité que la teneur critique en chlorures sera atteinte (initiation de la corrosion) est de l'ordre de 5×10^{-4} . Pour une durée de vie cible de 100 ans, pour le cas d'un ouvrage d'art, la probabilité que la teneur critique en chlorures sera atteinte est de l'ordre de 7.5×10^{-4} . Pour des structures de génie civil, la probabilité de défaillance critique est de l'ordre de 10^{-4} [fib-34]. Cela signifie que la structure étudiée devra atteindre sa durée de vie avec un très faible risque de corrosion des armatures.

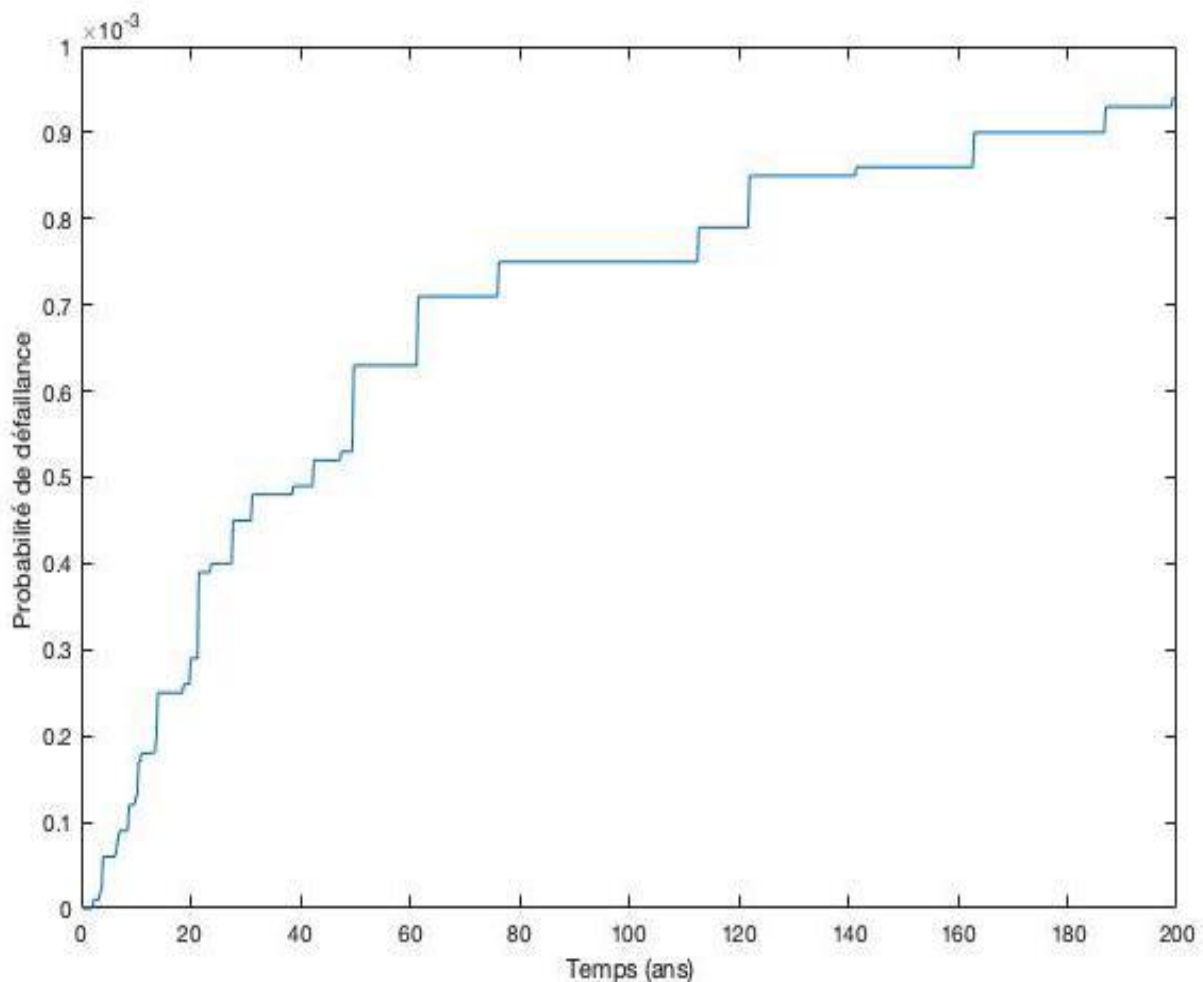


Figure 3.1 Probabilité d'initiation de la corrosion en fonction du temps.

Plusieurs lois de probabilités ont été utilisées pour représenter approximativement le temps d'initiation de la corrosion. Les figures 3.2 et 3.3 présentent les fonctions de distribution cumulative (CDF) et de densité de probabilité (PDF) discrètes du temps d'initiation de la corrosion obtenues par le modèle et trois approximations qui les représentent le mieux (lognormale, Weibull et exponentielle). Selon ces trois lois, la moyenne du temps d'initiation de la corrosion varie de 54.9556 à 60.1669, et son écart type varie de 1.07238 à 1.07843.

