

N° d'ordre :

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de L'enseignement Supérieur et de La Recherche Scientifique

المركز الجامعي بلحاج بوشعيب عين تموشنت

Centre Universitaire Belhadj Bouchaib-Ain Témouchent



Institut de Technologie
Departement de Genie Civil
Laboratoire des Structures Intelligentes



THESE

Présentée pour l'obtention du **diplôme de DOCTORAT 3^{eme} Cycle**

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie Civil

Spécialité : Structure

Par : M^{elle} Chérifi Wafa Nor El Houda

Intitulé de la thèse

Durabilité des éléments en béton armé en milieu marin

Soutenue publiquement, le 15 / 03 / 2020 , devant le jury composé de :

Mr. Aissa Mamoune Sidi Mohammed	Pr	Président	Centre Universitaire BELHADJ Bouchaib/ Ain Témouchent
Mr. Houmadi Youcef	Pr	Rapporteur	Centre Universitaire BELHADJ Bouchaib/ Ain Témouchent
Mr. Benali Omar	Pr	Co-rapporteur	Université Taher Moulay de Saida
Mr. Belarbi Lahcen	Pr	Examineur	Centre Universitaire BELHADJ Bouchaib/ Ain Témouchent.
Mr. Khelidj Abdelhafid	Pr	Examineur	Université de Nantes

Année Universitaire : 2019/2020

Remerciment

La réalisation de cette thèse a été possible grâce au concours de plusieurs personnes à qui je voudrais témoigner toute ma gratitude.

Je voudrais tout d'abord adresser toute ma reconnaissance au directeur de ma thèse, Monsieur HOUMADI Youcef Maître de Conférence au centre universitaire Belhadj Bouchaib Ain Temouchent, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion. Son exigence m'a grandement stimulé.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mon co-directeur de thèse, Monsieur BENALI Omar, Professeur à l'université de Saida. Je le remercie d'avoir contribué à l'encadrement de cette thèse, pour ses conseils avisés et son soutien.

J'exprime mes vifs remerciements à Monsieur AISSA MAMOUNE Sidi Mohammed, Professeur au centre universitaire Belhadj Bouchaib Ain Temouchent, qui m'a fait l'honneur de m'aider dans mes recherches et aussi de présider mon jury.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements et ma profonde reconnaissance à Monsieur KHELIDJ Abdelhafid, Professeur à l'Université de Nantes, Monsieur BELARBI Lahcen Professeur au Centre Université Belhadj Bouchaib Ain Temouchent, qui ont eu la gentillesse d'accepter la charge d'être les rapporteurs et examinateurs de cette thèse de doctorat.

Je remercie l'équipe du laboratoire de recherche GeM (Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique), à l'IUT de Saint Nazaire – Nantes, de m'avoir bien accueilli et orienter dans mes recherches durant mon stage chez eux.

Je remercie également toute l'équipe du Laboratoire des Structures Intelligentes du centre universitaire Belhadj Bouchaib de Ain Temouchent dont je partage le quotidien avec un grand plaisir.

Enfin j'exprime mon profond amour et ma reconnaissance à ma famille qui ont toujours été pour moi d'un grand soutien moral.

Résumé

La corrosion des armatures en acier est l'un des principaux phénomènes déterminant la durée de vie de la structure. Des méthodes basées sur plusieurs indicateurs de la probabilité de corrosion peuvent être suivies. Certaines de ces mesures sont plus ou moins longues et nécessitent des équipements très spécifiques. Ces dernières années, plusieurs tests non destructifs ont été mis au point pour être relativement rapides et moins coûteux, sur la base de la mesure du potentiel de corrosion.

Plusieurs bancs d'essais ont été développés pour évaluer le risque de corrosion par des essais non destructifs "CANIN+" effectués sur des bétons ordinaires et mortier à l'état durci. Les résultats obtenus en utilisant ces mesures révèlent une diminution du potentiel de corrosion des éprouvettes dans un milieu agressif (contenant 3% de NaCl) par rapport au milieu de référence. La progression des tests dans les différents milieux confirme l'agressivité de l'environnement sur les structures et l'intérêt du revêtement.

La thèse était divisée en deux parties. Le premier vise une étude probabiliste pour prédire le temps d'initiation à la corrosion des structures en béton armé dans les environnements contenant des chlorures. Il est exprimé sous forme de modèle mathématique utilisant la seconde loi de Fick et les propriétés de distribution statistique de leurs paramètres sont incluses dans ce modèle. La dispersion dans les conditions d'exposition environnementale et les propriétés structurelles ont été considérées comme des champs aléatoires dans le modèle mathématique avec une conception probabiliste. Cette étude probabiliste est développée à l'aide d'une simulation de Monte Carlo afin de déterminer la contribution de chaque paramètre d'entrée et les paramètres statistiques des variables aléatoires sur les fonctions de distribution de probabilité du temps initial de corrosion. En outre, une étude comparative a été réalisée pour analyser l'impact de la distribution de probabilité sur la réponse (le temps initial de corrosion).

La deuxième partie de la thèse était l'analyse neuronale des données obtenues par la mesure expérimentale du potentiel de corrosion. Une analyse statistique a été effectuée à l'aide d'une régression linéaire multiple afin de tester la fiabilité des données. Les réseaux de neurones artificiels (RNA) sont ensuite utilisés pour développer un modèle permettant de prédire le potentiel de corrosion du ferrailage dans un béton ou un mortier. Les résultats indiquent que le réseau neuronal artificiel est capable de prédire le potentiel de corrosion avec un degré de précision acceptable.

Abstract

Corrosion of steel reinforcement is one of the main phenomena determining the life of the structure. Methods based on several indicators of the likelihood of corrosion can be followed. Some of these measures are more or less long and require very specific equipment. In recent years, several non-destructive tests have been developed to be relatively fast and less expensive, based on the measurement of corrosion potential.

Several test benches have been developed to evaluate the risk of corrosion by non-destructive "CANIN +" tests carried out on ordinary concretes and hardened mortars. The results obtained using these measurements reveal a decrease in the corrosion potential of the specimens in an aggressive medium (containing 3% NaCl) relative to the reference medium. The progression of the tests in the different environments confirms the aggressiveness of the environment on the structures and the interest of the coating.

The thesis was divided in two parts. The first one is aimed at a probabilistic study to predict the corrosion initiation time of concrete structures in chloride-containing environments. It is expressed as a mathematical model using the second Fick law and the statistical distribution properties of their parameters are included in this model. Dispersion under environmental exposure conditions and structural properties were considered random fields in the mathematical model with a probabilistic design. This probabilistic study is developed using a Monte Carlo simulation to determine the contribution of each input parameter and the statistical parameters of the random variables on the probability distribution functions of the initial corrosion time. In addition, a comparative study was conducted to analyze the impact of the probability distribution on the response (the initial corrosion time).

The second part of the thesis was the neural analysis of the data obtained by the experimental measurement of the corrosion potential. Statistical analysis is performed using multiple linear regression to test the reliability of the data. Artificial neural networks (ANNs) are then used to develop a model for predicting the corrosion potential of reinforcement in a concrete or mortar. The results indicate that the artificial neural network is able to predict the corrosion potential with an acceptable degree of accuracy.

ملخص

تآكل حديد التسليح هي واحدة من الظواهر الرئيسية التي تحدد حياة الهيكل. يمكن اتباع الطرق المعتمدة على عدة مؤشرات لاحتمال التآكل. بعض هذه التدابير طويلة أو أقل وتتطلب معدات محددة للغاية. في السنوات الأخيرة، تم تطوير العديد من الاختبارات غير المدمرة لتكون سريعة نسبيًا وأقل تكلفة، استنادًا إلى قياس إمكانية التآكل.

تم تطوير العديد من مناضد الاختبار لتقييم خطر التآكل بواسطة اختبارات (+ CANIN) غير المدمرة التي أجريت على الخرسانات العادية ومدافع الهاون المتصلبة. النتائج التي تم الحصول عليها باستخدام هذه القياسات تكشف عن انخفاض في احتمال تآكل العينات في وسط عدواني (يحتوي على 3 ٪ كلوريد الصوديوم) نسبة إلى الوسط المرجعي. يؤكد تقدم الاختبارات في البيئات المختلفة عدوانية البيئة على الهياكل واهتمام الطلاب.

تم تقسيم الرسالة في جزأين. تهدف الدراسة الأولى إلى دراسة احتمالية للتنبؤ بوقت بدء التآكل في الهياكل الخرسانية في البيئات المحتوية على كلوريد. يتم التعبير عنها كنموذج رياضي باستخدام قانون Fick الثاني ويتم تضمين خصائص التوزيع الإحصائي لمعلماتها في هذا النموذج. تم اعتبار التشتت في ظروف التعرض البيئي والخصائص الهيكلية حقولًا عشوائية في النموذج الرياضي مع تصميم احتمالي. تم تطوير هذه الدراسة الاحتمالية باستخدام محاكاة مونت كارلو لتحديد مساهمة كل معلمة إدخال والمعلمات الإحصائية للمتغيرات العشوائية على وظائف توزيع الاحتمال في وقت التآكل الأولي. بالإضافة إلى ذلك، أجريت دراسة مقارنة لتحليل تأثير توزيع الاحتمالات على الاستجابة (زمن التآكل الأولي).

الجزء الثاني من الأطروحة هو التحليل العصبي للبيانات التي تم الحصول عليها عن طريق القياس التجريبي لإمكان التآكل. يتم إجراء التحليل الإحصائي باستخدام الانحدار الخطي المتعدد لاختبار موثوقية البيانات. ثم يتم استخدام الشبكات العصبية الاصطناعية (ANNs) لتطوير نموذج للتنبؤ باحتمال التآكل في التعزيز في الخرسانة أو الملاط. تشير النتائج إلى أن الشبكة العصبية الاصطناعية قادرة على التنبؤ بإمكانية التآكل بدرجة مقبولة من الدقة.

Tables des matières

Résumé.....	I
Abstract	II
Tables des matières.....	IV
Liste des Abréviations.....	VIII
Liste des figures.....	XI
Liste des tableaux.....	XIII
INTRODUCTION GÉNÉRALE	XIV
CHAPITRE I: RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE	4
1 Introduction.....	5
2 Le matériau étudié	5
2.1 Le béton.....	5
2.2 Hydratation des ciments	5
2.3 L'armature du béton	6
3 Importance du phénomène de corrosion	6
3.1 Contexte	6
3.2 Définition.....	7
3.3 Processus et mode de corrosion du béton armé	8
3.3.1 Les étapes de corrosion des armatures dans le béton armé	8
3.3.2 Mécanisme de corrosion induit par les ions chlorures	9
3.3.3 Seuil d'amorçage de la corrosion due aux chlorures	10
3.4 Autres paramètres influençant le processus de corrosion	11
3.4.1 La composition du béton.....	11
3.4.2 Le taux d'oxygène et d'humidité	12
3.4.3 La température.....	12
3.4.4 La résistivité électrique du béton.....	13
4 Modèle du temps de l'initiation à la corrosion induit par les chlorures	13
4.1 Le modèle simplifié	14
4.2 Le modèle proposé par DuraCrete	14
5 Conception basée sur la durabilité.....	15
5.1 Méthodes de conceptions actuelles.....	15
5.2 L'approche probabiliste.....	16
5.2.1 Théorie de la fiabilité.....	17
5.2.2 Fonction d'état limite	17
5.2.3 Probabilité de défaillance.....	19

5.2.4	Les méthodes d'évaluation des probabilités.....	21
5.2.4.1	Méthode FORM	21
5.2.4.2	Méthode SORM.....	21
5.2.4.3	Méthode de Monte Carlo.....	22
6	Techniques de simulation utilisée	23
6.1	Composantes majeures d'un algorithme de Monte Carlo	23
6.1.1	Génération de nombres aléatoires	24
6.1.2	Génération des variables aléatoires.....	24
6.1.3	Précision et efficacité de la simulation de Monte Carlo.....	25
7	Conclusions.....	25
CHAPITRE II : DETECTION ET LUTTE CONTRE LA CORROSION		27
1	Introduction.....	28
2	Méthodes d'évaluation de la corrosion	28
2.1	L'intérêt des essais non destructifs	28
2.2	Inspection visuelle	29
2.3	Mesure du potentiel de corrosion.....	29
2.4	La mesure de la résistivité du béton	31
2.4.1	Méthode de Wenner	32
2.4.2	Méthode de polarisation d'armature de l'enrobage	32
2.5	La mesure de la résistance de polarisation	34
2.5.1	Mesure de la résistance de polarisation linéaire	34
2.5.2	Mesure d'impédance électrochimique « résistance de Nyquist »	35
2.5.3	Vitesse de corrosion	36
2.6	Autres méthodes complémentaires.....	37
2.6.1	Méthode électromagnétique « Radar ».....	37
2.6.2	Emission acoustique	39
2.6.3	Ultrason	39
3	La lutte contre la corrosion	40
3.1	Protection par inhibiteur de corrosion.....	41
3.1.1	Définition.....	41
3.1.2	Généralités sur leurs utilisations	41
3.1.3	Classifications des inhibiteurs	42
3.1.3.1	Compositions chimiques	42
3.1.3.2	Mode d'action	43
3.1.3.3	La nature électrochimique du processus	44
3.1.3.4	Mode d'emplois.....	46

3.1.4	L'efficacité d'un inhibiteur de corrosion	47
3.2	Action des inhibiteurs migrants	47
4	Conclusion	50
CHAPITRE III : APPLICATION DES RESEAUX DE NEURONES AUX PROBLEMES DE GENIE CIVIL		51
1	Introduction.....	52
2	Réseau neuronal artificiel.....	52
2.1	Neurone.....	53
2.2	Architecture du réseau de neurones.....	53
2.2.1	Types de couches	53
2.2.1.1	Couche d'entrée	54
2.2.1.2	Couche cachée.....	54
2.2.1.3	Couches de sortie	54
2.2.2	Les classes du réseau de neurone artificiel	54
2.2.2.1	Réseau de transmission simple couche.....	54
2.2.2.2	Réseau de transfert de donnée à couches multiples	55
2.2.2.3	Réseaux récurrents.....	56
3	Aspects mathématiques d'ANN	57
3.1	Coefficient de pondération	57
3.2	Fonction d'activation.....	58
4	Processus de formation et propriétés de l'apprentissage	59
4.1	Apprentissage de formation supervisé	60
4.2	Apprentissage non supervisé	61
4.3	Apprentissage par renforcement	61
4.4	Apprentissage hors ligne	61
4.5	Apprentissage en ligne	62
5	Application de l'analyse neuronale en génie civil	62
5.1	Le comportement des matériaux de construction.....	62
5.2	L'application en géotechnique	62
5.3	Le phénomène de corrosion.....	63
6	Conclusion	65
CHAPITRE IV : ANALYSE PROBABILISTE POUR L'ESTIMATION DU TEMPS D'INITIATION DE LA CORROSION		66
1	Introduction.....	67
2	Modèle simplifié pour prévoir le temps d'initiation de la corrosion	67
2.1	Discrétisation structurelle avec expansion Karhnuen-Loeve (K-L).....	68
2.2	Quantification statistique des paramètres dans le modèle simplifié	69

2.3	Étude de conception	70
2.4	Effet de la distance d'autocorrélation sur la probabilité de défaillance	73
3	Etude paramétrique	75
3.1	Impact des coefficients de variation (COV) des différentes variables aléatoires sur les PDF de la réponse du système (tini)	76
3.2	Impact des distributions de probabilité sur les PDF de la réponse système (tini)	81
4	Conclusion	84
CHAPITRE V : CORROSION DES ARMATURES ET LA PREDICTION PAR LA METHODE DES RESEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS GENERALISES		
86		
1	Introduction.....	87
2	Méthodes de surveillance de la durée de vie des structures en béton armé.....	87
2.1	Méthode et mesure.....	88
2.2	Condition expérimentale.....	89
2.2.1	Milieux d'étude.....	89
2.2.2	Sélection du matériel.....	90
2.2.3	Échantillons d'étude	90
2.3	Procédure expérimentale.....	90
2.4	Résultats et discussion	91
2.4.1	Influence du cycle.....	91
2.4.2	Influence du milieu	91
2.4.3	Influence de l'enrobage.....	92
2.4.4	Influence de l'inhibiteur	92
2.5	Conclusion	95
3	Analyse statistique des données de potentiel de corrosion	95
3.1	Modèles proposés pour le potentiel de corrosion.....	96
4	Modélisation artificielle du réseau neuronal	99
4.1	Évaluation de la performance des modèles formés.....	100
4.2	Validation et test des modèles développés	101
5	Conclusion	104
CONCLUSION GENERALE		
105		
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES		
109		
ANNEXES.....		
134		
Annexe A		
135		
Annexe B.....		
141		

Liste des Abréviations

Symboles Romains

a	La distance entre deux points voisins
AFm	Le monosulfoaluminate
AFt	L'ettringite
ANN	système d'analyse neuronale
B	Une constante égale à 26 mV
BO	Béton ordinaire
C _d	Condensateur
C-S-H	les silicates de calcium hydratés
CH	La portlandite
Cl ⁻	Les ions chlorures
C _s	Teneur en ions chlorure à la surface du béton
c _t	L'épaisseur de l'enrobage de béton
C _{th}	Le seuil de concentration de chlorure
C(x,t)	La concentration en ions chlorure libres à une profondeur x
COV	Coefficient de variation
CND	Contrôles Non Destructifs
END	Essais Non Destructifs
D _c	Le coefficient de diffusion effective de chlorure
D ₀	Le coefficient de diffusion mesuré à un temps de référence t ₀
E	Potentiel mesuré
E _p	Potentiel de polarisation
E _{corr}	Potentiel de corrosion
EA	L'émission acoustique
erf ⁻¹ ()	L'inverse de la fonction d'erreur
F	La constante de Faraday
F()	Une fonction de répartition bijective
Fe ²⁺	Les ions ferreux
Fe ³⁺	Ions ferrique
FORM	Méthode de fiabilité du premier ordre
G ()	La fonction d'état limite
i	Densité de courant
I(.)	Le domaine d'insécurité
I	Un courant alternatif
i _{corr}	La densité de courant instantané de corrosion
ke	Correction des variables environnementales D0 pour tenir compte de l'influence de l'environnement d'exposition
kt	Méthode de test correction de variable D0 pour tenir compte de l'influence de la méthode d'essai
kc	Variable d'exécution corrigeant D0 pour tenir compte de l'influence de la méthode de durcissement

L _x	La distance d'autocorrélation horizontale
L _y	La distance d'autocorrélation verticale
M	Milieu
MCS	Simulation de Monte Carlo
M _{Fe}	La masse atomique du fer
Mo	Mortier
MSE	l'erreur quadratique moyenne
n	le facteur âge qui prend en compte la dépendance temporelle de D ₀
n _{Fe}	La valence des ions ferreux
N _s	Nombres de simulations
OH ⁻	Les ions hydroxydes
p	Nombre de nœuds de sortie
P	Nombre de modèles d'entraînement
PDF	Fonctions de distribution de probabilité
P _f	La probabilité de défaillance
PRNG	Un générateur de pseudo-nombres aléatoires
R	Coefficient de corrélation
R _e	Résistance électrique
RNA	Réseaux de neurones artificiels
R _p	La résistance de polarisation
R (t)	La variable de résistance
S	La surface d'armature polarisée
SIE	La spectroscopie d'impédance électrochimique
S (t)	La variable de charge
SORM	Méthode de fiabilité du second ordre
t	La période d'exposition
t _i	Une composante de la sortie souhaitée T
t _{ini}	le temps d'initiation à la corrosion
U	suit une loi uniforme sur (0,1)
V	La différence de potentiel
V _{corr}	La vitesse de corrosion
W	Les matrices de pondération optimales
x	L'épaisseur de l'enrobage de béton
(X _n) _n	Suite de variables aléatoires
Y	Un vecteur de sortie
y _i	une sortie d'ANN correspondante
Z	Fonction de transfert

Symboles Grecs

β	L'indice de fiabilité
γ	Le coefficient d'inhibition
ΔE	Différence de potentiel

Δi	Valeurs des courants enregistrés dans OCP
ρ_{Fe}	La masse volumique du fer
$\tau \%$	Le taux d'inhibition
ϕ	La loi de distribution de Gauss de moyenne nulle et d'écart-type unitaire

Liste des figures

Chapitre I :

<i>Figure I. 1 Conditions d'exposition en environnement marin (Deby, 2008).</i>	7
<i>Figure I. 2 Dégradation schématique des armatures au cours du temps selon le diagramme de Tuutti (Tuutti, 1982).</i>	9
<i>Figure I. 3 Processus électrochimique de corrosion par les chlorures (Ollivier et Vichot, 2006).</i>	10
<i>Figure I. 4 Représentation d'un état limite (Hyvert, 2009).</i>	18
<i>Figure I. 5 Les principes d'une analyse de fiabilité en fonction du temps (Gjørsv, 2011).</i>	20
<i>Figure I. 6 Représentation graphique du principe des méthodes FORM et SORM (Hyvert, 2009).</i>	22

Chapitre II :

<i>Figure II. 1 Circuit d'électrode de référence (ASTM, 2009).</i>	30
<i>Figure II. 2 Exemple d'une carte de zones présentant le risque de corrosion (AusculTECH, 2013).</i> ...	31
<i>Figure II. 3 Schéma de principe de la mesure de la résistivité électrique d'un béton par la méthode Wenner (Naar, 2006).</i>	32
<i>Figure II. 4 Mesure de résistivité d'un enrobage de béton, par polarisation d'une armature (Naar, 2006).</i>	33
<i>Figure II. 5 Représentation de Stern pour des valeurs de surtension de l'ordre de 20 mV autour du potentiel en circuit ouvert (Cu_7Sn, $v = 100 \text{ mV.s}^{-1}$, $\omega = 1000 \text{ tours.min}^{-1}$) (Gabrielli et al, 2007).</i>	35
<i>Figure II. 6 Représentation, dans le plan de Nyquist, de l'impédance électrochimique, dans le cas d'un processus de transfert de charge et circuit électrique équivalent (Rahmouni, 2005).</i>	36
<i>Figure II. 7 Principe générale de la SIE (Muller, 2010).</i>	36
<i>Figure II. 8 Résultats par mesure visuel, radar, potentiel et résistivité électrique de la corrosion d'une dalle (Dous et al, 2002).</i>	38
<i>Figure II. 9 types de disposition de deux transducteurs piézoélectriques.</i>	40
<i>Figure II. 10 Diagrammes d'Evans montrant le déplacement du potentiel de corrosion dû à la présence d'un inhibiteur de corrosion (Constantine, 2011).</i>	46

Chapitre III :

<i>Figure III. 1 illustration du réseau avec une seule couche de neurones (Da Silva et al, 2017).</i>	55
<i>Figure III. 2 Réseau direct entièrement connecté avec une couche cachée et une couche de sortie (Haykin, 1999).</i>	56
<i>Figure III. 3 Réseau récurrent sans boucles d'auto-retour et sans neurones cachés (Haykin, 1999).</i> .	56
<i>Figure III. 4 Réseau récurrent avec neurones cachés (Haykin, 1999).</i>	57
<i>Figure III. 5 Diagramme schématique d'un nœud typique (ASCE, 2000).</i>	58

Chapitre IV :

<i>Figure IV. 1 Modèle de discrétisation à 2 dimensions.</i>	69
<i>Figure IV. 2 L'effet du nombre de simulation sur le P_f.</i>	71
<i>Figure IV. 3 L'effet du nombre de simulation sur le $COV(P_f)$.</i>	72
<i>Figure IV. 4 L'Effet de la distance d'autocorrélation sur la probabilité de défaillance dans le cas d'un champ aléatoire $L_x = L_y$.</i>	73
<i>Figure IV. 5 L'effet de la distance d'autocorrélation verticale L_y sur la probabilité de défaillance pour différentes valeurs de L_x.</i>	74

<i>Figure IV. 6 L'effet de la distance horizontale d'autocorrélation L_x sur la probabilité de défaillance pour différentes valeurs de L_y.</i>	75
<i>Figure IV. 7 Influence des coefficients de variation du revêtement "c_i" sur les PDF.</i>	77
<i>Figure IV. 8 Influence des coefficients de variation de la concentration en chlorure sur la surface "C_s" sur les PDF.</i>	78
<i>Figure IV. 9 Influence des coefficients de variation de la concentration seuil en chlorure "C_{th}" sur les PDF.</i>	79
<i>Figure IV. 10 Influence des coefficients de variation du coefficient de diffusion effectif du chlorure "D_c" sur PDF.</i>	80
<i>Figure IV. 11 Influence de la variation de la distribution de probabilité des coefficients de variation du revêtement "c_i" sur les PDF.</i>	81
<i>Figure IV. 12 Influence de la variation de la distribution de probabilité des coefficients de variation de la concentration seuil en chlorure "C_{th}" sur les PDF.</i>	82
<i>Figure IV. 13 Influence de la variation de la distribution de probabilité de la diffusion effective du chlorure "D_c" sur PDF.</i>	83
<i>Figure IV. 14 Influence de la variation de la distribution de probabilité des coefficients de variation de la concentration en chlorure sur la surface "C_s" sur les PDF.</i>	84

Chapitre V :

<i>Figure V. 1 Appareil CANIN+.</i>	89
<i>Figure V. 2 Diagramme géométrique des échantillons.</i>	91
<i>Figure V. 3 valeur du potentiel du mortier SIKATOP SF 126 échantillons en fonction du temps a) 1er cycle avant séchage, b) 2ème cycle, après séchage.</i>	93
<i>Figure V. 4 valeur du potentiel des échantillons de béton ordinaires en fonction du temps a) 1er cycle avant séchage, b) 2ème cycle, après séchage.</i>	94
<i>Figure V. 5 Variation du potentiel de corrosion et du temps</i>	97
<i>Figure V. 6 Corrélation entre les valeurs prédites et mesurées du potentiel de corrosion.</i>	98
<i>Figure V. 7 L'architecture de réseau neuronal utilisée pour le potentiel de corrosion.</i>	100
<i>Figure V. 8 Apprentissage, validation et test du modèle ANN pour l'estimation du potentiel de corrosion.</i>	102
<i>Figure V. 9 Résultats d'erreur entre les cibles et les sorties pour le potentiel de corrosion.</i>	103

Liste des tableaux

Chapitre II :

<i>Tableau II. 1 Interprétations de résistivité électrique du béton pour le risque de corrosion des aciers (NGUYEN, 2016).....</i>	<i>33</i>
<i>Tableau II. 2 Résistivité comme un indicateur de durabilité selon (Baroghel-Bouny, 2004)..</i>	<i>33</i>

Chapitre IV :

<i>Tableau IV. 1 Données d'entrée pour le moment d'initiation de la corrosion (Polder et Rooij, 2005, Polder et Rooij, 2003).</i>	<i>70</i>
<i>Tableau IV. 2 Effet de coefficients de variation de variables aléatoires sur le temps d'initiation de la corrosion.</i>	<i>76</i>

Chapitre V :

<i>Tableau V. 1 Valeurs des potentiels citées dans ASTM C-876-09 (ASTM, 2009).</i>	<i>89</i>
<i>Tableau V. 2 Analyse statistique du potentiel de corrosion des données des matériaux étudiés.</i>	<i>96</i>
<i>Tableau V. 3 Analyse statistique du potentiel de corrosion des matériaux étudiés.</i>	<i>96</i>
<i>Tableau V. 4 Estimation du carré R par rapport au temps avec différents modèles de régression d'estimation des courbes.</i>	<i>97</i>
<i>Tableau V. 5 Estimation du R² par rapport au temps avec différents modèles de régression d'estimation des courbes.</i>	<i>98</i>
<i>Tableau V. 6 Résultats de performance du modèle développé</i>	<i>101</i>

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La durabilité des structures en béton armé est devenue une préoccupation majeure à toutes les étapes de la construction : conception, construction et maintenance de ces structures. La durée de vie est largement liée à la durabilité du matériau utilisé. Par conséquent, le béton est considéré plus durable s'il résiste à la pénétration d'agents agressifs.

Contrairement aux actions mécaniques, les actions environnementales ne sont pas réversibles et accumulent des composants dangereux dans le béton, tels que les ions chlorures. La mauvaise estimation de la gravité des actions environnementales provoque un pourcentage élevé de dommages aux structures en béton armé, en particulier ceux causés par la corrosion.

