



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 : Khediri Ilyes.
Barbari Kaouthar.

Sujet

MODELISATION DE LA CARBONATATION DU BETON EN PRESENCE D'INCERTITUDES EN UTILISANT LE CODE FIB-34.

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

Ms Labeled Abderrahim.

Maître Assistant A

Président.

Ms Soltani Mohamed Rédha.

Maître de conférences B

Rapporteur.

Ms Hamidane H'mida.

Maître Assistant A

Examineur.

Promotion : 2019/2020.

Remerciements

Tout d'abord, nous tenons à remercier monsieur Hamidane H'mida, notre encadreur de mémoire, qui nous a supervisé, dirigé, conseillé, et supporté tout le temps de la rédaction de cette mémoire.

Nous adressons nos remerciements également à l'ensemble du personnel du département de génie civil, d'université de Tébessa, et aux membres de jury.

Nous remercions aussi tous les collègues et les amis pour le soutien et l'ambiance inoubliables.

Enfin, un remerciement particulier à nos familles, pour le soutien quotidien et l'encouragement pendant tous les années d'études.

Table des matières

Introduction générale :	1
Chapitre 01 : Présentation des phénomènes pathologiques :	4
1.1. Introduction :	4
1.2. La corrosion des armatures dans le béton :	4
1.2.1. Mécanisme de la corrosion dans le béton :	5
1.2.2. Phases de la corrosion :	6
1.2.3. Impact de la corrosion des armatures :	7
1.2.3.1. <i>Diminution progressive de la section des armatures</i> :	7
1.2.3.2. <i>Apparition de contraintes locales de traction dans le béton d'enrobage</i> :	8
1.3. Carbonatation des bétons :	8
1.3.1. Aspects physico-chimiques :	9
1.3.1.1. <i>Les minéraux cimentaires</i> :	9
1.3.1.2. <i>Le dioxyde de carbone</i> :	9
1.3.1.3. <i>Carbonatation des hydrates du béton</i> :	10
1.3.2. Facteurs influençant la vitesse de carbonatation :	12
1.3.2.1. <i>Rapport E/C</i> :	12
1.3.2.2. <i>Conditions de cure</i> :	13
1.3.2.3. <i>Dosage en ciment</i> :	13
1.3.2.4. <i>Type de ciment</i> :	14
1.3.2.5. <i>Concentration en dioxyde de carbone</i> :	14
1.3.2.6. <i>Teneur en eau du béton</i> :	16
1.3.2.7. <i>Température</i> :	16
1.3.3. Conséquences de la carbonatation sur le béton :	17
1.3.3.1. <i>Diminution de la porosité</i> :	17
1.3.3.2. <i>Augmentation de la résistance mécanique du béton</i> :	18

1.3.3.3. <i>Augmentation de la teneur en eau</i> :	18
1.3.3.4. <i>Evolution des propriétés de transfert</i> :	19
1.3.3.5. <i>Chute du pH de la solution interstitielle</i> :	19
Chapitre 02 : Modélisation de la carbonatation.	21
2.1. Introduction :	21
2.2 Approche fiabiliste :	21
2.2.1. Incertitudes :	21
2.2.2. États limites :	22
2.2.3. Calcul de la probabilité de défaillance :	23
2.2.4. Méthode de simulation Monte Carlo :	23
2.3. Modélisation de la carbonatation :	24
2.3.1. État limite de dépassivation :	24
2.3.2. Equation d'état limite de dépassivation :	25
2.3.3. Quantification des paramètres aléatoires (selon FIB-34) :	26
2.3.3.1. <i>Enrobage</i> :	26
2.3.3.2. <i>Durée de vie de conception t_{sl}</i> :	26
2.3.3.3. <i>Fonction environnementale k_e</i> :	26
2.3.3.4. <i>Paramètre de transfert d'exécution k_c</i> :	27
2.3.3.5. <i>Résistance à la carbonatation inverse $R_{ACCO} - 1$</i> :	27
2.3.3.6. <i>Concentration de CO_2</i> :	28
2.3.3.7. <i>Fonction de climat $w(t)$</i> :	28
2.4. Méthode d'estimation du temps d'initiation de la corrosion :	29
Chapitre 03 : Applications numériques et résultats.	32
3.1. Introduction :	32
3.2. Temps d'initiation de la corrosion :	33
3.3. Etude paramétrique :	35
3.3.1. Effet des paramètres du matériau :	35

3.3.1.1. <i>Effet du Rapport E/C</i> :	35
3.3.1.2. <i>Effet du type de liant</i> :	37
3.3.1.3. <i>Effet de la période de cure</i> :	39
3.3.2. Effet des conditions climatiques :	40
Conclusion :	44
Références bibliographiques :	46

Liste des symboles :

Symbole/ Abréviation	Définition
A :	Surface du métal corrodé (cm ²).
<i>a</i> :	Enrobage (mm).
<i>b_c</i> :	Paramètre (Distribution normale, avec une moyenne et un écart).
<i>b_w</i> :	Exposant de régression
CO ₂ :	Dioxyde de carbone.
Cl ⁻ :	Ion de chlorure.
CO ₃ ⁻² :	Ion carbonate
Ca(OH) ₂ :	Hydroxyde de calcium (portlandite).
Ca ²⁺ :	Ion de calcium.
CaCO ₃ :	Carbonate de calcium.
C3S :	Alite (Silicate tricalcite).
C2S :	Bélite (Silicate dicalcite).
C-S-H :	Silicates de calcium hydratés.
C-H :	Portlandite.
CEM I :	Ciment qui contient 0% de substitution.
CEM II :	Ciment composé (jusqu'au 35% de substitution).
CEM III :	Ciment composé (jusqu'au 60% de substitution).
<i>C_s</i> :	Concentration de CO ₂ [kg/m ³].
<i>C_s</i> :	Concentration de CO ₂ .
<i>C_{s,atm}</i> :	Concentration de CO ₂ de l'atmosphère [kg/m ³].
<i>C_{s,emi}</i> :	Concentration de CO ₂ additionnelle dû aux sources des émissions [kg/m ³].
CDF :	Fonction de distribution cumulative.
<i>d</i> :	Largeur de l'élément structurel (pour l'enrobage (<i>a</i>)).
<i>e⁻</i> :	Electron.
E/C :	Quantité d'eau sur quantité de ciment.

ELS :	Etat limite de service.
ELU :	Etat limite ultime.
f_e :	Paramètre constant (5,0).
F :	Constante de FARADAY (96500 C/mol).
$Fe(OH)_2$:	Hydroxyde de fer 2.
Fe :	Fer.
Fe^{2+} :	Ion ferreux
FIB-34 :	Fédération International de Béton, Bulletin 34.
$G(\{X\})$:	Fonction d'état limite.
g_e :	Paramètre constant (2,5).
H_2O :	Monoxyde de dihydrogène.
H^+ :	Ion hydronium.
H_2 :	Dihydrogène
H_2CO_3 :	Acide carbonique faible.
HCO_3^- :	Hydrogénocarbonate
H_0 :	Constante de Henry
h_{Nd} :	Hauteur des précipitations.
I_{corr} :	Courant de corrosion (A).
k_e :	Fonction environnementale.
k_c :	Paramètre de transfert d'exécution.
k_t :	Paramètre de régression.
M :	Masse atomique du métal (g/mol).
m :	Valeur nominale d'enrobage (a).
Nf :	Nombre des points situés dans le domaine de défaillance.
Ns :	Nombre total de points.
n :	Nombre d'électrons de valence.
O_2 :	Dioxygène.
OH^- :	Ions hydroxydes.
p_{sr} :	Distribution moyenne de la direction de vent pendant la chute de pluie.
PDF :	Fonction de densité de probabilité.
P_0 :	Probabilité de défaillance cible.
Pf :	Probabilité de défaillance.

P_{fc} :	Probabilité de défaillance cible.
P_{dep} :	Probabilité de dépassivation.
PH :	Potentiel hydrogène.
RH_{real} :	Humidité relative de couche carbonatée (%).
RH_{ref} :	Humidité relative référentielle (%).
$R_{ACC_0}^{-1}$:	Résistance effective de béton à la carbonatation (inverse) [(mm ² /an) / (kg/m ³)].
SiO ₂ :	Dioxyde de silicium.
s :	Écart d'enrobage (a).
t :	Temps (an).
t_{sl} :	Durée de vie de conception (an).
t_c :	Paramètre constant qui égale à la période de cure [Jours].
t_0 :	Temps de référence (an) .
T	Température référentiel.
Tow	Temps de trempage dans l'eau.
T_{ini} :	Temps d'initiation de la corrosion (an).
V_{corr} :	Vitesse de corrosion (cm/an).
W (t) :	Fonction de climat.
$x_c(t_{sl})$:	Profondeur de carbonatation à l'instant t_{sl} (mm).
Δm :	Perte de masse (g/an).
ε_t :	Terme d'erreur [(mm ² /an) / (kg/m ³)].
ρ :	Densité (cm ³).

Liste des tableaux :

Titre	Page
Tableau (1.1) : Relation entre la baisse de porosité et le rapport E/C dans un béton carbonaté [Ngala et al., 1997].	18
Tableau (2.1) : valeurs de résistance inverse à la carbonatation [fib-34, 2006].	28
Tableau (3.1) : Valeurs des variables aléatoires.	32
Tableau (3.2) : Moyenne et écart type des fonctions PDF du temps d'initiation de la corrosion.	36
Tableau (3.3) : Moyenne et écart type des fonctions PDF du temps d'initiation de la corrosion.	38
Tableau (3.4) : Moyenne et écart type des fonctions PDF du temps d'initiation de la corrosion.	39
Tableau (3.5) : Valeurs maximale et minimale de l'humidité relative.	42
Tableau (3.6) : Moyenne et écart type des fonctions PDF du temps d'initiation de la corrosion.	43

Liste des figures :

Titre	Page
Figure (1.1) : Représentation schématique de la réaction de corrosion des aciers [Thierry, 2005]	6
Figure (1.2) : Phases de la corrosion [Silva, 2004]	7
Figure (1.3) : Volume relatif du fer et des produits de corrosion [LIU et al, 1996]	8
Figure (1.4) : Changement de la concentration du CO ₂ atmosphérique à l'échelle globale [Yoon et al. , 2007].	10
Figure (1.5) : Mécanisme de carbonatation de la portlandite [Thiery, 2005]	12
Figure (1.6): Influence du rapport E/C sur la carbonatation des pâtes de ciment [BAROGHEL et al., 1994].	13
Figure (1.7) : Relation entre épaisseur carbonatée et dosage en ciment, extrait de [HYVERT, 2009].	14
Figure (1.8) : Evolution dans le temps de l'épaisseur carbonatée mesurée pour le mortier à base de CEM I et pour les différentes teneurs de CO ₂ [HYVERT, 2009]	15
Figure (1.9) : Evolution dans le temps de l'épaisseur carbonatée mesurée pour le mortier à base de CEM II et pour les différentes teneurs de CO ₂ [HYVERT, 2009].	15
Figure (1.10) : Evolution dans le temps de l'épaisseur carbonatée mesurée pour le mortier à base de CEM III et pour les différentes teneurs de CO ₂ [HYVERT, 2009].	16
Figure (1.11) : Profondeur de carbonatation pour des températures différentes d'après les essais de [JOHN et al., 1990].	17
Figure (2.1) : Organigramme de la procédure de calcul du temps d'initiation de la corrosion T_{ini} .	30
Figure (3.1) : Variation annuelle sinusoïdale d'humidité relative.	33
Figure (3.2) : Probabilité d'initiation de la corrosion (CDF).	34
Figure (3.3) : Fonctions de densité de probabilités du temps d'initiation de la corrosion (PDF).	35
Figure (3.4) : Effet du rapport E/C sur la probabilité d'initiation de la corrosion.	36
Figure (3.5) : Effet du type de liant sur la probabilité d'initiation de la corrosion.	38
Figure (3.6) : Effet de la période de cure sur la probabilité d'initiation de la corrosion.	40

Figure (3.7) : Valeurs d'humidité relative de la ville d'Alger.	41
Figure (3.8) : Valeurs d'humidité relative de la ville de Tébessa.	41
Figure (3.9) : Valeurs d'humidité relative de wilaya d'Adrar.	42
Figure (3.10) : Effet de l'humidité relative sur la probabilité d'initiation de la corrosion.	43

Résumé

La corrosion des armatures est l'un des mécanismes de dégradation des structures en béton armé les plus fréquents et coûteux du point de vue maintenance et réparation. En zones urbaines ou à forte activité industrielle, la corrosion est principalement causée par la carbonatation du béton. Pour une construction durable et une meilleure gestion du cycle de vie, des modèles de prédiction de la performance des structures sont devenus nécessaires. Ces modèles doivent prendre en considération les phénomènes impliqués, les facteurs influents, les conditions environnementales et leurs incertitudes correspondantes. Ce travail présente un modèle de prédiction de la période d'initiation de la corrosion par carbonatation. La modélisation est réalisée selon les recommandations du code *fib-34*. 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 la concentration en dioxyde de carbone dans le milieu environnant. Les paramètres présentant des incertitudes sont traités comme des variables aléatoires. Le calcul fiabiliste est effectué au moyen de la méthode de simulation de Monte-Carlo. Une étude paramétrique est menée visant à étudier l'effet de certaines propriétés du matériau telles que le rapport E/C, le type de liant et la période de cure humide. Finalement l'influence des conditions climatiques sur le temps d'initiation de la corrosion est investiguée à travers des simulations en utilisant des données réelles d'humidité relative de trois villes en Algérie ayant des conditions climatiques différentes. Le modèle est sensible à tous les paramètres influents.

Mots-clés : corrosion, carbonatation, béton armé, modélisation, durabilité, fiabilité.

Abstract

Corrosion of reinforcement is one of the most frequent degradation mechanisms of reinforced concrete structures that is costly from a maintenance and repair point of view. In urban areas or areas with high industrial activity, corrosion is mainly caused by the carbonation of concrete. For a sustainable construction and a better life cycle management, models for predicting the performance of structures have become necessary. These models must take into consideration the phenomena involved, the influencing factors, the environmental conditions and their corresponding uncertainties. This work presents a model for predicting the initiation period of carbonation corrosion. The modeling is carried out according to the recommendations of the *fib*-34 service life design code. This model takes into account the effect of material properties (W/C ratio, type of cement, curing period), climatic conditions (relative humidity) and the concentration of carbon dioxide in the surrounding environment. Parameters with uncertainties are treated as random variables. The reliability analysis is performed using Monte-Carlo simulation method. A parametric study is carried out to study the effect of some material properties such as the W/C ratio, the type of binder and the wet curing period. Finally, the influence of climatic conditions on the corrosion initiation time is investigated through simulations using real relative humidity data from three cities in Algeria with different climatic conditions. The model proved sensitive to all influencing parameters.

Keywords: corrosion, carbonation, reinforced concrete, modeling, durability, reliability.

ملخص

يعتبر تآكل التعزيزات من أكثر آليات تدهور الهياكل الخرسانية المسلحة شيوعاً وتكلفة من وجهة نظر الصيانة والإصلاح. في المناطق الحضرية أو المناطق ذات النشاط الصناعي العالي، يحدث التآكل بشكل أساسي بسبب كربنة الخرسانة. من أجل البناء المستدام وإدارة دورة الحياة بشكل أفضل، أصبحت نماذج التنبؤ بأداء الهياكل ضرورية. يجب أن تأخذ هذه النماذج بعين الاعتبار الظواهر المعنية والعوامل المؤثرة والظروف البيئية وما يقابلها من شكوك وعدم يقين. يقدم هذا العمل نموذجاً للتنبؤ بفترة بدء التآكل بسبب الكربنة. يتم تنفيذ النمذجة وفقاً لتوصيات كود (فيب-34). يأخذ هذا النموذج بعين الاعتبار تأثير خصائص المواد (نسبة ماء/اسمنت، نوع الإسمنت، فترة المعالجة)، الظروف المناخية (الرطوبة النسبية) وتركيز ثاني أكسيد الكربون في البيئة المحيطة. يتم التعامل مع العوامل غير المؤكدة كمتغيرات عشوائية. يتم حساب الموثوقية باستخدام طريقة محاكاة مونت كارلو. تم إجراء دراسة عاملية تهدف إلى دراسة تأثير بعض خواص المادة مثل نسبة ماء/اسمنت ونوع المادة الرابطة وفترة المعالجة الرطبة. أخيراً، تم التحقق من تأثير الظروف المناخية على وقت بدء التآكل من خلال المحاكاة باستخدام بيانات الرطوبة النسبية الحقيقية لثلاث مدن في الجزائر ذات ظروف مناخية مختلفة. النموذج حساس لجميع العوامل المؤثرة.

