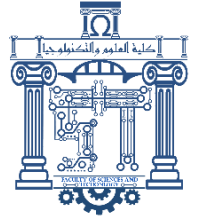




الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

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 : Nacib Bouthaina

Sujet

**Etude de l'effet des conditionn météorologiques et du
changement climatique sur la corrosion des armatures
induite par la carbonatation du béton**

Présenté et soutenu publiquement, le 22 / 06 / 2024 , devant le jury composé de :

Ms. Hassounat Nasser
Ms. Hamidane H'mida
Ms. Salhi Mohamed Lamine

Professeur
Maître Assistant A
Maître Assistant A

Président
Rapporteur
Examineur

Promotion : 2023/2024

Table des matières :

Introduction générale :	16
Chapitre 01 : Recherche bibliographique	1
1. Introduction :	1
2. Carbonatation du béton :	2
2.1. Cause la carbonatation du béton:	2
2.2. Mécanisme la carbonatation du béton :	2
2.3. Facteurs de la carbonatation du béton :	5
2.4. Conséquences de la carbonatation du béton :	7
2.5. Influence de la condition météorologique la carbonatation du béton :	9
2.6. Influence du changement climatique sur la carbonatation du béton :	10
3. Modélisation de la carbonatation :	11
3.1. Les modèles empiriques :	11
3.2. Les modèles physiques :	13
3.3. Les modèles semi-empiriques :	14
3.3.1. Modèle FIB :	15
4. Modélisation en présence d'incertitudes:	17
Chapitre 02 : Méthode d'analyse	19
1. Introduction :	19
2. Modélisation la carbonatation :	19
2.1.État limite de dépassivation :	19
2.2. Equation d'état limite de depassivation :	20
2.3. Quantification des paramètres aléatoires:	21
2.3.1. Enrobage :	21
2.3.2. Durée de vie de conception tsl :	21
2.3.3. Fonction environnementale k_e :	21
2.3.4. Paramètre de transfert d'exécution k_c :	22
2.3.5. Résistance à la carbonatation inverse $R^{-1}ACC_0$:	22
2.3.6. Concentration de CO_2 :	23
2.3.7.Fonction de climat $w(t)$:	24
2.3.8. Fonction d'environnementale F_t :	24
3. Méthode de simulation Monte Carlo :	25
4. Donnée climatique :	27
4.1. Les Villes :	27
4. 2. Changement climatique :	37
Chapitre 03 : Étude numériques et résultats	39

1. Introduction :	39
2. Temps d'initiation de la corrosion :	40
3. Effet du nombre d'échantillonnages:	41
4. Effet des propriétés du matériau:	42
4.1. Effet du rapport E/C:	42
4.2. Effet du type de ciment :	43
5. Effet des conditions météorologiques:	44
6. Effet du changement climatique :	46
6.1. L'effet du scénario et de la période de projection :	49
Conclusion générale :	53
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES :	54

FREMERCIEMENTS :

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

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

Nous remercions également les membres du jury de nous avoir honorés en acceptant d'évaluer ce modeste travail.

Ma chère famille,

Je tiens à vous exprimer ma profonde gratitude pour votre soutien illimité tout au long de mon parcours académique et de l'écriture de ce mémoire. Sans votre soutien, je n'aurais pas pu atteindre cette réalisation importante.

Je remercie ma chère mère pour son amour constant, son soutien inépuisable et son encouragement continu qui m'ont donné la force d'aller de l'avant. Je remercie également mon père pour sa sagesse et ses conseils précieux, soutien constant tout au long du chemin.

À mes chers frères et sœurs, je vous remercie pour votre encouragement constant et votre soutien sans faille (Louay, Roudaina).

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et mes remerciements à mon soutien (Fouad), pour son soutien et ses encouragements continus pendant la préparation de mon mémoire de fin d'études.

Mes chers amis,

je vous remercie pour votre soutien constant et vos encouragements tout au long de mon parcours académique et de l'écriture de mon mémoire. Vous avez toujours été une source d'inspiration et une grande force pour moi. Merci pour chaque moment et votre soutien illimité.(Ibtissam, Chaima, Wissam).

Liste des symboles :

Symbole /Abréviation	Définition
a :	Enrobage (mm)
bc :	Paramètre (Distribution normale, avec une moyenne et un écart).
bw :	Exposant de régression
CaCO ₃ :	Carbonate de calcium.
CO ₂ :	Dioxyde de carbone.
Ca(OH) ₂ :	Hydroxyde de calcium (portlandite)
CO ⁻² ₃ :	Ion carbonate
Ca ⁺² :	Ion de calcium
Cs :	Concentration de CO ₂
Cs,atm :	Concentration de CO ₂ de l'atmosphère [kg/m ³]
Cs ;emi :	Concentration de CO ₂ additionnelle dû aux sources des émissions [kg/m ³]
d :	largeur de l'élément structurel (pour l'enrobage (a))
E/C :	Quantité d'eau sur quantité de ciment.
fe :	Paramètre constant (5,0).
Fe :	Fer.

Fe ⁺² :	Ion ferreux
Fe(OH) ₂ :	Hydroxyde de fer 2
FIB-34 :	Fédération International de Béton, Bulletin 34.
G (X) :	Fonction d'état limite
ge :	Paramètre constant (2,5).
H ⁺ :	I on hydronium.
H ₂ O :	Monoxyde de dihydrogène
HCO ₃ ⁻ :	Hydrogénocarbonate
Ho:	Constante de Henry
hNd :	Hauteur des précipitations
Ke :	Fonction environnementale
Kc :	Paramètre de transfert d'exécution
Kt :	Paramètre de régression
m :	Valeur nominale d'enrobage (a)
Nf :	Nombre des points situés dans le domaine de défaillance.
Ns :	Nombre total de points.

OH ⁻ :	Ions hydroxyles.
PH :	Potentiel hydrogène.
Psr :	Distribution moyenne de la direction de vent pendant la chute de pluie
P _o :	Probabilité de défaillance cible
Pf :	Probabilité de défaillance.
P _{dep} :	Probabilité de dépassivation
R ⁻¹ NAC, _o	la résistance effective inverse à la carbonatation du béton, en mm ² /an/ (kgCO ₂ /m ³),
R ⁻¹ ACC, _o	Résistance effective de béton à la carbonatation (inverse) [(mm ² /an) / (kg/m ³)]
RH _{real}	Humidité relative de couche carbonatée (%)
Rh _{ref}	Humidité relative référentielle (%)
rN :	vitesse de la réaction de neutralisation
rD :	Le taux de dissolution de Ca(OH) ₂ dans l'eau interstitielle du béton
S :	Écart d'enrobage (a)
t :	Temps (an).
tsl :	Durée de vie de conception (an)
tc :	Paramètre constant qui égale à la période de cure [Jours]
to :	Temps de référence (an) .
Tow :	Temps de trempage dans l'eau.

W (t) :	Fonction de climat.
X_c (t_{sl}) :	Profondeur de carbonatation à l'instant t _{sl} (mm).
ϵt :	Terme d'erreur [(mm ² /an) / (kg/m ³)].

Liste des tableaux :

Titre	Page
Tableau (2.1) : Valeurs de résistance inverse à la carbonatation [fib-34, 2006]	27
Tableau (2.2) : Température (TX) Change deg C - Near terme, Meduim terme et à long terme - pour trois Scénarios (de 1995 à 2014) Régions [IPCC WGI Interactive Atlas]	43

Liste des figures :

Titre	page
Figure (1.1): Mécanisme de carbonatation de la portlandite [Thiery, 2005]	8
Figure (1.2) : Profondeur de carbonatation pour les températures différentes d'après les essais de [JOHN et al, 1990]	9
Figure (2.1) : échantillonnage Monte Carlo pour deux variables aléatoire	29
Figure (2.2) : valeurs Max température de la ville Adrar [WeatherOnline,2023]	31
Figure (2.3) : valeurs Min température de la ville Adrar [WeatherOnline, 2023]	31
Figure (2.4): valeurs Relative humidité de la ville Adrar [WeatherOnline, 2023]	32
Figure (2.5) : valeurs Max température de la ville Annaba[WeatherOline,2023]	32
Figure (2.6) : valeurs Min température de la ville Annaba[WeatherOnline,2023]	33
Figure (2.7): valeurs Relative humidité de la ville Annaba [WeatherOnline,2023]	33
Figure (2.8): valeurs Max température de la ville Tébessa [WeatherOnline, 2023]	34
Figure (2.9): valeurs Min température de la ville Tébessa [WeatherOnline, 2023]	35
Figure (2.10): valeurs Relative humidité de la ville Tébessa[WeatherOnline, 2023]	35

Figure (2.11) : valeurs Max température de la ville Bergen [WeatherOnline, 2023]	36
Figure (2.12) : valeurs Min température de la ville Bergen [WeatherOnline, 2023]	37
Figure (2.13) : valeurs Relative humidité de la ville Bergen [WeatherOnline, 2023]	38
Figure (2.14) : valeurs Max température de la ville Abu Dhabi [WeatherOnline,2023]	38
Figure (2.15) : valeurs Min température de la ville Abu Dhabi [WeatherOnline, 2023]	39
Figure (2.16) : valeurs Relative humidité de la ville Abu Dhabi [WeatherOnline, 2023]	39
Figure (2.17) : valeurs Max température de la ville Accra [WeatherOnline, 2023]	39
Figure (2.18) : valeurs Min température de la ville Accra [WeatherOnline, 2023]	40
Figure (2.19) : valeurs Relative humidité de la ville Accra [WeatherOnline, 2023]	41
Figure (3.1) : Probabilité d'initiation de la corrosion en fonction du temps	42
Figure (3. 2) : Probabilité d'initiation de la corrosion en fonction du temps (Du nombre d'échantillonnages)	43
Figure (3. 3) : Probabilité d'initiation de la corrosion en fonction du temps (E/C).	44
Figure (3.4) : Probabilité d'initiation de la corrosion en fonction du temps (Type de ciment).	45
Figure (3.5) : La probabilité cumulative de l'initiation de la corrosion (CDF)	46
Figure (3.6) : La probabilité cumulative de l'initiation de la corrosion (CDF) (Adrar)	47
Figure (3.7) : La probabilité cumulative de l'initiation de la corrosion (CDF) (Annaba)	47

Figure (3.8) : La probabilité cumulative de l'initiation de la corrosion (CDF) (Tebessa)	48
Figure (3.9) : La probabilité cumulative de l'initiation de la corrosion (CDF) (Bergen)	48
Figure (3.10) : La probabilité cumulative de l'initiation de la corrosion (CDF) (Abu Dhabi)	49
Figure (3.11) : La probabilité cumulative de l'initiation de la corrosion (CDF) (Accra)	49
Figure (3.12) : La probabilité cumulative de l'initiation de la corrosion (Adrara (Term))	50
Figure (3.13) : La probabilité cumulative de l'initiation de la corrosion (Annaba(Term))	51
Figure (3.14) : La probabilité cumulative de l'initiation de la corrosion (Tébessa(Term))	51
Figure (3.15) : La probabilité cumulative de l'initiation de la corrosion (Bergen(Term))	52
Figure (3.16) : La probabilité cumulative de l'initiation de la corrosion (Abu Dhabi(Term))	52
Figure (3.17) : La probabilité cumulative de l'initiation de la corrosion (Accra(Term))	53

Résumé :

La corrosion de l'armature est l'un des mécanismes de dégradation les plus courants et coûteux pour l'entretien et la réparation des structures en béton armé. Dans les zones urbaines ou industrielles, la corrosion est souvent causée par la carbonatation du béton et ions chlorures. Pour atteindre une construction durable et une meilleure gestion du cycle de vie, les modèles de prévision de la performance structurelle deviennent essentiels. Ces modèles doivent prendre en compte les phénomènes pertinents, les facteurs influents, les conditions environnementales ainsi que les incertitudes qui y sont associées.

Ce travail présente un modèle pour prédire l'apparition de la corrosion des structures en béton résultant de la carbonatation basé sur les recommandations du code (fib-34). Le modèle tient compte des effets des caractéristiques des matériaux (tels que le rapport eau/ciment, le type de ciment et la période de cure), Du changement climatiques (telles que l'humidité relative et la température), des conditions météorologiques et de la concentration de dioxyde de carbone ambiant, en traitant les incertitudes comme des variables aléatoires. L'analyse probabiliste est entretenue calculée en utilisant la méthode de simulation de Monte Carlo.

Une étude a été menée afin d'analyser l'impact de certaines propriétés des matériaux telles que le rapport eau/ciment, le type de liant et la période de cure. L'effet des variations climatiques et des conditions météorologiques sur le temps de début de la corrosion a été vérifié par simulation en utilisant les données d'humidité relative et de température de trois villes en Algérie et de trois villes en dehors de l'Algérie ayant des conditions climatiques différentes. Les résultats obtenus ont montré que le modèle est sensible à tous les facteurs influents.

Mots-clés : corrosion, carbonatation, béton armé, modélisation, durabilité, climat, simulation Monte-Carlo.

Abstract :

Rebar corrosion is one of the most common and costly mechanisms for the maintenance and repair of reinforced concrete structures. In highly urban or industrial areas, corrosion often occurs due to concrete carbonation and chloride ions. To achieve sustainable construction and better life cycle management, performance prediction models become essential. These models must consider relevant phenomena, influencing factors, environmental conditions, and associated uncertainties.

This work presents a model to predict the onset of corrosion of concrete structures resulting from carbonation on the recommendations of Code fib-34. The model takes into account the effects of

material properties (such as water-to-cement ratio, type of cement, curing period), climatic changes (such as relative humidity and temperature), weather conditions, and ambient carbon dioxide concentration, treating uncertainties as random variables. The probabilistic analysis is undertaken using the Monte-Carlo simulation method.

A study was conducted to analyze the impact of certain material properties, such as the water/cement ratio, type of binder, and curing period. The effect of climatic changes and weather conditions on the initiation time of corrosion was verified through simulations using relative humidity and temperature data from three cities in Algeria and three cities outside Algeria with different climatic conditions. The results obtained showed that the model is sensitive to all influencing factors.

Keywords: corrosion, carbonation, reinforced concrete, modeling, durability, climate, Monte-Carlo simulation.

ملخص :

يعد صدأ التسليح أحد الآليات الأكثر شيوعًا والمكلفة لصيانة وإصلاح الهياكل الخرسانية المسلحة. في المناطق الحضرية أو الصناعية للغاية، غالبًا ما يحدث الصدأ بسبب كربنة الخرسانة و أيونات الكلوريد. لتحقيق البناء المستدام وإدارة أفضل لدورة الحياة، تصبح نماذج التنبؤ بالأداء الهيكلي ضرورية، حيث يجب أن تأخذ هذه النماذج في الاعتبار الظواهر ذات الصلة والعوامل المؤثرة والظروف البيئية والشكوك المصاحبة لها و عدم اليقين.

يقدم هذا العمل نموذجًا للتنبؤ ببداية صدأ الهياكل الخرسانية الناتجة عن الكربنة بناءً على توصيات كود (فيب-34). يأخذ النموذج في الاعتبار تأثيرات خصائص المواد (مثل نسبة الماء إلى الأسمنت، ونوع الأسمنت، وفترة المعالجة)، والتغيرات المناخية (مثل الرطوبة النسبية ودرجة الحرارة)، والظروف الجوية، وتركيز ثاني أكسيد الكربون المحيط، مع التعامل مع حالات عدم اليقين على أنها عشوائية كمتغيرات. و يتم اجراء التحليل الاحتمالي باستخدام طريقة محاكاة مونت كارلو.

تم إجراء دراسة تهدف إلى تحليل تأثير بعض خواص المواد مثل نسبة الماء/الأسمنت، نوع المادة الرابطة، وفترة المعالجة. و تم التحقق من تأثير التغيرات المناخية والظروف الجوية على وقت بدء الصدأ من خلال المحاكاة باستخدام بيانات الرطوبة النسبية ودرجة الحرارة لثلاث مدن في الجزائر و ثلاث مدن خارج الجزائر ذات ظروف مناخية مختلفة، وأظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن النموذج حساس لجميع العوامل المؤثرة.

الكلمات المفتاحية: التآكل، الكربنة، الخرسانة المسلحة، النمذجة، المتانة، المناخ، محاكاة مونت كارلو.

Introduction

générale

Introduction générale :

Le béton est le matériau de construction le plus répandu au monde. Les structures en béton armé sont conçues et construites pour durer. Cependant, en raison de l'environnement hostile auquel ils sont exposés, certaines conditions peuvent entraîner une dégradation plus rapide que prévu. Parmi les mécanismes de dégradation importants pour l'environnement, la corrosion des renforts est particulièrement préoccupante. Ce processus de corrosion est un phénomène électrochimique qui se produit dans le béton et est principalement provoqué par la carbonatation du revêtement de béton et/ou la pénétration des ions chlorure. Par conséquent, afin d'améliorer la durabilité des structures en béton armé, il est nécessaire de prolonger la période d'initiation de la corrosion en utilisant du béton peu perméable et en assurant des revêtements adéquats.

Lorsque le dioxyde de carbone atmosphérique pénètre dans le béton (principalement par diffusion), il réagit avec les composés hydratés présents dans le coulis de ciment (en particulier la Portland et le silicate de calcium hydraté) pour former du carbonate de calcium. Cette réaction se traduit par une augmentation de volume et une diminution du pH de la solution interstitielle. L'augmentation de volume réduit la porosité du béton, augmente sa résistance mécanique et provoque d'autres modifications dans sa structure interne. Une baisse du pH de la solution interstitielle en dessous de 9 favorise la corrosion du renfort. Ces maladies liées à la corrosion peuvent avoir des conséquences économiques importantes, notamment en raison des coûts élevés de maintenance et de réparation. Les conditions climatiques, notamment l'humidité relative et la température, peuvent influencer le développement de la corrosion en favorisant la pénétration d'agents agressifs dans le béton ou en favorisant les réactions chimiques. Pour assurer la pérennité d'une structure et mieux gérer sa durée de vie, il est nécessaire d'utiliser des modèles de performance pour prédire les dommages potentiels. Cette prévision doit être effectuée simultanément à la conception structurelle, en tenant compte de tous les facteurs d'influence, notamment les propriétés des matériaux et le changement climatique et les conditions météorologiques.

Prédire la durée de vie structurelle associée à la corrosion de l'acier due à la pénétration de la carbonisation nécessite de comprendre et de prendre en compte les principaux mécanismes de transfert. Des mécanismes prédictifs peuvent quantifier la durée de vie des réalisations futures et aider à la formulation du béton en exigeant la performance de ses propriétés physico-chimiques.

L'objectif principal de cette étude est de mieux prédire la durée de vie des structures en béton armé, pour lequel nous utiliserons une méthode de simulation probabiliste de Monte Carlo pour simuler les performances des structures en béton armé sous attaque carbone Codez "FIB34".

Afin d'atteindre nos objectifs, notre étude de recherche a été structurée sur base de trois chapitres en plus d'une introduction et une conclusion:

Dans le premier chapitre, une description de certains aspects théoriques relatifs à la corrosion induite par la carbonatation est donnée. Le mécanisme de la corrosion, le processus de carbonatation, les facteurs influents et les conséquences ont été tous bien expliqués en plus d'influence des conditions météorologique et changement climatiques, Nous concluons le chapitre 1 avec les types de modélisation de carbonatation ainsi que la modélisation en présence d'incertitudes.

Dans le deuxième chapitre, le modèle de carbonatation utilisé dans cette étude et proposé par le code fib-34 est présenté. Ensuite, méthode Monte Carlo, Enfin, nous avons terminé le deuxième chapitre avec les données climatiques, qui représentent les villes, les conditions et les changements climatiques.

Dans le troisième chapitre, la performance numérique du modèle développé est illustrée à travers quelques exemples. Une investigation de l'influence de Scénario et term et des conditions climatiques et changement climatiques

Enfin, la conclusion regroupe l'ensemble de leçons tirées des résultats de ce travail.

Chapitre

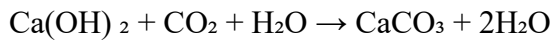
01

Chapitre 01 : Recherche bibliographique

1. Introduction :

La carbonatation du béton est un vieillissement naturel du béton.

Ce phénomène se produit lorsque le dioxyde de carbone (CO₂) présent dans l'air réagit avec le béton pour former du carbonate de calcium (CaCO₃). La réaction chimique pertinente est la suivante :



La carbonatation du béton est un processus naturel de vieillissement qui peut entraîner le ternissement et la corrosion des armatures en acier. Lorsque le dioxyde de carbone présent dans l'atmosphère pénètre dans les pores du béton, il se dissout et forme des acides au contact de la solution interstitielle contenue dans le coulis de ciment, favorisant ainsi la carbonisation.

La carbonatation affecte les structures en béton et les armatures en acier, entraînant, entre autres conséquences, des cloques en surface, une perte de résistance et des dommages structurels.

De plus, les conditions météorologiques et les changements climatiques jouent un rôle majeur dans la carbonisation du béton.

Ce chapitre présente les données bibliographiques nécessaires à sa mise en contexte. Il s'agit principalement de l'usure des renforts provoquée par la carbonation le béton, ses causes, son mécanisme et ses facteurs, notamment les conséquences qui en découlent, ainsi que l'effet des conditions météorologiques et des changements climatiques sur la carbonisation du béton.

Nous concluons le chapitre 1 avec les types de modélisation de carbonatation ainsi que la modélisation en présence d'incertitudes.

2. Carbonatation du béton :

2.1. Cause la carbonatation du béton:

Carbonatation du béton Réaction chimique provoquée par la combinaison de la chaux libre du béton et du dioxyde de carbone présent dans l'air. La carbonatation du béton est un phénomène courant dans ce type de matériau de construction. Le dioxyde de carbone présent dans l'atmosphère finit par pénétrer dans les pores du béton.

Du fait de l'hydratation naturelle du ciment, le dioxyde de carbone va pouvoir dégrader le béton. La carbonatation est responsable des changements progressifs dans la microstructure interne du béton. Il dégrade facilement le béton armé au fil des années. Il existe même des cas où la charpente en fer est complètement exposée à cause de cette dégradation.

Au fil du temps, la carbonatation peut entraîner des problèmes de durabilité dans les structures en béton armé. Les barres d'acier qui garantissent la résistance globale finiront par se dilater sous l'influence de la rouille. La corrosion peut provoquer des fissures dans le béton et celui-ci doit subir un retrait en conséquence directe de la carbonisation. L'acier est ensuite exposé jusqu'à ce qu'il soit inévitablement détruit par la rouille.

2.2. Mécanisme la carbonatation du béton :

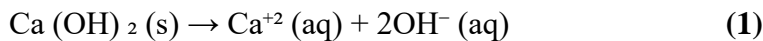
Dans le processus de fabrication du béton, la quantité d'eau utilisée pour l'hydratation du ciment est toujours supérieure à la quantité stœchiométrique requise. Le ciment hydraté est donc toujours un milieu poreux dont les pores sont préalablement remplis d'eau porteuse d'ions afin de respecter l'équilibre chimique avec les hydrates du ciment (PORTLANDITE, CSH, AFT, AFM...).

Lorsque le matériau cimentaire sèche à l'air libre, il se sature en eau et ses pores se remplissent partiellement d'air

Le dioxyde de carbone naturellement présent dans l'atmosphère peut diffuser à travers la phase vapeur du ciment. La diffusion dans la phase liquide est négligeable. On constate que le ciment est complètement saturé d'eau et que seuls des carbonates sont présents sur sa couche limite du fait de la formation de calcite qui bouche immédiatement les pores.

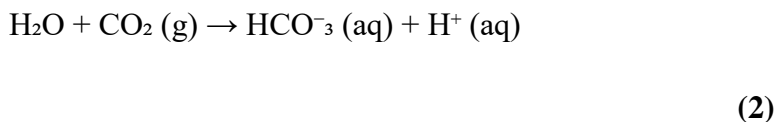
Le CO₂ présent dans la phase gazeuse interstitielle se dissout dans la solution interstitielle pour former des ions carbonate, qui réagissent principalement avec les ions calcium Ca⁺². Pendant le processus de durcissement du béton, le silicate di-calcique et le silicate tricalcique (SiO₂, 2CaO) et (SiO₂, 3CaO)

s'hydratent avec du dioxyde de carbone (CO₂) pour former du carbonate de calcium (CaCO₃), formant ainsi de l'hydroxyde de calcium (Ca(OH)₂). [1]

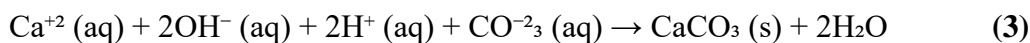


Le dioxyde de carbone se dissout également dans l'eau interstitielle du béton

et forme de l'acide carbonique avant de réagir avec le Ca(OH)₂ dissous, à savoir



La réaction de neutralisation suivante complète la réaction finale étape de carbonatation



Où les symboles (s) et (aq)entre parenthèses signifient nifier les états solides et aqueux.