Le temps d'initiation à la corrosion est un des facteurs clés pour la prévision de la durée de vie d'une structure en béton armé, car le risque de corrosion de l'acier dépend fortement de la qualité de la conception et de la construction de la couverture en béton. Ainsi, une stratégie de détection des paramètres les plus influents est nécessaire pour l'analyse probabiliste du temps d'initiation à la corrosion. Ces paramètres influent sur la variabilité de la réponse du système et réduisent considérablement le temps de calcul de l'analyse probabiliste. Cela présente également l'avantage de réduire le coût de la recherche expérimentale de nouveaux projets similaires, car les paramètres non influents ne nécessitent pas de recherche expérimentale approfondie sur leur variabilité.

La prise en compte des méthodes non destructives dans la prévention et la lutte contre la dégradation des structures en béton armé exposées à un milieu simulant le milieu marin de la méditerranée (3% de NaCl) a été réalisée. Les mesures reposent sur l'examen de l'évolution du potentiel de corrosion autour de l'acier et qui définissent les différents paramètres physiques décrivant l'état du système. L'un des grands avantages de ces types d'essais est le fait qu'ils sont faciles à mettre en œuvre, peuvent être réalisés rapidement et plus économiquement.

La fidélité des résultats n'est pas tout à fait exacte car plusieurs facteurs influencent ces résultats. La corrosion en tant que processus électrochimique est un système très complexe et non linéaire qui dépend de divers paramètres. L'évaluation et la quantification des processus de corrosion prennent beaucoup de temps et les fonctions mathématiques classiques ne permettent pas de prédire ces processus non linéaires.

De nos jours, la prédiction de la perte de corrosion des matériaux est possible par des méthodes d'intelligence artificielle. Cette dernière a été appliquée avec succès à de nombreux domaines du génie civil tels que la prévision, l'analyse des risques, la prise de décision, l'optimisation des ressources, la classification, la sélection, etc. Vu la complexité du

phénomène de corrosion, la plupart des modèles mathématiques ne parviennent pas à bien simuler le comportement complexe de ce problème. Les réseaux de neurones artificiels sont principalement utilisés dans des systèmes réels caractérisés par une non-linéarité élevée, une complexité considérable et une grande difficulté pour leur description mathématique formelle.

Le travail présenté comporte plusieurs objectifs, comprendre l'importance du phénomène de corrosion, conception d'un modèle du temps de l'initiation à la corrosion « t_{ini} » induit par les ions chlorures par la technique de MCS, analyser la technique de mesure non destructif du potentiel de corrosion ainsi le « t_{ini} », prédire ces paramètres en utilisant des corrélations ou les réseaux de neurones.

La thèse est constituée de cinq chapitres :

- Le premier chapitre est consacré à une synthèse bibliographique sur les objectifs du travail. Il présente une revue sur les différents aspects nécessaires à la mise en œuvre d'une approche probabiliste pour étudier le temps d'initiation à la corrosion des armatures dans les constructions en béton armé.
- Le deuxième chapitre est réservé à une revue des différentes procédures utilisées pour les mesures non destructives pour évaluer la corrosion et les techniques pour lutter contre ce phénomène.
- Le troisième chapitre est consacré à une revue globale de l'utilisation des réseaux de neurones pour les problèmes en génie civil.
- Le quatrième chapitre vise à prédire le temps d'initiation à la corrosion (t_{ini}) des structures en béton dans des environnements chlorurés en utilisant une approche de variabilité spatiale. Cette approche prend en compte la variabilité spatiale des différents paramètres de la structure, tels que la concentration de chlorure en surface (C_s), le seuil de concentration (C_{th}), le coefficient de diffusion (D_c) et le revêtement (c_t) figurant dans le modèle simple.
- Le cinquième chapitre porte sur la mesure non destructive du potentiel de corrosion. La variabilité du potentiel a reflété la nature aléatoire du phénomène d'où le développement d'un modèle basé sur des réseaux de neurones artificiels permettant de prédire l'état de corrosion avec un potentiel précis.

Une conclusion générale est donnée en fin de cette thèse.

CHAPITRE I: RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

1 Introduction

En règle générale, le béton armé donne de bons résultats en termes de performance structurelle et de durabilité. Pour la plupart des ouvrages en béton armé, la corrosion des armatures est l'un des principaux phénomènes décisifs pour la durée de vie de la structure. La pénétration des agents agressifs est la cause physico-chimique la plus importante qui réduit la durée de service des ouvrages en béton armé par la corrosion des armatures. Le premier objectif de cette synthèse bibliographique est de présenter le phénomène physico-chimique qui gouverne le processus de corrosion par l'action des ions chlorures. Ensuite, nous parlerons de la démarche probabiliste utilisée pour appréhender la durabilité des ouvrages en béton, en particulier la dégradation des structures par la corrosion.

2 Le matériau étudié

2.1 Le béton

Le béton est un matériau obtenu d'un mélange homogène de ciment, d'eau, de granulats (sable, gravier, caillou, etc.) et d'adjuvants dans des proportions bien déterminées et en fonction des caractéristiques voulues. L'eau est (avec le ciment) l'ingrédient le plus important du béton. Elle assure au béton ses propriétés rhéologiques en intervenant dans ses réactions d'hydratation et par suite dans ses propriétés mécaniques (Baroghel-Bouny, 1994). Les granulats, appelés aussi agrégats sont des éléments inertes composés de roches carbonatés. Leurs ajouts au liant hydraulique aident à former une pierre artificielle. Ils constituent le squelette du béton en participant à sa résistance mécanique en conférant sa compacité (Nahali, 2015).

2.2 Hydratation des ciments

Le ciment mélangé avec l'eau, il forme une pâte cimentaire qui fait prise et durcit suite à des réactions de dissolution-précipitation. Après durcissement, le mélange conserve sa résistance et sa stabilité, même sous l'eau. Car le ciment a le rôle d'un liant hydraulique. Parmi les différents types de ciments, un des plus couramment utilisé est le ciment Portland composé de clinker, de gypse (5%) et éventuellement d'ajouts (< 5%). Le clinker est obtenu par calcination vers 1450°C d'un mélange de calcaire et d'argile en proportion moyenne 80% - 20% (Renaut, 2017, Bouregaya, 2018).

L'hydratation du ciment est l'ensemble de réactions chimiques qui se produisent entre le ciment et l'eau dès la mise en contact de ces deux phases. L'hydratation du ciment s'opère

par dissolution des solides anhydres, suivie d'une précipitation des hydrates formant une structure mécaniquement résistante (Sail, 2013). Pendant l'hydratation, les principaux hydrates formés sont :

- les silicates de calcium hydratés (C-S-H) qui se présentent sous la forme de feuillets avec un pourcentage des hydrates formé de 60-70% massique. Ils sont considérés comme les principaux acteurs du développement des résistances mécaniques de la matrice cimentaire.
- La portlandite (CH) qui se présente sous forme de plaquettes hexagonales avec un pourcentage des hydrates formés de 20-25% massique. Elle est le composé responsable de la forte alcalinité du béton ($12,4 < \text{pH béton} < 13,5$).
- L'ettringite AFt qui se présente sous la forme d'aiguilles hexagonales.
- Le monosulfoaluminate AFm qui se présente sous la forme de plaquettes hexagonales (Mai-Nhu, 2013).

Les produits d'hydratation majeurs sont les silicates de calcium hydratés C-S-H et la portlandite ou hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ou CH. Les quantités de C-S-H et de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ formées dépendent essentiellement du rapport eau/ciment noté E/C et du temps d'hydratation (Ghosh et Handoo, 1980, Struble et al, 1980, Montanaro et al, 1988)

2.3 L'armature du béton

Le béton est résistant à la compression par contre, il est moins résistant lorsqu'il est soumis à des efforts de traction. Pour améliorer cette propriété mécanique, on dispose dans les parties tendues des armatures généralement en acier. Il est résistant en tension mais également économique, afin de ne pas trop augmenter le coût du béton et considéré durable autant que le béton lui-même. Vis-à-vis de la corrosion, l'acier inoxydable est plus résistant qu'un acier ordinaire (McDonald et al, 1995). Toutefois, son coût élevé limite son utilisation. A cet effet, dans la plupart des constructions en béton armé, les constructeurs font plutôt appel à l'acier ordinaire malgré sa durée de vie limitée.

3 Importance du phénomène de corrosion

3.1 Contexte

Le béton armé est l'un des produits le plus utilisé dans la réalisation des constructions situés en sites marins. La grande partie de la dégradation de ces constructions revient au transfert des ions chlorures contenus dans l'eau de mer à travers l'enrobage par la corrosion

des armatures et ainsi en affectant la durabilité de l'ouvrage et augmentant les coûts de maintenance, de réparation et de reconstruction.

En site marin (figure I.1), les mécanismes de dégradation sont fonction de quatre zones d'exposition de l'ouvrage cités comme suit :

- La zone atmosphérique : les risques de corrosion sont modérés en raison des faibles concentrations en chlorures et en humidité ;
- La zone immergée : les risques de corrosion sont plus limités car les chlorures ne pénètrent que par diffusion ;
- la zone d'éclaboussures et la zone de marnage : le risque de corrosion est le plus important car les teneurs en chlorures et en oxygène sont très élevées, l'alternance des cycles d'humidification / séchage a pour effet d'accélérer le processus de transfert des chlorures par diffusion et convection dans un béton partiellement saturé (Soufi, 2013).

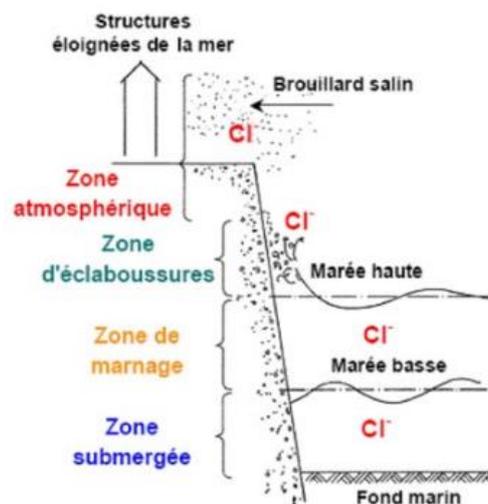


Figure I. 1 Conditions d'exposition en environnement marin (Deby, 2008).

3.2 Définition

Généralement, la corrosion est une réaction chimique ou électrochimique entre un métal et son environnement qui entraîne une dégradation du matériau et de ses propriétés. Il existe trois types de corrosion : la corrosion chimique, la corrosion électrochimique et la corrosion bactérienne. Nous décrivons uniquement la **corrosion électrochimique** dont l'importance est prédominante dans le domaine du génie civil.

La corrosion électrochimique, appelée aussi corrosion humide, se produit lorsqu'il existe des hétérogénéités, soit dans le métal, soit dans la solution corrosive. Ces hétérogénéités déterminent la formation à la surface du métal d'une pile avec un passage d'un courant électrique qui circule entre les électrodes. Les zones appelées anodes (électrode où se produit la réaction d'oxydation) sont attaquées et les zones appelées cathodes (électrode où se produit la réaction de réduction : déposition à la surface du métal) sont le siège d'une ou plusieurs réactions de réduction.

En ne considérant que le processus de corrosion électrochimique au contact de milieux dont l'eau est le solvant principal (cas des constructions en béton armé), nous distinguons plusieurs modes de corrosion : uniforme, galvanique, caverneuse, par piqure, sous contraintes et intergranulaire. Dans ce présent travail, nous nous contenterons d'étudier la corrosion par piqure (attaque par des ions chlorures).

3.3 Processus et mode de corrosion du béton armé

3.3.1 Les étapes de corrosion des armatures dans le béton armé

Le béton est un matériau poreux et réactif, susceptible de se dégrader physiquement et chimiquement en contact avec son environnement. En générale, il est considéré que la corrosion ne s'amorce que lorsque les agents agressifs ont pénétré le béton sain et ont atteint les armatures. Selon Tuutti (Tuutti, 1982), l'évolution de la corrosion des armatures du béton armé s'effectue généralement en deux phases (Figure I.2) :

- La première phase appelée « phase d'initiation du processus de corrosion » comporte deux étapes : La 1ère où l'armature est dite « à l'état passif ». La solution alcaline dans les pores du béton, produit une oxydation rapide en surface de l'acier pour former une couche protectrice appelée film passif (Ghods et al, 2009 ; Struble et al, 1980). Ce phénomène n'arrête pas la réaction de corrosion, mais limite considérablement sa progression à un taux de quelques microns par année. Durant la 2ème étape, les éléments agressifs, tels que les chlorures (Cl^-), présents dans le milieu environnant, pénètrent dans le béton en quantités suffisantes pour détruire le film passif. L'amorçage de la corrosion dépend de la cinétique de diffusion des chlorures, et du taux des chlorures liés (Baroghel-Bouny et al, 2008).
- La deuxième phase correspond à la propagation de la corrosion et l'armature est dite « à l'état actif ». elle commence lorsque ces corps agressifs dépassent le seuil d'initiation au niveau de la surface des armatures. Elle correspond à la croissance de la

rouille qui va alors entrainer un gonflement qui peut ensuite faire éclater le béton d'enrobage. A ce stade, les réparations deviennent lourdes et coûteuses.

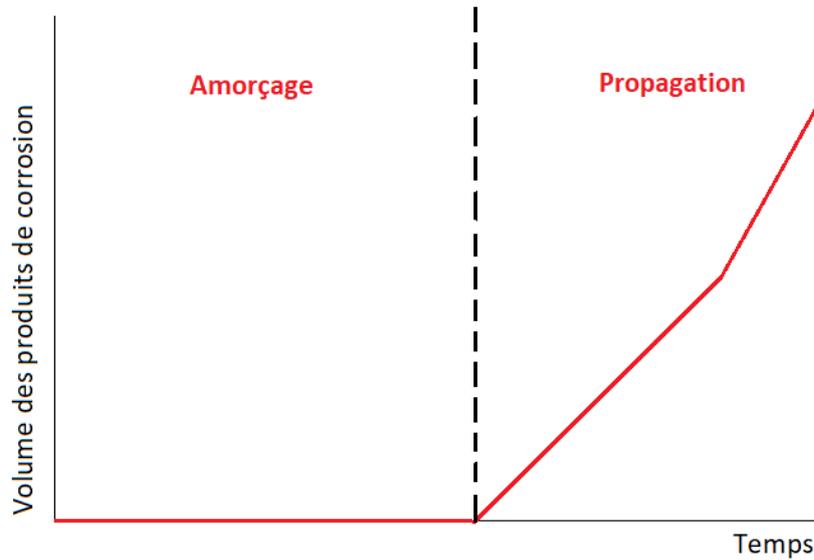


Figure I. 2 Dégradation schématique des armatures au cours du temps selon le diagramme de Tuutti (Tuutti, 1982).

3.3.2 Mécanisme de corrosion induit par les ions chlorures

Dans un béton sain, les armatures sont protégées de la corrosion par un phénomène de passivation. L'alcalinité du béton (pH de l'ordre de 13) génère la formation d'une couche ou d'un film passivant d'oxydes ou d'hydroxydes de fer sur la surface des armatures d'une épaisseur variable entre 10^{-3} et 10^{-1} μm (Poupard, 2001). En présence d'ions chlorures, provenant de l'eau de mer, la corrosion des aciers est observée. La diminution du pH est causée par la pénétration des ions chlorures (montrer sur la figure I.3) dans le réseau poreux du béton en modifiant la morphologie du film passif, qui protège l'armature, par la production des ions FeCl^{3-} qui consomment les ions OH^- présents (Ollivier et Vichot, 2006). Ces réactions conduisent à la destruction du film protecteur et engendrent l'apparition des piles électrochimiques de corrosion. Les réactions qui se produisent sont les suivantes (Amarni, 2012 ; Soufi, 2013) :

Dans la zone anodique, l'acier se dissout :



Les ions ferreux Fe^{2+} peuvent s'oxyder ultérieurement en ions ferrique Fe^{3+} ($\text{Fe}^{3+} + e^- \leftrightarrow \text{Fe}^{2+}$).

Dans la zone cathodique, les électrons libérés sont consommés par deux réactions chimiques :

La réaction (2) correspond à la réduction de l'oxygène dissous dans l'eau :



La réaction (3) correspond à la réduction du proton avec dégagement d'hydrogène :



Les ions hydroxydes OH^- formés dans la solution se combinent aux ions ferreux Fe^{2+} et forme de l'hydroxyde ferreux à la surface de l'acier :



Les hydroxydes et les ions ferreux se déplaçant dans l'électrolyte, se combinent pour former de l'hydroxyde ferrique, qui se transforme en rouille déposée sur l'acier. Les réactions se poursuivent et conduisent à la formation de produits de corrosion expansifs (Koleva et al, 2006). Les produits de corrosion occupent un volume plusieurs fois supérieur au volume initial de l'acier, à ce stade leur formation peut entraîner une fissuration au niveau du béton de l'enrobage et son éclatement ou son feuilletage. De ce fait, sur le plan structurel, la corrosion est à l'origine d'une perte de section des armatures et une perte d'adhérence entre le béton et l'acier.

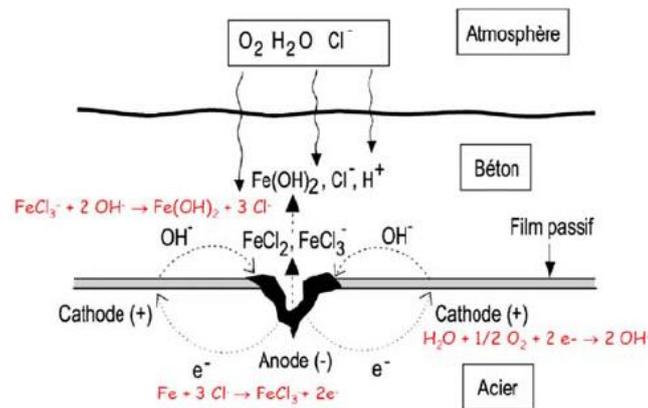


Figure I. 3 Processus électrochimique de corrosion par les chlorures (Ollivier et Vichot, 2006).

3.3.3 Seuil d'amorçage de la corrosion due aux chlorures

La dépassivation de l'armature dépend non seulement de la concentration en chlorure mais aussi du rapport Cl^-/OH^- . Toutefois, la difficulté de mesurer la concentration des ions OH^- a incité les chercheurs à utiliser un autre paramètre qui est le pourcentage en ions

chlorures (totaux ou libres) par rapport à la masse du ciment ou du béton. De nombreuses études ont déjà été consacrées à la détermination de cette valeur et montre que ce seuil peut varier d'une façon importante de 0,35 à 3% (Alonso et al, 2000). Le seuil de chlorure pour l'amorçage de la corrosion des armatures ne semble pas être une valeur unique et il dépend de plusieurs facteurs, tels que : les proportions de mélange de béton, le type de ciment, contenu C_3A du ciment, les matériaux mélangés, rapport eau/ciment, la température, par rapport l'humidité, les conditions de surface d'acier et la source de pénétration des chlorures (Deby, 2008). Néanmoins, il est souvent admis la valeur du chercheur Hausmann pour le rapport Cl^-/OH^- égale à 0,6 (Hausmann, 1967).

Les chlorures sont présents dans la matrice cimentaire sous deux formes :

- Chlorures libres : soluble dans l'eau se trouvent sous forme ionique dans la solution interstitielle.
- Chlorures liés ou fixés : ceux fortement adsorbés sur les C-S-H et ceux chimiquement liés dans la matrice cimentaire sous forme de composés tels que les chloro-aluminates de calcium (C_3A important pour la fixation).

Les chlorures libres sont les plus pertinents puisque ce sont eux qui conduisent à la corrosion des armatures. De ce fait, la corrosion due aux chlorures est un phénomène dangereux, parce qu'elle se produit localement et entraîne une réduction importante de la section d'armature.

3.4 Autres paramètres influençant le processus de corrosion

Hormis les chlorures, le développement de la corrosion de l'acier dépend aussi d'autres paramètres qui entrent en jeu en influencent l'initiation, la vitesse et les produits de corrosion. Ces paramètres sont résumés dans ce qui suit.

3.4.1 La composition du béton

Le béton assure une barrière physique et chimique contre la pénétration des chlorures, de l'humidité et de l'oxygène. Il assure une protection de l'armature contre l'initiation de la corrosion du fait de son pH élevé de l'ordre de 12,5 à 13. Toutefois, la porosité du béton fait que la corrosion se produit et se propage en affectant la durabilité de l'ouvrage et remettant en cause l'efficacité de cette protection. Le choix de la formulation du béton et de la nature de ses principaux constituants forme une approche pour augmenter la résistance à la corrosion du béton. On peut dire que plus le matériau a une bonne compacité plus le processus de corrosion sera retardé. Aussi, Le ciment participe à la fixation des chlorures au sein des hydrates. Une bonne fixation participe à retarder l'initiation de la corrosion.

3.4.2 Le taux d'oxygène et d'humidité

L'oxygène et l'humidité jouent un rôle majeur dans le processus de corrosion. La vitesse de corrosion en dépend fortement. Un taux élevé de saturation de l'humidité dans le réseau poreux du matériau augmente le courant de corrosion mais diminue l'accès de l'oxygène, un taux trop bas favorise l'accès de l'oxygène mais ralentit les courants de corrosion. Par conséquent, un taux élevé d'humidité sans arriver à la saturation augmente la vitesse de corrosion (Pietro, 1996 ; Shamsad, 2003). Une vitesse de corrosion élevée correspond à un béton présentant une humidité relative sans arriver à la saturation varie entre 70% et 80% (Blankwoll, 1997). La présence d'oxygène affecte l'évolution des réactions cathodiques. A la cathode, il se combine avec l'eau et les électrons pour former les ions hydroxydes OH⁻. A l'anode, l'oxygène modifie également la composition chimique des produits de corrosion (Poupard, 2001).

3.4.3 La température

La variation de la température influe la vitesse de corrosion. D'après Liu (Liu et Wayer, 1998), une augmentation de la température accroît la vitesse de corrosion. Cela est considéré vrai pour le béton carbonaté et celui attaqué par les ions chlorure. L'équation I.5 montre la relation entre le courant de corrosion et la température.

$$i_{corr} = i_0 \cdot e^{2283 \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)} \quad (I. 5)$$

D'où :

$i_0 = i_{corr}$ (A.cm⁻²) à T₀ (T₀ approximativement entre 25 et 40°C).

T, T₀ : Température absolue (K).

L'effet de la température sur le taux de corrosion dans le béton est très complexe et contrôlé par l'interaction de plusieurs facteurs. D'après Cornell et Schwertmann (Cornell et Schwertmann, 2003), la température avait une influence directe sur la nature des oxydes formés dans le béton. D'autre part, Les processus anodiques (oxydation des composants de l'acier) et cathodiques (réduction des protons en milieu acide) sont activés thermiquement et font augmenter la vitesse de corrosion. En situation de corrosion active, une élévation de 10 à 20°C multiplie par deux sa vitesse d'après Uhlig (Uhlig, 1983). L'augmentation de la température de 20 à 70°C conduit à une réduction du seuil de chlorure nécessaire pour amorcer la corrosion. A l'augmentation de la température, la concentration en oxygène diminue dans la solution interstitielle du béton cela conduit à l'accroissement de la résistivité du béton (Zivica et al, 1997).

3.4.4 La résistivité électrique du béton

La résistivité électrique représente la capacité du matériau à s'opposer au courant électrique. Le taux de corrosion est inversement proportionnel à la résistivité. Dans le cas d'une résistivité $>1000\Omega.m$, pour un béton sec, le risque de corrosion est négligeable. Pour une résistivité du béton faible, pour un béton très humide, le courant de corrosion sera plus élevé (Polder, 2001). La résistivité du béton est influencée par le taux de saturation et la composition du matériau.

Nous nous sommes intéressées dans ce paragraphe aux paramètres fortement variables comme la température, la composition du béton, l'humidité et la résistivité du béton. D'autres facteurs ont aussi une influence sur le processus de corrosion et qui sont (Angst et al, 2009) :

- l'état d'interface acier-béton ;
- la concentration des ions hydroxyde dans la solution interstitielle (pH) ;
- le potentiel électrochimique de l'acier ;
- les conditions de surface de l'acier ;
- le rapport E/C ;
- le degré d'hydratation ;
- la composition chimique de l'acier ;
- le type de cation accompagnant l'ion chlorure.

4 Modèle du temps de l'initiation à la corrosion induit par les chlorures

La durabilité des structures en béton armé peut être réduite par des processus de dégradation d'origine environnementale et/ou fonctionnelle comme la pénétration des chlorures. Des recherches considérables ont été effectuées au cours des deux dernières décennies pour mieux comprendre les mécanismes impliqués dans la corrosion induite par les chlorures des barres d'armature noyées dans le béton. La corrosion des armatures commence quand un niveau seuil de chlorures atteint les armatures en aciers. Le temps d'initiation de la corrosion, t_{ini} est le temps nécessaire pour que cette concentration seuil de chlorures atteigne les armatures. Des solutions de forme fermée pour calculer t_{ini} ont été proposées sur la base de la solution de la loi de Fick et du modèle Duracrete (Duracrete 2000 ; Bastidas-Arteaga, 2009).

4.1 Le modèle simplifié

Le modèle simplifié actuellement utilisé pour décrire la pénétration des chlorures dans le béton est montré sous sa forme mathématique dans l'équation (I.6), la concentration en ions chlorure libres $C(x,t)$ à une profondeur x après un temps t pour un milieu semi-infini est:

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

Des solutions pour calculer t_{ini} ont été proposées sur la base de la solution de la loi de Fick et sur le modèle DuraCrete. Par exemple, pour la solution classique de la loi de Fick (Eq. I.6) : t_{ini} est obtenu lorsque $C(X, t)$ est égal à C_{th} et x est égale à c_t (l'épaisseur de l'enrobage de béton) comme suit :

$$C_{th} = C_s \left[1 - \operatorname{erf}\left(\frac{c_t}{2\sqrt{D_c t_{ini}}}\right) \right] \quad (\text{I.7})$$

$$t_{ini} = \frac{c_t^2 \left[\operatorname{erf}^{-1}\left(1 - \frac{C_{th}}{C_s}\right) \right]^{-2}}{4D_c} \quad (\text{I.8})$$

Avec :

t_{ini} : Le temps d'initiation de la corrosion, est calculé en comparant la concentration de chlorure dans la profondeur du béton $C(ct, t)$ avec le seuil de concentration C_{th} .

Puis t_{ini} est obtenue lorsque la concentration de chlorure à la couverture des barres atteint le seuil de concentration C_{th} . Le seuil de concentration du chlorure C_{th} est défini comme la concentration de chlorure dans laquelle la couche de rouille passive de l'acier est détruite et la réaction de corrosion commence (Lounis, 2003 ; Lounis et Daigle, 2008).

4.2 Le modèle proposé par DuraCrete

Le modèle proposé par DuraCrete pour la modélisation de la corrosion due à l'infiltration de chlorure comprend des paramètres environnementaux et matériels. De plus, le coefficient de diffusion est modélisé en fonction du temps et un facteur d'âge est introduit pour refléter la diminution du coefficient due aux influences matérielles et environnementales. Le modèle peut être vu dans l'équation (I.9).

$$C(x, t) = C_s \left[1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{k_e k_t k_c D_0 \left(\frac{t_0}{t}\right)^n t}}\right) \right] \quad (\text{I.9})$$

Avec :

- D_0 : le coefficient de diffusion mesuré à un temps de référence t_0 ;
- k_e : correction des variables environnementales D_0 pour tenir compte de l'influence de l'environnement d'exposition ;
- k_t : correction de variable D_0 pour tenir compte de l'influence de la méthode d'essai ;
- k_c : variable d'exécution corrigeant D_0 pour tenir compte de l'influence de la méthode de durcissement ;
- n : le facteur âge qui prend en compte la dépendance temporelle de D_0 ;
- t : la période d'exposition.

D'après l'équation (9), le temps nécessaire à l'initiation de la corrosion peut être déterminé comme suit:

$$t_{ini} = \left(\frac{c_t^2 \left[\text{erf}^{-1} \left(1 - \frac{c_{th}}{c_s} \right) \right]^{-2}}{4k_e k_t k_c D_0 (t_0)^n} \right)^{\frac{1}{1-n}} \quad (\text{I.10})$$

5 Conception basée sur la durabilité

5.1 Méthodes de conceptions actuelles

Dans les codes de conception actuels, certaines limitations sont données en fonction de la durabilité des structures, sur les conditions environnementales auxquelles les structures sont exposées (Şengül, 2011). Ces limitations sont : rapport eau/ciment maximal, teneur minimale en ciment et résistance minimale à la compression du béton.

Les facteurs liés à la composition du béton sont l'une des causes des problèmes de durabilité rencontrés dans les structures en béton, mais aussi les défauts de qualité de la structure. Par exemple, la profondeur réelle de l'enrobage du béton au niveau de la structure peut être inférieure à la valeur spécifiée ou la perméabilité au chlorure de béton peut être supérieure aux exigences de la spécification. Pour une même structure, les propriétés structurelles et les caractéristiques du béton peuvent différer considérablement d'un élément à l'autre ou même au sein d'un même élément (Gjørsv, 2004).

