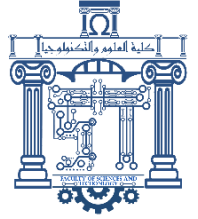




الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
Republique Algerienne Democratique Et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



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 : TERA A Aymén

Sujet

**Analyse fiabiliste de la durabilité des structures en
béton armé sujettes à l'action des chlorures en
présence d'incertitudes épistémiques**

Présenté et soutenu publiquement, le 23 / 06 /2021, devant le jury composé de :

Pr Msabhia Ali
Dr HamidanH'mida
Pr HarkatiAbd El Hedi

Maître Assistant A
Maître de conférences B
Maître Assistant A

Président
Rapporteur
Examinateur 1

Année Universitaire : 2020/2021

DEDICACE

À ma chère maman

À mon cher frère

À mes chères familles et tous les amis

Remerciements

Mes sincères remerciements vont à mon encadrant Dr. Hamidan h'mida, pour son attention, qui a supervisé, dirigé, conseillé, et supporté tout le temps de la rédaction de cette mémoire et sa connaissance scientifique qui m'ont beaucoup apporté tout au long de ce parcours. Nous adressons nos remerciements également à l'ensemble du personnel du département de génie civil, d'université de Tébessa, et aux membres de jury. Je remercie aussi tous mes collègues et mes amis au département de Génie civil, pour l'ambiance conviviale et amicale qui m'a été très profitable.

Enfin, je remercie de tout mon cœur maman Noura, pour son soutien, Leur amour, son encouragement, sa compréhension, leur confiance en moi m'ont toujours été une source de motivation et sa patience dans tous les domaines et surtout au cours de cette mémoire.

ملخص

إنّ تآكل التعزيزات هو إحدى الأمراض التي تؤثر على أداء هياكل الخرسانة المسلحة وهي سبب رئيسي لتدهورها. هذا التآكل قد ينتج من جزيء هجوم الكلوريدات أو دورات التجميد والذوبان. تتمثل النتائج المترتبة على هذا التآكل في تغير قطر الفولاذ وعدم تمسكه بالخرسانة، وهما العاملان اللذان يؤديان إلى تدهور الخرسانة والتقليل من العمر التشغيلي لها. هذا النوع من الضرر هو المسؤول عن إلحاق الخسائر المادية لمعظم دول العالم الكبرى من أجل صيانة وإصلاح الهياكل التي تدهورت.

في إطار هذا العمل قمنا بتطوير نموذج لتحليل متانة الهياكل الخرسانية المسلحة المعرضة للتآكل الناجم عن هجوم الكلوريد، مع مراعاة وجود تأثير عدم اليقين من أجل التنبؤ بفترة بدء التآكل. استند نموذج تغلغل الكلوريد باستخدام طريقة الجمع بين محاكاة مونت كارلو والنهج الفاصل.

تم توجيه دراستنا في هذا العمل حول آليات النقل والظروف البيئية ومن جهة أخرى قمنا بشرح أهم العوامل التي تؤثر على ديمومة الخرسانة من وجهة التآكل. تم استنتاج أن النموذج حساس لجميع العوامل المؤثرة.

الكلمات المفتاحية: التآكل، الخرسانة المسلحة، تغلغل الكلوريد، محاكاة مونت كارلو، التدهور، الإصلاح.

Résumé

La corrosion des armatures est l'une des pathologies qui affectent la performance des structures en béton armé. La corrosion peut résulter de l'attaque des chlorures ou de la carbonatation. Ses conséquences sont la réduction du diamètre de l'acier et la perte d'adhérence au béton, ce qui conduit à la détérioration du béton et réduit sa durée de vie. Ce type de dommages est responsable d'infliger des pertes matérielles à la plupart des grands pays du monde pour l'entretien et la réparation des ouvrages détériorés.

Dans le cadre de ce travail, nous avons développé un modèle pour analyser la durabilité des structures en béton armé soumises à la corrosion causée par l'attaque des chlorures, prenant en compte la présence d'incertitudes aléatoires et épistémiques. L'objectif principal est de prédire le temps d'initiation de la corrosion qui marque la fin de la durée de service dans la plupart des règlements. Le modèle de pénétration des chlorures est basé sur une solution empirique de la deuxième loi de Fick. Les incertitudes aléatoires sont représentées par des lois de probabilités tandis que les incertitudes épistémiques sont représentées par des boîtes de probabilités. L'estimation du temps d'initiation de la corrosion est basée sur une méthode combinant les simulations Monte Carlo et l'analyse d'intervalles. L'approche proposée a été testée sur un ouvrage existant. Une étude paramétrique a été menée pour investiguer l'effet du nombre de tirages et de la discrétisation des intervalles sur la précision de calcul de la probabilité d'initiation de la corrosion.

Mots clés : corrosion, béton armé, attaque des chlorure, simulation Monte Carlo, analyse d'intervalle, fiabilité.

Summary

Corrosion of reinforcements is one of the pathologies that affect the performance of reinforced concrete structures. Corrosion can result from chloride attack or carbonation. Its consequences are the reduction in reinforcing bar diameter and the loss of steel-to-concrete adhesion, which leads to concrete deterioration and reduces its service life. This type of damage is responsible for inflicting financial losses in most of the major countries due to the maintenance and repair expenses of deteriorated structures.

In this work, we have developed a model to analyze the durability of reinforced concrete structures subjected to corrosion caused by chloride attack, taking into account the presence of aleatory and epistemic uncertainties. The main objective is to predict the corrosion initiation time which marks the end of service life in most construction codes. The chloride penetration model is based on an empirical solution of Fick's second law. Aleatory uncertainties are represented by probability functions, while epistemic uncertainties are represented by probability boxes. The estimation of corrosion initiation time is based on a method combining Monte Carlo simulations and interval analysis. The proposed approach has been tested on an existing structure. A parametric study was carried out to investigate the effect of the number of Monte Carlo simulations and the discretization of the intervals on the accuracy of estimating the probability of corrosion initiation.

Key words: corrosion, reinforced concrete, chloride attack, Monte Carlo simulation, interval analysis, reliability.

Table de matières

DEDICACES

REMERCIEMENTS

ملخص

RESUME

SUMMARY

TABLE DE MATIERES

LISTE DES TABLEUX

LISTE DES FIGURES

LISTE DES SYMBOLES

Introduction générale.....1

Chapitre I : Corrosion des armatures

1.1. Introduction.....3

1.2. Mécanisme de la corrosion.....3

1.3. Phases de la corrosion.....4

1.4. Causes de la corrosion (CL⁻, CO₂)5

1.5. Conséquences de la corrosion.....6

1.6. Aspect physico-chimique de la corrosion.....6

1.6.1. Formes de la corrosion.....7

1.6.2. Facteurs influent sur la corrosion des armatures.....8

1.6.2.1.Enrobage.....8

1.6.2.2. Humidité relative.....8

1.6.2.3. Agents agressifs autres que les chlorures.....9

1.6.2.4. Oxygène.....9

1.6.2.5.Teneur en chlorure.....9

1.6.2.6. Température.....9

1.6.3. Réactions de corrosion des aciers dans le béton.....9

1.7. Mécanismes de transport des chlorures dans le béton.....11

1.8.Modélisation de la pénétration des chlorures.....12

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

2.1.Introduction.....	14
2.2.Classe des incertitudes.....	14
2.3.Approche probabiliste.....	15
2.3.1. Variable aléatoire.....	15
2.3.2. Méthode Monte Carlo.....	15
2.3.3. Analyse de la fiabilité.....	17
2.3.3.1.Domains de défaillance.....	17
2.3.3.2.Fonction d'état limite.....	17
2.3.3.3.Calcul de la probabilité de défaillance.....	19
2.3.3.4.Calcul de la fiabilité.....	20
2.4.Approches d'intervalle.....	21
2.4.1. Concept de variable d'intervalle.....	21
2.4.2. Analyse de la fiabilité.....	21
2.4.3. Analyse d'intervalle.....	22
2.4.3.1.Approche arithmétique.....	22
2.4.3.2.La méthode des vertex.....	22
2.4.3.3.Approche d'optimisation.....	23
2.5.Approches floue ou possibiliste.....	23
2.5.1. Concept de variable floue ou possibiliste.....	23
2.5.1.1.Historique.....	24
2.5.1.2.Définition de la logique floue.....	24
2.5.2. Analyse floue.....	25
2.5.3. Analyse de la fiabilité.....	27

Chapitre III : Méthodologies d'analyse

3.1. Introduction.....	28
3.2.L'approche adoptée pour le calcul de la probabilité d'initiation de la corrosion.....	28
3.2.1. Notions de base de la Fonction de probabilités d'intervalle.....	28
3.2.2. Combinaison d'intervalle et simulation Monte Carlo.....	28
3.3.Modèle utilisée pour l'estimation de la concentration des chlorures.....	30

Chapitre IV : Applications numériques et résultats

4.1. Introduction.....	33
4.2. Effet de l'incrément de temps.....	33
4.3. Effet du nombre de tirages de Monte Carlo.....	35
4.4. Effet du rapport Eau/Liant (E/L)	36
4.5. Effet du nombre d'intervalles de discrétisation.....	37
Conclusion générale et perspectives.....	38
Références Bibliographique.....	39

Liste des figures

Figure	Titre	Page
Figure 1.1	Mécanisme de la corrosion des aciers en béton armé	4
Figure 1.2	Phases de la corrosion	5
Figure 1.3	Exemples de la conséquence de la corrosion	6
Figure 1.4	Formes de corrosion	8
Figure 1.5	Mécanisme de la corrosion des aciers	10
Figure 1.6	Formation des produits de corrosion du fer dans un béton	11
Figure 2.1	Méthodologie de la simulation Monte Carlo	16
Figure 2.2	Représentation de l'état limite	17
Figure 2.3	Formes simples des fonctions d'appartenance ou de distribution de possibilité	25
Figure 2.4	Procédure d'analyse floue en utilisant la méthode de discrétisation de coupe- α	27
Figure 3.1	Génération d'intervalles aléatoires à partir d'une boîte de probabilité continue	30
Figure 3.2	Organigramme d'analyse probabiliste d'intervalle de l'initiation de la corrosion des armatures de béton	32
Figure 4.1	Effet de l'incrément de temps sur la probabilité d'initiation de la corrosion.	36
Figure 4.2	Effet du nombre de tirages Monte Carlo sur la probabilité d'initiation de la corrosion.	35
Figure 4.3	Effet du rapport E/L sur la probabilité d'initiation de la corrosion.	36
Figure 4.4	Effet du nombre d'intervalles de discrétisation sur la probabilité d'initiation de la corrosion.	37

Liste des tableaux

Tableau 4.1. Description des paramètres incertains considérés.

Liste des symboles

Symbole / Abréviation	Définition
CO_2	Dioxyde de carbone
Cl^-	Ion de chlorure
$CaCl_2$	Le chlorure de calcium
$Ca(OH)_2$	Hydroxyde de calcium
$Fe(OH)_2$	Hydroxyde de fer
O_2	Dioxygène
H_2O	Monoxyde de dihydrogène
OH^-	Ions hydroxydes
Fe	Fer
Fe^{2+}	Ion ferreux
e^-	Electron
$\frac{\partial C_t}{\partial t}$	Capacité de fixation des chlorures du béton
C_f et C_t	Les concentrations des chlorures totaux et libres dans le béton
D_{c1}	Le coefficient de diffusion des ions chlorure dans le béton
\emptyset	Le potentiel électrique
D_i	Le coefficient de diffusion dans la solution interstitielle

i	Espèce
z_i	Le nombre de charge de l'espèce " i "
F	La constante de Faraday
R	La constante des gaz parfaits ($R= 8.314 J/mol. °K$)
T	La température absolue[°K]
$C(x, t)$	La concentration des ions chlorures à une profondeur x et à un instant
C_s	La concentration de chlorure de surface
erf	La fonction d'erreur
x	Profondeur avec une teneur correspondante en chlorures $C(x, t)$ [mm]
t	Temps [années]
Pf	Probabilité de défaillance
$f_x(X)$	La fonction de densité de probabilité
N	Le nombre total de simulations effectuées
x_i	La valeur de la variable aléatoire
Pfc	La probabilité de défaillance cible
(ELS)	Etats limites de service
(ELU)	Etats limites ultimes
$G(x)$	La fonction de défaillance (la fonction d'état limite)
C_{crit}	La concentration critique de chlorure [wt. -%/c]
x	Le vecteur des variables aléatoires

$C.V$	Coefficient de Variation
$\tilde{P}f$	Probabilité floue de défaillance
\underline{x}	Borne inférieure d'un intervalle
\bar{x}	Borne supérieure d'un intervalle
x	Variable d'intervalle
\bar{x}	Rayon d'un intervalle
\tilde{x}	Point central d'un intervalle
\tilde{x}	Variable floue
\tilde{y}	La valeur de la possibilité de la grandeur de réponse floue
y^*	La plus grande possibilité de toutes les combinaisons d'entrée résultant
n	Paramètres d'entrée flous
m	Combinaisons possibles de réalisation
(FDC)	La fonction de distribution cumulative
\underline{F}_X	Borne inférieure d'une fonction de distribution cumulative floue
\overline{F}_X	Borne supérieure d'une fonction de distribution cumulative floue
F_X	Fonction de distribution cumulative
$\mu_{\tilde{x}}$	Fonction de possibilité d'une variable floue
D_{C1}^0	Le coefficient de diffusion à l'âge t_0 du béton
t_0	Point de référence du temps [années]

PH Potentiel hydrogène

N L'exposant de vieillissement

E/C Rapport eau/ciment

Introduction
Générale

Introduction générale

Le béton est aujourd'hui le matériau de construction le plus utilisé dans le monde. Comme il s'agit du progrès et du développement de la science, les scientifiques et les chercheurs s'efforcent de concevoir et de construire des structures en béton armé qui durent longtemps et assurent la sécurité des utilisateurs et les limitent du danger.

La corrosion des aciers dans le béton est l'une des principales pathologies des ouvrages de génie civil. Elle entraîne des coûts très importants de maintenance, la plupart des grands pays du monde subissant des pertes de matériaux très importantes. Malgré que de grands efforts ont été faits dans les domaines de la recherche afin d'évaluer les effets de la corrosion résultant d'ions agressifs. La corrosion, de par sa nature, entraîne une détérioration des facteurs mécanique, qui accélèrent le vieillissement et la dégradation du béton et par conséquence compromettre la sécurité, la fonctionnalité et la durabilité de la structure et réduire sa durée de service.

Les structures en béton sont souvent exposées à des environnements où divers facteurs de corrosion nuisent à leur durabilité. Ces dommages peuvent entraîner la perte de la maintenance et du traitement caractéristiques et imprévus, et dans le pire des cas, la perte de l'intégrité structurelle et les risques de sécurité qui l'accompagnent. La corrosion des armatures de béton est la cause la plus fréquente de dégradation, car la corrosion de l'acier entraîne une réduction de la section transversale des armatures, la fissuration, l'écaillage et le relâchement du béton en raison de la formation de rouille dans l'interface du béton-acier.

L'attaque des chlorures est la cause principale de la corrosion des armatures de béton dans les zones côtières. Comme ce mécanisme de dégradation est divisé en deux étapes : l'initiation et la propagation. Dans la première étape, les ions chlorures pénètrent dans la couche d'enrobage pour atteindre les armatures, est c'est beaucoup plus long que la deuxième étape dans laquelle l'armature se corrode. Il existe Plusieurs mécanismes qui contribuent au transport des chlorures dans le béton. Ces mécanismes sont influencés par les conditions environnementales et les propriétés du béton.

Dans la modélisation du transport des chlorures dans le béton, les incertitudes sont généralement prises en compte en utilisant une analyse fiabiliste basée sur la théorie des probabilités. Les incertitudes sont considérées comme aléatoires, donc ces incertitudes épistémiques doivent être considérées différemment des incertitudes aléatoires.