La réaction (3) montre que la carbonatation consomme du Ca(OH)₂, un produit qui confère au béton un pH élevé. Les vitesses des réactions (1) et (3) jouent un rôle important dans la carbonatation du béton. Le taux de dissolution de Ca(OH)₂ dans l'eau interstitielle du béton, rD et la vitesse de la réaction de neutralisation rN, c'est-à-dire la vitesse de réaction du CO₂ avec Ca (OH) 2 dissous, sont donnés par les équations. (4) et (5), respectivement [2]

$$rD = 1.685 \times 10^{-5} \eta F_s K_s a_s [\text{Ca (OH)}_2 \text{ (s)}] ([\text{OH}^-] - [\text{OH}^-]) \quad (4)$$

$$rN = HRTK_2 [\text{OH}^-] [\text{CO}_2 \text{ (g)}] \quad (5)$$

Dans la formule :

- rD : est en moles de Ca(OH)₂ dissous par unité de volume de béton par seconde.
- fs : est la fraction volumique du film aqueux sur les parois des pores.
- η : est la porosité du béton.

- k_s : est le coefficient de diffusion de masse pour la dissolution de Ca(OH)_2 (s) ce qui est approximativement $0,5 \times 10^{-5} \text{m/s}$.
- a_s : est la surface des pores par unité de volume de béton.
- $[\text{Ca(OH)}_2(\text{s})]$: est la concentration molaire de Ca(OH)_2 par unité de volume de béton.
- $[\text{CO}_2(\text{g})]$: est la concentration molaire de CO_2 par unité de volume de pores air.
- $[\text{OH}^-]$: est la concentration molaire de OH^- par volume unitaire de la phase aqueuse dans les pores.

Les changements dans l'équilibre chimique entre les hydrates et la solution interstitielle dans la matrice cimentaire conduisent à la dissolution des hydrates. Le nouvel équilibre chimique correspond à une solution beaucoup plus acide que l'originale. Le pH passe d'une valeur de 13 dans les zones non carbonatées (permettant la passivation de l'acier) à une valeur inférieure à 9 dans les zones dégradées. Lorsque la zone carbonatée atteint les barres d'acier, le métal commence à se corroder, formant des produits de corrosion plus gros

(FeO(OH) , $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) que ceux initialement présents dans l'acier au carbone. Cette réaction de dilatation explique la fissuration du béton autour des barres d'acier corrodées. Cependant, la carbonatation peut également augmenter l'imperméabilité du béton puisque les carbonates bouchent certains pores : l'absorption capillaire est réduite et la résistance mécanique est meilleure. Ce phénomène est couramment observé dans le béton utilisant du ciment Portland. [3][4]

L'humidité relative de l'air joue un rôle important dans le taux de carbonatation. [5][6] Pour le béton ordinaire, l'humidité relative est maximale autour de 50-70 % et est quasiment nulle dans une atmosphère sèche ou saturée d'eau [7][3]. Par conséquent, les surfaces protégées seront plus sévèrement carbonatées que les surfaces exposées à la pluie [8]. Les concentrations élevées de dioxyde de carbone contribuent également à augmenter les taux de carbonatation [6]. La cinétique de carbonatation est également fonction de la température [9], et est contrôlée par la compétition entre les effets thermiques du transfert d'eau et la solubilité inverse des réactifs. La profondeur des carbonates augmente avec la température jusqu'à atteindre la température limite caractéristique de la formulation, au-delà de laquelle la solubilité inverse du réactif devient le facteur limitant

La détermination de la profondeur de carbonatation a été réalisée sur du béton fraîchement découpé. Après le dépoussiérage, nous pulvérisons des colorants sensibles au pH, de la phénolphthaléine (cancérogène/mutagène) [10] et même du le thymolphthaléine [11][12]. La phénolphthaléine devient au

rouge violacé au contact de matériaux dont le pH est supérieur à 9,2 et reste incolore au pH le plus bas (c'est-à-dire la zone de carbonatation).

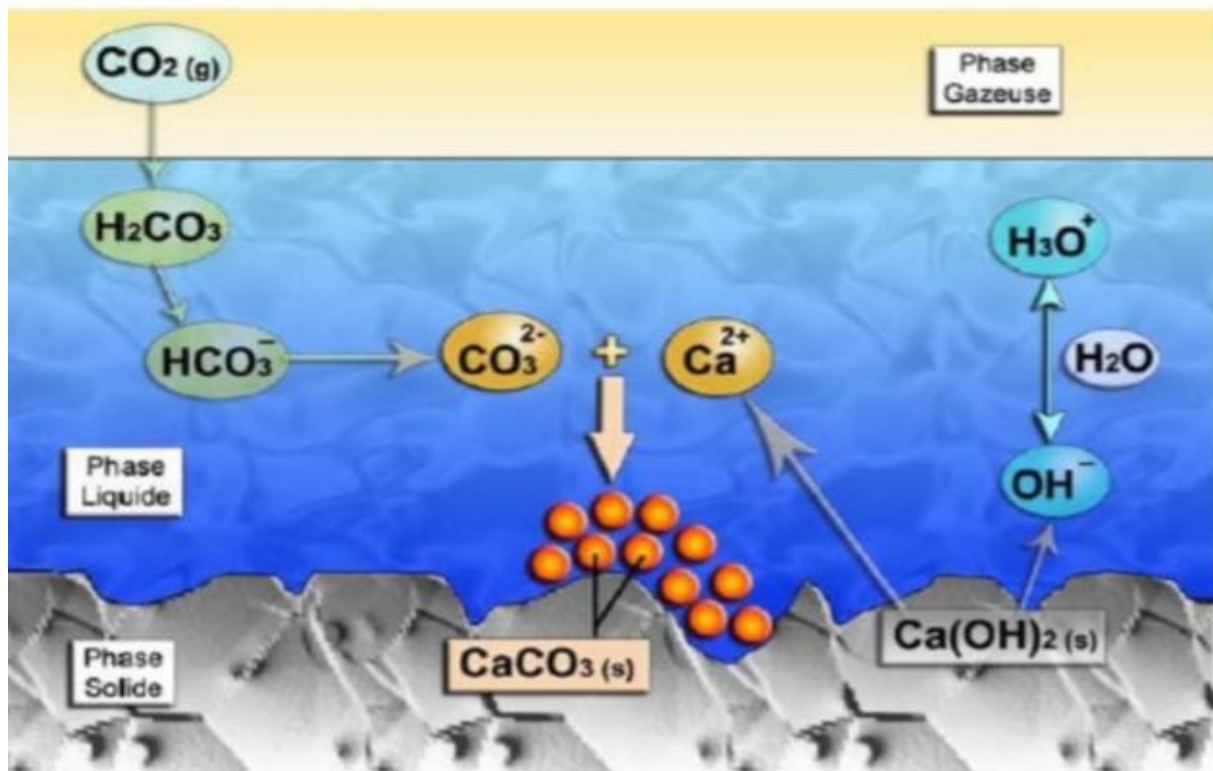


Figure 1.1 : Mécanisme de carbonatation de la portlandite [Thiery, 2005]

2.3. Facteurs de la carbonatation du béton :

- 1. Le dioxyde de carbone (CO_2) existe dans l'air :** le CO_2 présent dans l'atmosphère pénètre dans les pores du béton et réagit avec l'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) pour former du carbonate de calcium (CaCO_3), provoquant la carbonatation du béton.[3]
- 2. Humidité :** Les réactions de corrosion (dissolution métallique ou passivation) ne se produisent qu'en présence d'une solution qui est ici contenue dans les pores du béton durci. Cette solution peut s'évaporer puis rentrer dans le béton dans les zones proches de la surface. Par contre, à cœur (à une profondeur supérieure à 35 mm en général), le béton reste saturé d'eau. Par ailleurs, la composition de cette solution dépend fortement des agents qui ont pu entrer dans le béton et l'altérer. La pénétration des gaz est plus rapide si le béton n'est pas saturé de liquide. Ainsi l'humidité du béton influe de deux façons sur la corrosion ou la passivation des armatures. Lorsque

l'humidité du béton est faible, la pénétration de certains gaz est facilitée ; par contre, la corrosion ne se produit qu'en présence de liquide.[13]

- 3 .Température :** L'effet de la température sur le taux de carbonatation est plutôt incertain. D'abord, l'augmentation de la température accélère les réactions chimiques (selon la loi de l'activation thermique Arrhenius), quant à lui, favorise l'assèchement des pores et donc l'entrée du dioxyde de carbone matrice de ciment. Cependant, l'augmentation de la température réduit également la solubilité. CO_2 (la constante de Henry H_0 diminue) et diminue la concentration de CO_2 phase gazeuse [Viet, 2015]. Suite aux travaux de [DROUET, 2010], la profondeur quelle que soit la formulation du béton, la carbonatation augmente à mesure que la température passe de 20°C à 50°C . [13]

Les expériences de [John et al, 1990] ont confirmé l'effet de la température sur l'augmentation de la profondeur de carbonatation est illustré dans la figure (1.2)

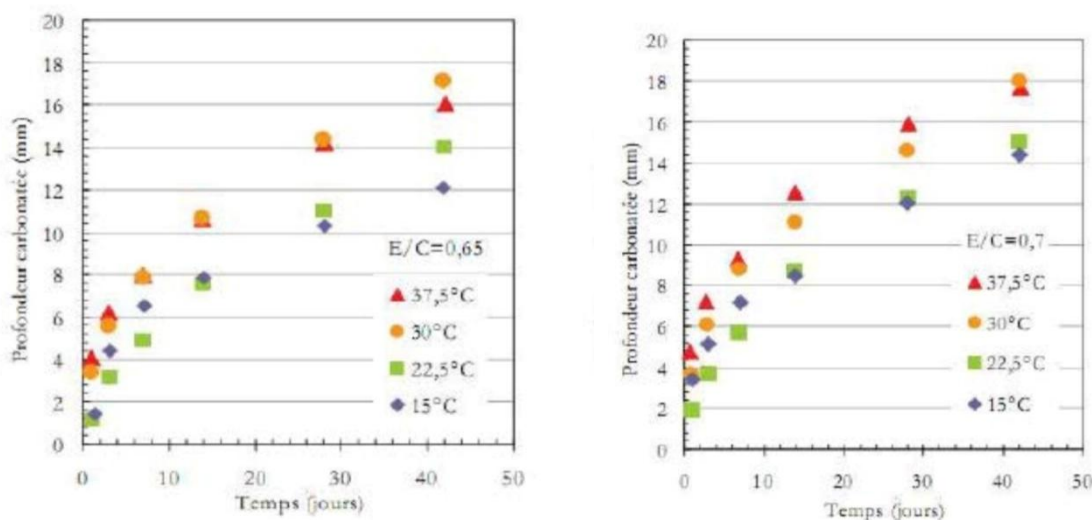


Figure 1.2 : Profondeur de carbonatation pour les températures différentes d'après les essais

De [JOHN et al, 1990]

- 4 .Enrobage :** La fonction principale de l'enrobage béton autour des barres d'acier est d'assurer le transfert du béton Adhérence entre béton et acier. De plus, les revêtements en béton protègent l'acier Il existe deux voies : par la protection physique, le béton qui forme barrière Fournit une protection agressive et chimique grâce au pH élevé de la solution interstitielle Le béton, qui stabilise la couche protectrice formée sur l'acier

- 5 Perméabilité du béton :** La perméabilité du béton est un facteur crucial qui influence sa durabilité et sa résistance aux agressions externes. Une perméabilité élevée signifie que le béton contient plus de pores interconnectés, permettant ainsi à des substances extérieures, comme le dioxyde de carbone, de pénétrer plus facilement et plus rapidement dans la matrice du béton. Lorsque le dioxyde de carbone pénètre dans le béton, il réagit avec l'hydroxyde de calcium pour former du carbonate de calcium, un processus connu sous le nom de carbonatation. Ce phénomène abaisse le pH du béton, ce qui peut entraîner la corrosion des armatures en acier et, par conséquent, compromettre l'intégrité structurelle du béton. Ainsi, une perméabilité élevée accélère non seulement le processus de carbonatation, mais augmente également la susceptibilité du béton à d'autres formes de dégradation. La réduction de la perméabilité du béton est donc essentielle pour améliorer sa longévité et sa performance globale dans les structures.
- 6 Exposition aux agents agressifs:** L'eau autour du béton ou l'eau qui pénètre par intermittence dans le béton (eau de pluie, etc.) peut contenir divers sels. Ceux-ci contribuent à la formation de produits de corrosion de l'acier enrobage. Par exemple, voici comment le chlorure agit à un certain niveau qualitatif. La rouille verte se forme en l'absence d'oxygène. Alors cela pourrait être transformé en produit classique en libérant des sulfates solubles. Cependant, au niveau quantitatif, l'impact des sulfates reste négligeable. En effet, sauf en cas de contamination brute dans l'industrie, seuls le chlorure et le dioxyde de carbone sont des facteurs de passivation de l'acier dans le béton.
- 7 PH du béton :** Les solutions interstitielles sont des solutions alcalines dont le pH est proche de 13. Ce milieu alcalin assure la passivation des barres d'acier. La carbonatation du béton peut entraîner une baisse du pH à environ 9, où les valeurs négatives favorisent la corrosion. Le phénomène pathologique qui se produit est la corrosion qui se traduit par la généralisation se traduit par une réduction progressive de la surface du renfort. Et, la formation de rouille exerce une pression sur le béton entourant les barres d'acier. Cette pression est souvent suffisante pour provoquer la fissuration du revêtement en béton [Jinane, 2010].

En résumé, la carbonatation du béton est un processus complexe influencé par de multiples facteurs interdépendants, et la compréhension de ces facteurs est essentielle pour prédire et gérer efficacement la durabilité à long terme des structures en béton.

2.4. Conséquences de la carbonatation du béton :

Les conséquences de ce processus peuvent être :

- 1. Corrosion de l'acier renforcé :** La corrosion des barres d'acier est un phénomène préoccupant. Lorsque l'alcalinité du béton diminue (généralement en raison de la

carbonisation), l'acier devient plus sensible à la corrosion. Ce processus modifie la structure de l'acier lui-même, affaiblissant ainsi la structure entière. De plus, la corrosion peut entraîner une augmentation des fissures, compromettant encore davantage la résistance et la durabilité de la structure.

- 2. Augmentation des fissures :** La corrosion de l'acier est généralement causée par des conditions environnementales défavorables, ce qui favorise le développement de fissures dans le béton. Ces fissures, initialement petites, vont augmenter en taille en raison de diverses causes telles que les cycles de gel-dégel et la pression mécanique. Cette augmentation des fissures a un effet négatif sur l'intégrité structurelle du béton en laissant passer des produits chimiques indésirables à travers la structure. Ainsi, l'infiltration d'eau et d'autres composants nocifs dans le béton augmente, ce qui entraîne une dégradation plus rapide du béton au fil du temps. Par conséquent, une surveillance régulière des fissures et la mise en œuvre de mesures préventives sont cruciales pour garantir la sécurité et la durabilité à long terme des structures en béton.
- 3. Diminution de la résistance du béton :** La diminution de la résistance du béton est un phénomène à long terme. En effet, le processus de carbonatation du béton est un phénomène naturel au cours duquel le CO_2 présent dans l'air se combine aux composants du béton, notamment l'hydroxyde de calcium, pour produire du carbonate de calcium. Cette réaction chimique diminue le pH de la surface du béton, ce qui peut entraîner la corrosion des fibres d'acier internes et une diminution de la résistance globale de la structure. Ainsi, les propriétés de durabilité et de sécurité de la structure peuvent être dégradées. Il est donc crucial de prendre des précautions et d'entretenir les structures afin de prévenir ou de ralentir le processus et d'assurer la viabilité à long terme des structures en béton.
- 4. Difficultés de maintenance et de réparation :** La difficulté d'entretenir et de réparer les structures en raison de leur carbonatation est importante. En fait, lorsque les matériaux utilisés dans la construction sont affectés par ce phénomène, leur réparation peut nécessiter des travaux coûteux et difficiles. Ces actions sont souvent cruciales pour maintenir l'intégrité et la sécurité des bâtiments, mais elles entraînent une augmentation des coûts financiers.

En résumé, la carbonatation du béton peut entraîner une durabilité réduite, une corrosion des armatures métalliques, des fissures structurelles et une détérioration générale, ce qui peut nécessiter des réparations coûteuses et raccourcir la durée de vie du bâtiment. Par conséquent, il est essentiel d'observer le processus de carbonatation dans le béton et de prendre des mesures préventives comme

l'utilisation de matériaux résistants à la carbonatation et l'amélioration de la qualité du béton afin de prolonger la durée de vie des structures et d'améliorer leurs performances.

2.5. Influence de la condition météorologique la carbonatation du béton :

L'effet des conditions météorologiques sur la carbonatation du béton comprend plusieurs facteurs différents :

1. **Température** : Dans les climats froids, la température joue un rôle crucial dans le processus de durcissement et de séchage du béton. Lorsque les températures chutent, ce processus peut ralentir, offrant ainsi davantage de temps à l'humidité pour s'accumuler dans le béton. Cette accumulation d'humidité peut entraîner la formation de glace dans les pores du béton, ce qui compromet sa qualité. En revanche, par temps chaud, le béton peut durcir et sécher plus rapidement. Cette accélération du processus de durcissement peut augmenter les risques de fissuration du béton, car la chaleur excessive peut entraîner une perte d'humidité trop rapide, compromettant ainsi la structure et la solidité du béton. Ainsi, la température joue un rôle crucial dans le processus de durcissement du béton et peut affecter significativement sa qualité et sa durabilité selon les conditions climatiques rencontrées.
2. **Humidité** : L'humidité joue un rôle crucial dans le processus de durcissement et de séchage du béton. Lorsque l'humidité est élevée, elle peut entraver ce processus en prolongeant le temps nécessaire au durcissement complet du béton. De plus, une humidité élevée crée un environnement propice à la croissance de moisissures, ce qui peut compromettre la qualité et la durabilité du béton. En revanche, une sécheresse sévère peut avoir des effets tout aussi néfastes. Une perte d'humidité trop rapide peut entraîner le retrait du béton, ce qui se traduit souvent par des fissures et des dommages structuraux. Ainsi, maintenir un équilibre approprié de l'humidité est essentiel pour garantir la solidité et la résistance du béton tout au long de son processus de durcissement et de séchage.
3. **Vent** : Pendant le processus de séchage, des vents forts soufflent sur la surface du béton, ce qui accélère l'évaporation de l'eau. Cette évaporation rapide peut provoquer une perte excessive d'humidité, ce qui peut entraîner des problèmes tels qu'une déformation et des fissures de la surface. Ces fissures peuvent compromettre l'intégrité structurelle du béton et réduire sa durabilité à long terme. Par conséquent, des mesures doivent être prises pour protéger la surface du béton des vents forts pendant le processus de séchage afin de minimiser le risque de dommages.
4. **Pluie** : Lorsque de fortes pluies surviennent, elles peuvent avoir un impact significatif sur le processus de séchage et de durcissement du béton. Premièrement, de fortes pluies peuvent

provoquer des fissures et endommager la surface supérieure du béton, compromettant ainsi sa résistance et sa durabilité. Ces fissures permettent à l'eau de s'infiltrer à l'intérieur du béton, affectant sa qualité et sa résistance structurelle. De plus, de fortes pluies peuvent provoquer la dispersion des produits chimiques utilisés dans le mélange de béton, altérant ainsi ses propriétés de durcissement et sa résistance ultime. Par conséquent, des précautions doivent être prises pour protéger le béton des fortes pluies, comme l'utilisation de bâches de protection et l'établissement de bons systèmes de drainage pour éviter l'accumulation d'eau à la surface du béton.

De manière générale, comprendre l'effet des conditions météorologiques sur la carbonatation du béton aide à prendre des mesures préventives appropriées pendant le processus de construction et d'entretien afin de garantir la qualité et la durabilité des structures construites en béton

2.6. Influence du changement climatique sur la carbonatation du béton :

Le changement climatique peut avoir plusieurs effets sur la carbonatation du béton, qui est le processus par lequel le dioxyde de carbone (CO_2) pénètre dans le béton et réagit avec les composants alcalins pour former des carbonates. Voici quelques détails sur ces effets :

1. **Augmentation des températures et de l'humidité :** Augmentation de la température et de l'humidité car le changement climatique a un impact important sur le béton. En effet, une augmentation des niveaux moyens de température et d'humidité favorise le processus de carbonisation du béton. La carbonatation est le phénomène par lequel le dioxyde de carbone (CO_2) pénètre dans le béton et réagit avec l'hydroxyde de calcium pour former du carbonate de calcium. Des conditions climatiques plus chaudes et plus humides accélèrent ce processus car ces conditions augmentent la diffusion du dioxyde de carbone à travers les pores du matériau. En conséquence, le béton peut perdre son intégrité structurelle plus rapidement, créant ainsi des défis supplémentaires pour la durabilité des infrastructures face au changement climatique.
2. **Variations des précipitations :** Les changements de précipitations causés par le changement climatique peuvent conduire à des cycles humides-secs plus prononcés. Cela signifie que certaines périodes peuvent connaître de fortes précipitations et une augmentation de l'humidité ambiante, tandis que d'autres périodes peuvent connaître une sécheresse prolongée. Ces fluctuations importantes peuvent avoir un impact direct sur les matériaux de construction comme le béton. Lorsque le milieu est humide, l'humidité favorise la pénétration du dioxyde de carbone dans le béton. Par la suite, lors de sécheresse, le béton sèche favorisant ainsi les

réactions de carbonisation. Ce processus de carbonisation, accéléré par le changement climatique, affecte la durabilité et la longévité des structures en béton.

3. **Augmentation du niveau de la mer :** Dans les zones côtières, l'élévation du niveau de la mer entraîne une augmentation de la salinité des eaux souterraines. Une salinité accrue accélère la carbonatation du béton exposé à ces conditions. La carbonatation est le processus par lequel le dioxyde de carbone présent dans l'air réagit avec l'hydroxyde de calcium présent dans le béton pour former du carbonate de calcium, provoquant la corrosion du béton et perdant sa résistance. L'augmentation de la salinité accélère ce processus car le sel augmente la conductivité de l'eau, augmentant ainsi la vitesse des réactions de carbonatation et raccourcissant la durée de vie des structures en béton dans les zones côtières.
4. **Phénomènes météorologiques extrêmes :** Les événements météorologiques extrêmes, tels que les tempêtes, les ouragans et les inondations, peuvent causer de graves dommages aux structures en béton. Ces dommages peuvent inclure des fissures, des écailles et une érosion de la surface du béton. Lorsque le béton est ainsi endommagé, il devient plus poreux et plus sensible à la pénétration du dioxyde de carbone (CO_2). La pénétration accrue du dioxyde de carbone accélère le processus de carbonatation, un phénomène chimique qui réduit le pH du béton et favorise la corrosion des armatures en acier à l'intérieur de la structure, réduisant ainsi la durabilité et la résistance du béton.

En résumé, le changement climatique peut aggraver la carbonatation du béton en créant des conditions environnementales plus propices à la pénétration du CO_2 et à la réaction de carbonatation, ce qui peut entraîner une détérioration plus rapide des structures en béton.

3. Modélisation de la carbonatation :

La carbonatation est un processus chimique dans lequel le dioxyde de carbone (CO_2) présent dans l'air réagit avec les composants alcalins du béton, notamment la chaux libre (hydroxyde de calcium), pour former du carbonate de calcium solide. La modélisation de la carbonatation implique la représentation mathématique ou informatique de ce processus pour prédire sa progression dans le temps, son impact sur la durabilité du béton et potentiellement aider à la conception de structures résistantes à la carbonatation

3.1. Les modèles empiriques :

Depuis les années 1970, de nombreux modèles empiriques ont été développés pour prédire la profondeur de carbonatation X_c . Ces modèles s'appuient sur les profondeurs de carbonatation X_c mesurées par projection de phénolphthaléine sur des éprouvettes carbonatées de laboratoire en

conditions accélérées ou sur des ouvrages. Une synthèse bibliographique assez approfondie a été réalisée par Parrot. [14]

Ces modèles se présentent sous la forme suivante :

$$Xc = At^\lambda \quad (1.1)$$

Où A correspond aux données « matériau » (rapport masse sur volume E/C, dosage du ciment, résistance mécanique, etc.). λ est généralement pris égal à 0,5

Il est important de noter que les délais initiaux de mesure de X C (typiquement 7 jours pour la carbonatation accélérée et plusieurs années pour la carbonatation in situ), qui servent à déclencher une loi empirique, sont typiquement déjà trop tardifs et ne permettent pas d'identifier le comportement. Ment du matériau pour des périodes d'exposition au CO₂. Par conséquent, il est possible qu'une évolution en forme de carré dans le temps ne soit qu'une caractéristique asymptotique du comportement. Néanmoins, de nombreuses études (comme celles menées par Daimon et al)[15][16] démontrent que les cycles humidité-séchage ont tendance à ralentir le taux de carbonatation en diminuant le paramètre λ à des valeurs proches de 0,25 à 0,35.