La plus part des normes ne prennent pas en compte la dispersion dans les propriétés structurelles. Les spécifications pour la composition du béton, telles que le rapport eau/ciment maximal et la teneur minimale en ciment du béton, sont jugées suffisantes. L'EUROCODE 2 (norme NF EN 1992-1-1) recommande certaines profondeurs de l'enrobage du béton pour une durée de vie de 50 ans à condition que ces profondeurs soient atteintes. Il n'est pas toujours vrai de supposer qu'une longue durée de vie puisse être obtenue par certains critères

prédéfinis et que des problèmes de durabilité rencontrés dans les bâtiments existants confortent cette observation (Gjørsv, 2003).

Par conséquent, d'autres méthodes sont nécessaires pour déterminer la performance à long terme des structures (Cather et Marsh, 1997 ; ACI, 2000). Outre les exigences de composition du béton telles que le rapport eau/ciment ou la teneur en ciment, des propriétés telles que la profondeur de l'enrobage de béton, les propriétés de transport de divers ions dans le béton, le taux de détérioration et leur dispersion doivent être prises en compte et évaluées en même temps que les états limites (ISO, 2008).

5.2 L'approche probabiliste

Pour appréhender la durabilité des ouvrages en béton, le recours à une démarche probabiliste est devenu assez fréquent. Il est vraisemblable que les textes normatifs et réglementaires s'appuient davantage sur des modèles probabilistes pour fixer des spécifications sur les obligations de moyens et de performances dans un souci de durabilité. Les environnements les plus concernés sont ceux pour lesquels la carbonatation ou la présence de chlorures est déterminante.

Jusqu'au XIX^{ème} siècle, la sécurité des constructions dépendait de l'expérience des constructeurs qui étaient en grande partie conçues et exécutées de manière empirique. Les progrès accomplis dans la connaissance du fonctionnement mécanique des structures, la meilleure prise en compte des charges appliquées et le contrôle de la résistance et de la régularité de production des matériaux, ont permis de préciser le coefficient global de sécurité et de l'adapter selon l'ouvrage. Cependant, cette approche déterministe a montré ses limites et la notion de sécurité sous un angle probabiliste fut introduite peu à peu au milieu du XX^{ème} siècle (Hyvert, 2009).

Une analyse purement déterministe est réalisée lorsque la variabilité des paramètres n'est pas prise en compte, où des valeurs uniques (les moyennes) sont attribuées aux grandeurs. Ceci, bien sûr, n'est pas réaliste. L'approche probabiliste prend en compte la variabilité des phénomènes en représentant une grandeur par la loi de distribution de sa valeur (densité de probabilité de la variable aléatoire). Les méthodes de fiabilité basées sur les probabilités peuvent fournir une description plus réaliste du monde réel, en intégrant les incertitudes dans l'analyse et en utilisant les ressources rares de manière plus efficace.

Selon l'approche probabiliste, un ouvrage est réputé sûr si sa probabilité de défaillance, P_f , est inférieure à une valeur donnée à l'avance, la probabilité cible : P_f ciblé

(risque de défaillance acceptable). La valeur de la probabilité cible est conditionnée par de nombreux facteurs, variant selon l'ouvrage, ses caractéristiques d'implantation et ses propriétés de service, tels que :

- la durée de vie escomptée ;
- les risques de vieillissement ;
- les conséquences engendrées par la ruine de l'ouvrage ;
- des critères économiques (valeur de remplacement, coût d'entretien,...) (Hyvert, 2009).

5.2.1 Théorie de la fiabilité

Les problèmes d'ingénierie typiques tels que la conception, l'évaluation, l'inspection et la planification de la maintenance peuvent être considérés comme des problèmes de décision soumis à une combinaison d'incertitudes inhérentes, de modélisation et statistiques. Au cours des deux dernières décennies, le domaine de la théorie de la fiabilité structurelle a non seulement mûri d'un point de vue scientifique et méthodique, mais a également acquis une importance croissante dans la pratique dans de nombreux domaines d'application de l'ingénierie en particulier le génie civil (Faber et Vrouwenvelder, 2008).

Le problème de base à résoudre dans la fiabilité des constructions consiste à vérifier que les résistances R restent supérieures aux sollicitations S et d'estimer la probabilité de défaillance. D'où, R et S sont le résultat de modélisations analytiques ou numériques, impliquant la prise en compte d'un plus grand nombre de variables aléatoires puisque leurs valeurs sont inconnues. Généralement, pour caractériser des variables aléatoires on associe des fonctions de répartition et la dérivée de cette fonction est désignée comme la « densité de probabilité ». Les principales caractéristiques des variables aléatoires sont les moments statistiques (espérance, variance, covariance, etc..) et la forme des lois de probabilité (Gauss, Galton, Gumbel, Fréchet, etc..) (Hyvert, 2009).

5.2.2 Fonction d'état limite

La défaillance dans l'analyse de fiabilité est déterminée par le concept de fonction d'état limite ou de fonction de performance. ils peuvent traduire une défaillance structurale (effondrement, perte d'équilibre, instabilité) pour les états limites ultimes, une défaillance de fonctionnement (flèche ou déplacement excessif) et/ou d'aspect (fissuration) pour les états limites de services, ou bien encore une défaillance à l'égard de la pérennité (dégradation de

l'enrobage des armatures par des agents agressifs et perte d'alcalinité de la solution interstitielle) prémisses d'une défaillance plus sévère, pour les états limites de durabilité.

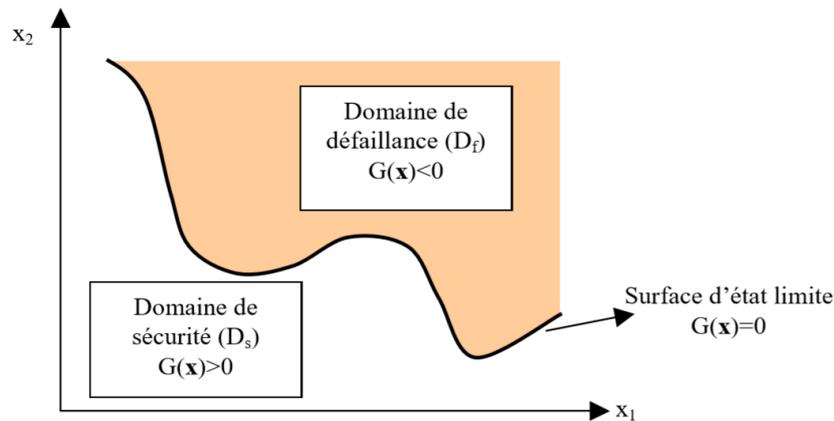


Figure I. 4 Représentation d'un état limite (Hyvert, 2009).

En fait, la fonction d'état limite est définie entre une performance correcte et incorrecte. Si cette valeur de fonction est positive ($g(X) > 0$), on peut dire que la région est sûre ou la performance est appropriée (domaine de sécurité) par contre si elle est négative ($g(X) < 0$), la performance est inappropriée on se trouve alors dans le domaine de défaillance (Shayanfar et al, 2015). La condition optimale est calculée en fonction de la limite entre les régions appropriées et inappropriées ($g(x) = 0$ surface d'état limite) voir figure I.4.

D'où l'objectif principal de la conception structurelle des structures en béton est toujours d'établir les effets combinés des charges (S) et de la résistance à supporter les charges (R) de telle sorte que le critère de conception devienne :

$$R(t) > S(t) \text{ ou } G = R(t) - S(t) > 0 \quad (\text{I.11})$$

D'où R (t) indique la variable de résistance, S (t) représente la variable de charge et G est la fonction d'état limite.

Les avantages de la définition des états limites sont qu'ils fournissent une bonne base pour le processus de conception et facilitent la planification de l'inspection et de la maintenance (DURACRETE, 1999). Il est possible de procéder à une optimisation économique si, par exemple, des actions de réparation peuvent être planifiées à l'avance de manière efficace. Si, par exemple, la défaillance d'une poutre en béton est définie comme un état limite, une optimisation économique peut permettre de conclure qu'il est préférable d'arrêter la carbonatation ou l'entrée de chlorure au point où le ferrailage commence à se corroder.

5.2.3 Probabilité de défaillance

La défaillance de l'élément est liée au dépassement de la résistance par la sollicitation : $S > R$, étant donné que tous les facteurs qui affectent R et S présentent également une dispersion et une variabilité élevées, les procédures de conception établies l'ont correctement prise en compte. En principe, la conception de la durabilité adopte la même approche que celle de la conception structurelle (Gjørv, 2011). Toute autre expression mathématique de la défaillance doit se traduire identiquement par la convention suivante : expression positive en cas de non défaillance (ou de performance), négative sinon.

Du point de vue de la durabilité, la résistance de la structure $R(t)$ peut diminuer avec le temps. Par exemple, le diamètre de l'armature est réduit à mesure que la corrosion de l'armature en acier dans le béton augmente. Ce phénomène conduit à l'apparition des fissures et une réduction de l'adhérence entre l'acier et le béton. En conséquence, la capacité de charge de l'élément structurel est réduite (Mehta, 1991). Le paramètre de charge $S(t)$ peut toutefois rester constant ou augmenter avec le temps. Comme la résistance $R(t)$ diminue et que l'effet de charge $S(t)$ augmente avec le temps, l'échec de la probabilité augmente avec le temps (ISO, 2008).

La résistance et la durabilité de la structure changent avec l'âge, la résistance $R(t)$ et l'effet de charge $S(t)$ sont pris en tant que paramètres dépendant du temps. Sur cette base, la probabilité de défaillance (P_f) peut être calculée comme indiqué ci-dessous (ŞENGÜL, 2011).

$$P_f(t) = P(R(t) < S(t)) \text{ ou } P_f(t) = P(G(R, S, t) \leq 0) \quad (\text{I.12})$$

Où $G()$ est défini comme la fonction d'état limite et la probabilité de défaillance est identique à la probabilité de la violation d'état limite.

Selon l'équation 12, la probabilité de défaillance augmente de manière continue avec le temps, comme le montre schématiquement la figure I.5. La distribution de la dispersion et de la variabilité de R et S est représentée sous forme de deux courbes qui varie avec le temps. Avec le temps, un chevauchement progressif du temps t_1 à t_2 se produit. Les distributions se rapprochent pour former une zone de plus en plus chevauchante qui peut être interprétée graphiquement comme une probabilité de défaillance. Le niveau supérieur acceptable de la probabilité de "défaillance" (t_{SLS}) est atteint et dépassé.

Lorsque les variables de résistance et de charge sont indépendantes et continues et que chacune d'elles est décrite par une fonction de densité de probabilité connue la probabilité de défaillance devient :

$$P_f = P(R - S < 0) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{s \geq r} f_R(r) \cdot f_S(s) dr ds \quad (I.13)$$

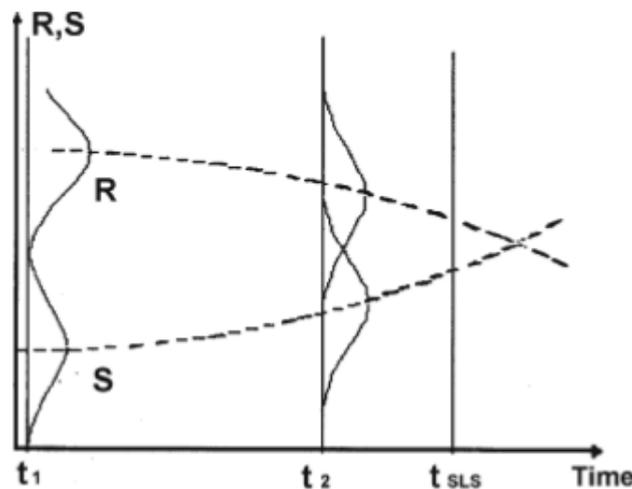


Figure I. 5 Les principes d'une analyse de fiabilité en fonction du temps (Gjørnv, 2011).

En considérant les distributions continues, la probabilité de défaillance à un moment donné peut être déterminée en utilisant l'intégrale de convolution (Naess, 1995). La solution de l'intégrale de convolution n'est disponible que dans quelques cas, c'est-à-dire lorsque les distributions de R et S sont normales (Ferreira, 2004). Cependant, il est nécessaire de recourir à des techniques numériques d'intégration et/ou à des hypothèses simplificatrices concernant la forme du domaine de défaillance et la corrélation entre les variables aléatoires. Plusieurs méthodes mathématiques sont disponibles pour évaluer la fonction de défaillance, telles que (Gjørnv, 2011) :

- FORM (méthode de fiabilité du premier ordre) ;
- SORM (méthode de fiabilité du second ordre) ;
- Simulation de Monte Carlo (MCS).

5.2.4 Les méthodes d'évaluation des probabilités

5.2.4.1 Méthode FORM

Son appellation vient de (First Order Reliability Method). Dans cette méthode, la surface d'état limite est approchée par un hyperplan tangent qui vise à estimer l'indice de fiabilité β et la probabilité de ruine P_f au point de défaillance le plus probable (approximation linéaire de la fonction d'état limite). Pour cette approximation, la probabilité de défaillance P_f est (houmadi, 2011, Hyvert, 2009) :

$$P_f = \varphi(-\beta) \quad (I.14)$$

Où ϕ est la loi de distribution de Gauss de moyenne nulle et d'écart-type unitaire.

L'équation 14 est exacte pour le cas où les variables aléatoires de base sont gaussiennes avec un état limite linéaire.

5.2.4.2 Méthode SORM

Son appellation vient de (Second Order Reliability Method). Dans cette méthode, la surface d'état limite est approchée par un hyperparaboloïde passant par le point de défaillance le plus probable et ayant les mêmes courbures principales en ce point. La probabilité de défaillance P_f s'écrit pour cette approximation:

$$P_f \approx \varphi(-\beta) \prod_{i=1}^n (1 - k_i \beta)^{-1/2} \quad (I.15)$$

Les quantités k_i sont les courbures principales au point de fonctionnement. Lorsque β tend vers l'infini, la valeur de P_f est asymptotiquement exacte (en pratique l'asymptote est quasiment atteinte pour $\beta > 6$) (Hyvert, 2009).

Comme le montre la figure 6, la méthode FORM est utilisée pour ajuster une fonction d'état de faible concavité au voisinage du point de conception. Par contre, la méthode SORM est utilisée pour une forte concavité de cette fonction au voisinage du même point (Houmadi, 2011). Dans la pratique, la méthode SORM, quoiqu'un peu plus précise, est moins utilisée que la méthode FORM dont l'approximation reste suffisante dans la plupart des cas et permet surtout d'évaluer rapidement l'incidence d'une variable donnée sur la fiabilité.

Quelle que soit la méthode utilisée, FORM ou SORM, l'estimation de la probabilité de défaillance repose sur le calcul de la valeur de l'indice de fiabilité β . Cet indice représente est la distance euclidienne entre l'origine du repère et le point de la surface d'état limite le plus

proche. Ce point correspond donc à la probabilité d'occurrence la plus forte pour l'ensemble de la surface d'état limite (Hyvert, 2009).

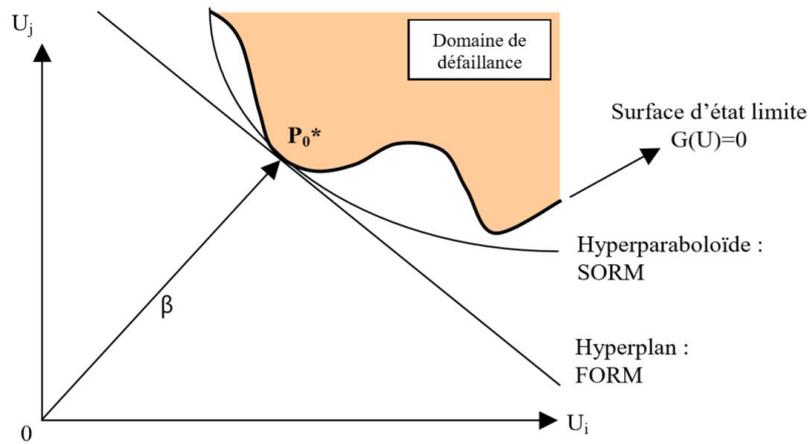


Figure I. 6 Représentation graphique du principe des méthodes FORM et SORM (Hyvert, 2009).

5.2.4.3 Méthode de Monte Carlo

Dans le cas où une détermination de la probabilité de défaillance plus précise que celles des méthodes FORM et SORM est exigée, la méthode de Monte Carlo peut être invoquée. Elle est considérée comme une méthode puissante qui peut prendre en compte simultanément différents paramètres. La méthode de Monte Carlo peut donc être utilisée pour la conception de la durabilité des structures en béton (ŞENGÜL, 2011). L'analyse Monte Carlo peut être décrite comme un processus d'échantillonnage statistique répété, par lequel des valeurs sélectionnées de manière aléatoire sont utilisées pour calculer la fonction d'état limite \$G\$ (Hammersley et Handscomb, 1975).

L'idée de base de cette méthode est de calculer l'intégrale (Eq.13) à l'aide d'un grand nombre \$N_s\$ de simulations (tirage) pseudo-aléatoires des variables du problème étudié. Pour chaque réalisation (simulation) de \$X\$, on vérifie si l'on se trouve dans le domaine de défaillance. La probabilité d'échec \$P_f(t)\$ obtenue par l'analyse de Monte Carlo est le rapport entre le nombre d'itérations qui ne confirment pas la fonction d'état limite \$g\$ et le nombre total d'itérations (Haugen, 1980). La probabilité de rupture \$P_f\$ est alors estimée :

$$\tilde{p}_f = \frac{N_{sf}}{N_s} = \frac{1}{N_s} \sum_1^N I(G(x)) \approx P_f \quad (I.16)$$

Où \$I(\cdot)\$ est le domaine d'insécurité, il est égale à 1 dans domaine de l'insécurité et il est égale à 0 dans le domaine de sécurité (Houmadi, 2011).

6 Techniques de simulation utilisée

Le principe de la simulation est d'utiliser un modèle, c'est-à-dire une représentation abstraite d'un système ou d'un problème, et d'étudier l'évolution de ce modèle sans faire fonctionner le système réel. Dans la forme la plus simple de la simulation de base, chaque variable aléatoire d'un problème est échantillonnée plusieurs fois pour représenter sa distribution réelle en fonction de ses caractéristiques probabilistes. La technique de simulation utilisant un ordinateur et de logiciels simplifie le processus. C'est un moyen peu coûteux pour étudier l'incertitude du problème comparé aux tests de laboratoire.

La méthode couramment utilisée à cet effet s'appelle la technique de simulation de Monte Carlo. Cette dernière est une méthode d'estimation d'une quantité numérique qui utilise des nombres aléatoires. La simulation de Monte-Carlo présente le double avantage d'être simple d'utilisation et de pouvoir être appliquée à un très large éventail de problèmes (Tuffin, 2010). Elle a évolué pour devenir un outil très puissant pour les ingénieurs ne disposant que de connaissances de base en matière de probabilité et de statistiques pour évaluer le risque ou la fiabilité de systèmes d'ingénierie complexes.

6.1 Composantes majeures d'un algorithme de Monte Carlo

Les composants constituent la base de la plupart des applications Monte Carlo. La compréhension de ces composants majeurs fournira au lecteur une base solide pour construire sa propre méthode de Monte Carlo. La technique de simulation de Monte Carlo comprend plusieurs éléments essentiels (CSEP, 1995) :

- Définition du problème : définition du problème en termes de toutes les variables aléatoires (Initialement, ils sont considérées comme non corrélées) ;
- Fonctions de distribution de probabilité (pdf) : quantification des caractéristiques probabilistes de toutes les variables aléatoires du système physique (ou mathématique), en termes de leurs PDF ou PMF et des paramètres correspondants ;
- Générateurs de nombres aléatoires : générer les valeurs de ces variables aléatoires avec des nombres aléatoires uniformément répartis sur l'intervalle unitaire ;
- Règles d'échantillonnage : c'est l'expérimentation numérique par l'évaluation du problème de manière déterministe pour chaque ensemble de réalisations de toutes les variables aléatoires ;
- Notation (ou décompte) : extraire des informations probabilistes à partir des résultats cumulés de N réalisations ;

- estimation d'erreur en fonction du nombre d'essais et d'autres quantités : détermination de la précision et de l'efficacité de la simulation ;
- Techniques de réduction de la variance : méthodes permettant de réduire la variance dans la solution estimée afin de réduire le temps de calcul pour la simulation de Monte Carlo.
- Parallélisations et vectorisation : algorithmes permettant aux méthodes de Monte Carlo d'être implémentées efficacement sur des architectures informatiques avancées.

6.1.1 Génération de nombres aléatoires

La simulation du résultat de variables stochastiques avec des distributions arbitraires est un outil nécessaire pour l'estimation de la probabilité d'échec. Dans une expérience physique, une sélection aléatoire quelconque est possible pour une valeur d'échantillon de chaque variable de base, tel que l'insertion d'une séquence de nombres dans un lot et la sélection d'un. La distribution de probabilité pour ces nombres serait la distribution uniforme ou rectangulaire à condition que la taille du lot soit grande et que l'intervalle entre les nombres soit petit (Ferreira, 2004). La distribution est donnée par :

Un générateur de pseudo-nombres aléatoires (PRNG) est généralement utilisé pour l'approche probabiliste car il est disponible sur la quasi-totalité des systèmes informatiques. Nous appelons suite uniforme de nombres pseudo-aléatoires (ou suite de nombres aléatoires) une suite d'éléments appartenant à un intervalle fini d'entiers I , satisfaisant les critères ci-dessous :

- Absence de périodicité : Le générateur ne doit pas répéter de séquences de nombres lors de générations d'un grand nombre d'éléments ;
- Indépendance statistique : Les entiers successifs engendrés ne doivent pas être liés (l'absence de corrélation) ;
- Uniformité de distribution répartie dans l'intervalle I (Saheb, 2004).

6.1.2 Génération des variables aléatoires

Idéalement, une méthode Monte-Carlo repose sur la simulation d'une suite de variables aléatoires $(X_n)_{n \geq 1}$ indépendantes et identiquement distribuées selon une loi donnée. Chapitre cours (Guyader, 2018). Les variables de base ont rarement une distribution uniforme. Ceci est bien entendu impossible sur un ordinateur. Une valeur d'échantillon pour une variable de base avec une distribution donnée (non uniforme) est appelée une variable aléatoire et peut être obtenue par un certain nombre de techniques mathématiques. La méthode générale pour la

génération des variables aléatoires de distribution quelconque est la méthode de transformation inverse d'une variable aléatoire de distribution uniforme. Cette méthode part d'une propriété élémentaire, soit F une fonction de répartition bijective, alors si U suit une loi uniforme sur $(0,1)$, la variable aléatoire $X = F^{-1}(U)$ a pour fonction de répartition F (voir équation 7).

$$P(X \leq x) = P(F^{-1}(U) \leq x) = P(U \leq F(x)) = F(x) \quad (I.17)$$

6.1.3 Précision et efficacité de la simulation de Monte Carlo

La précision de l'estimation dépend du nombre de cycles de simulation. Pour une faible probabilité de défaillance avec un nombre de simulation petit (N), l'estimation de p_f donnée par l'éq.6 peut être sujette à une erreur considérable. A mesure que N s'approcherait de l'infini, l'estimation de la probabilité de défaillance s'approcherait de la valeur réelle. Ainsi, l'efficacité est essentiellement indépendante du nombre de simulation. L'inconvénient de cette méthode est qu'elle converge lentement et que son résultat présente une variation aléatoire importante tant que le nombre de simulations n'est pas assez grand. Ainsi, l'obtention d'un niveau de confiance de 95% sur P_f s'obtient en réalisant au minimum de l'ordre de $3/P_f$ simulations, à condition que les modèles de détermination de la fonction d'état limite présentent quant à eux peu de bruit numérique (Hyvert, 2009). Les probabilités visées en génie civil étant extrêmement faibles, de l'ordre de 10^{-3} , le coût numérique de ce type d'estimation de P_f est parfois exorbitant (Houmadi, 2011).

La précision de l'équation 6 peut être étudiée de plusieurs manières. La variance ou COV peut être estimée en supposant que chaque cycle de simulation constitue un essai de Bernoulli et le nombre d'échecs dans les essais de N peut être considéré comme suivant une distribution binomiale. Ainsi, le COV de p_f peut être exprimé par (Ferreira, 2004) :

$$COV(P_f) = \frac{\sqrt{\frac{P_f(1-P_f)}{N}}}{P_f} \quad (I. 18)$$

7 Conclusions

Nous avons présenté dans cette étude bibliographique différents aspects nécessaires à la mise en œuvre d'une approche probabiliste pour étudier le temps d'initiation à la corrosion des armatures dans les constructions en béton armé. Il ressort de cette étude que les méthodes d'évaluation de fiabilité et la bonne connaissance des phénomènes physico-chimiques liés à la dépassement des armatures doivent pouvoir être combinées dans ce but. Afin de compléter

cette recherche bibliographique, dans le chapitre suivant, nous allons élargir nos informations d'un point de vue : mesures non destructif pour évaluer la corrosion et les techniques pour lutter contre ce phénomène.

CHAPITRE II : DETECTION ET LUTTE CONTRE LA CORROSION

1 Introduction

Le plus souvent, la première manifestation tangible de la corrosion est d'ordre visuel. Le phénomène est constaté par sa localisation ou par la modification de l'aspect extérieur de l'armature. La lutte contre la corrosion peut être envisagée par des mesures qui protègent les matériaux métalliques contre l'action destructive du milieu, c'est pour cela l'élaboration d'un système de protection et la détection de la corrosion dès la phase de conception d'une structure en béton armé garanti une certaine durée de vie.

Ces dernières années, des progrès ont été réalisés dans la compréhension et l'évaluation des mécanismes de détérioration des structures en béton, causé par la corrosion, soumises à des environnements agressifs vis-à-vis des armatures. De nos jours, les méthodes d'évaluation de corrosion permettent d'estimer la durée de vie résiduelle avec un niveau de fiabilité de plus en plus important et contribuent au développement et l'optimisation de nouvelles stratégies de maintenance, de réparation des ouvrages en béton armé. Nous aborderons ces différentes méthodes dans ce chapitre.

2 Méthodes d'évaluation de la corrosion

2.1 L'intérêt des essais non destructifs

L'évaluation de l'état des matériaux de construction est une question essentielle dans la réévaluation des ouvrages existants, dans lesquels le vieillissement des matériaux peut avoir réduit le degré de sécurité en provoquant une perte de performance (Breysse et Lataste, 2009). L'ensemble des techniques et procédés fournissant des informations sur une structure, sans qu'il en résulte des altérations préjudiciables à leur utilisation, est regroupé sous deux appellations principales : Contrôles Non Destructifs (CND) ou encore Essais Non Destructifs (END) au niveau normatif.

Les essais non destructifs sont un ensemble de méthodes sont souvent employées pour évaluer l'état d'intégrité de structures ou de matériaux, sans détérioration ou modification irréversible de celui-ci à différents stades de leur cycle de vie. Les objectifs de ces techniques peuvent être classés en trois niveaux d'exigence (Breysse et Lataste, 2009) :

- Détecter un défaut ou une variation des propriétés de l'ouvrage ;
- Classement entre zones ou entre ouvrages ;
- Quantifier les propriétés en les comparant à des valeurs seuil.

La corrosion étant la principale cause de dégradation des structures en béton armé (Godart, 2005, Woodward et al, 2001), l'évaluation non destructive est généralement réalisée en combinant trois techniques (NEA, 2002) :

- Les mesures de potentiel de demi-cellules, qui fournissent une indication de la probabilité d'une activité de corrosion au moment des essais, par une valeur de potentiel (mise en relation de la norme ASTM) ;
- La mesure de la résistivité du béton, qui renseigne sur la teneur en humidité du béton ;
- La mesure de la résistance de polarisation, qui donne une indication de la vitesse de corrosion du ferrailage au moment des essais.

2.2 Inspection visuelle

L'inspection visuelle est le premier moyen de contrôle non destructif à la reconnaissance et au diagnostic d'ouvrages en béton armé. C'est la façon la plus directe pour déterminer l'état de corrosion des armatures dans une structure en béton armé. Ainsi, elle permet de fournir immédiatement des données utiles et globales sur le degré de détérioration visible. Les données recueilli peuvent être utilisées dans la prise de décision afin d'établir un diagnostic global d'un ouvrage (Taillandier et al, 2013).