L'objectif principal de ce mémoire, est l'analyse de la durabilité des structures en béton armé contre la corrosion induite par l'attaque des chlorures, prenant en compte l'effet du type d'incertitudes impliquées, afin d'obtenir une meilleure prédiction de la durée de vie des structures en béton armé et une estimation du temps d'initiation de la corrosion. Pour cela, les incertitudes épistémiques sont modélisées par des boîtes de probabilités, et l'analyse fiabiliste est menée par un couplage de l'analyse d'intervalle à une simulation de Monte Carlo.

Cette mémoire est divisée en quatre chapitres, en plus d'une introduction générale et une conclusion générale.

Le premier chapitre de ce manuscrit est consacré à une revue bibliographique, dans laquelle une description du mécanisme de la corrosion des armatures induite par l'attaque des chlorures, de ses formes, ses facteurs influents ont été présentés et de ses conséquences. Ensuite, nous avons étudié l'aspect physico-chimique de la pénétration des ions chlorures et le mécanisme de leur transport, et les effets de la corrosion sur le comportement mécanique du béton.

Le deuxième chapitre présente les méthodes de modélisation des incertitudes. Il commence par classer les incertitudes en deux catégories : aléatoires et épistémiques. Après il ya trois approches de base qui peuvent être utilisées pour la description des incertitudes, à savoir, l'approche probabiliste, l'approche d'intervalle et l'approche floue.

Le troisième chapitre consacré à la méthodologie d'analyse de l'initiation de la corrosion induite par l'attaque des chlorures. Il commence par les notions de base de la boite de probabilité, ensuite l'approche adopté pour le calcul de la probabilité d'initiation de la corrosion. Puis étudier le modèle utilisé pour l'estimation de la concentration des chlorures et ses paramètres.

Le quatrième chapitre est destiné à examiner la robustesse de la méthode d'analyse proposée et la discussion des résultats obtenus à partir du développement d'une application numérique. Un exemple d'une structure existante a été utilisé pour tester la fiabilité d'estimation du temps d'initiation de la corrosion.

Chapitre I : Corrosion des armatures

1.1. Introduction

L'étude de la durabilité des structures en béton armé comprend généralement l'étude de la corrosion des armatures, elle est considérée comme un phénomène courant et basique de fragilité et de détérioration des structures en béton armé qui est soumise à l'action conjointe des chlorures, et les cycles de gel-dégel. Le phénomène de corrosion est complexe et dépend de nombreux facteurs tels que les matériaux de renforcement de béton, ainsi que des conditions environnementales qui prévalent dans les zones qui limitent fortement la qualité de la corrosion des structures en béton armé, telles que la température, l'humidité, la concentration de sels nocifs et le degré de confinement de la poussière.

Le béton armé est l'un des matériaux de construction les plus couramment utilisés dans le monde dont l'effet de la corrosion est connu depuis l'Antiquité. Par conséquent, des efforts importants sont réalisés par des chercheurs scientifiques dans ce domaine afin de limiter l'érosion et la détérioration des propriétés du matériau de base, en l'occurrence l'interaction chimique ou électrochimique avec l'environnement, connue sous le nom de réaction physique, dont la nature est généralement identifiée comme une réaction électrochimique.

Dans ce chapitre, nous présentons dans une première étape les concepts de base liés à la corrosion que se soit par carbonisation ou résultant des chlorures. Ensuite, les facteurs de corrosion affectant le comportement mécanique du béton ainsi que les mécanismes de corrosion dans le béton.

1.2. Mécanisme de la corrosion

La corrosion est définie comme la dégradation d'un matériau suite à une attaque électrochimique de son environnement. En général, cela peut être compris comme la tendance générale selon laquelle les matériaux doivent rechercher la forme d'énergie interne la plus stable ou inférieure [38]. Lorsque la corrosion est le résultat d'une réaction électrochimique (oxydation), la vitesse de son apparition dépend dans une certaine mesure de la température, de la salinité du liquide en contact avec le métal et des propriétés des métaux impliqués. D'autres matériaux non métalliques sont également corrodés par d'autres mécanismes. La corrosion peut être due à une réaction chimique (oxydation) qui comprend trois attaques de métal liquide.

- ☞ Les minéraux liquides attaquent les solides à leurs points d'énergie les plus élevés, comme les joints de grains, qui finiront par provoquer des fissures.
- ☞ Filtration sélective qui consiste à séparer les solides de l'alliage. La corrosion du graphite dans la fonte grise se produit lorsque le fer est dilué de manière sélective dans l'eau ou le sol et libère du tartre de graphite et des produits de corrosion, provoquant des fuites ou une défaillance des tuyaux.
- ☞ Dissolution et oxydation des matériaux céramiques, les matériaux céramiques réfractaires qui sont utilisés pour contenir le métal fondu pendant la fusion et l'affinage peuvent être fondus par le laitier qui se produit à la surface du métal.

L'érosion des armatures de béton étant une réaction électrochimique, elle nécessite l'existence de quatre environnements simultanés, qui sont les suivants :

- Un milieu conducteur d'électrons (l'acier).
- Un milieu électrolytique (le liquide interstitiel du béton).
- Une zone anodique (oxydation de fer).
- Une zone cathodique (réduction d'espèces chimiques en solution : eau ou oxygène dissous).

Les réactions de corrosion commencent à se produire comme illustré à la figure (1.1)

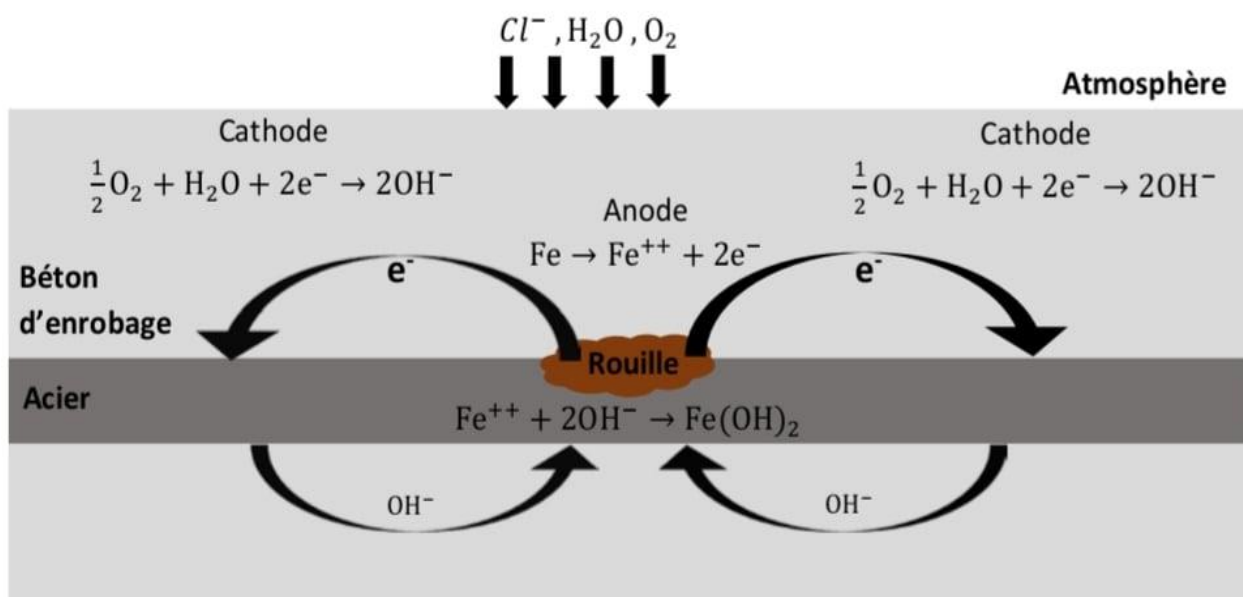


Figure 1.1. Mécanisme de la corrosion des aciers en béton armé [57].

1.3. 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 (voir figure 1.2) :

- **Phase d'initiation : (ou d'incubation)** : c'est la phase durant laquelle les agents agressifs, tels que le dioxyde de carbone (CO₂) 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 fortes concentrations au niveau des armatures. Cette phase correspond à l'augmentation de volume 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. [39]

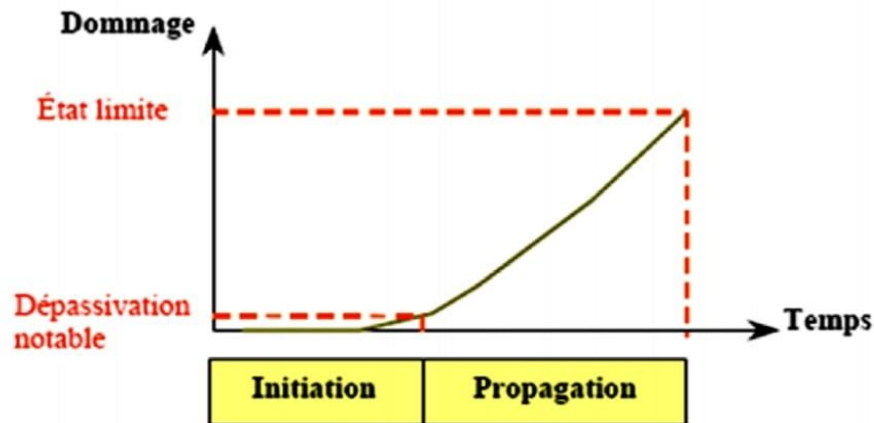


Figure 1.2. Phases de la corrosion [39].

1.4. Causes de la corrosion (Cl^- , CO_2)

La corrosion des armatures est un processus résultant de la décomposition de l'acier d'armature due à une réaction chimique ou électrochimique à l'intérieur du béton et se produit en raison d'influences internes ou environnementales.

Parmi les facteurs qui causent la corrosion des armatures dans le béton, on trouve les suivants :

- ☞ **Couverture de béton insuffisante** : Lorsque la couverture de béton est insuffisante et inadaptée, le béton s'érode rapidement en raison de la pénétration d'humidité car la petite taille de la couverture de béton conduit à l'accélération du processus de carbonisation et à l'entrée de chlorures.
- ☞ **Humidité** : L'humidité pénètre dans les pores du béton et interagit avec le fer et le ciment qui corrodent l'armature.
- ☞ **Réaction alcaline totale** : La réduction de l'alcalinité augmente les risques de corrosion du fer en présence d'humidité. Des alcalis tels que le potassium et le sodium sont présents dans les composants du ciment, qui à leur tour interagissent avec les composants silicium des agrégats, provoquant la fissuration du béton.
- ☞ **Accélérateurs dans le béton (chlorure de calcium $CaCl_2$)** : Le chlorure de calcium augmente les fissures dans le béton et réduit également la résistance électrique du béton et améliore le processus électrochimique. Par conséquent, l'utilisation de chlorure de calcium comme accélérateur dans le béton conduit à la corrosion de l'armature.

- ☞ **L'effet de l'eau de mer sur le béton :** L'eau de mer contient un pourcentage élevé de sels et de chlorures qui pénètrent dans le béton sous forme de spray ou d'humidité et interagissent avec le béton, ce qui conduit à la corrosion de l'armature.
- ☞ **Carbonisation :** L'ajout d'eau au ciment entraîne le durcissement du béton et la libération d'hydroxyde de calcium, qui forme une couche protectrice autour de la barre d'armature, et avec le temps, le dioxyde de carbone dans l'atmosphère interagit avec l'hydroxyde du béton et forme du carbonate de calcium, ce qui conduit à des fissures qui endommagent et corrodent l'armature.
- ☞ **L'effet de la fuite :** Quelle que soit la perméabilité du béton, les fuites d'eau des balcons, des salles de bains, des murs, etc. entraîneront la rouille et la corrosion des barres d'armature en béton.
- ☞ **Présence de produits chimiques solubles tels que les sulfates :** Lorsqu'une réaction se produit entre l'aluminat de calcium et le sulfate dissous dans le béton, cette réaction chimique provoque l'expansion du béton, également appelée attaque au sulfate qui conduit à la corrosion de l'armature.

1.5. Conséquences de la corrosion

La corrosion de l'acier réduit le diamètre de l'armature utilisée et le réduit partiellement ou complètement. Il est également connu sous le nom de dommage au métal en raison de sa réaction chimique ou électrochimique avec l'atmosphère ou le milieu de corrosion environnant, ce qui conduit à la réaction chimique à la formation de rouille lorsque la taille de l'acier devient plus grande et gonfle en raison de les pressions d'expansion dans le béton. Comme cela conduit à la fissuration du ciment ou du béton dans l'aspect extérieur visible qui résulte de la dilatation et du bombement de l'acier, comme le montrent la figure suivante.



Figure 1.3. Exemples de la conséquence de la corrosion.

1.6. Aspect physico-chimique de la corrosion

La corrosion peut être définie comme la destruction d'un métal à la suite d'une réaction chimique ou physique entre le métal et son environnement environnant. Là où une fine croûte de rouille se

forme autour de la barre d'armature en raison de sa présence dans l'atmosphère pour la première fois.

Lorsque nous mettons du béton hydraté et immergeons l'acier, l'eau pénètre dans les pores de la rouille et interagit avec l'acier et forme un mince couche d'hydroxydes de fer $\text{Fe}(\text{OH})_2$ et de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Tous ces matériaux et produits proches de l'acier ou des barres d'armature confèrent au béton un pH élevé de l'ordre de 13, ce qui à son tour assure la destruction du métal et le protège par passivation. [40]

1.6.1. 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 comme le montre la figure 1.4 [39] :

- ☞ *Corrosion généralisée* : la corrosion a un aspect à peu près uniforme (figure 1.4 (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 1.4 (b)). Dans le cas où le matériau métallique a des constituants très différents, il peut apparaître une dissolution sélective (figure 1.4 (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 1.4 (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.

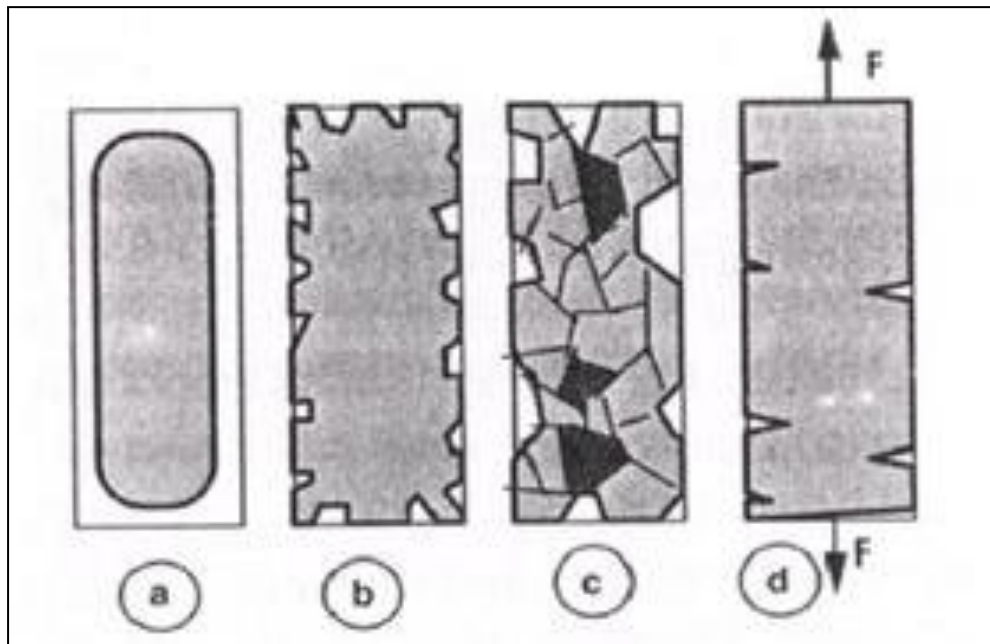


Figure 1.4. Formes de corrosion [39].

1.6.2. Facteurs influent sur 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 [41]. On présente ci-dessous les facteurs prépondérants. [39]

1.6.2.1. Enrobage

Lorsqu'une structure en béton armé se trouve dans un environnement agressif, la première partie critique de toute la structure est l'enrobage qui est la première défense pour la protection des armatures contre la corrosion, cette capacité de protection offerte par le béton aux armatures dans le béton armé s'évalue par [39] :

- La qualité du béton d'enrobage, en particulier la porosité ;
- L'épaisseur d'enrobage qui dépend du niveau d'agressivité du milieu d'exposition.