La loi (1.1) a été corrigée par Daimon et al. [15]

$$\begin{cases} Xc = 0 & \text{pour } 0 \leq t \leq t_i \\ Xc = A(t - t_i)^\lambda & \text{pour } t \geq t_i \end{cases} \quad (1.2)$$

Inclure une phase d'initiation de la carbonatation (durée t_i) pour tenir compte d'une phase de séchage du matériau au cours de laquelle se produit le blocage initial du transport du CO₂ par les pores capillaires saturé d'eau. Compte tenu des effets des réactions chimiques (qui ont été démontrés expérimentalement par exemple par Thiery et al) [17], cet ajustement peut également être lié à la non-instantanéité des réactions chimiques, un certain temps étant nécessaire. Puis nécessaire pour que la carbonatation complète de la surface exposée se produise.

Face à la diversité des colles à base de ciment utilisées aujourd'hui, notamment dans le béton de nature environnementale, les données d'entrée « Matérielles » (E/C, teneur en ciment, résistance mécanique à la compression, etc.)

ne sont plus liés au tra-Réduisez la complexité de la durabilité des matériaux cimentaires. Par exemple, les ajouts de minéraux On utilise couramment la consommation d'une partie du silicate des stèles par réaction.

Cendres volcaniques (dans le cas des cendres volantes), tout en réduisant la porosité du matériau et bonnes propriétés mécaniques dues à la finesse des particules utilisées (dans le cas de la poudre de silice).

Ainsi, bien que d'un point de vue strictement chimique, ces matériaux dits « Respectueux de l'environnement » (Car ils sont formulés avec de plus petites quantités de clinker) Peut être moins durable

En raison de leur faible teneur en Portlandien, d'un point de vue physique, ils forment un bâtonnet - Empêche efficacement la pénétration du CO₂. A cet égard, il convient de citer les travaux de Tsukayama [18], Paillère et al [19], Roper et al, et Scholeswold et al [20]. Il faut donc trouver un compromis formulez-les correctement pour assurer leur pérennité.

Modèle physicochimique Problèmes dans lesquels les indicateurs de durabilité physique servent directement de données d'entrée pour l'intervention

(Telle que la porosité, la perméabilité, etc.) Et la composition chimique (telle que la teneur en silicate), peuvent ces problèmes sont actuellement en cours de résolution.

Humidité ambiante, conditions de durcissement et concentration atmosphérique de CO₂ phère est une variable fondamentale qui n'est habituellement pas prise en compte dans le modèle expérience. C'est pourquoi ces modèles ne peuvent être utilisés qu'à certaines concentrations CO₂ et les conditions climatiques pour lesquelles il est calibré et vérifié. Il faut cependant On peut considérer que le modèle de carbonisation fait intervenir les paramètres environnementaux suivants :

Données d'entrée, permettant notamment des prédictions liées aux conditions extérieures n'importe lequel.

La nature empirique de ces modèles implique de s'appuyer sur d'anciennes fondations techniques, désormais Tenir obsolète. C'est pourquoi les chercheurs étudient des approches théoriques lorsque sont simplifiés, ce qui se traduit par des modèles d'analyse intégrés en tant que données d'entrée L'indice « Performance » de durabilité physique et chimique est principalement la porosité, Perméabilité à l'eau liquide, état de l'eau et teneur en matières carbonatables.

3.2. Les modèles physiques :

La carbonatation physique est un phénomène impliquant une réaction chimique entre le dioxyde de carbone (CO₂) et certains matériaux, comme le béton. Cette réaction entraîne la formation de carbonate de calcium (CaCO₃) à la surface du matériau.

La modélisation physique de la carbonatation vise à comprendre et prédire les mécanismes et les effets de ce phénomène. Elle permet d'évaluer la durabilité des matériaux, de prédire leur vieillissement et d'optimiser leurs performances.

Les résultats de la recherche montrent que le béton se carbonise sous l'accélération du CO₂, entraînant des modifications de la porosité et du retrait de l'éprouvette. Des modèles de carbonatation existent pour évaluer la résistance physique du béton à la pénétration du front de carbonatation.

La modélisation de la carbonatation peut prendre en compte différents paramètres tels que la porosité du matériau, la teneur en hydrates carbonatables et l'évolution du pH du milieu. Des modèles physico-chimiques et déterministes ont été développés pour décrire le mécanisme de carbonatation en détail.

De plus, la modélisation de la carbonatation peut être utilisée pour prévoir comment la carbonatation se développera dans des œuvres réelles soumises à des conditions d'exposition naturelles. Il permet une comparaison entre les résultats du modèle et les données expérimentales utilisées pour suivre l'évolution de la carbonatation dans l'œuvre.

La modélisation de la carbonatation peut être réalisée en combinant des méthodes expérimentales avec des connaissances physiques et chimiques. Elle peut également considérer l'interaction entre le cycle du carbone et le climat.

Les modèles de carbonatation peuvent être déterministes et physico-chimiques, comme celui développé par Villain et al. Qui décrit la cinétique des réactions chimiques et rend compte des conditions hydriques initiales du matériau.

D'autres modèles peuvent être stochastiques, comme le modèle de Monte Carlo, qui intègre la variabilité des paramètres et permet une simulation plus réaliste de la carbonatation.

3.3. Les modèles semi-empiriques :

Les modèles de carbonatation semi-empiriques sont des outils utilisés depuis les années 1970 pour prédire la profondeur de carbonatation XC dans les structures en béton.

Le modèle est basé sur des équations semi-empiriques développées par Debye et Hückel et propose une approche physico-chimique et déterministe pour comprendre les mécanismes de carbonatation. Il prend en compte des facteurs tels que le bilan de température et d'absorption d'humidité pour évaluer l'impact de ce phénomène sur les propriétés de transport d'eau des matériaux cimentaires.[22][23]

Voici quelques points clés sur ces modèles :

1. **caractère Physico-chimique** : Les modèles semi-empiriques ont fréquemment un caractère physico-chimique et incluent une explication approfondie du mécanisme de carbonatation dans le béton.
2. **Déterministes** : Ces modèles sont déterministes, ce qui signifie que pour prédire la profondeur de carbonatation, ils s'appuient sur des principes scientifiques établis
3. **Description du mécanisme à grain fin** : Ils prennent en compte des composants particuliers du processus de carbonatation, ce qui les aide à être plus précis dans l'estimation de la profondeur atteinte.
4. **Applications pratiques** : Ces modèles sont utilisés pour évaluer les effets de la carbonatation sur les structures en béton et peuvent aider aux décisions d'entretien et de réparation

3.3.1. Modèle FIB :

La FIB propose un modèle physique permettant d'accéder à l'évolution de la profondeur de carbonatation en fonction de la racine carré du temps, en tenant compte de la nature, des propriétés et de la proportion du ciment utilisé pour le béton, ainsi que des conditions environnementales. La profondeur de carbonatation $X_c(t)$ au temps t , en mm, peut être déterminée par l'équation suivante :

$$X_c(t) = \sqrt{2 \cdot k_e \cdot k_c \cdot R_{NAC,0}^{-1} \cdot C_s \cdot W(t) \cdot \sqrt{t}} \quad (1.3)$$

Dans la formule :

- $k_e \rightarrow$ est une fonction environnementale ;
- $k_c \rightarrow$ est un paramètre de transfert d'exécution ;
- $R_{NAC,0}^{-1} \rightarrow$ est la résistance effective inverse à la carbonatation du béton, en $\text{mm}^2/\text{an}/(\text{kgCO}_2/\text{m}^3)$, obtenue sur des éprouvettes de béton sec en laboratoire dans des conditions naturelles ;
- $C_s \rightarrow$ est la concentration atmosphérique de CO_2
- $W(t) \rightarrow$ est la fonction météorologique.

La fonction environnementale k_e est donnée par l'équation (1.4), prenant en compte l'effet de l'humidité relative sur le coefficient de diffusion du CO_2 par rapport à l'humidité relative de référence

L'humidité relative est de 65%. L'humidité relative extérieure moyenne est de 77 %. L'humidité relative intérieure moyenne est de 50 %, conforme à cette recommandation de confort.

Intérieur chaud et humide. L'humidité relative sur le panneau est de 74% au contact de l'isolant 54 % sont des panneaux extérieurs et 54 % sont des panneaux intérieurs. La distribution de l'humidité relative est calculée comme suit La température extérieure moyenne annuelle en 2018 était de 14,3°C. Confort intérieur moyen à 20°C, composition et géométrie des panneaux sandwich en béton armé.

$$K_e = \left\{ \frac{\left(1 - \left(\frac{RH}{100}\right)^5\right)}{\left(1 - \left(\frac{RH_{ref}}{100}\right)^5\right)} \right\}^{2.5} \quad (1.4)$$

Prise en compte des précautions après préfabrication et cure des éléments en béton armé Le béton est coulé, l'exécution est considérée comme optimale et le paramètre d'exécution k_c est pris égal à 1 En raison du manque de résultats des essais de carbonatation accélérée sur béton conçu et coulé le RNAC résidentiel en béton inverse la résistance efficace à la carbonatation, R_{nac}^{-1} , 0 Prendre égal à 2995,9 millimètres carrés/an/ (kgCO₂/m³). Elle est déterminée par l'inverse de la résistance effective carbonisation des bétons secs, réglementée par le Bulletin Fib 34 [24] pour les bétons avec CEM I 42.5R et le rapport eau-ciment est égal à 0,56. et est le terme d'erreur, égal à 315,5 mm²/an/ (kgCO₂/m³), selon Comme le montre l'équation (1.5) :

$$R_{NAC,0}^{-1} = Kt \cdot R_{ACC,0}^{-1} + \epsilon t \quad (1.5)$$

Les concentrations externes et internes de CO₂ (Cs) étaient respectivement de 450 ppm et 630 ppm. Exister Lorsqu'elle est isolée, la concentration de CO₂ est considérée comme la même que la concentration externe, c'est-à-dire 450ppm.

La fonction météo $W(t)$ (équation 1.6) est exprimée sous forme de fonction climatique, où Prise en compte des événements pluvieux et des conditions d'exposition, c'est-à-dire le type Superficiel dans notre cas. T_0 est le temps de référence lors du test de carbonatation accélérée effectué, qui est la valeur par défaut de 28 jours (0,047 ans), p_{SR} est la probabilité de pluie Balance sur des éléments considérés comme égaux respectivement à 0,25 ou 1 Verticalement et horizontalement. T_0W est le temps de trempage, c'est à dire le nombre de jours par an Les précipitations dépassent 2,5 mm. Il y a eu 18 jours de précipitations à La Rochelle en 2018 Supérieure à 2,5 mm, c'est-à-dire que la fréquence annuelle est égale à 0,049.

b_w est l'indice de régression égal à 0,446.

$$W(t) = \left(\frac{t}{T}\right)^{\frac{(P \cdot SR \cdot T \cdot W)^{bw}}{2}} \quad (1.6)$$

4. Modélisation en présence d'incertitudes:

La modélisation en présence d'incertitudes aléatoires et épistémiques est un domaine complexe qui suscite l'intérêt de nombreux chercheurs.

Les incertitudes ont été classées en deux types fondamentaux : **les incertitudes aléatoires** et **les incertitudes épistémiques**. Les incertitudes aléatoires sont liées à la variabilité inhérente des phénomènes, tandis que les incertitudes épistémiques résultent d'un manque de connaissances qui peut être comblé par davantage de travail, comme la collecte de données.[25]

Il est crucial de faire la distinction entre ces deux types d'incertitude car ils nécessitent souvent des approches de modélisation différentes. Par exemple, l'incertitude épistémique est souvent liée à un manque de données d'entraînement dans le modèle, qui peut être corrigé en augmentant la taille des données d'entraînement ou en améliorant l'architecture du modèle.

La modélisation sous incertitude dans le domaine de la carbonatation du béton est un sujet de recherche important.

Plusieurs études ont été menées sur ce sujet, notamment en utilisant le code FIB-34 pour modéliser la carbonatation du béton, en tenant compte des incertitudes. Les modèles de carbonatation du béton sont sensibles aux propriétés de transfert des bétons, et la disponibilité d'informations influence la sélection du modèle le plus efficace. L'étude examine également la capacité des modèles analytiques de carbonatation à tenir compte de l'incertitude, soulignant l'importance de tenir compte de la variabilité du processus. [26][27]

Chapitre

02

Chapitre 02 : Méthode d'analyse

1. Introduction :

Comme nous l'avons vu au chapitre 1, la carbonatation est un phénomène qui a des conséquences uniquement bon pour le béton, mais la corrosion des armatures crée des problèmes. Il est donc nécessaire d'étudier le mécanisme de corrosion par carbonisation pour garantir durabilité des structures exposées à ce phénomène.

Durée de vie des structures en béton armé présentant qui risque une corrosion induite par carbonatation est divisée en deux étapes :

période d'initiation: est relativement lente,

période de propagation: est plus courte et caractérisé par une baisse rapide des performances de la structure jusqu'à échouer,

Par conséquent, l'étude de la période d'initiation revêt une grande importance pour prévenir l'apparition de cette maladie. Le risque de dommages causés par la carbonatation devient très coûteux à ce stade propagation.

Après avoir présenté dans le premier chapitre les données bibliographiques de la corrosion induite par la carbonatation des structures en béton armé, nous nous intéressons ici à l'aspect probabiliste permettant de prendre en compte la variabilité des phénomènes.

En effet, nous présentons certains outils théoriques bien connus qui nous seront utiles tout au long de ce mémoire. Nous commençons avec une brève présentation de la modélisation de la carbonatation par les méthodes probabilistes en générale et la simulation Monte-Carlo en particulier, Nous concluons le chapitre 2 Donnée climatique (les villes et conditions climatique et changement climatique).

2. Modélisation la carbonatation :

La manière la plus simple de prédire la durée de vie des structures en béton armé (par rapport Corrosion des barres d'armature) est une évaluation de la durée de la phase initiale de corrosion.

Concernant la corrosion due à la carbonisation, le problème est de déterminer le temps nécessaire à la corrosion. La première couche de renfort est dépassivée par l'action du CO₂. [24]

2.1.État limite de dépassivation :

L'état limite de dépassivation provoqué par la carbonatation peut être défini comme :

$$P_{\text{dep}} = [a, Xc(tsl) < 0] < P_o \quad (2.1)$$

Avec :

- P_{dep} : Probabilité de dépassivation ;
- a : Enrobage (mm) ;
- $X_c(t_{sl})$: Profondeur de carbonatation à l'instant t_{sl} (mm) ;
- t_{sl} : Durée de vie de conception (an) ;
- P_o : Probabilité de défaillance cible

Les variables a , $X_c(t)$ doivent être quantifiées à l'aide de méthodes purement probabilistes.

2.2. Equation d'état limite de dépassivation :

Méthodes probabilistes pour simuler les causes de la corrosion

La carbonisation du béton non fissuré a été développée par le projet de recherche Duracrete, Révisé par le projet DARTS. Ces projets ont abouti au développement de code de modélisation, Durée de vie des structures en béton armé : code du modèle de conception de durée de vie fib-34, Bulletin de la Fédération internationale du béton 34. Il est basé sur l'équation de l'état limite

Ci-dessous, comparez le revêtement (a) avec la profondeur de carbonatation $X_c(t)$ À un certain moment t :

$$g[a, X_c(t)] = a - X_c(t) \quad (2.2)$$

$$X_c(t) = \sqrt{2 \times k_e \times k_c \times (k_t \times R^{-1} Acc_o + \epsilon t) \times C_s} \times \sqrt{t} \times W(t) \quad (2.3)$$

Avec :

- a : Enrobage (mm) ;
- $X(t)$: Profondeur de carbonatation à l'instant t (mm) ;
- k_e : Fonction environnementale ;
- k_c : Paramètre de transfert d'exécution ;
- k_t : Paramètre de régression ;
- $R^{-1} Acc_o$: Résistance effective de béton à la carbonatation (inverse) [(mm²/an) / (kg/m³)] ;

- ϵt : Terme d'erreur $[(\text{mm}^2/\text{an}) / (\text{kg}/\text{m}^3)]$;
- C_s : Concentration de CO_2 [kg/] ;
- $W(t)$: Fonction de climat

2.3. Quantification des paramètres aléatoires:

2.3.1. Enrobage :

L'enrobage (a) doit être traitée comme une variable aléatoire qui accepte tout type de distribution pour une intégration large, sinon distribution pour les valeurs exclues doit être négative

(lognormal, Beta, Weibull ou Neville)

- Valeur de (a) : $m = \text{nom } a \text{ (mm)}$.
- écart de (a) :
 $S = 8 \text{ à } 10 \text{ mm}$: cas d'absence d'exigences d'exécution particulières ;
 $S = 6 \text{ mm}$: cas d'exigences additionnelles d'exécution.

Pour les distributions limitées :

- Limite inférieure : 0 mm ;
- Limite supérieure : $5 \times \text{nom } a < d$ /avec d : largeur de l'élément structurel.

2.3.2. Durée de vie de conception t_{sl} :

Les valeurs indiquées sont les suivantes :

- 10 ans : pour les structures temporaires ;
- 10 - 25 ans : pour les éléments structurels remplaçables ;
- 15 - 30 ans : pour les structures agricoles ;
- 50 ans : pour les structures des bâtiments ;
- 100 ans : pour les structures des bâtiments monumentaux et l'ouvrages d'art.

2.3.3. Fonction environnementale k_e :

La fonction environnement prend en compte les niveaux d'humidité relative

Le coefficient de diffusion et dépasse la résistance à la carbonatation du béton peut exprimer par l'équation suivante :

$$K_e = \left(\frac{1 - \left(\frac{RH_{real}}{100} \right)^{f_e}}{1 - \left(\frac{RH_{ref}}{100} \right)^{f_e}} \right)^{g_e} \quad (2.4)$$

Avec:

- **RH_{real}**: Humidité relative de couche carbonatée (%);

Les données peuvent être disponibles à partir de la station météorologique la plus proche, qui peuvent varier de 0 et 100 % et représenté par une fonction de distribution Beta ou Weibull.

- **RH_{ref}**: Humidité relative référentielle (%);

Pour le climat de référence T= +20°C/65% HR, c'est un paramètre constant de valeur 65 %;

- **f_e**: Paramètre constant d'une valeur de 5,0;

- **g_e**: Paramètre constant d'une valeur de 2,5;

2.3.4. Paramètre de transfert d'exécution **kc** :

Compte tenu de l'effet du durcissement sur la résistance efficace à la carbonatation, Déterminez l'équation suivante lors du calcul de **kc** :

$$K_c = \left(\frac{tc}{7} \right)^{bc} \quad (2.5)$$

Avec:

tc et **bc** sont des variables quantifiées comme suit:

- **bc**: Distribution normal, avec une moyenne de -0,567, et un écart s d'une valeur de 0,024

- **tc**: Paramètre constant qui égale la période de cure, [Jours].

2.3.5. Résistance à la carbonatation inverse **R⁻¹ACC_o** :

Les données de 'fib_34' suivantes peuvent être utilisées pour la résistance à la carbonatation inverse (Tableau 2.1)

• Facteur k_{tet} ϵt :

Le coefficient pour la méthode d’essai de carbonatation accélérée est quantifié comme suit :

- Paramètre de régression Kt :

Une distribution normale avec une moyenne de 1,25 et un écart $s = 0,35$.

- Terme d’erreur ϵt : $[(mm^2/ an)/ (kg/ m^3)]$

Une distribution normale avec une moyenne de 315,5 et écart $s = 48$

Tableau 2.1 : Valeurs de résistance inverse à la carbonatation [fib-34, 2006] [24]

Type de ciment	Rapport E/C					
	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60
CEM 1 42.5 R	n.d	3.1	5.2	6.8	9.8	13.4
CEM 1 42.5 R + CV	n.d	0.3	1.9	2.4	6.5	8.3
CEM 1 42.5 R + FS	3;5	5.5	n.d	n.d	16.5	n.d
CEM 3/B 42.5	n.d	8.3	16.9	26.6	44.3	80.0

2.3.6. Concentration de CO₂:

La concentration de CO₂ dans l'air ambiant représente un impact direct sur les structures en béton, Cela peut être exprimé par l’équation suivante :

$$C_s = C_{s,atm} + C_{s,emi} \quad (2.6)$$

Avec :

- $C_{s,tm}$: Concentration de CO₂ de l’atmosphère $[kg/m^3]$, peut être quantifiée comme suit :

Une distribution normale, une moyenne de 0,00082, et un écart s de 0,0001.

- $C_{s,emi}$: Concentration de CO₂ additionnelle dû aux sources des émissions $[kg/m^3]$

2.3.7.Fonction de climat w(t) :

La fonction climatique prend en compte les conditions climatiques dues à :

Trempez la surface du béton dans l'eau comme indiqué dans la formule suivante :

$$W(t) = \left(\frac{t_0}{t}\right)^w \quad (2.7)$$

$$W = \frac{(Psr \times Tow)^{bw}}{2} \quad (2.8)$$

Avec :

- **t₀**: Temps de référence (ans), constant d'une valeur de 0,0767
- **Tow** : Temps de trempage dans l'eau, la plus proche station de météo peut l'offrir ;

Ou :

$$T_{OW} = \frac{\text{jours de chute de pluie avec } hNd \geq 2,5 \text{ mm par année}}{365} \quad (2.9)$$

- **hNd** : Hauteur des précipitations ;
- **Psr** : Distribution moyenne de la direction de vent pendant la chute de pluie, quantifiée comme suit :
 - égale à 0 si l'élément traité est un élément intérieur ;
 - égale à 1 si l'élément traité est un élément horizontal.

La station de météo peut offrir des valeurs pour les éléments verticaux.

- **bw**: Exposant de régression quantifié comme suit :
 - Distribution normale, une moyenne de 0,446 et un écart s=0,163

2.3.8. Fonction d'environnementale Ft :

Les facteurs Ft prennent en compte les effets de la température variable dans le temps, Déterminez l'équation suivante lors du calcul de FT:

Méthode d'analyse

$$Ft(t) = \exp\left(\frac{E}{R} \left[\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T(t)} \right]\right) \quad (2.10)$$

3. Méthode de simulation Monte Carlo :

La méthode Monte Carlo est une méthode de simulation numérique largement utilisée dans les domaines suivants problèmes de fiabilité. Dans cette méthode, l'échantillonnage de variables aléatoires utilisé pour construire un ensemble de valeurs destinées à décrire la défaillance et l'espace sûr.

L'échantillonnage est construit à partir d'une distribution statistique spécifiée

Chaque variable aléatoire introduite dans le problème. Puisque cette méthode gère Pour la simulation de la fonction d'état limite, plus l'échantillonnage utilisé est grand, plus La description de l'espace et les probabilités de défaillance obtenues seront précises [29]. Exister de nombreuses applications Monte Carlo simulent directement des processus physiques.

La technologie la simulation Monte Carlo comporte sept éléments de base [30]:

1. **Définition du problème** : basée sur la définition de tous les problèmes Variable aléatoire.
2. **Fonction de densité de probabilité (PDF)** : caractéristiques quantitatives. Calculer la somme des probabilités de toutes les variables aléatoires basées sur PDF Paramètres correspondants.
3. **Générateur de nombres aléatoires** : générer les valeurs de ces variables aléatoire.
4. **Règles d'échantillonnage** : évaluer le problème avec certitude chaque ensemble de réalisations de toutes les variables aléatoires, c'est-à-dire des expériences numériques.
5. **Notation** : Extraire des informations probabilistes de N telles réalisations.
6. **Estimation des erreurs** : déterminer la précision et l'efficacité de l'algorithm simulation.
7. **Techniques de réduction de la variance** : méthodes pour réduire la variance de la solution estimée afin de réduire le temps de calcul des simulations de Monte Carlo.

Toutes les variables aléatoires sont considérées comme non corrélées.