Aujourd'hui, les inspections visuelles peuvent être effectuées par des appareils photographiques et interpréter par des méthodes d'analyse d'image. Dans certains cas, l'inspection visuelle par la photographie est nécessaire dans les situations particulières comme dans une ambiance nucléaire ou un climat inclément. Mais, la seule inspection visuelle n'est pas en mesure d'évaluer la résistance ou les dégradations internes de la structure. Elle peut s'accompagner de l'emploi de techniques ou d'essai non destructif.

2.3 Mesure du potentiel de corrosion

La mesure du potentiel de corrosion des armatures est la plus fréquente parmi les méthodes de CND, étant donné son principe physique simple et sa facilité de mise en œuvre (Elsener et al, 2003). Elle permet de localiser les endroits où le béton est corrosif ou non corrosif, et d'associer successivement ces endroits aux probabilités de corrosion des armatures forte ou faible (Din Stribu, 2005, AusculTECH, 2013).

Au début des années 70, les travaux de Stratfull (Stratful, 1973) sur des dalles en béton armé ont permis l'élaboration, de la norme ASTM C876 'Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete'. Selon cette norme, la mesure de la différence de potentiel électrique s'effectue entre une armature dans le béton et une électrode

de référence en cuivre sulfate de cuivre en contact avec le béton de recouvrement de cette armature. Elle permet d'avoir une information sur la probabilité de corrosion de l'armature, tel que : le potentiel mesuré est supérieur à -200 mV donne une probabilité de corrosion Inférieure à 10%, par contre si le potentiel est inférieur à -350 mV la probabilité est supérieure à 90 % (ASTM, 2009).

L'équipement consiste en une demi-cellule et un voltmètre à haute impédance. La demi-cellule est un tube avec une extrémité poreuse, qui contient une tige métallique dans une solution saturée de son propre sel (voir figure II.1), par ex. cuivre dans le sulfate de cuivre ou argent dans le chlorure d'argent. Lorsque l'argent est utilisé dans les demi-cellules de chlorure d'argent, l'électrode de référence fournit un système stable, bien que plus coûteux (Ferreira, 2004). Cette électrode est connectée via un voltmètre à haute impédance ($R = 10 \text{ M}\Omega$) à l'induit.

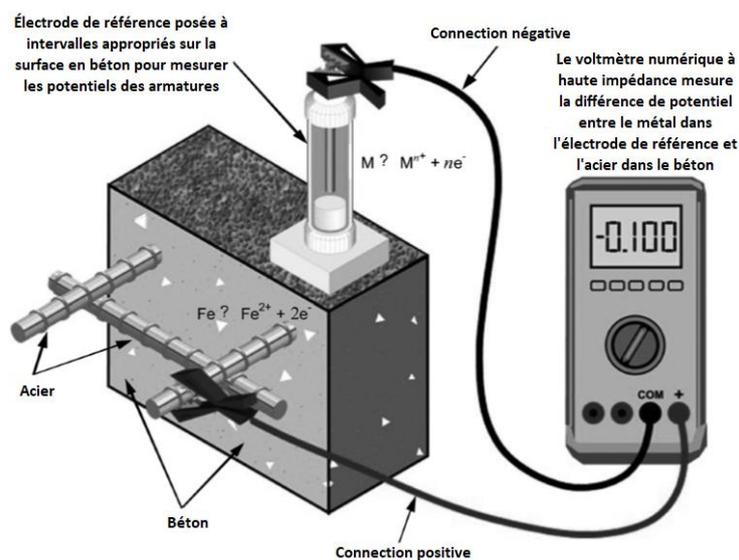


Figure II. 1 Circuit d'électrode de référence (ASTM, 2009).

L'équipement est simple et permet à un levé non destructif de produire des cartes des zones présentant la probabilité de corrosion des armatures au sein de la structure auscultée, tel que montré à la figure II.2. Cette méthode ne peut pas indiquer le taux de corrosion réel.

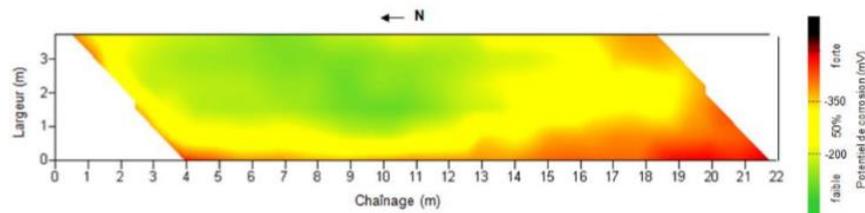


Figure II. 2 Exemple d'une carte de zones présentant le risque de corrosion (AuscultECH, 2013).

La mesure des potentiels de corrosion peut être utilisée à tout moment de la vie d'un élément en béton, mais ces mesures doivent être interprétées par des ingénieurs ou des spécialistes techniques. Il est souvent nécessaire d'utiliser d'autres données en plus des mesures du potentiel de demi-cellules, telles que les teneurs en chlorures, la profondeur de carbonatation, les résultats d'études de délamination, le taux de corrosion et les conditions d'exposition environnementales, pour formuler des conclusions sur l'activité de corrosion de l'acier noyé son effet probable sur la durée de vie d'une structure (ASTM, 2009).

2.4 La mesure de la résistivité du béton

La mesure de la résistivité électrique du béton est une technique complémentaire aux mesures de potentiel de corrosion et la résistance de polarisation pour une meilleure évaluation de l'état de corrosion des armatures. De nombreux auteurs ont utilisé la résistivité électrique du béton comme un indicateur de durabilité des armatures dans le béton (Andrade et al, 2000, Baroghel-Bouny, 2004). Le principe de cette technique est de mesurer le potentiel résultant de ce champ électrique généré par injection d'un courant dans le béton.

La résistivité électrique de béton est une grandeur sensible à l'humidité relative et qui permet de localiser les zones polluées par des ions chlorure propices au développement du risque de la corrosion (Hunkeler, 1996, Polder et Peelen, 2002, Pruckner et Gjørnv, 2004,). Aussi, le coefficient de diffusion des chlorures est inversement proportionnel à la résistivité électrique du béton, mesurée dans des conditions particulières d'humidité et de salinité.

Dans la pratique, la résistivité du béton se mesure par différents méthodes non destructives. La technique la plus courante s'agit d'une adaptation du dispositif de Wenner utilisé en géologie (Wenner, 1915). Afin de mieux visualiser les zones de faible résistivité, les résultats des mesures sont souvent portés sur un plan (cartographie). En effet, ces zones de faible résistivité sont celles à grand risque de corrosion des armatures.

2.4.1 Méthode de Wenner

Il s'agit d'un appareil composé de quatre électrodes en ligne distancé entre elles par une même longueur, notée a (Figure II.3). Le plus souvent, un courant alternatif I est envoyé dans le béton à partir des deux pointes extrêmes. La fréquence du courant est comprise entre 50 et 1000 Hz. La différence de potentiel V , créée par la circulation du courant, est mesurée entre les deux électrodes intérieures (Millard, 1991, Morris et al, 1996). Le rapport V / I donne la résistance électrique de l'enrobage. La résistivité est déduite de ce rapport grâce à la formule suivante (équation II.1):

$$\rho = 2\pi a \frac{V}{I} \quad (\text{II. 1})$$

Où a est la distance entre deux points voisins.

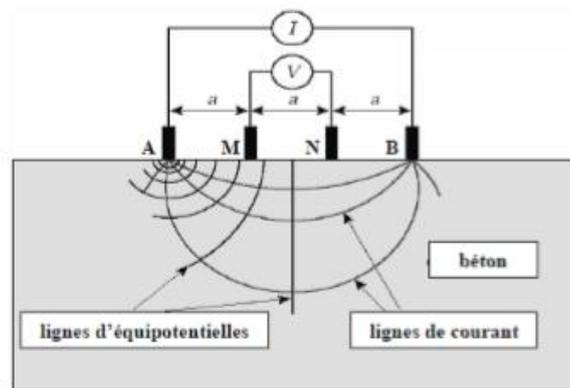


Figure II. 3 Schéma de principe de la mesure de la résistivité électrique d'un béton par la méthode Wenner (Naar, 2006).

2.4.2 Méthode de polarisation d'armature de l'enrobage

A l'aide d'une contre-électrode placée à la surface du béton, la résistance électrique d'un enrobage de béton peut être mesurée en polarisant une armature. Il est possible de calculer la résistivité du béton à l'aide de la longueur et le diamètre de l'armature concernée par la mesure. Par cette méthode, la résistance électrique est déterminée en un point au cours du temps.

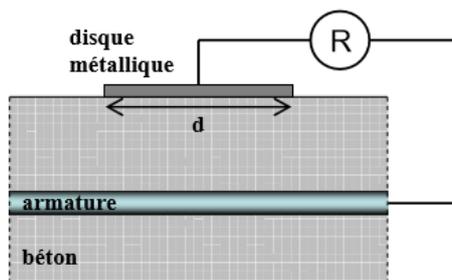


Figure II. 4 Mesure de résistivité d'un enrobage de béton, par polarisation d'une armature (Naar, 2006).

Pour un même dispositif de mesure de résistance électrique, les seuils sont significativement différents. La sensibilité de ce paramètre à l'humidité du matériau, à sa température, à la qualité du contact et à l'âge du béton, fait qu'il est très difficile de définir des seuils de résistivité électrique en se basant seulement sur des résultats issus d'une seule technique. Le tableau II.1 montre quelques résultats proposés par différents auteurs dans la littérature.

Tableau II. 1 Interprétations de résistivité électrique du béton pour le risque de corrosion des aciers (NGUYEN, 2016).

	Seuils de résistivité ($\Omega.m$)		
Risque de corrosion	Langford et Broomfield, 1987	Feliu et al, 1996 et Polder et al, 2000	Bungey et al, 2006 ^(*)
Très bas	>1000 (pas de risque)	1000-2000	>200
Bas à modéré	500-1000	100-1000	100-200
Haut	100-500		50-100
Très haut	<100 ^(**)	<100	<50
(*) : Pour béton non saturé, acier dépassivé (**): La résistivité n'est plus le paramètre contrôlant			

Dans le tableau II.2, il est montré que la mesure de résistivité peut également servir d'indicateur de durabilité potentielle du béton (Baroghel-Bouny, 2004).

Tableau II. 2 Résistivité comme un indicateur de durabilité selon (Baroghel-Bouny, 2004)

Durabilité potentielle	Très faible	Faible	Moyen	Elevée	Très élevée
$\rho(\Omega.m)$	<50	50-100	100-250	250-1000	>1000

2.5 La mesure de la résistance de polarisation

Cette méthode est une technique simple, rapide et non destructive qui permet de mesurer la densité du courant de corrosion de l'acier et aussi l'utiliser pour le suivi de la corrosion (Andrade et Alonso, 1996a, Andrade et Alonso, 1996b). Afin de mesurer la résistance de polarisation, il faut réaliser un balayage du potentiel dans un domaine de ± 10 mV par rapport au potentiel de corrosion de l'électrode de travail ainsi déterminer le courant « i » correspondant. Ce balayage se fait dans le sens du domaine cathodique vers l'anodique avec une vitesse de balayage bien déterminée. De plus il paraît clair que cette technique soit particulièrement adaptée pour étudier l'efficacité inhibitrice de molécules dont l'effet n'est pas connu et permet leur suivi dans le temps.

Il existe deux techniques pour mesurer la résistance de polarisation : la spectroscopie d'impédance électrique et la résistance de polarisation linéaire.

2.5.1 Mesure de la résistance de polarisation linéaire

La résistance de polarisation de l'acier nécessite un système électrochimique constitué de trois électrodes : l'armature qui est l'électrode de travail, une électrode de référence et une contre-électrode. La mesure de la résistance de polarisation peut se faire soit (Cremona, 2012):

- En mode potentiostatique : balayage en tension et enregistrement d'un courant ;
- En mode galvanostatique : balayage en courant et enregistrement d'une tension.

La résistance de polarisation R_P est définie par la formule de Stern-Geary (Stern et Geary, 1957), comme suite :

$$R_P = \left(\frac{\Delta E}{\Delta i} \right)_{\Delta E \rightarrow 0} \quad (\text{II. 2})$$

Stern a représenté la pente de la courbe $E = f(i)$ (figure II.5) une droite qui relie entre le potentiel mesuré E et la densité de courant i pour un intervalle de E compris entre -20 mV et 20 mV autour du potentiel de corrosion E_{corr} , dans le but de déterminer la valeur de R_P .

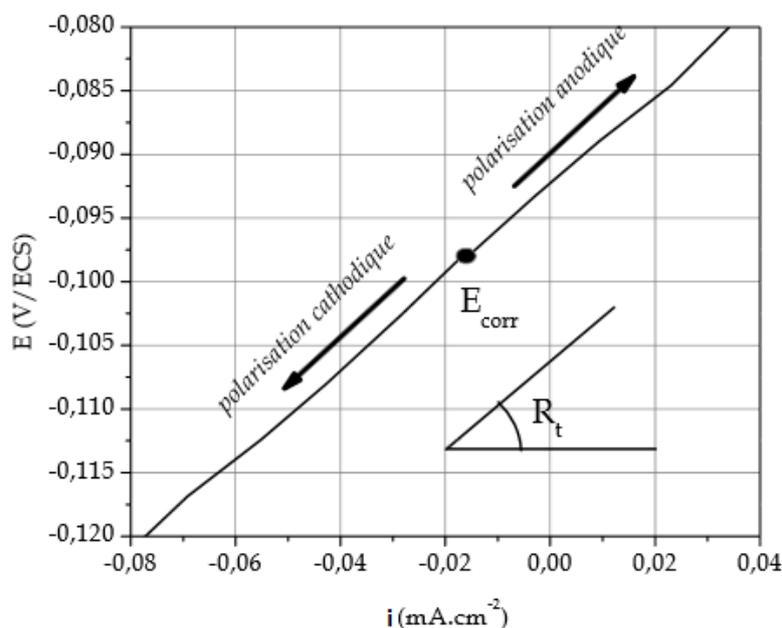


Figure II. 5 Représentation de Stern pour des valeurs de surtension de l'ordre de 20 mV autour du potentiel en circuit ouvert (Cu7Sn , $\nu = 100 \text{ mV.s}^{-1}$, $\omega = 1000 \text{ tours.min}^{-1}$) (Gabielli et al, 2007).

2.5.2 Mesure d'impédance électrochimique « résistance de Nyquist »

La spectroscopie d'impédance électrochimique (SIE) est une technique complémentaire employée pour détailler les mécanismes intervenant dans les processus de corrosion lorsque les essais sont réalisés au laboratoire (Fattah-Alhosseini et al, 2009, Galicia et al, 2009, Macdonald, 2009). Plusieurs chercheurs ont représenté l'interface acier/béton sous la forme d'un circuit électrique équivalent (Randles, 1947 ; Conway et al, 1951 ; Gonzalez et al, 1985 ; Andrade 2004). Le circuit de Randles comporte une résistance électrique R_e (la résistance de l'électrolyte et de l'enrobage ou chute ohmique) en série avec un circuit parallèle constitué d'une résistance R_p (la résistance au transfert de charge) et d'un condensateur C_d qui décrit la double couche électrochimique (voir figure II.6).

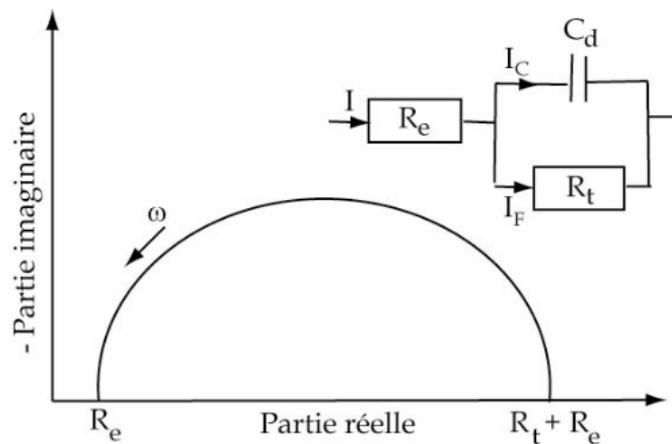


Figure II. 6 Représentation, dans le plan de Nyquist, de l'impédance électrochimique, dans le cas d'un processus de transfert de charge et circuit électrique équivalent (Rahmouni, 2005).

La technique de mesures d'impédances électrochimiques peut être considérée comme un système linéaire car la réponse du système électrochimique à faible perturbation sinusoïdale est linéaire.

D'une façon générale, nous pouvons dire que pour tout système linéaire, il existe une relation entre la fonction d'excitation et la fonction de sortie (Girault, 2007). En superposant ces propos à la technique SIE, le schéma électrique décrit alors le comportement de la chaîne électrochimique lorsqu'elle est soumise à une perturbation temporelle (fonction d'excitation) de l'intensité ou du potentiel, par l'intermédiaire de sa fonction de transfert, un nombre complexe noté Z , qui dépend de la pulsation (figure II.7).

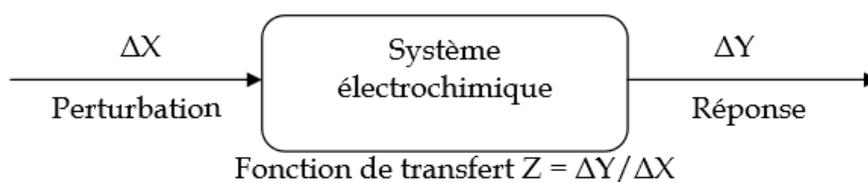


Figure II. 7 Principe générale de la SIE (Muller, 2010).

2.5.3 Vitesse de corrosion

La densité de courant instantané de corrosion i_{corr} exprimée en $\mu A.cm^{-2}$ est calculée à partir de la résistance de polarisation linéaire (relation de Stern-Geary (Stern et Geary, 1957) équation II.3), connaissant la chute ohmique du béton et la surface de l'armature :

$$i_{corr} = \frac{B}{S \cdot R_p} \quad (II. 3)$$

où :

- B est une constante égale à 26 mV pour des armatures dans un état actif ou égale à 52 mV pour des aciers passifs (Andrade et Gonzalez, 1978 ; Andrade et al, 2004 ; Garcia et Marie-Victoire, 2008) ;
- S est la surface d'armature polarisée (égale à $\pi * D_{armature} * L_{polarisée}$ en cm²) ;
- R_p est la résistance de polarisation (en kΩ).

En utilisant la loi de Faraday, la perte de masse de fer (exprimée en µg) peut être calculée d'après la valeur de i_{corr} en prenant en compte la surface exposée S et le temps.

$$m = \frac{M_{Fe}}{n_{Fe} * F} * i * S * t \quad (II. 4)$$

Avec :

- M_{Fe} la masse atomique du fer (M_{Fe} = ~56 g.mol⁻¹) ;
- n_{Fe} la valence des ions ferreux (n_{Fe} = 2) ;
- F la constante de Faraday (F ~ 96500 C.mol⁻¹ ~ 96500 A.s.mol⁻¹).

A partir des équations 3 et 4, nous pouvons déduire la vitesse de corrosion V_{corr} (exprimée en µm.an⁻¹) :

$$V_{corr} = \frac{m}{\rho_{Fe} * S * t} \approx 11.6 * i_{corr} \quad (II. 5)$$

Avec : ρ_{Fe} la masse volumique du fer (ρ_{Fe} = ~7,86 g.cm⁻³).

2.6 Autres méthodes complémentaires

2.6.1 Méthode électromagnétique « Radar »

Le principe de cette technique en génie civil est basé sur l'absorption et la réflexion d'ondes radar arrivant sur du béton, dans la gamme des hyperfréquences (de 1000 à 3000 MHz) (Bourreau, 2017), et qui dépendent de la résistivité électrique de ce matériau. Cette propriété peut être utilisée pour localiser les zones de faible résistivité sur une construction, à un instant donné. Les principaux avantages de cette méthode sont (Balayssac et al, 2009 ; Hugenschmidt et al, 2012 ; Agred, 2017) :

- Méthode non destructive et rapide ;
- La fiabilité et la reproductibilité (qui dépendent de l'humidité du béton et de la fréquence utilisée) ;
- Un très haut rendement d'acquisition et une profondeur d'investigation importante (jusqu'à 50 cm), à travers les différentes interfaces ;

- peu sensible aux variations des conditions environnementales ;
- l'évaluation de la variabilité spatiale des bétons in situ pour détecter des zones de probabilité de dégradation.

Plusieurs études récentes de recherches se basent sur cette méthode se sont développées afin de caractériser les propriétés physiques et chimiques du béton, ainsi à la mise en évidence des conditions qui favorise le développement de la corrosion des armatures en acier (Laurens 2001 ; Dous 2002 ; Sbartai et al, 2005 ; Balayssac et al, 2007 ; Ihamouten 2011). Afin d'améliorer l'évaluation de ces propriétés, la mesure électromagnétique par le radar est utilisée comme une technique complémentaire en combinaison avec d'autres mesures CND plus locales (résistivité électrique, ultrason) (Nguyen, 2014). Les résultats d'étude de Dous (Dous et al , 2002), sur la probabilité de l'activité de corrosion, ont permis de démontrer qu'il y avait des similitudes entre le radar, le potentiel de corrosion, la résistivité électrique et l'inspection visuelle (voir Figure II.8).

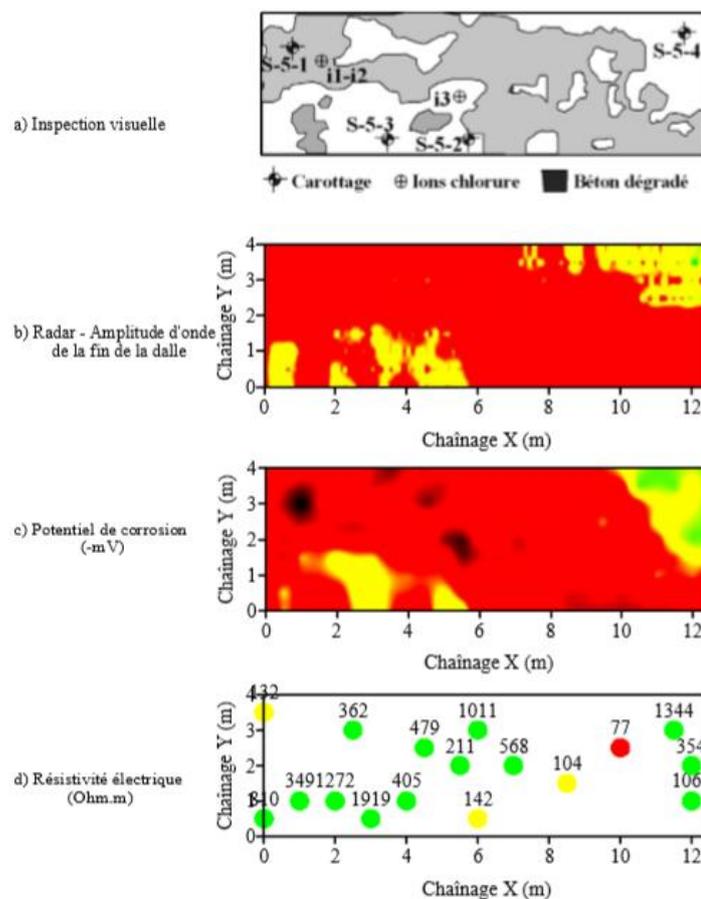


Figure II. 8 Résultats par mesure visuel, radar, potentiel et résistivité électrique de la corrosion d'une dalle (Dous et al, 2002).

2.6.2 Emission acoustique

Selon la norme ASTM, l'émission acoustique (EA) se désigne comme une étude scientifique des phénomènes de génération d'ondes élastiques transitoires par dissipation d'énergie provenant de sources à l'intérieur d'un matériau (ASTM, 1982). D'une façon générale, cette technique consiste à détecter un événement acoustique et à localiser son lieu d'émission. Dans le cas du béton, les fissures locales du matériau sont les événements qui génèrent une libération brutale d'énergie mécanique (Vervisch-fortuné, 2009). L'émission acoustique est parmi les seules techniques de suivi d'endommagement du béton par la détection et localisation des micro-endommagements, sans les influencer. Cependant, son application reste limitée du fait que tout défaut non évolutif (non énergétique), ne peut être décelé.

Plusieurs chercheurs en génie civil, orientent l'utilisation de l'émission acoustique à étudier la relation entre « la densité, l'événement acoustique et l'activité de corrosion des armatures » (Li et al, 1998, Proust et al, 2001), d'autre, entre « l'endommagement et la corrosion d'armature » (Seah et al, 1993, Perrin et al, 2010, Yuma et al, 2013, Goszczyńska, 2014), dans le but de détecter le phénomène de corrosion. Une étude de recherche de Nahali (Nahali et al, 2014) réalisée sur la corrosion des armatures d'acier en milieu simulant le béton chloruré en couplant les mesures électrochimiques et (EA) a montré que l'inhibiteur Na_3PO_4 augmente de manière significative le rapport critique d'initiation à la corrosion localisée de ces armatures.

2.6.3 Ultrason

L'auscultation aux ultrasons est basée sur un dispositif composé d'un générateur relié à deux transducteurs piézoélectriques (un comme émetteur et l'autre comme récepteur). Ces capteurs permettent de mesurer la propagation d'ondes mécaniques dans un matériau, en convertissant une impulsion électrique en une onde acoustique et inversement. Les signaux reçus sont numérisés à l'aide d'un oscilloscope. Il existe trois dispositions pratiques de mesure, et sont illustrés dans la figure II.9 : directe (a), semi-directe (b) indirecte (c).

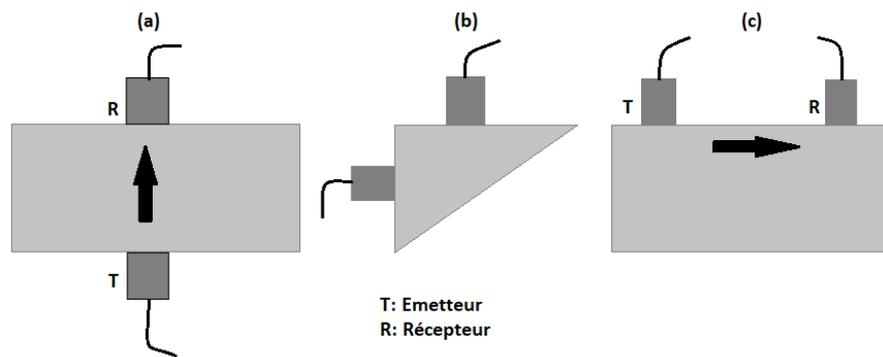


Figure II. 9 types de disposition de deux transducteurs piézoélectriques.

Une mesure par ultrasons peut être exploitée, soit par la vitesse de propagation (réalisé en laboratoire et sur site), soit par l'atténuation de l'amplitude d'ondes essentiellement réalisée en laboratoire, qui permet d'évaluer le béton lors de son jeune âge ou en cas d'endommagement. La méthode de détermination de la vitesse des ondes ultrasonores dans le béton est défini par les normes EN 12504-4 et ASTM C597 (Nguyen, 2014). La vitesse ultrasonore permet la détection des fissures, des nids-d'abeilles et des vides dans le béton (IAEA, 2002), aussi elle peut être liée aux propriétés mécaniques du béton (ex. résistance à la compression) en utilisant des corrélations empiriques. Une procédure de la détermination de ces corrélations est décrite dans la norme EN 13791 : 2007 (Nguyen, 2014).

3 La lutte contre la corrosion

La lutte contre la corrosion est représentée par toutes les mesures qu'on peut prendre pour protéger les matériaux métalliques contre l'action destructive du milieu, c'est pour cela il est primordiale d'élaboré un système de protection contre la corrosion dès la phase de conception d'une installation afin d'éviter de nombreux problèmes et garantir une certaine durée de vie. Ces dernières années, La solution optée doit répondre à un certain critère qui suit : doit être compatible avec les prescriptions concernant la protection de l'environnement et permet le recyclage ou l'élimination des différents composants à la fin de leur utilisation. Nous pouvons cités plusieurs techniques de protection :

- protection par revêtements ;
- utiliser des armatures résistantes à la corrosion (galvanisées, inoxydables ou en matériaux composites) ;
- prévenir la pénétration des ions chlore par l'emploi de béton plus imperméable (BHP);
- protection électrochimique ;

- protection par inhibiteurs.

3.1 Protection par inhibiteur de corrosion

3.1.1 Définition

Selon National Association of Corrosion Engineers (NACE) et la norme internationale ISO 8044 : 2015 « un inhibiteur de corrosion est une substance chimique qui, présente à une concentration appropriée dans un système de corrosion, diminue la vitesse de corrosion, sans changer notablement la concentration en agent corrosif. Un inhibiteur de corrosion est généralement efficace à faible concentration » (Iso, 2015).