1.6.2.2. 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. [39]

1.6.2.3. 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 dé passivation des aciers dans le béton. [39]

1.6.2.4. 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. [39]

1.6.2.5. 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 [42] ; Brime, 2001 [43] ; Petterson, 1993 [44]], 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. [39]

1.6.2.6. 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. [39]

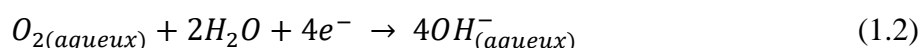
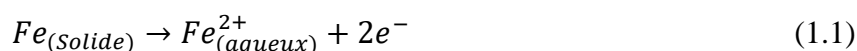
1.6.3. Réactions de corrosion des aciers dans le béton

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 ($4CaO \cdot FeO_3 \cdot 13H_2O$).

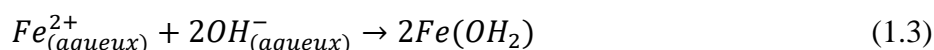
L'hydratation du ciment produit également l'hydroxyde de calcium ($Ca(OH)_2$) qui assure un pH élevé à la solution interstitielle. D'une façon générale, les constituants à base d'alcalins du ciment, notamment de calcium et, dans une échelle moins importante de potassium et de sodium, contribuent à la réserve alcaline du béton [45]. 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 hydroxyles. 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 hydroxyles de façon à former les hydroxydes :



Cet hydroxyde ($Fe(OH)_2$) peut continuer à s'oxyder et former de la rouille anhydre (Fe_2O_3) ou de la rouille hydratée ($Fe(OH)_3$) et du $FeOOH$, sachant que [41] :



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 1.5.

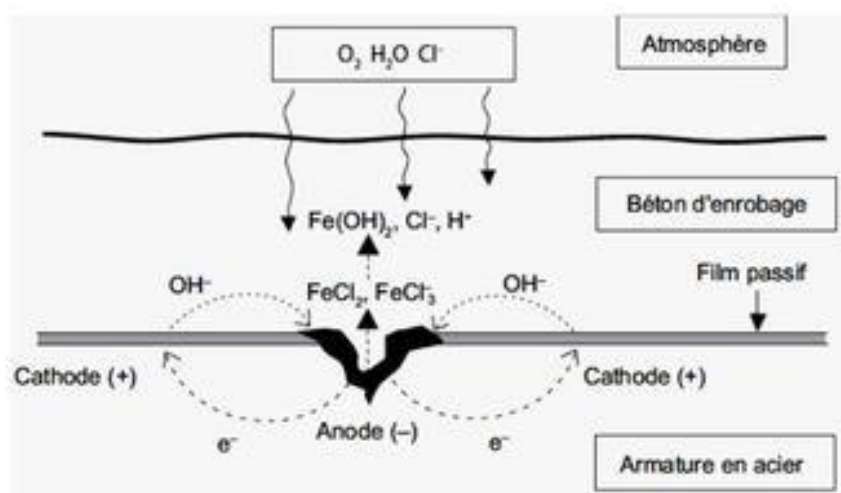
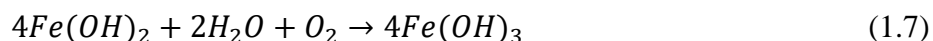
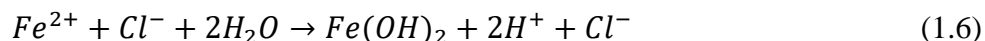


Figure 1.5. Mécanisme de la corrosion des aciers.

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 pénètrent dans le béton contribuant 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 :



Les états du béton correspondants à la formation de chacun des produits de corrosion sont représentés sur la Figure 1.6.

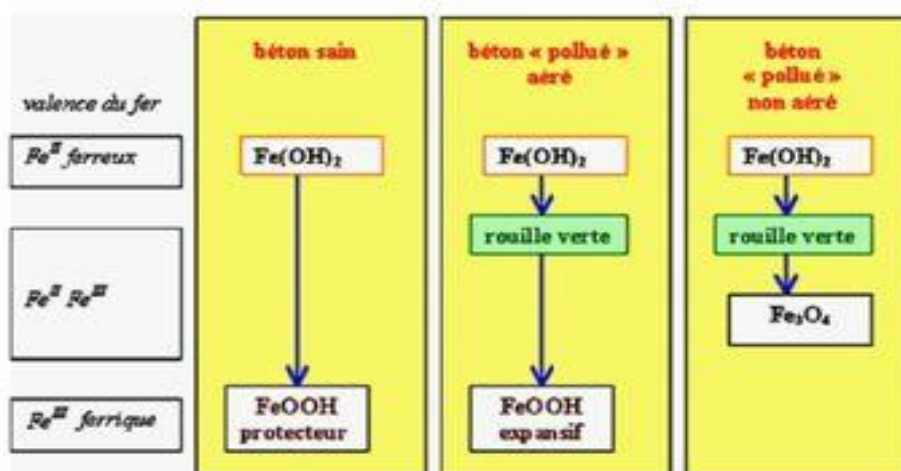


Figure 1.6. Formation des produits de corrosion du fer dans un béton.

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. [39]

1.7. Mécanismes de transport des chlorures dans le béton

Les chlorures de sources externes peuvent entrer dans le béton par une combinaison de processus :

- Par la convection : Les ions chlorure sont entraînés par les mouvements de l'eau dans le cas du béton insaturé (humidité relative);
- Par la diffusion : gradient de concentration entre la surface extérieure du béton et la solution interstitielle, dans le cas de béton saturé ;

- Par la migration électrique : gradient de potentiel électrique. Ce mécanisme est important lorsque le gradient de potentiel électrique est élevé, ce qui n'est pas le cas dans les situations courantes des structures en béton [1].

Il existe deux méthodes traditionnelles de modélisation de la pénétration du chlorure dans le béton. La première méthode est la deuxième loi de Fick et est basée sur la théorie classique de la diffusion au niveau macroscopique, la seconde méthode est basée sur les lois de l'électrochimie, en particulier l'équation de Nernst-Planck.

Le taux d'ions chlorure traversant une surface perpendiculaire à la direction de diffusion peut être exprimé en utilisant la deuxième loi de Fick [2] :

$$\frac{\partial C_t}{\partial t} = \text{Div}[D_{c1} \text{grad}(C_f)] \quad (1.8)$$

Dans laquelle C_f et C_t sont les concentrations des chlorures totaux et libres dans le béton respectivement et D_{c1} est le coefficient de diffusion des chlorures dans le béton.

Le taux des ions traversant une surface peut être exprimé en utilisant la loi de Nernst-Planck [46] :

$$\frac{\partial(C_{ti})}{\partial t} = \frac{z_i F}{RT} \text{Div}[D_i C_{fi} \text{grad}(\phi)] \quad (1.9)$$

Dans laquelle C_f et C_t sont les concentrations des ions totaux et libres de l'espèce "i", ϕ est le potentiel électrique, D_i est le coefficient de diffusion dans la solution interstitielle de l'espèce "i", z_i est le nombre de charge de l'espèce "i", F est la constante de Faraday, R est la constante des gaz parfaits et T est la température absolue [°K].

1.8. 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. Alors que de nombreux modèles de prédiction de la corrosion des armatures d'acier du béton induite par les chlorures ont été développés. Il est classé en trois catégories [47] :

- *Modèles empiriques* : L'approche empirique se base sur l'intelligence artificielle et l'observation du processus de corrosion et pour créer des relations mathématiques entre la profondeur de corrosion et divers facteurs explicatifs [49,50].
- *Modèles mécanique (physico-chimiques)* : Des modèles mécaniques des processus de corrosion ont été développés afin de combiner des interactions électrochimiques et mécaniques avec les interactions complexes des détails de migration et de diffusion. Dans cette catégorie, dans le cas de l'attaque par chlorures, on trouve les modèles basés sur la deuxième loi de Fick [51-53] et les modèles basés sur l'équation de Nernst-Planck [54,55].
- *Modèles semi-empiriques* : C'est une solution simple d'un modèle mécanique avec des paramètres obtenus expérimentalement. Comme utilise les données préparées pour les

résultats expérimentaux pour simplifier les calculs, et permettent de prévoir à long terme [56].

Le modèle d'entrée de chlorure utilisé dans le présent travail est basé sur la deuxième loi empirique de diffusion de Fick. Dans ce modèle, les processus de transport de l'entrée de chlorure sont représentés par un coefficient de diffusion de chlorure « apparent » [48]. La concentration de chlorure $C(x, t)$ à une distance x de la surface du béton au temps t est donnée par :

$$C(x, t) = C_s \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_{C1}t}} \right) \right) \quad (1.10)$$

Dans laquelle C_s est la concentration de chlorure de surface, D_{C1} est le coefficient de diffusion du chlorure apparent et erf est la fonction d'erreur.

**Chapitre II : Méthode de modélisation probabiliste
pour la corrosion induite par les chlorures**

2.1. Introduction

La capacité de prédire numériquement la performance à long terme des structures sous des charges statiques, dynamiques ou environnementales a une grande valeur scientifique et économique. Dans la phase de conception, une analyse fiable de la durabilité des structures en béton armé réduit les coûts d'inspection et de réparation possibles, et une stratégie de gestion du cycle de vie avec le coût de vérification le plus bas est développée. De plus, il peut réaliser une optimisation basée sur les performances à un stade précoce sans avoir besoin de recherches expérimentales approfondies. Cependant, en raison de doutes sur la description mathématique de la réalité physique, les gens sont généralement sceptiques quant à l'utilisation de modèles déterministes pour vérifier numériquement la robustesse des structures [4].

Les méthodes non déterministes sont devenues très populaires pour vérifier les modèles numériques en estimant leur fiabilité. Il existe trois principales méthodes non déterministes : l'approche probabiliste, floue et l'approche d'intervalle ou l'approche possibiliste [4].

Ce chapitre décrit les sources d'incertitudes, leurs catégories et leurs méthodes de description. L'incertitude est divisée en deux catégories : aléatoire et cognitive. Trois méthodes de base peuvent être utilisées pour décrire l'incertitude, à savoir la méthode des probabilités, la méthode des intervalles et la méthode floue. L'applicabilité de chaque méthode à la modélisation de l'incertitude stochastique et cognitive est discutée. Dans ce travail, nous nous appuyons sur la description de méthodes probabilistes floues pour étudier la durabilité des structures en béton exposées au chlorure, tout en prenant en compte le caractère aléatoire ou cognitif de l'incertitude et son applicabilité à l'analyse de problèmes de paramètres incertains.

2.2. Classes des incertitudes

Le non-déterminisme dans une simulation de la réalité physique peut être classé en deux Catégorie : épistémique et aléatoire [3]. Une incertitude épistémique est définie comme une déficience potentielle dans toute phase ou activité du processus de modélisation due à un manque de connaissances. Le mot potentiel souligne que la déficience peut se produire ou non. Cette définition indique essentiellement que l'incertitude est causée par des informations incomplètes résultant soit de l'imprécision, de la non-spécificité ou de la dissonance. L'imprécision caractérise des informations mal définies, peu claires ou indistinctes. Dans la littérature, cette incertitude est dite réductible, car lorsque plus d'informations sont disponibles elle peut être transformée en incertitude aléatoire ou même estimée de façon déterministe.

L'incertitude aléatoire est définie comme la variation inhérente au système physique modélisé ou l'environnement considéré. En se référant à l'analyse numérique, une incertitude aléatoire est généralement décrite par une quantité distribuée définie sur une plage de valeurs possibles. Suppose que la valeur numérique exacte attachée à la représentation de la propriété variable du modèle se situe dans cette plage, mais elle variera d'une unité à l'autre ou d'un temps à l'autre. Idéalement, des informations objectives sur la plage de variation et la fréquence d'occurrence de la Grandeur variable dans cette plage sont disponibles. Dans la littérature, certains qualifient cette incertitude d'irréductible. Des exemples typiques d'incertitudes aléatoires sont les effets

environnement (température, hydraté, ...) et les propriétés des matériaux hétérogènes disponibles, elle ne peut pas disponibles, elle ne peut pas déterminer de façon déterministe.

2.3. Approches probabilistes

2.3.1. Variable aléatoire

En théorie des probabilités, une variable aléatoire est une variable dont la valeur est déterminée après un tirage aléatoire. Le but d'une description probabiliste d'une quantité inconnue ou incertaine est de définir un domaine de valeurs possibles et de donner des informations sur la fréquence d'occurrence de cette grandeur à l'intérieur de ce domaine. La fonction de densité de probabilité est définie $f_x(X)$ pour la variable X sur le domaine des valeurs possibles. La probabilité que la valeur de cette quantité appartient à un certain intervalle $[\alpha, \beta]$ est donnée par [5] :

$$P(\alpha \leq X \leq \beta) = \int_{\alpha}^{\beta} f_x(X) dx \quad (2.1)$$

2.3.2. Méthode Monte Carlo

Nous appelons méthode de Monte Carlo toute méthode visant à calculer des valeurs numériques largement utilisées dans les problèmes de fiabilité et utilisant des méthodes stochastiques (c'est-à-dire des techniques probabilistes) [11]. La méthode de Monte Carlo est surtout utilisée pour calculer des intégrales, et est aussi souvent utilisée pour estimer l'influence de la variabilité aléatoire de différents paramètres sur les résultats attendus. Les calculs de probabilité sont généralement effectués à l'aide de méthodes de simulation. Par conséquent, dans le cas d'une fonction de probabilité simple, l'intégration peut être effectuée directement. Si le domaine d'intégration est borné, l'intégration numérique est possible. Dans la simulation numérique de problèmes physiques, en particulier dans le cas de la modélisation par la méthode des éléments finis, les calculs de probabilité sont généralement effectués à l'aide de méthodes de simulation [12]. La méthode de simulation de Monte Carlo consiste à prélever des échantillons de changements aléatoires pour construire un ensemble de valeurs décrivant les espaces de défaillance et de sécurité. 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 [13].

La figure (2.1) montre les procédures générales pour la simulation de Monte Carlo. Dans la figure, il y a trois étapes sont nécessaires dans le processus de simulation :

1. L'échantillonnage sur les variables d'entrée aléatoires X ;
2. L'évaluation des quantités de réponse Y ;
3. L'analyse statistique sur les quantités de réponse du modèle.

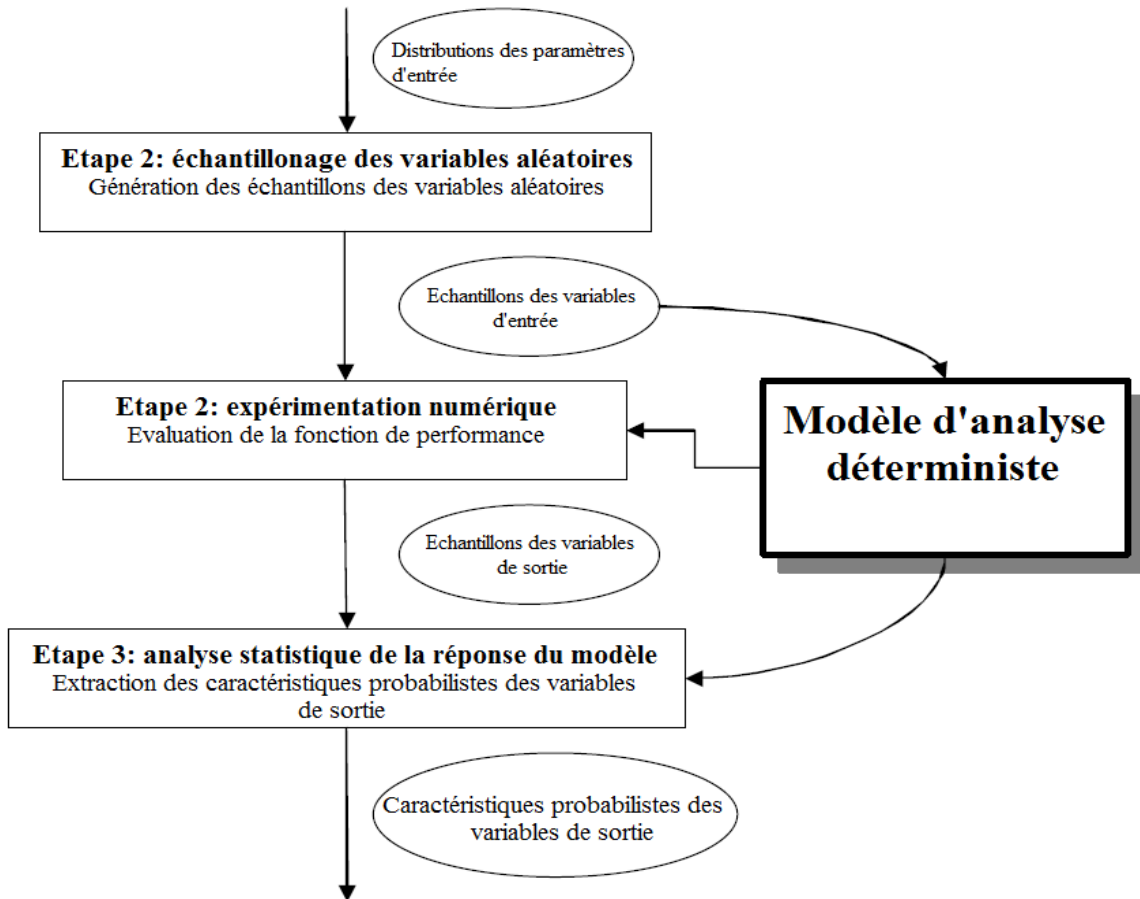


Figure 2.1 Méthodologie de la simulation Monte Carlo [14].