الكلمات المفتاحية: التآكل، الكربنة، الخرسانة المسلحة، النمذجة، المتانة، الموثوقية.

Introduction générale :

Le béton armé est le matériau de construction le plus utilisé dans le monde. Les ouvrages en BA sont créés et construits pour durer. Pourtant, il existe des situations dans lesquelles ils se dégradent plus vite que prévu à cause de l'agressivité de l'environnement auquel ils sont exposés. Parmi les mécanismes de détérioration du BA liés à l'environnement, la corrosion des armatures occupe une place centrale. Le processus de corrosion est un phénomène électrochimique qui se produit au sein du béton, à cause de carbonatation du béton d'enrobage et/ou de la pénétration des ions chlorures. Pour améliorer la durabilité des ouvrages en béton armé, il est donc nécessaire d'allonger la période d'initiation de la corrosion en utilisant des bétons peu perméables et un enrobage suffisant.

Lorsque le gaz carbonique atmosphérique pénètre dans le béton (surtout par diffusion), il réagit avec les composés hydratés de la pâte cimentaire et en particulier avec la Portlandite et les silicates de calcium hydratés pour donner le carbonate de calcium. Cette réaction s'accompagne d'une augmentation de volume et d'une diminution du pH de la solution interstitielle. L'augmentation du volume provoque une diminution de la porosité du béton, une augmentation de sa résistance mécanique et d'autres modifications de la structure interne du béton. La chute du pH de la solution interstitielle à des valeurs inférieures à 9 favorise la corrosion des armatures. Ces désordres dus à la corrosion peuvent avoir des conséquences économiques importantes comme les coûts de maintenance et de réparation qui sont en général très élevés. Les caractéristiques climatiques, en particulier l'humidité relative et la température, contribuent à l'évolution de la corrosion en favorisant la pénétration des agents agressifs au sein du béton ou en favorisant les réactions chimiques. Pour assurer la durabilité des structures et mieux gérer leur durée de vie, la prédiction des dégradations possibles sur la base de modèles de performance est devenue une nécessité. Cette prédiction doit être effectuée au même stade que la conception structurelle, et doit tenir compte de tous les facteurs influents, en particulier les propriétés du matériau et les conditions climatiques.

Dans la modélisation des mécanismes de dégradation, les paramètres relatifs au matériau et à l'environnement présentent des incertitudes qui doivent être prises en compte pour assurer une bonne représentativité de la réalité. Pour cette raison, l'évaluation de la sécurité structurale vis-à-vis de la corrosion doit être effectuée sur des bases probabilistes, en utilisant les principes et les méthodes de la théorie de la fiabilité.

Dans ce travail, un modèle pour la prédiction du temps d'initiation de la corrosion des armatures induite par la carbonatation du béton a été développé en utilisant l'approche proposée par le code *fib-34*. Un intérêt spécial a été consacré à étudier l'effet de certaines propriétés du matériau (rapport E/C, type de liant, période de cure) et l'influence des conditions climatiques (humidité relative) sur le temps d'initiation de la corrosion.

Le mémoire est divisé en 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. Dans le deuxième chapitre, le modèle de carbonatation utilisé dans cette étude et proposé par le code *fib-34* est présenté. Ensuite, l'approche probabiliste pour la prise en compte des incertitudes et la représentation aléatoire des paramètres incertains sont décrites. Dans le troisième chapitre, la performance numérique du modèle développé est illustrée à travers quelques exemples. Une investigation de l'influence de certaines propriétés du matériau et des conditions climatiques a été menée. Enfin, la conclusion regroupe l'ensemble de leçons tirées des résultats de ce travail

CHAPITRE

01

Chapitre 1 : Présentation des phénomènes pathologiques.

1.1. Introduction :

Les structures en béton armé souffrent de plusieurs agressions d'origines différentes (interne ou externe) qui conduisent à des dégradations plus ou moins sévères. La corrosion des armatures due à la carbonatation du béton est généralement la problématique la plus rencontrée, du fait de l'exposition de la plupart des constructions à l'atmosphère, pouvant entraîner une pathologie allant de simples traces de rouille sur le parement jusqu'à une perte significative de capacité portante du fait de la diminution des sections d'armature et/ou de la perte d'adhérence, fissuration et éclatement du béton d'enrobage. Ces désordres dus à la corrosion peuvent avoir des conséquences économiques importantes : les coûts de maintenance et de réparation sont en général très élevés. La corrosion des armatures est principalement due à la carbonatation du béton, car l'influence des chlorures ne concernant généralement que les ouvrages en milieu marin ou exposés aux sels de déverglaçage.

Le dioxyde de carbone (CO₂) est présent dans l'atmosphère sous forme gazeuse. Il pénètre dans le réseau poreux du béton, ensuite dans la solution interstitielle du béton et réagit avec certains hydrates pour former l'un des trois isomorphes du carbonates de calcium : l'aragonite, la vaterite et la calcite qui est la forme la plus stable dans les conditions standard de température et de pression. En consommant la réserve de basicité constituée par la portlandite, le processus de carbonatation a notamment pour effet d'abaisser le pH aux environs de 8,5.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à la compréhension de ce mécanisme de carbonatation, et la prise en compte des différents facteurs qui le conditionnent, notamment les facteurs environnementaux, et ces conséquences sur les armatures et le béton.

1.2. La corrosion des armatures dans le béton :

La corrosion des aciers dans le béton est l'une des principales pathologies des ouvrages de génie civil, elle est la cause essentielle de dégradation des ponts routiers en béton armé partout dans le monde.

La corrosion selon la norme ISO 8044 (1999) « Corrosion des métaux et alliages – Termes principaux et définitions » est une « interaction physico-chimique entre un métal et son milieu environnant entraînant des modifications dans les propriétés du métal et souvent une dégradation fonctionnelle du métal lui-même, de son environnement ou de son système

technique constitué par les deux facteurs. » Cette interaction est généralement de nature électrochimique.

La corrosion se définit donc comme une interaction entre :

- Le matériau, conducteur d'électricité par déplacement d'électrons « libres ». Le matériau se caractérise par sa nature, son état de surface, sa mise œuvre.
- Le milieu environnant, généralement électrolytique, conducteur ionique d'électricité. Le milieu environnant est caractérisé par son pH, sa température, la présence de dioxygène, d'agents agressifs, d'inhibiteurs de corrosion
- Parfois un autre facteur peut intervenir dans le processus de corrosion : contraintes mécaniques (corrosion sous contraintes), microorganismes, écoulements, courants vagabonds...

Lorsqu'on veut étudier la durabilité des différents types d'ouvrages (structures en béton armé), la tenue des armatures passives ou précontraintes vis-à-vis de la corrosion est le principal facteur à prendre en compte. En générale, l'origine de la corrosion des armatures est double :

- la carbonatation du béton d'enrobage par le dioxyde de carbone environnant ;
- où l'attaque de la couche passive par les ions chlorure.

1.2.1. Mécanisme de la corrosion dans le béton :

La corrosion des armatures de béton est une réaction électrochimique qui nécessite la présence simultanée de quatre milieux :

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

D'un point de vue général, la corrosion de fer implique deux réactions électrochimiques simultanées (deux demi-réactions d'oxydo-réduction) :

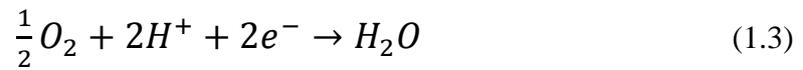
- Une réaction d'oxydation de fer se produit en zone anodique :



- La réaction cathodique résulte de la consommation des électrons produits par la réaction d'oxydation, en présence d'oxygène, la réaction cathodique correspond à la réduction du dioxygène :



Et



- En l'absence d'oxygène, le couple redox entrant est H_2O (ou H^+)/ H_2 :



Et



- Enfin, les ions hydroxydes OH^- diffusent vers l'anode, et ils réagissent avec les ions Fe^{2+} pour former des hydroxydes ferreux :

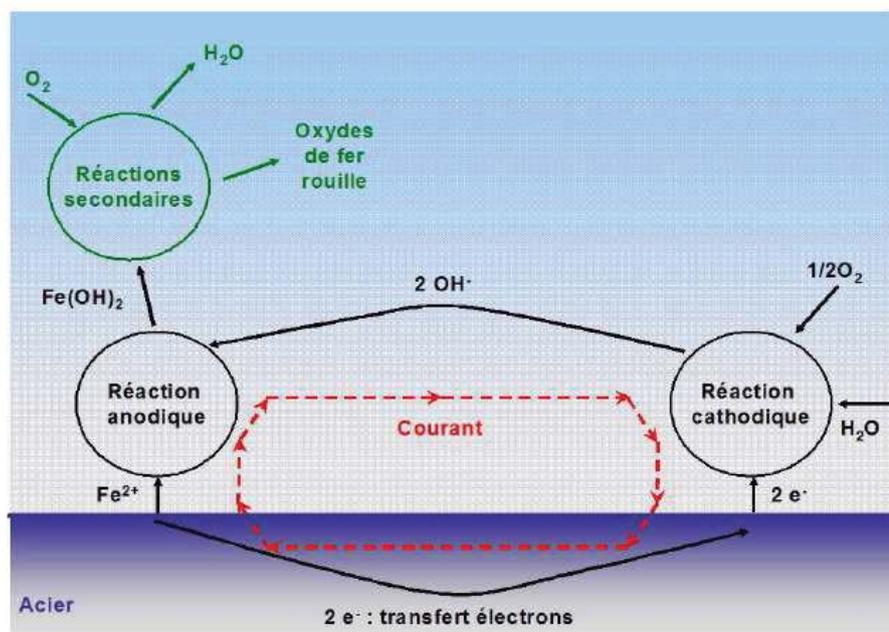
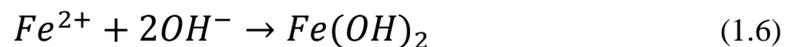


Figure 1.1 : Représentation schématique de la réaction de corrosion des aciers

[Thierry, 2005].

1.2.2. Phases de la corrosion :

La durée de vie d'un ouvrage en béton armé vis-à-vis de la corrosion des armatures est généralement décrite à travers 2 phases :

- **Phase d'initiation** : (ou d'incubation) : c'est la phase durant laquelle les agents agressifs, tels que le dioxyde de carbone (CO₂) ou les chlorures (Cl⁻), présents dans le milieu environnant, pénètrent dans le béton.
- **Phase de propagation** : cette phase commence lorsque ces agents agressifs se trouvent à des fortes concentrations au niveau des armatures. Cette phase correspond à l'augmentation de volume de la rouille, qui peut ensuite faire éclater le béton d'enrobage.

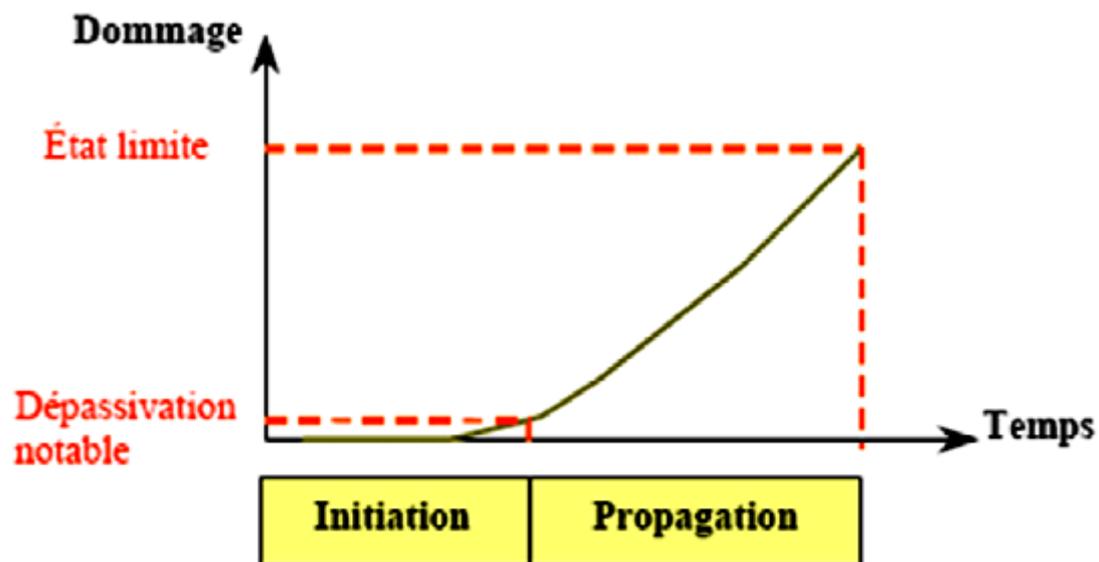


Figure 1.2 : Phases de la corrosion [Silva, 2004].

1.2.3. Impact de la corrosion des armatures :

1.2.3.1. Diminution progressive de la section des armatures :

La corrosion conduit à une diminution progressive de la section des armatures. La perte de poids d'acier par unité de surface au cours du temps est pilotée par la vitesse de corrosion de l'acier comme montrée dans l'équation (1.7) :

$$\Delta m_{1an} = \frac{V_{corr}}{A \times \rho} \quad (1.7)$$

Où Δm_{1an} est la perte de masse (g/an) ; V_{corr} est la vitesse de corrosion (cm/an) ; A est la surface du métal corrodé (cm²) et ρ est la densité de fer (cm³).

La loi de FARADAY permet de relier le courant de corrosion à cette perte de masse :

$$\Delta m = \frac{M \times t \times I_{corr}}{n \times F} \quad (1.8)$$

Où M est la masse atomique du métal (g/mol) ; I_{corr} est le courant de corrosion (A) ; t est le temps de corrosion (s) ; n est le nombre d'électrons de valence et F est la constante de FARADAY (96500 C/mol).

1.2.3.2. Apparition de contraintes locales de traction dans le béton d'enrobage :

La formation des produits de corrosion engendre des contraintes locales de traction dans le béton d'enrobage. En effet, tous les produits de corrosion ont un volume plus important que le métal à l'état initial comme montré dans la Figure (1.3) :

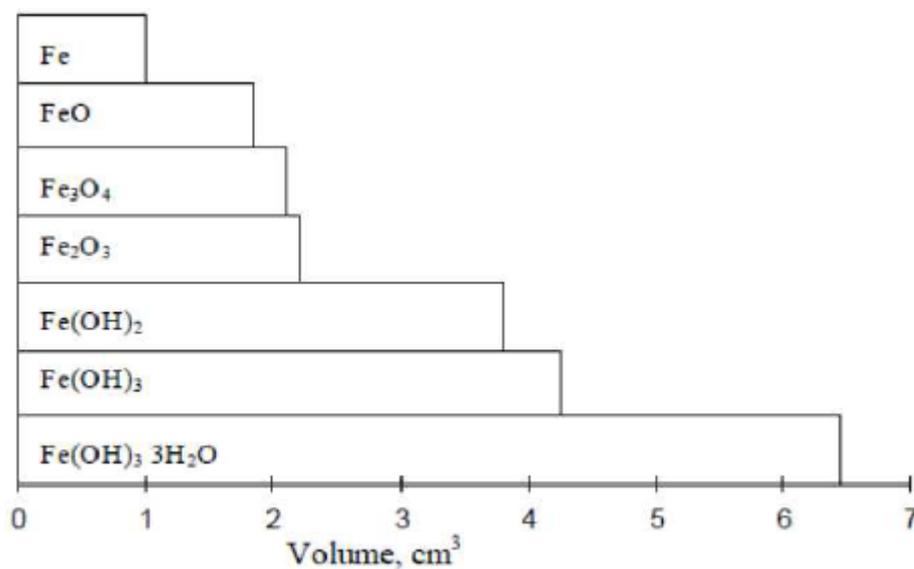


Figure 1.3 : Volume relatif du fer et des produits de corrosion [LIU et al, 1996].