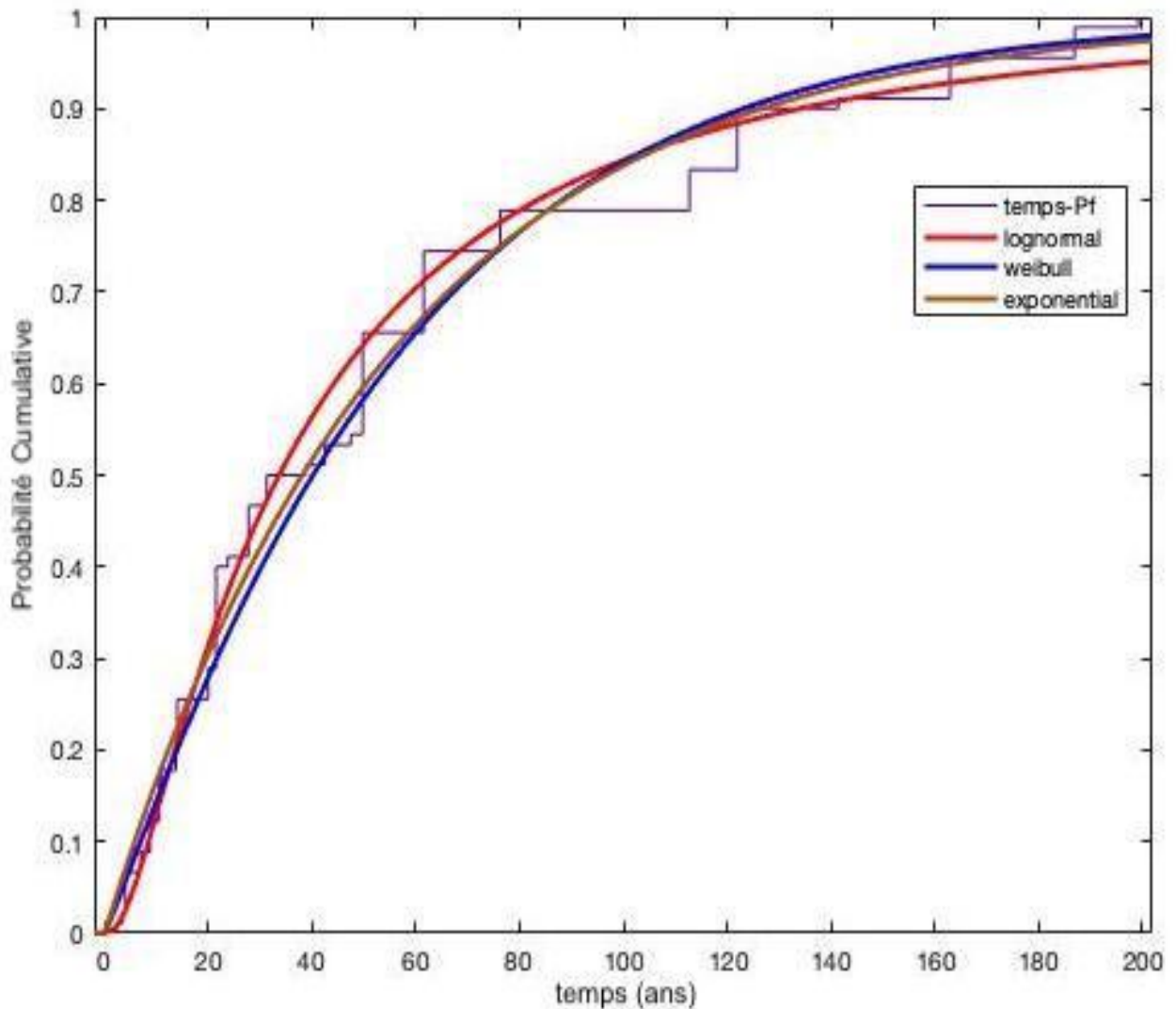


Figure 3.2 Fonction de distribution cumulative CDF pour différents lois de distribution (lognormale, Weibull et exponentielle).

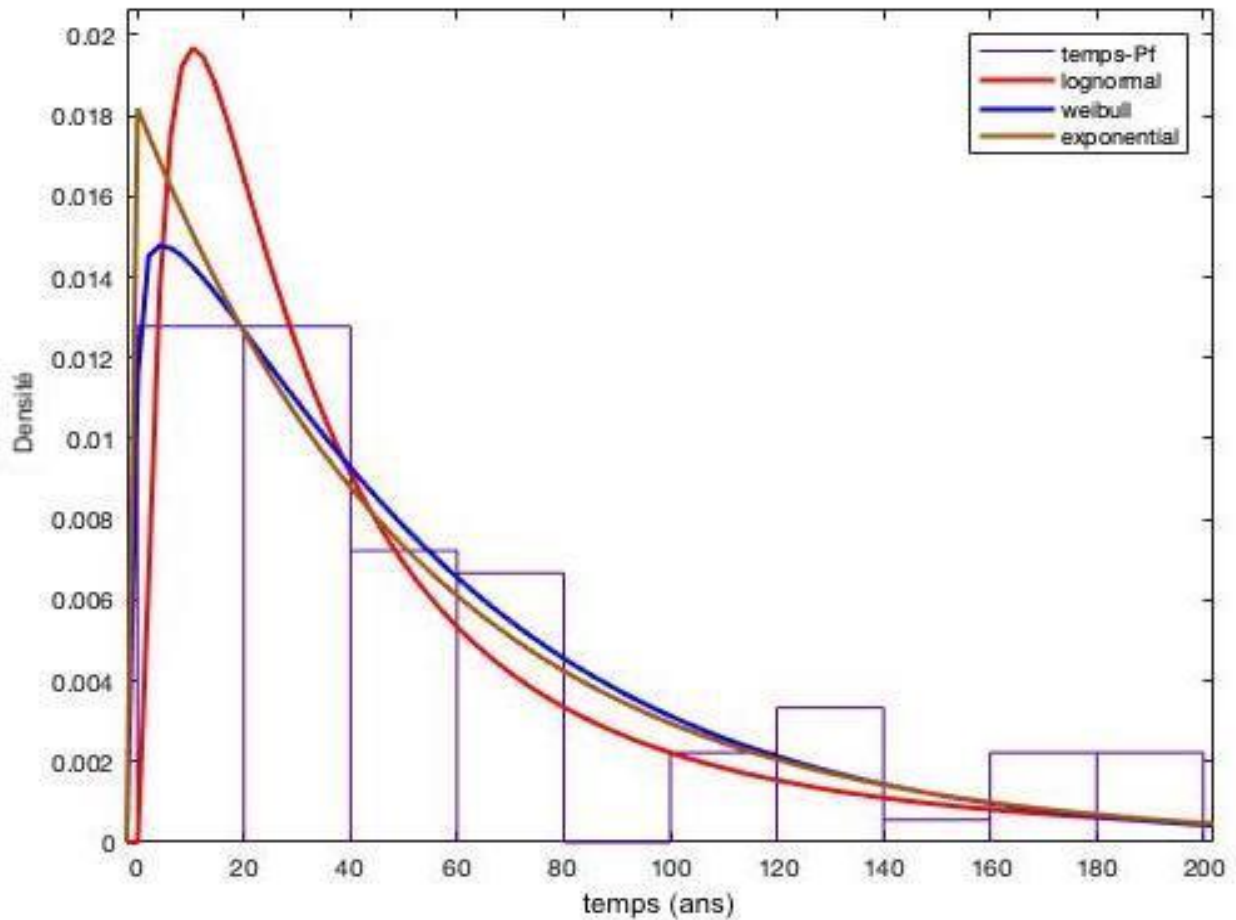


Figure 3.3 Fonction de densité de probabilité PDF pour différents lois de distribution.

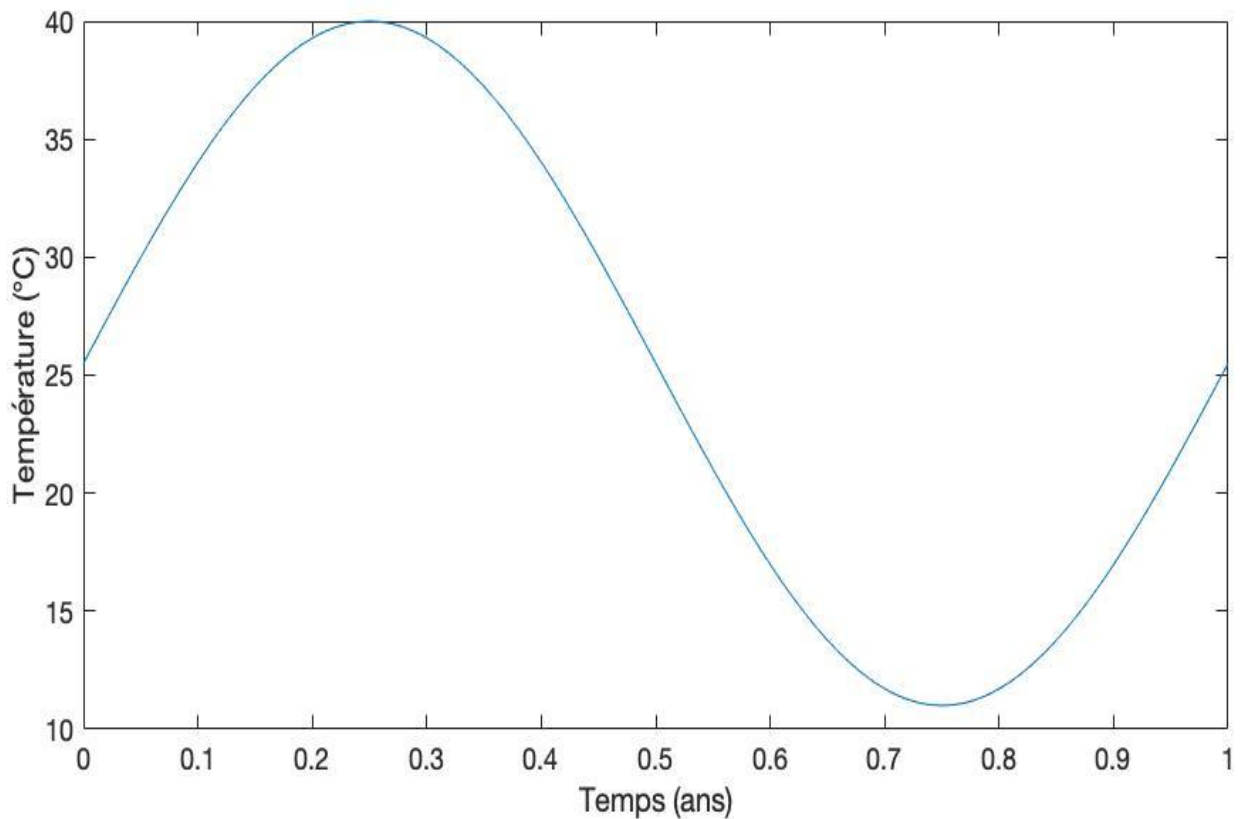


Figure 3.4 Variation de la température dans un an (Tébessa).