Le principe 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).

Si la défaillance est définie par l'évènement $G \leq 0$, Nous calculons la probabilité de défaillance à l'aide de l'expression suivante [13] :

$$Pf = P(G \leq 0) = \int_{G \leq 0} f_X(x_i) dx_i = \int_{G \leq 0} I(x_i) f_X(x_i) dx_i = E[I(x_i)] \quad (2.2)$$

La fonction $I(x_i)$ peut s'écrire :

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

En simulant la fonction d'état limite pour une plage d'échantillonnage commode, la valeur moyenne de $I(x_i)$ sera estimée par :

$$Pf = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I[G(x_i) \leq 0] \quad (2.4)$$

Cette méthode présente de nombreux avantages. Elle reste facile à implémenter et n'impose pas d'autres paramètres de réglage que le nombre de tirages à faire. Elle est particulièrement stable et

ne pose pas de contraintes particulières, ni sur la fonction à évaluer, ni sur les lois des variables aléatoires. L'inconvénient de cette méthode est qu'elle converge lentement. Il faut un grand nombre de tirages, donc un grand nombre d'évaluations numériques, pour obtenir un résultat approché et fiable de la solution.

2.3.3. Analyse de la 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 [Eurocode 2, 2004].

2.3.3.1. Domaines de défaillance

Un scénario de défaillance est généralement décrit par une ou plusieurs fonctions de performance délimitant deux domaines : Lorsque la fonction de performance est négative c'est un domaine de défaillance, un domaine de sécurité lorsque la fonction est positive. La frontière entre ces deux domaines est appelée surface d'état limite ou de défaillance [6] (figure 2.2).

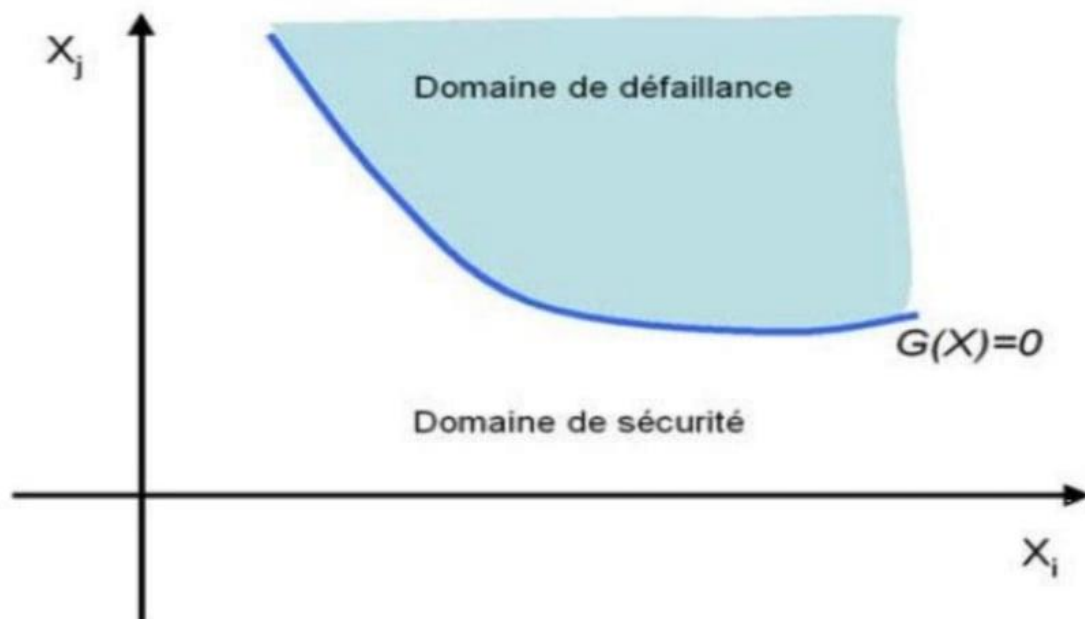


Figure 2.2 Représentation de l'état limite [6]

2.3.3.2. Fonction d'état limite

Les états de défaillance correspondent à des situations considérées comme inacceptables. L'évaluation de ces situations dépend de l'état limite pris en compte. En pratique, deux types d'états limites peuvent être distingués [7] :

- Etats limites de service (ELS) : les conséquences d'un dépassement sont d'ordre économique (esthétique, confort...);

- Etats limites ultimes (ELU) : les conséquences d'un dépassement peuvent compromettre la sécurité de la structure (plastification, instabilité, fatigue, effondrement progressif, corrosion...).

Chaque mode de défaillance est associé à une fonction d'état limite ou fonction de défaillance $G(x)$ définie dans l'espace des variables aléatoires. Les valeurs prises par cette fonction permettent de délimiter deux domaines séparés par une surface d'état limite [8] :

- $G(x) > 0$ domaine de sureté
- $G(x) \leq 0$ domaine de défaillance (2.5)
- $G(x) = 0$ surface d'état limite

La base du calcul probabilité est la probabilité de déterminer de défaillance d'une structure. Pour une structure soit dit « sûre » vis-à-vis de la corrosion induite par les chlorures, la concentration critique de chlorure C_{crit} doit être supérieure à la teneur en chlorures $C(x, t)$ dans le béton à une profondeur x et à l'instant t (équation (2.6)). Ensuite, nous allons calculer la fonction d'état limite (équation $G(x)$) 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.

$$C_{crit} > C(x) \tag{2.6}$$

$$G(x) = C_{crit} - C(x) \tag{2.7}$$

La probabilité de défaillance Pf (équation (2.3)) est alors la probabilité que la fonction $G(x)$ soit négative.

$$Pf(t) = P(G(x, t) < 0) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I[G(x_i, t) \leq 0] \tag{2.8}$$

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

Afin de calculer la probabilité de défaillance, nous devons prendre en compte de la variabilité des paramètres d'entrée des modèles que nous mentionnons [15,16] :

- Modèles utilisés pour concevoir l'ouvrage ;
- Propriétés matériaux ;
- Environnement et charges subies par l'ouvrage ;
- Dimensionnement de l'ouvrage ;
- Distance par rapport au sens de coulage.

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 [17].

2.3.3.3. Calcul de la probabilité de défaillance

La probabilité de défaillance peut être calculée par [Lemaire et al., 2005] :

- Intégration directe qui ne peut se faire que dans les cas où les fonctions de densité ont des formes simples ;
- Intégration numérique qui peut se faire quand le domaine d'intégration est borné mais conduit parfois à des erreurs du même ordre de grandeur que Pf ;
- Simulation qui est une procédure simple mais souvent très coûteuse en temps de calcul ;
- Échantillonnage et intégration qui consistent à utiliser une simulation pour intégrer l'expression de Pf

Bien que la méthode de simulation s'avère consommatrice en temps de calcul, elle reste un des moyens les plus simples et les plus complets pour l'estimation d'une espérance ou d'une intégrale mathématique. De plus, cette méthode est bien adaptée au domaine du génie civil où les probabilités de défaillance cibles sont de l'ordre de 10^{-4} . Dans notre travail, le calcul de fiabilité est effectué par la méthode de simulation et plus précisément par les simulations de Monte-Carlo dont le principe est décrit ci-dessous.

La justification théorique de la méthode des simulations de Monte-Carlo est la loi des grands nombres. Dans le domaine de la fiabilité, son principe consiste à simuler des réalisations de l'état limite et à compter le nombre d'évènements de défaillance.

Soit $\{X\} = [X_1, X_2, \dots, X_n]$, le vecteur représentant l'ensemble des variables aléatoires dont dépend la fiabilité de la structure. La probabilité de défaillance s'écrit :

$$Pf = \int_{G(\{X\}) \leq 0} f_{\{X\}}(\{X\}) dx_1 \dots dx_n = \int_D f_{G(\{X\})}(\{X\}) I_{G(\{X\}) \leq 0}(\{X\}) dx_1 \dots dx_n \quad (2.9)$$

Est la densité conjointe de probabilité du vecteur aléatoire $\{X\}$ et D le domaine d'intégration. La fonction $I_{G(\{X\}) \leq 0}(\{.\})$ est l'indicateur du domaine de défaillance défini par :

$$I_{G(\{X\}) \leq 0}(\{.\}) = \begin{cases} 1 & \text{si } G(\{X\}) \leq 0 \\ 0 & \text{si } G(\{X\}) > 0 \end{cases} \quad (2.10)$$

L'équation (2.9) donne la probabilité de défaillance Pf par l'espérance mathématique de $I_{G(\{X\}) \leq 0}(\{.\})$. Ainsi la valeur de Pf est approchée par la moyenne des $p_i = I_{G(\{X\}) \leq 0}(\{x_i\})$.

Pour calculer la probabilité de défaillance, il suffit de compter les points situés dans le domaine de défaillance (N_f) et de diviser leur nombre par le nombre total de points (N_s) selon l'équation :

$$Pf \approx \tilde{P}f = \frac{N_f}{N_s} \quad (2.11)$$

Où $\tilde{P}f$ est un estimateur non biaisé de la probabilité de défaillance. Selon Lemaire [Lemaire et al.,2005], la variance et le coefficient de variation de l'estimation de Pf peuvent être exprimés respectivement par les équations (2.12) et (2.13) :

$$Var[\tilde{P}f] = \frac{1}{N_s} Pf(1 - Pf) \approx \frac{1}{N_s} \tilde{P}f(1 - \tilde{P}f) \quad (2.12)$$

$$CoV = \sqrt{\frac{(1 - Pf)}{N_s Pf}} \approx \sqrt{\frac{1}{N_s Pf}} \Bigg|_{Pf \rightarrow 0} \quad (2.13)$$

D'après l'équation (2.13), le coefficient de variation tend vers $\frac{1}{\sqrt{N_s Pf}}$ lorsque $Pf \ll 1$. Ainsi, si on vise un C.V. de 0,1 et une probabilité de défaillance cible (P_{fc}) de 10^{-n} , le nombre de simulation requis est $N_s = 10^{(n+2)}$. Étant donné les temps d'exécution de nos modèles mécaniques, le grand nombre de simulations ne pose pas de problème pour l'évaluation de la fiabilité.

2.3.3.4. Calcul de la fiabilité

Les études d'analyse des risques des structures vieillissantes. Industrielles ou de génie civil, et leur surveillance, ont vocation actuellement de répondre à beaucoup d'enjeux, en termes de sécurité mais aussi de durabilité et d'impact environnemental. Basées essentiellement sur le retour d'expérience, la plupart d'entre elles s'avèrent non appropriées. Dans la démarche de fiabilité des structures, les paramètres influents sont considérés comme des variables aléatoires. Le risque est évalué sous la forme d'une probabilité et non plus sous la forme d'un jugement binaire. La méthodologie d'optimisation de la maintenance par la fiabilité (OMF-structures), appliquée aux composants passifs, permet à l'exploitant de minimiser le risque de défaillance de sa structure, et d'optimiser les inspections en service et la maintenance.

La fiabilité de la conception de la structure est acceptable si la probabilité de défaillance est Pf , pour une condition limite donnée, 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 [9]. La fiabilité de conception est également définie comme la probabilité que la structure remplisse ses fonctions dans la période de temps spécifiée.

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 [10] : un domaine de défaillance lorsque la fonction de performance est négative et un domaine de sûreté lorsque la fonction de performance est positive. La fiabilité est également définie comme le complément des probabilités de défaillance :

$$\text{Fiabilité} = 1 - Pf = \int_{G(x) > 0} f_x(x) dx \quad (2.14)$$

2.4. Approches d'intervalle

2.4.1. Concept de variable d'intervalle

La variable d'intervalle est la forme la plus simple de la modélisation numérique non-probabiliste des incertitudes, il est défini comme une plage continue dans le domaine des nombres réels. Cette plage est délimitée par une borne inférieure et une borne supérieure. Lorsque l'intervalle est fermé, nous disons que les deux bornes peuvent être des réalisations du scalaire d'intervalle. La variable d'intervalle peut être déterminée par :

$$\mathbf{x} = \{x \mid x \in \mathbb{R}; \underline{x} \leq x \leq \bar{x}\} \quad (2.15)$$

Où \underline{x} et le borne inférieure et \bar{x} et la borne supérieure pour la variable d'intervalle \mathbf{x}

Le rayon de l'intervalle est défini comme suit :

$$\bar{\mathbf{x}} = \frac{\bar{x} - \underline{x}}{2} \quad (2.16)$$

Le point central de l'intervalle est défini comme suit :

$$\check{\mathbf{x}} = \frac{\bar{x} + \underline{x}}{2} \quad (2.17)$$

Une matrice d'intervalle $[\mathbf{X}]$ est l'ensemble des matrices pour lesquelles chaque coefficient x_{ij} est inclus dans son scalaire d'intervalle \mathbf{x}_{ij} correspondant.

$$[\mathbf{X}] = \{[\mathbf{X}] \mid x_{ij} \in \mathbf{x}_{ij}\} \quad (2.18)$$

Une matrice ou un vecteur d'intervalle nécessite que des scalaires d'intervalle soient définis pour chaque entrée de la matrice ou du vecteur.

La matrice ou un vecteur d'intervalle comprend toutes les combinaisons d'entrées tant qu'elles sont dans les limites de leur scalaire d'intervalle, comme défini dans l'équation (2.18).

L'évaluation d'une fonction générale $ef(x_1, x_2, \dots, x_n)$ qui dépend de variables d'intervalles $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_n$ doit prendre en considération toutes les combinaisons possibles des valeurs appartenant aux intervalles des variables concernées [21].

2.4.2. Analyse de la fiabilité

L'application du concept d'analyse d'intervalle dans l'étude de la fiabilité numérique est souvent appelée anti-optimisation [26].

Ben Haim nous a présenté Le concept d'anti-optimisation comme base d'une étude de fiabilité non probabiliste [27, 28]. Le concept de probabilité de défaillance qui sert de moyen de mesure de la fiabilité est remplacé par une plage de comportement acceptable. Cela signifie que la conception doit garantir que les performances restent dans un domaine acceptable, sans spécifier une probabilité de défaillance. La fiabilité devient alors un critère précis (ayant des valeurs possibles de 1 ou 0) distinguant les conceptions acceptables ou inacceptables. La caractéristique le plus important du concept d'anti-optimisation est qu'il élargit l'objectivité des études de

fiabilité à des variables incertaines dont seulement la plage de variation est connue, car le modèle d'intervalle représente parfaitement ces incertitudes sans avoir besoin d'informations additionnelles généralement subjectives. Pour certains cas, si la fiabilité requise tend vers un, la procédure d'anti-optimisation aboutit au même choix de paramètres de conception qu'une analyse probabiliste [29]. L'anti-optimisation se révèle dans ce cas bien moins coûteuse en temps de calcul.