Ces produits de corrosion peuvent engendrer la fissuration du béton d'enrobage et provoquer l'écaillage du béton de surface. En outre, la fissuration provoquée est un trajet de diffusion pour les agents agressifs de l'environnement de la structure considérée. En plus, ces produits de corrosion pouvant entraîner une perte d'adhérence des armatures à cause de la couche friable et stratifiée qui se forment à l'interface de l'acier et du béton.

1.3. Carbonatation des bétons :

La carbonatation est définie comme un phénomène de vieillissement naturel qui concerne tous les types de bétons. Elle correspond à la réaction des produits hydratés du ciment avec le dioxyde de carbone atmosphérique dissous dans la solution interstitielle. Ces réactions

s'accompagnent d'une diminution du pH du béton de 13 à 9 environ provoquant la dépassivation de la couche protectrice des armatures et la diminution de la porosité du béton.

1.3.1. Aspects physico-chimiques :

Il est nécessaire de présenter tout d'abord les constituants de la pâte de ciment hydratée (les minéraux cimentaires) qui réagissent avec le CO_2 lors de la carbonatation, et aussi les propriétés du CO_2 et ses réactions dans la phase aqueuse.

1.3.1.1. Les minéraux cimentaires :

Le ciment Portland hydraté contient des phases minérales qui résultent de l'hydratation du Clinker en présence de gypse. Selon [Huet, 2005], les principaux minéraux du clinker sont :

- les silicates de calcium : $3CaO.SiO_2$, $2CaO.SiO_2$;
- l'aluminate tricalcique : $3CaO.Al_2O_3$;
- le ferro-aluminate tétracalcique : $4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$.

Les produits d'hydratation des silicates de calcium sont des silicates de calcium hydratés ($xCaO.SiO_2.nH_2O$, notés *C-S-H*) et la portlandite ($CaO.H_2O$, notée *C-H*). Les produits de l'hydratation des phases aluminées sont, en présence de gypse, l'ettringite ($3CaO.Al_2O_3.3CaOSO_3.32H_2O$, noté AFt) et le monosulfoaluminate de calcium ($3CaO.Al_2O_3.CaOSO_3.11H_2O$, noté AFm). La consommation des sulfates lors de la formation des AFm et AFt implique que les alcalins soient présents sous forme de soude ou de potasse dans la solution interstitielle [Jinane, 2010].

1.3.1.2. Le dioxyde de carbone :

La concentration de dioxyde de carbone gazeux dans l'air est un facteur essentiel dans l'étude du mécanisme de carbonatation. Selon [Stumm et al., 1981], l'air contient en moyenne 0,033 % de gaz carbonique (CO_2). Depuis la révolution industrielle, la concentration du CO_2 dans l'air est en augmentation permanente estimée à 0,05 % par an à l'échelle globale [Jinane, 2010].

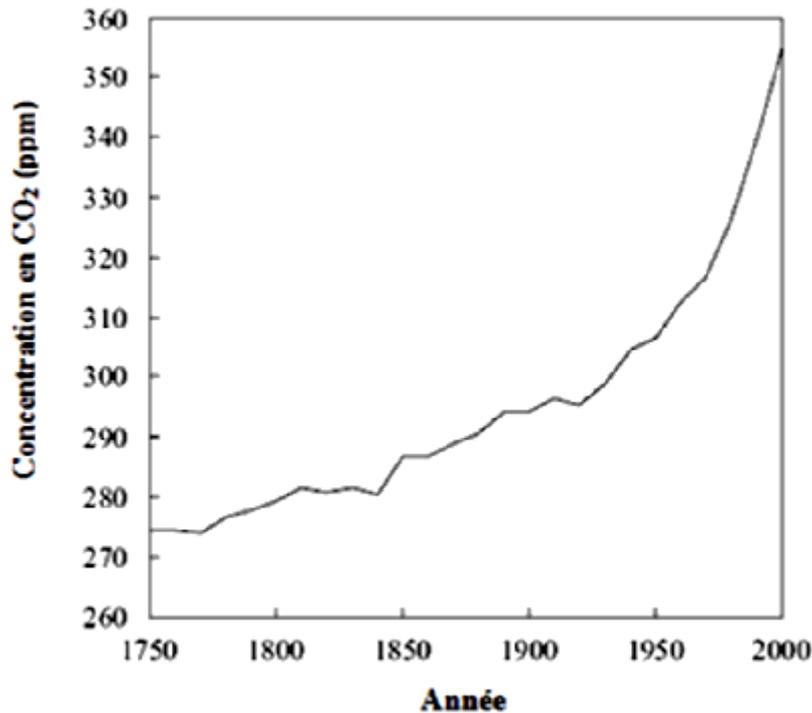


Figure 1.4 : Changement de la concentration du CO_2 atmosphérique à l'échelle globale
[Yoon et al. , 2007].

La mesure de la concentration en CO_2 de façon précise dans l'espace et dans le temps et pour différentes conditions environnementales (température par exemple) n'existe pas. Ainsi, l'utilisation des valeurs approximatives de la concentration en CO_2 dans l'atmosphère est justifiée. Des études par [Thiery, 2005] approuvent les valeurs suivantes :

- 0,03 % dans un milieu rural ;
- 0,1 % celle dans un local mal ventilé ;
- 0,3 % - 1 % dans les grandes villes et les parois des tunnels.

Une classification similaire a été proposée par [Saetta et al., 2004] :

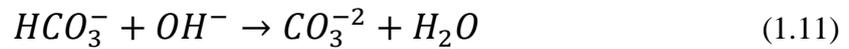
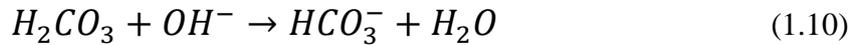
- 0,015 % dans un milieu rural ;
- 0,036 % dans les centres villes ;
- 0,045 % dans les zones industrielles.

1.3.1.3. Carbonatation des hydrates du béton :

En réalité, à l'exception du gypse, tous les composants du ciment, anhydres ou hydratés, peuvent réagir et se carbonater. Les mécanismes principaux sont ceux de la carbonatation de la portlandite $Ca(OH)_2$ et des silicates de calcium hydratés C-S-H. La dissolution du CO_2 dans la solution interstitielle s'écrit selon la réaction d'équilibre suivante :



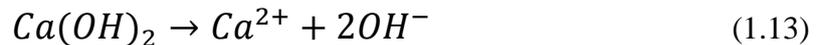
Dans l'eau, l'acide carbonique (H_2CO_3) se comporte comme un diacide faible dont la dissociation a lieu en deux phases désignées par les réactions :



Les ions OH^- dans les deux dernières équations proviennent de l'autoprotolyse de l'eau qui s'écrit :



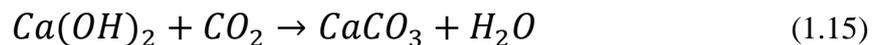
La dissolution du CO_2 entraîne une baisse de la concentration en OH^- dans la solution interstitielle, ce qui réduit le pH. Pour rétablir la basicité du milieu, la portlandite se dissout suivant la réaction :



Ainsi les ions calcium (Ca^{2+}) réagissent avec les ions carbonates (CO_3^{2-}) pour former du carbonate de calcium :



Les différentes étapes du mécanisme de carbonatation de la portlandite peuvent être représentées par l'équation simplifiée :



Les $C-S-H$ proviennent, comme la portlandite, de l'hydratation des deux phases silicatées du clinker : C_3S et C_2S . La carbonatation des $C-S-H$ donne naissance à des carbonates de calcium, à un matériau siliceux hydraté (qualifié de gel de silice) et éventuellement à de l'eau libre. Cette réaction est considérée sous une forme topochemique (sans transport de matière ou phénomènes de dissolution-précipitation) entre phases hétérogènes :



Bien que les $C-S-H$ présentent la phase hydratée la plus importante dans la pâte de ciment et confèrent au béton l'essentiel de sa résistance mécanique, ils ont un pouvoir tampon sur le pH de la solution interstitielle plus faible que la portlandite. Par conséquent, leur prise en compte dans le mécanisme de carbonatation n'est pas indispensable.

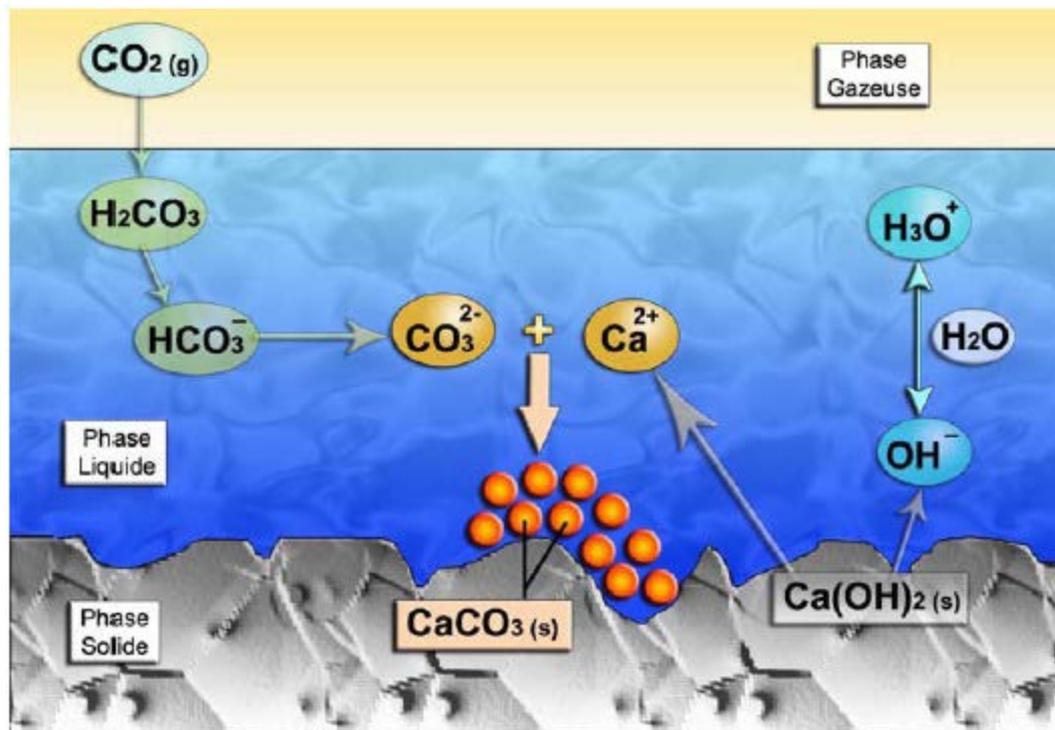


Figure 1.5 : Mécanisme de carbonatation de la portlandite [Thiery, 2005].

1.3.2. Facteurs influençant la vitesse de carbonatation :

1.3.2.1. Rapport E/C :

Le rapport E/C a une importance réelle dans l'interconnexion du réseau poreux et donc sur la diffusivité des espèces gazeuses. Il joue un grand rôle dans la détermination de la perméabilité, la teneur en eau et le degré d'hydratation du matériau. Avec un rapport E/C faible, les grains de ciment dans un volume unitaire sont nombreux et rapprochés, les espaces entre les grains de ciment sont moins grands, et sa diminution permet non seulement de diminuer le volume total des pores capillaires, mais également de réduire leur diamètre. Donc, de plus le rapport E/C est faible, la porosité capillaire est en fait constituée d'un réseau de pores plus fin et plus discontinu. Dans ces conditions, il n'est pas facile pour le CO_2 de pénétrer dans la pâte de ciment. D'autre part, quand les grains de ciment se rapprochent, la surface d'échange entre le CO_2 en solution et la matrice cimentaire diminue [Viet, 2015]. De ce fait, le rapport E/C a une grande influence sur la vitesse de carbonatation, comme illustré sur la Figure (1.6) :

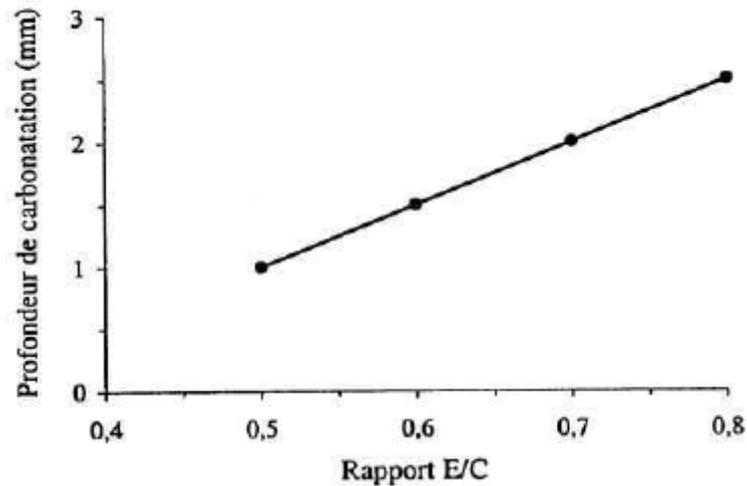


Figure 1.6 : Influence du rapport E/C sur la carbonatation des pâtes de ciment [BAROGHEL et al., 1994].

1.3.2.2. Conditions de cure :

Une cure inadaptée résulte en une hydratation insuffisante de la couche superficielle de béton par manque d'eau, ce qui augmente la porosité et, par conséquent, la sensibilité à la carbonatation. Selon [Ollivier et al., 2008], la réduction du temps de cure peut avoir des conséquences nocives à long terme, alors qu'une cure humide prolongée limite la profondeur de carbonatation.

1.3.2.3. Dosage en ciment :

La migration du CO₂ gazeux à travers le système poreux du béton dépend du dosage en ciment. L'épaisseur carbonatée réduit lorsque la teneur en ciment du béton augmente. Cette propriété s'explique par la densité du matériau qui s'améliore lorsque le dosage en ciment du matériau est élevé. Cependant, selon [LOO, 1994], ce paramètre est moins influent que le rapport E/C.

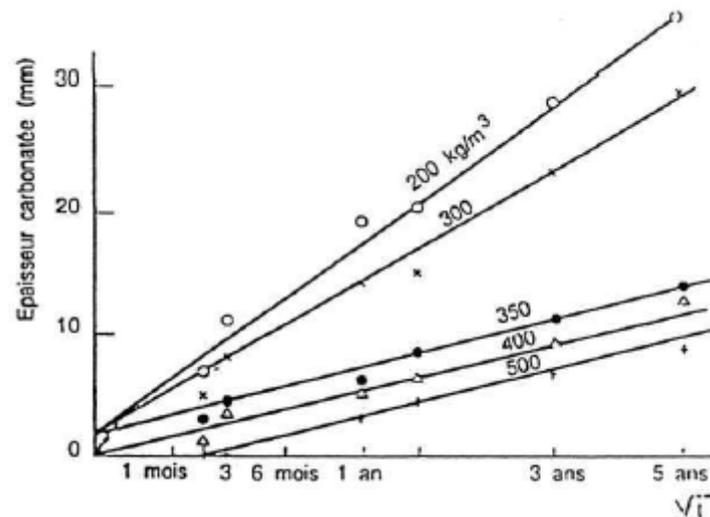


Figure 1.7 : Relation entre épaisseur carbonatée et dosage en ciment, extrait de [HYVERT, 2009].

1.3.2.4. Type de ciment :

Les ciments contenant des constituants secondaires (laitiers, cendres volantes, pouzzolane) ont naturellement une teneur inférieure en composés susceptibles de se carbonater à celle du ciment Portland. Ainsi, la profondeur de carbonatation des ciments avec ajouts est supérieure à celle du ciment Portland [Venuat et al., 1968 ; Ho et al., 1987]. Toutefois, les additions permettent de réduire la porosité et ainsi l'effet négatif peut être annulé [Houst, 1992] ;

1.3.2.5. Concentration en dioxyde de carbone :

Il existe évidemment une relation précise entre la concentration en CO₂ de l'atmosphère et la vitesse de carbonatation. Les épaisseurs carbonatées sont plus élevées dans les ambiances plus riches en CO₂, comme le montrent les Figures (1.8), (1.9) et (1.10) obtenues sur des mortiers normalisés [Viet, 2015]. On remarque que la profondeur carbonatée pour une pression partielle de 10% et de l'ordre de 3 fois (pour un mortier à base de CEM I) à 4 fois (pour un mortier à base de CEM II ou CEM III) plus élevée que pour une pression partielle atmosphérique (0,03%).