Le cœur de cette méthode est de construire des échantillons pour chaque variable la question implique le hasard. Ensuite, le domaine de sécurité et le point la défaillance est prédite en simulant l'équation (2.11), comme le montre la figure 2.1. La Pour les simulations Monte Carlo, la probabilité de défaillance est calculée à l'aide de l'expression suivante [29] :

$$Pf = \int_{G \leq 0} f(x) dx = \int_{G \leq 0} I(x) f(x) dx = E[I(x)] \tag{2.11}$$

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

$$I(\mathbf{x}) = \begin{cases} 1 & \rightarrow G \leq 0 \\ 0 & \rightarrow G > 0 \end{cases}$$

Pour calculer la probabilité d'échec, il suffit de calculer les points du domaine

échecs (N_f) et divisez leur nombre par le nombre total de points (N_s) selon l'équation

$$Pf = \frac{N_f}{N_s} \tag{2.12}$$

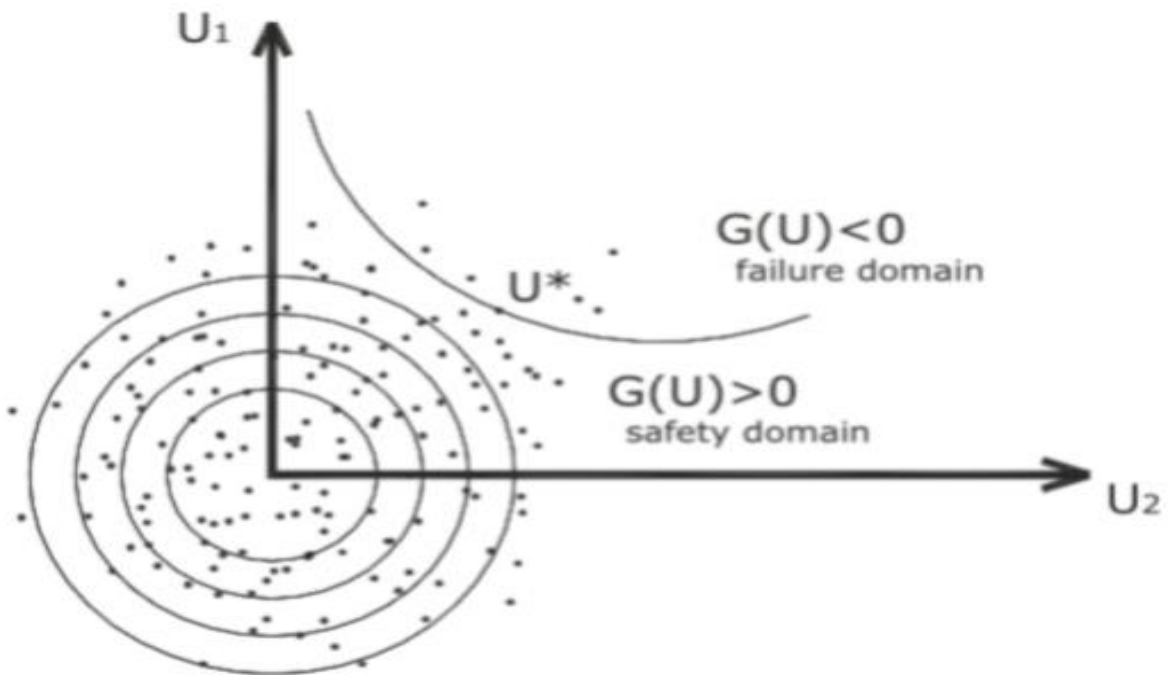


Figure 2.1 : échantillonnage Monte Carlo pour deux variables aléatoire [29]

Cette approche présente de nombreux avantages. Il reste facile à mettre en œuvre et ne nécessite pas Il n'y a pas d'autres paramètres à ajuster sauf la quantité à imprimer. Elle est spéciale stable et n'impose aucune contrainte particulière sur la fonction ou la loi à évaluer variable aléatoire. L'inconvénient de cette méthode est sa vitesse de convergence lente. Cela nécessite un beaucoup d'imprimés, donc beaucoup d'évaluations numériques à obtenir Résultats approximatifs et fiables de la solution.

4. Donnée climatique :

4.1. Les Villes :

Nous avons choisi trois wilayas en Algérie et trois villes hors d'Algérie, chacun avec son propre climat :

1. Ville d'Adrar (climat Sec et Chaud) :

Le climat sec et chaud d'Adrar est principalement dû à son emplacement dans le nord du désert du Sahara, ce qui signifie qu'elle est influencée par les caractéristiques désertiques telles que le faible taux de précipitations et les températures élevées. De plus, les variations de température entre le jour et la nuit sont extrêmes dans les régions désertiques, ce qui les rend généralement sèches et chaudes.

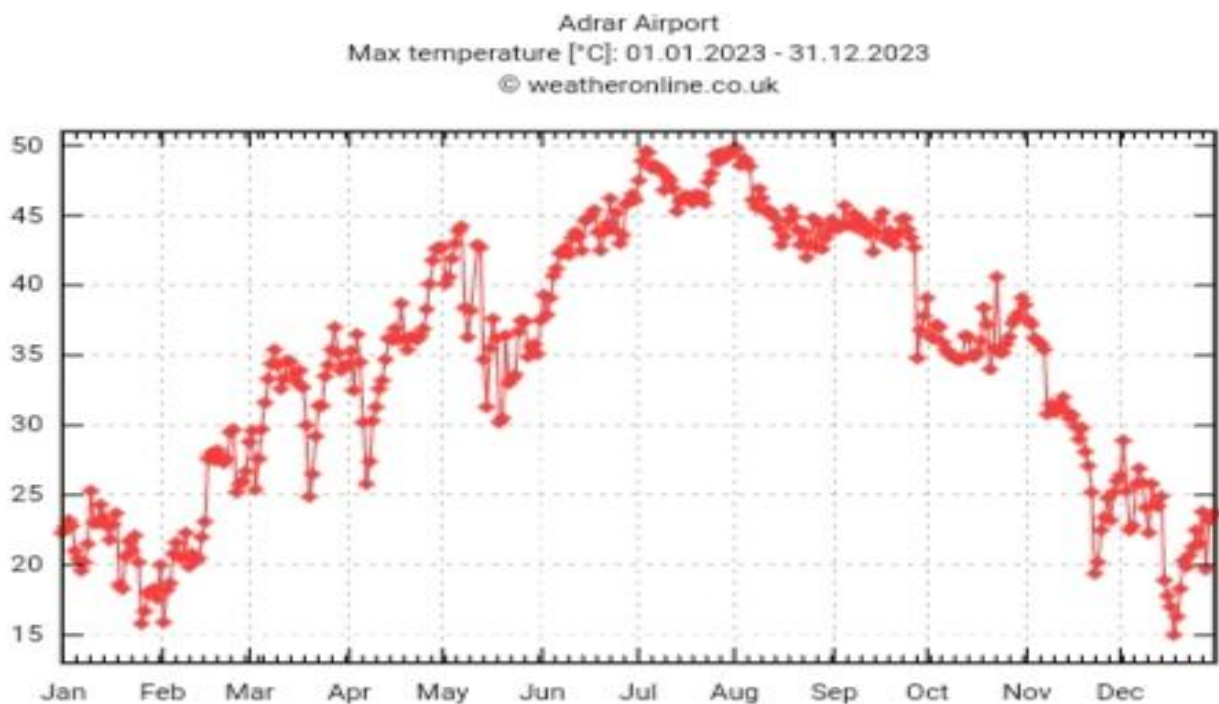


Figure 2.2 : valeurs Max température de la ville Adrar [WeatherOnline,2023] [31]

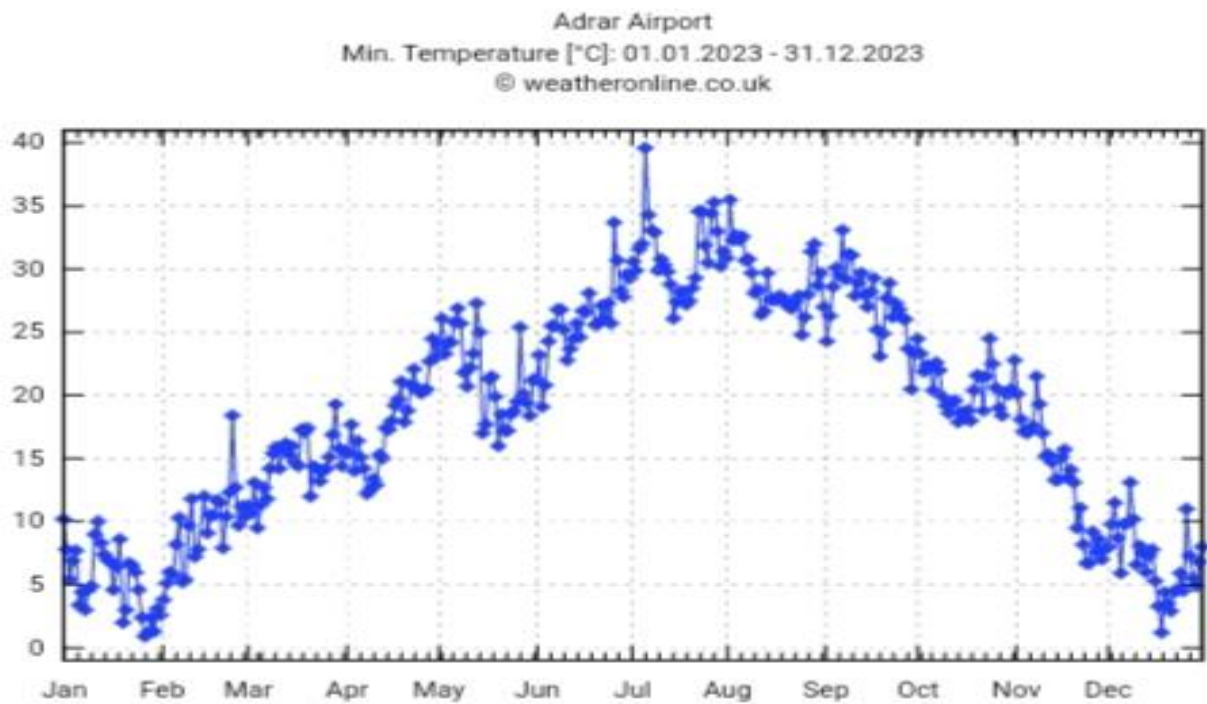


Figure 2.3 : valeurs Min température de la ville Adrar [WeatherOnline,2023] [31]

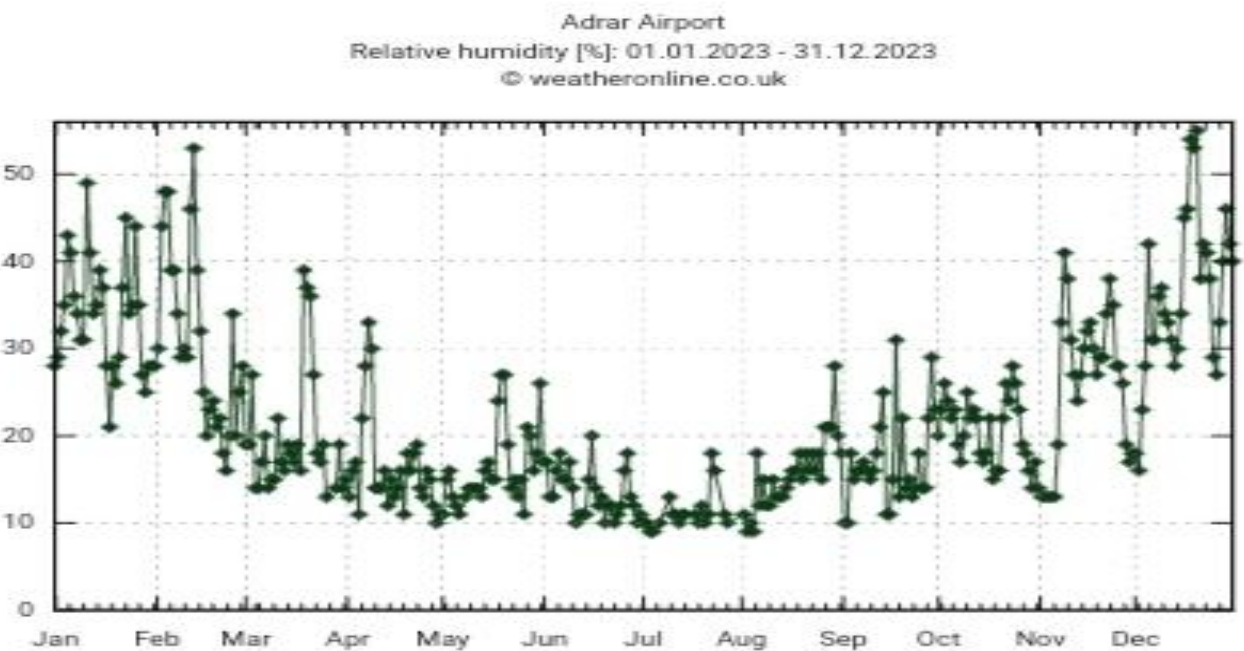


Figure 2.4 : valeurs Relative humidité de la ville Adrar [WeatherOnline,2023] [31]

2. Ville d’Annaba (climat humide et Chaud) :

Wilaya d’Annaba se distingue par un climat à la fois humide et chaud en raison de sa situation géographique et de son relief. Située dans le nord-est de l’Algérie, aux pieds des montagnes du Petit Atlas et près de la mer Méditerranée, elle bénéficie de l’humidité venant

de la mer, favorisant ainsi les précipitations. De plus, sa topographie variée favorise la formation de mécanismes locaux de formation de nuages et de précipitations.

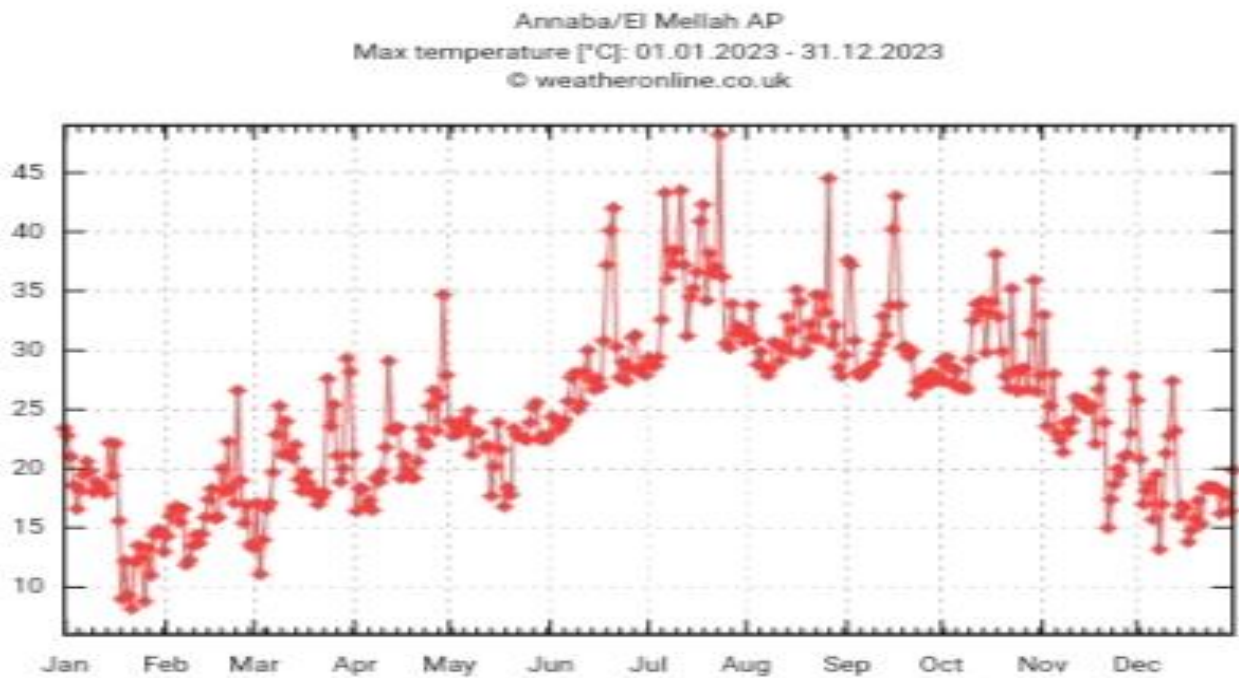


Figure 2.5 :valeurs Max température de la ville Annaba [WeatherOnline,2023] [31]

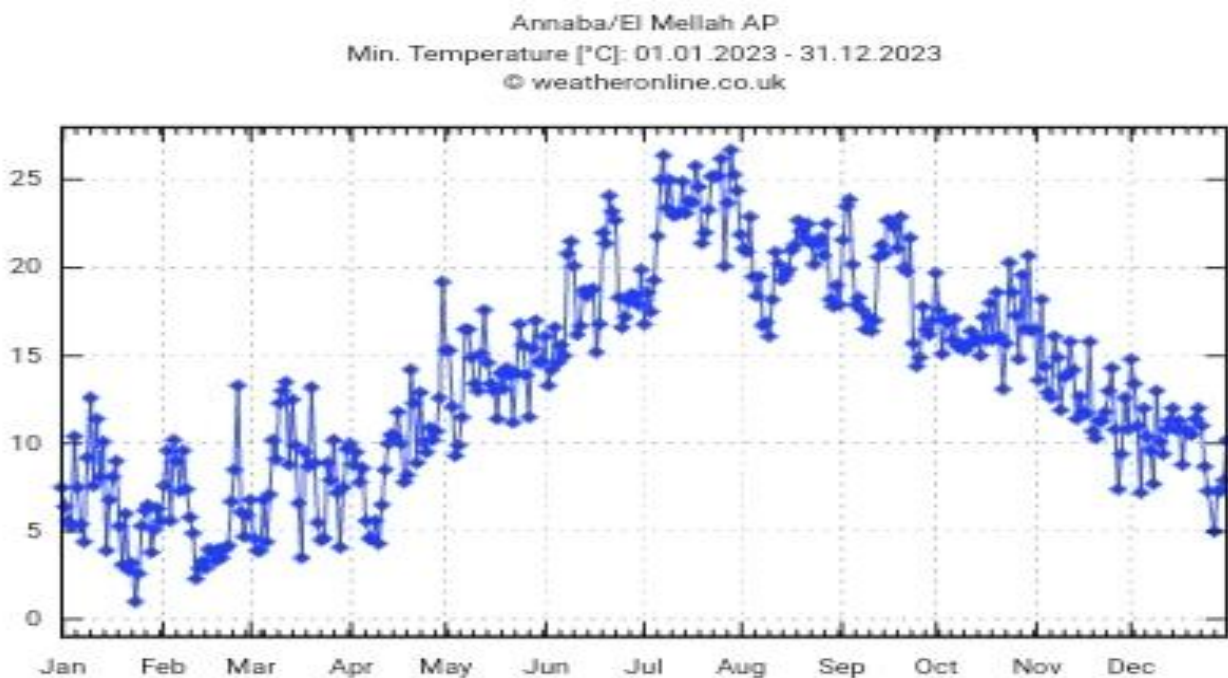


Figure 2.6 : valeurs Min température de la ville Annaba [WeatherOnline,2023] [31]

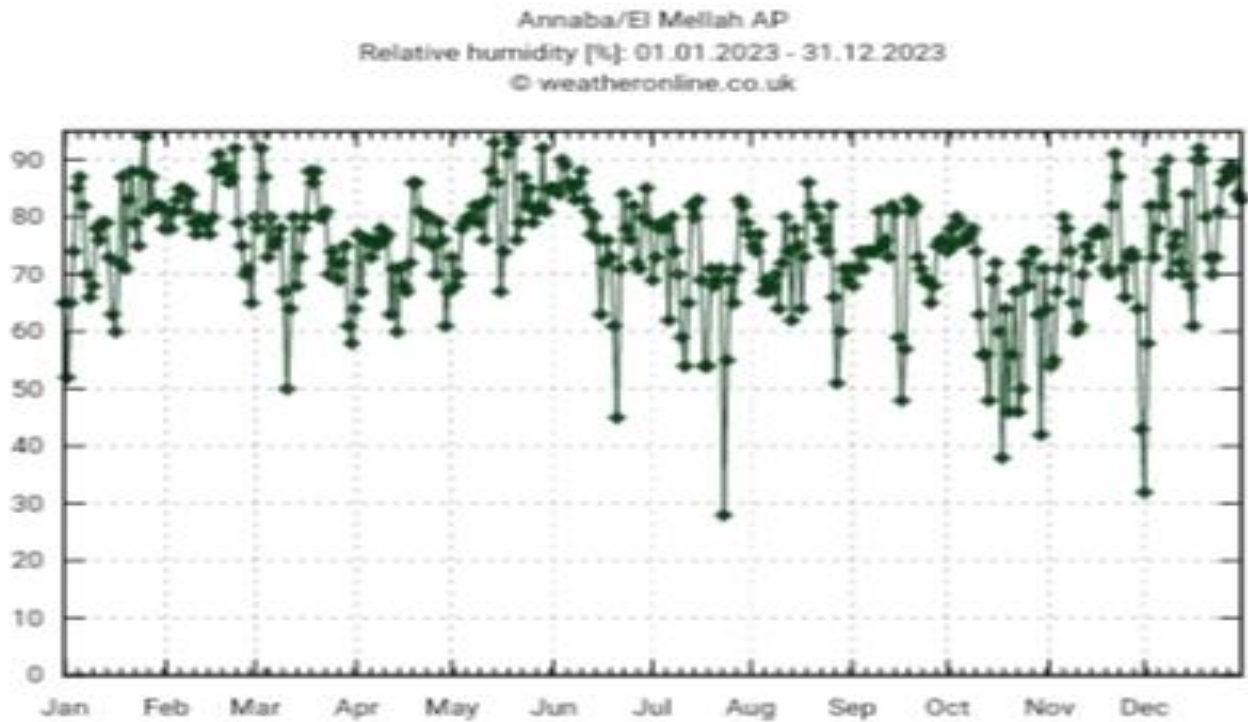


Figure 2.7 : valeurs Relative humidité de la ville Annaba [WeatherOnline,2023] [31]

3. Ville Tébessa (climat Sec et Froid) :

La wilaya de Tébessa est située dans l'est de l'Algérie, et se caractérise par un climat sec et froid en raison de sa proximité avec le Sahara et de son relief montagneux. Cela signifie qu'elle reçoit peu de pluie et connaît des températures basses pendant l'hiver.

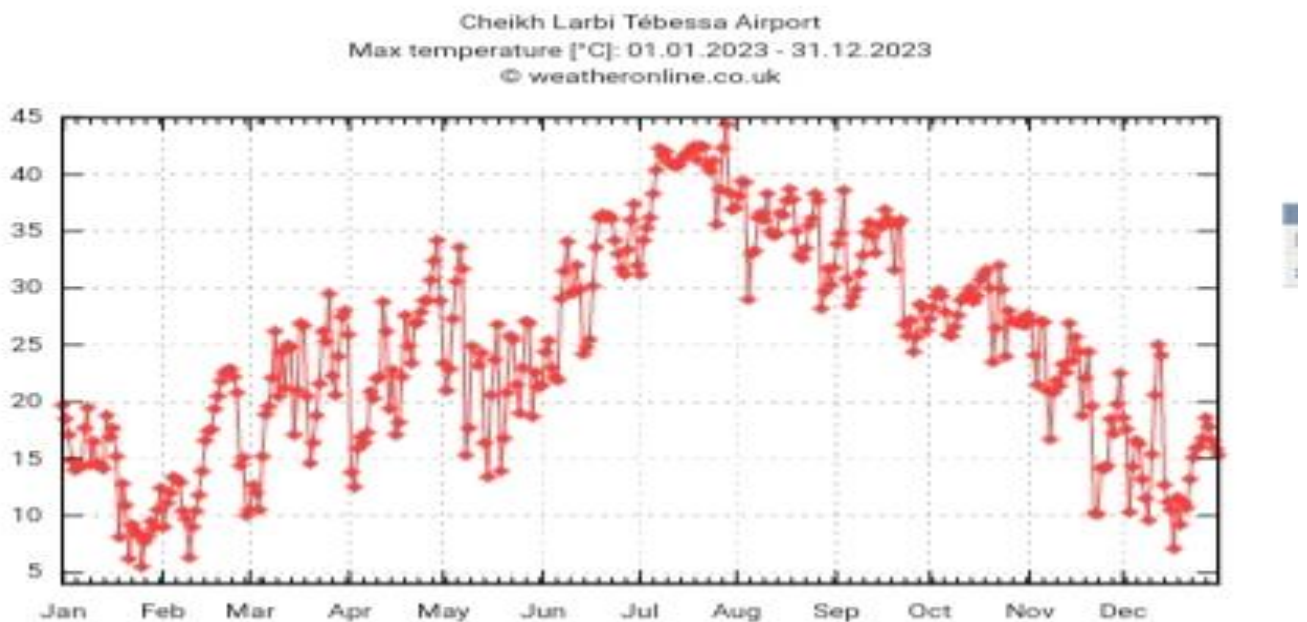


Figure 2.8: valeurs Max température de la ville Tébessa [WeatherOnline,2023] [31]