2.4.3. Analyse d'intervalle

Le but de l'analyse d'intervalle est d'obtenir sur la base des informations suffisantes et utiles sur le comportement physique simulé en se basant sur une description d'intervalle de l'incertitude sur certains paramètres d'entrée du problème. Puisque la description de l'incertitude d'entrée d'intervalle ne donne aucune information sur la fréquence d'appartenance des paramètres incertains, le problème se réduit à trouver la plage du résultat de l'analyse. Il existe trois catégories importantes et fondamentales d'approches d'analyse d'intervalle : l'optimisation, l'arithmétique d'intervalle et la méthode des vertex.

2.4.3.1. Approche arithmétique

La méthode de calcul consiste à convertir l'action déterministe numérique en une procédure d'intervalle équivalent, et cela est dû à l'utilisation d'opérations d'intervalle arithmétique. La base de cette conversion est due aux opérations arithmétiques de division, multiplication, soustraction et addition :

$$\mathbf{a} + \mathbf{b} = [\underline{a} + \underline{b}, \bar{a} + \bar{b}] \quad (2.19)$$

$$\mathbf{a} - \mathbf{b} = [\underline{a} - \bar{b}, \bar{a} - \underline{b}] \quad (2.20)$$

$$\frac{\mathbf{a}}{\mathbf{b}} = \mathbf{a} \times \begin{bmatrix} \frac{1}{\bar{b}} & \frac{1}{\underline{b}} \end{bmatrix}, 0 \notin \mathbf{b} \quad (2.21)$$

$$\mathbf{a} \times \mathbf{b} = [\min\{\bar{a} \times \bar{b}, \bar{a} \times \underline{b}, \underline{a} \times \bar{b}, \underline{a} \times \underline{b}\}, \max\{\bar{a} \times \bar{b}, \bar{a} \times \underline{b}, \underline{a} \times \bar{b}, \underline{a} \times \underline{b}\}] \quad (2.22)$$

Afin de générer le code de calcul d'intervalle, chaque opération de base dans le calcul déterministe doit être remplacée par sa théorie du calcul d'intervalle. Ensuite, nous pouvons obtenir la plage de variation des grandeurs de réponse. L'inconvénient de cette approche arithmétique est que cette plage de variation est une approximation conservative de la plage exacte, au point où elle ne peut pas être utile pour des applications pratiques. Par conséquent, l'approche d'optimisation est la plus utilisée dans l'analyse d'intervalle [18].

2.4.3.2. La méthode des vertex

Cette méthode est considérée dans la littérature comme la méthode la plus largement utilisée dans l'analyse d'intervalle, en particulier dans l'analyse floue. Parmi les inconvénients de cette méthode. Premièrement, le temps de calcul augmente exponentiellement avec le nombre de variables incertaines. Cela limite son application à des problèmes à quelques variables d'intervalles. Deuxièmement, si la relation entre la procédure numérique déterministe et les

paramètres d'intervalles n'est pas monotone, cette méthode ne mène pas vers une solution précise [19].

La méthode des vertex a été présentée par Dong et al.[20]. Pour que cette méthode nous permette une approximation des bornes des intervalles des grandeurs de réponse d'une procédure numérique à variables d'intervalles. Les bornes des grandeurs de réponse sont obtenues par l'introduction à l'analyse de toutes les combinaisons possibles des bornes des paramètres d'entrée puis la sélection des valeurs extrêmes parmi tous les résultats. S'il existe N variables d'intervalles x_1, x_2, \dots, x_n , il y a 2^N combinaisons des bornes ou vertex dont l'analyse doit être effectuée pour chacune. Si ces combinaisons sont notées C_j , les bornes des résultats sont données par :

$$[\underline{y}, \bar{y}] \approx [\min_j f(C_j), \max_j f(C_j)]; \quad j = 1, \dots, 2^N \quad (2.23)$$

2.4.3.3. Approche d'optimisation

L'objectif de l'approche d'optimisation est de trouver les bornes inférieure et supérieure de la réponse d'une procédure numérique déterministe par le biais d'un algorithme de recherche à l'intérieur du domaine défini par les variables d'intervalle. L'analyse d'intervalle devient alors un problème d'optimisation dans lequel la fonction cible est la réponse de la procédure numérique déterministe, les variables de recherche sont les paramètres incertains et les contraintes sont les intervalles délimitant les valeurs des paramètres incertains. Il existe deux méthodes d'optimisation connues successivement : l'optimisation de la réponse de surface et l'optimisation globale.

La première méthode c'est la méthode de l'optimisation de la réponse de surface, il consiste à approcher la fonction cible est approximée par une fonction de réponse appropriée. Ensuite, L'optimisation est effectuée sur la surface de réponse. Cette approche permet de réduire énormément le temps de calcul par rapport à l'optimisation globale, mais sa précision dépend entièrement du degré d'exactitude de la fonction de surface de réponse [22].

Dans la deuxième méthode est la méthode d'optimisation globale, optima est recherché à travers une évaluation itérative de la fonction cible à des points désignés du domaine de recherche. Il existe plusieurs techniques d'optimisation qui ont été utilisée pour l'analyse d'intervalle telles que la recherche directionnelle [23], la programmation linéaire [24] et les algorithmes génétiques [25]. L'inconvénient de cette approche est qu'elle peut être très coûteuse en temps de calcul.

2.5. Approches floue ou possibiliste

2.5.1. Concept de variable floue ou possibiliste

2.5.1.1. Historique

En 1965, la théorie des sous-ensembles flous a été introduite et la logique floue a été développée par Lotfi A. Zadeh [30,31]. Puis, en 1974, le Docteur Mamdani a appliqué pour la première fois un contrôleur flou à un moteur à vapeur. Puis la première application de la logique floue a été réalisée en 1980 par F.L. Smith et Co. Pour que cette logique est encore très utilisée aujourd'hui dans divers domaines.

2.5.1.2. Définition de la logique floue

La logique floue est un outil pour formaliser des situations approximatives et non exactes. Alors que l'esprit humain est capable de penser à étudier et à traiter des données inexactes. Le concept de variable floue est de décrire la fonction d'appartenance du degré d'appartenance pour chaque élément dans l'ensemble flou. Ses valeurs peuvent graduellement varier entre Le degré '0' signifie la non-appartenance, le degré '1', l'appartenance totale. Toute valeur dans l'intervalle autre que '0' et '1', signifie une appartenance graduelle, partielle. Cette transition graduelle dans la description de l'appartenance peut être utilisée dans la représentation des incertitudes correspondant aux paramètres d'une analyse numérique [32]. Une variable floue \tilde{x} peut être définie par :

$$\tilde{x} = \{(x, \mu_{\tilde{x}}) | x \in [\underline{x}, \bar{x}]; \mu_{\tilde{x}}(x) \in [0, 1]\} \quad (2.24)$$

Une fonction d'appartenance $\mu_{\tilde{x}}$ est une fonction représentée en courbe dont les points se trouvent dans l'univers du discours ayant les valeurs d'appartenance entre 0 et 1, et $[\underline{x}, \bar{x}]$ est le domaine des valeurs possibles de \tilde{x} . Les fonctions d'appartenance regroupent dans trois classes : symétriques, régulièrement distribuées ou distribuées de manière non uniforme [33]. Les fonctions d'appartenance peuvent avoir différentes formes présentées dans la figure (2.3).

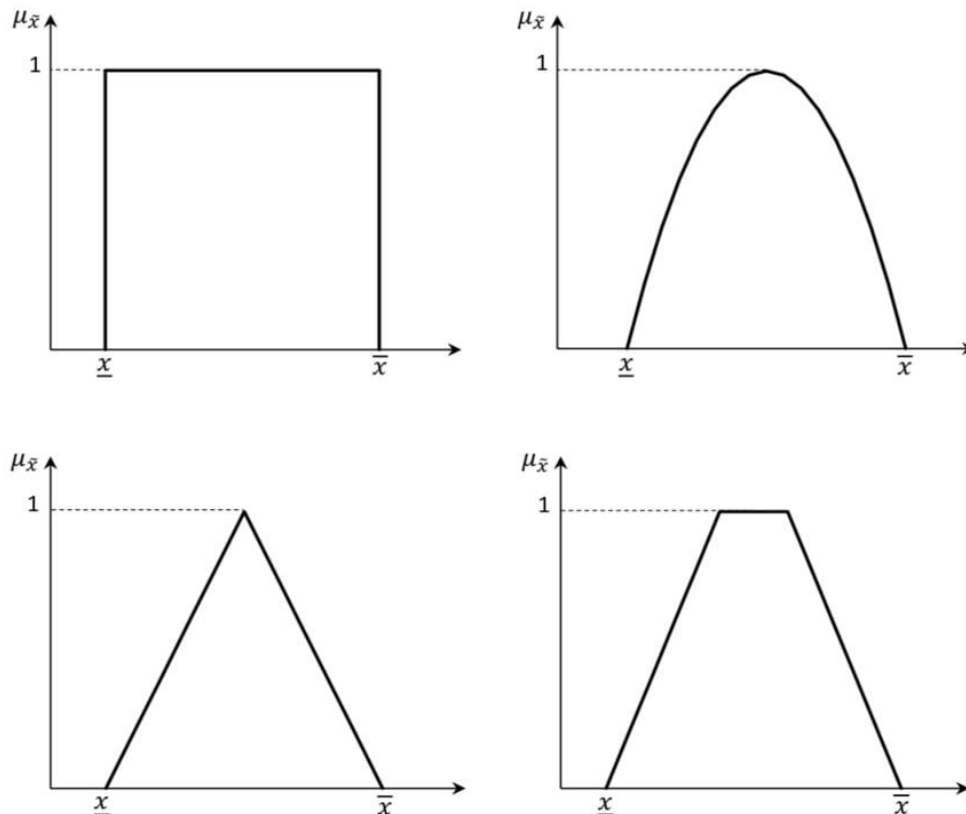


Figure 2.3 Formes simples des fonctions d'appartenance ou de distribution de possibilité.

Bien que les fonctions de distribution puissent être exécutées à l'aide d'opérations mathématiques telles que des algorithmes, des réseaux de neurones, etc., elles sont généralement exécutées de manière subjective sur la base de connaissances et d'expériences et la compréhension humaine du phénomène traité telles que telles que l'inférence, la préférence et l'intuition [34]. Dans l'analyse numérique floue, la connaissance de la forme précise de la distribution de possibilité n'est pas si importante, car les méthodes approchées généralement utilisées s'intéressent seulement aux intervalles correspondant à certains niveaux de possibilité [34]. Par conséquent, l'utilisation des distributions possibles sous différentes formes donne généralement des résultats presque identiques.

2.5.2. Analyse floue

Le but de l'analyse floue est de trouver une description floue de certaines quantités de réponse d'une procédure déterministe dans laquelle les paramètres d'entrée sont modélisés à l'aide de variables floues. Il y a trois étapes existantes pour donner la définition d'un analyse floue :

- La première étape c'est la combinaison des différents paramètres flous d'entrée $\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_n$;
- La deuxième étape consiste à calculer des grandeurs de réponse $y_j = f(X_j)$ correspondant à chaque combinaison des paramètres d'entrée $X_j = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$;

- La dernière étape consiste à La construction des fonctions de distribution de possibilité des grandeurs de réponse $\mu_{\tilde{y}}(y)$;

Pour n paramètres d'entrée flous et m combinaisons possibles de réalisation de ceux-ci, nous concluons de l'équation (2.25) que la valeur de la possibilité pour chaque combinaison est la plus petite valeur des possibilités de toutes les variables d'entrée

$$\mu(X_j) = \text{Min}\{\mu(x_i); i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, m\} \quad (2.25)$$

\tilde{y} Est la valeur de la possibilité de la grandeur de réponse floue pour une valeur spécifique y^* est la plus grande possibilité de toutes les combinaisons d'entrée résultant en y^*

$$\mu_{\tilde{y}}(y^*) = \text{Max}\{\mu(X_j); y^* = f(X_j); j = 1, \dots, m\} \quad (2.26)$$

Les deux équations (2.25) et (2.26) représentent le principe développé par Zadeh qui est le principe d'extension [35]. Ce principe décrit la relation entre les grandeurs de réponse et les distributions possibilistes des paramètres d'entrée. En théorie des probabilités, lorsque les événements sont dans un état indépendant, la probabilité d'un résultat est égale au produit des probabilités des événements constituants, dans le cas où l'on obtient le résultat de plusieurs façons, la probabilité d'un résultat est donnée par la somme des probabilités de toutes les voies, alors qu'en théorie des ensembles flous, lorsque les événements sont dans un état indépendant, la possibilité d'un résultat est égale à la possibilité minimale des événements constituants, dans le cas où l'on obtient le résultat de plusieurs façons la possibilité du résultat est donnée par la possibilité maximale de toutes les possibilités [19].

Puisque le principe d'extension a un côté positif, il a un inconvénient qui est qu'il ne peut pas être mis en œuvre directement dans un contexte numérique. Pour chaque valeur y du résultat, il faut toutes les combinaisons possibles de réalisation des paramètres flous d'entrée pour déterminer la valeur de la possibilité correspondante. Comme un nombre infini de combinaisons possibles de réalisation des variables flous d'entrée peut exister, une méthode numérique approximative est nécessaire pour calculer les grandeurs de réponse floues. Une approche couramment utilisée, connue sous le nom de la méthode de niveau- α ou de coupe- α [36], consiste à analyser les variables d'entrée à un niveau de possibilité α spécifique. Chaque niveau α est associé à des sous-ensembles $X_{i\alpha}$ de variables floues \tilde{x}_i définies comme :

$$X_{i\alpha} = \{x_i \in \tilde{x}_i, \mu_{\tilde{x}_i}(x_i) \geq \alpha\} \quad (2.27)$$

Cela signifie que chaque coupe- α est l'intervalle résultant de l'intersection de la fonction de distribution de possibilité à $\mu_{\tilde{x}_i}(x_i) = \alpha$ (figure (2.4)). Après la dérivation des coupes- α de toutes les quantités d'entrée à un niveau spécifique, une analyse d'intervalle général est effectuée sur ces intervalles. L'intervalle de sortie obtenu est une intersection de la fonction de distribution du résultat au niveau α et représente par conséquent une coupe- α du résultat. Cela signifie qu'une approximation discrétisée de la fonction de distribution possibiliste du résultat peut être obtenue en répétant la procédure de niveau- α à un certain nombre de niveaux, comme le montre la figure

(2.4).

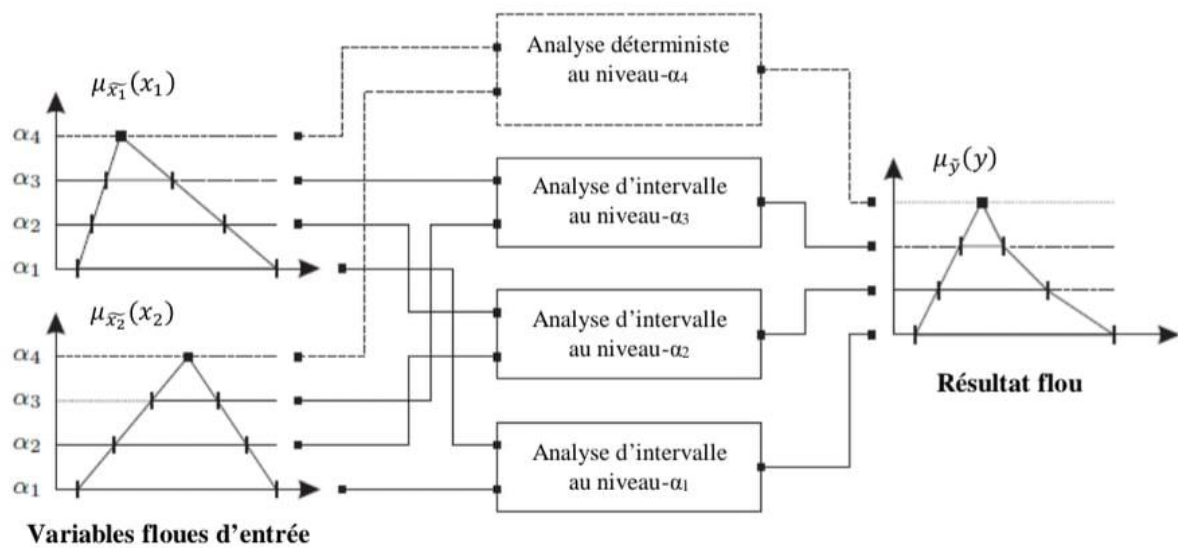


Figure 2.4 Procédure d'analyse floue en utilisant la méthode de discrétisation de coupe- α [18].