3.4 Étude Paramétrique

Dans cette partie, nous étudierons l'effet de chacun des paramètres qui influent sur la phase d'initiation de la corrosion induite par les chlorures, la compréhension de leur effet sur la dégradation des structures est l'objectif principal de ce travail. Les paramètres pris en considération sont le rapport E/C, l'enrobage, le type du ciment et des additifs, la concentration de chlorures de profondeur DX (l'effet de la convection) et la température extérieure.

Paramètre	Symbole	Unité	Valeur	
Rapport eau/ciment	E/C	-	0.40, 0.45, 0.50, 0.55, 0.60	
Température réelle	Treal	°C	Alger	max=36 ; min=10
			Tromso	max=12.5 ; min= -15.5
			Lagos	max=29.4 ; min=24.6
Enrobage	x	mm	40, 50, 60, 70, 80	

Tableau 3.2 Paramètres étudiée pour la compréhension de leur effet sur la corrosion.

3.4.1 Effet du Rapport E/C

Pour investiguer l'effet du rapport eau/ciment (E/C) sur le temps d'initiation de la corrosion, nous avons étudié un béton confectionné avec un ciment de type CEM I 42,5 R et cinq différentes valeurs du rapport E/C (0.40, 0.45, 0.50, 0.55 et 0.60). Les résultats des simulations sont montrés dans la figure (3.5). Nous remarquons que le rapport E/C a un effet considérable sur l'évolution de la corrosion dans le béton. Plus le rapport augmente plus l'initiation de la corrosion est accélérée et sa probabilité augmente. Ce résultat peut s'expliquer par l'influence de rapport E/C sur les propriétés du béton (réduction de la perméabilité), affectant ainsi la pénétration des chlorures dans le béton (la diffusion et la convection du chlorures).

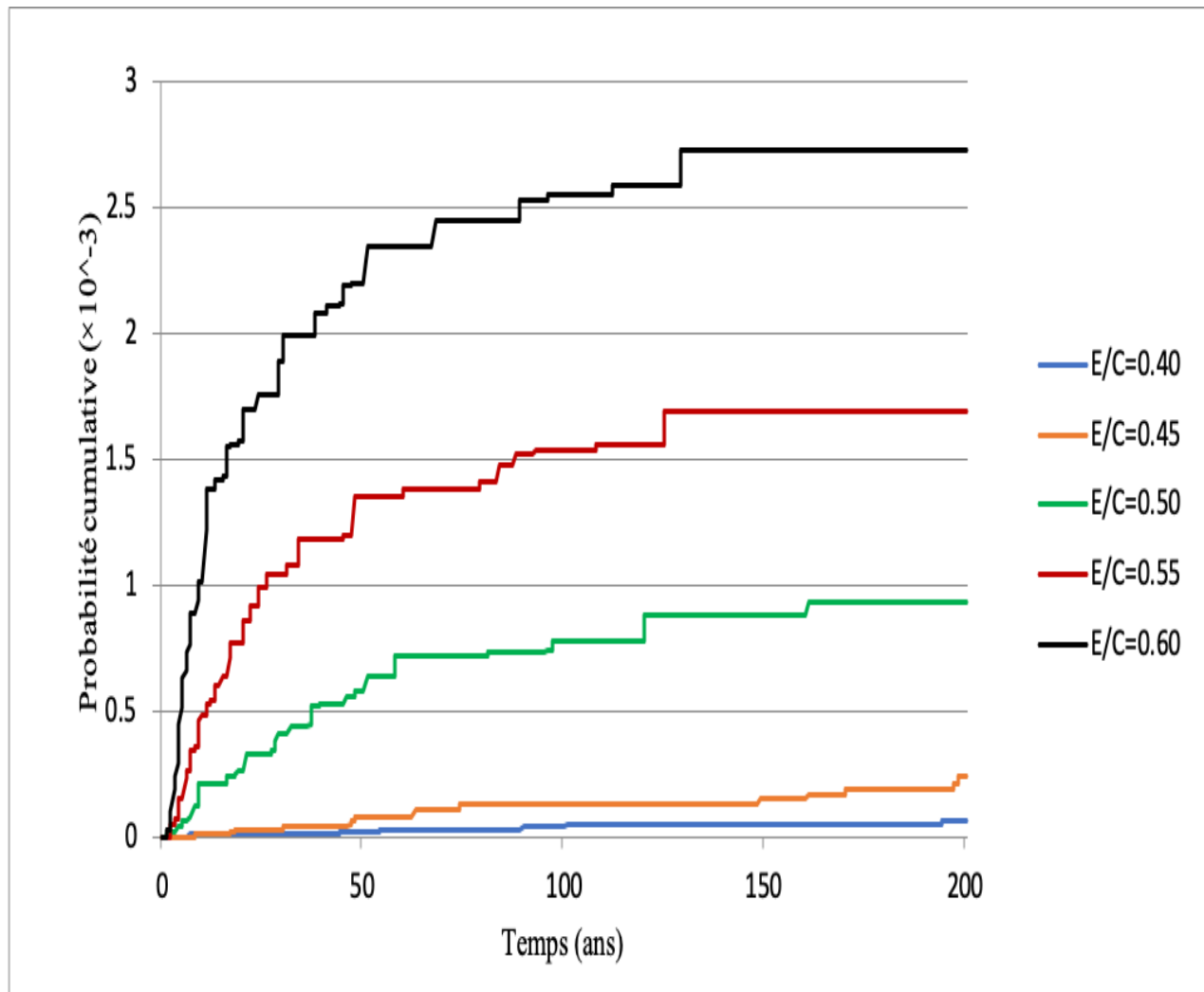


Figure 3.5 Probabilité d'initiation de la corrosion en fonction du temps (E/C).

3.4.2 Effet du type de liant utilisé

Pour évaluer l'effet du type de liant utilisé pour la confection du béton sur le temps d'initiation de la corrosion, nous avons utilisé plusieurs types de liants, à savoir (CEM I 42,5 R, CEM I 42.5 R + FA, CEM III/B 42.5). Le rapport adopté est de $E/C=0.5$. Les résultats obtenus des simulations sont présentés sur la figure (3.6). Les résultats montrent que le type du liant joue un rôle significatif vis-à-vis de la corrosion. On observe que la probabilité d'initiation de CEM 3/B stabilise à une valeur nulle dans toute la durée de vie de la structure, tandis que le CEM I + FA augmente après 30 ans de service d'une façon très faible, et le CEM I augmente de façon importante. En conséquence, il a été constaté que le CEM 3/B sont le meilleur pour des structures dans un environnement agressif, et l'utilisation d'additifs améliore la durabilité de la structure à la corrosion et augmente la durée de vie de la structure.