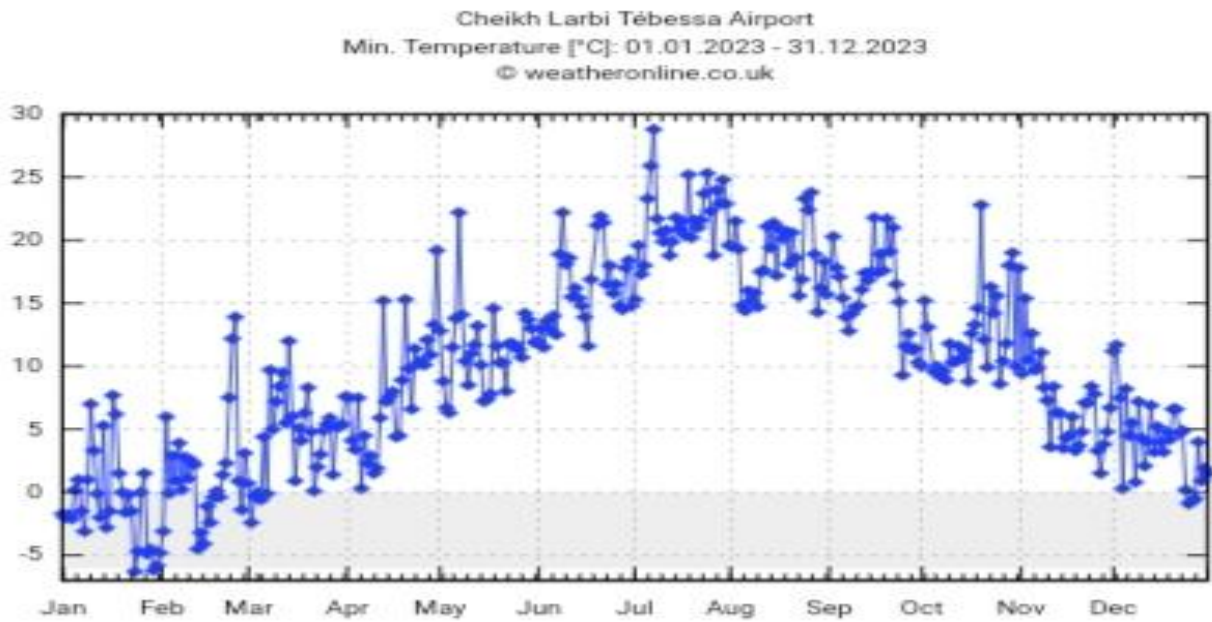


Figure 2.9 : valeurs Min température de la ville Tébessa [WeatherOnline,2023] [31]

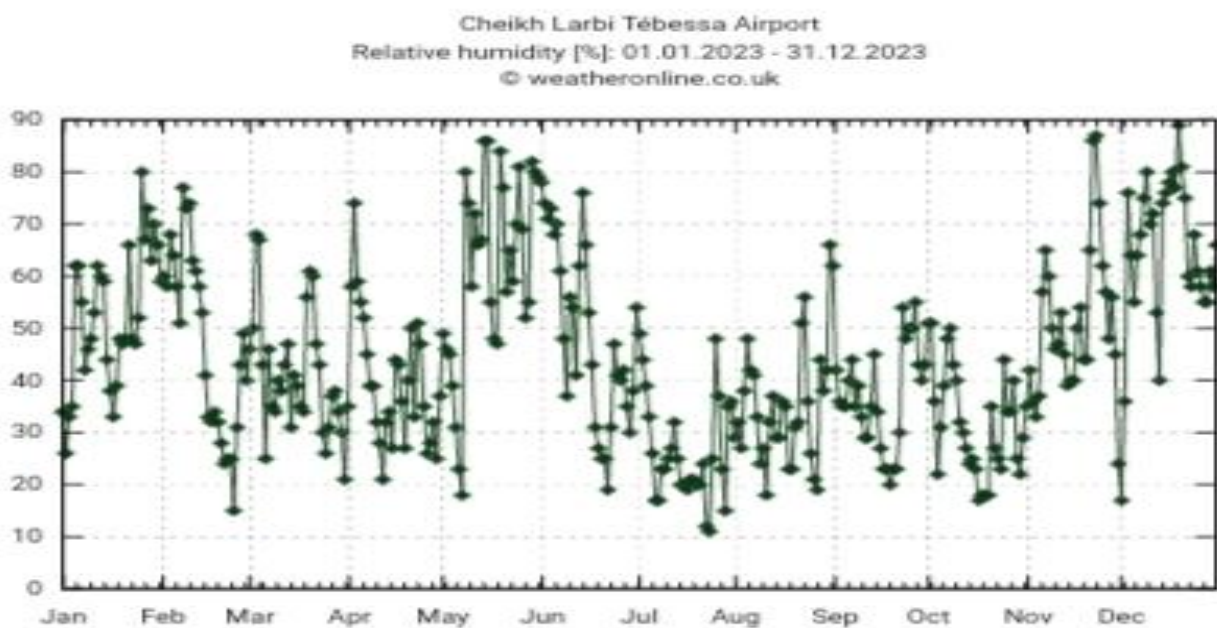


Figure 2.10 : valeurs Relative humidité de la ville Tébessa [WeatherOnline,2023] [31]

4. Ville de Bergen (climat humide et Froid) :

Bergen, la ville norvégienne située sur la côte de la mer du Nord, se caractérise par un climat humide et froid en raison de l'influence de la mer et de son relief montagneux. Les températures sont relativement stables grâce au réchauffement de la mer en hiver et à son refroidissement en été. De plus, les reliefs montagneux contribuent à la formation de

conditions météorologiques complexes, entraînant des précipitations abondantes et fréquentes.

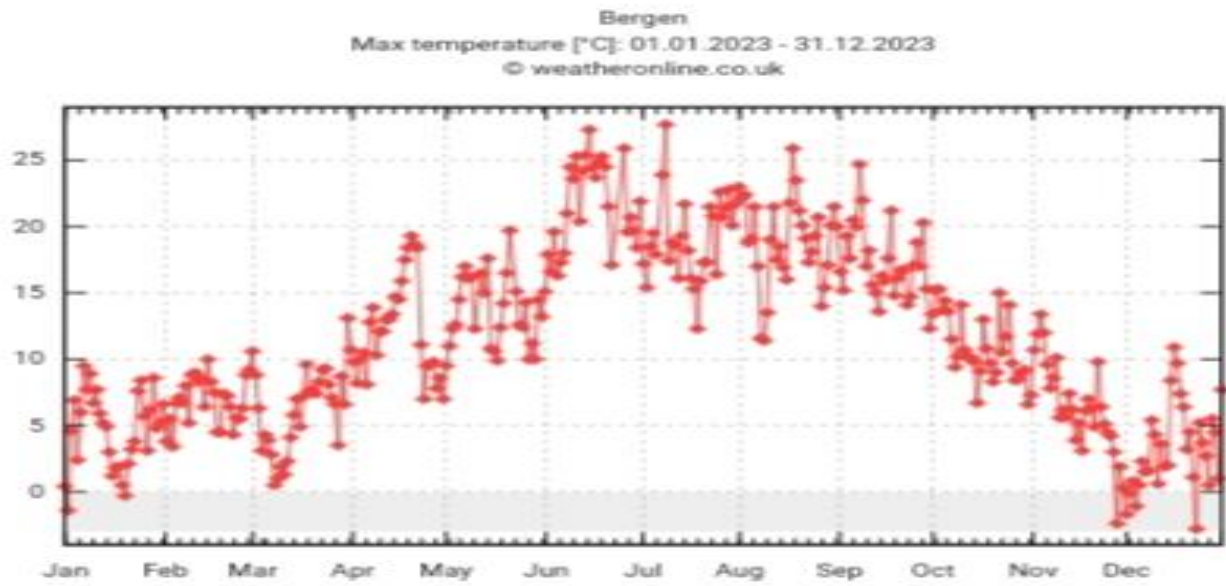


Figure 2.11 : valeurs Max température de la ville Bergen [WeatherOnline,2023] [31]

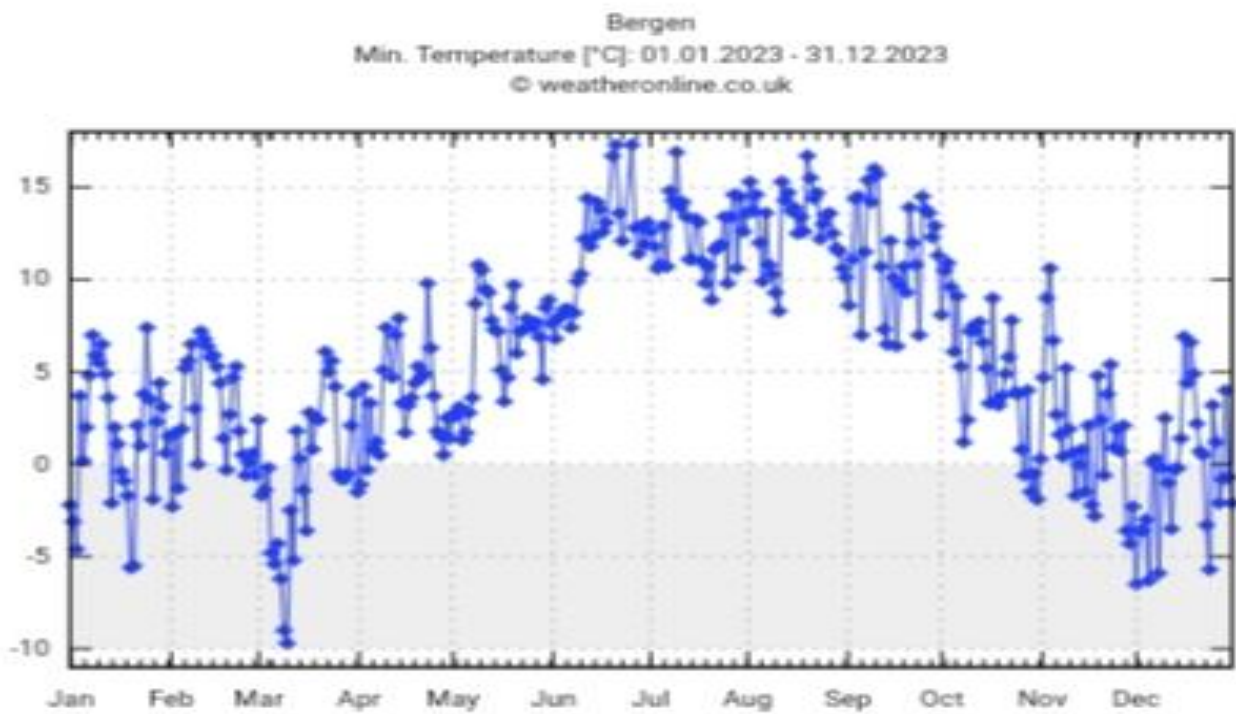


Figure 2.12 : valeurs Min température de la ville Bergen [WeatherOnline,2023] [31]

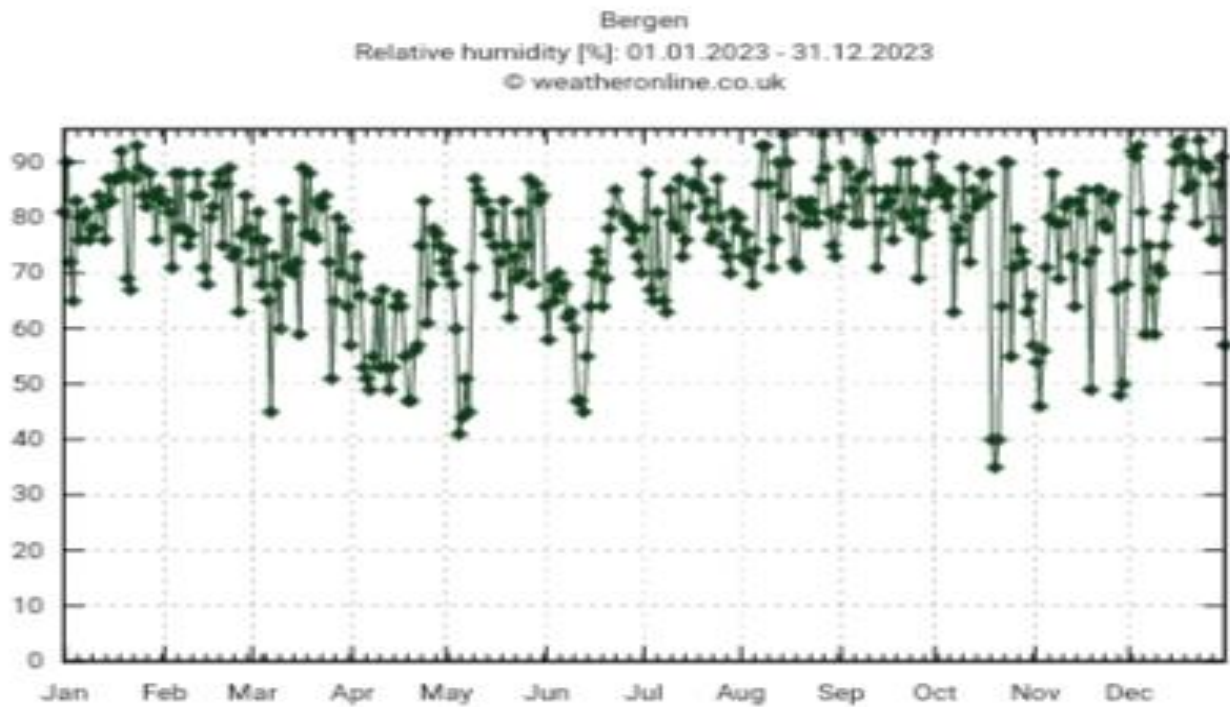


Figure 2.13 : valeurs Relative humidité de la ville Bergen [WeatherOnline, 2023] [31]

5. Ville d'Abu Dhabi (climat très chaud et humide) :

Nous avons choisi Abou Dhabi comme une ville caractérisée par un climat très chaud et humide en raison de sa position géographique proche de l' quateur et de la côte du golfe Persique, ce qui l'expose à un fort ensoleillement et à l'humidité des eaux marines. La région est dotée d'un climat désertique qui contribue à l'élévation des températures en raison de la faible évaporation et de la rétention de chaleur par le sol sableux. Les infrastructures modernes et les hauts bâtiments retiennent la chaleur, et la rareté des précipitations fait que les températures restent élevées pendant de longues périodes.

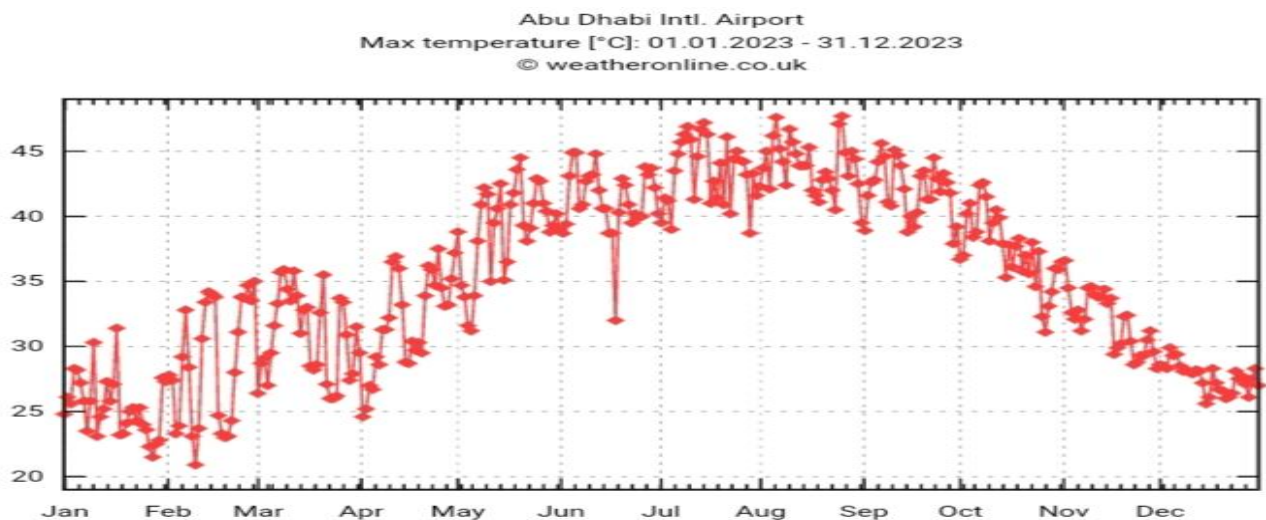


Figure 2.14 : valeurs Max température de la ville Abu Dhabi [WeatherOnline,2023] [31]

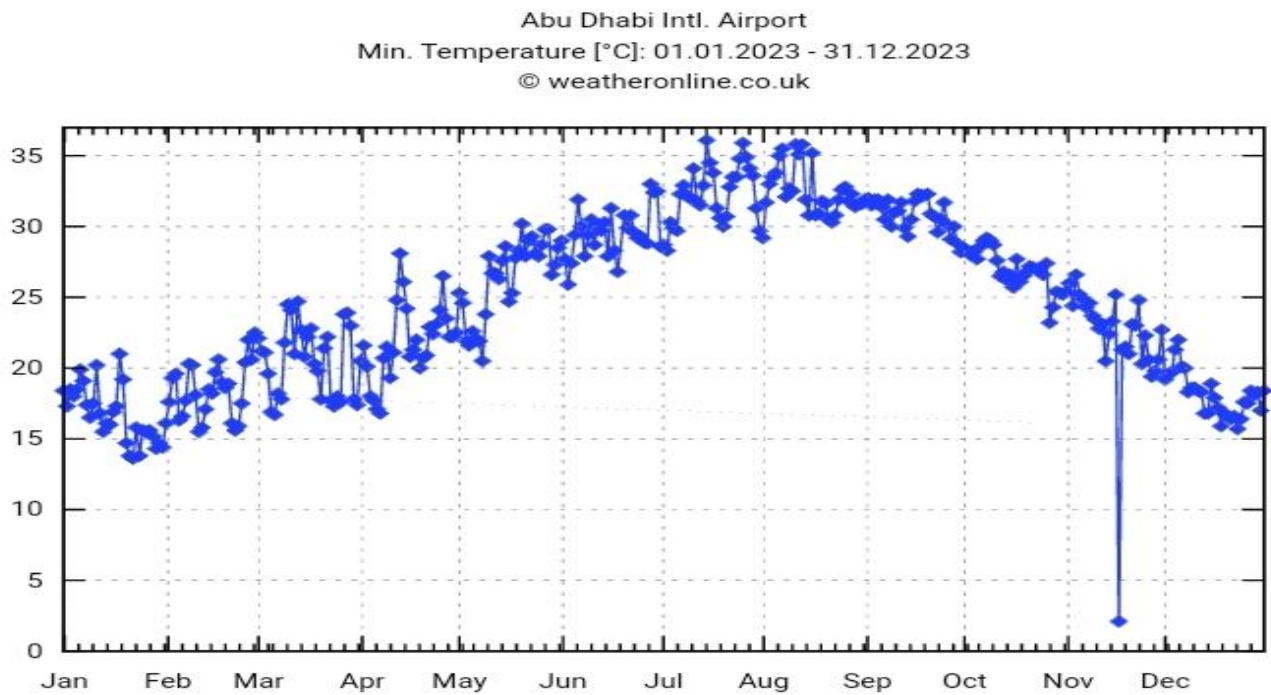


Figure 2.15 : valeurs Min température de la ville Abu Dhabi [WeatherOnline, 2023] [31]

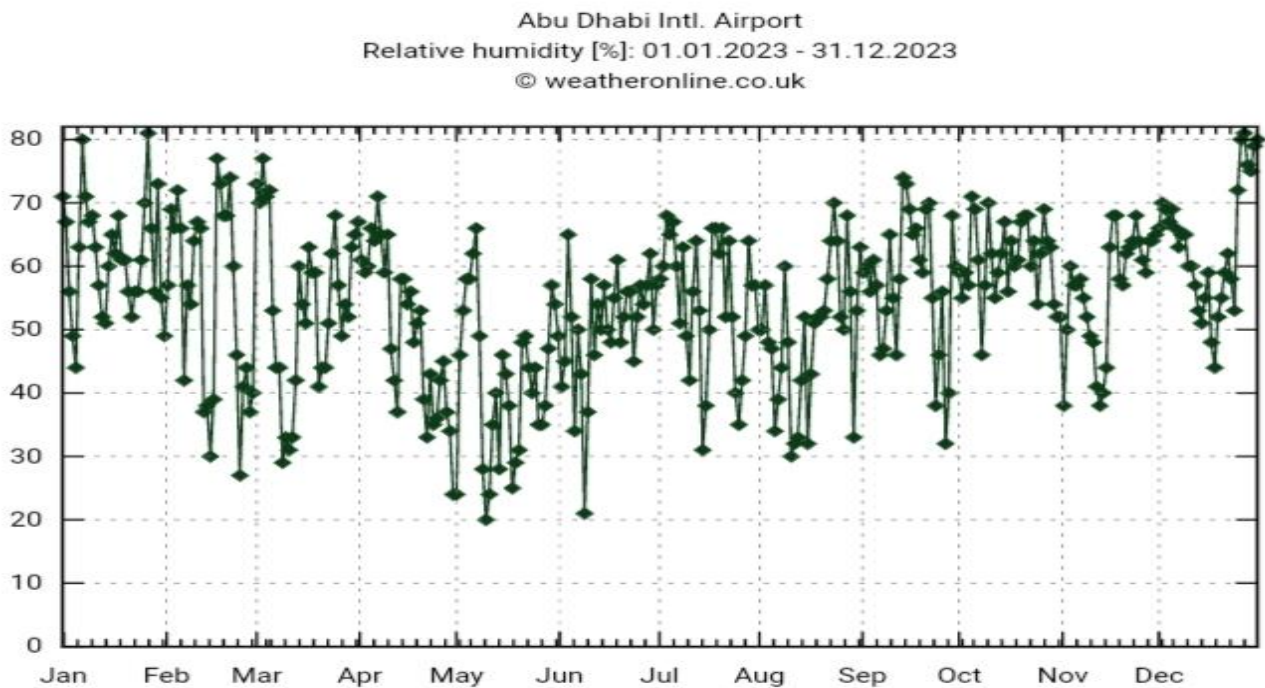


Figure 2.16 : valeurs Relative humidité de la ville Abu Dhabi [WeatherOnline, 2023] [31]

6. Ville d'Accra (climat très chaud et humide) :

La ville d'Accra, en tant que capitale du Ghana située sur la côte ouest de l'Afrique, se caractérise par un climat équatorial humide. Cela signifie qu'elle connaît des températures élevées tout au long de l'année avec un taux élevé d'humidité. Accra est située près de

l'équateur, ce qui la rend fortement influencée par les courants d'air humide en provenance de l'océan Atlantique. L'océan Atlantique se trouve au sud-ouest d'Accra, et les vents maritimes humides se déplacent vers la côte, augmentant ainsi l'humidité de l'air qui atteint la ville. Ces conditions géographiques et climatiques font que Accra connaît des températures élevées et une humidité élevée tout au long de l'année.