Afin de déterminer l'intervalle de la sortie à chaque niveau de coupe- α , toutes les méthodes d'analyses d'intervalle que nous avons décrites précédemment peuvent être utilisées. Mais la méthode des vertex est la méthode la plus utilisée dans l'analyse floue car elle est la moins coûteuse en temps de calcul. Comme l'analyse floue passe par cinq étapes en utilisant la méthode des vertex :

- En utilisant la méthode de niveau- α , nous représentons les paramètres d'entrée flous ;
- Ensuite, la formation de toutes les combinaisons possibles des valeurs maximales et minimums des paramètres d'entrée à chaque niveau α ;
- Puis le calcul de toutes les valeurs des Grandeurs de réponse pour toutes les combinaisons à chaque niveau α ;
- Puis la sélection des valeurs maximales et minimums des grandeurs de réponse comme valeurs extrêmes de la réponse floue au niveau α ;
- Et enfin, après le calcul des valeurs extrêmes des grandeurs de réponse à tous les niveaux α , construction des fonctions de distribution de possibilité des grandeurs de réponse.

2.5.3. Analyse de la fiabilité

Les résultats de l'analyse floue peuvent être utilisés pour déterminer la probabilité de défaillance [36]. La méthode des possibilités peut être utilisée comme un outil pour étudier la fiabilité numérique du système. Cependant, la probabilité de cet échec est relative car elle est affectée par la subjectivité qui est généralement implicite dans la définition des paramètres d'entrée flous. Par exemple, si un groupe de personnes est confronté au même problème, ils obtiendront généralement des valeurs de probabilité d'échec différentes. De plus, l'interprétation des résultats

de l'analyse probabilité-fiabilité doit se faire en l'absence d'information, et est liée au choix de l'analyste lors de la définition des paramètres d'entrée flous. Pour cette raison, cette méthode est extrêmement difficile à standardiser dans les règles générales d'analyse de fiabilité.

La fiabilité de l'utilisation de l'analyse floue étant connue pour être étudiée, Catallo [25] et Biondini et al ont adopté un autre principe. [37]. Basée sur la technologie α -coupe, l'anti-optimisation peut être effectuée à chaque niveau de discrétisation. Cela peut être utilisé pour dériver le niveau pour atteindre la marge de sécurité requise. L'intervalle obtenu par l'intersection de la fonction de distribution de probabilité des paramètres d'entrée au même niveau $-\alpha$ définit la plage de valeurs admissibles de l'attribut non déterministe. Similaire au concept de probabilité de défaillance, la plage de valeurs admissibles causée par l'anti-optimisation de niveau est affectée par la subjectivité de la définition des paramètres d'entrée. La conclusion qui en est tirée est que l'utilisation de méthodes floues pour étudier la fiabilité ne fournit pas une mesure absolue de la qualité de la conception .

Chapitre III : Méthodologie d'analyse

3.1. Introduction

La corrosion des armatures est une cause principale de la dégradation des structures en béton armé exposées aux chlorures. Les incertitudes épistémiques jouent un rôle important dans l'analyse fiabiliste de la durabilité des structures en béton armé. Dans l'analyse de fiabilité structurelle traditionnelle, les incertitudes sont traitées par une modélisation probabiliste et une analyse statistique. Les incertitudes dues à des informations incomplètes sont différentes du caractère aléatoire inhérent d'une quantité physique (souvent appelée incertitude « aléatoire »). La sécurité structurelle est mesurée par une probabilité de défaillance. Pour cette étude, les incertitudes épistémiques sont représentées par une boîte de probabilités. L'analyse fiabiliste est alors entretenue par une approche mixte probabiliste-intervalle.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à la méthodologie d'analyse qui nous permet de donner un aperçu du rôle des incertitudes épistémiques sur la fiabilité de la durabilité. Nous commençons d'abord par une brève présentation des concepts de base de la fonction de probabilité. Puis une description du couplage de l'analyse d'intervalle et la simulation de Monte Carlo. Ensuite une brève description du modèle utilisé pour estimer la concentration des chlorures. Et finalement, schématiser l'organigramme d'analyse probabiliste d'intervalle de l'initiation de la corrosion des armatures de béton.

3.2. Approche de calcul de la probabilité d'initiation de la corrosion

3.2.1. Notions de base de la Fonction de probabilités d'intervalle

Soit $F_X(x)$ la fonction de distribution cumulative (FDC) pour une variable incertaine aléatoire X . S'il n'y a pas assez de données pour définir une modélisation probabiliste unique, un intervalle fermé $[\underline{F}_X(x), \overline{F}_X(x)]$ peut-être trouvé pour sélectionner ou borner les valeurs possibles de $F_X(x)$, et à partir de là on dit $\underline{F}_X(x) \leq F_X(x) \leq \overline{F}_X(x)$. Une telle paire de deux FDC $\underline{F}_X(x)$ et $\overline{F}_X(x)$ définit une « boîte de probabilité ». Les deux FDC $\underline{F}_X(x)$ et $\overline{F}_X(x)$ de la boîte de probabilité forme une enveloppe de toutes les distributions de probabilités possibles. En fonction des informations disponibles, une boîte de probabilité peut être construite de plusieurs manières. La façon la plus simple consiste à supposer raisonnablement le type de distribution, alors que les paramètres de distribution sont estimés sous forme d'intervalles [58].

3.2.2. Simulation Monte Carlo couplée à une analyse d'intervalle :

Afin d'effectuer une analyse de fiabilité avec des boîtes de probabilité, des méthodes basées sur l'échantillonnage sont utilisées [59,60]. Tout d'abord, nous considérons la simulation de Monte Carlo conventionnelle, où la probabilité de défaillance, P_f est estimée par la relation suivante :

$$P_f = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N I[G(x_j) \leq 0] \quad (3.1)$$

Dans laquelle N est le nombre total des échantillons de Monte Carlo, et x_j représente la valeur j du vecteur des variables aléatoires X et $G()$ est la fonction d'état limite. La défaillance se produit lorsque $G() \leq 0$. $I[]$ est la fonction indicatrice qui prend une valeur de 1 si $G() \leq 0$ et une

valeur de 0 le cas contraire. La fonction d'état limite dans le cas de l'étude de l'initiation de la corrosion est donnée par :

$$G(X, t) = C_{th}(X) - C_t(X, t) \quad (3.2)$$

Dans laquelle, C_{th} est la concentration seuil des chlorures dans le béton et C_t est la concentration des chlorures totaux dans le béton à la profondeur d'enrobage.

Pour que x_j échantillons puissent être générés, on utilise la méthode de transformation inverse [61] :

$$\mathbf{x}_j = F_X^{-1}(u_j), \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (3.3)$$

Dans laquelle $F_X(\cdot)$ étant le FDC de X , et u_1, \dots, u_N les échantillons des variables aléatoires uniformes standard indépendantes et identiquement distribuées.

Considérons maintenant la situation dans laquelle $F_X(\cdot)$ est inconnu mais limité par $\underline{F}_X(\cdot)$ et $\overline{F}_X(\cdot)$. Étant donné que seules les limites de $F_X(\cdot)$ sont connues, il n'est pas possible de générer des échantillons ponctuels mais uniquement des échantillons d'intervalle. (Voir l'équation (3.3)) :

$$\begin{cases} \underline{\mathbf{x}}_j = F_X^{-1}(u_j), \\ \overline{\mathbf{x}}_j = F_X^{-1}(u_j), \end{cases} \quad j = 1, \dots, N, \quad (3.4)$$

Puisque FDC est inverse et décroissant de façon monotone, Supposons qu'il s'ensuit que $\underline{\mathbf{x}}_j \leq \mathbf{x}_j \leq \overline{\mathbf{x}}_j$. L'équation (3.3) indique que pour une donnée u_j , l'intervalle $[\underline{\mathbf{x}}_j, \overline{\mathbf{x}}_j]$ contient toutes les simulations possibles de la famille de probabilité représentée par la boîte de probabilité.

Puisque :

$$\begin{cases} \underline{G}_j(\mathbf{x}) = \min\{G(\mathbf{x}) : \underline{\mathbf{x}}_j \leq \mathbf{x} \leq \overline{\mathbf{x}}_j\}, \\ \overline{G}_j(\mathbf{x}) = \max\{G(\mathbf{x}) : \underline{\mathbf{x}}_j \leq \mathbf{x} \leq \overline{\mathbf{x}}_j\}, \end{cases} \quad (3.5)$$

Et on déduit l'inégalité suivante :

$$I[\overline{G}_j(\mathbf{x}) \leq 0] \leq I[G(x_j) \leq 0] \leq I[\underline{G}_j(\mathbf{x}) \leq 0]. \quad (3.6)$$

L'équation (3.4) montre que dans chaque simulation, il faut calculer les bornes de la fonction d'état limite lorsque les variables aléatoires simulées varient par intervalles. Il s'agit d'un problème typique de recherche de distance et peut être résolu par la méthode d'analyse par intervalles [62].

Lorsque nous appliquons l'équation (3.1) à l'inégalité (3.5), cela donne :

$$\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N I[\overline{G}_j(\mathbf{x}) \leq 0] \leq \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N I[G(x_j) \leq 0] \leq \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N I[\underline{G}_j(\mathbf{x}) \leq 0]. \quad (3.7)$$

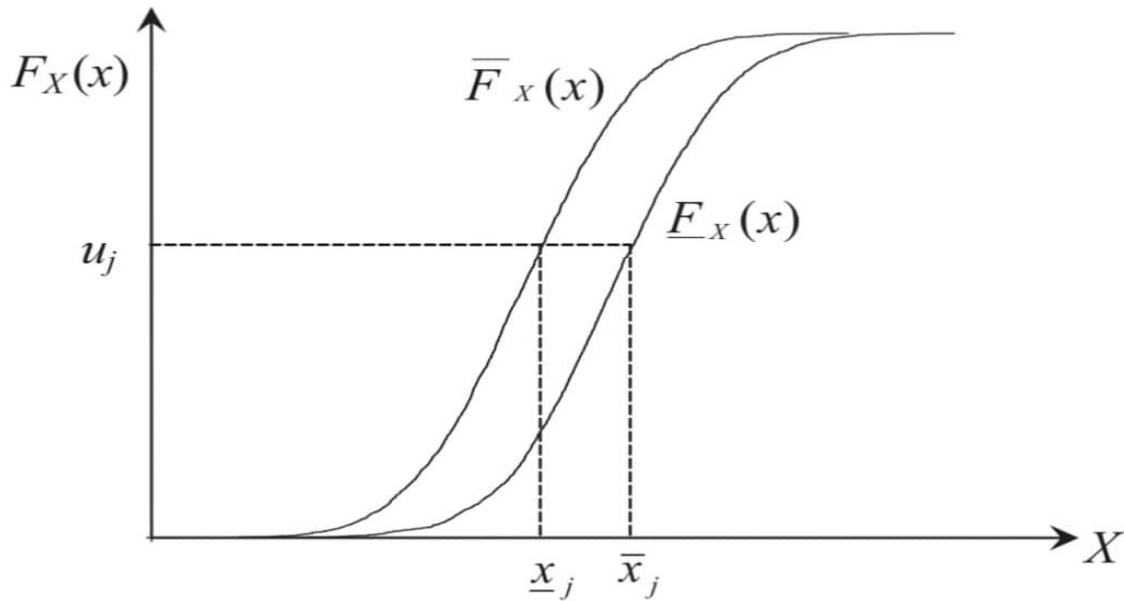


Figure 3.1. Génération d'intervalles aléatoires à partir d'une boîte de probabilité continue [61].

Par conséquent, une limite inférieure et une limite supérieure pour Pf sont données comme suit :

$$\underline{Pf} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N I[\bar{G}_j(\mathbf{x}) \leq 0], \quad \bar{Pf} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N I[G_j(\mathbf{x}) \leq 0]. \quad (3.8)$$

3.3. Modèle d'estimation de la concentration des chlorures

Dans ce travail, le modèle empirique de pénétration des chlorures, basé sur la deuxième loi de diffusion de Fick, a été utilisé. Dans ce modèle, les processus de transport de chlorures sont représentés par un coefficient de diffusion de chlorure « apparent » [48].

La concentration en chlorure C_t à une distance x de la surface du béton à un instant de temps est donnée par l'équation suivante :

$$C_t(x, t) = C_s \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_{C1}t}} \right) \right) \quad (3.9)$$

Dans laquelle C_s est la concentration des chlorures en surface, D_{C1} est le coefficient apparent de diffusion des chlorures et erf est la fonction d'erreur.

Il a été observé que le coefficient de diffusion diminue avec le temps. On définit le coefficient de diffusion par l'équation suivante :

$$D_{C1}(t) = D_{C1}^0 \left(\frac{t_0}{t} \right)^n \quad (3.10)$$

Où D_{C1}^0 est le coefficient de diffusion à l'âge t_0 du béton et n l'exposant de vieillissement. En réalité, le coefficient de diffusion D_{C1} ne peut pas diminuer à l'infini avec le temps. Il diminue

progressivement selon l'équation (3.2) pendant les 30 premières années d'exposition et puis commence à s'approcher d'une valeur constante.

La concentration en surface C_s dépend de la salinité de l'eau de mer et de sa concentration en chlorures ainsi que de la capacité d'absorption des chlorures des matériaux en béton. La concentration en chlorures en surface est généralement exprimée par :

$$C_s = A * (E/C) \quad (3.11)$$

Où le paramètre A est lié à l'environnement et E/C représente le rapport eau/liant. Les dernières études ont montré que C_s dépend aussi du temps selon l'équation suivante :

$$C_s(t) = A(E/C) \frac{at}{1 + at} \quad (3.12)$$

La figure (3.2) montre l'algorithme du modèle développé pour déterminer la boîte de probabilité $P_f(t)$ du temps d'initiation de la corrosion et estimer la durée de vie des structures en béton exposées aux chlorures.