D'une façon générale, un inhibiteur de corrosion assure un effet curatif ou préventif afin de prolonger la durée de vie des constructions en béton armé. Cette technique réduit le taux de corrosion en empêchant la réaction anodique, la réaction cathodique, ou les deux en même temps. Leur domaine d'utilisation recouvre les milieux agressifs, acides, la vapeur, et les eaux de refroidissement.

3.1.2 Généralités sur leurs utilisations

Un inhibiteur ou un mélange d'inhibiteurs peut être utilisé comme unique moyen de protection (permanente avec surveillance imposé du dispositif ou temporaire : durant une période où la pièce est particulièrement sensible à la corrosion (stockage, décapage, nettoyage,...) ou encore lorsque la pièce est soumise à des usinages très sévères comme le perçage, taraudage, forage, filetage,...) ou combiné à un autre moyen de protection (Fiaud, 1990, Bommesbach, 2005).

Un bon inhibiteur de corrosion doit abaisser la vitesse de corrosion d'un métal sans en affecter ces caractéristiques physico-chimiques (en particulier résistance mécanique). Il doit être stable non seulement en présence des autres constituants du milieu, mais aussi aux températures d'utilisation. Comme toutes les normes sont très strictes en ce qui concerne la toxicité, un inhibiteur doit être aussi compatible avec celles-ci et, bien sûr, d'un point de vue économique, son prix est aussi très important. Un inhibiteur est définitivement reconnu comme tel s'il est efficace à faible concentration.

3.1.3 Classifications des inhibiteurs

Nous pouvons distinguer les différents inhibiteurs selon leurs :

3.1.3.1 Compositions chimiques

a. Inhibiteurs organiques

Ils constituent un groupe important car ils modifient à la fois les réactions anodique et cathodique en affectant l'ensemble de la surface. L'action inhibitrice de ces composés organiques est liée à la formation par adsorption d'une barrière plus ou moins continue qui empêche l'accès de la solution au métal. Cette adsorption dépend de la charge ionique de l'inhibiteur et des charges électriques présentes à la surface du métal. Leur utilisation est actuellement préféré à celle des inhibiteurs inorganiques (paragraphe II.1.3.1.b) pour des raisons d'écotoxicité.

Les inhibiteurs organiques sont généralement constitués de sous-produits organiques. À partir d'une molécule "mère" possédant une certaine efficacité, il est toujours possible de synthétiser des composés de plus en plus complexes dans le but par exemple d'améliorer l'efficacité inhibitrice ou encore certaines propriétés physiques (Ichchou, 2011). Ils possèdent, au minimum, un centre actif susceptible d'échanger des électrons avec le métal, tel l'azote, l'oxygène, le phosphore ou le soufre. Les groupes fonctionnels usuels, permettant leur fixation sur le métal, sont :

- le radical amine (-NH₂) ;
- le radical mercapto (-SH) ;
- le radical hydroxyle (-OH) ;
- le radical carboxyle (-COOH) (Bommessbach, 2005).

b. inhibiteurs inorganique

Ces inhibiteurs minéraux sont utilisés souvent plus en milieux alcalins et presque jamais en milieux acides. Ils nécessitent plus ou moins d'oxygène dissous dans le milieu corrosif pour être efficaces, nous pouvons remarquer que presque toutes les molécules inorganiques inhibitrices contiennent de l'oxygène dans leur formule (Fiaud, 1990). Les molécules minérales se dissocient en solution et assure les phénomènes d'inhibition par ces produits de dissolution (anions et cations). Les principaux anions inhibiteurs sont les oxo-anions de type XO₄ⁿ⁻ tels les chromates, molybdates, phosphates, silicates,...etc. Les cations sont essentiellement Ca²⁺ et Zn²⁺ et ceux qui forment des sels insolubles avec certains anions tels que l'hydroxyle OH⁻ (Bommessbach, 2005, Constantin, 2011). L'utilisation des inhibiteurs

inorganiques est toujours efficace mais du fait de leurs toxicités, leurs emploi est amoindris et réglementé car ils présentent un coté néfaste pour l'environnement.

3.1.3.2 Mode d'action

a. Inhibiteurs d'adsorption

L'adsorption est un phénomène de surface universel car toute surface est constituée d'atomes n'ayant pas toutes leurs liaisons chimiques satisfaites. Cette surface a donc tendance à combler ce manque en captant atomes et molécules se trouvant à proximité. Deux types d'adsorption peuvent être distingués : la physisorption (formation de liaisons faibles) et la chimisorption (Bommersbach, 2005, Sail, 2013).

La première, encore appelée adsorption physique se fait par des forces d'interactions physiques, met en jeu des liaisons faibles, se produit sans modification de la structure moléculaire et est parfaitement réversible, trois types de forces sont à distinguer :

- Les forces de dispersion toujours présentes ;
- Les forces polaires, résultant de la présence de champ électrique ;
- Les liaisons hydrogène dues aux groupements hydroxyle ou amine.

Dans le cas de l'adsorption chimique, ou dite chimisorption, il y a réaction chimique entre l'adsorbant et l'adsorbat qui consiste à la mise en commun d'électrons entre la partie polaire de la molécule et la surface métallique, ce qui engendre la formation de liaisons chimiques bien plus stables par des énergies de liaison importantes, du type liaisons covalentes, ioniques ou métalliques entre les espèces chimiques adsorbées et l'adsorbant. Les électrons proviennent en grande majorité des doublés non appariés des molécules inhibitrices tels que O, N, S, P,... (Tous ces atomes se distinguant des autres de par leur grande électronégativité) (Ichchou, 2011). Elle s'accompagne d'une profonde modification de la répartition des charges électroniques des molécules adsorbées. Elle est souvent irréversible (ou difficilement réversible) et engendre une couche monomoléculaire.

b. Formation d'un film intégrant les produits de dissolution du substrat

Cette forme d'inhibition, appelée également inhibition «d'interphase » traduit la formation d'un film tridimensionnel entre le substrat corrodé et les molécules d'inhibiteur. Les inhibiteurs d'interphase ne se contentent ainsi pas d'être adsorbés aux interfaces métal/oxyde et oxyde/électrolyte, mais sont également incorporés dans les couches barrières (en formant des complexes par exemple) ; ainsi ces molécules inhibitrices d'interphase conduisent à des réseaux homogènes et denses présentant de fait une faible porosité et une bonne stabilité (Bommersbach, 2005). Il existe deux classes d'inhibiteurs passivants :

- Les ions oxydants qui peuvent passiver l'acier en l'absence d'oxygène (exemple Cr_4^{2-});
- Les ions non oxydants (MoO_4^{2-} , WO_4^{2-} , PO_4^{3-} , $\text{B}_4\text{O}_7\text{Na}_2$, $\text{C}_6\text{H}_5\text{COONa}$) qui nécessitent la présence d'oxygène et déplacent la réaction cathodique de réduction de ce dernier en favorisant son adsorption à la surface du métal.

Tous ces ions se consomment lentement et il est donc nécessaire de contrôler périodiquement la concentration du circuit lors de l'utilisation de tels inhibiteurs. La concentration requise en inhibiteur passivant dépend en fait de nombreux facteurs tels que :

- la température ;
- le pH ;
- la présence d'ions dépassivants comme Cl^- ou réducteurs comme S^{2-} (Constantin, 2011).

3.1.3.3 La nature électrochimique du processus

a. Les inhibiteurs anodiques

Leur mode d'action consiste à élever la valeur du potentiel de corrosion contribuent à protéger les matériaux considérés avec une concentration en inhibiteur suffisante afin d'atteindre l'intensité critique de formation d'une couche passive sur l'anode (formation d'un film passif protecteur). Pour cela, les matériaux doivent être passivables.

Longtemps, les produits les plus utilisés ont été les anions nitrite et chromate. Ces inhibiteurs anodiques sont dits « passivants », qui ne nécessitant pas la présence d'oxygène dissous pour la formation de la couche passive. Mais il existe aussi d'autres inhibiteurs anodiques, contrairement aux nitrites et chromates, d'où le mode d'action pour former des films passifs nécessite souvent la présence d'oxygène dissous. Les chromates sont efficaces dans une large gamme de pH (5 à 10). Les nitrites sont plus efficaces à pH compris entre 8 et 9. Ces inhibiteurs donnent d'excellents résultats pour la protection du fer et de ses alliages : acier, fonte. Leur efficacité pour la protection des alliages de cuivre ou d'aluminium est pratiquement nulle. Il faudra donc ajouter des inhibiteurs spécifiques (notamment organiques) en cas de présence de ces matériaux dans le système à protéger (Lédion et Blériot, 2013).

Même si les inhibiteurs anodiques sont très efficaces et souvent utilisés, ils ont généralement une propriété indésirable : une concentration insuffisante provoquera une accélération de la corrosion, souvent sous la forme de piqûres. Dans ce cas, l'inhibiteur fait plus de mal que de bien, nous pouvons le désigné comme dangereux. L'ion benzoate semble être une exception, parce qu'une très faible concentration d'inhibiteur entraîne seulement la corrosion généralisée (Constantin, 2011).

b. Les inhibiteurs cathodiques

Le mode d'action des inhibiteurs cathodiques est quant à lui basé, la plupart du temps, sur une précipitation des cations qui peuvent migrer vers la surface cathodique, où ils sont sous formes de sels basiques ou d'hydroxydes, formant des films adhérents et compacts . De ce fait, une diminution de la vitesse de la réaction cathodique induit un déplacement du potentiel de corrosion vers des valeurs moins noble. ces inhibiteurs sont plus sûrs que les inhibiteurs anodiques, car ils ne risquent pas de favoriser de corrosion localisée, même en cas de sous-dosage.

Suivant leur mode d'action, ils sont classés en trois catégories :

- les poisons cathodiques : ils rendent plus difficile la réduction des ions H^+ mais ces composés favorisent la pénétration de l'hydrogène dans le matériau et peuvent fragiliser ce dernier ;
- les précipités cathodiques : le pH du milieu doit être ajusté afin de ne pas précipiter les sels sous la forme d'une suspension non protectrice ;
- les désoxygénants ou les fixateurs d'oxygène : au-dessus d'un pH de 6, la corrosion de l'acier est liée à la présence d'oxygène dissous. L'addition de ces composés permet d'en diminuer la concentration. Toutefois, l'ajout de catalyseurs est souvent nécessaire (Millet, 2008).

c. Les inhibiteurs mixtes

Les inhibiteurs mixtes sont un mélange entre un inhibiteur cathodique et un inhibiteur anodique, Ils ont à la fois les propriétés des deux inhibiteurs. Leurs ajouts peuvent donner comme résultat une croissance d'effet inhibiteur et éliminer aux faibles concentrations le risque à la corrosion par piqûres.

La figure II.10 représente les divers cas de ces types d'inhibiteurs (anodique, cathodique et mixte) par les schémas d'Evans qui montrent le déplacement du potentiel de corrosion avec et sans inhibiteur.

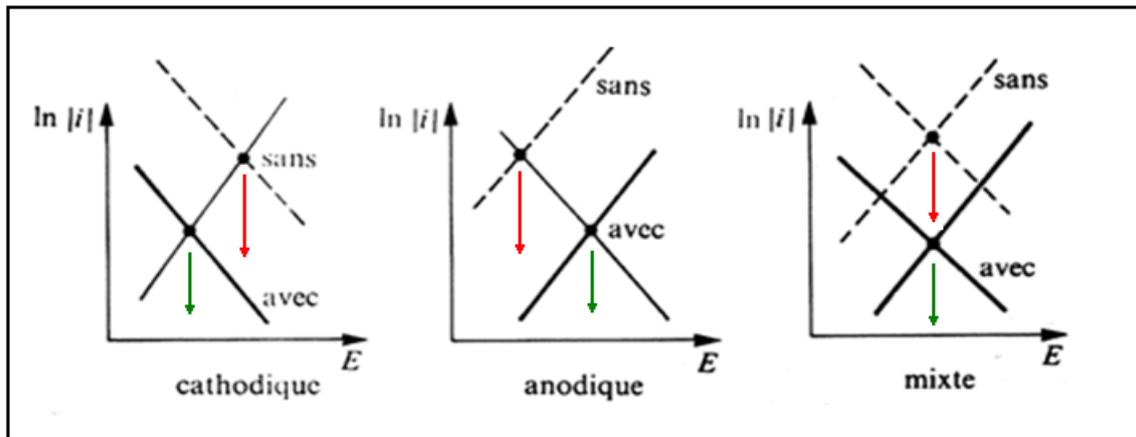


Figure II. 10 Diagrammes d'Evans montrant le déplacement du potentiel de corrosion dû à la présence d'un inhibiteur de corrosion (Constantine, 2011).

3.1.3.4 Mode d'emplois

L'application des inhibiteurs de corrosion dans le béton est soit par : les inhibiteurs mélangés, ajouté au béton frais ou à l'eau de gâchage (adjuvant au béton), généralement utilisé comme mortier de réparation, et les inhibiteurs d'imprégnation en surface appelé aussi inhibiteur de corrosion migrateur imprègne en surface, ou ils sont appliqués sur la surface du béton durci comme un traitement de consolidation et d'imperméabilisation pour protéger le béton. Bien que les inhibiteurs mélangés sont disponibles dans le commerce depuis les années 70 (Elsener et al, 2000), des inhibiteurs de corrosion qui migrent pour des structures en béton ont été proposées dans les 20 à 30 dernières années.

Avant toute application d'inhibiteur, la surface du béton doit être préparée par suppression de la peinture ou autre revêtement par sablage ou hydro sablage. Un traitement par inhibiteur n'est pas faisable si la surface a été préalablement traitée avec un hydrofuge. Afin de valider la mise en œuvre la plus adaptée, nous pouvons tester plusieurs méthodes d'application. La validation de la procédure est basée sur les essais de convenue (évaluation de la quantité de produit dans le béton et détermination de sa concentration au droit de l'armature). Cette concentration doit être conforme aux spécifications du fabricant, concernant la concentration minimale efficace.

La durabilité du traitement peut être vérifiée par :

- des mesures de teneur en inhibiteur au niveau de l'acier après quelques années ;
- le suivi dans le temps des mesures de potentiels (cartographie) ou de courants de corrosion (résistance de polarisation) (Sail, 2013).

3.1.4 L'efficacité d'un inhibiteur de corrosion

Quel que soit le type de mécanisme par lequel agit l'inhibiteur, l'efficacité de ce dernier caractérise le ralentissement de la corrosion, c'est-à-dire la diminution du courant de corrosion (ou de la vitesse de corrosion). Il existe plusieurs façons d'exprimer l'efficacité d'un inhibiteur ou d'une formulation inhibitrice. Les expressions les plus courantes sont :

✓ **Le taux d'inhibition :**

$$\tau\% = \frac{u_0 - u}{u_0} \times 100 \quad (\text{II. 6})$$

Où : u_0 et u représentent respectivement les mesures de la corrosion (perte de masse, intensité de corrosion, etc...) en l'absence et en présence d'inhibiteur ;

✓ **Le coefficient d'inhibition :**

$$\gamma = \frac{u_0}{u} \quad (\text{II. 7})$$

Lorsque le taux d'inhibition de plusieurs inhibiteurs est très élevé, le coefficient d'inhibition aide à mieux différencier entre eux ;

✓ **La concentration minimale efficace :**

Ce dernier ne fait pas référence au comportement du système en l'absence d'inhibiteur, mais suppose qu'un critère d'efficacité ait été défini (vitesse de corrosion maximale admissible) (Fiaud, 1990).

3.2 Action des inhibiteurs migrateurs

La prévention de la corrosion de l'acier doux a été étudiée par Elsener (Elsener et al, 1999) dans un milieu saturée d'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) et les solutions dans le mortier. L'effet protecteur de l'inhibiteur migrateur « **amides hydroxyalkyle** » contre la corrosion par piqûres causées par le chlorure d'attaque et par la corrosion uniforme à la suite de la carbonatation a été déterminé. Les résultats ont montré que des concentrations élevées ($\approx 10\%$) a permis l'inhibition de la corrosion par piqûres dans une solution contenant de l'initiation 1 M / L de chlorure de sodium (NaCl). Toutefois, les propriétés inhibitrices peuvent être perdues par évaporation du constituant volatil de l'inhibiteur ou par la précipitation de la fraction non volatile de l'inhibiteur en présence d'ions calcium.

L'addition de l'inhibiteur au mélange de mortier a abouti à un retard de l'initiation de la corrosion dans le cas des pénétrations de chlorure, mais aucune réduction significative du taux de corrosion. En outre, l'estimation de l'ampleur de l'effet retardateur sur l'amorce de corrosion sur des structures réelles est difficile, car l'inhibiteur a été trouvé à évaporer du mortier. Cette évaporation a entraîné une perte de propriétés inhibitrices. Par conséquent, l'efficacité à long terme de l'inhibiteur ne pouvait pas être garantie.

Aussi Elsener (Elsener et al, 2000) a étudié la vitesse de diffusion dans le mortier et la grande mobilité de la molécule d'hydroxyalkyl amine dans la pâte de ciment poreux. Ainsi, il a supposé qu'il est en principe possible d'obtenir des concentrations élevées d'inhibiteur à la barre d'armature pour influencer la vitesse de corrosion. Cependant, sur des échantillons de mortier armé présentant la corrosion par piqûres induite par des chlorures, aucune réduction du taux de corrosion ne peut être détectée après l'application de l'inhibiteur.

L'écart entre le taux de diffusion élevé observé et l'absence de corrosion d'atténuation a été rationalisée par le fait que seule la diffusion de la composante volatile de l'inhibiteur a été mesurée. La migration du composant non volatile (carbonique acides) à travers le béton n'a pas été prouvée, et il a été supposé avoir un faible taux de diffusion. Il a été conclu que l'un des constituants inhibiteurs n'a pas atteint la barre d'armature, ce qui peut expliquer le manque de propriétés inhibitrices.

Vasquez et Morris (Vasquez et Morris, 2001) ont étudié la performance d'un MCI à base d'un alcool aminoalkyle sur des échantillons de béton contenant des barres d'armatures. Deux rapports eau / ciment (E/C), de diverses teneurs en chlorures et deux conditions d'exposition ont été étudiés. L'efficacité d'inhibition a été suivie sur une période de 1000 jours à l'aide de paramètres tels que le potentiel de corrosion, le courant de corrosion et la résistance électrique. Les résultats montrent que, lorsque le béton est exposé à l'environnement marin, l'inhibiteur est capable de réduire la vitesse de corrosion (CR) que lorsque la teneur en chlorure est inférieure à 0,16% initiale en poids. Par rapport au ciment contenu. L'efficacité augmente à mesure que les E/C augmente. Il n'y a pas d'effet bénéfique lorsque la teneur en chlorure initiale est supérieure à 0,43%. Lorsque le béton est immergé dans une solution saline, aucun effet bénéfique lié à l'utilisation de l'inhibiteur pourrait être apprécié, indépendamment du poids /C ou la teneur en chlorures dans le béton initial.

Un béton traité avec un inhibiteur de corrosion migrateur propriétaire (de l'ordre Cortec MCI2005) sont présentés par Holloway et al. (Holloway et al, 2004). Le béton traité a été

évidées et ces noyaux ont ensuite été sectionnés et écrasés avant d'être immergés dans l'eau distillée pour extraire l'inhibiteur disponible. Les concentrations d'amines ont été quantifiées en utilisant une électrode de détection et d'ammonium ont été ensuite liés à la concentration d'inhibiteur présent. L'inhibiteur examiné, rapporté à contenir une combinaison d'amines volatiles et les composés amino-carboxylates, a été trouvée pour diffuser facilement à travers le béton. L'inhibiteur a été soumis à un essai de 5 ans et trouvée être efficace pour supprimer la corrosion de l'armature d'acier en présence de fortes concentrations de chlorure. Les profils de concentration indiquent que seules de faibles concentrations d'inhibiteur ont été nécessaires pour obtenir une inhibition dans ce cas.

L'efficacité de la migration des inhibiteurs de corrosion (MCI) et les mortiers de réparation contre la corrosion des barres d'armature a été étudiée par Fedrizzi et al. (Fedrizzi et al, 2004) dans des échantillons de béton fabriqués par du ciment Portland ordinaire avec un rapport égal à 0,6 E/C, et contenant 1.% en poids de chlorures. L'inhibiteur à base alcanolamine a été testé en plus avec un mortier commun et deux mortiers de réparation. Des techniques électrochimiques, des mesures de corrosion spectroscopie d'impédance électrochimique et le potentiel (EIE) ont été utilisés pour déterminer le comportement à la corrosion des échantillons quand une cellule contenant une solution de NaCl à 3,5% a été appliquée sur le mortier de réhabilitation.

Le porosimètre par mercure (MIP) a également été utilisé pour la caractérisation de la porosité totale des mortiers de réparation et une analyse chimique a été effectuée pour déterminer la quantité de chlorures pénétrés dans les couches de mortier et dans le substrat en béton. Les résultats démontrent que l'utilisation simultanée de l'inhibiteur à base alcanolamine avec un bon revêtement de barrière offre une protection contre la corrosion des barres d'armature et permet la réhabilitation de structures en béton détériorées.

Le but du document d'Ormellese et al. (Ormellese et al, 2005) est d'enquête sur l'efficacité de quatre inhibiteurs de corrosion commerciaux, trois composés d'inhibiteur organiques adjuvants (ajoutés au mélange de béton dans le dosage suggéré par le fabricant) (OCIA) et un nitrite inhibiteur à base (N), uniquement à des fins de comparaison. Les trois OCIA sont des esters d'amines (C), des aminoalcools (D) et alcanolamines (E) sur la base dans la prévention de corrosion d'acier au carbone induite par chlorure dans le béton. Les chlorures sont ajoutés dans le mélange de béton ou de l'extérieur par pénétration avec une solution de chlorure de sodium à 3,5%. L'efficacité des inhibiteurs a été évaluée par

surveillance à long terme des barres d'armature de la corrosion dans le béton armé et par inspection visuelle des barres d'armature après trois ans de tests.

Les principales conclusions sont tirées où tous les inhibiteurs testés sont capables de retarder l'apparition de chlorures corrosion induits par une réduction du taux de pénétration des chlorures dans le béton en remplissant ces pores et en bloquant sa porosité par la formation d'un complexe. Les inhibiteurs organiques analysés semblent réduire l'étendue de la zone corrodée et le taux de pénétration, mais la réduction est non significative. Les résultats obtenus en présence d'un inhibiteur de nitrite à base sont en accord avec la littérature.

Dans l'étude de Soylev et al. (Soylev et al, 2007), l'efficacité de deux générations « amino-alcool (AMA) » d'inhibiteurs de corrosion appliquée en surface sur la base (SACI) est étudiée. Les inhibiteurs ont été appliqués sur la surface du béton durci. Les résultats ont montré que la nouvelle génération du SACI était efficace pour maintenir le taux de corrosion faible par rapport aux échantillons témoins, malgré une teneur élevée en chlorure au niveau de l'acier intégré et l'efficacité augmente avec la concentration en chlorure. Cependant, aucun des inhibiteurs sont efficaces quand ils sont appliqués après l'initiation de la corrosion.

4 Conclusion

Ce chapitre a mis en avant l'importance des méthodes de détection de corrosion ainsi une revue sur les techniques possible de protection contre ce phénomène. Nous pouvons dire qu'acquérir des données collectées in situ pour alimenter les modèles prédictifs permettant d'évaluer les vitesses de corrosion et d'estimer la durée de vie résiduelle d'une structure en béton armé. A cet effet, les chapitres qui suivent nous permettrons d'étudier une méthode de suivi de corrosion en utilisant un moyen de protection.

CHAPITRE III : APPLICATION DES RESEAUX DE NEURONES AUX PROBLEMES DE GENIE CIVIL

1 Introduction

En ingénierie, les réseaux de neurones artificiels sont considérés comme un sujet interdisciplinaire moderne qui aide à résoudre divers problèmes qui ne pourraient pas être résolus par la modélisation et les méthodes statistiques traditionnelles.

D'autre part, les réseaux de neurones artificiels sont définis comme des systèmes qui résolvent des problèmes complexes pour lesquels il n'existe pas d'algorithmes séquentiels, mais uniquement des exemples de solutions d'où ils génèrent leurs propres règles d'apprentissage. Au fil des années, Les modèles de réseaux de neurones artificiels (RNA) ont été largement appliqués à divers domaines du génie civil, tels que le génie géotechnique, le génie des structures, le génie des ressources en eau, etc.

En génie civil, le programme de prise de décision est influencé par de nombreuses incertitudes qui pourraient être résolues non seulement en ayant besoin de calculs mathématiques, physiques et mécaniques, mais aussi en fonction de l'expérience des praticiens. La recherche sur les réseaux de neurones en intelligence artificielle a récemment fourni un système puissant qui fonctionne comme complément à un tel système expert conventionnel. Il présente un certain nombre de propriétés intéressantes pour modéliser un comportement mécanique complexe ou un système.

Dans ce qui suit, une revue globale de l'utilisation de réseaux de neurones sera abordée pour le domaine de génie civil.

2 Réseau neuronal artificiel

Les origines des réseaux de neurones artificiels (RNA) sont inspirées des systèmes nerveux biologiques. Le cerveau biologique est constitué de milliards de neurones hautement interconnectés formant un réseau de neurones travaillant à l'unisson pour résoudre un problème spécifique (Haykin, 1999, Jeng et al, 2003).

Les réseaux de neurones artificiels (également appelés réseaux de neurones) résultent des caractéristiques positives de plusieurs axes de recherche pour résoudre de nombreux problèmes d'ingénierie complexes et différents qui ne pourraient pas être résolus autrement (à l'aide des méthodes de modélisation et statistiques traditionnelles) (Flood et Nabil, 1994, Flood et Paul, 1996, Jeng et al, 2003). Aussi, elle est considérée comme une des branches de

la science informatique impliquée dans la recherche, la conception et l'application d'un ordinateur intelligent (Singh et al, 2019).

ANN est un système de traitement de l'information distribué massivement parallèlement, qui ont une propension naturelle à rendre les connaissances expérimentales disponibles et à les stocker (Jeng et al, 2003, Coolen et al, 2005). Les réseaux sont capables de collecter, de mémoriser et de traiter de nombreuses données expérimentales. Les performances et la complexité de calcul des réseaux de neurones sont caractérisées par l'architecture du réseau, qui dépend généralement de la détermination des couches d'entrée, de sortie et cachée. Selon ASCE, le développement de l'ANN repose sur les règles suivantes (ASCE, 2000) :

- Le traitement de l'information se produit au niveau de nombreux éléments appelés nœuds, également appelés unités ou neurones.
- Les signaux sont transmis entre les nœuds via des liaisons de connexion.
- Chaque lien de connexion a un poids associé qui représente sa force de connexion.
- Chaque nœud applique généralement une transformation non linéaire appelée fonction d'activation à son entrée réseau pour déterminer ses signaux de sortie.

2.1 Neurone

Le neurone artificiel reçoit les signaux d'entrée et génère les signaux de sortie. Chaque analyse neuronal (ANN) organise ces nœuds selon un arrangement particulier avec le nombre de couches suivantes : single (réseaux de Hopfield); bicouche (réseaux de résonance adaptative Carpenter / Grossberg); et multicouches (la plupart des réseaux de rétroprojection). Les ANN peuvent également être classées en fonction de la direction du flux et du traitement de l'information. Généralement, les nœuds sont disposés en couches ou l'information part de la couche d'entrée vers la couche de sortie. La sortie du nœud d'une couche dépend uniquement des entrées qu'il reçoit des couches précédentes et des poids correspondants, car les nœuds d'une couche sont connectés seulement à la suivante. Par contre, pour un réseau récurrent de ANN l'information passe dans les deux sens (du nœud d'entrée vers le nœud de sortie et inversement) (ASCE, 2000).

2.2 Architecture du réseau de neurones

2.2.1 Types de couches

En générale, Le réseau de neurones est composé de nombreux neurones connectés mutuellement, regroupés en couches. Le nombre de couche détermine la complicité du réseau.

Un réseau neuronal artificiel peut être divisé en trois parties (Lazarevska et al, 2014, Da Silva et al, 2017, Singh et al, 2019) :

2.2.1.1 Couche d'entrée

Dans la plupart des réseaux, la (première) couche d'entrée accepte des données de l'environnement en variables d'entrée pour le problème considéré. Cette couche d'entrée constitue un moyen de fournir des informations au réseau sous la forme de données, de signaux, de caractéristiques ou de mesures de sources externes. La règle de base est que pour chaque donnée, nous ne devons avoir qu'une seule valeur d'entrée. Ces entrées sont normalisées dans la limite produite selon les fonctions d'activation.