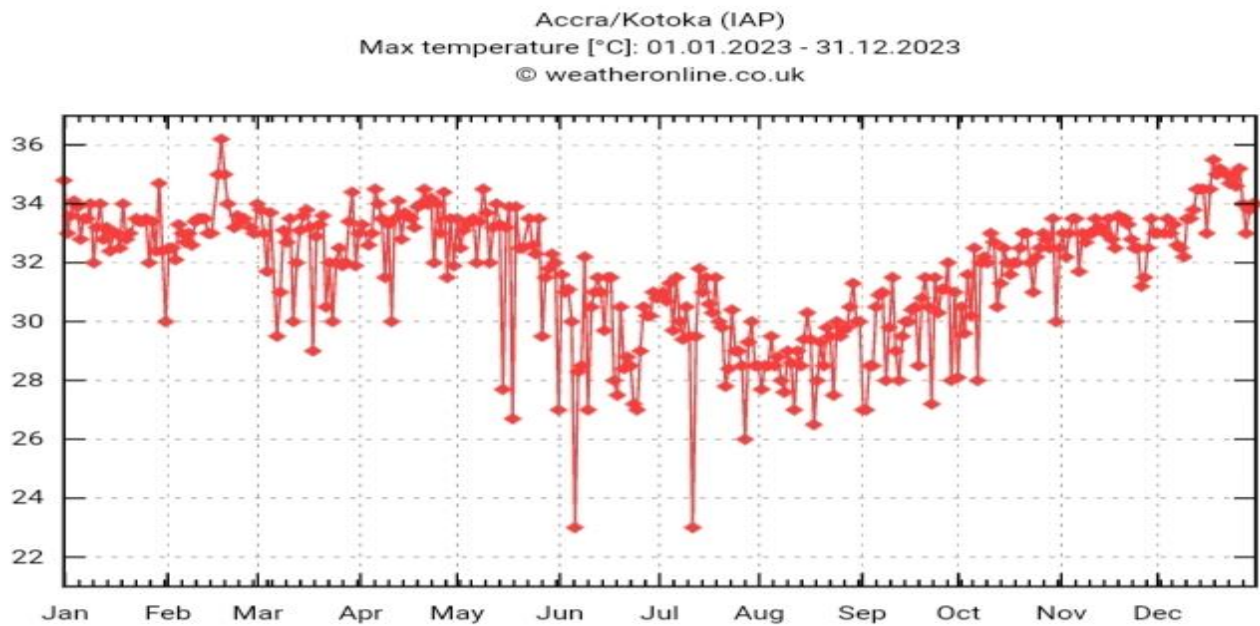


Figure 2.17 : valeurs Max température de la ville Accra [WeatherOnline, 2023] [31]

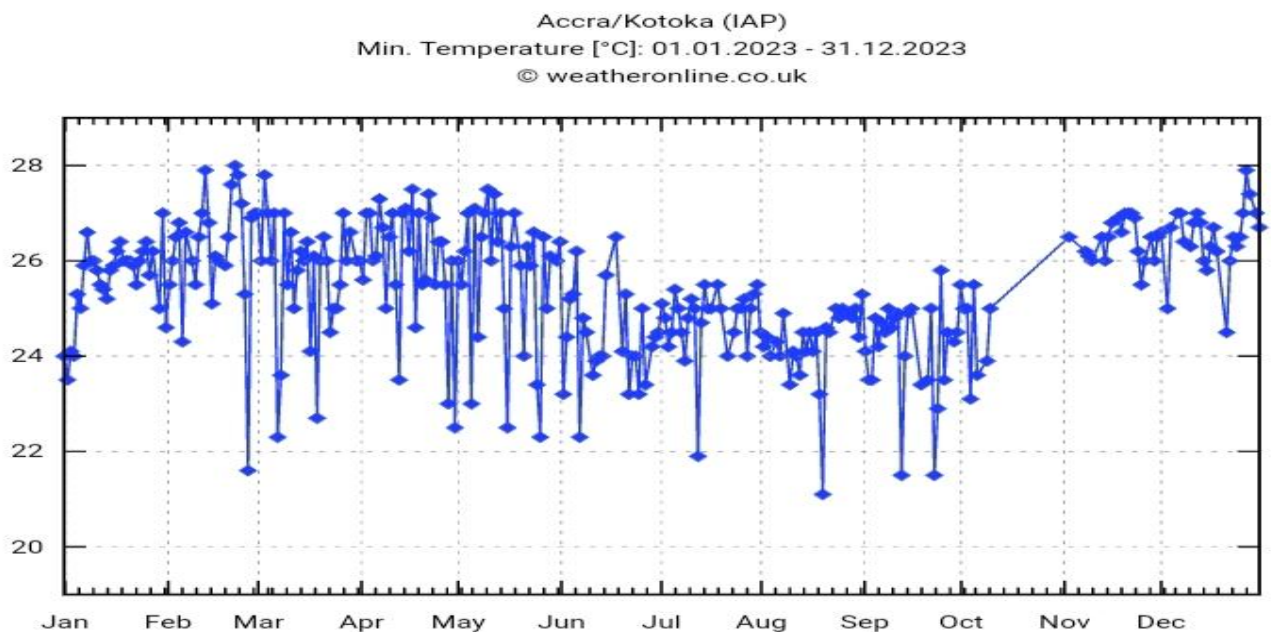


Figure 2.18 : valeurs Min température de la ville Accra [WeatherOnline, 2023] [31]

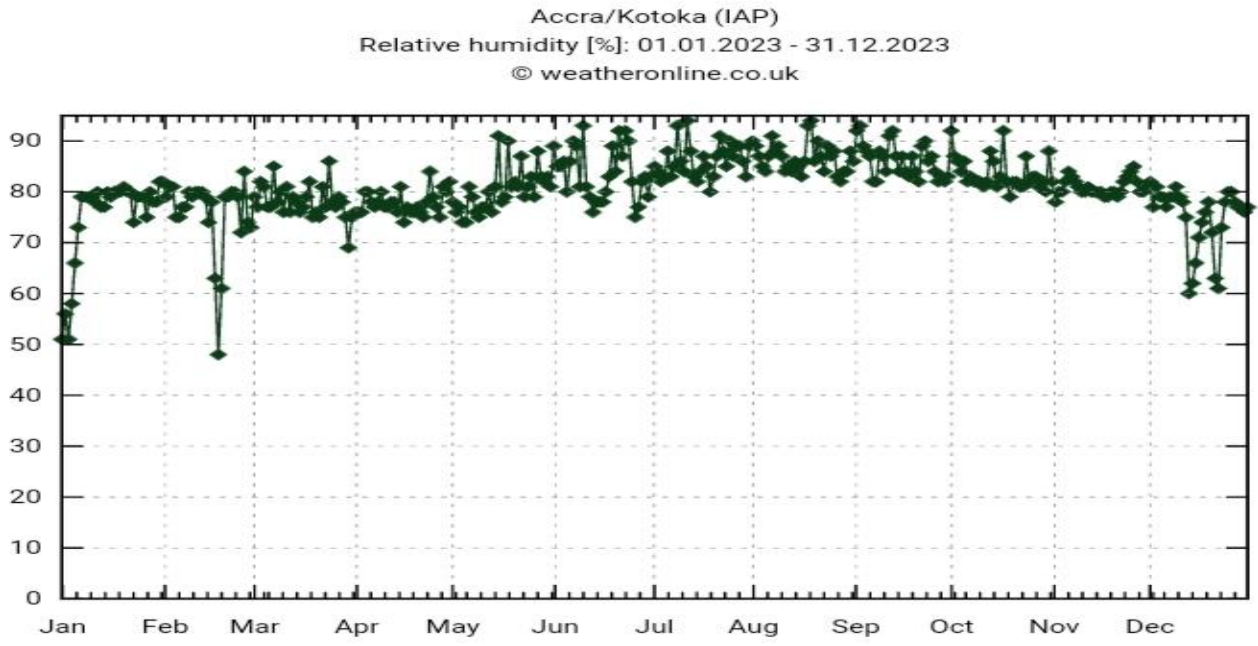


Figure 2.19 : valeurs Relative humidité de la ville Accra [WeatherOnline, 2023] [31]

4. 2. Changement climatique :

Tableau 2.2. Température (TX) Change deg C - Near terme, Meduim terme et à long terme - pour trois

Scénarios (de 1995 à 2014) Régions [IPCC WGI Interactive Atlas] [32]

Les Villes	Near Term (2021-2040)			Meduim Term (2041-2060)			Long Term (2081-2100)		
	Scenario								
	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	RCP2.6	RCP4.5	RCP 8.5	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
Adrar	0.8	0.8	1.0	1.0	1.4	1.9	0.9	2.0	4.3
Annaba	0.8	0.8	0.9	0.9	1.3	1.9	0.9	1.9	4.2
Tébessa	0.8	0.8	0.9	0.9	1.3	1.9	0.9	1.9	4.2
Bergen	0.6	0.7	0.9	0.9	1.2	1.7	0.8	2.0	3.8
Abu Dhabi	0.7	0.7	0.9	0.9	1.3	1.9	0.8	1.9	4.2
Accra	0.7	0.8	0.9	0.9	1.3	1.8	0.8	1.9	4.0

Chapitre

03

Chapitre 03 : Étude numériques et résultats**1. Introduction :**

Ce chapitre est consacré à démontrer les performances du modèle de corrosion par carbonatation présenté dans le deuxième chapitre. Ce modèle permet d'estimer la période d'initiation de la corrosion induite par la carbonatation en comparant la profondeur de carbonatation à l'épaisseur de l'enrobage. Ce modèle prend en compte l'effet des propriétés du matériau (rapport E/C, type de ciment, période de la cure), des conditions climatiques (humidité relative et Temperature) et changement climatique et la concentration en dioxyde de carbone dans le milieu environnant.

Les calculs l'analyse probabiliste sont effectués au moyen de simulations de Monte-Carlo.

En premier temps, un exemple de calcul du temps d'initiation de la corrosion est illustré.

Ensuite, une étude comparative est menée visant à étudier l'effet des changements climatiques est investiguée à travers des simulations en utilisant des données réelles d'humidité relative et Température de trois villes en Algérie ayant des conditions climatiques différentes, à savoir " Annaba", "Tébessa" et "Adrar", et trois villes hors d'Algérie "Bergen en Norvège", " Abu Dhabi dans le Golfe" et "Accra en Ghana".

Finalement etude l'influence des Les terms et les scenarios sur le temps d'initiation de la corrosion.

2. Temps d'initiation de la corrosion :

La figure (3.1) représente la courbe de probabilité de l'initiation de la corrosion en fonction du temps (CDF).

Au début, on remarque qu'il y a une très faible probabilité de début de la corrosion, car les conditions ne sont pas très favorables à l'initiation de la corrosion.

Avec le temps, la probabilité de début de la corrosion augmente progressivement, indiquant l'effet cumulatif des facteurs provoquant la corrosion tels que l'humidité et la température.

Aux alentours de 50 ans, il y a une augmentation notable de la probabilité de corrosion, ce qui indique que les conditions deviennent plus favorables à la corrosion.

À la fin de la période temporelle (100 ans), la probabilité atteint environ 0,7, ce qui signifie qu'il y a une grande probabilité de début de la corrosion à cette période.

Nous en concluons que ce phénomène augmente avec le temps. Autrement dit, à mesure que la structure vieillit. Cela est dû à la pénétration des carbonatations dans le béton et à leur accumulation à proximité des armatures jusqu'à atteindre la teneur critique.

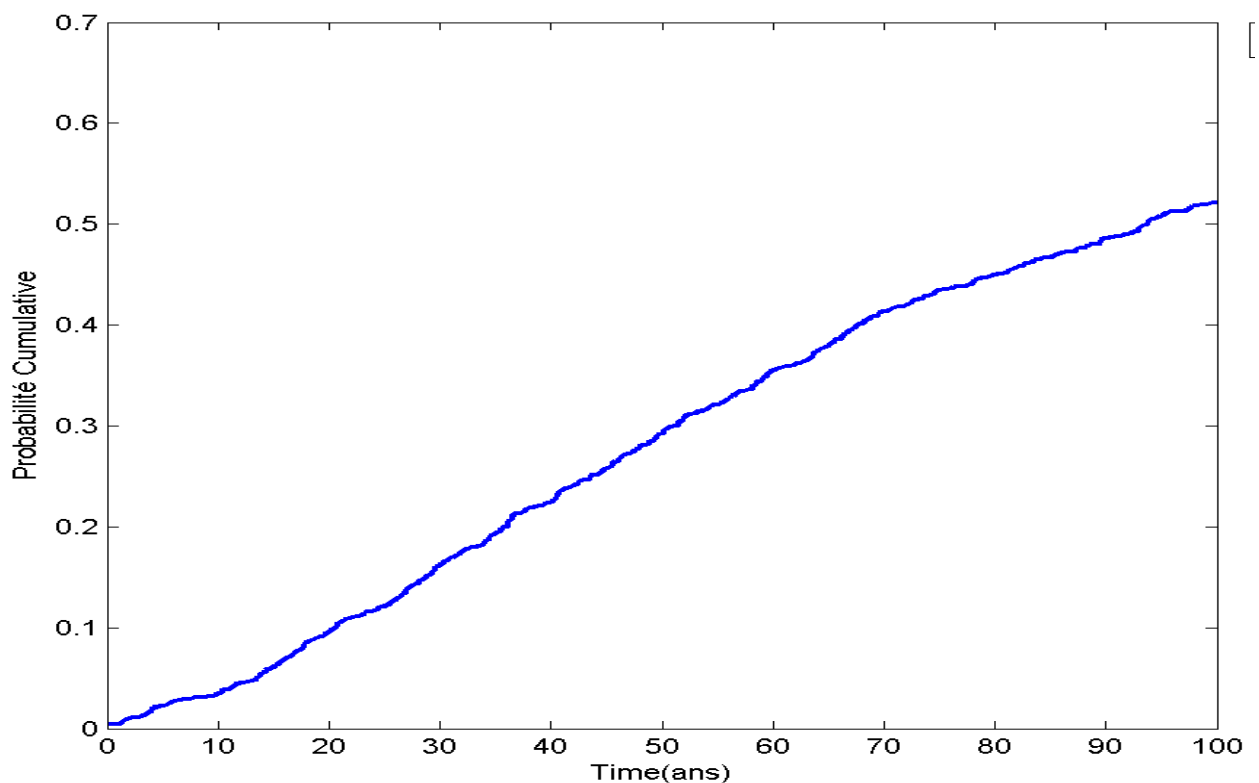


Figure 3.1. Probabilité d'initiation de la corrosion en fonction du temps(CDF)

3. Effet du nombre d'échantillonnages:

A travers la courbe qui représente la probabilité cumulative de l'érosion en fonction du temps, résultant de différents nombres d'échantillons de Monte Carlo variant entre 1000 et 20000.

Nous observons que, avec le temps, l'érosion augmente pour toutes, les tailles d'échantillons.

De plus, nous remarquons une convergence des courbes avec l'augmentation de la taille de l'échantillon, ce qui indique que l'augmentation de la taille de l'échantillon réduit la variance et améliore la précision de l'estimation.

En augmentant la taille de l'échantillon, la courbe devient plus stable et les résultats sont plus précis, ce qui est clairement visible pour les grands échantillons (10000 et 20000) par rapport aux petits échantillons.

En conclusion, dans une simulation de Monte Carlo, l'augmentation de la taille de l'échantillon améliore considérablement la précision et la fiabilité des résultats. Une analyse supplémentaire d'un échantillon de 20 000 montre que celui-ci offre le plus haut niveau de précision et de stabilité avec le moins de variation et de fluctuations. Ainsi, pour obtenir des résultats de haute précision, il est recommandé d'utiliser de grands échantillons comme 20 000 pour garantir une stabilité et une précision extrêmes dans la simulation.

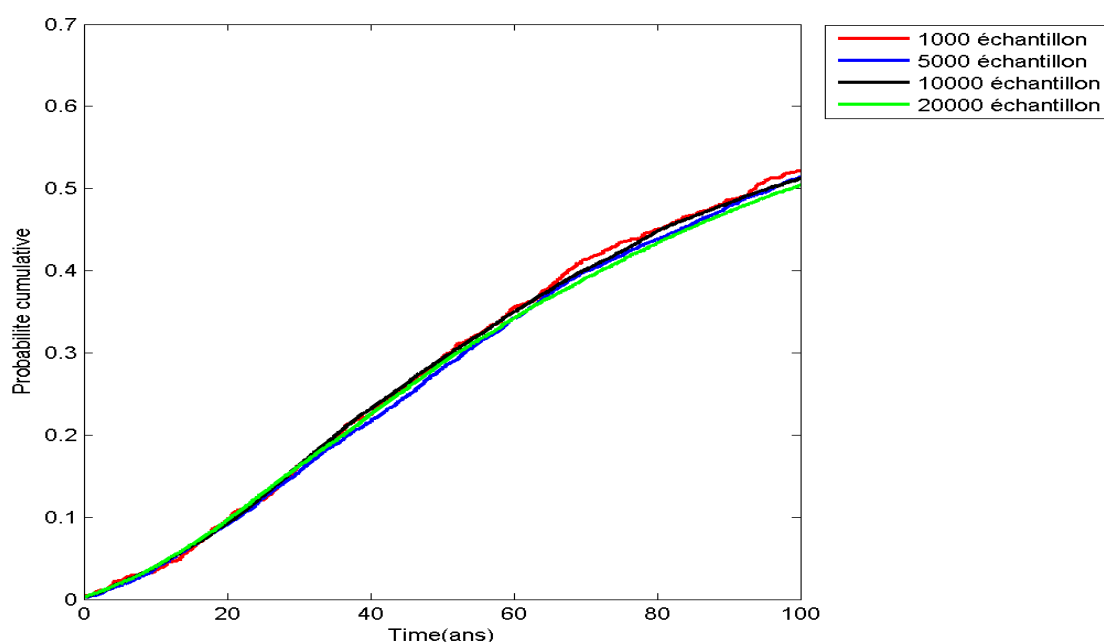


Figure 3. 2. Probabilité d'initiation de la corrosion en fonction du temps
(Du nombre d'échantillonnages)

4. Effet des propriétés du matériau:

4.1. Effet du rapport E/C:

Etudier l'effet du rapport eau/ciment (E/C) sur le temps d'initiation de la corrosion,

Nous avons étudié des bétons constitués de ciment de type CEM 3/B 42,5 et de cinq ciments différentes valeurs du rapport E/C (0,40, 0,45, 0,50, 0,55 et 0,60). Résultats de la simulation comme le montre la figure (3.3). On constate que le rapport E/C a un impact considérable le processus d'évolution de la corrosion du béton. plus le ratio augmente, plus il y a de démarrages La corrosion s'accélère et la probabilité d'apparition augmente. Ce résultat peut s'expliquer par l'influence d'effet du rapport E/C sur les propriétés du béton (perméabilité réduite), affectant ainsi la pénétration Carbonatation dans le béton (diffusion de la carbonisation).

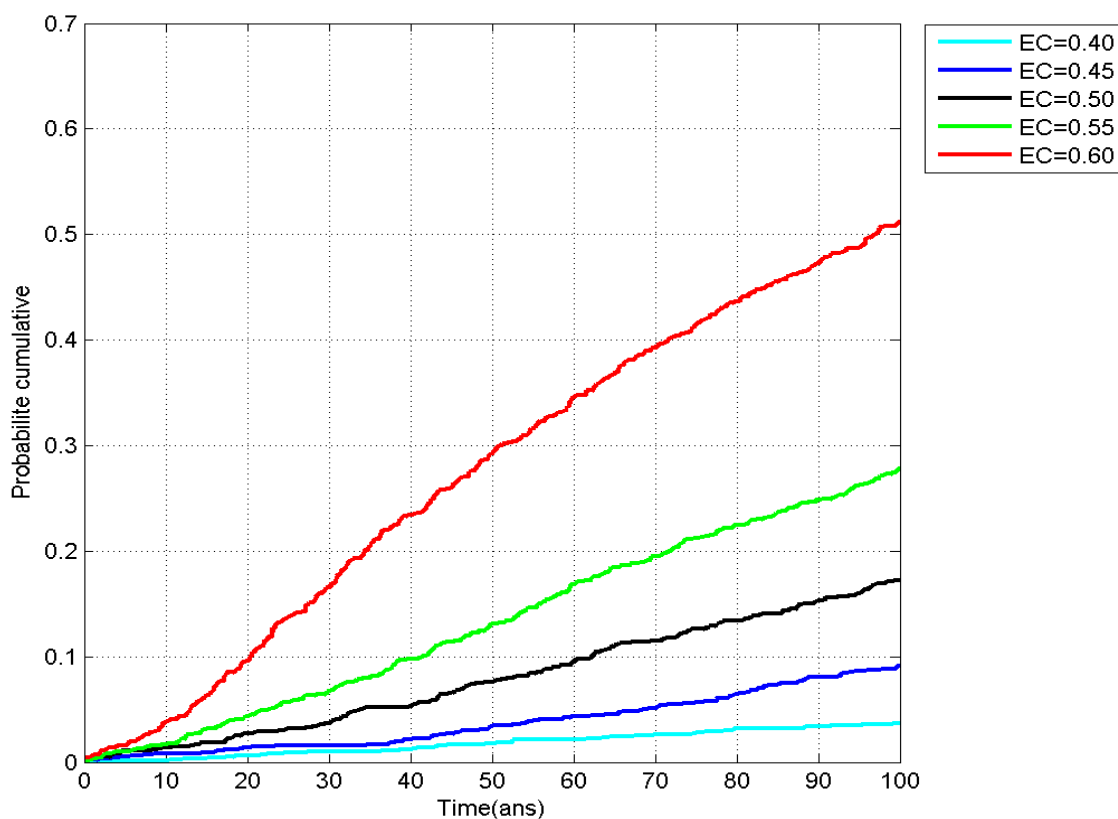


Figure 3. 3. Probabilité d'initiation de la corrosion en fonction du temps (E/C).

4.2. Effet du type de ciment :

Pour évaluer l'effet du type de Ciment pour la confection du béton sur le temps d'initiation de la corrosion, nous avons utilisé plusieurs types de liants, à savoir (CEM 1 42.5 R, CEM 1 42.5 R + CV, CEM 1 42.5 R+FS, CEM 3/B42.5). Le rapport adopté est de $E/C=0.55$.

Les résultats obtenus des simulations sont présentés sur la figure (3.4). Les résultats montrent que le type du ciment joue un rôle significatif vis-à-vis de la corrosion des armatures.

On observe que la probabilité d'initiation de CEM 1 42.5 R, CEM 1 42.5 R + CV, CEM 1 42.5 R+FS Elle augmente légèrement après 40 ans de service tandis que le type CEM 3/B augmente considérablement. En conséquence, il a été constaté que le type CEM 3/B n'est pas adapté pour résister à la carbonatation, tandis que le type CEM 1+CV est le meilleur pour les structures dans un environnement agressif par rapport aux autres types

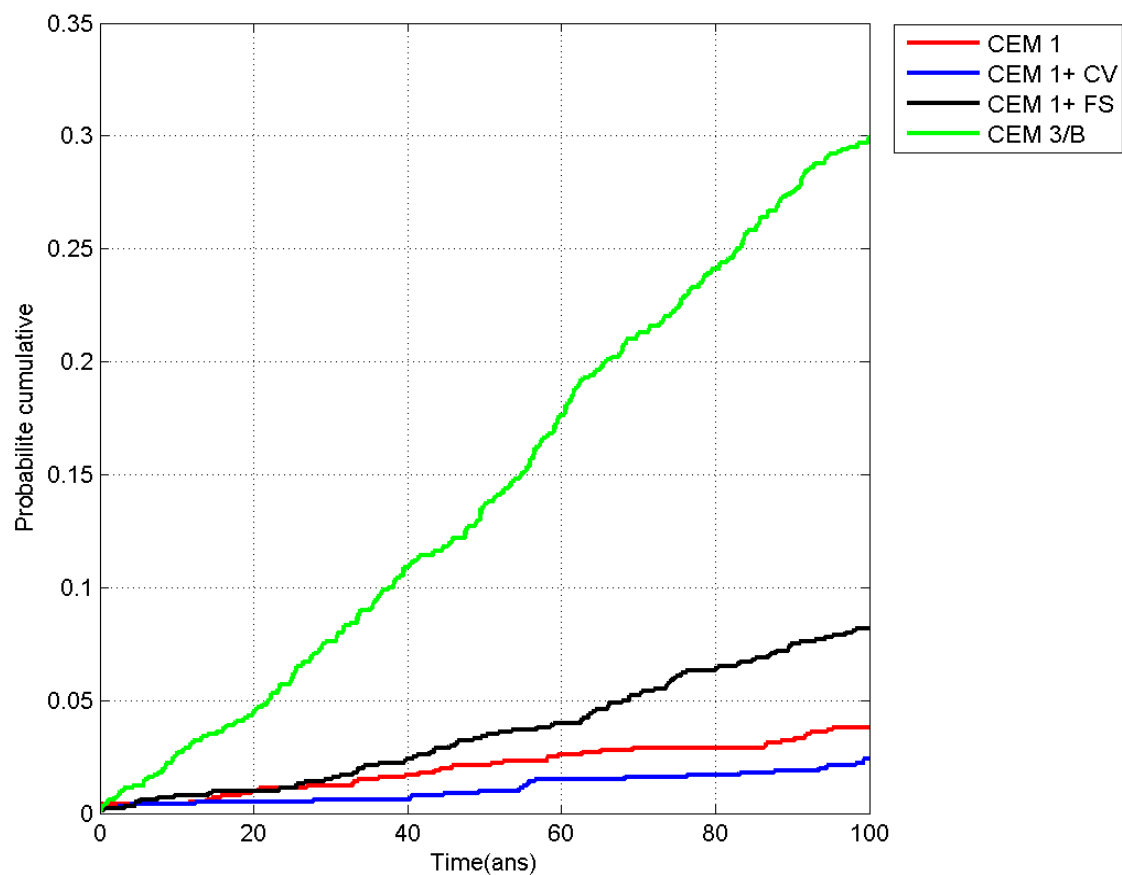


Figure 3.4. Probabilité d'initiation de la corrosion en fonction du temps (Type de ciment).

5. Effet des conditions météorologiques:

À partir de la figure (3.5), qui représente la fonction de Probabilité Cumulative de l'initiation de la corrosion (CDF) en fonction du temps pour six villes avec des emplacements géographiques et des climats différents : Adrar, Annaba, Tebessa, Bergen, Abou Dhabi et Accra

À partir de la figure, nous remarquons que les quatre villes (Adrar, Tebessa, Abu Dhabi et Accra) ont une courbe identique avec les mêmes valeurs. La probabilité cumulative de l'initiation de la corrosion augmente rapidement et de manière constante au fil du temps, indiquant que les conditions climatiques dans ces villes accélèrent significativement le processus de corrosion.

Quant au graphique représentant la ville d'Annaba, la probabilité cumulative de l'initiation de la corrosion à Annaba est significativement plus faible comparée aux quatre autres villes. Cela indique que les conditions climatiques à Annaba contribuent à la corrosion, mais de manière moins intense, ce qui témoigne d'un effet modéré des conditions climatiques sur la corrosion à Annaba

Enfin, la probabilité cumulative de l'initiation de la corrosion à Bergen est la plus basse. Cela indique que les conditions climatiques à Bergen ont un effet très limité sur la corrosion.

La raison pour laquelle la carbonatation a affecté Adrar, Tebessa, Abou Dhabi et Accra plus que les autres villes peut résulter d'un ensemble de facteurs mentionnés ci-dessus. Tout d'abord, les températures élevées dans ces villes contribuent de manière significative à accélérer le processus de carbonatation, car les températures élevées augmentent l'activité des réactions chimiques à l'intérieur du béton. Cela conduit à une augmentation du taux de diffusion du dioxyde de carbone dans le béton et donc à une augmentation du taux de carbonatation.