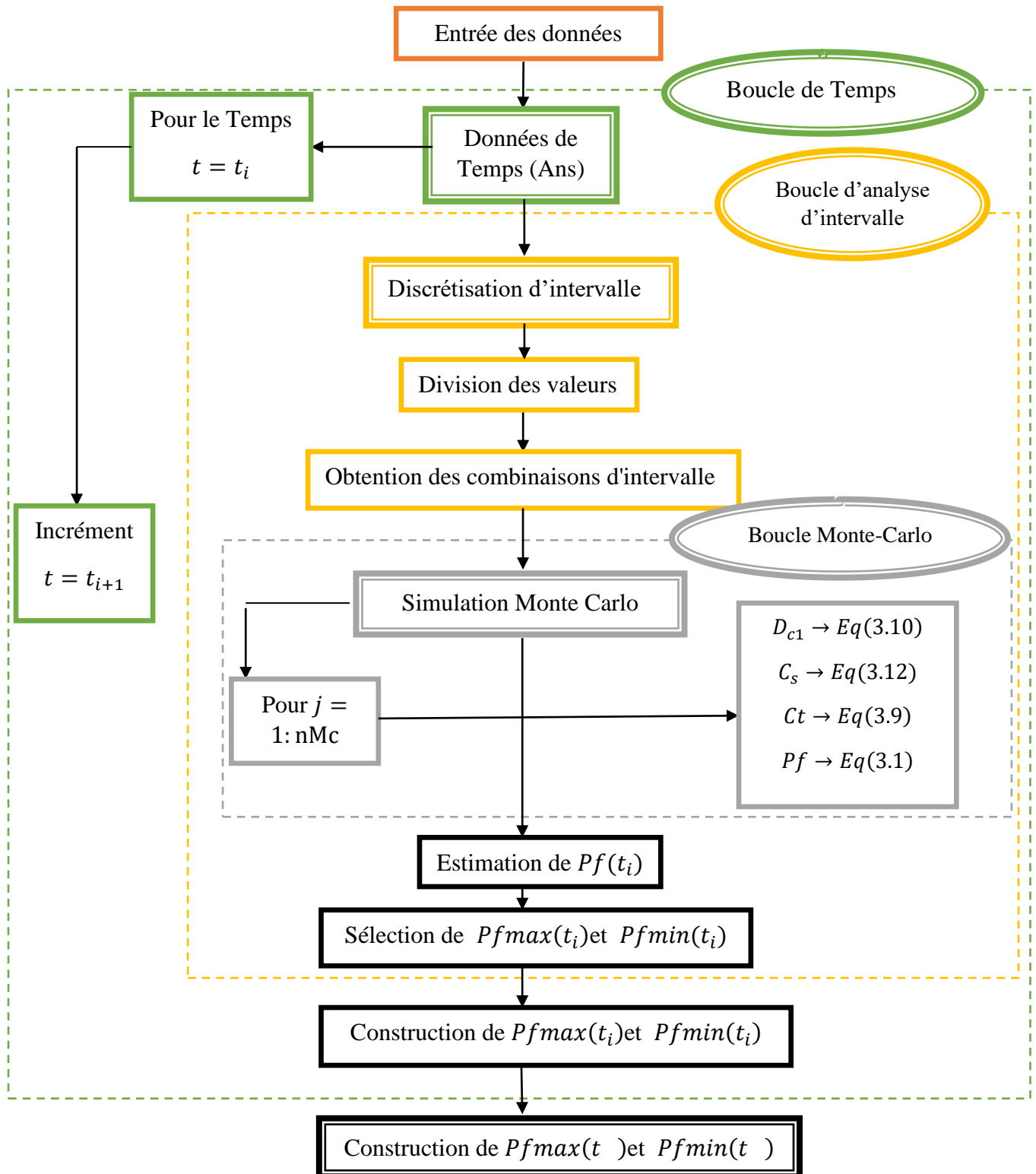


Figure 3.2. Organigramme d'analyse probabiliste d'intervalle de l'initiation de la corrosion des armatures de béton.

Chapitre IV : Applications numériques et résultats

4.1. Introduction

Pour examiner la performance numérique du modèle développé, la durabilité vis-à-vis de la corrosion d'une pile de pont a été étudiée. Le pont est construit dans la province de Guangdong, une région marine subtropicale dans le sud de la Chine [58]. La température moyenne annuelle dans le site du projet varie de 22,3 à 23,1 °C. L'humidité moyenne annuelle est comprise entre 77% et 80% avec de grandes variations saisonnières. L'humidité saisonnière peut atteindre 100 % au printemps et en été, et chute à 10 % en hiver. La teneur en ions chlorures dans l'eau de mer est de l'ordre de 10700– 17020 mg/L.

Le béton du projet a un rapport eau/liant (w/b) de 0,35. Le liant a une composition ternaire : Ciment Portland (rapport massique 50%), cendres volantes (20%) et laitiers (30%). Un nombre limité d'essais in situ ont été menés au cours des trois dernières décennies dans la même région. Ces essais visent à investiguer la performance à long terme des structures implantées dans cette région. Dans cette campagne expérimentale, le coefficient de diffusion et la concentration des chlorures en surface ont été obtenus en ajustant le profil des chlorures à un certain âge d'exposition à la loi empirique de Fick. La régression a fourni la concentration en surface et le coefficient de diffusion à cette âge particulier d'exposition. Bien que les résultats des tests soient précieux, malheureusement, le nombre de données est insuffisant pour déterminer avec précision les propriétés statistiques des variables utilisées dans le modèle d'estimation du temps d'initiation de la corrosion. Des incertitudes épistémiques importantes existent, notamment dans la teneur critique en chlorure C_{th} , la concentration des chlorures en surface C_s et l'exposant de vieillissement n du coefficient de diffusion. Les incertitudes épistémiques, ainsi que d'autres incertitudes aléatoires, doivent être clairement définies dans l'évaluation fiabiliste de la durabilité.

Le tableau (4.1) donne les caractéristiques des paramètres incertains aléatoires et épistémiques considérés dans cette étude.

Paramètre	Type	Distribution	Moyenne	Ecart type
C_{th}	Épistémique	Beta	[0.757,0.770] % pds de ciment	[0.303,0.320]
A	Épistémique	Normale	[15.36, 18.64] % pds de ciment	3.74
n	Épistémique	Normale	[0.428,0.512]	0.096
D_{28}	Aléatoire	Normale	$3 (10^{-12}) \text{ m/s}^2$	0.6
d	Aléatoire	Normale	80 mm	5.3

Tableau 4.1. Description des paramètres incertains considérés.

Dans ce chapitre, une étude paramétrique a été menée pour investiguer l'effet de l'incrément de temps, du nombre de tirages de Monte Carlo et de la discrétisation des intervalles.

4.2. Effet de l'incrément de temps

Pour investiguer l'effet de l'incrément de temps sur l'estimation de la probabilité d'initiation de la corrosion, 4 valeurs ont été utilisées dans les simulations. Le nombre de tirages de Monte Carlo adopté est de 20000 échantillons. Les paramètres intervalles ont été discrétisés en 2 valeurs seulement (bornes supérieure et inférieure). La figure (4.1) montre les bornes supérieur et

inférieure de la fonction cumulative de la probabilité d'initiation de la corrosion en fonction du temps. On remarque que jusqu' à une durée de 10 ans le risque d'initiation de la corrosion est nul. Ensuite, le risque commence à augmenter en fonction du temps, mais il reste minimale jusqu' à une durée de 20 ans. Ensuite, le risque devient de plus en plus considérable et atteint une valeur comprise entre 0.3 et 0.6 à la durée de vie cible de l'ouvrage (75 ans).

On remarque aussi la grande différence entre les bornes supérieure et inférieure de la probabilité d'initiation de la corrosion. Cette dispersion est principalement due aux incertitudes épistémiques qui s'amplifient dans une analyse de la fiabilité. Cela montre l'importance de la prise en compte du type d'incertitude d'une façon appropriée qui reflète son effet sur la précision d'estimation du temps d'initiation de la corrosion.

Il peut être clairement constaté l'effet négligeable de l'incrément de temps. Les bornes supérieures et inférieures de la fonction cumulative de la probabilité d'initiation de la corrosion sont juxtaposées pour les différentes valeurs de l'incrément de temps. Dans la suite du travail, un incrément de temps de 1 jour sera adopté.

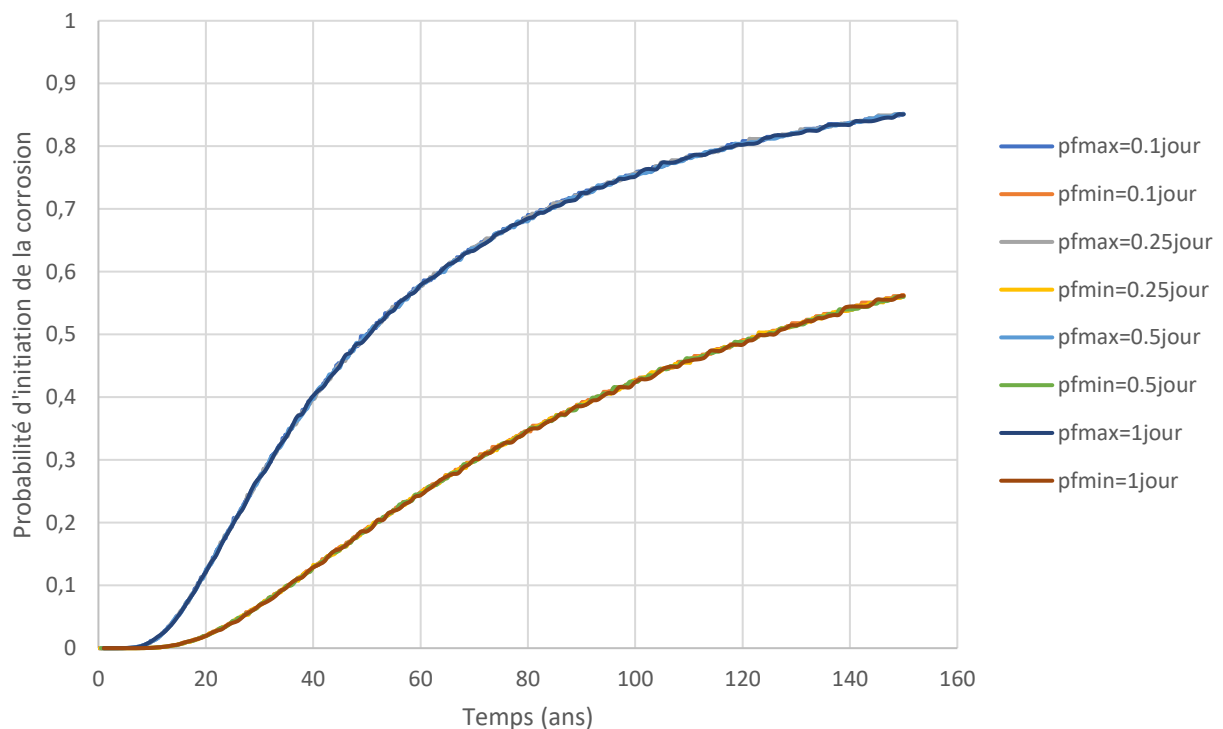


Figure 4.1. Effet de l'incrément de temps sur la probabilité d'initiation de la corrosion.

4.3. Effet du nombre de tirages de Monte Carlo

Pour investiguer l'effet du nombre de tirages Monte Carlo sur la précision d'estimation de la probabilité d'initiation de la corrosion, des simulations avec différents nombres d'échantillons ont été entretenues. La figure (4.2) montre les bornes supérieur et inférieure de la fonction cumulative de la probabilité d'initiation de la corrosion obtenues pour des simulations avec 1000, 5000, 10000 et 20000 échantillons. Les paramètres intervalles ont été discrétisés en deux

valeurs seulement (bornes inférieure et supérieure). Théoriquement, plus le nombre d'échantillons augmente plus la précision des simulations s'améliore. On remarque que les courbes obtenues sont quasiment identiques pour les différents nombres de tirages. Cela signifie qu'une simulation avec 1000 échantillons est suffisante pour avoir une bonne précision. Cela résulte en une réduction très importante du coût de calcul. Dans la suite du travail, les simulations de Monte Carlo sont menées avec 1000 tirages.

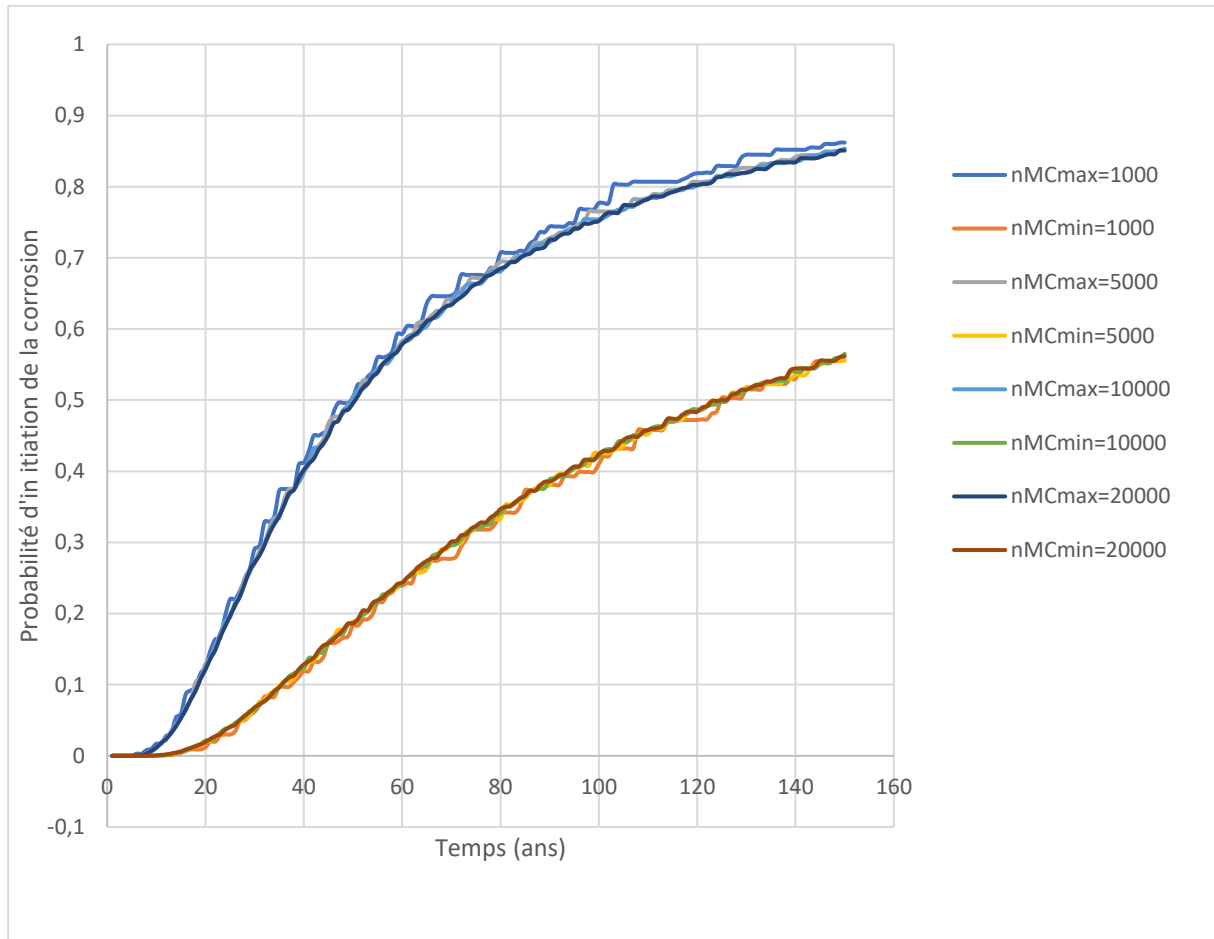


Figure 4.2. Effet du nombre de tirages Monte Carlo sur la probabilité d'initiation de la corrosion.

4.4. Effet du rapport Eau/Liant (E/L)

Pour investiguer l'effet du rapport **E/L** 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 trois différentes valeurs de rapport E/L (0,35 – 0,45 – 0,55). Les résultats des simulations sont montrés sur la figure (4.3). Nous remarquons que le rapport E/L 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/L sur les propriétés du béton (réduction de la perméabilité), affectant ainsi la pénétration des chlorures dans le béton (la diffusion et la convection des chlorures).