2.2.1.2 Couche cachée

Le terme «caché» fait référence au fait que cette partie du réseau de neurones n'est pas vue directement depuis l'entrée ou la sortie du réseau (Haykin, 1999). Le nombre de couches cachées et le nombre de nœuds dans chaque couche cachée sont généralement déterminés par une procédure d'essai et d'erreur. Les nœuds des couches voisines du réseau sont entièrement connectés par des liens. Des neurones responsables de l'extraction des motifs associés au processus ou au système analysé. Ces couches effectuent la majeure partie du traitement interne à partir d'un réseau.

2.2.1.3 Couches de sortie

Les résultats finaux du réseau sont les sorties des neurones de la dernière couche de réseau qui représente la solution du problème analysé. Selon le type de problème, le réseau peut avoir une ou plusieurs sorties.

2.2.2 Les classes du réseau de neurone artificiel

L'architecture principale des réseaux de neurones artificiels prenant en compte le dépôt de neurones, leurs interconnexions et la composition de sa couche. En général, l'architecture de réseau est identifiée par trois classes fondamentalement différentes :

2.2.2.1 Réseau de transmission simple couche

Ce réseau de neurones artificiels ne comporte qu'une seule couche d'entrée pour une seule couche de sortie correspondante, mais pas l'inverse. Autrement dit, ce réseau est strictement du type à action directe. La figure III.1 montre l'illustration d'un réseau pour le cas de « n » nœuds dans les couches d'entrée avec « m » couche de sortie. Un tel réseau est désigné réseau à couche unique en référence à la couche de sortie des nœuds de calcul

(neurones). Nous ne comptons pas la couche d'entrée des nœuds source car aucun calcul n'y est effectué (Haykin, 1999).

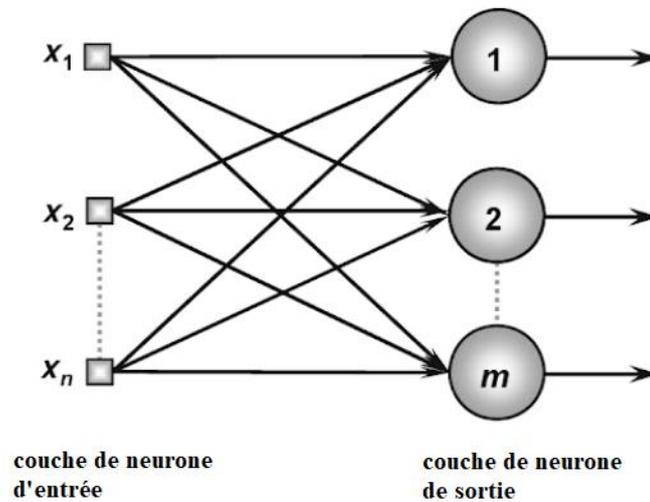


Figure III. 1 illustration du réseau avec une seule couche de neurones (Da Silva et al, 2017).

2.2.2.2 Réseau de transfert de donnée à couches multiples

La deuxième classe d'un réseau de neurones artificiels possède une ou plusieurs couches cachées entre la couche d'entrée et les couches de sortie, dont les nœuds de calcul sont appelés par neurones cachés ou unités cachées (Haykin, 1999, Singh et al, 2019). Cette classe est généralement utilisée pour des problèmes complexes. Le graphique d'architecture de la figure III.2 illustre la disposition d'un exemple de multicouche avec une couche d'entrée avec 10 signaux d'échantillons, 4 couches neuronales cachées et enfin de 2 couches neurale de sortie représentant la solution du problème analysé.

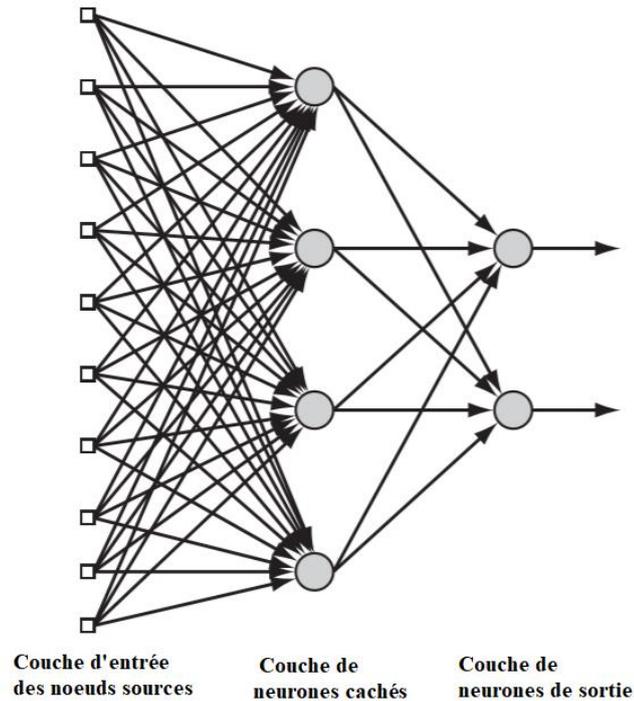


Figure III. 2 Réseau direct entièrement connecté avec une couche cachée et une couche de sortie (Haykin, 1999).

2.2.2.3 Réseaux récurrents

Un réseau de neurones récurrent se distingue des autres réseaux de neurones en possédant au minimum une boucle de contre-réaction. Les figures III.3 et III.4 illustrent des exemples de réseaux récurrents. Dans la structure décrite dans la figure III.3, le réseau est constitué d'une seule couche de neurone avec des boucles de rétroaction soi-même. Chaque neurone renvoi son signal de sortie vers sa propre entrée sans avoir de neurones cachés.

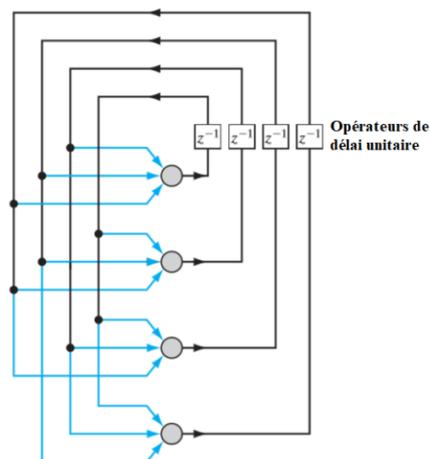


Figure III. 3 Réseau récurrent sans boucles d'auto-retour et sans neurones cachés (Haykin, 1999).

Sur la Figure III.4, il est illustré une autre classe de réseaux récurrents à neurones cachés d'où les connexions de rétroaction proviennent des neurones cachés ainsi que des neurones de sortie. Dans un réseau de neurones récurrent, la présence de boucles de rétroaction impliquent l'utilisation de branches particulières composées d'éléments de retard d'unité (notés z^{-1}) (Haykin, 1999). Ces éléments impliquent un comportement dynamique non linéaire pour un réseau de neurone avec des unités non linéaires. De ce fait, les boucles de rétroaction ont un impact sur les performances et la capacité d'apprentissage du réseau.

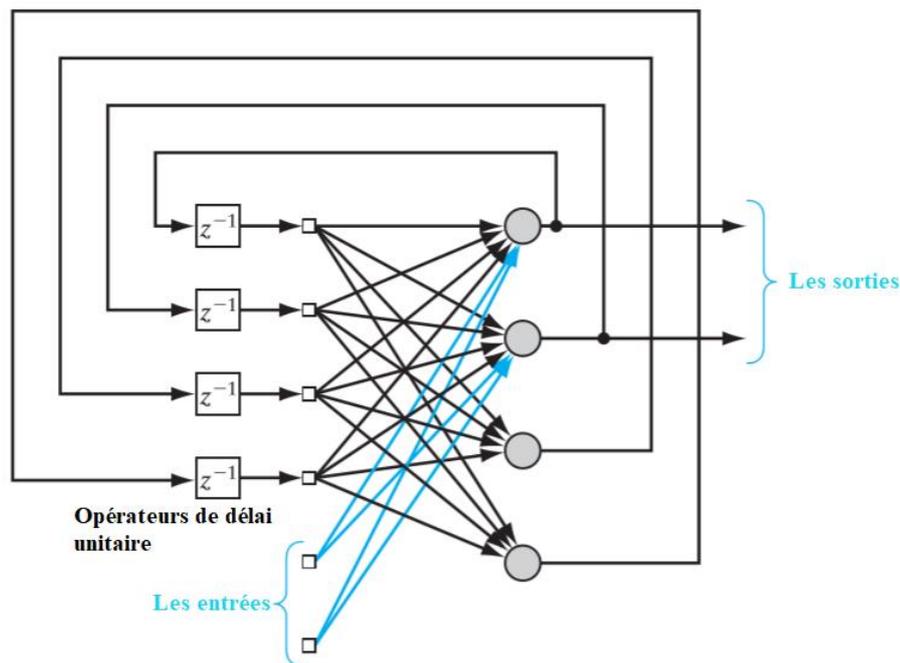


Figure III. 4 Réseau récurrent avec neurones cachés (Haykin, 1999).

3 Aspects mathématiques d'ANN

3.1 Coefficient de pondération

Un diagramme schématique d'un nœud typique est illustré à la figure III.5. Les entrées du système sont représentées avec un vecteur composé d'un certain nombre de variables $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ qui influencent le comportement du système. Le vecteur de pondération $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ représente le poids de connexion entre « j » nœud d'entrée avec son propre nœud. Chaque nœud d'entrée a son coefficient de poids. Ce coefficient est considéré un élément clés pour un réseau de neurone en stimulant les neurones (Flood et Nabil, 1994, Flood et Paul, 1996, ASCE, 2000, Lazarevska et al, 2014). Les impulsions de neurone d'entrée sont obtenues en multipliant ces coefficients de pondération avec les signaux d'entrée (Lazarevska et al, 2014).

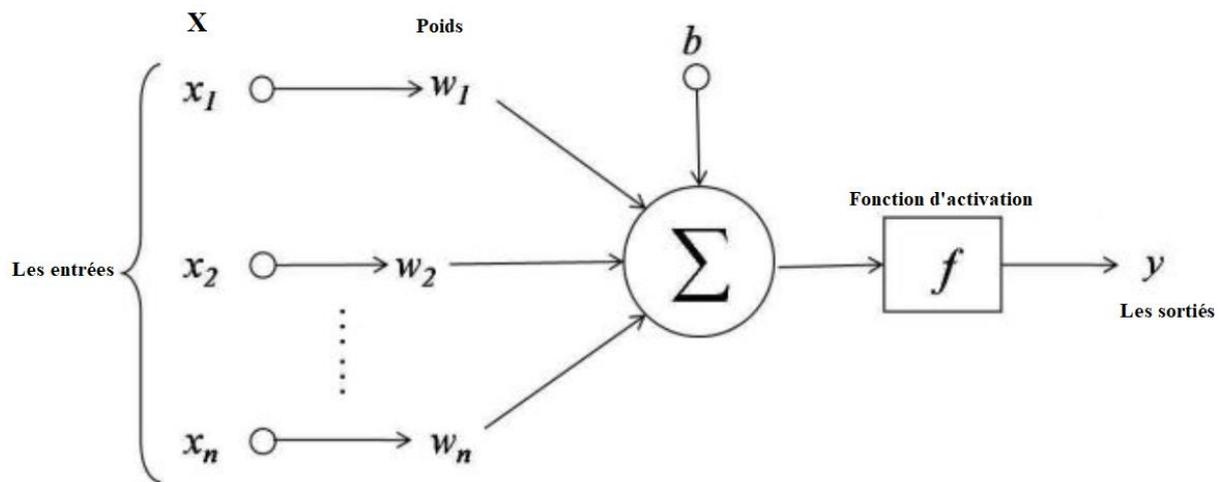


Figure III. 5 Diagramme schématisé d'un nœud typique (ASCE, 2000).

Le vecteur de sortie système Y est composé d'un certain nombre de variables résultantes de la valeur de la fonction f par rapport au produit intérieur du vecteur X et W, moins b et qui représentent le comportement du système ($Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$). L'équation III.1 définit l'opération :

$$y_j = f(X \times w_j - b_j) \quad (III.1)$$

D'où :

b est la valeur de seuil, également appelée polarisation, associée à ce nœud.

La fonction f est appelée fonction d'activation.

Dans le langage ANN, le biais b, du nœud doit être dépassé avant de pouvoir être activé. L'impulsion reçue est traitée par une fonction de transformation appropriée (fonction d'activation f(x)).

3.2 Fonction d'activation

La fonction d'activation a pour but de déterminer si le résultat de l'impulsion de synthèse peut générer une sortie. Elle est liée directement aux neurones des couches cachées en une fonction non linéaire. Sa forme fonctionnelle détermine la réponse d'un nœud au signal d'entrée total qu'il reçoit. Presque toutes les fonctions non linéaires peuvent être utilisées en tant qu'une fonction d'activation, mais la plus couramment utilisée est la fonction sigmoïde (tangente hyperbolique et logistique). Sa popularité peut être attribuée à sa monotonie, réponse graduée et la simplicité de sa dérivée qui sera utilisée pendant le

processus d'entraînement (ASCE, 2000, Lazarevska et al, 2014). La fonction est présentée comme suite (équation III.2) :

$$f(t) = \frac{1}{1+e^{-t}} \quad (\text{III. 2})$$

D'où :

$f(t)$ est la valeur normalisée du résultat de la fonction de résumé.

La valeur de sortie, après la transformation, sera comprises entre 0 et 1 (Flood, 1990, Flood et Nabil, 1994, Flood et Paul, 1996, Jeng et al, 2003). A l'absence de la fonction d'activation (transformation), la valeur de sortie risque d'être trop grande, particulièrement pour les réseaux complexes (peu de couches cachées) (Lazarevska et al, 2014).

4 Processus de formation et propriétés de l'apprentissage

Les réseaux de neurones artificiels ont plusieurs caractéristiques de base, l'une des caractéristiques les plus distingué la capacité d'apprendre à partir de la présentation d'échantillons (motifs), qui exprime le comportement du système (Lazarevska et al, 2014, Da Silva et al, 2017). La capacité d'apprentissage rapproche du monde réel et de la pensée humaine, ainsi une fois que le réseau a appris la relation entre les entrées (des données chaotiques et incompréhensibles) et les sorties, il peut généraliser les solutions de qualité, même si les données d'entré ne sont pas complètes. Par conséquent, le processus de formation d'un réseau de neurones consiste à généraliser les solutions produites par ses sorties en ajustant les poids et les seuils synaptiques de ses neurones pour minimiser la fonction d'erreur (Da Silva et al, 2017, Singh et al, 2019).

Ce processus est répété plusieurs fois jusqu'à ce que le réseau réagisse comme nous le souhaitons ou jusqu'à ajustement des coefficients de pondération de toutes les données d'apprentissage (Lazarevska et al, 2014). Le réseau est dit formé, lorsqu'il fournit des sorties correctes pour toutes les données de formation. Ensuite le réseau génère des sorties pour de nouvelles données d'entrée différentes de celles de formation (Flood, 1990, Jeng et al, 2003).

L'équation III.3 montre la fonction d'erreur utiliser dans un processus d'apprentissage pour qu'un ANN génère un vecteur de sortie $Y = (y_1, y_2, \dots, y_p)$ aussi proche que possible du vecteur cible $T = (t_1, t_2, \dots, t_n)$, en trouvant les matrices de pondération optimales W et les vecteurs de polarisation V (ASCE, 2000).

$$E = \sum_P \sum_p (y_i - t_i)^2 \quad (\text{III. 3})$$

D'où :

t_i : une composante de la sortie souhaitée T ;

y_i : une sortie d'ANN correspondante ;

p : nombre de nœuds de sortie ;

P : nombre de modèles d'entraînement.

Habituellement, l'ensemble des échantillons disponibles du comportement du système est divisé en plusieurs sous-ensembles, appelés sous-ensemble d'apprentissage, de test et de validation. Le sous-ensemble d'apprentissage, composé de 60 à 90% d'échantillons aléatoires de l'ensemble. Par contre, le sous-ensemble de test, composé de 10 à 40% de l'ensemble complet d'échantillons qui sert à vérifier les capacités du réseau à généraliser des solutions qui se situent dans les niveaux acceptables, permettant ainsi de valider une topologie donnée (Da Silva et al, 2017). Cependant, les caractéristiques statistiques des données doivent également être prises en compte lors du dimensionnement de ces sous-ensembles dans un réseau neuronal artificiel. Le processus d'apprentissage et de formation a une importance capitale dans les réseaux de neurones vus leur applicabilité à la résolution de problèmes d'ingénierie.

4.1 Apprentissage de formation supervisé

En apprentissage supervisé nécessite un enseignant externe pour guider le processus de formation. Le réseau consiste à disposer un historique d'ensemble d'entrées de modèle (cause du système) et une sortie équivalente qui sont les variables d'effet. Le processus et son comportement est alors représenté par une table avec des données d'entrée / sortie, également appelée table attribut / valeur. L'hypothèse est formulée à partir de cette information sur le système en cours d'apprentissage. A cet effet, l'application de l'apprentissage supervisé dépend uniquement de la disponibilité de cette table attribut / valeur et se comporte comme si un "coach" enseignait au réseau quelle était la réponse correcte pour chaque échantillon présenté (Da Silva et al, 2017).

La sortie réelle du réseau est comparée à la sortie ciblée et une erreur est calculée. Cette erreur est utilisée pour ajuster les poids de connexion entre les entrées et les sorties du modèle afin de réduire l'erreur entre les sorties historiques et celles prédites par le RNA

(Masters, 1993). Une fois la formation terminée, on espère que le RNA pourra alors générer des résultats raisonnables compte tenu des nouveaux apports.

4.2 Apprentissage non supervisé

Dans l'apprentissage non supervisé, le réseau est uniquement présenté avec les stimuli d'entrée qui adapte automatiquement ses poids de connexion en regroupant ces modèles d'entrée en classes de fonctionnalités similaires et il n'y a pas de sorties souhaitées. L'algorithme d'apprentissage ajuste les poids et les seuils synaptiques du réseau afin de refléter ces grappes au sein du réseau lui-même (Da Silva et al, 2017, Singh et al, 2019). Sinon, le concepteur de réseau utilise ses connaissances du problème pour spécifier (a priori) la quantité maximale de ces grappes possibles.

4.3 Apprentissage par renforcement

En intelligence artificielle, les méthodes d'apprentissage par renforcement consistent à apprendre les actions expérimentales à prendre pour optimiser une récompense quantitative au cours du temps. En outre, Ils analysent en permanence la différence entre les réponses produites par le réseau et la sortie souhaitée correspondante (Sutton et Barto, 1990). Les paramètres neuronaux internes sont ajustés en fonction des informations qualitatives ou quantitatives acquises lors de l'interaction avec l'environnement, de manière probabiliste. Ces informations sont utilisées pour évaluer les performances d'apprentissage qui se fait généralement par essais et erreurs. L'apprentissage par renforcement considère un ensemble fini de solutions possibles qui peuvent être récompensées si elles ont des chances de générer des résultats satisfaisants (Da Silva et al, 2017).

4.4 Apprentissage hors ligne

L'apprentissage hors ligne, également appelé apprentissage par lots, convient aux réseaux de neurones qui opèrent en environnement stationnaire. Les ajustements sur les vecteurs de pondération et les seuils du réseau sont effectués une fois que tout le jeu d'apprentissage est présenté. En raison de l'invariance d'un tel environnement au cours du temps, le nombre de points observés dans les échantillons peut être déterminé par un apprentissage limité à un ensemble fini représentatif de stimuli. Par conséquent, les réseaux utilisant l'apprentissage hors ligne nécessitent au moins une époque d'apprentissage pour pouvoir exécuter une étape d'ajustement sur leurs poids et leurs seuils (Da Silva, 2017). La disponibilité des échantillons d'apprentissage doivent être pendant tout le processus d'apprentissage.

4.5 Apprentissage en ligne

Dans l'apprentissage hors ligne, les ajustements sur les poids et les seuils du réseau sont effectués après la présentation de chaque échantillon d'apprentissage. Ainsi, le rejet de l'échantillon respectif peut se faire après avoir exécuté l'étape d'ajustement. L'apprentissage en ligne avec cette configuration est généralement utilisé lorsque le comportement du système cartographié change rapidement (Da Silva, 2017).

5 Application de l'analyse neuronale en génie civil

Au cours de ces 20 dernières années, l'utilisation des ANN a été une pratique en constante augmentation dans toutes les disciplines scientifiques et technologiques. De plus, les ANN ont été appliquées avec succès à de nombreuses applications d'ingénierie, notamment en génie civil par exemple : gestion de la construction, matériaux de construction, optimisation hydraulique, ingénierie géotechnique et des transports. La grande majorité des applications de génie civil des réseaux de neurones repose sur un simple algorithme de propagation en retour.

5.1 Le comportement des matériaux de construction

Le béton armé présente une complexité de comportement structurel vue sa nature hétérogène, sa nature composite et de la variété de facteurs qui influent sur ce comportement. Pour étudier son comportement les analyses du RCC ont une portée limitée et approximatives, car elles s'appuient sur les résultats de tests expérimentaux, à la fois coûteux et longs à réaliser. L'utilisation d'une branche de l'intelligence artificielle connue sous le nom de réseau de neurones est favorable comme alternative rapide et fiable à de tels tests expérimentaux.

Plusieurs chercheurs ont utilisé les réseaux de neurones pour simuler le comportement des matériaux. Elle est utilisée pour analyser les différentes propriétés tels que : la résistance à la compression du béton selon les différents mélanges de béton, la valeur d'affaissement du béton (Öztaş et al, 2006), la valeur du cisaillement ultime la force exercée sur les poutres en béton et la valeur de la résistance ultime (Pu et Mesbahi, 2006). Aussi, d'autres propriétés matérielles telles que le module d'élasticité, le rapport de positionnement, la résistance ultime et la limite d'élasticité (Pandya et Shah, 2014).

5.2 L'application en géotechnique

Depuis le début des années 90, les ANN ont été appliqués avec succès à presque tous les problèmes d'ingénierie géotechnique. Les propriétés géotechniques des sols sont

contrôlées par des facteurs tels que la minéralogie, l'eau interstitielle. L'utilisation des méthodes statistiques pour étudier les interactions des facteurs est difficile à établir en raison de leur interdépendance (Yang et Rosenbaum, 2002).

Pour les ouvrages de génie civil, la liquéfaction pendant le tremblement de terre est l'un des phénomènes très dangereux de rupture du sol qui les endommagent énormément. Cela a attiré de nombreux chercheurs (Agrawal et al, 1997, Ali et Najjar, 1998) pour étudier l'applicabilité des RNA à la prévision de la liquéfaction.

Les autres applications des RNA en génie géotechnique comprennent : la reconstitution du profil des contraintes durant l'histoire d'une argile à partir des données du PCPT (Pradeep et Nitin, 2002), estimation des tassements pour les fondations superficielles (Shahin et al, 2002) et ingénierie géo-environnementale (Shang et al, 2004).

5.3 Le phénomène de corrosion

Certains chercheurs ont utilisé les RNA pour prévoir le comportement et la modélisation pour résoudre les problèmes liés à la corrosion. Cottis et al. (1999) ont proposé l'ANN pour la présentation d'un modèle permettant d'estimer un potentiel en fonction de la composition de la solution et de la température pour l'acier inoxydable AISI 304. En outre, Parthiban et al. (2005) ont appliqué cette technique pour connaître le comportement à la corrosion de l'acier noyé dans le béton dans différentes conditions.

Ramana et al. (2009) ont présenté un modèle simulant les interrelations complexes entre ce potentiel et divers paramètres environnemental pour l'acier inoxydable austénitique. Subir (2012) a utilisé Neural Network pour étudier l'effet de paramètres environnementaux dans d'autres systèmes afin de prédire le taux de corrosion de l'acier doux dans l'eau de mer. En outre, les cartographies 3D ont clairement mis en évidence les interrelations complexes entre les variables et l'importance de l'effet conjoint des variables plutôt que sur une seule variable sur le taux de corrosion de l'acier dans l'eau de mer.

Dans le cadre des recherches menées par Kwon et Kim (2012), il a été proposé une technique permettant de calculer les proportions de mélanges de béton satisfaisant la durée de vie en réseau de neurones (NN). Jančíková et al. (2013) ont utilisé des réseaux de neurones artificiels pour prédire la corrosion de l'acier exposée dans des conditions atmosphériques. Le choix de leurs données d'entrée est le suivant : temps d'exposition, température locale, quantité de précipitation, humidité relative, pH des précipitations et concentration des

principaux polluants. Le modèle a permis de prédire la perte de corrosion de l'acier avec une erreur relative suffisamment petite (6%).

Les performances du modèle ANN de Reddy (2014) ont été atteintes avec les paramètres d'entrée du modèle, soit la température, la durée d'humidité, la concentration en dioxyde de soufre, la concentration en chlorure, le temps d'exposition et la sortie du modèle en profondeur de corrosion. Les résultats ont montré un bon accord avec les connaissances expérimentales sur les environnements où les environnements SO₂ et Cl⁻ ont plus d'influence que d'autres éléments.

L'étude de Din et al. (2015) utilise la méthode du réseau de neurones artificiels (ANN) pour développer un modèle de croissance de la corrosion dépendant du temps pour les oléoducs et les gazoducs. Dans cette recherche, ils n'utilisent pas de méthodes de correction des données. Les résultats de cette étude permettent de prédire la fiabilité de la structure du pipeline en ce qui concerne la probabilité de défaillance ou l'estimation de la durée de vie.

Horvatić et al. (2016) ont testé l'impact des ions chlorure sur le potentiel de corrosion et de piqûre de l'acier inoxydable AISI 304 avec différentes concentrations, températures et valeurs de pH. Des méthodes expérimentales et des méthodes de réseau de neurones artificiels ont été appliquées pour prédire le comportement de l'acier inoxydable. Les résultats des modèles développés ont montré un bon accord avec les résultats expérimentaux et aucune différence significative entre les modèles.

Min-Der et al. (2017) a utilisé ANN avec les données d'enquête sur la corrosion atmosphérique de l'acier au carbone à Taiwan recueillies par l'Institut de la technologie portuaire et marine pour développer un modèle de prévision de la corrosion.

Shirkhani et al. (2019) a utilisé le réseau de neurones pour analyser des données provenant de différents types de béton sous l'influence d'ions chlorures. Cette méthode leur a permis de prédire la force de liaison entre le béton et l'armature en acier. La complexité des phénomènes de corrosion, impliquant l'effet du potentiel de corrosion comme sortie unique, nécessite la modélisation par des réseaux de neurones artificiels (NN).

Cette méthode a une excellente capacité à modéliser des problèmes non linéaires avec plusieurs variables. Les réseaux de neurones permettent d'économiser du temps et de l'argent en prélevant des échantillons de données plutôt que des ensembles de données complets pour trouver des solutions (Rahali et al. 2018).

6 Conclusion

Dans de nombreuses situations de génie civil, il est démontré que les réseaux de neurones sont une meilleure méthode de calcul par rapport aux méthodes classiques, principalement en raison de leur capacité à analyser des données contenant des erreurs ou à résoudre des problèmes sans solution raisonnable et à tirer parti des données antérieures.

Les mesures électrochimiques du potentiel de corrosion obtenues par la méthode non destructive (demi-cellule) sont utilisées pour estimer un indicateur de durabilité d'une structure en béton. Dans le chapitre V, l'analyse neuronale est effectuée pour ces mesures.

**CHAPITRE IV : ANALYSE PROBABILISTE POUR
L'ESTIMATION DU TEMPS D'INITIATION DE LA
CORROSION**

1 Introduction

La principale cause de dégradation des structures de pont en béton armé est la corrosion de l'acier d'armature induite par les chlorures. Ce problème peut réduire considérablement la facilité de maintenance et la sécurité, tout en augmentant les coûts de réparation et de maintenance (Bastidas-Arteaga et Schoefs, 2012, Bastidas-Arteaga et Schoefs, 2015, Koch et al, 2016). Le temps d'initiation à la corrosion (t_{ini}) est un facteur clé dans la prévision de la durée de vie d'un élément en béton, car le risque de corrosion de l'acier dépend fortement de la qualité de la conception et de la construction de la couverture en béton. D'où le béton représente la barrière physique contre les agents agressifs externes.

L'approche d'analyse basée sur la méthode probabiliste est le moyen le plus fiable de résoudre les problèmes d'incertitude. Ce dernier a récemment suscité un vif intérêt de la part des chercheurs (Morcous et al, 2002, Lounis, 2003, Daigle et al, 2004, Darmawan et Stewart, 2006, Bastidas-Arteaga et Schoefs, 2012, Bastidas-Arteaga et Schoefs, 2015, Shayanfar et al, 2015, Nguyena et al, 2017). A mesure que les concepts de fiabilité sont mieux compris et que davantage de logiciels sont développés, les applications basées sur la fiabilité passent de simples exemples hypothétiques utilisant des données fictives à des problèmes d'ingénierie plus complexes, pratiques et réalistes (Estes et Frangopol, 1999).