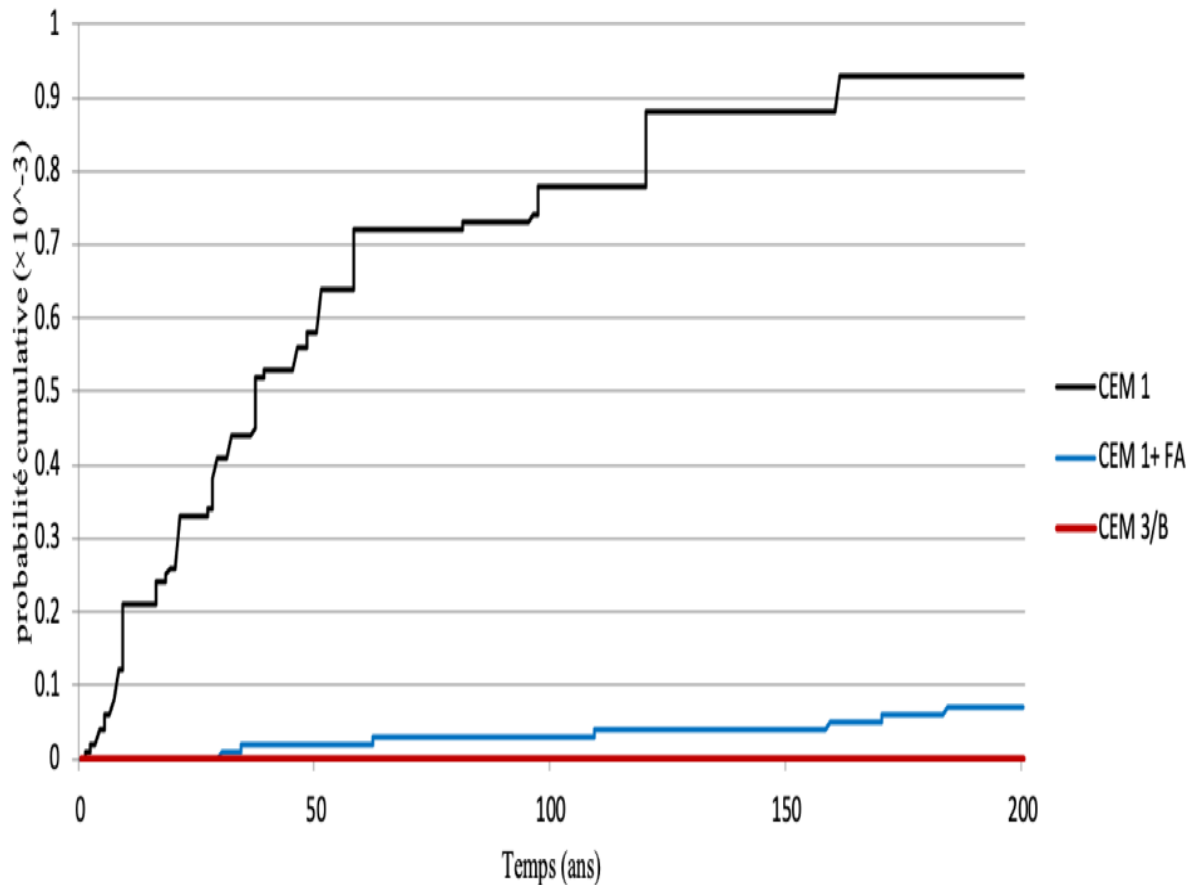


Figure 3.6 Probabilité d'initiation de la corrosion en fonction du temps (différents type de liants).

3.4.3 Effet de la convection des chlorures

La convection accélère la pénétration des chlorures en surface, nous pouvons donc nous attendre à ce qu'il ait une influence majeure sur le processus de corrosion par les chlorures en général et sur le temps d'initiation de la corrosion plus particulièrement. Pour étudier la sensibilité du modèle à la convection, la concentration des chlorures en surface $C_{S,DX}$ est considérée à différentes profondeurs pour refléter l'effet de la zone de transport convectif. Les distributions (Pf, CDF et PDF) pour $C_{S,0}$ ayant une profondeur de convection $\Delta x=0$ et $C_{S,\Delta x}$ ayant une Δx normalement distribué ont été obtenues. Les résultats des simulations sont présentés sur la figure (3.7). On peut observer une faible augmentation de la probabilité de défaillance pour $\Delta x \neq 0$ (en présence de la convection) par rapport à $\Delta x=0$ (absence de la convection). Cela signifie que l'effet de la convection sur l'initiation de la corrosion est mineur. Cela contredit ce qui est généralement accepté que la convection accélère significativement le transport des chlorures et par conséquent l'initiation de la corrosion. L'approche adoptée pour la prise en compte de la convection n'est peut-être pas efficace.

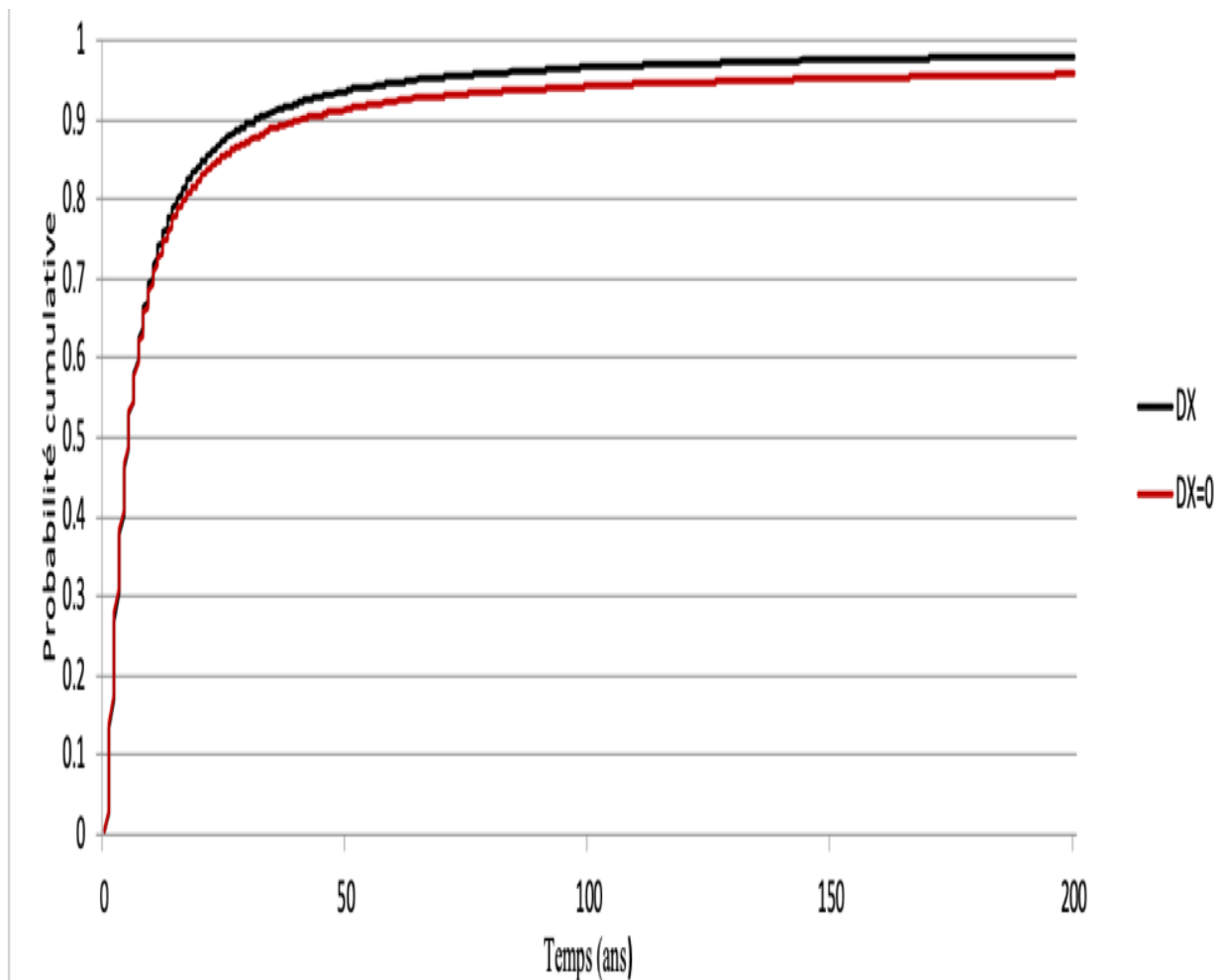


Figure 3.7 Probabilité d'initiation de la corrosion en fonction du temps ($C_{S,0}$ et $C_{S,\Delta x}$).