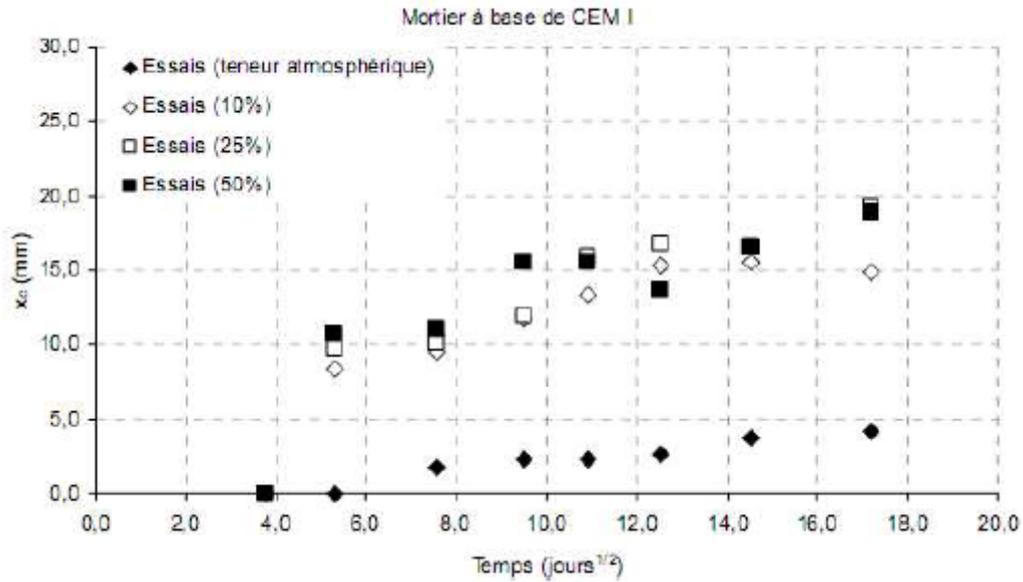


Figure 1.8 : Evolution dans le temps de l'épaisseur carbonatée mesurée pour le mortier à base de CEM I et pour les différents teneurs de CO2 [HYVERT, 2009].

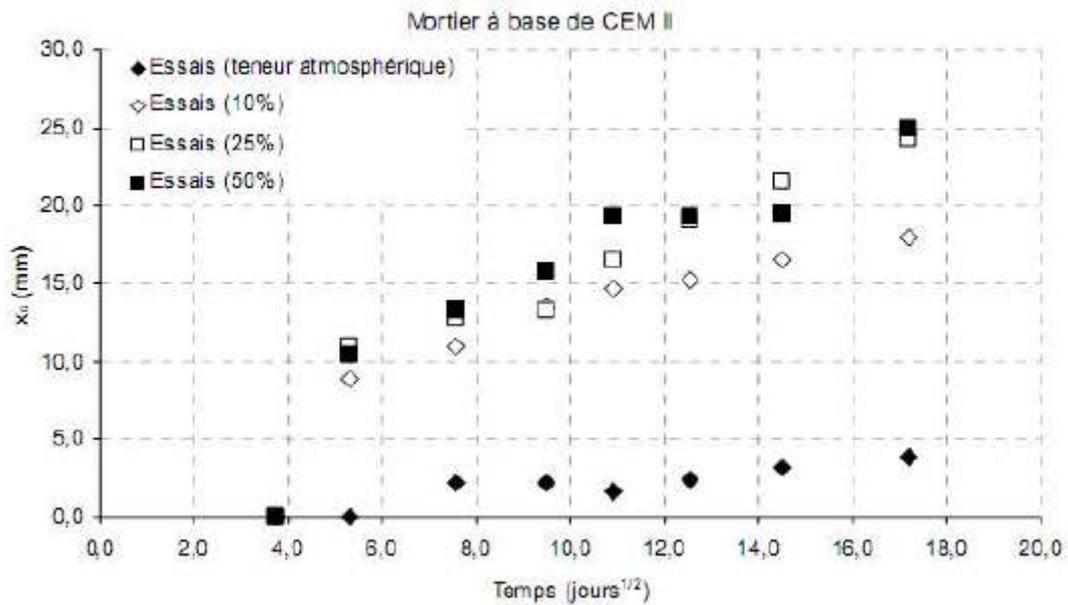


Figure 1.9 : Evolution dans le temps de l'épaisseur carbonatée mesurée pour le mortier à base de CEM II et pour les différents teneurs de CO2 [HYVERT, 2009].

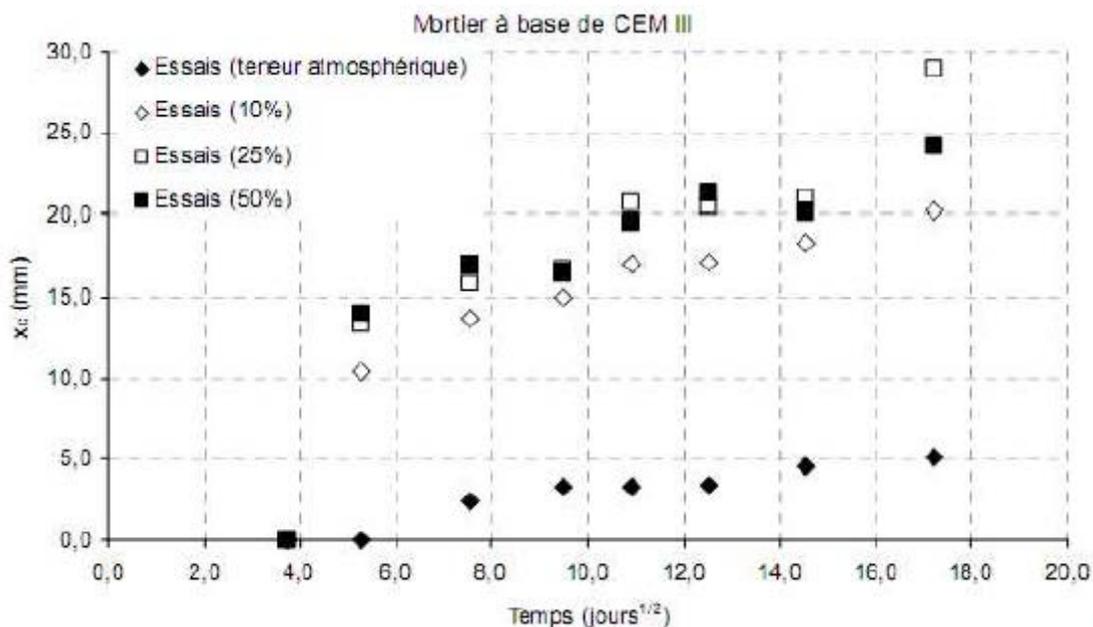


Figure 1.10 : Evolution dans le temps de l'épaisseur carbonatée mesurée pour le mortier à base de CEM III et pour les différentes teneurs de CO₂ [HYVERT, 2009].

1.3.2.6. Teneur en eau du béton :

La teneur en eau du béton est un facteur qui présente une grande influence sur la cinétique de carbonatation. Pour une humidité relative comprise entre 60 et 80 %, la vitesse de carbonatation est maximale [Jinane, 2010]. Au-delà de 80 %, la cinétique diminue rapidement pour atteindre des valeurs extrêmement faibles lorsque les pores sont saturés d'eau (humidité relative > 90 %), sachant que la diffusion du dioxyde de carbone dans l'eau est 10000 fois plus faible que dans l'air [Houst, 1992]. A l'opposé, si un béton est placé dans un environnement très sec, la quantité d'eau présente dans les pores est insuffisante pour dissoudre le CO₂. Donc, la cinétique de carbonatation est faible à très faible lorsqu'un béton est immergé ou lorsqu'il est placé dans un environnement très sec.

1.3.2.7. Température :

L'effet de la température sur la vitesse de carbonatation est assez incertain. D'une part, une élévation de température accélère les réactions chimiques (thermo-activation selon la loi d'Arrhenius), d'autre part elle favorise le séchage des pores et ainsi l'accès du CO₂ dans la matrice cimentaire. Cependant une augmentation de la température diminue aussi la solubilité du CO₂ (diminution de la constante de Henry, H₀) et réduit la concentration en CO₂ dans la phase gazeuse [Viet, 2015]. D'après les travaux de [DROUET, 2010], la profondeur de carbonatation augmente lorsque la température passe de 20°C à 50°C quelle que soit la

formulation du béton. Les expérimentations de [John et al., 1990] confirment l'effet de la température sur l'accroissement de la profondeur de carbonatation comme montré dans la figure (1.11) :

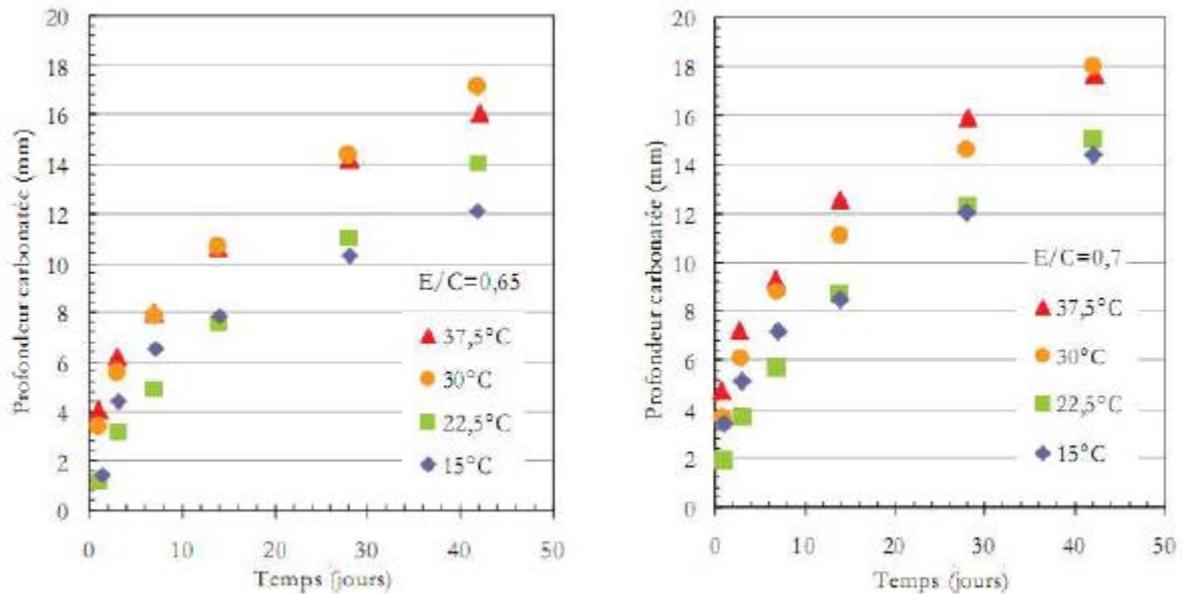


Figure 1.11 : Profondeur de carbonatation pour les températures différentes d'après les essais de [JOHN et al., 1990].

1.3.3. Conséquences de la carbonatation sur le béton :

Du point de vue du béton seul, on considère que la carbonatation a un effet bénéfique : elle améliore les performances mécaniques et limite la pénétration d'agents agressifs en réduisant la porosité. Cependant, la dépassivation de la couche protectrice des aciers est favorisée à cause de la diminution du pH de la phase aqueuse des pores que provoque la carbonatation, et par conséquent favorise la corrosion des armatures.

1.3.3.1. Diminution de la porosité :

La carbonatation de la portlandite entraîne une augmentation de volume. Selon [Houst et al., 1989], si l'on tient compte des produits solides, l'augmentation de volume par rapport à $Ca(OH)_2$ est la suivante, selon la structure cristalline du carbonate de calcium formé (Calcite, Aragonite et Vatérite) :

- 12 % pour la Calcite ;
- 3 % pour l'Aragonite ;
- 19 % pour la Vatérite.

Elle modifie aussi la distribution de la taille des pores de la pâte de ciment durcie [Thiery, 2006]. Dans l'étude de [Pihlajavaara, 1968], après 32 mois de carbonatation naturelle d'un CME I de $E/C = 0,3$, on observe une chute de porosité de 31,6 % à 25,6 %. D'autres études faites par [Houst et al., 1994 ; Ngala et al., 1997] ont permis de généraliser ce résultat pour des pâtes de ciment de E/C variant de 0,3 à 0,8. Le tableau (1.1) montre quelques valeurs :

Tableau 1.1 : Relation entre la baisse de porosité et le rapport E/C dans un béton carbonaté [Ngala et al., 1997].

E/C	<i>Diminution de la porosité (%)</i>
0.5	14.6
0.6	13.4
0.7	9.9

1.3.3.2. Augmentation de la résistance mécanique du béton :

La diminution de la porosité entraîne une augmentation de la résistance mécanique du béton. La calcite formée consolide la structure de la pâte de ciment durcie. Il est connu que le carbonate de calcium formé par carbonatation de la portlandite est un excellent liant, qui assure l'essentiel de la résistance mécanique des mortiers à la chaux. La résistance à la compression et à la flexion de bétons au ciment Portland conservés dans une atmosphère de CO_2 peut augmenter jusqu'à 30 % par rapport aux mêmes bétons conservés en atmosphère exempte de gaz carbonique [Lea, 1970].

1.3.3.3. Augmentation de la teneur en eau :

La carbonatation induit localement une accumulation d'humidité dans les pores : en effet, la carbonatation de la portlandite et des $C-S-H$ libère une partie d'eau qui peut participer à la composition de la solution interstitielle et aussi contribuer au transport d'agents agressifs. On note que la carbonatation de la portlandite est l'origine principale de la libération de cette eau libre [Thiery, 2005].

1.3.3.4. Evolution des propriétés de transfert :

La carbonatation conduit à une évolution de la microstructure qui a un impact sur les propriétés de transfert des matériaux cimentaires : coefficients effectifs de diffusion aux ions et aux gaz et perméabilité aux gaz et à l'eau liquide [Jinane, 2010]. Selon [Daimon et al., 1971], le coefficient effectif de diffusion aux gaz (oxygène ou hydrogène) est diminué après la carbonatation de matériaux à base de ciment CEM I. Cependant, le coefficient de diffusion effectif des ions (chlorures par exemple) est augmenté à l'issue de la carbonatation de matériaux à base de ce ciment [Ngala et al., 1997], qui est due à la diminution de la capacité de fixation chimique des chlorures, où il y'a une réaction préférentielle des sels de Friedel avec le CO₂, et donc les ions chlorures préalablement fixés seront libérés après la carbonatation.

1.3.3.5. Chute du pH de la solution interstitielle :

La solution interstitielle est une solution alcaline de pH proche de 13. Ce milieu basique assure la passivation des aciers d'armatures. La carbonatation du béton entraîne une baisse du pH à une valeur d'environ 9 pour laquelle le potentiel électrique des armatures chute vers les valeurs négatives favorisant leur corrosion. La pathologie qui apparaît est une corrosion généralisée se traduisant par une diminution progressive de la surface des armatures. De plus, la formation de rouille expansive exerce une pression sur le béton entourant l'armature. Cette pression est souvent suffisante pour provoquer l'éclatement du béton d'enrobage [Jinane, 2010].

CHAPITRE

02

Chapitre 02 : Modélisation de la carbonatation.

2.1. Introduction :

Comme on a vu dans le chapitre 01, la carbonatation est un phénomène qui a des effets bénéfiques sur le béton seul, mais c'est la corrosion des armatures qui pose des problèmes. Alors, il faut étudier le mécanisme de corrosion induite par carbonatation pour assurer la durabilité des structures exposées à ce phénomène.