Deuxièmement, l'humidité relative élevée joue un rôle important dans ces villes. L'humidité aide à transformer le dioxyde de carbone en acide carbonique, qui attaque l'alcalinité du béton et la réduit, ce qui contribue à une corrosion plus rapide de l'armature en acier. Les villes comme Accra, qui bénéficient d'un climat humide, connaissent une carbonatation plus intense en raison de ces conditions.

Troisièmement, la concentration élevée de dioxyde de carbone dans l'air dans ces villes contribue à augmenter le taux de carbonatation. Les villes souffrant d'une forte pollution atmosphérique ou situées à proximité de zones industrielles sont exposées à des concentrations plus élevées de CO₂ dans l'air, ce qui augmente la quantité de CO₂ qui se diffuse dans le béton.

Enfin, la perméabilité du béton joue un rôle crucial dans le processus de carbonatation. Le béton à haute perméabilité permet un passage plus important des gaz, y compris du dioxyde de carbone. Si les matériaux de construction utilisés ou les techniques de construction dans ces villes entraînent une perméabilité élevée du béton, cela augmente l'impact de la carbonatation. Cela peut être le cas dans des

villes comme Adrar et Tébessa, où la qualité des matériaux de construction et les techniques d'exécution peuvent être moins efficaces.

En conclusion, une combinaison de températures élevées, d'humidité relative élevée, de concentration élevée de dioxyde de carbone dans l'air et de haute perméabilité du béton sont les facteurs qui rendent la carbonatation plus impactante à Adrar, Tébessa, Abou Dhabi et Accra par rapport aux autres villes.

Sur la base de cette analyse, on peut conclure que la corrosion dépend largement des conditions climatiques, où l'humidité et la température jouent un rôle crucial dans la détermination de la vitesse d'initiation de la corrosion dans les structures métalliques. Les villes avec des conditions climatiques sévères (chaudes ou humides) présentent une probabilité plus élevée de corrosion par rapport à celles avec des conditions climatiques modérées ou froides.

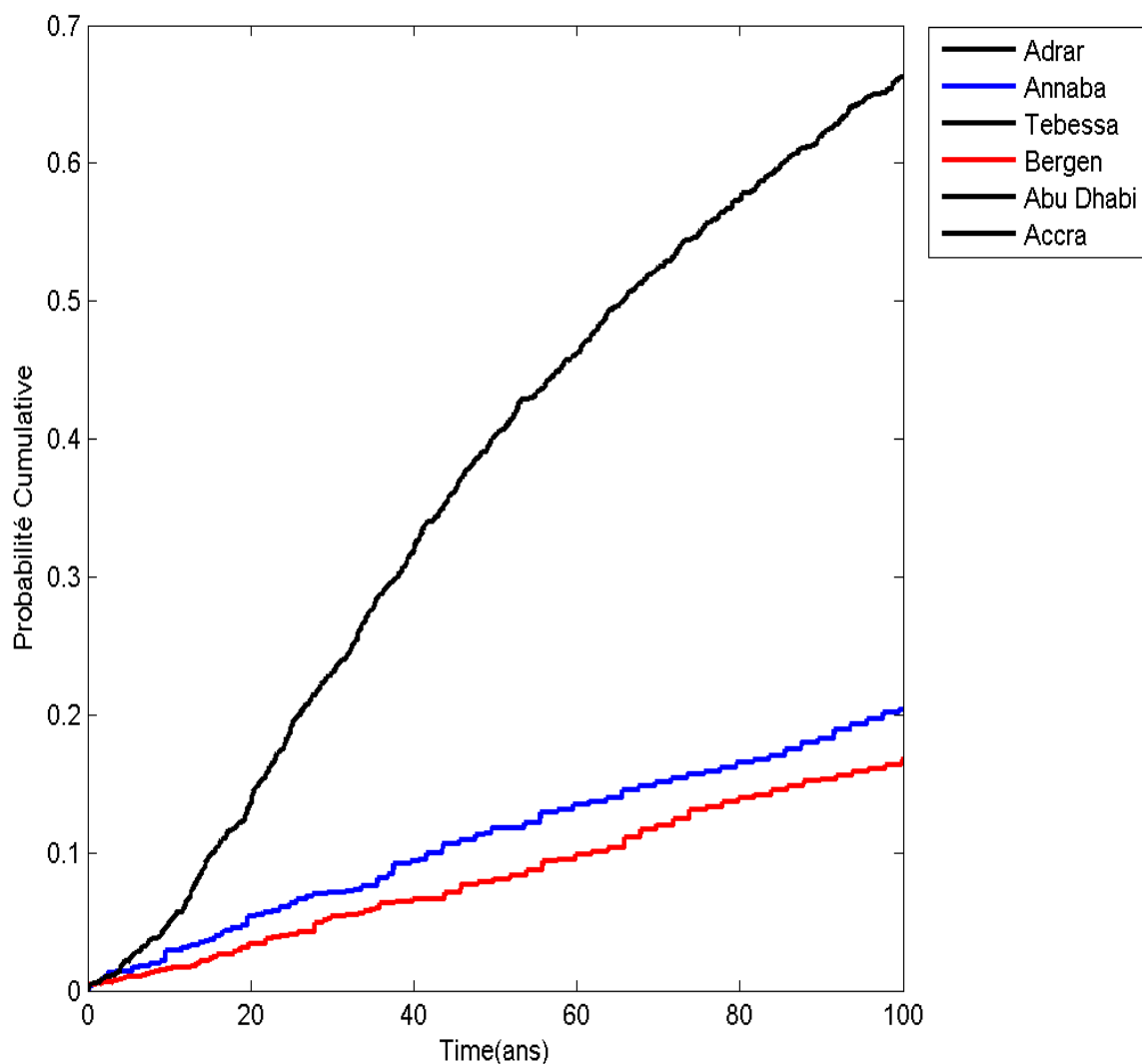


Figure 3.5. La probabilité cumulative de l'initiation de la corrosion (CDF)

6. Effet du changement climatique :

Les graphiques représentent la probabilité cumulative de l'initiation de la corrosion (CDF) dans six emplacements différents, avec et sans changements climatiques.

On observe que la courbe rouge tend à augmenter plus rapidement que la ligne bleue. Cela indique que l'érosion commence plus tôt en présence du changement climatique.

Au point de 50 ans, nous constatons que la probabilité cumulative de début d'érosion approche 0,4 (40%).

Alors que la courbe bleue montre une pente plus lente, ce qui indique que l'érosion commence plus tard par rapport à l'environnement affecté par le changement climatique.

Au point de 50 ans, nous constatons que la probabilité cumulative de début d'érosion approche 0,3 (30%).

Nous concluons que le changement climatique accélère le processus de début d'érosion en raison de l'augmentation des températures, des changements dans l'humidité, ou d'autres facteurs environnementaux liés au changement climatique.

Cette accélération du processus d'érosion a un impact significatif sur les infrastructures et les bâtiments qui dépendent de matériaux susceptibles de s'éroder.

En conclusion, nous constatons que dans les deux cas, il y a un développement léger, mais les changements climatiques jouent un rôle important dans l'augmentation des probabilités de corrosion dans la plupart des villes, bien que l'impact varie d'une ville à l'autre en fonction des conditions environnementales et locales. Ces résultats soulignent l'importance de prendre en compte les changements climatiques lors de l'élaboration des plans de maintenance et de gestion des infrastructures.

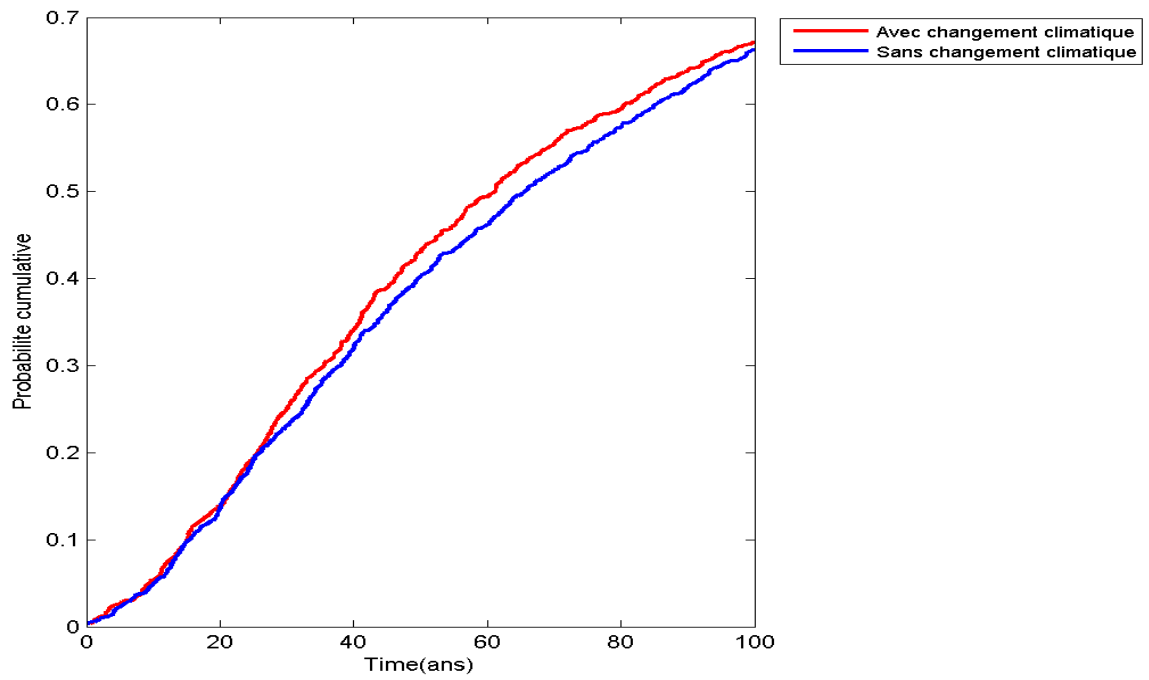


Figure 3.6. La probabilité cumulative de l'initiation de la corrosion (CDF)
(Adrar)

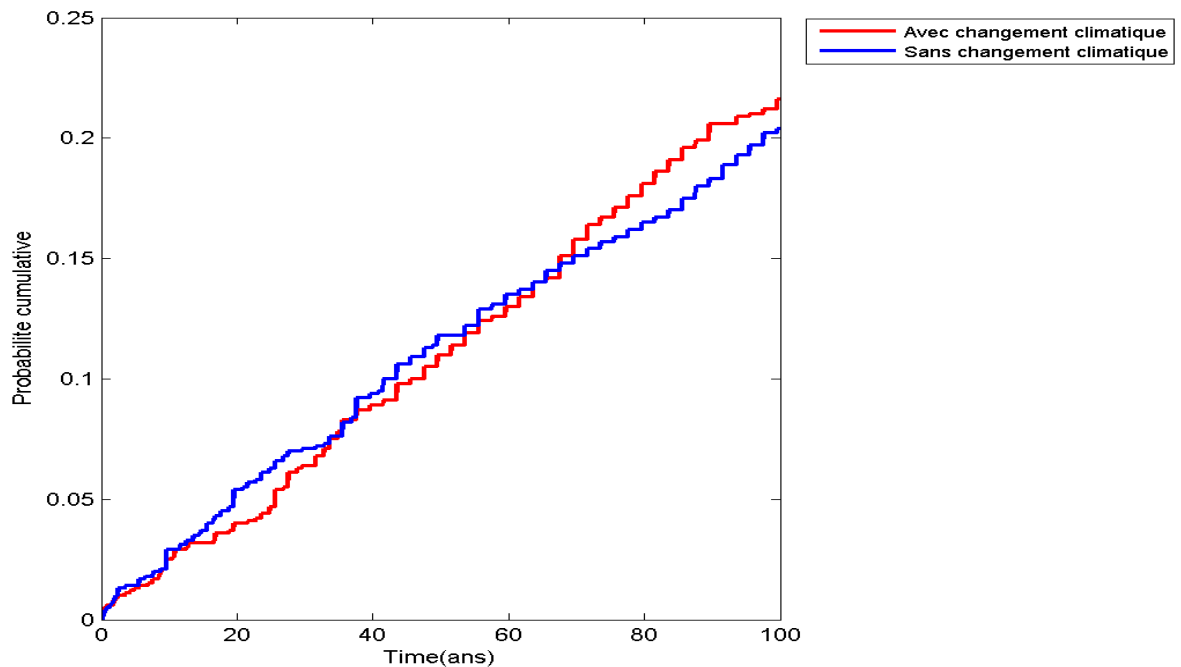


Figure 3.7. La probabilité cumulative de l'initiation de la corrosion (CDF)
(Annaba)

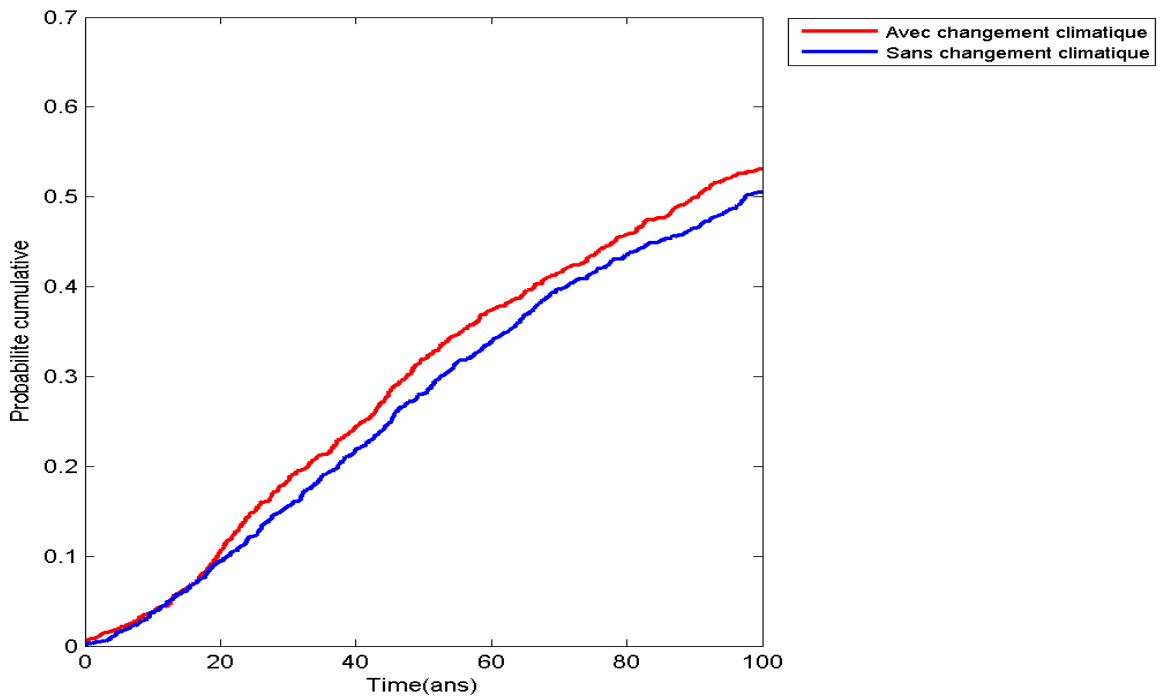


Figure 3.8. La probabilité cumulative de l'initiation de la corrosion (CDF)
(Tébessa)

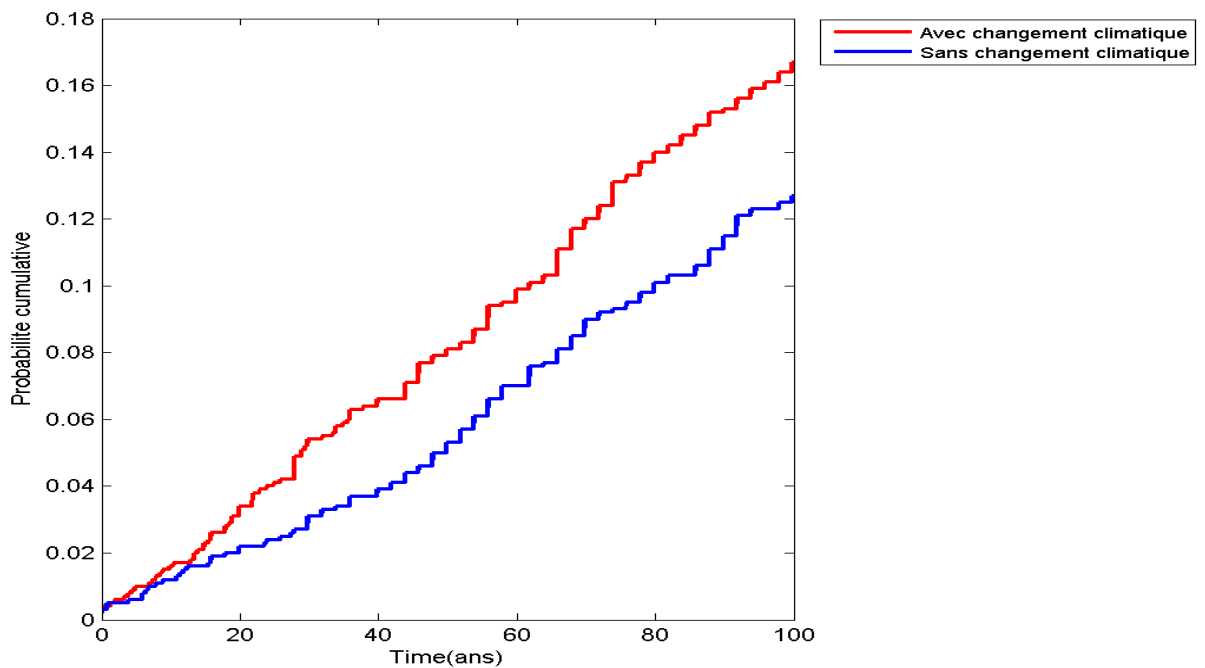


Figure 3.9. La probabilité cumulative de l'initiation de la corrosion (CDF)
(Bergen)

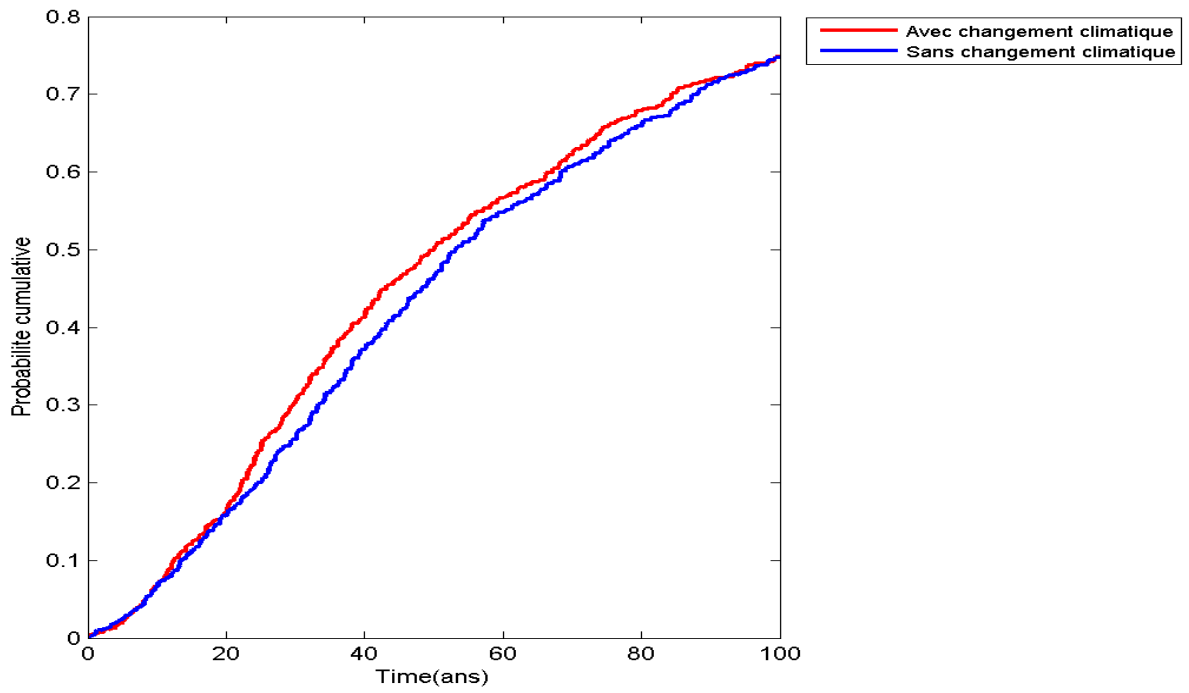


Figure 3.10. La probabilité cumulative de l'initiation de la corrosion (CDF)
(Abi Dhabi)

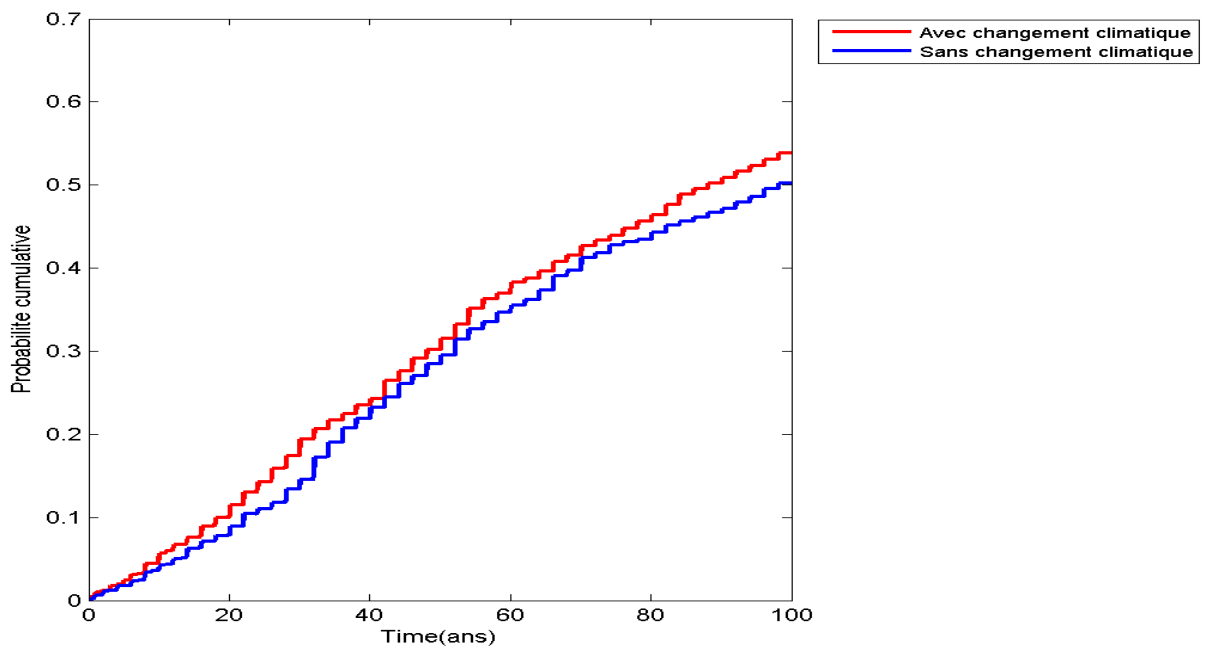


Figure 3.11. La probabilité cumulative de l'initiation de la corrosion (CDF)
(Accra)

6.1. L'effet du scénario et de la période de projection :

Étudier l'effet du scénario et de la projection. de prévision sur l'heure de début de la corrosion, Nous avons étudié trois périodes (court terme, moyen terme et long terme) sur six villes et le scénario RCP 8.5 Résultats de la simulation Comme le montre les figures [(3.10)(3.11)(3.12) (3.13) (3.14) (3.15)].

Et on remarque que le taux de corrosion augmente avec le temps dans toutes les villes

- Court Terme: le taux de corrosion le plus bas de toutes les villes, indiquant l'impact à near terme sur la corrosion le plus faible.
- Moyen Terme : le taux de corrosion augmente par rapport au near terme, ce qui indique que la corrosion augmente avec le temps.
- Long Terme : les taux de corrosion sont les plus élevés parmi toutes les villes, ce qui reflète un impact significatif à long terme sur l'augmentation de la corrosion.

L'augmentation de la corrosion au fil du temps est le résultat de l'interaction de plusieurs facteurs chimiques, environnementaux et mécaniques. Ces facteurs s'accumulent avec le temps, provoquant une dégradation progressive des matériaux et des structures. Il est donc nécessaire de prendre des mesures préventives et d'effectuer un entretien régulier pour assurer la durabilité et la sécurité à long terme des structures en béton.