3.4.4 Effet de la températures Extérieure

L'effet de la température extérieure sur l'attaque des chlorures et sur l'estimation de la durée de vie doit être pris en compte lors de la conception de structures en béton armé, Pour cela, nous choisissons 3 villes côtières :

- Tromso (Norvège) : climat subarctique humide et froid, avec des valeurs de température $T_{max}= 12.5$ °C et $T_{min}= -15.5$ °C ;
- Lagos (Nigeria) : climat tropical humide et très chaud , avec des valeurs de température $T_{max}= 29.4$ °C et $T_{min}= 24.6$ °C ;
- Alger (Algérie) : climat méditerranéen humide et chaud , avec des valeurs de température $T_{max}=36$ °C et $T_{min}=10$ °C.

Les fonctions de distributions cumulatives (CDF) du temps d'initiation de la corrosion dans les trois villes sont tracées sur les figures (3.8) et (3.9). Malgré la différence du climat de ces villes,

les résultats sont presque identiques. Cela signifie que la température a une très faible influence sur le transport des chlorures dans le béton, par conséquent, la probabilité d'initiation de la corrosion est aussi peu affectée par le changement de température. Cela est en accord avec des travaux antérieurs [13] qui ont trouvé que la phase d'initiation de la corrosion est peu affectée par la température tandis que la phase de propagation est beaucoup plus affectée par la température.

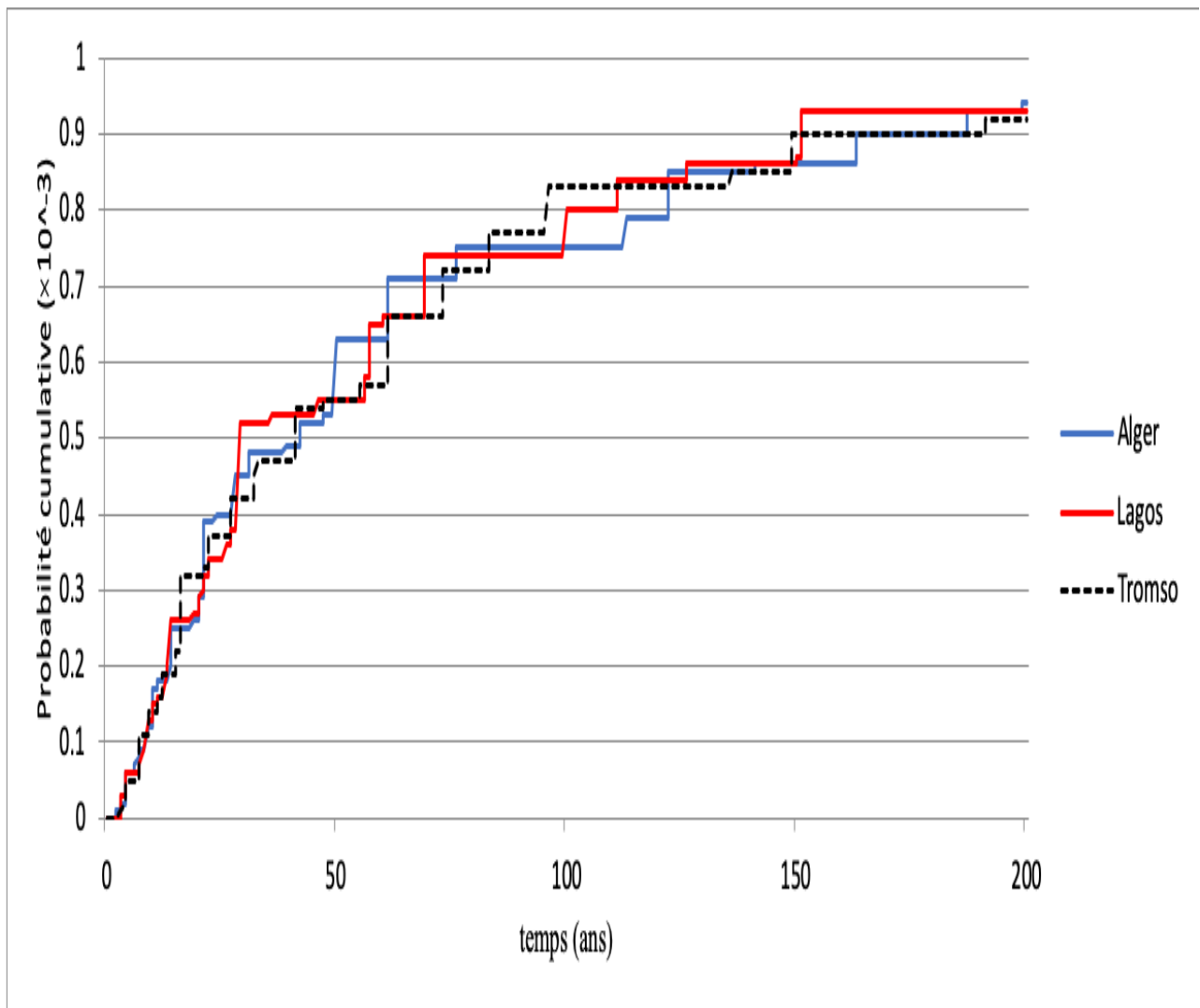


Figure 3.8 Probabilité d'initiation de la corrosion en fonction du temps (Alger, Tromso, Lagos).