La durée de vie en service d'une structure en béton armé qui risque une corrosion induite par carbonatation est divisée en deux étapes : une période d'initiation et une période de propagation. La phase d'initiation est relativement lente, et la phase de propagation est plus courte et se caractérise par une diminution rapide des performances de la structure jusqu'à la défaillance. Donc, l'étude de la période d'initiation est très importante pour la prévention des risques d'endommagement par carbonatation qui deviennent très coûteux dans la phase de propagation.

L'étude de la carbonatation (modélisation) doit permettre de couvrir l'ensemble des phénomènes qui se produisent lors de la carbonatation, leurs interactions, ainsi que l'interaction avec les conditions extérieures, par un modèle qui permet de prévoir la profondeur carbonatée ainsi que le temps de protection qu'offre l'enrobage à l'égard de la dépassivation des armatures.

Dans ce chapitre, Nous présentons l'approche fiabilistes, ainsi que le modèle utilisé dans notre étude, avec les paramètres aléatoires et la quantification de chaque un d'eux.

2.2 Approche fiabiliste :

Selon [Eurocode 2, 2004], le dimensionnement d'une structure est acceptable dans un contexte probabiliste, si la probabilité de défaillance P_f , pour un état limite donné, est inférieure à la probabilité de défaillance cible P_{fc} requise pour la sûreté d'une structure qui dépend du niveau de risque acceptable dans le domaine de son utilisation.

2.2.1. Incertitudes :

Pour obtenir un modèle réaliste de dégradation, il est nécessaire de prendre en compte les incertitudes liées aux phénomènes en question. Les mécanismes de dégradations des structures en béton armé dépendent du matériau, de l'environnement et du chargement. Ces facteurs présentent des sources d'incertitudes lors de la modélisation de ces mécanismes [Jinane, 2010]. Selon [Melchers, 1999], ces incertitudes peuvent être classées en 4 catégories :

- incertitudes physiques dues à la nature aléatoire des variables de base telles que : (a) la variabilité de la géométrie de la structure (ex. épaisseur de l'enrobage) ; (b) la variabilité des propriétés du matériau (ex. résistance) ; (c) la variabilité des facteurs environnementaux (ex. concentration de CO₂ à la surface du béton) ; et (d) la variabilité du chargement ;
- incertitudes statistiques résultant de la modélisation des paramètres par des modèles probabilistes simplifiés ou de la supposition d'une indépendance entre les variables aléatoires. Elles peuvent aussi résulter de l'utilisation d'une taille limitée des échantillons dans l'estimation des paramètres statistiques ou des modèles probabilistes des variables aléatoires du modèle ;
- incertitudes de modélisation provenant de l'utilisation de modèles physiques simplifiés (ex. modélisation de la pénétration des chlorures comme étant une diffusion pure exprimée par la deuxième loi de Fick) ;
- incertitudes de décisions associées à la définition de l'état limite, ou de la probabilité de défaillance acceptable dans les deux types d'états limites (ultime ou de service).

2.2.2. États limites :

L'évaluation des états de défaillance qui correspondent à des situations inacceptables, dépend de l'état limite pris en compte. En effet, nous spécifions deux types d'états limites :

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

Pour chaque mode de défaillance, une fonction d'état limite $G(\{X\})$ est définie dans l'espace des variables aléatoires. La fonction $G(\{X\})$ est une fonction déterministe dont les variables sont aléatoires [Jinane, 2010]. Les valeurs prises par cette fonction permettent de délimiter deux domaines séparés par une surface d'état limite :

- $G(\{X\}) = 0$: Surface d'état limite.
- $G(\{X\}) > 0$: Domaine de sureté.
- $G(\{X\}) \leq 0$: Domaine de défaillance.

2.2.3. Calcul de la probabilité de défaillance :

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

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

Dans notre travail, le calcul de fiabilité est effectué par la méthode de simulation et plus précisément par les simulations de Monte-Carlo dont le principe est décrit ci-dessous.

2.2.4. Méthode de simulation Monte Carlo :

La méthode de Monte-Carlo est simple à mettre en œuvre mais sollicite de nombreux tirages de variables aléatoires. Pour chaque tirage, on vérifie si l'on se trouve dans le domaine de défaillance (valeur de la fonction d'état limite négative). La probabilité recherchée est le rapport entre le nombre de tirages dépassant la valeur seuil de défaillance et le nombre total de tirages.

La justification théorique de la méthode des simulations de Monte-Carlo est la loi des grands nombres [Jinane, 2010]. Dans le domaine de la fiabilité, son principe consiste à simuler des réalisations de l'état limite et à compter le nombre d'évènements de défaillance.

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

$$p_f = \int_{G(\{X\}) \leq 0} f_{\{X\}}(\{x\}) dx_1 \dots dx_n = \int_D f_{G(\{X\})}(\{x\}) I_{G(\{X\}) \leq 0}(\{x\}) dx_1 \dots dx_n \quad (2.1)$$

Où $f_{\{X\}}(\{x\})$ est la densité conjointe de probabilité du vecteur aléatoire $\{X\}$ et D le domaine d'intégration.

La fonction $I_{G(\{X\}) \leq 0}(\{x\})$ est l'indicateur du domaine de défaillance défini par :

$$I_{G(\{X\}) \leq 0}(\{x\}) = \begin{cases} \mathbf{1} & \text{si } G(\{X\}) \leq 0 \\ \mathbf{0} & \text{si } G(\{X\}) > 0 \end{cases} \quad (2.2)$$

L'équation (2.1) donne la probabilité de défaillance P_f par l'espérance mathématique de $I_{G(\{X\}) \leq 0}(\{x\})$.

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

$$p_f = \frac{N_f}{N_s} \quad (2.3)$$

Cette méthode présente de nombreux avantages. Elle reste facile à implémenter et n'impose pas d'autres paramètres de réglage que le nombre de tirages à faire. Elle est particulièrement stable et ne pose pas de contraintes particulières, ni sur la fonction à évaluer, ni sur les lois des variables aléatoires. L'inconvénient de cette méthode est qu'elle converge lentement. Il faut un grand nombre de tirages, donc un grand nombre d'évaluations numériques, pour obtenir un résultat approché et fiable de la solution.

2.3. Modélisation de la carbonatation :

La façon la plus simple de prédire la durée de vie des ouvrages en béton armé (vis-à-vis de la corrosion des armatures) est l'évaluation de la durée de la phase d'initiation de la corrosion. Concernant la corrosion induite par carbonatation, il s'agit de définir le temps nécessaire pour que le premier lit d'armatures soit dépassivé par l'action du CO₂.

2.3.1. État limite de dépassivation :

L'état limite de dépassivation pour induite par la carbonatation peut être définie par :

$$P_{dep} = [a - x_c(t_{sl}) < 0] < P_0 \quad (2.4)$$

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_0 : Probabilité de défaillance cible.

Les variables a , $x_c(t)$, doivent être quantifiées avec une pure approche probabiliste.

2.3.2. Equation d'état limite de depassivation :

Une approche probabiliste pour la modélisation de la corrosion engendrée par la carbonatation d'un béton non-fissuré a été développée par le projet de recherche Duracrete et révisée par le projet DARTS. Ces projets ont abouti à l'élaboration d'un code de modélisation de la durée de service des structures en béton armé : Service Life Design Model Code *fib-34*, Bulletin 34 de la Fédération International de Béton. Elle est basée sur l'équation d'état limite suivante dans laquelle l'enrobage (a) est comparé avec la profondeur de carbonatation $x_c(t)$ dans un certain point de temps t :

$$g[\mathbf{a}, \mathbf{x}_c(t)] = \mathbf{a} - \mathbf{x}_c(t) \quad (2.5)$$

$$\mathbf{x}_c(t) = \sqrt{2 \times \mathbf{k}_e \times \mathbf{k}_c \times (\mathbf{k}_t \times \mathbf{R}_{ACC_0}^{-1} + \boldsymbol{\varepsilon}_t) \times \mathbf{C}_s \times \sqrt{t} \times \mathbf{W}(t)} \quad (2.6)$$

Avec :

\mathbf{a} : Enrobage (mm) ;

$\mathbf{x}_c(t)$: Profondeur de carbonatation à l'instant t (mm) ;

t : Temps (an) ;

\mathbf{k}_e : Fonction environnementale ;

\mathbf{k}_c : Paramètre de transfert d'exécution ;

\mathbf{k}_t : Paramètre de régression ;

$\mathbf{R}_{ACC_0}^{-1}$: Résistance effective de béton à la carbonatation (inverse) [(mm²/an) / (kg/m³)] ;

$\boldsymbol{\varepsilon}_t$: Terme d'erreur [(mm²/an) / (kg/m³)] ;

\mathbf{C}_s : Concentration de CO₂ [kg/m³] ;

$\mathbf{W}(t)$: Fonction de climat.

2.3.3. Quantification des paramètres aléatoires (selon fib_34) :

2.3.3.1. Enrobage :

L'enrobage (**a**) doit être considéré comme une variable aléatoire, qui peut accepter tous les types de distribution pour les enrobages larges, Sinon, une distribution qui exclure les valeurs négatives doit être établie, (Lognormal, Beta, Weibull ou Neville)

- Valeur de (a) : m = nom a (mm).
- écart de (a) :

s = 8 à 10 mm : cas d'absence d'exigences d'exécution particulières ;

s = 6 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.

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

Des valeurs indicatives sont montrées comme suite :

- 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.

2.3.3.3. Fonction environnementale k_e :

La fonction environnementale prend en compte l'influence de niveau d'humidité sur le coefficient de diffusion, et delà sur la résistance de béton à la carbonatation, elle peut être exprimée par l'équation suivante :

$$k_e = \left(\frac{1 - \left(\frac{RH_{\text{real}}}{100} \right)^{f_e}}{1 - \left(\frac{RH_{\text{ref}}}{100} \right)^{f_e}} \right)^{g_e} \quad (2.7)$$

Avec :

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

La plus proche station de météo peut offrir des données qui peut être utilisées, elle varie entre 0 et 100 %, et exprimée avec une fonction de distribution Beta ou Weibull.

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

Pour un climat référentiel de $T= +20^{\circ}C/ 65\% RH$, c'est un paramètre constant d'une valeur de 65% ;

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

g_e : Paramètre constant d'une valeur de 2,5.

2.3.3.4. Paramètre de transfert d'exécution k_c :

Il prend l'influence de la cure sur la résistance effective de carbonatation en considération,

L'équation suivante a été déterminée pour le calcul de k_c :

$$\mathbf{k}_c = \left(\frac{t_c}{7}\right)^{b_c} \quad (2.8)$$

Avec :

t_c Et **b_c** sont des variables quantifiées comme suit :

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

t_c : Paramètre constant qui égale la période de cure, [Jours].

2.3.3.5. Résistance à la carbonatation inverse $R_{ACC_0}^{-1}$:

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

- **Facteur k_t et ε_t :**

Les facteurs de méthode d'essai de carbonatation accélérée sont quantifiés comme suit :

- paramètre de régression **k_t** :

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

- Terme d'erreur ϵ_t : $[(mm^2/an)/(kg/m^3)]$.

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

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

$R_{Acc_0}^{-1}$ [$10^{-11}(m^2/s)/(kg/m^3)$] 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

2.3.3.6. Concentration de CO_2 :

La concentration de CO_2 de l'air ambiant représente l'impact direct sur la structure en béton, qui peut être représentée par l'équation suivante :

$$C_s = C_{s,atm} + C_{s,emi} \quad (2.9)$$

Avec :

$C_{s,atm}$: Concentration de CO_2 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 CO_2 additionnelle dû aux sources des émissions [kg/m^3].

2.3.4.7. Fonction de climat $w(t)$:

La fonction de climat prend en considération les conditions climatiques dues au fait de trempage de la surface de béton en eau, comme montré dans l'équation :

$$W(t) = \left(\frac{t_0}{t}\right)^w \quad (2.10)$$

$$w = \frac{(p_{sr} \times T_{ow})^{b_w}}{2} \quad (2.11)$$

Avec :

t_0 : Temps de référence (ans), constant d'une valeur de 0,0767 ;

T_{ow} : Temps de trempage dans l'eau, la plus proche station de météo peut l'offrir ;

$$\text{Ou : } \quad \mathbf{Tow} = \frac{\text{jours de chute de pluie avec } h_{Nd} \geq 2,5 \text{ mm par année}}{365} \quad (2.12)$$

h_{Nd} : Hauteur des précipitations ;

p_{sr} : 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.

b_w : Exposant de régression quantifié comme suit :

- Distribution normale, une moyenne de 0,446 et un écart s=0,163.

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

Dans le modèle représenté ci-dessus, la période d'initiation de la corrosion est considérée terminée lorsque la profondeur de carbonatation atteint les armatures (épaisseur d'enrobage). L'estimation du temps de cette période se fait à l'aide d'un programme de calcul développé sous MATLAB. Ce code de calcul estime premièrement la profondeur de carbonatation à un instant donné $\mathbf{x}_c(\mathbf{t})$, puis la compare à l'épaisseur d'enrobage (\mathbf{a}) pour évaluer la fonction d'état limite $\mathbf{g}[\mathbf{a}, \mathbf{x}_c(\mathbf{t})]$, prenant en compte la variabilité aléatoire des paramètres cités précédemment. La prise en compte des incertitudes se fait en utilisant la méthode de simulation Monte-Carlo qui sert à calculer la variation au cours du temps de la probabilité d'initiation de la corrosion (probabilité de défaillance) et le temps d'initiation de la corrosion, c'est-à-dire les fonctions de densité de probabilité (PDF) et de distribution cumulative (CDF). La figure (2.1) montre la procédure de calcul du temps d'initiation de la corrosion et ses caractéristiques statistiques.

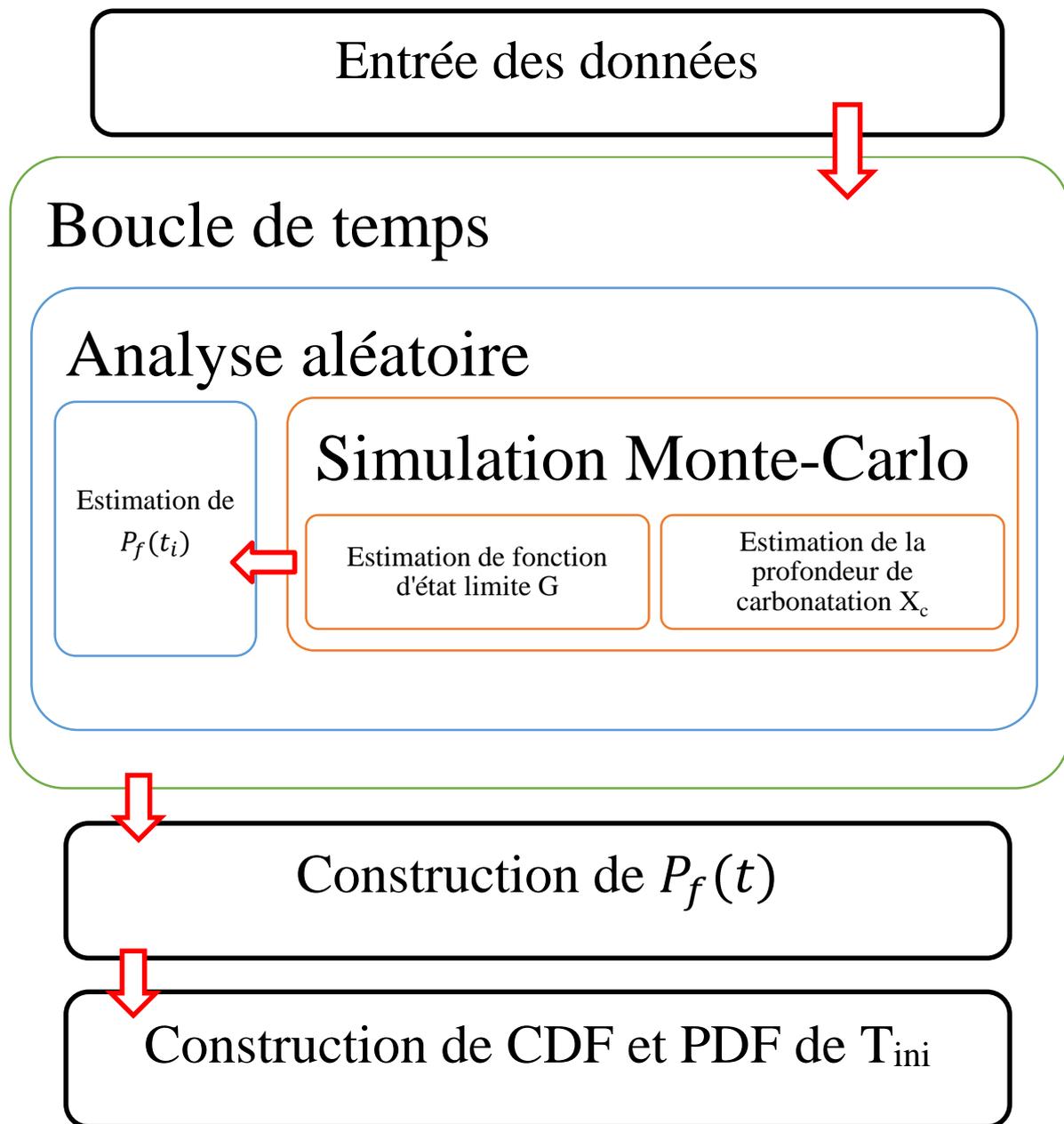


Figure 2.1 : Organigramme de la procédure de calcul du temps d'initiation de la corrosion

T_{ini} .