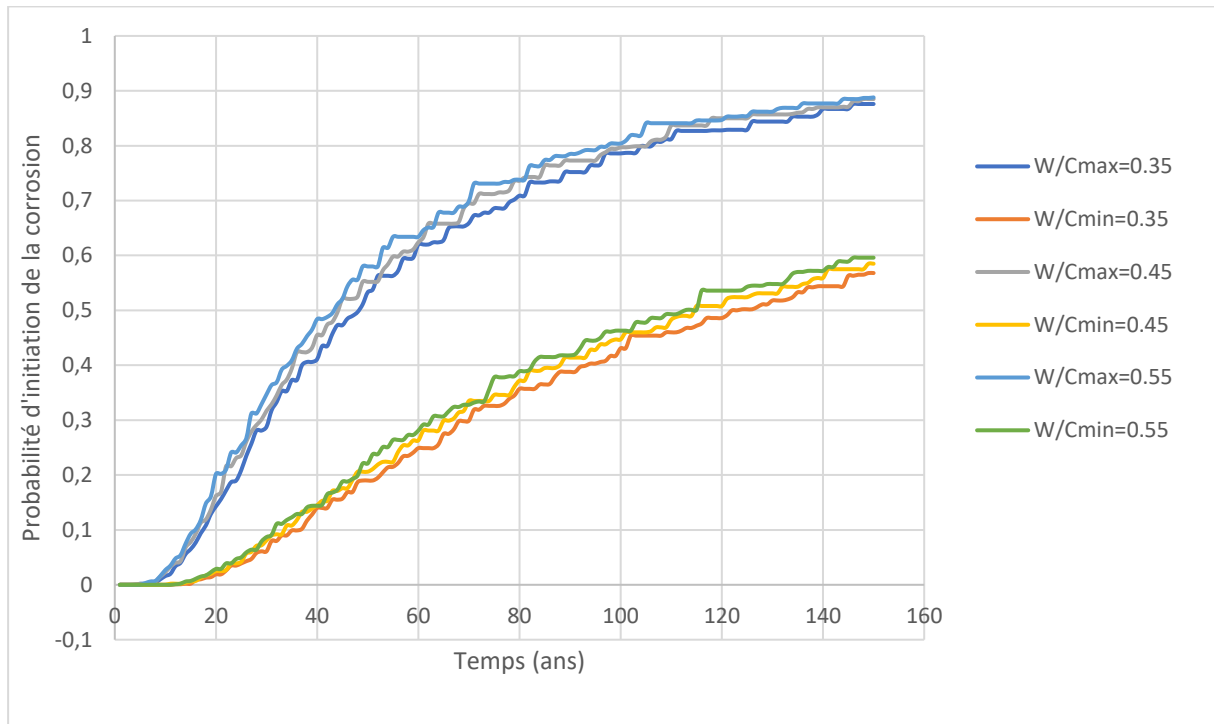


Figure 4.3. Effet du rapport E/L sur la probabilité d'initiation de la corrosion.

4.5. Effet du nombre d'intervalles de discrétisation

Pour investiguer l'effet du nombre d'intervalles de discrétisation sur la précision d'estimation de la probabilité d'initiation de la corrosion, des simulations avec 1, 3, 5 et 7 intervalles ont été faites. Les résultats sont montrés dans la figure (4.4). Nous remarquons que le nombre d'intervalles n'a pas d'impact significatif sur la précision d'estimation du temps d'initiation de la corrosion. Cela est dû à la monotonie du modèle de détermination du profil des chlorures, qui donne des extremums pour les bornes supérieures et inférieures des paramètres d'entrée.

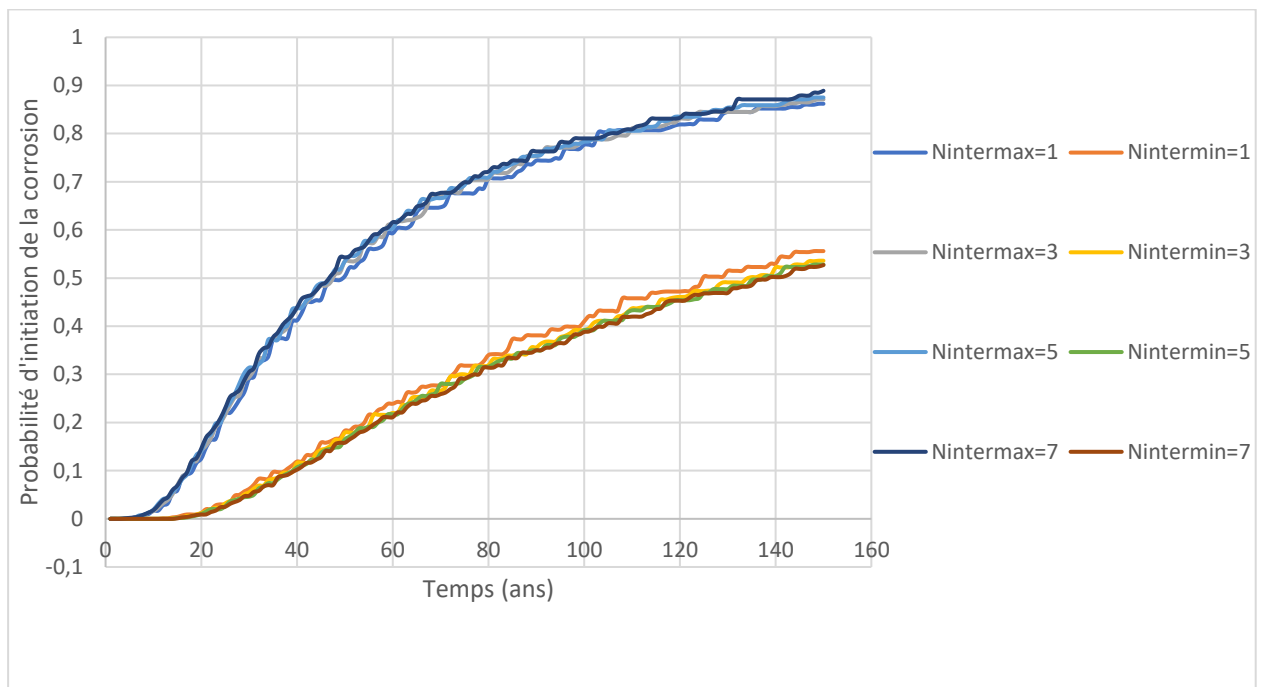


Figure 4.4 Effet du nombre d'intervalles de discrétisation sur la probabilité d'initiation de la corrosion.

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale et perspectives

Les structures en béton armé souffrent de graves problèmes de dégradation affectant considérablement leur durabilité, ceci est principalement dû à la pénétration des chlorures. Aussi, afin d'améliorer les performances et la durabilité des structures en génie civil, il est indispensable de connaître les paramètres influant la corrosion induite par l'attaque des chlorures.

Dans le présent travail, nous nous sommes intéressés à proposer un modèle pour estimer le temps d'initiation de la corrosion des armatures de béton induite par l'attaque des chlorures. Il prend en considération les différentes incertitudes dans les paramètres d'entrée. Une analyse probabiliste a été réalisée pour estimer le temps d'initiation de la corrosion et a été performée en combinant l'analyse d'intervalle et la simulation de Monte Carlo. Le modèle développé a été écrit dans un programme sur MATLAB. Une étude paramétrique a été menée pour investiguer l'effet des paramètres numériques du modèle. Les conclusions suivantes peuvent être tirées de cette étude :

- L'effet de l'incrément de temps est négligeable ;
- La simulation Monte-Carlo avec 1000 échantillons est suffisante pour avoir une bonne précision donc c'est une réduction très importante du coût de calcul ;
- Le rapport E/L a un effet considérable sur l'évolution de la corrosion dans le béton ;
- Le nombre d'intervalles de discrétisation n'a pas d'impact significatif sur l'analyse de la corrosion dans le béton armé ;

Références Bibliographique

- [1] A. Ababneh. The coupled effect of moisture diffusion, chloride penetration and freezing-thawing on concrete durability. Ph.D. Dissertation, University of Colorado, Boulder, CO, USA, (2002), pp 207.
- [2] J. Crank. Mathematics of diffusion. Oxford University Press, (2nd ed.) London, (1975).
- [3] A. Der Kiureghian, O. Ditlevsen. Aleatory or epistemic? Does it matter? Structural Safety 31 (2009) 105–112.
- [4] H.HAMIDANE ,Modélisation de la performance des structures en béton armé dans les milieux agressifs .Thèse de doctorat d'université.Tébessa :Université LarbiTébessi, 2021,30p.
- [5] R. E. Walpole, R. H. Myers, S. L. Myers, K. Ye. Probability and statistics for engineers and scientists. Pearson, (9th ed.) Boston, (2012).
- [6]DEBY Fabrice, « Approche probabiliste de la durabilité des bétons en environnement marin», thèse de doctorat de l'université de Toulouse, 2008.
- [7]J. Kabbara. Evaluation fiabiliste de l'impact des facteurs climatiques sur la corrosion des poutres en béton armé : application au cas libanais. Thèse de Doctorat, Université Blaise Pascal, Aubière, Clermont-Ferrand, France, (2010), pp 158.
- [8]EL HASSAN G., Evaluation fiabiliste de l'impact des facteurs climatiques sur la corrosion des poutres en béton arme application au cas libanais. Thèse de doctorat d'université. Blaise pascal – Clermont II : Université blaise pascal – Clermont II, 2010, 175 p.
- [9]Calcul des structures en béton - Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments, EN 1992-1-1, 2004.
- [10]M. Lemaire, A. Chateauneuf, J.C. Mitteau. Fiabilité des structures, couplage mécano-fiabiliste statique; Hermès Sciences publications, Lavoisier 2005.
- [11] Nowak AS, Collins KR (2000) Reliability of structures. McGraw Hill, Michigan.
- [12] D. Moens, D. Vandepitte. Recent advances in non-probabilistic approaches for non-deterministic dynamic finite element analysis. Archives of computational Methods in Engineering 13(3) (2006) 389-464.
- [13] 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.
- [14] M. Lemaire, A. Chateauneuf, J. C. Mitteau. Structural reliability. ISTE Ltd and John Wiley & Sons, London, (2009).

- [15] Comité Européen du Béton « Manuel Sécurité des Structures - concepts généraux charges et actions », Bulletins d'informations 106 et 107, 1975.
- [16] Comité Européen du Béton « General principles on Reliability for Structures », Bulletin d' information 191, 1988.
- [17] 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.
- [18] D. Moens, M. Hanss. Non-probabilistic finite element analysis for parametric uncertainty treatment in applied mechanics: Recent advances. *Finite Elements in Analysis and Design* 47 (2011) 4-16.
- [19] U.O. Akpan, T.S. Koko, I.R. Orisamolu, B.K. Gallant. Practical fuzzy finite element analysis of structures. *Finite Elements in Analysis and Design* 38 (2001) 93–111.
- [20] W. Dong, H. Shah. Vertex method for computing functions of fuzzy variables. *Fuzzy Sets and Systems* 24 (1987) 65–78.
- [21] H.HAMIDANE, Modélisation de la performance des structures en béton armé dans les milieux agressifs .Thèse de doctorat d'université. Tébessa : Université LarbiTébessi, 2021, 38-39p.
- [22] U. Akpan, T. Koko, I. Orisamolu, B. Gallant. Fuzzy finite element analysis of smart structures. *Smart Materials and Structures* 10 (2001) 273–284.
- [23] S. Rao, L. Chen. Numerical solution of fuzzy linear equations in engineering analysis. *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 43 (1998) 391–408.
- [24] U. Köylüoğlu, I. Elishakoff. A comparison of stochastic and interval finite elements applied to shear frames with uncertain stiffness properties. *Computers & Structures* 67 (1998) 91–98.
- [25] L. Catallo. Genetic anti-optimization for reliability structural assessment of precast concrete structures. *Computers & Structures* 82 (13–14) (2004) 1053–1065.
- [26] H.HAMIDANE, Modélisation de la performance des structures en béton armé dans les milieux agressifs .Thèse de doctorat d'université. Tébessa : Université LarbiTébessi, 2021, 41p.
- [27] Y. Ben-Haim. A non-probabilistic concept of reliability. *Structural Safety* 14 (1994) 227-245.
- [28] Y. Ben Haim. A Non-Probabilistic Measure of Reliability of Linear Systems based on Expansion of Convex Models. *Structural Safety* 17 (1995) 91–109.
- [29] M. Zingales, I. Elishakoff. Anti-Optimization Versus Probability in an Applied Mechanics Problem: Vector Uncertainty. *Transactions of the ASME, Journal of Applied Mechanics* 67 (2000) 472–483.

- [30] L. Zadeh. Fuzzy sets. *Information and Control* 8 (1965) 338–353.
- [31] L. Zadeh. Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes. *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on*, (1973) 28-44.
- [32] J.C. Bezdek. ‘The thirsty traveler visits Gamont: a rejoinder to Comments on fuzzy sets-What are they and why?’, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 1994, vol. 2, no 1, p. 43-45
- [33] J. Godjevac. *Idées nettes sur la logique floue*. Presses polytechniques et universitaires romandes. (1999).
- [34] T. J. Ross. *Fuzzy logic with engineering applications*. John Wiley & Sons, Ltd, (3rd ed.) USA, (2010).
- [35] L. Zadeh. Fuzzy sets. *Information and Control* 8 (1965) 338–353.
- [36] J. Sawyer, S. Rao. Strength-based reliability and fracture assessment of fuzzy mechanical and structural systems. *AIAA Journal* 37(1) (1999) 84–92.
- [37] F. Biondini, F. Bontempi, P. Malerba. Fuzzy reliability analysis of concrete structures. *Computers & Structures* 82(13-14) (2004) 1033–1052.
- [38] W. D. Callister, D. G. Rethwisch. *Materials science and engineering: an introduction*. John Wiley & Sons, Inc., (8th ed.) USA, (2010).
- [39] G. EL HASSAN, Evaluation fiabiliste de l’impact des facteurs climatiques sur la corrosion des poutres en béton arme application au cas libanais. Thèse de doctorat d’ université. Blaise pascal - Clermont II : Université blaise pascal -clermont II, 2010, 175 p.
- [40] Ployaert C., la corrosion des armatures des béton armes et précontraints, Fédération de l’Industrie Cimentière Belge, 2008, 16, p. 7.
- [41] 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.
- [42] 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.
- [43] 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.
- [44] K. Pettersson dans R.K. Dhir, M.R. Jones (Eds.). *Concrete2000*, vol. 1, E&FN Spon, London, p. 461, 1993.

- [45] A. Almusallam. Effect of degree of corrosion on the properties of reinforcing steel bars, *Construction and Building Materials* vol. 15, p. 361-368, 2001.
- [46] Y. Wang, L. Li, C. L. Page. Modeling of chloride ingress into concrete from a saline environment. *Journal of Building and Environment* 40 (2005) 1573-1582.
- [47] H. Hamidane, 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.
- [48] M. Collepardi, A. Marcialis, R. Turriziani, Penetration of chloride ions into cement pastes and concretes, *J. Am. Ceram. Soc.* 55 (10) (1972) 534–535.
- [49] M. B. Anoop, K. B. Rao, T. V. S. R. A. Rao. Application of fuzzy sets for estimating service life of reinforced concrete structural elements in corrosive environments. *Engineering Structures* 24 (2002) 1229-1242.
- [50] H-W Song, S-J Kwon. Evaluation of chloride penetration in high performance concrete using neural network algorithm and micro pore structure. *Cement and Concrete Research* 39 (2009) 814-824.
- [51] A. V. Saetta, R. Scotta, R. Vitaliani. Analysis of chloride diffusion into partially saturated concrete. *ACI Materials Journal* 90(5) (1993) 441-451.
- [52] R. Frey, T. Balogh, G.L. Balázs. Kinetic method to analyze chloride diffusion in various concretes. *Cement and Concrete Research* 24(5) (1994) 863-873.
- [53] Y. Xi, Z. P. Bazant. Modeling chloride penetration in saturated concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering* 11(1) (1999) 58-65.
- [54] Y. Wang, L. Li, C. L. Page. Modeling of chloride ingress into concrete from a saline environment. *Journal of Building and Environment* 40 (2005) 1573-1582.
- [55] S. Chatterji. Transportation of ions through cement based materials, Part I. Fundamental equations and basic measurement techniques. *Cement and Concrete Research* 24(5) (1994) 907-912.
- [56] DuraCrete. Probabilistic performance based durability design of concrete structures. The European Union – BriteEuram III, Project BE95-1347, Report R15 (2000).
- [57] G. K. Glass. Reinforcement corrosion, in J. Newman, B. S. Choo (ed.) *Advanced concrete technology: concrete properties*. Butterworth-Heinemann, Oxford, (2003), pp. 218-244.
- [58] H. Zhang. Durability reliability analysis for corroding concrete structures under uncertainty. *Mechanical Systems and Signal Processing* 101 (2018) 26–37.

[59] D.A. Alvarez, On the calculation of the bounds of probability of events using infinite random sets, *Int. J. Approx. Reason.* 43 (2006) 241–267.

[60] Y. Wang, Imprecise probabilities based on generalised intervals for system reliability assessment, *Int. J. Reliab. Saf.* 4 (2010) 319–342.

[61] A.H.-S. Ang, W. Tang, *Probability Concepts in Engineering*, second ed., John Wiley, 2007.

[62] A. Neumaier, *Interval Methods for Systems of Equations*, Cambridge University Press, 1990.