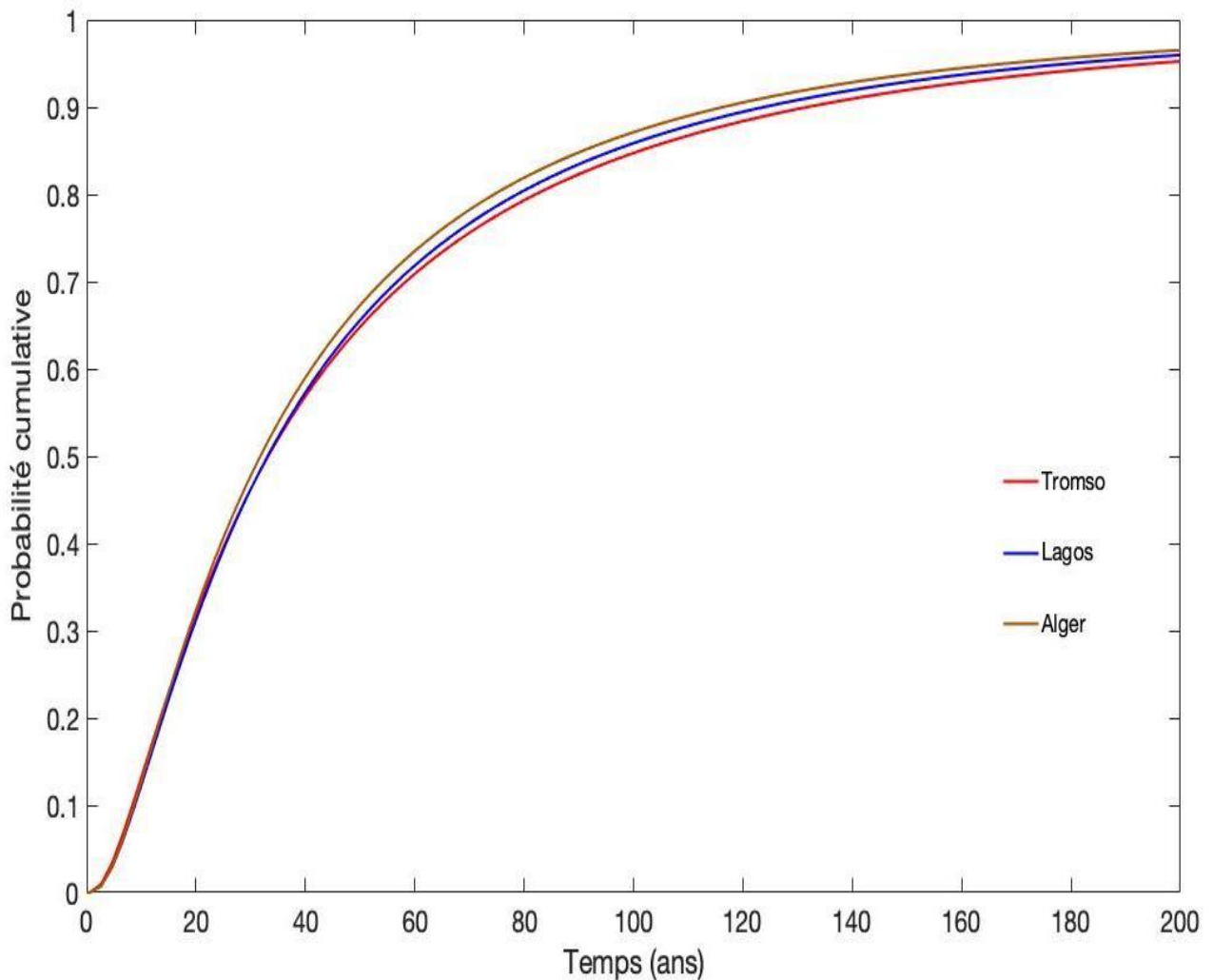


Figure 3.9 Effet des conditions climatiques sur la probabilité d'initiation de la corrosion (CDF approximée par une loi lognormale).

3.4.5 Effet de l'enrobage

Pour étudier l'effet de l'enrobage sur la corrosion des aciers dans les bétons, nous avons considéré un rapport E/C=0.5 et la température réelle de la ville Tébessa. L'évolution de la corrosion est étudiée pour cinq valeurs nominales différentes de l'enrobage entre 40 et 80 mm avec un pas de 10 mm et un écart-type de 10 mm. À travers les résultats montrés à la figure (3.10) et la figure (3.11), on peut constater que l'enrobage a un effet considérable sur l'évolution de la corrosion (temps d'initiation de la corrosion). Plus l'enrobage augmente plus la probabilité de défaillance est moindre. Cela peut s'expliquer par la plus grande distance à parcourir par les ions chlorures pour atteindre les armatures, et par conséquent, le temps d'initiation de la corrosion est plus important.

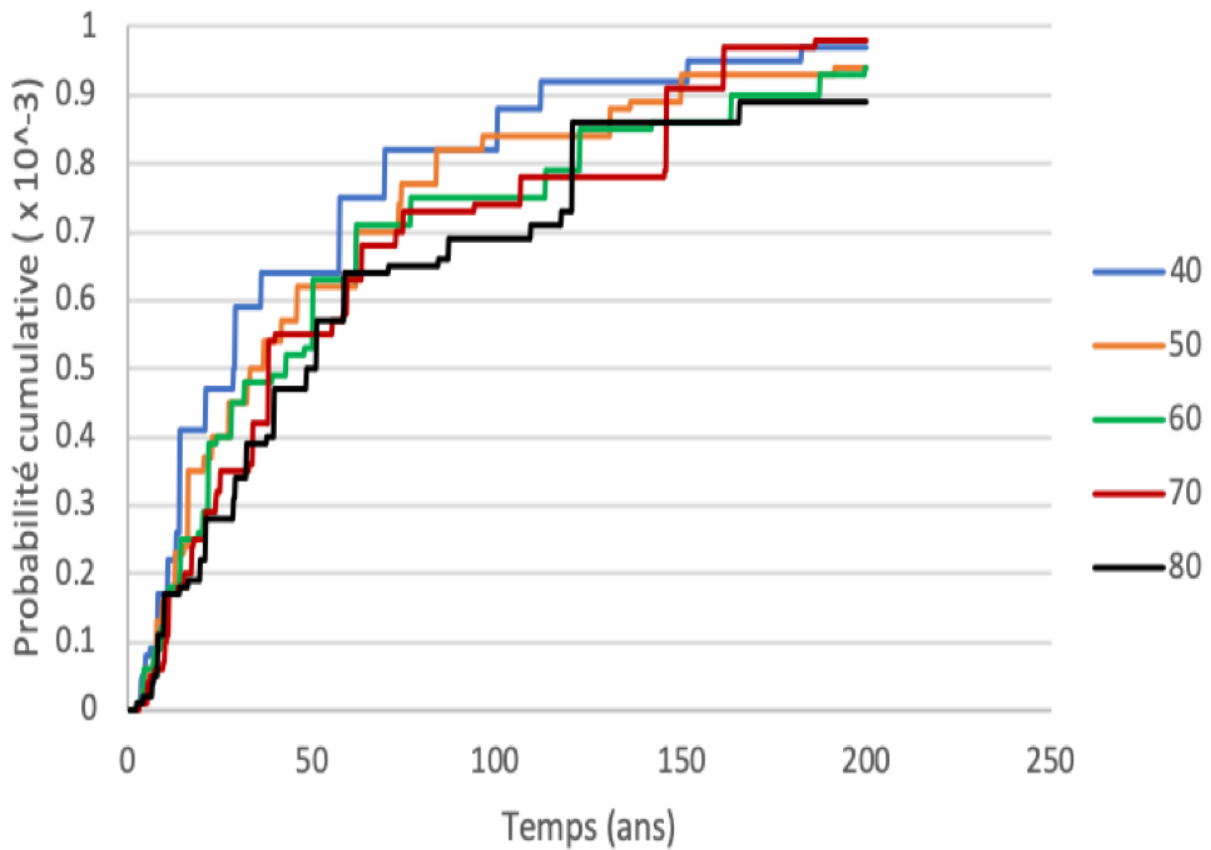


Figure 3.10 Probabilité d'initiation de la corrosion en fonction du temps (enrobage).