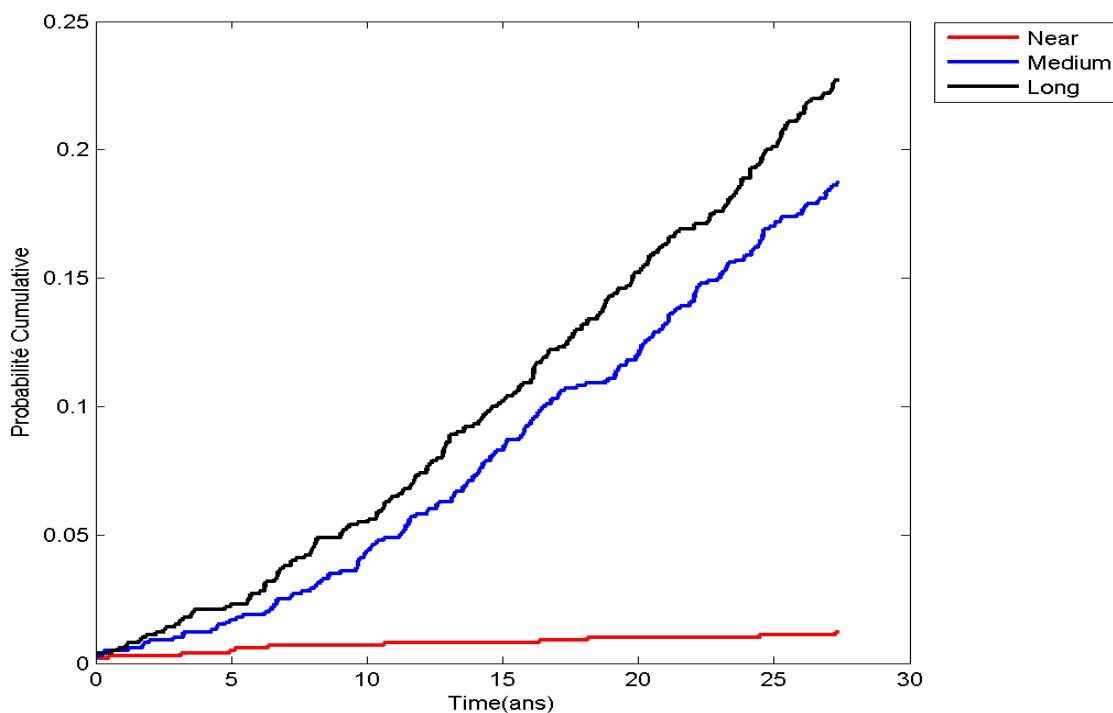


Figure 3.12. La probabilité cumulative de l'initiation de la corrosion (Adrara (Term))

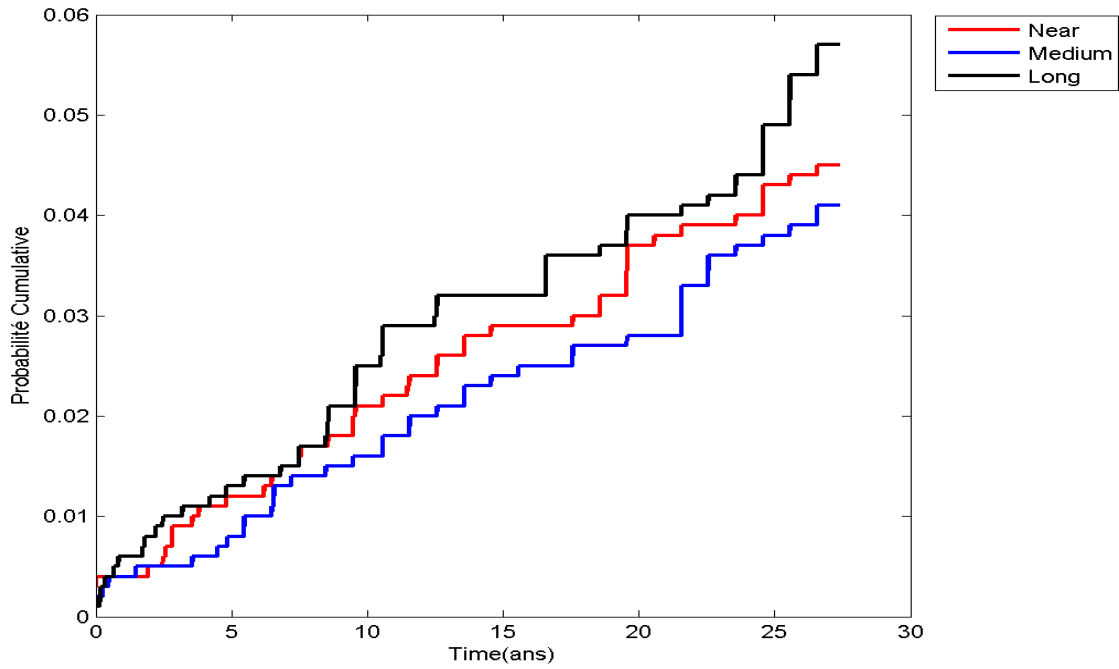


Figure 3.13. La probabilité cumulative de l'initiation de la corrosion (Annaba(Term))

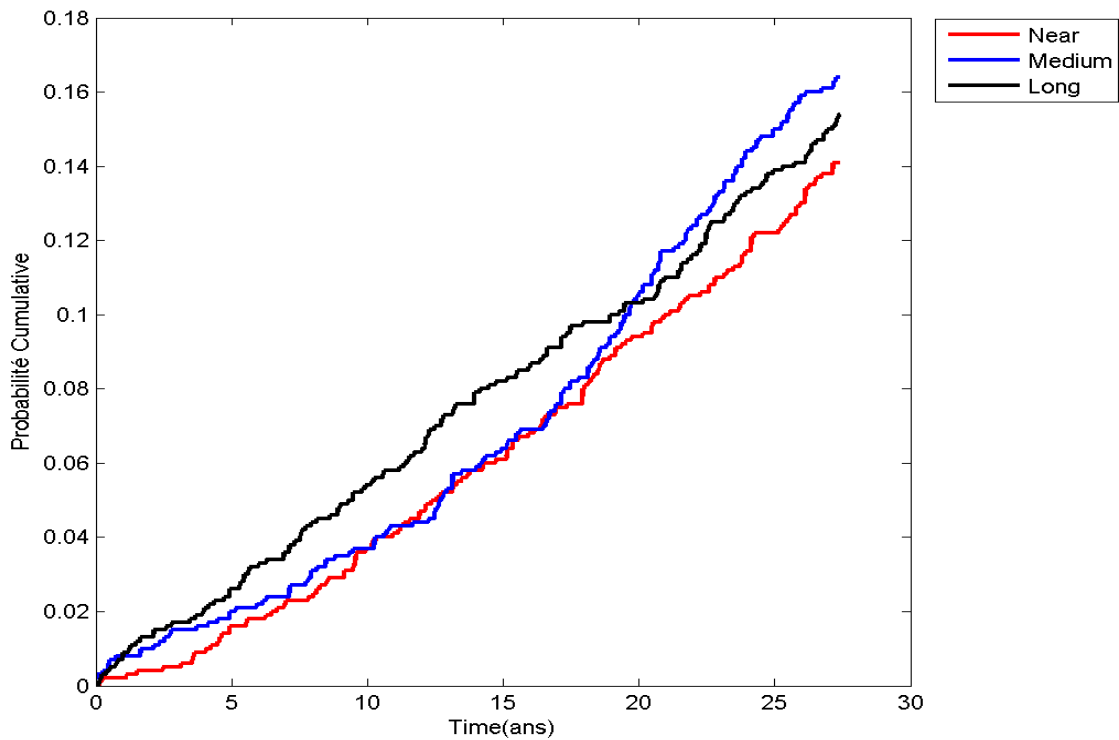


Figure 3.14. La probabilité cumulative de l'initiation de la corrosion (Tébessa(Term))

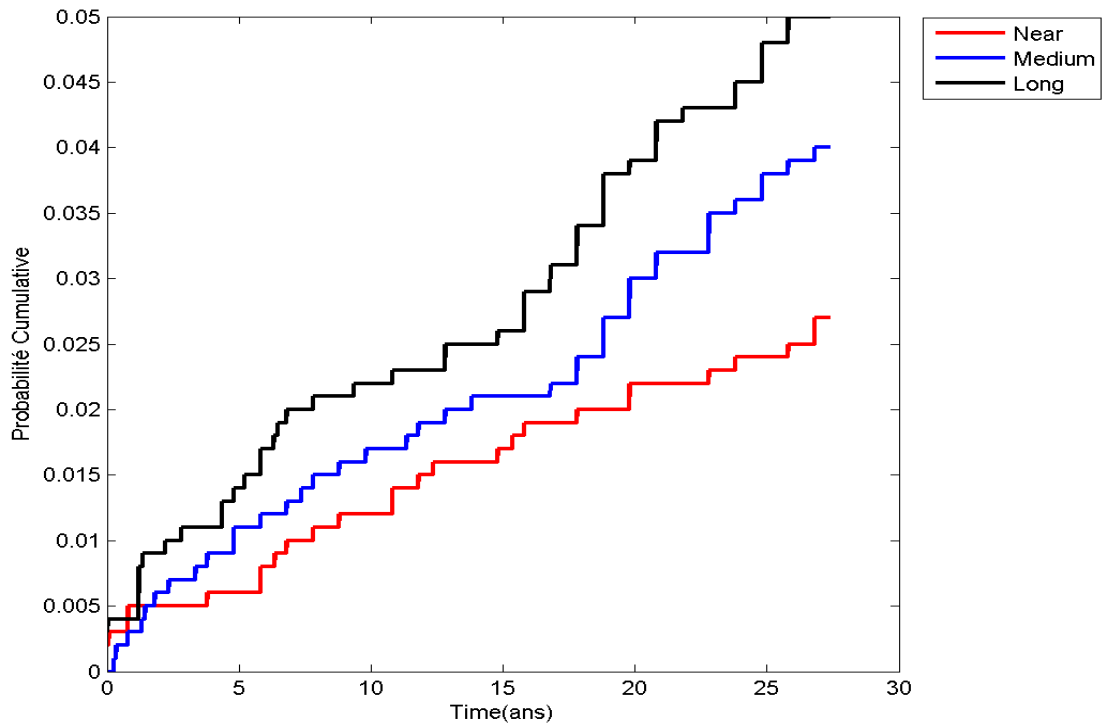


Figure 3.15. La probabilité cumulative de l'initiation de la corrosion (Bergen(Term))

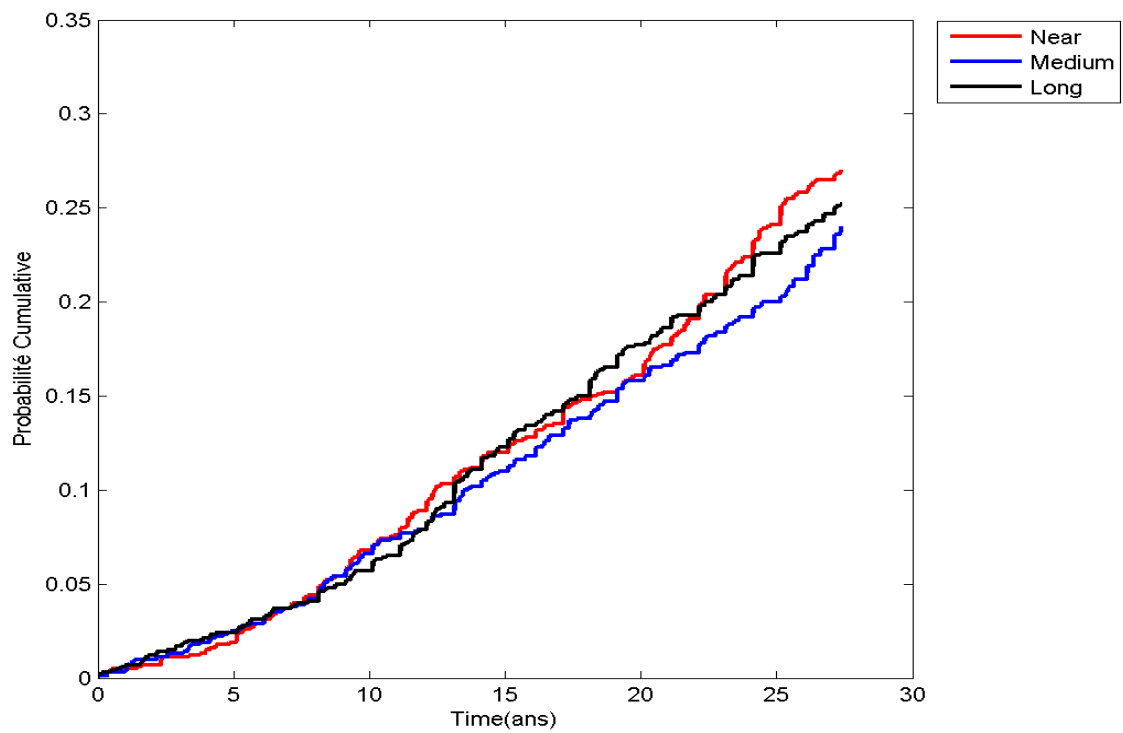


Figure 3.16. La probabilité cumulative de l'initiation de la corrosion (Abu Dhabi(Term))

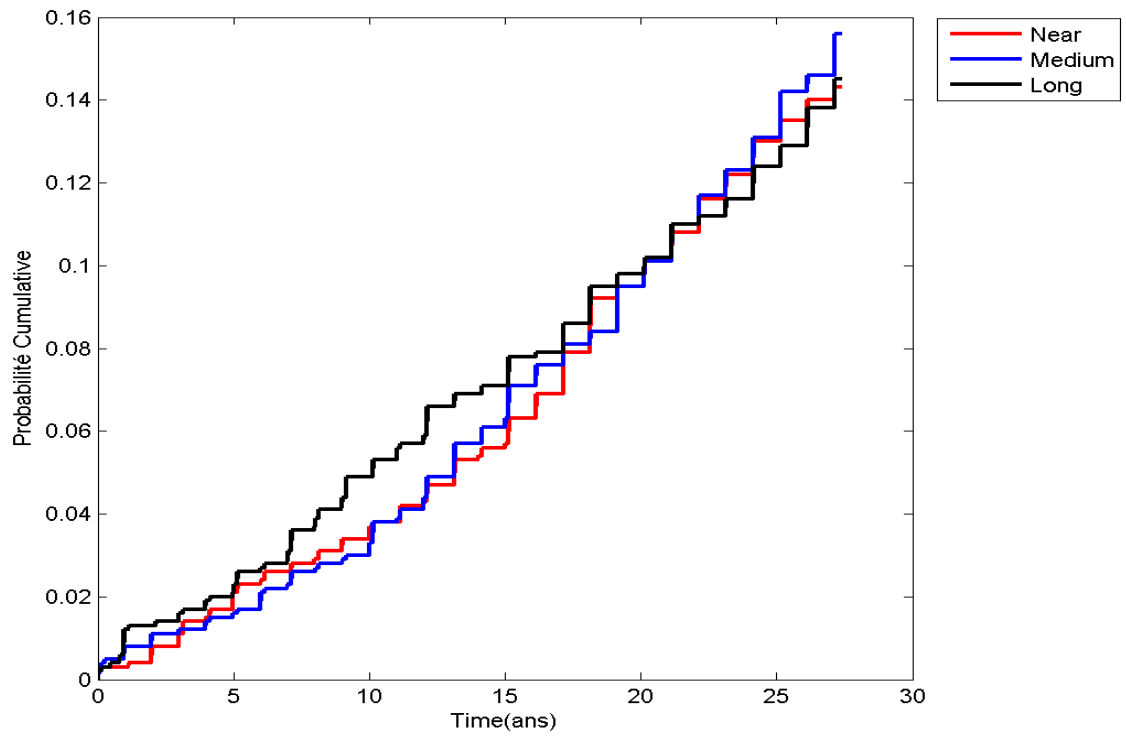


Figure 3.17. La probabilité cumulative de l'initiation de la corrosion (Accra(Term))

Conclusion

générale

Conclusion générale :

Dans ce travail, un modèle de prédiction de la durée de vie des structures en béton armé vis-à-vis de la corrosion induite par la carbonatation a été développé. Il prend en compte la variabilité aléatoire de tous les paramètres d'entrée et est basé sur la méthode proposée par le code fib-34. L'analyse probabiliste pour l'estimation du temps d'initiation de la corrosion a été performée par la méthode de simulation Monte Carlo. Le modèle développé a été implémenté dans un programme sur MATLAB.

Une étude paramétrique a été menée pour investiguer l'effet de certains facteurs sur la probabilité d'initiation de la corrosion. Les différents paramètres considérés sont la teneur en ciment et scénario et Effet des propriétés du matériau (E/C) et Effet du nombre d'échantillonnages et L'effet du scénario et de la période de projection et effet des conditions climatiques et changement climatiques, Les résultats obtenus ont permis de tirer les conclusions suivantes:

- Plus le rapport E/C est grand, plus la probabilité de défaillance augmente.
- Le ciment de type CEM 3 est défavorable vis-à-vis de la résistance à la carbonatation.
- Le climat très chaud et humide défavorise la carbonatation du béton, contrairement au climat très sec.
- Dans le cas d'obtention de faibles probabilités de défaillance, des temps de simulation plus courts entraînent des estimations moins précises des temps d'apparition de la corrosion. Pour obtenir une bonne précision, la simulation doit être étendue jusqu'à atteindre une probabilité de défaillance relativement élevée (L'augmentation du nombre de l'échantillon améliore considérablement la précision et la fiabilité des résultats)
- changements climatiques jouent un rôle important dans l'augmentation des probabilités de corrosion
- Plus le période de projection, plus la probabilité de défaillance n'augmente

À titre de suggestions pour des recherches futures, de nombreux paramètres d'entrée ont une plage de valeurs qui n'est pas entièrement précise ou réaliste, leur utilisation peut donc conduire à des résultats de modélisation très incertains. Par conséquent, des niveaux d'évaluation accrus comprenant des mesures supplémentaires sur place et/ou des analyses en laboratoire sont recommandés.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

- [1] (en) « Influence of porosity and water content on the diffusivity of CO₂ and O₂ through hydrated cement paste », *Cement and Concrete Research*, vol. 24, no 6, 1er janvier 1994, p. 1165–1176 (ISSN 0008-8846, DOI 10.1016/0008-8846(94)90040-X, lire en ligne [archive], consulté le 12 avril 2021)
- [2] « Papadakis V, Vayenas CG, Fardis MN. Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation ». *ACI Mater J* 1991;88(4):363–73.
- [3] (en) « Carbonation of cement paste: Understanding, challenges, and opportunities », *Construction and Building Materials*, vol. 117, 1er août 2016, p. 285–301 (ISSN 0950-0618, DOI 10.1016/j.conbuildmat.2016.04.138, lire en ligne [archive], consulté le 12 avril 2021)
- [4] (en) « Reinforced concrete structures: A review of corrosion mechanisms and advances in electrical methods for corrosion monitoring », *Construction and Building Materials*, vol. 269, 1er février 2021, p. 121240 (ISSN 0950-0618, DOI 10.1016/j.conbuildmat.2020.121240, lire en ligne [archive], consulté le 12 avril 2021)
- [5] (en) Vagelis G. Papadakis, Costas G. Vayenas et Michael N. Fardis, « Physical and Chemical Characteristics Affecting the Durability of Concrete », *Materials Journal*, vol. 88, no 2, 1er mars 1991, p. 186–196 (ISSN 0889-325X, DOI 10.14359/1993, lire en ligne [archive], consulté le 12 avril 2021)
- [6] (en) Andreas Leemann et Fabrizio Moro, « Carbonation of concrete: the role of CO₂ concentration, relative humidity and CO₂ buffer capacity », *Materials and Structures*, vol. 50, no 1, 10 août 2016, p. 30 (ISSN 1871-6873, DOI 10.1617/s11527-016-0917-2, lire en ligne [archive], consulté le 12 avril 2021)
- [7] (en) « Natural and accelerated CO₂ binding kinetics in cement paste at different relative humidities », *Cement and Concrete Research*, vol. 49, 1er juillet 2013, p. 21–28 (ISSN 0008-

8846, DOI 10.1016/j.cemconres.2013.03.009, lire en ligne [archive], consulté le 12 avril 2021)

[8] (en) « Impact of different climates on the resistance of concrete to natural carbonation », *Construction and Building Materials*, vol. 216, 20 août 2019, p. 450–467 (ISSN 0950-0618, DOI 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.263, lire en ligne [archive], consulté le 12 avril 2021)

[9] (en) « Carbonation of cement-based materials: Challenges and opportunities », *Construction and Building Materials*, vol. 120, 1er septembre 2016, p. 558–570 (ISSN 0950-0618, DOI 10.1016/j.conbuildmat.2016.05.080, lire en ligne [archive], consulté le 12 avril 2021)

[10] (en) Alan R. Duggan, Jamie Goggins, Eoghan Clifford et Bryan A. McCabe, « The Use of Carbonation Depth Techniques on Stabilized Peat », *Geotechnical Testing Journal*, vol. 40, no 6, 10 novembre 2017, p. 1083–1100 (ISSN 0149-6115, DOI 10.1520/GTJ20160223, lire en ligne [archive], consulté le 12 avril 2021)

[11] (en) Myoung-Youl Yu, Jae-Yong Lee et Chul-Woo Chung, « The Application of Various Indicators for the Estimation of Carbonation and pH of Cement Based Materials », *Journal of Testing and Evaluation*, vol. 38, no 5, 1er septembre 2010, p. 534–540 (ISSN 0090-3973, DOI 10.1520/JTE102382, lire en ligne [archive], consulté le 12 avril 2021)

[12] (en) « Alternative pH-indicators for determination of carbonation depth on cement-based concretes », *Cement and Concrete Composites*, vol. 109, 1er mai 2020, p. 103565 (ISSN 0958-9465, DOI 10.1016/j.cemconcomp.2020.103565, lire en ligne [archive], consulté le 12 avril 2021)

[13] 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

- [14] PARROTT L.J., A review of carbonation in reinforced concrete, Cement and Concrete Association, 1987, 42 pages
- [15] DAIMON M., AKIBA T., KONDOR R., Through pore size distribution and kinetics of the carbonation reaction of Portland cement mortars, Journal of the American Ceramic Society, 1971, vol. 54, n o 9, pp. 423-428
- [16] ALEXANDER M.G., MACKECHNIE J.R., YAM W., Carbonation of concrete bridge structures in three south african localities, Cement and Concrete Composites, 2007, vol. 29, n o 10, pp. 750-759.
- [17] THIERY M., VILLAIN G., DANGLA P., PLATRET G., Investigation of the carbonation front shape on cementitious materials: effects of the chemical kinetics, Cement and Concrete Research, 2007,
- [18] TSUKAYAMA R., Long Term Experiments on the Neutralization of Concrete Mixed with Fly Ash and the Corrosion of Reinforcement, Proc. of 7 th International Congressional on the Chemistry of Cement (ICCC), 1980, France (Paris), vol. 3, pp. 30-35.
- [19] PAILLERE A.-M., RAVERDY M., GRIMALDI G., Carbonation of concrete with low calcium fly ash and granulated blast furnace slag : influence of air entraining agents and freezing and thawing cycles, Proc. of 2 nd Intern. Conf. on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pouzzolans in Concrete, 1986, Espagne (Madrid), Ed. MALHOTRA V.M., pp. 541-562.
- [20] ROPER H., KIRBY G., BAWEJA D., Long term durability of blended cement concretes in structures, Proc. of 2 nd Intern. Conf. on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pouzzolans in Concrete, 1986, Espagne (Madrid), Ed. MALHOTRA V.M., pp. 463-482.
- [21] SKJOLSVOLD O., Carbonation depths of concrete with and without condensed silica fume, Proc. of 2 nd Intern. Conf. on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pouzzolans in Concrete, 1986, Espagne (Madrid), Ed. MALHOTRA V.M., pp. 1031- 1048.

[22] [PDF] Exemple d'application; un modèle de carbonatation in situ - HAL

Par M Thiery 2007 Cité dans le n° 13

[23] (PDF) Exemple de modèle de carbonatation in situ Portail de recherche

Ce modèle, pour ceux qui sont M Thiery et G villain et d'autres ...en octobre 2007

[24] Fib Bulletin 34. (2006). Model code for service life design. The International Federation for structural concrete, Task Group 5.6, Lausanne (Switzerland).

[25] [PDF] Incertitudes aléatoires et épistémiques, sont-elles vraiment...Par F Aguirre cité dans le n° 24

[26] [PDF] MODELISATION DE LA CARBONATATION DU BETON EN ...univ-tebessa

MODELISATION DE LA CARBONATATION DU. BETON EN PRESENCE

D'INCERTITUDES EN. UTILISANT LE CODE FIB-34. Présenté et soutenu publiquement, le 30 / 09 / 2020 ..

[27] MODELISATION DE LA CARBONATATION DU BETON EN ...univ-tebessa

MODELISATION DE LA CARBONATATION DU BETON EN PRESENCE

D'INCERTITUDES EN UTILISANT LE CODE FIB-34. Khediri, Ilyes. URI:

<http://localhost:8080/jspui/handle ...>

[29] 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.

[30] CSEP; Introduction to monte carlo methods. Computational Science Projects, 1995.

[31] [WeatherOnline, 2024], Weather Online, 2024. Algeria history – Graph

WeatherOnline,.

- <https://www.woeurope.eu/weather/maps/forecastmaps?LANG=eu&CONT=afri®ION=0>

[32] <https://interactive-atlas.ipcc.ch/regional-information>