La méthode de simulation de Monte Carlo (MCS) est utilisée pour calculer la fonction de distribution de probabilité (PDF) et la probabilité de défaillance de la réponse du système au moment du déclenchement de la corrosion. Pour illustrer la prévision de la durée de vie d'une structure en béton armé, un exemple d'élément de pont en béton se détériorant sous l'effet d'une corrosion initiée par les chlorures est analysé (Ying et Vrouwenvelder, 2007).

2 Modèle simplifié pour prévoir le temps d'initiation de la corrosion

Le modèle simplifié actuellement utilisé pour décrire la pénétration du chlorure dans le béton est exposé dans le chapitre 1 paragraphe III.1. L'équation (IV.1) représente la concentration en ions chlorure libres $C(x, t)$ à une profondeur x après un temps t pour un milieu semi-infini est égale à :

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

Basé sur l'équation IV.2, des solutions de calcul ont été proposées dans l'équation IV.3. Pour la solution classique de la loi de Fick (l'équation IV.1) est obtenu lorsque $C(x, t)$ est égal à C_{th} et x est égal à l'épaisseur du revêtement de béton, comme suit (Malioka, 2009) :

$$C_{th} = C_s \times \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{c_t}{2 \times \sqrt{D_c \times t_{ini}}} \right) \right] \quad (\text{IV.2})$$

$$t_{ini} = \frac{c_t^2 \left[\operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \frac{C_{th}}{C_s} \right) \right]^2}{4D_c} \quad (\text{IV.3})$$

D'où :

t_{ini} : le temps initial de corrosion est calculé en comparant la concentration en chlorure dans la profondeur de béton $C(c_t, t)$ avec le seuil de concentration (C_{th}).

$\operatorname{erf}^{-1}()$: est l'inverse de la fonction d'erreur.

Où x dans l'équation IV.1 est remplacée par la profondeur de la couverture en béton c_t puisque l'équation IV.3 se réfère à la première couche de renforcement. Le C_{th} est défini comme la concentration de chlorure dans laquelle la couche de rouille passive de l'acier est détruite et la réaction de corrosion commence. Par conséquent, le t_{ini} est obtenu lorsque la concentration en chlorure au niveau de la barre de remplissage atteint le seuil de concentration (C_{th}) (Lounis, 2003, Lounis et Daigle, 2008).

2.1 Discrétisation structurelle avec expansion Karhnuen-Loeve (K-L)

Dans la littérature, nous pouvons trouver plusieurs méthodes de discrétisation proposées par les chercheurs, qui consistent à décomposer les champs initiaux en fonctions déterministes complètes optimales (Vanmarcke et Grigoriu, 1983, Spanos et Ghanem, 1989, Sudret et Berveiller, 2008). A cet effet, la discrétisation d'une section implique une subdivision de la structure de l'échantillon en petits morceaux de champ aléatoire dans la direction de l'axe des x et de l'axe des y , comme il est illustré sur la Figure IV.1. Mais, la discrétisation avec plus d'éléments, fournit des résultats plus précis mais nécessite également plus de temps de calcul.

Le passage de la représentation du champ aléatoire continu à un nombre limité de variables aléatoires est nécessaire pour introduire l'incertitude des propriétés des matériaux dans un modèle de calcul. Pour cela, il faut choisir une méthode de discrétisation. Dans cette

étude, la méthode d'expansion Krahnun-Loève (K-L) a été adoptée pour la discrétisation de la région étudiée dans un pont en béton aux Pays-Bas (Ying et Vrouwenvelder, 2007).

Le phénomène de corrosion peut être modélisé par plusieurs méthodes (par exemple, FORM, FOSM, etc.), mais la méthode MCS est considérée comme la méthode la plus robuste entre elles (Sudret, 2008, Houmadi et al, 2012). La méthode de Monte Carlo peut être utilisée pour effectuer l'analyse de fiabilité en ce qui concerne l'occurrence de chaque mode de défaillance possible. Dans cette recherche, il s'effectue dans l'espace de variables standard normalement indépendantes.

Dans cette étude, le choix de la distribution de probabilité normale est basé sur la littérature (Ying et Vrouwenvelder, 2007 ; Polder et Rooij, 2005 ; Polder et Rooij, 2003). De plus, plusieurs chercheurs ont utilisé cette distribution pour étudier l'effet des variables aléatoires du système de réponse (Ying et Vrouwenvelder, 2007 ; Polder et Rooij, 2005 ; Polder et Rooij, 2003 ; Duracrete, 2000 ; Stewart et Mullard, 2007). Il est possible de modéliser certains phénomènes avec une distribution de probabilité log-normale. À cette fin, une étude comparative entre la distribution normale et log-normale sur les PDF de la réponse système (t_{ini}) a été étudiée.

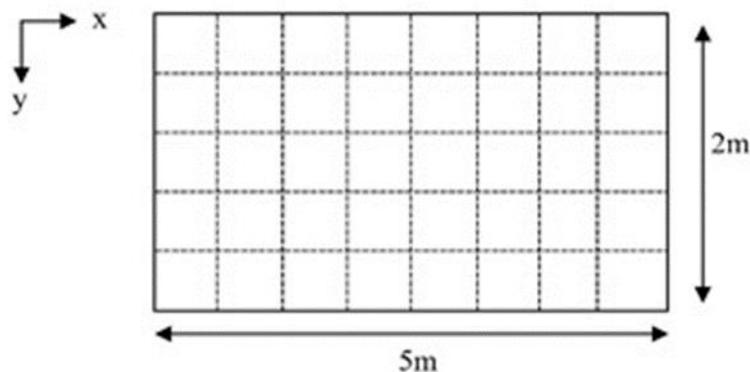


Figure IV. 1 Modèle de discrétisation à 2 dimensions.

2.2 Quantification statistique des paramètres dans le modèle simplifié

Les paramètres d'un modèle peuvent être quantifiés à l'aide de mesures structurelles réelles ou, si cela n'est pas possible, les mesures doivent être effectuées en laboratoire. Il est donc compréhensible que les caractéristiques statistiques des paramètres varient en fonction de la source des mesures (Faber et Sørensen, 2002). Dans ce cas, la quantification était basée sur des mesures dans un faisceau de pont en béton aux Pays-Bas (Ying et Vrouwenvelder, 2007). Cette région de structures exposées est située dans un environnement marin très agressif.

Le tableau IV.1 donne les paramètres d'entrée de la quantification des variables dans le modèle simplifié suivant. La moyenne et l'écart type des paramètres sont fournis par les auteurs (Polder et Rooij, 2005, Polder et Rooij, 2003).

Dans le tableau IV.1, les COV des variables aléatoires présentées sont calculées par équation IV.4 au paragraphe I.3. Nous notons que la couverture en béton a un très petit écart type. Rooij et Polder (Polder et Rooij, 2003) considèrent que la qualité du béton des éléments de pont est très bonne. En revanche, dans la littérature, il est toujours intéressant d'étudier avec des valeurs importantes, par exemple dans Duracrete (Duracrete, 2000), la moyenne et l'écart type sont respectivement égaux à 40 mm et 8 mm.

Tableau IV. 1 Données d'entrée pour le moment d'initiation de la corrosion (Polder et Rooij, 2005, Polder et Rooij, 2003).

Variables	Description	Distribution	Moyenne	Ecart type	Coefficient de variation (%)
c_t	L'enrobage	Normal	41,1 (mm)	1,4 (mm)	3,4
C_s	Teneur en ions chlorure à la surface du béton	Normal	5,3% (en masse de ciment)	1,47% (en masse de ciment)	28
C_{th}	Concentration seuil en chlorure	Normal	0.5% (en masse de ciment)	0.1% (en masse de ciment)	20
D_c	Diffusion effective de chlorure	Normal	$8,83 \times 10^{-6}$ (m ² / ans)	$3,69 \times 10^{-6}$ (m ² / an)	42

2.3 Étude de conception

Pour étudier des travaux de génie civil utilisant l'approche probabiliste, la fonction d'état limite est définie par le domaine de sécurité ou par le domaine de défaillance. Dans cette étude, les probabilités de défaillance inférieures à 10^{-3} sont considérées comme stables (Lemaire et al, 2009).

De plus, les paramètres d'entrée (C_s , D_c , C_{th} et c_i) du modèle simplifié (équation IV.1), ont été pris en compte en tant que champs aléatoires. La probabilité de défaillance est calculée à l'aide de la simulation de Monte Carlo (MCS). Cela a l'avantage de donner des résultats précis, mais avec un temps de calcul très important. De plus, le nombre de MCS doit être suffisant pour un calcul rigoureux de la probabilité de défaillance. À cette fin, il est important d'étudier le nombre de simulations qui correspond à un faible coefficient de variation de la probabilité de défaillance COV (P_f) avec un temps de calcul raisonnable.

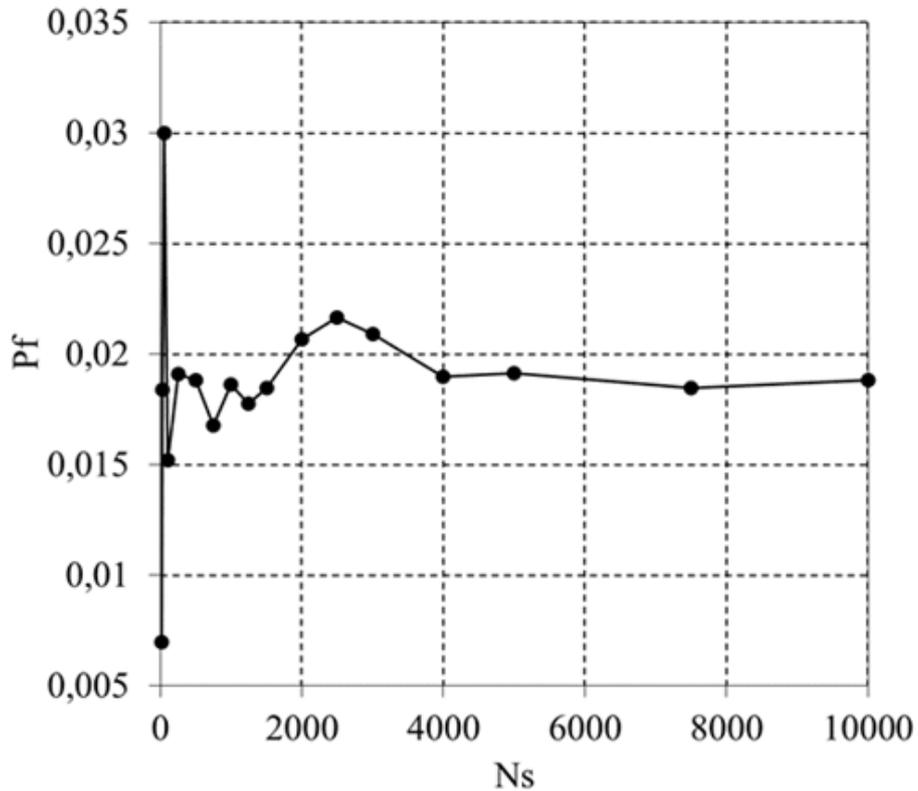


Figure IV. 2 L'effet du nombre de simulation sur le P_f .

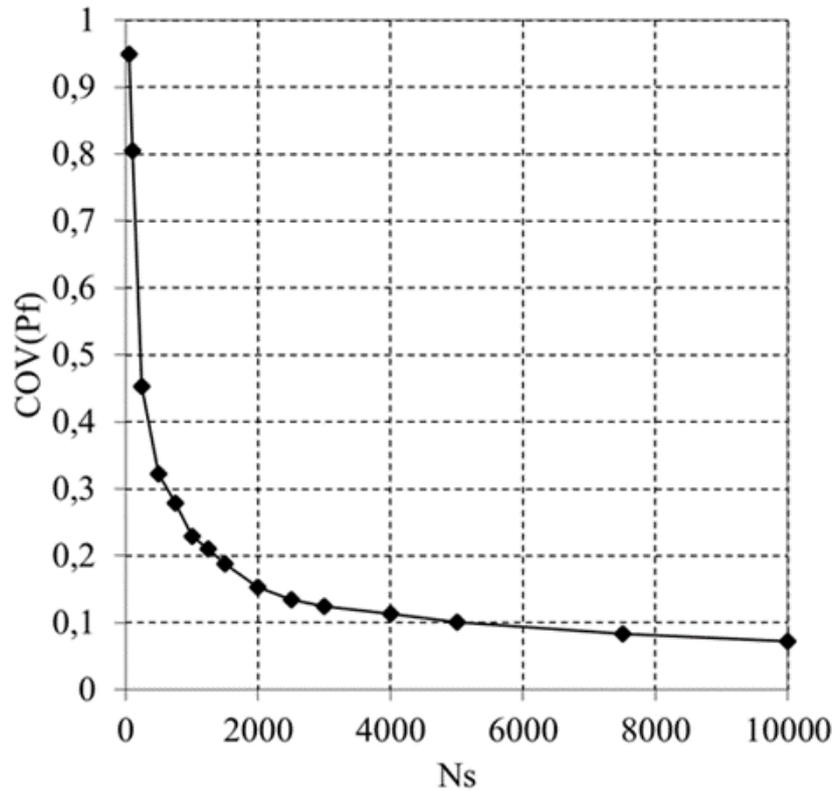


Figure IV. 3 L'effet du nombre de simulation sur le COV(Pf).

Le COV (Pf) peut être calculé à l'aide de l'équation suivante (IV.4) (18) :

$$COV(P_f) = \sqrt{\frac{1-P_f}{N \times P_f}} \quad (IV.4)$$

La figure III.3 montre l'effet du numéro de simulation sur le COV (Pf). Il a été constaté que le COV (Pf) diminue avec l'augmentation du nombre de simulations. Il atteint une valeur inférieure à 10% à partir de 5 000 simulations. La figure IV.3 indique que le seuil de coupure diminue avec les niveaux successifs. Cela signifie que la procédure proposée est valide car les réalisations générées par cette procédure progressent avec succès vers la limite de l'état de surface.

De même, il a été constaté que lorsque le nombre de simulations est égal à 2000 pour $P_f = 2 \times 10^{-2}$, ce qui correspond à un $COV(P_f) = 15\%$. Par contre, pour un nombre de simulations égal à 10 000, $P_f = 1,9 \times 10^{-2}$ dans la figure IV.2. Cependant, la méthode MCS devient plus coûteuse en temps de calcul pour déterminer les faibles probabilités de défaillance $P_f (\leq 10^{-3})$ (Neville, 1995). Cela est dû au grand nombre de réalisations nécessaires dans un tel cas. À cet effet, pour réduire le temps de calcul, le nombre $N_s = 2000$ réalisations ont été utilisées pour calculer les probabilités de défaillance pour un gain de temps considérable de 50% (8 heures).

2.4 Effet de la distance d'autocorrélation sur la probabilité de défaillance

Afin de déterminer la distance d'autocorrélation horizontale et verticale L_x et L_y respectivement, leur impact sur la probabilité de rupture du temps de début de corrosion P_f , a été étudié.

La figure IV.4 montre l'effet des distances d'autocorrélation sur la probabilité de défaillance correspondant à un champ aléatoire isotrope ($L_x = L_y$). Dans ce cas, la probabilité d'échec a été calculée et a les mêmes valeurs moyennes que les variables aléatoires.

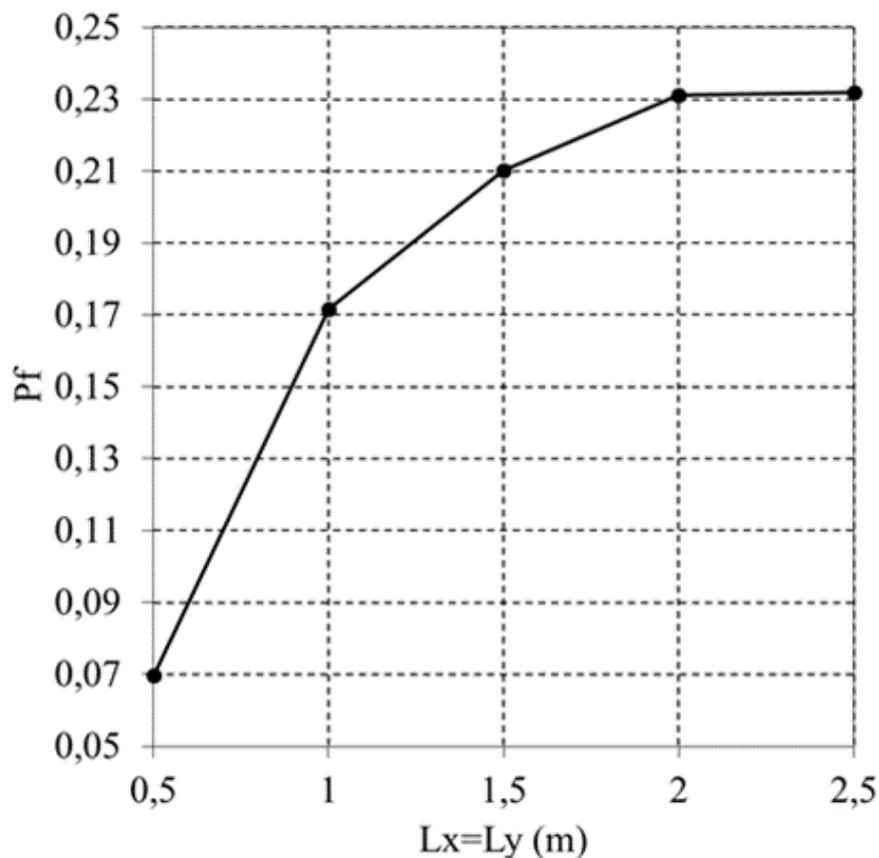


Figure IV. 4 L'Effet de la distance d'autocorrélation sur la probabilité de défaillance dans le cas d'un champ aléatoire $L_x = L_y$.

La figure IV.4 indique que l'augmentation de la distance d'autocorrélation augmente l'échec de la probabilité. Cependant, elle diminue le taux de majoration pour les grandes distances d'autocorrélation. En effet, le champ aléatoire tend vers un matériau homogène pour de grandes valeurs de distances d'autocorrélation ($L_x = L_y > 2m$). L'augmentation de l'échec de probabilité due à l'augmentation de la distance d'autocorrélation peut s'expliquer comme suit : lorsque la distance d'autocorrélation est très grande, le matériau a tendance à être homogène. Dans ce cas, le temps d'initiation de la corrosion a été jugé trop proche de celui

obtenu lors de l'étude d'un matériau homogène. Pour des distances d'autocorrélation plus petites, une hétérogénéité du matériau est obtenue, ce qui entraîne une variabilité des paramètres d'entrée.

En outre, pour étudier l'impact du classement aléatoire anisotrope des paramètres d'entrée, la probabilité de défaillance a été tracée en fonction de la distance d'autocorrélation verticale et horizontale sur les figures IV.5 et IV.6, respectivement.

Les figures IV.5 et IV.6 montrent que la distance d'autocorrélation augmente avec l'augmentation de la probabilité de défaillance. Cette observation peut s'expliquer, lorsque la distance d'autocorrélation est très grande, le matériau tend à être homogène. La faible valeur de la distance d'autocorrélation (L_x ou L_y) induit une grande hétérogénéité qui entraîne une grande variabilité des variables aléatoires. Cette variabilité conduit à une probabilité d'échec plus faible.

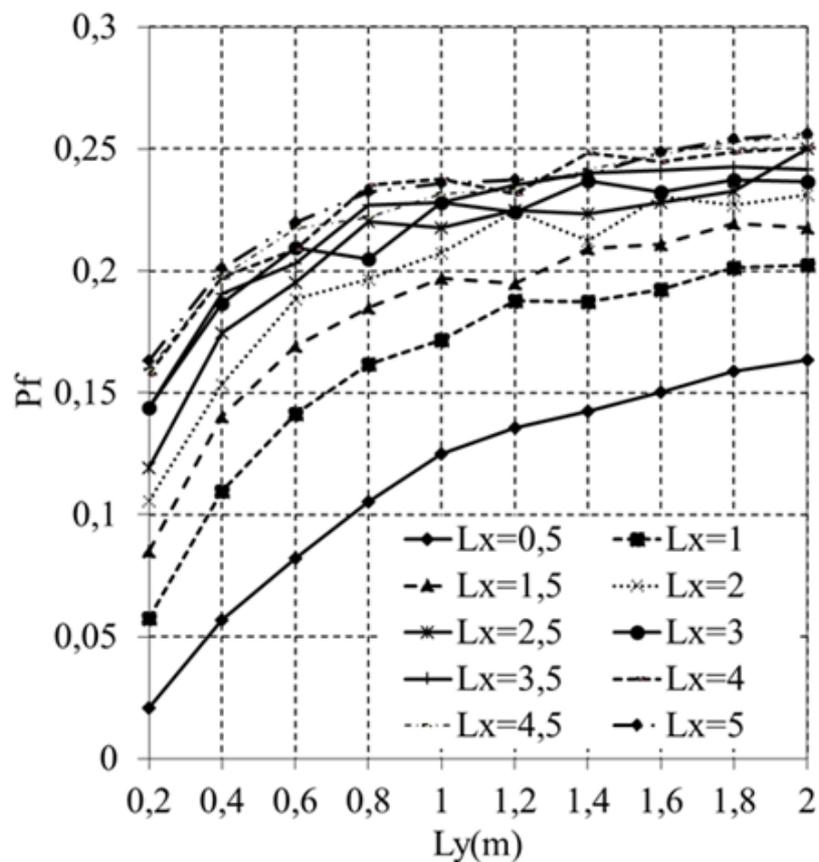


Figure IV. 5 L'effet de la distance d'autocorrélation verticale L_y sur la probabilité de défaillance pour différentes valeurs de L_x .

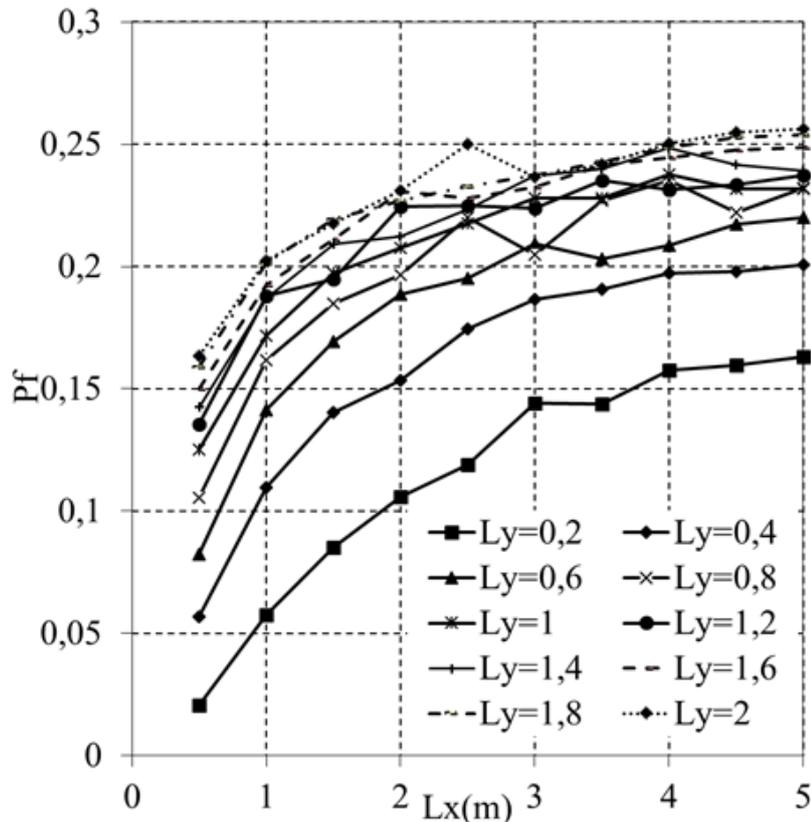


Figure IV. 6 L'effet de la distance horizontale d'autocorrélation L_x sur la probabilité de défaillance pour différentes valeurs de L_y .

D'autre part, l'augmentation de la distance d'autocorrélation augmente le temps d'initiation à la corrosion " t_{ini} " et par conséquent la probabilité de défaillance augmente. Lorsque la distance d'autocorrélation est très grande, le problème devient similaire à celui de la dimension de champ aléatoire (1D), la probabilité de défaillance est donc inférieure à la probabilité bidimensionnelle. Par conséquent, pour donner à notre programme une approche plus réaliste (milieu hétérogène dans une structure en béton armé), nous avons utilisé de petites valeurs pour les distances $L_x = 0,5$ et $L_y = 0,4$.

3 Etude paramétrique

Une étude paramétrique a été entreprise pour étudier l'effet des variables aléatoires (la couche de revêtement, la concentration en surface du chlorure C_s , la concentration seuil en chlorure C_{th} et le coefficient de diffusion D_c) sur les fonctions de distribution de probabilité (PDF) de la réponse du système (t_{ini}). De plus, la distribution de probabilité des variables aléatoires sur les réponses PDF a été étudiée.

3.1 Impact des coefficients de variation (COV) des différentes variables aléatoires sur les PDF de la réponse du système (tini)

Pour étudier l'effet du COV des variables aléatoires sur les PDF de la réponse du système. Pour ces derniers leurs COV est augmentée ou diminuée de 50% par rapport à sa valeur de base indiquée dans le tableau IV.2.

Tableau IV. 2 Effet de coefficients de variation de variables aléatoires sur le temps d'initiation de la corrosion.

Variables aléatoires	Coefficient de variation COV (variable aléatoire) %	Paramètres statistiques de PDF				
		Moyenne (ans)	Ecart type (ans)	Skewness	Kurtosis	Coefficient de variation de PDF %
c_t	1.7	35.196	3.889	1.021	5.854	11.049
	3.4	35.068	3.709	1.257	8.626	10.577
	5.1	35.039	3.278	1.025	5.867	9.355
C_s	14	34.832	2.909	1.12	7.460	8.352
	28	35.068	3.709	1.26	8.626	10.577
	42	35.516	4.555	1.44	9.122	12.825
C_{th}	10	35.313	4.153	1.10	6.296	11.761
	20	35.068	3.709	1.26	8.626	10.577
	30	34.799	2.999	0.703	3.868	8.618
D_c	21	34.409	1.591	0.545	3.880	4.624
	42	35.068	3.709	1.257	8.626	10.577
	63	36.208	8.689	3.361	30.885	23.997

Pour déclencher la corrosion, les chlorures externes doivent être transportés à l'intérieur du béton et atteindre l'acier (Neville, 1995, Bamforth et Price, 1993). Pour cette raison, l'épaisseur du revêtement (l'enrobage) est l'un des paramètres les plus importants influant sur la durée de vie des structures. Cependant, la figure IV.7 montre que lorsque le coefficient de variation COV du revêtement (c_t) augmente, la moyenne et l'écart type du temps d'initiation à la corrosion varient légèrement. On trouve que le COV proposé par Ying (Ying et Vrouwenvelder, 2007) est moins important que ceux trouvés dans la littérature

(Daigle et al, 2004, Lounis et Amleh, 2003). À cette fin, le coefficient de variation COV du revêtement (c_i) n'a pratiquement aucun impact sur le PDF. Il faut supposer que l'épaisseur est uniforme le long de la structure.

Bien que l'épaisseur du revêtement soit en théorie considérée comme une valeur constante, elle varie d'un endroit à l'autre et cette variation est étroitement liée au niveau de contrôle de la qualité effectué pendant la construction. Par exemple, dans l'étude Lounis et Amleh (Lounis et Amleh, 2003) du pont Dickson à Montréal, aujourd'hui démolie, l'épaisseur de la couche de béton a été mesurée directement à de nombreux endroits sur le pont. La profondeur moyenne du revêtement était de 36,6 mm avec un coefficient de variation du COV de 45%. La profondeur de chevauchement spécifiée était de 25 mm. Il est donc proposé d'utiliser des valeurs de coefficients de variation de 10%, 20% et 30% (et au-delà) pour des contrôles de qualité satisfaisants, modérés et faibles de la construction, respectivement (Daigle et al, 2004).