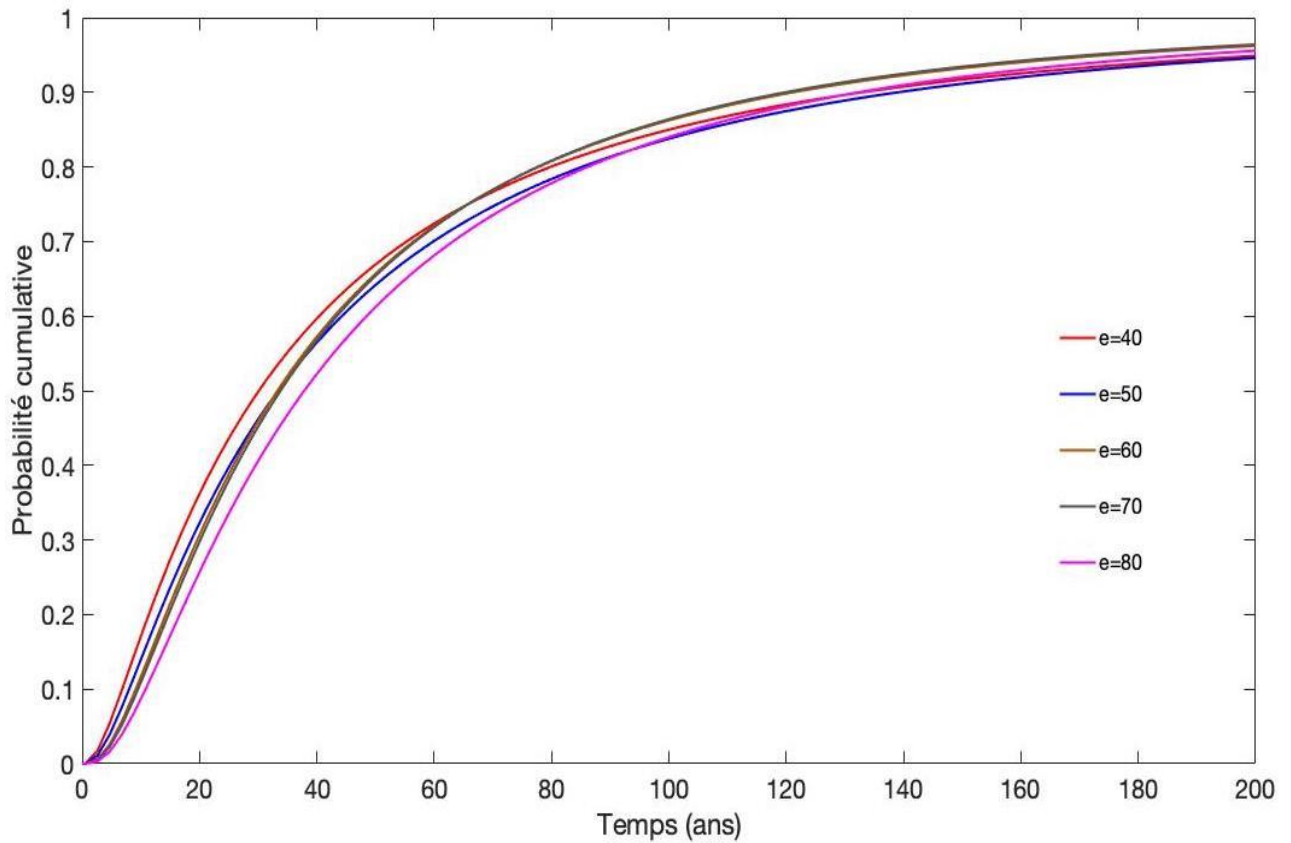


Figure 3.11 Effet de l'enrobage sur la probabilité d'initiation de la corrosion (CDF approximée par une loi lognormale).

Conclusion

Générale

Conclusion Générale

Dans ce travail, un modèle de prédiction de la durée de vie des structures en béton armé vis-à-vis de la corrosion induite par les chlorures a été développé. Il prend en compte la variabilité aléatoire de tous les paramètres d'entrée et est basé sur la méthode proposée par le code *fib-34*. L'analyse probabiliste pour l'estimation du temps d'initiation de la corrosion a été performée par la méthode de simulation Monte Carlo. Le modèle développé a été implémenté dans un programme sur MATLAB. Une étude paramétrique a été menée pour investiguer l'effet de certains facteurs sur la probabilité d'initiation de la corrosion. Les différents paramètres considérés sont la température, le rapport E/C, le type de liant, l'enrobage et la convection. Les résultats obtenus ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- Le temps d'initiation de la corrosion peut suivre approximativement plusieurs fonctions de densités de probabilités, à savoir la fonction exponentielle, lognormale et Weibull ;
- Plus le rapport E/C augmente plus la probabilité d'initiation de la corrosion augmente et temps d'initiation diminue ;
- Parmi les types de ciments utilisés, celui du type 3 a montré la meilleure performance vis-à-vis de la pénétration des chlorures ;
- L'utilisation des additifs minéraux réduit la probabilité d'initiation de la corrosion ;
- La température a un effet mineur sur la probabilité d'initiation de la corrosion ;
- D'après les résultats obtenus, l'enrobage a un effet mineur sur la probabilité d'initiation de la corrosion. Cela contredit ce qui est logique et généralement accepté par la communauté scientifique ;
- L'étude de l'influence de la convection sur la probabilité d'initiation de la corrosion a abouti au fait que cette influence est négligeable. Cela n'est pas logique, car le transport convectif des chlorures est plus rapide que le transport diffusif, ce qui signifie que l'initiation de la corrosion devrait être plus rapide.

À titre de recommandations pour des futurs travaux de recherche, pour de nombreux paramètres d'entrée, ces valeurs peuvent ne pas être entièrement précises et réalistes, et par conséquent leur utilisation peut conduire à des résultats de modélisation très incertains. Par conséquent, des niveaux d'évaluation plus élevés utilisant des mesures supplémentaires sur site et / ou des tests de laboratoire sont recommandés.

Références bibliographiques

- [1] Ployaert C., la corrosion des armatures des béton armés et précontraints, Fédération de l'Industrie Cimentière Belge, 2008, 16, p. 7.
- [2] Dooms B., Pollet V., Mosselmans G., la corrosion des armatures induite par la présence de chlorures dans le béton, CT gros œuvre , 2008, 14, pp.1.
- [3] Bureau de normalisation NBN B 15-001 Supplément à la NBN EN 206-1. Béton. Spécification, performances, production et conformité. Bruxelles, NBN, 2004, 3^e éd.
- [4] Bureau de normalisation NBN EN 206-1 Béton. Partie 1 : spécifications, performances, production et conformité. Bruxelles, NBN, 2001.
- [5] Groupement belge du béton Cours de technologie du béton. Bruxelles, GBB, 2006.
- [6] Mekkaoui Alaoui M., Etude du comportement de l'acier inoxydable URN45N et l'acier au carbone C38 dans différents milieux simulant le béton. Thèse de doctorat d'université. Mohammed V : Université de Mohammed V, 2014, 158 p.
- [7] J. Baron, J. P. Ollivier, « Durabilité des bétons ». Presses de l'école Nationale Ponts et Chaussées, 1992.
- [8] Fabrice Deby M., Approche probabiliste de la durabilité des bétons en environnement marin. Thèse de doctorat d'université . Toulouse : Université de Toulouse, 2008, 202 p.
- [9] Alonso, C., Andrade, C., Castellote, M. et Castro, P. (2000). Chloride threshold values to depassivate reinforcing bars embedded in a standardized opc mortar. Cement and Concrete Research, 30:1047–1055.
- [10] Glass, G. K. et Buenfeld, N. R. (1997). The presentation of the chloride threshold level for corrosion of steel in concrete. Corrosion Science, 39:1001-1013.
- [11] Izquierdo, D., Alonso, C., Andrade, C. et Castellote, M. (2004). Potentiostatic chloride threshold values for rebar depassivation : experimental and statistical study. Electrochimica Acta, 49:2731{2739.
- [12] Hausman, D. A. (1967). Steel corrosion in concrete : how does it occur? Materials protection.
- [13] EL HASSAN G., Evaluation fiabiliste de l'impact des facteurs climatiques sur la corrosion des poutres en béton armé application au cas libanais. Thèse de doctorat d'université. Blaise pascal – Clermont II : Université blaise pascal – clermont II, 2010, 175 p.
- [14] A. Raharinaivo, G. Arliguie, T. Chaussadent, G. Grimaldi, V. Pollet, G. Taché. La corrosion et la protection des aciers dans le béton, Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 167 pages, 1998.