CHAPITRE

03

Chapitre 03 : Applications numériques et résultats.

3.1. Introduction :

Ce chapitre est réservé pour la démonstration de la performance du modèle de la corrosion par carbonatation proposé dans le 2ème chapitre. Ce modèle permet d'estimer la période d'initiation de la corrosion induite par carbonatation en comparant la profondeur de carbonatation avec l'épaisseur d'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 la concentration en dioxyde de carbone dans le milieu environnant. Les calculs fiabilistes sont effectués au moyen de simulations de Monte-Carlo. La fonction d'état limite est associée à la dépassivation des armatures. La période d'initiation de corrosion est terminée lorsque la profondeur de carbonatation atteint les armatures.

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 de certaines propriétés du matériau telles que le rapport E/C, le type de liant et la période de cure humide. Finalement l'influence des conditions climatiques sur le temps d'initiation de la corrosion est investiguée à travers des simulations en utilisant des données réelles d'humidité relative de trois villes en Algérie ayant des conditions climatiques différentes, à savoir Alger, Tébessa et Adrar.

Les types de lois de probabilités décrivant les variables aléatoires considérées dans ce modèle et leurs caractéristiques sont données dans le tableau (3.1). Il est à mentionner que, dans ce modèle, la fonction climatique $W(t)$ reflétant l'effet de la pluviométrie et du vent a été négligée à cause du manque de données nécessaires pour sa prise en considération.

Tableau 3.1 : Valeurs des variables aléatoires.

<i>Paramètre</i>	<i>Symbole</i>	<i>Distribution</i>	<i>Moyenne</i>	<i>Ecart type</i>
Enrobage	a	Lognormale	40 mm	10
Paramètre de régression	k_t	Normale	1.25	0.35
Paramètre	b_c	Normale	-0.567 [(mm ² /an)/ (kg/m ³)]	0.024
Terme d'erreur	ε_t	Normale	315.5 [(mm ² /an)/ (kg/m ³)]	48
Concentration de CO2	C_s	Normale	0.82 [kg/m ³]	0.1

3.2. Temps d'initiation de la corrosion :

En utilisant l'approche décrite dans le chapitre 2, la probabilité d'initiation de la corrosion induite par la carbonatation a été calculée pour un béton ayant un rapport E/C égale à 0.5 et confectionné en utilisant un ciment de type CEM 1 42.5 R. La cure humide a été prolongée à 28 jours dans une température ambiante. L'humidité relative a été modélisée en utilisant une fonction sinusoïdale avec des valeurs minimale et maximale de 70% et 90% respectivement, comme montré dans la figure (3.1) :

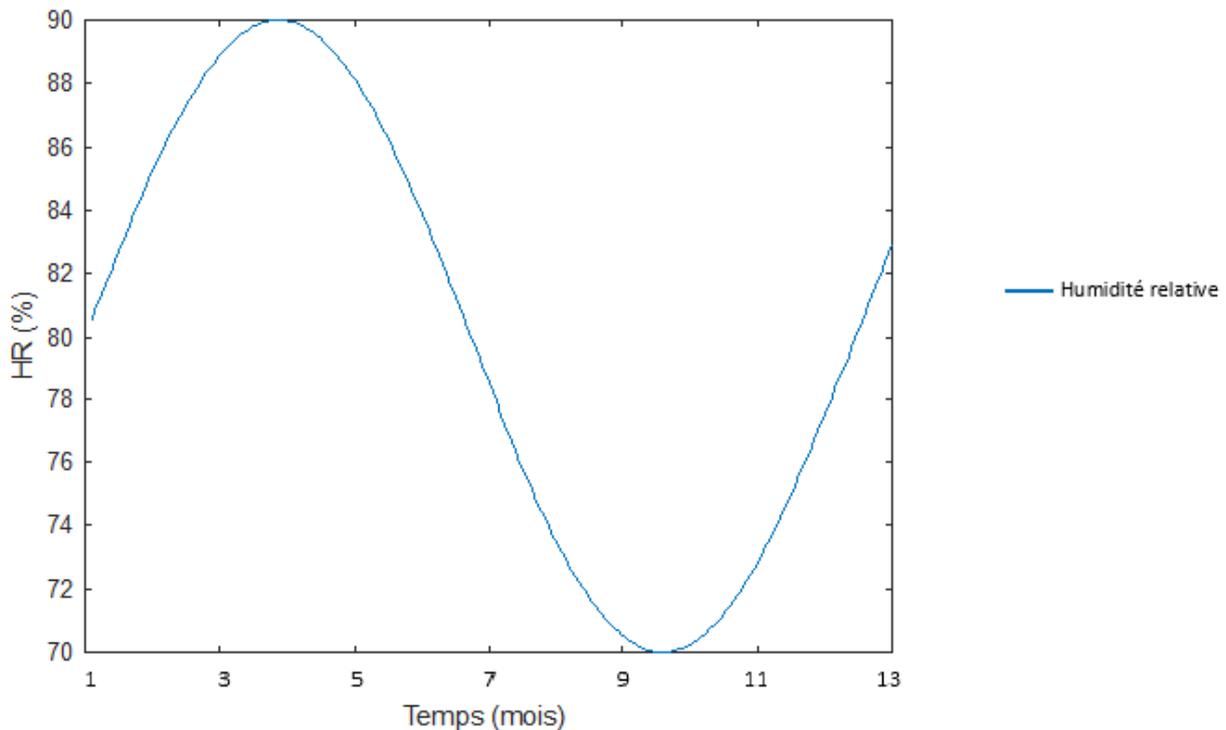


Figure 3.1 : Variation annuelle sinusoïdale d'humidité relative.

La figure (3.2) montre la variation de la probabilité d'initiation de la corrosion (probabilité de défaillance) en fonction du temps. Cette même fonction est équivalente à la fonction de distribution cumulative du temps d'initiation de la corrosion (CDF). On remarque que jusqu'à une durée de 90 ans le risque d'initiation de corrosion est très faible. Après 90 ans, la probabilité d'initiation de la corrosion devient de plus en plus importante et avec un taux de croissance important jusqu'à l'atteinte de l'ordre 1 environ les 180 ans.

La figure (3.3) montre les fonctions de densités de probabilités (PDF) discrète et approchées du temps d'initiation de la corrosion en utilisant trois lois de distribution différentes, à savoir la loi normale, la loi Weibull et la loi à valeur extrême. L'approximation de la loi discrète obtenue

par le modèle a été entretenue en utilisant l'outil Distribution Fitting Tool de Matlab. D'après les résultats obtenus, pour le béton et les conditions climatiques considérés, le temps d'initiation de la corrosion a une moyenne de 179.326 ans et un écart type de 8.71195.

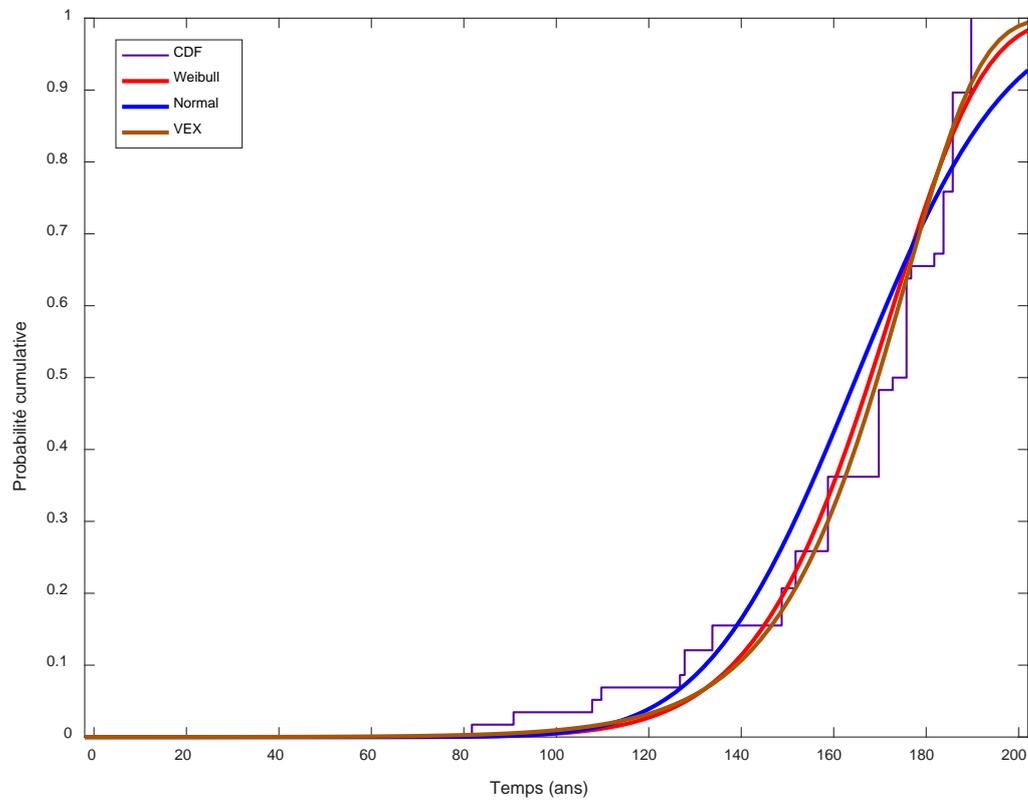


Figure 3.2 : Probabilité d'initiation de la corrosion (CDF).

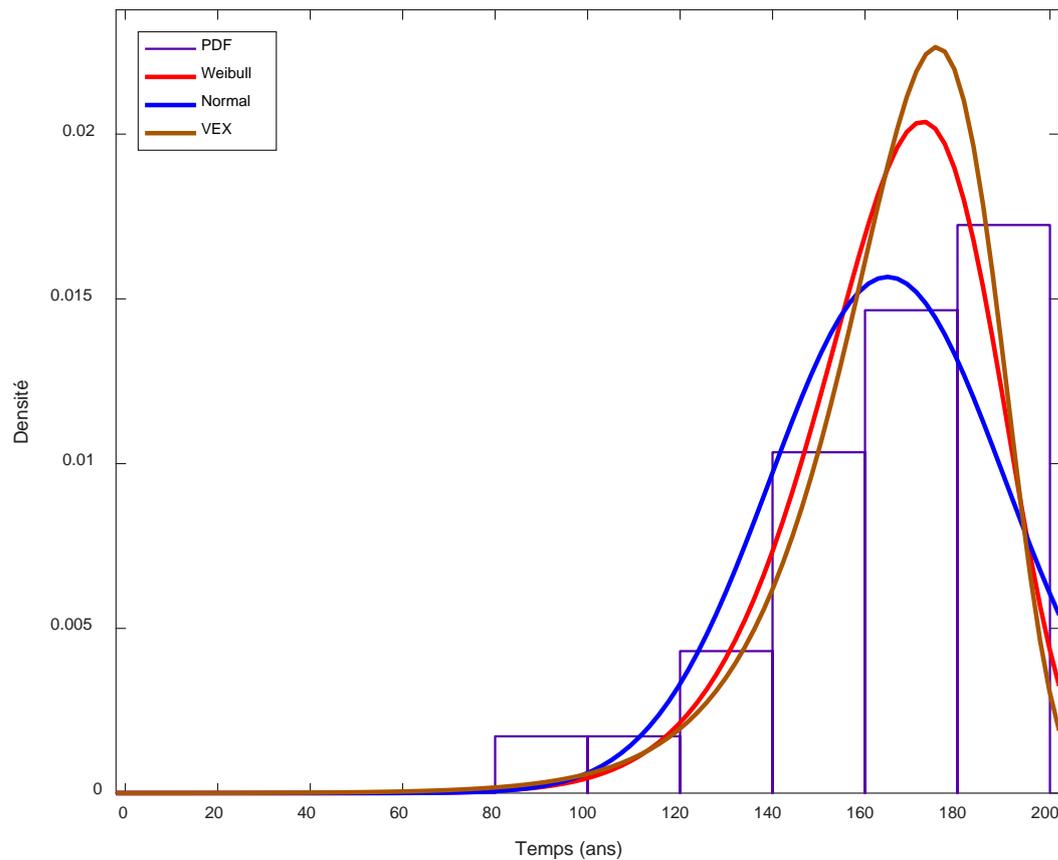


Figure 3.3 : Fonctions de densité de probabilités du temps d’initiation de la corrosion (PDF).

3.3. Etude paramétrique :

3.3.1. Effet des paramètres du matériau :

3.3.1.1. Effet du Rapport E/C :

Pour étudier l’effet du rapport E/C sur le temps d’initiation de la corrosion, des simulations en utilisant différentes valeurs ont été effectuées. L’effet du rapport est implicitement incorporé dans la résistance inverse à la carbonatation $R_{ACC_0}^{-1}$. Les valeurs de $R_{ACC_0}^{-1}$ correspondant aux différents rapports E/C utilisés sont montrées dans le tableau (2.1) du chapitre 2. Le type de ciment adopté est un CEM 1 42.5 R et la période de cure est fixée à 28 jours. L’humidité relative varie entre 70% et 90%. La figure (3.4) montre la variation de la probabilité d’initiation de la corrosion en fonction d’E/C. La moyenne et l’écart type de la fonction de densité du temps d’initiation de la corrosion pour chaque rapport E/C sont présentés dans le tableau (3.2).