- [15] G.K. Glass, N.R. Buenfeld. The presentation of the chloride threshold level for corrosion of steel in concrete, *Corrosion Science*, vol. 39, no. 5, p. 1001 – 1013, 1997.
- [16] Project Funded by the European Commission under the Transport, RTD Programme of the 4th Framework Programme - Bridge Management and Condition Monitoring, BRIME PL97-2220, January 2001.
- [17] K. Pettersson dans R.K. Dhir, M.R. Jones (Eds.). *Concrete2000*, vol. 1, E&FN Spon, London, p. 461, 1993.
- [18] A. Almusallam. Effect of degree of corrosion on the properties of reinforcing steel bars, *Construction and Building Materials* vol. 15, p. 361-368, 2001.
- [19] TOUIL B., Étude de la diffusion des chlorures dans les bétons locaux. Thèse de magister d'université. Aboubeker Belkaid – Telemcen : Université A B – Telemcen, 2009, 182 p.
- [20] LUCIE S., Durabilité des ouvrages en béton soumis à la corrosion : optimisation par une approche probabiliste. Thèse de doctorat d'université. Toulouse : Université de Toulouse, 2019, 215 p.
- [21] TAHLAITI M, « Étude de la pénétration des chlorures et de l'amorçage de la corrosion en zone saturée et en zone de marnage », Thèse de doctorat, Université de La Rochelle, 2010.
- [22] POWERS TC, COPELAND LE, HAYES JC, MANN HN, "Permeability of Portland cement past", *Journal of American Concrete Institute*, 51,285-298, 1954.
- [23] HYVERT Nicolas, « Application de l'approche probabiliste à la durabilité des produits préfabriqués en béton », thèse de doctorat de l'université de Toulouse en collaboration avec le CERIB, 2009.
- [24] YEAU KY, KIM EK, « An experimental study on corrosion resistance of concrete with ground granulate blast-furnace slag », *Cement and Concrete Research*, 35, 1391-1399, 2005.
- [25] YIGYTER H, YAZICI H, AYDIN S, « Effects of cement type, water/cement ratio and cement content on sea water resistance of concrete », *Building and Environment*, 42, 2017.
- [26] DHIR RK, EL-MOHR MAK, DYER TD, « Chloride binding in GGBS concrete », *Cement and Concrete Research*, 26, n°12, 1767-1773, 1996.
- [27] LUO R, CAI Y, WANG C, HUANG X, « Study of chloride binding and diffusion in GGBS concrete », *Cement and Concrete Research*, 33, 1-7, 2003.
- [28] LAY S, ZELLER S, SCHIESSL P, « Time dependent chloride migration coefficient of concrete as input to a probabilistic service life model », *Proceedings of int. workshop on management of durability in the building process*, Milano, published as CD-ROM by workshop organizers, 2003.
- [29] SHI X, XIE N, FORTUNE K, GONG J, « Durability of steel reinforced concrete in chloride environments: an overview », *Construction and Building Materials*, 30, 125-138, 2012.

- [30] KHAN MI, “Nanostructure and microstructure of cement concrete incorporating multicementitious composites”, Transportation Research Board, vol. 2141, 2010.
- [31] AMRANI L., Durabilité des éléments en Béton Armé en milieu agressif corrosion des Armatures. Thèse de Magister d’université. Mouloud Mammeri de TIZI – OUZOU : Université de TIZI – OUZOU, 2012, 100 p.
- [32] Auyeung Y., Balaguru P., Chung L., Bond behaviour of corroded reinforcing bars, ACI Material Journal, vol. 97, no. 2, p. 214 – 220, 2000.
- [33] Maaddawy T. E., Soudki K., A model for prediction of time from corrosion initiation to corrosion cracking, Cement & Concrete Composites, vol. 29, no. 3, p. 168 – 175, 2007.
- [34] Weyers R.E.. Service life model for concrete structures in chloride laden environments, ACI Material Journal, vol. 95, no. 4, p. 445 – 453, 1998.
- [35] Andrade C., Alonso C., Garcia D., Rodriguez J., Remaining lifetime of reinforced concrete structures: Effect of corrosion on the mechanical properties of the steel, dans Int. Conf. on life prediction of corrodible structures, NACE, 12/1–12/11. 1991.
- [36] Rodriguez J., Ortega L.M., Casal J., Load carrying capacity of concrete structures with corroded reinforcements, Construction building and materials, vol. 11, no.4, p. 239 – 248, 1997.
- [37] Stewart M.G., Al-Harthy A.. Pitting corrosion and structural reliability of corroding RC structures: Experimental data and probabilistic analysis, Reliability Engineering and System Safety, vol. 93, no. 3, p. 373 – 382, 2008.
- [38] Ferreira M., Probability-based durability design of concrete structures in marine Environment. Minho: University of Minho, 2004, 340 p.
- [39] Stewart M.G., Workmanship and its Influence on Probabilistic Models of Concrete Compressive Strength, ACI Materials Journal (American Concrete Institute), vol. 9, no. 4, p. 361 – 372, 1995.
- [40] Phu Tho Nguyen. Étude multiphysique du transfert de chlorures dans les bétons insaturés : prédiction de l’initiation de la corrosion des aciers. Thèse de doctorat d’université de La Rochelle, 2014. 23 p.
- [41] Bentur, A., Berke, N., Diamond, S., 1997. Steel Corrosion in Concrete: Fundamentals and civil engineering practice, First. ed. CRC Press, London, UK.
- [42] Berto L., Simioni P., Satta A., Numerical modelling of bond behaviour in RC structures affected by reinforcement corrosion, Engineering Structures, vol. 30, no. 5, p.1375–1385, 2008.
- [43] DEBY Fabrice, « Approche probabiliste de la durabilité des betons en environnement marin », thèse de doctorat de l’université de Toulouse, 2008.

- [44] Eurocodes 2 – norme NF EN 1992-2. Calcul des structures en béton Partie 1-1: Règles générales et règles pour les bâtiments, 2005 et Annexe Nationale à la NF EN 1992 -1- 1: 2005 (2015).
- [45] fib bulletin 34: Model code for service life design, International Federation for Structural Concrete, Lausanne, Switzerland, ISBN 978-2-88394-074-1 (2006).
- [46] Calcul des structures en béton - Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments, EN 1992-1-1, 2004.
- [47] M. Lemaire, A. Chateaneuf, J.C. Mitteau. Fiabilité des structures, couplage mécano-fiabiliste statique; Hermès Sciences publications, Lavoisier 2005.
- [48] Nogueira et al., Probabilistic failure modelling of reinforced concrete structures subjected to chloride penetration, International Journal of Advanced Structural Engineering, 2012, 14, P.5–6.
- [49] Nowak AS, Collins KR (2000) Reliability of structures. McGraw Hill, Michigan.
- [50] CSEP; Introduction to monte carlo methods. Computational Science Projects, 1995.
- [51] Cherifi WNE., Houmadi Y., Benali O., probabilistic analysis for estimation of the initiation time of corrosion, Mathematical Modelling in Civil Engineering, 2019, 13, P. 11.
- [52] DuraCrete : General guidelines for durability design and redesign research project BE91347 project “Probabilistic performance based durability design of concrete structures” Document R15:109, 2000.
- [53] Comité Européen du Béton « Manuel Sécurité des Structures – concepts généraux charges et actions », Bulletins d’informations 106 et 107, 1975.
- [54] Comité Européen du Béton « General principles on Reliability for Structures », Bulletin d’information 191, 1988.
- [55] Hamidane.H, et al., Reliability analysis of corrosion initiation in reinforced concrete structures subjected to chlorides in presence of epistemic uncertainties, Structural Safety, 2020, 12, PP.1- 4.
- [56] Projet ANR Modevie “Modélisation du vieillissement des ouvrages en béton”, 2014.
- [57] DARTS – Durable and Reliable Tunnel Structures: Data, European Commission, Growths 2000, Contract G1RD-CT-2000-00467, Project GrD1-25633, 2004.
- [58] Ivan.Z, et al., Use of chloride ingress model for condition assessment in bridge management, Original scientific paper, 2018, 15, PP. 2-4.