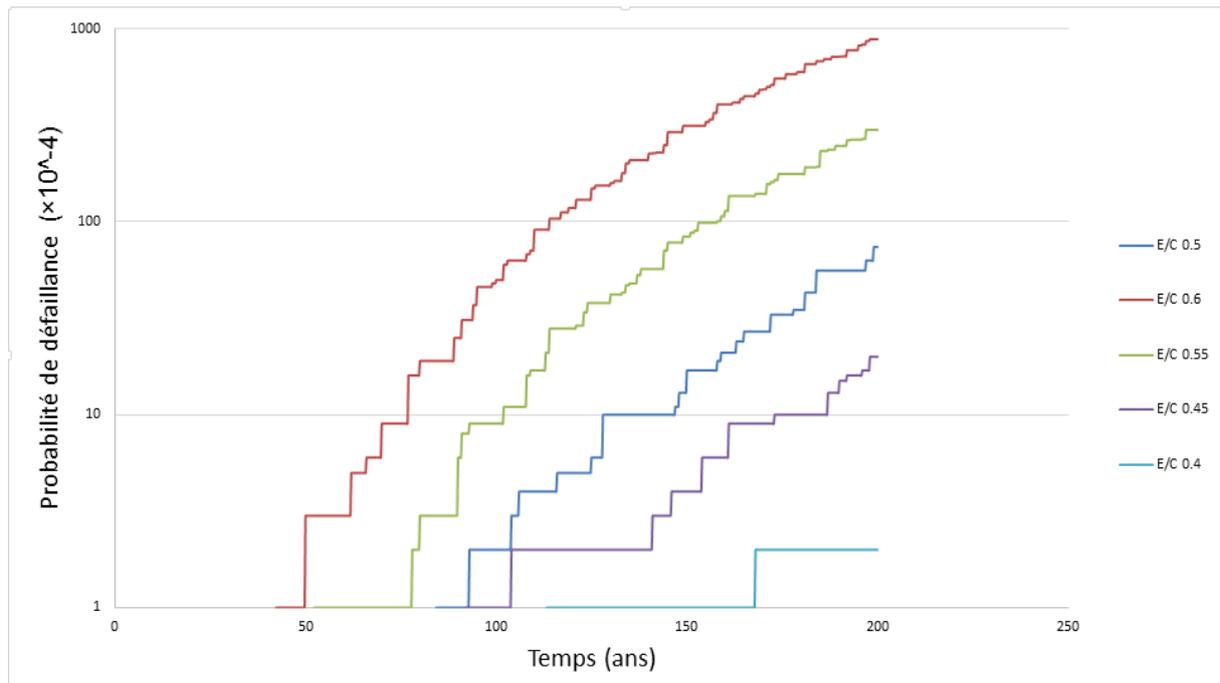


Figure 3.4 : Effet du rapport E/C sur la probabilité d'initiation de la corrosion.

Tableau 3.2 : Moyenne et écart type des fonctions PDF du temps d'initiation de la corrosion.

Rapport E/C	Moyenne	Ecart type
0.4	172.297	10.2928
0.45	178.331	9.84722
0.5	179.326	8.71195
0.55	175.804	7.35901
0.6	170.632	6.58875

A première vue, on remarque que plus le rapport E/C augmente plus la probabilité d'initiation de la corrosion augmente. Elle est maximale pour le plus grand rapport E/C (0.6) et minimale pour le plus petit (0.4). L'interprétation de ces résultats a une relation directe avec le niveau de porosité et surtout la perméabilité du béton qui augmentent avec toute augmentation du rapport E/C. Il est connu que la perméabilité est le premier facteur qui favorise la pénétration des agents agressifs extérieurs, c'est-à-dire, plus la perméabilité est élevée, plus la diffusion du CO₂ est rapide et la carbonatation est favorisée. Cela accélère l'initiation de la corrosion, et par conséquent, le niveau du risque de vient de plus en plus élevé.

Dans le tableau (3.2), on remarque que la moyenne du temps d'initiation de la corrosion est la plus basse pour un rapport E/C de 0.6 et la plus élevée pour un rapport E/C de 0.5. On remarque aussi qu'elle diminue avec n'importe quelle variation du rapport E/C par rapport à la valeur de

0.5. Physiquement, le temps d'initiation de la corrosion doit être le plus élevé pour le rapport E/C le plus petit (0.4 dans notre cas) et diminuer plus le rapport E/C augmente, alors que ce n'est pas le cas ici. Cela peut être dû au temps de la simulation relativement court et qui ne permet pas d'atteindre des niveaux élevés de la probabilité de défaillance (pour des valeurs de E/C de 0.4 et 0.45) et engendre un manque de données sur la fonction de distribution cumulative (CDF). Cela résulte en une estimation moins précise de la moyenne du temps d'initiation de la corrosion. Cette interprétation peut être consolidée par les valeurs de l'écart type qui est de plus en plus faible pour les rapports E/C élevés. Cela signifie que l'erreur sur l'estimation de la moyenne est la plus faible pour E/C=0.6 et la plus importante pour E/C=0.4.

3.3.1.2. Effet du type de liant :

Pour investiguer l'effet du type de liant utilisé, deux types de ciments et deux types d'additifs minéraux ont été adoptés dans les simulations. Au total, quatre types de liant ont été étudiés :

- CEM 1 42.5 R ;
- CEM 3/B 42.5 ;
- CEM 1 42.5 R + Cendres volantes (5% du poids de ciment) ;
- CEM 1 42.5 R + Fumée de silice (22% du poids de ciment).

Le rapport E/C adopté est de 0.55, la période de cure est de 28 jours, et l'humidité relative varie entre 70% et 90%. La probabilité d'initiation de la corrosion pour les différents types de liants est montrée dans la figure (3.5). Le tableau (3.3) donne la moyenne et l'écart type du temps d'initiation de la corrosion pour les différentes matrices cimentaires.

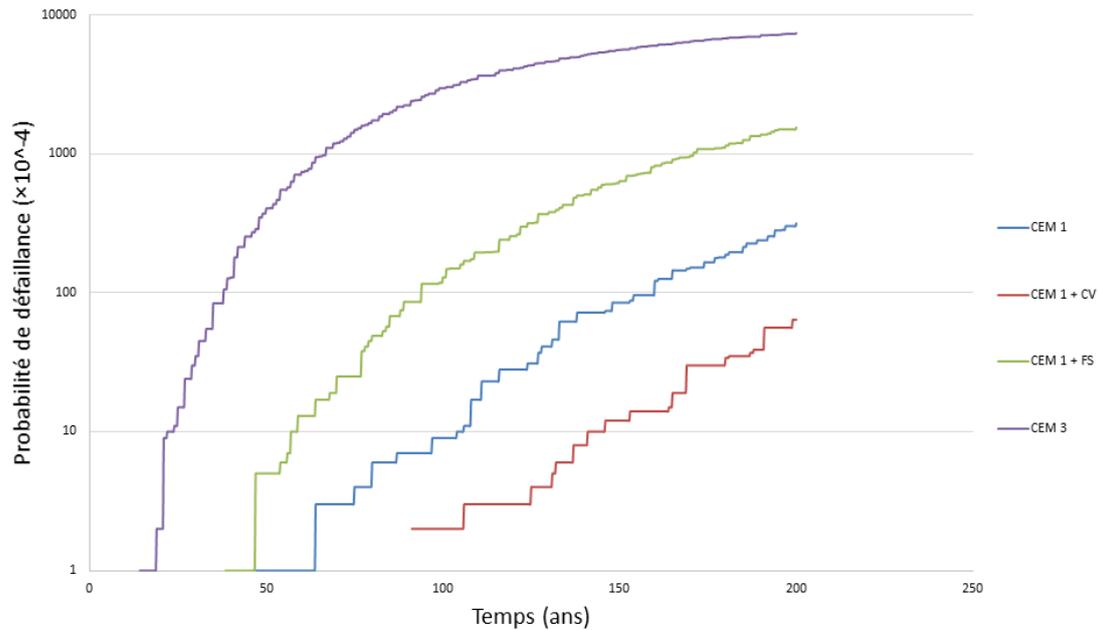


Figure 3.5 : Effet du type de liant sur la probabilité d'initiation de la corrosion.

Tableau 3.3 : Moyenne et écart type des fonctions PDF du temps d'initiation de la corrosion.

Type de ciment	Moyenne	Ecart type
CEM 1 42.5 R	177.678	7.73951
CEM 1 42.5 R + CV	176.527	9.69987
CEM 1 42.5 R + FS	167.02	5.78717
CEM 3/B 42.5	129.093	3.03501

Tout d'abord, du point de vue résistance à la carbonatation, on remarque que le ciment CEM 3 est le plus faible en le comparant avec les autres types de ciment, où il a, de loin, la plus grande probabilité d'initiation de la corrosion. Cela revient à sa composition de jusqu'au 60% de laitier de haut fourneau et juste 40% de clinker portland, ce qui diminue la densité de béton et augmente le niveau de porosité qui facilite la manifestation du processus de carbonatation. On remarque aussi que le ciment CEM 1 en association avec les cendres volantes a la plus basse probabilité de défaillance, et ça revient à la contribution des cendres volantes à la réduction de porosité par le remplissage des pores et vides. Au contraire, l'addition de fumée de silice au CEM 1 a augmenté la probabilité de défaillance, ce qui conclue que la fumée de silice n'a pas un effet bénéfique sur la résistance à la carbonatation.

Du tableau (3.3), identiquement à la section précédente, l'erreur sur l'estimation de la moyenne du temps d'initiation de la corrosion est la plus faible lorsque les niveaux de risque atteints sont les plus élevés (cas du ciment CEM 3). Cela signifie que si l'on veut augmenter la précision

d'estimation du temps d'initiation de la corrosion, la simulation doit être prolongée jusqu'à atteinte d'un haut niveau de risque (probabilité de défaillance élevée).

3.3.1.3. Effet de la période de cure :

Pour étudier de l'effet de la période de cure sur le temps d'initiation de la corrosion, des périodes de cure humide de 7, 14, 21, et 28 jours ont été adoptées dans les simulations. Le rapport E/C est pris égal à 0.5, le type du ciment est CEM 1 42.5 R et l'humidité relative varie entre 70% et 90%. La figure (3.6) montre les résultats obtenus pour ces différentes périodes de cure. La moyenne et l'écart type de la fonction de densité du temps d'initiation de la corrosion correspondant à chaque période de cure sont présentés dans le tableau (3.4).

Comme montré dans la figure (3.6), il y'a une relation inverse entre la probabilité d'initiation de la corrosion et la période de cure. Plus la période de cure est longue, moins la valeur de probabilité de défaillance. L'explication de cette relation est toujours le niveau de porosité du béton, où une courte période de cure résulte en une hydratation insuffisante du béton, qui mène à la formation d'un réseau poreux large et connecté, ainsi que l'apparition des fissures qui facilite la pénétration des agents agressifs extérieurs.

Tableau 3.4 : Moyenne et écart type des fonctions PDF du temps d'initiation de la corrosion.

Période de cure	Moyenne	Ecart type
7 jours	166.478	6.03666
14 jours	174.558	7.72064
21 jours	177.74	8.00392
28 jours	178.322	8.11604

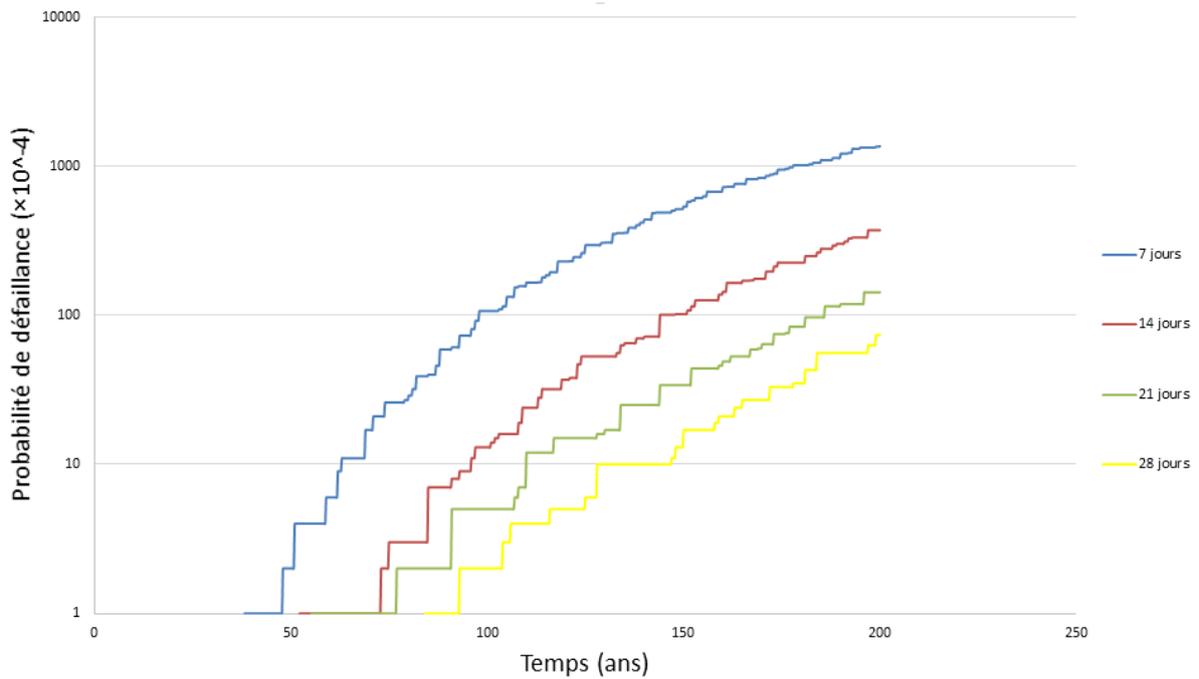


Figure 3.6 : Effet de la période de cure sur la probabilité d'initiation de la corrosion.

3.3.2. Effet des conditions climatiques :

L'étude de l'influence de la variation de l'humidité relative a été entretenue à travers la considération des climats de trois villes algériennes dans trois zones géographiques différentes :

- Une ville côtière (Alger) ;
- Une ville dans les hauts plateaux (Tébessa) ;
- Une ville au sud (Adrar).

Des données réelles d'humidité relative des villes étudiées ont été obtenues et utilisées dans les simulations, comme montré dans les figures (3.7, 3.8 et 3.9).

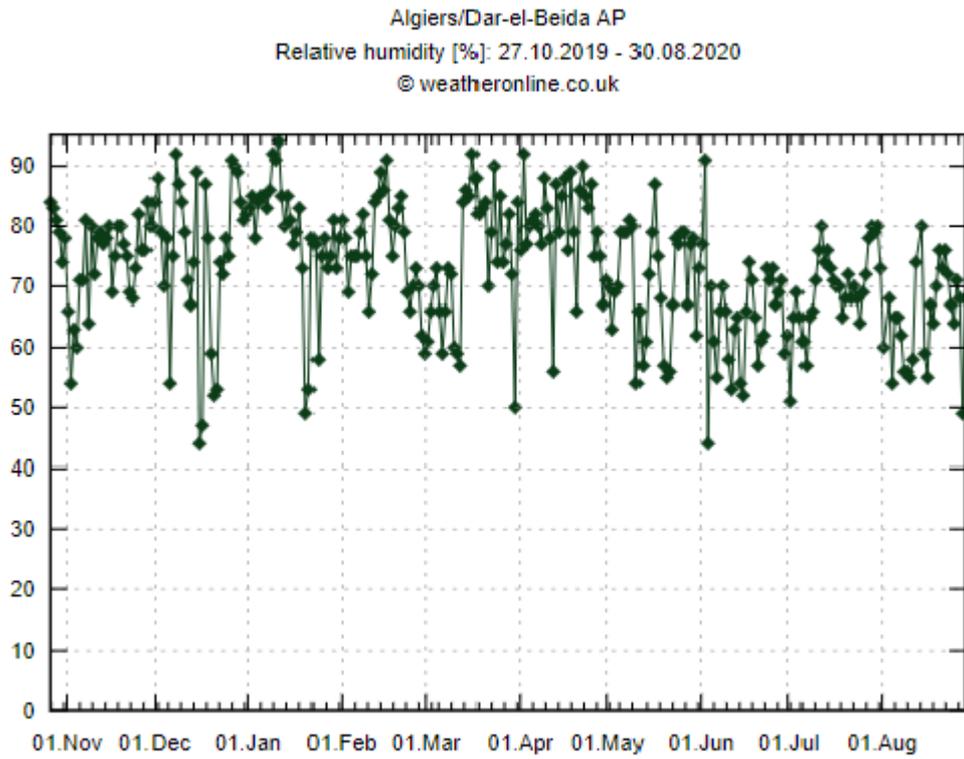


Figure 3.7 : Valeurs d’humidité relative de la ville d’Alger [WeatherOnline, 2020].

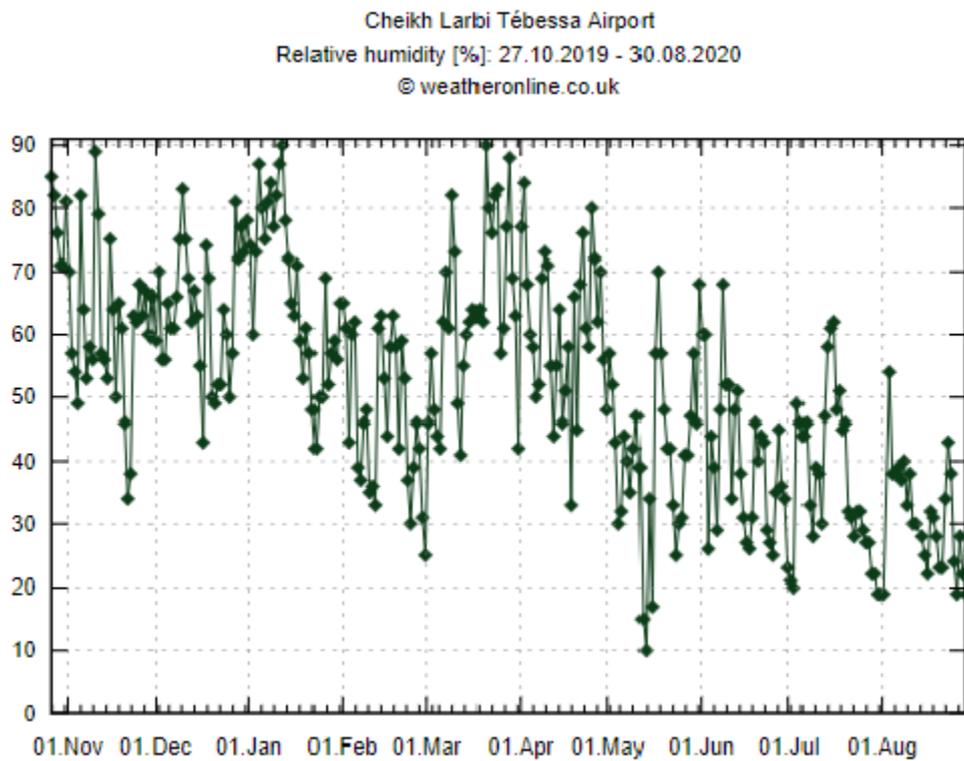


Figure 3.8 : Valeurs d’humidité relative de la ville de Tébessa [WeatherOnline, 2020].

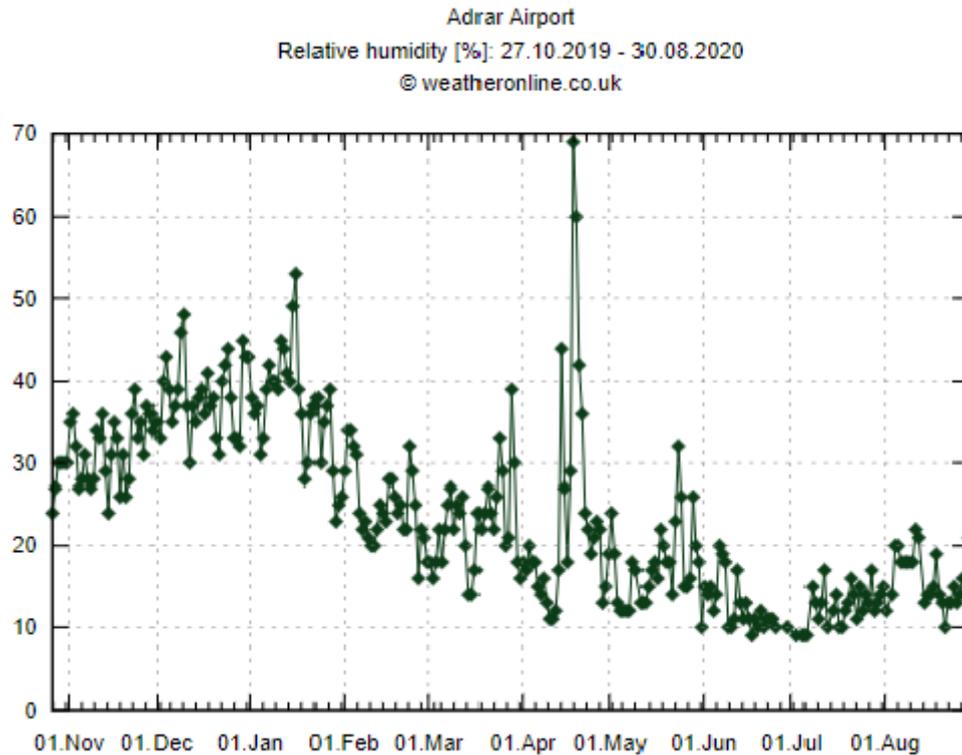


Figure 3.9 : Valeurs d'humidité relative de wilaya d'Adrar [WeatherOnline, 2020].

Les valeurs d'humidité relative maximale et minimale utilisées dans le modèle sont montrées dans le tableau suivant :

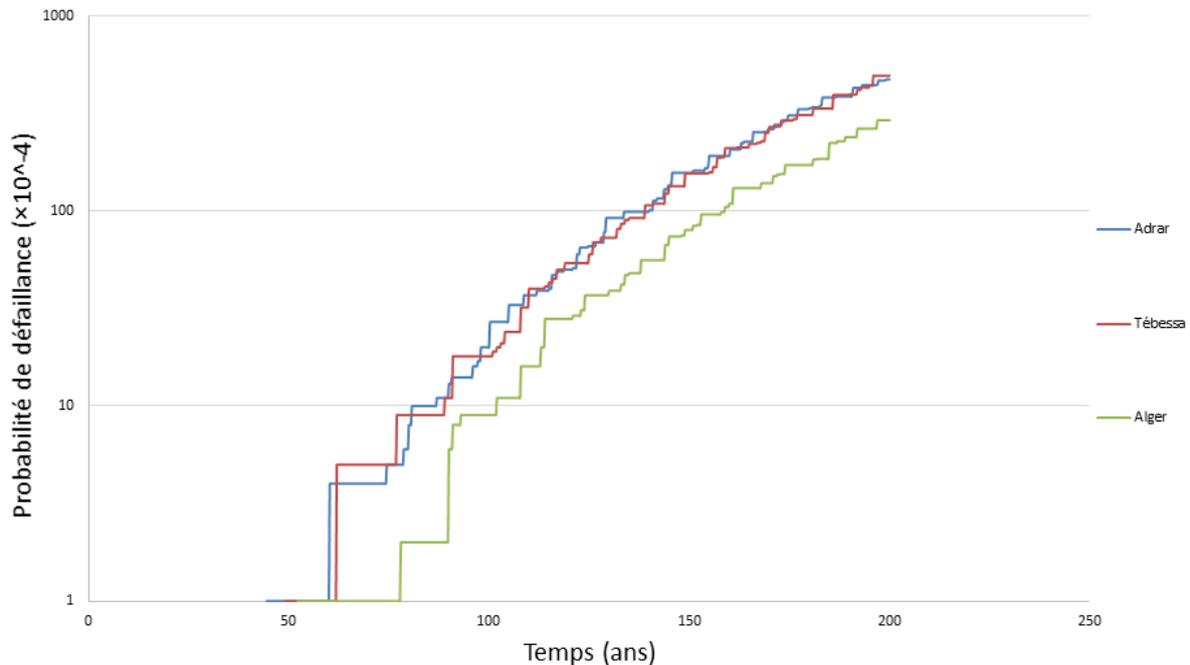
Tableau 3.5 : Valeurs maximale et minimale de l'humidité relative.

Villes	HR (%)	
	Min	Max
Alger	55	95
Tébessa	20	90
Adrar	10	45

Le rapport E/C est pris égal à 0.5, le type du ciment est CEM 1 42.5 R et la période de cure est de 28 jours. Les résultats obtenus sont montrés dans la figure (3.10). La moyenne et l'écart type de la fonction de densité du temps d'initiation de la corrosion correspondant à chaque ville sont présentés dans le tableau (3.6), et a figure (3.10) montre la variation de la probabilité d'initiation de la corrosion :

Tableau 3.6 : Moyenne et écart type des fonctions PDF du temps d'initiation de la corrosion.

HR	Moyenne	Ecart type
Alger (55 – 95 %)	175.234	7.79672
Tébessa (20 – 90 %)	173.624	7.18645
Adrar (10 – 45 %)	171.763	7.12477

**Figure 3.10** : Effet de l'humidité relative sur la probabilité d'initiation de la corrosion.

Comme il est montré dans la figure (3.10), les probabilités de défaillance pour Adrar et Tébessa sont très proches et plus importantes que celle pour Alger. Théoriquement, la plage de variation de l'humidité relative à Tébessa est la plus favorable à la carbonatation, par rapport à celle à Adrar où le climat très sec ralentit un peu la vitesse de carbonatation (à cause du manque d'eau interstitielle nécessaire pour la dissolution du CO₂ pour réagir avec les cristaux de la pâte de ciment). La probabilité de défaillance est faible à Alger qui possède un climat très humide qui défavorise la carbonatation, et ça revient à la plénitude des pores de béton avec l'eau qui obstrue la diffusion de dioxyde de carbone et ralentie la vitesse de carbonatation dans le béton. Il est connu que la vitesse de carbonatation est maximale pour une humidité relative comprise entre 50 et 70 %, pratiquement nulle en atmosphère sèche ou pour des bétons complètement saturés en eau.

Conclusion :

Dans ce travail, un modèle d'estimation du temps d'initiation de la corrosion des armatures de béton induite par la carbonatation a été proposé. L'effet de la variabilité des paramètres du modèle a été considéré à travers une modélisation probabiliste selon l'approche proposée par le code *fib-34*. L'analyse fiabiliste a été entretenue en utilisant la méthode de simulation Monte Carlo, pour l'estimation de la probabilité de défaillance et la détermination des caractéristiques statistiques du temps d'initiation de la corrosion. Une étude paramétrique a été menée pour investiguer la sensibilité du modèle à certaines propriétés du matériau et aux conditions climatiques. Les résultats obtenus ont permis à tirer les conclusions suivantes :

- Le temps d'initiation de la corrosion peut suivre approximativement plusieurs fonctions de densités de probabilités, à savoir la fonction normale, Weibull et à valeur extrême.
- 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.
- L'addition des cendres volantes au CEM 1 a un effet bénéfique sur la résistance à la carbonatation.
- L'addition de fumée de silice au CEM 1 n'a pas un effet bénéfique sur la résistance à la carbonatation.
- Plus la période de cure est longue, moins est la valeur de la probabilité de défaillance.
- Le climat très humide défavorise la carbonatation du béton, contrairement au climat très sec.
- Pour les 3 cas étudiés, l'humidité relative entre 10 et 45% est la plus favorable à carbonatation.
- Dans le cas d'atteinte de faibles probabilités de défaillance, le temps de simulation court résulte en une estimation moins précise du temps d'initiation de la corrosion. Pour avoir une bonne précision, il faut prolonger la simulation jusqu'à atteindre une probabilité de défaillance relativement élevée.

Enfin, une perspective à cette modélisation consisterait à intégrer à ce modèle de carbonatation l'effet de la fonction climatique qui reflète l'effet de la pluviométrie et du vent, qui a été négligée dans ce cas à cause du manque de données nécessaires pour sa prise en considération.

Une autre extension de ce travail consisterait à considérer l'influence du changement de la porosité causée par les produits de la carbonatation du béton sur les propriétés de transfert dans la zone d'enrobage.

Références bibliographiques

[Baroghel et al., 1994] BAROGHEL. BONNY. *Water vapour sorption experiments on hardened cementitious materials*, Cement and Concrete Research. 1994.

[Daimon et al., 1971] M. Daimon, T. Akiba, R. Kondo. *Through pore size distribution and kinetics of carbonation reaction of Portland cement mortars*. Journal of the American Ceramic Society, vol. 54, no. 9, p. 423 – 428. 1971.

[Drouet, 2010]. DROUET.E. *Impact de la température sur la carbonatation des matériaux cimentaires : prise en compte des transferts hydriques*. Thèse de l'ENS Cachan. 2010.

[Eurocode 2, 2004] Eurocode 2 : *Calcul des structures en béton - Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments*. EN 1992-1-1. 2004.

[Fib-34, 2006] International Federation for Structural Concrete (fib). *Model code for service life design, fib Bulletin, 34*. Lausanne. 2006.

[Ho et al., 1987] D.W.S. Ho, R.K. Lewis. *Carbonation of Concrete and its Prediction*. Cement and Concrete Research, vol. 17, no. 3, p. 489 – 504. 1987.

[Houst, 1992] Y.F. Houst. *Diffusion de gaz, carbonatation et retrait de la pâte de ciment durcie*. Thèse N°1108 de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. 1992.

[Huet, 2005] B. Huet. *Comportement à la corrosion des armatures dans un béton carbonaté. Influence de la chimie de la solution interstitielle et d'une barrière de transport*, Thèse de doctorat à l'Institut Nationale des Sciences Appliquées. 2005.

[Hyvert, 2009] HYVERT. *Application de l'approche probabiliste à la durabilité des produits préfabriqués en béton*. Thèse de l'Université Paul Sabatier – Toulouse III. 2009.

[Jinane, 2010] Jinane Kabbara. *Evaluation fiabiliste de l'impact des facteurs climatiques sur la corrosion des poutres en béton armé : application au cas libanais*. Engineering Sciences. Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, 2010.

[Lea, 1970] F.M. Lea. *The Chemistry of Cement and Concrete* (2e édition), Edward Arnold. 1970.

[Lemaire et al., 2005] M. Lemaire, A. Chateauneuf, J.C. Mitteau. *Fiabilité des structures, couplage mécano-fiabiliste statique*. Hermès Sciences publications. Lavoisier. 2005.

[Liu et al, 1996] LIU.P.L, WEYERS. *Modeling the time to corrosion cracking of the cover concrete in chloride contaminated reinforced concrete structures*. Ph.D Dissertation, Blacksburg Virginia, 1996.

[Loo, 1994] LOO et al., *A carbonation prediction model for accelerated carbonation testing of concrete*. Magazine of Concrete Research. 1994.

[Melchers, 1999] R.E. Melchers, *Structural Reliability: Analysis and Prediction*. Second Edition. John Wiley & Sons England. 1999.

[Ngala et al., 1997] V.T. Ngala, C.L. Page. *Effects of carbonation on pore structure and diffusional properties of hydrated cement pastes*. Cement and Concrete Research, vol. 27, no. 7, p. 995 – 1007. 1997.

[Ollivier et al., 2008] J.P. Ollivier, A. Vichot. *La durabilité des bétons*. Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. 840 pages. 2008.

[Pihlajavaara, 1968] S.E. Pihlajavaara. *Some results of the effect of carbonation on the porosity and pore size distribution of cement paste*. Materials and Structures, vol. 1, no. 6, p. 521 – 527. 1968.

[Saetta et al., 2004] A.V. Saetta, R.V. Vitaliani. *Experimental investigation and numerical modeling of carbonation process in reinforced concrete structures. Part I: Theoretical formulation*, Cement and Concrete Research, vol. 34, no. 4, p. 571 – 579, 2004.

[Silva, 2004] R. Silva. *Contribution à l'analyse probabiliste de la performance des ponts en béton armé*, thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 225 pages, 2004.

[Stumm et al., 1981] W. Stumm, J.J. Morgan. *Aquatic Chemistry*, John Wiley & Sons, New York, 1981.

[Thiery, 2005] M. Thiery. *Modélisation de la carbonatation atmosphérique des matériaux cimentaires Prise en compte des effets cinétiques et des modifications microstructurales et hydriques*, Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2005. de Lyon, 2005.

[Venuat et al., 1968] M. Venuat, J. Alexandre. *De la carbonatation du béton*, Revue des Matériaux de Construction, no. 638, p. 421 – 427. 1968.

[Viet, 2015], Viet Duc NGO. *Contribution à l'approche probabiliste de la durabilité des structures en béton soumises à la carbonatation*. Thèse de doctorat à l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse. 2015.

[WeatherOnline, 2020], Weather Online, 2020. Algeria history – Graph WeatherOnline, 31 août 2020, <https://www.woeurope.eu/weather/maps/forecastmaps?LANG=eu&CONT=afri®ION=0011&LAND=AL&UP=1&R=150&CEL=C>.

[Yoon et al. , 2007] I.S. Yoon, O. Copuroglu, K.B. Park. *Effect of global climatic change on carbonation progress of concrete*, Atmospheric Environment, vol. 41, no. 34, p. 7274 – 7285, 2007.