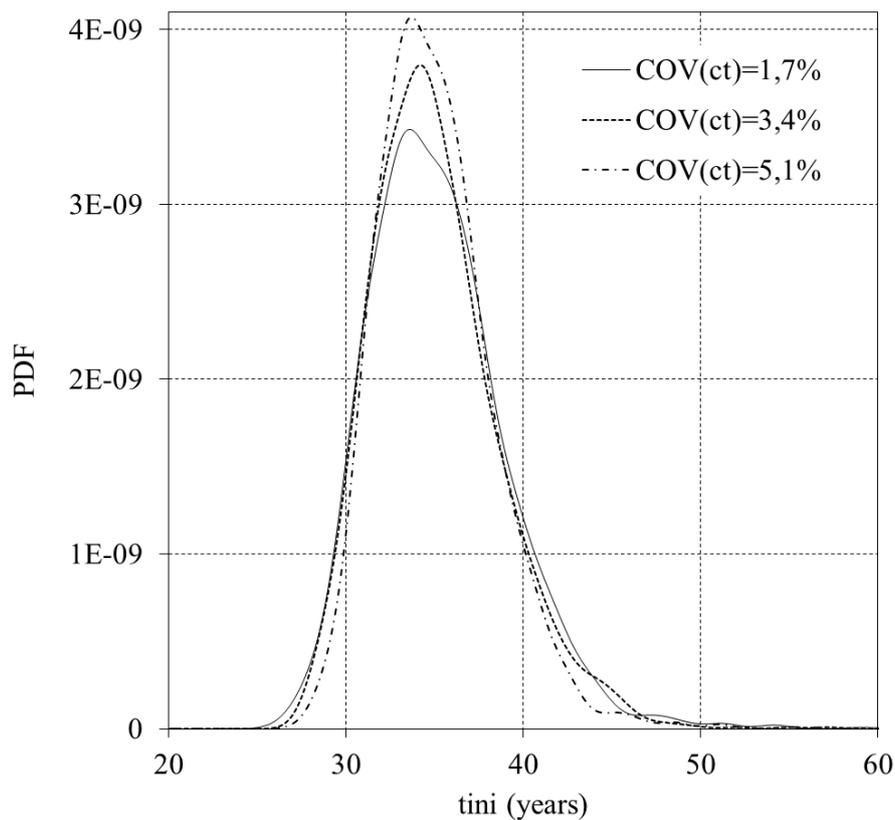


Figure IV. 7 Influence des coefficients de variation du revêtement " c_i " sur les PDF.

Pour étudier l'effet du coefficient de variation de la concentration de chlorure en surface sur la probabilité de dépassivation, des valeurs allant de 14% à 42% ont été utilisées pour obtenir les probabilités. Les résultats sont présentés à la figure IV.8.

Dans un environnement corrosif, C_s a un impact significatif sur la phase initiale de corrosion des armatures en acier. La figure IV.8 montre clairement cette influence également dans le tableau IV.2, la moyenne et l'écart type du t_{ini} augmentent avec l'augmentation du COV (C_s). L'asymétrie (skewness) et le kurtosis des réponses sont également affectées par l'augmentation du coefficient de variation.

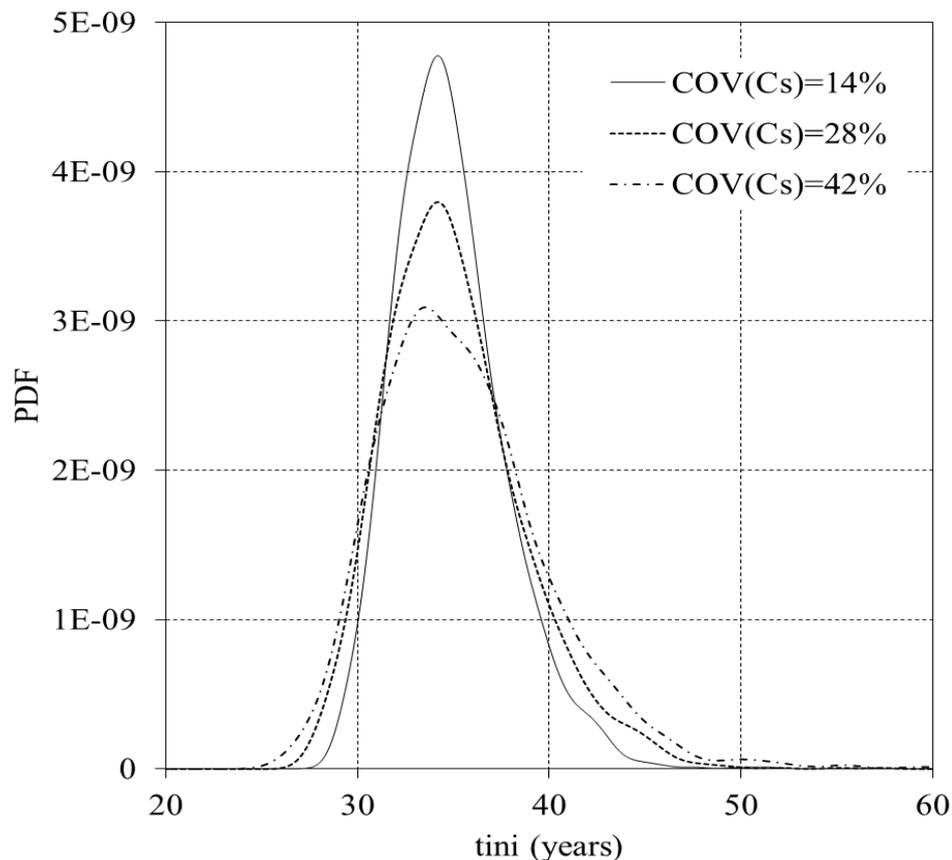


Figure IV. 8 Influence des coefficients de variation de la concentration en chlorure sur la surface " C_s " sur les PDF.

Outre la concentration de surface (C_s) de la structure étudiée, une autre concentration de chlorure appelée seuil de chlorure (C_{th}) a été prise en compte dans cette étude. Le niveau de seuil de chlorure est la concentration de chlorures requise pour décomposer le film de protection passif sur la surface de l'acier et l'initiation à la corrosion. Les seuils de chlorure proposés dans la littérature couvrent un large éventail de valeurs. Glass et Buenfeld (Glass et Buenfeld, 1995) ont examiné les différents facteurs influant sur la valeur seuil et résumé les valeurs de référence.

La figure IV.9 montre l'effet du coefficient COV de variation de la concentration de seuil en chlorure (C_{th}) sur le t_{ini} . Ces résultats ont été obtenus en utilisant divers COV de C_{th} .

Dans cette étude, la valeur de seuil moyenne de chlorure (C_{th}) est de 0,5% située juste entre la valeur proposée par le comité ACI (EICC, 1992), qui se situe à l'extrémité conservatrice de la plage, et la valeur de 0,4% utilisée. En Europe, cela semble être une valeur plus appropriée. A cet effet, la figure IV.9 et le tableau IV.2 montrent que la variation du COV (C_{th}) a un impact sur le t_{ini} . En d'autres termes, le t_{ini} diminue avec l'augmentation du COV (C_{th}).

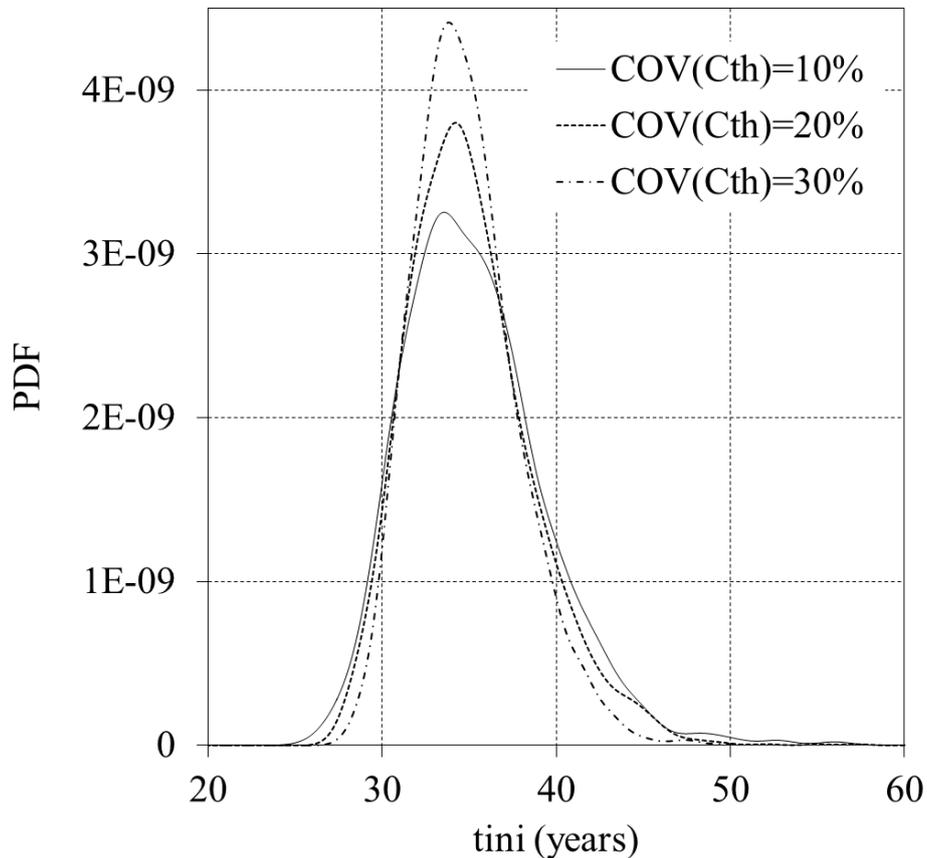


Figure IV. 9 Influence des coefficients de variation de la concentration seuil en chlorure " C_{th} " sur les PDF.

La figure IV.10 illustre l'effet du coefficient de variation du coefficient de diffusion (D_c) sur les PDF. A partir de cette figure, il a été observé que le coefficient de diffusion a un impact important sur le facteur PDF de la réponse du système.

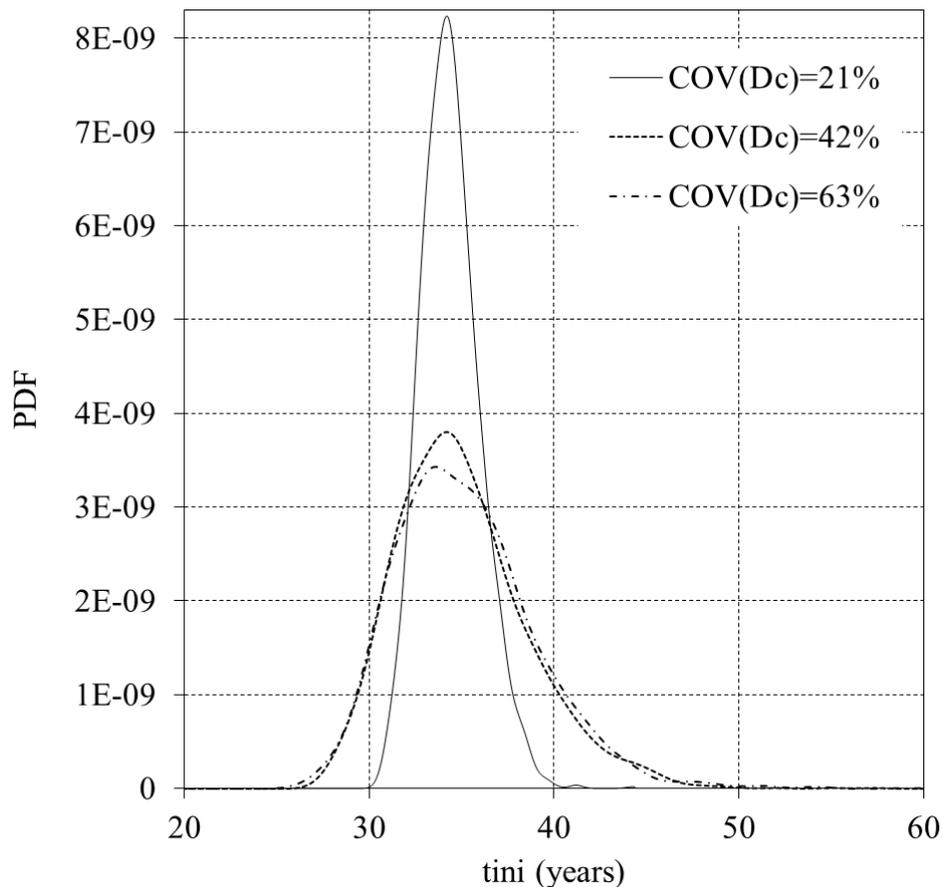


Figure IV. 10 Influence des coefficients de variation du coefficient de diffusion effectif du chlorure "Dc" sur PDF.

Le tableau IV.2 montre également que le COV (D_c) augmente systématiquement avec le champ aléatoire (de 34,5 ans pour le COV (D_c) = 21% à 36 ans pour le COV (D_c) = 63%). Cela signifie que le champ aléatoire a un impact important sur la variabilité de la réponse du système (t_{ini}).

Le Kurtosis est un descripteur de la forme d'une distribution de probabilité. Le tableau IV.2 montre que, lorsque l'écart-type augmente, le kurtosis augmente pour C_s et D_c . La mesure faite de la dispersion donnée par l'écart type montre que la distribution des masses de probabilité est autour de leur centre. En d'autres termes, d'après les figures IV.8 et IV.10, chaque fois que le COV augmente, l'aplatissement des courbes est noté. Par contre, pour les figures IV.7 et IV.9, l'aplatissement des courbes est négligeable.

La moyenne de t_{ini} augmente faiblement avec l'augmentation du COV (D_c), contrairement aux autres moments statistiques (écart-type, asymétrie « skewness », kurtosis) qui augmentent d'une manière très importante.

3.2 Impact des distributions de probabilité sur les PDF de la réponse système (t_{ini})

L'impact de la distribution de probabilité («DN» normal ou «DLGN» log normal) des paramètres de champ aléatoire sur les PDF de la réponse du système a été étudié. Sur les figures IV.11, IV.12, IV.13 et IV.14, la fonction de densité de probabilité du temps d'initiation à la corrosion (t_{ini}) est calculée sur la base des paramètres d'entrée présents dans le tableau IV.1 à l'aide de distributions normales et log-normales.

Il est noté sur les figures IV.11 et IV.12 que le changement de distribution de probabilité pour les champs aléatoires « C_{th} » et « c_t » n'a pas d'effet sur leurs réponses PDF contrairement à « D_c » et « C_s ».

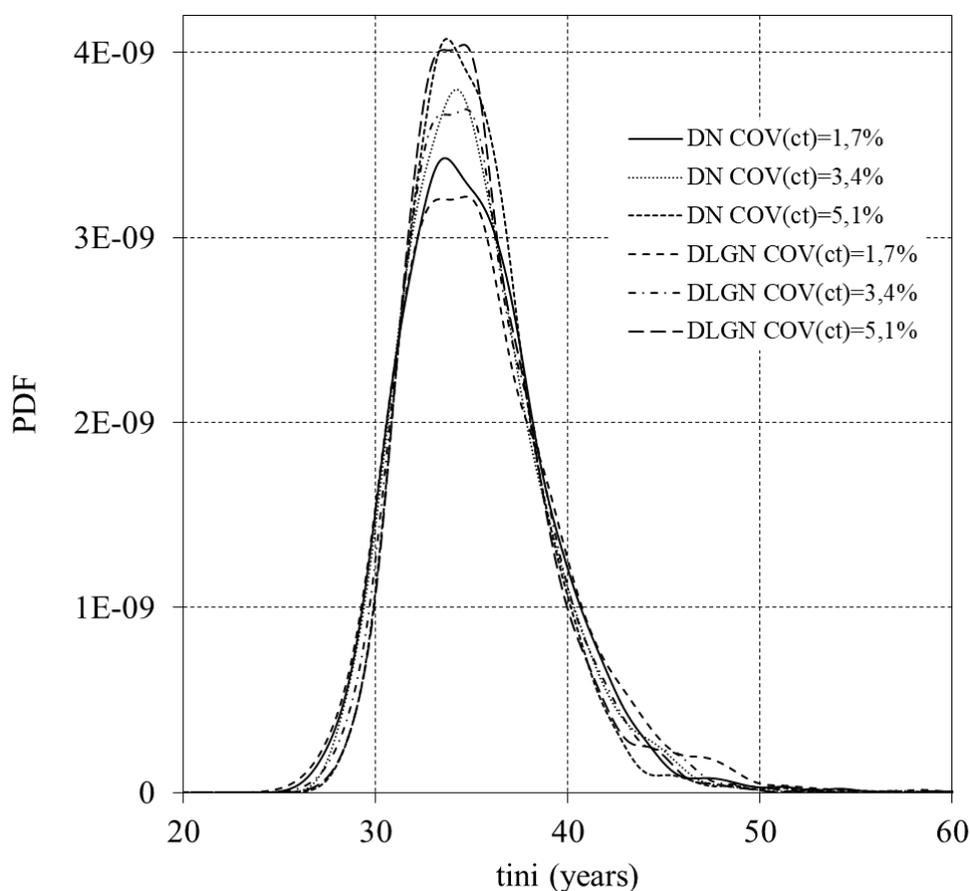


Figure IV. 11 Influence de la variation de la distribution de probabilité des coefficients de variation du revêtement " c_i " sur les PDF.

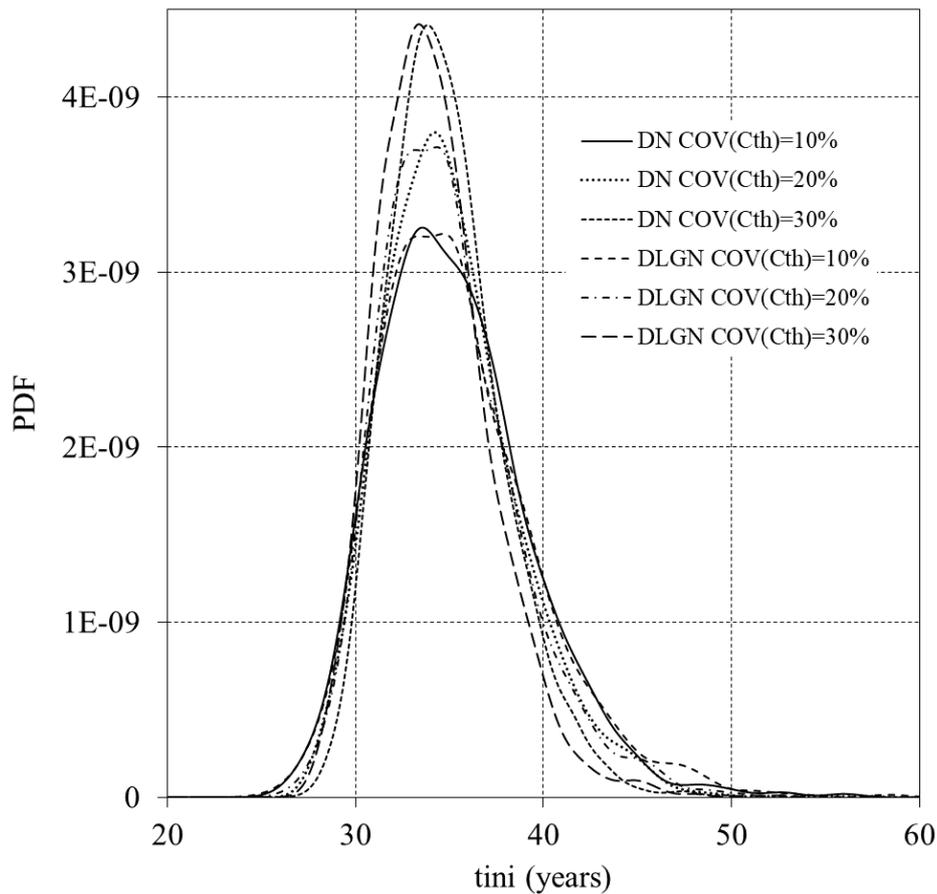


Figure IV. 12 Influence de la variation de la distribution de probabilité des coefficients de variation de la concentration seuil en chlorure "Cth" sur les PDF.

Avec l'augmentation de COV (D_c), dans la figure IV.13, l'impact de la distribution de probabilité augmente. Il a été remarqué que la distribution de probabilité sur la moyenne de t_{ini} et le PDF ont une légère influence (COV (D_c) = 63%, la différence de t_{ini} entre la distribution de la loi normale et log normale est de 7 ans). En d'autres termes, on peut dire que pour des matériaux homogènes (avec de faibles COV) l'impact des distributions de probabilité est négligeable.

L'utilisation de la distribution log-normale dans les champs aléatoires d'entrée donne un t_{ini} beaucoup plus grand que dans le cas de la prise en compte d'une distribution normale. En conséquence, le paramètre de sortie t_{ini} sera surestimé, ce qui peut conduire à une estimation du temps de maintenance incorrect.

Avec l'augmentation du COV, il a été noté que la loi de distribution avait une légère influence sur la moyenne de t_{ini} (COV (C_s) = 42%, la différence de t_{ini} entre la distribution de la loi normale et le log normal est de 3 ans), montré sur la figure IV.14.

Skewness a démontré une mesure de l'asymétrie de la distribution de probabilité des variables aléatoires autour de leur moyenne. Si l'asymétrie est > 0 , on dit que la distribution est asymétrique à gauche, < 0 asymétrique à droite. Sinon si elle est égale à 0, la distribution est symétrique (Groeneveld et Meeden, 1984). Aux figures IV.13 et IV.14, la distribution est asymétrique à gauche pour l'utilisation de la distribution log-normale pour différents COV. Aux figures IV.11 et IV.12, la distribution est presque symétrique.

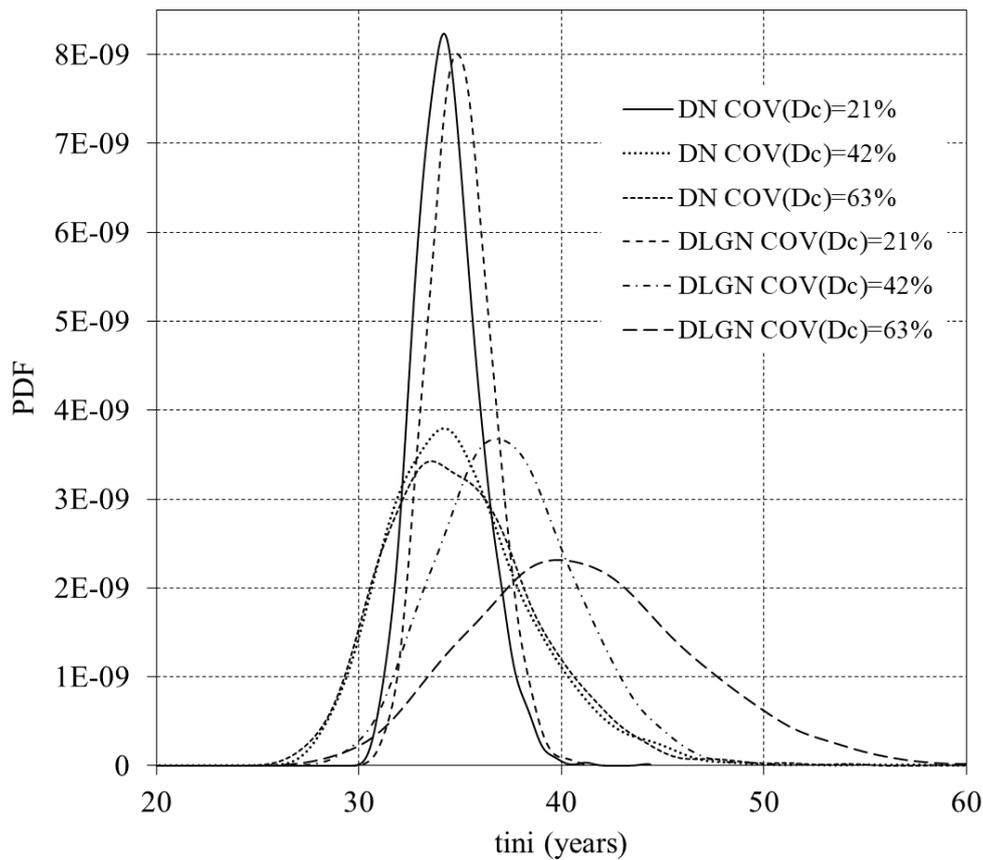


Figure IV. 13 Influence de la variation de la distribution de probabilité de la diffusion effective du chlorure "Dc" sur PDF.

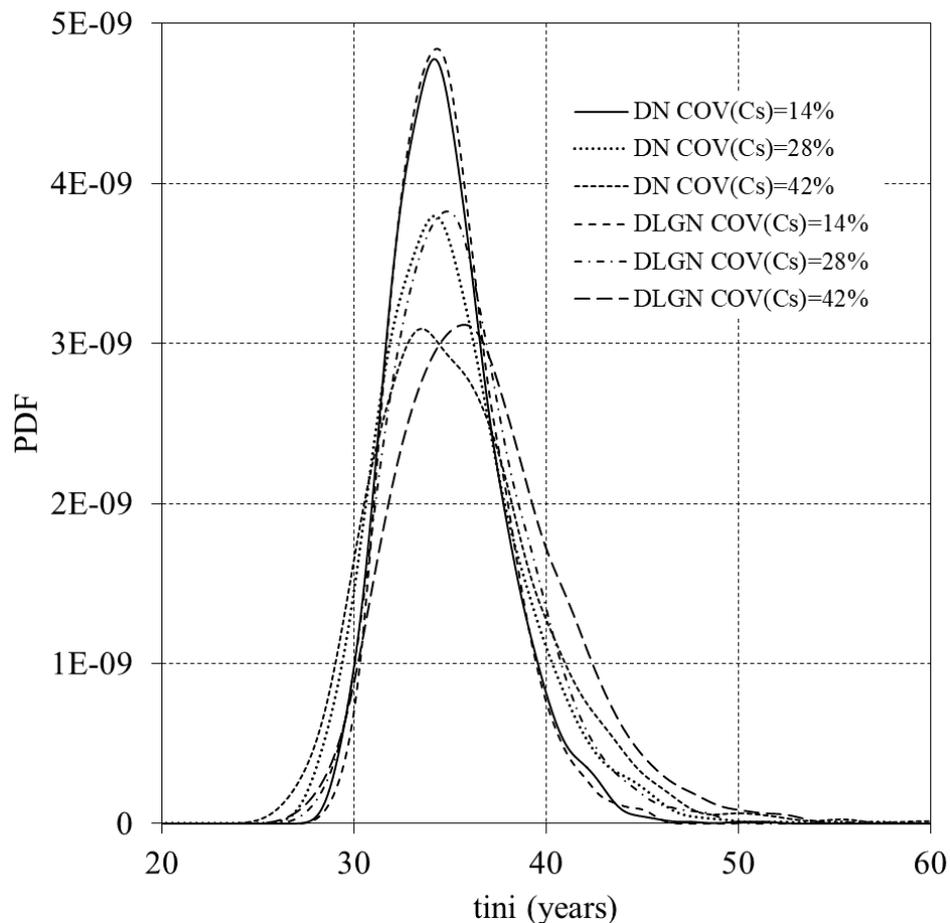


Figure IV. 14 Influence de la variation de la distribution de probabilité des coefficients de variation de la concentration en chlorure sur la surface " C_s " sur les PDF.

4 Conclusion

Une étude paramétrique a montré que le délai d'initiation de la corrosion était principalement dû au coefficient de diffusion (D_c) et à la concentration en surface de chlorure (C_s). Pour notre cas d'étude, L'épaisseur du revêtement et le seuil de concentration en chlorure ont une contribution pratiquement négligeable et se révèlent être des facteurs n'affectant pas la structure en béton armé à étudier. Ainsi, ces derniers paramètres ont un poids négligeable dans la variabilité de la réponse. Il peut être considéré comme paramètre déterministe. Ainsi, nous pouvons réduire le temps de calcul de l'analyse probabiliste et le coût de la recherche expérimentale de nouveaux projets similaires lors de la détection des paramètres les plus influents sur la variabilité des réponses du système. Alors les paramètres non influents ne nécessitent pas d'enquête expérimentale approfondie sur leur variabilité.

Les résultats de l'analyse ont montré que, si l'on utilisait un type de distribution différent pour les paramètres du problème, la proportion avec le type de distribution était

efficace dans les résultats du calcul. Le temps d'initiation de la corrosion peut être surestimé par le choix du type de distribution des champs d'entrée aléatoires. Cette surestimation peut conduire à une estimation du temps de maintenance incorrect.

Pour les faibles COV des différents champs aléatoires, l'impact des distributions de probabilité sur les PDF de la réponse système (t_{ini}) est négligeable. D'autre part, l'impact est important pour les champs aléatoires (D_c et C_s) lorsque les valeurs de leurs COV sont considérables.

**CHAPITRE V : CORROSION DES ARMATURES ET LA
PREDICTION PAR LA METHODE DES RESEAUX DE
NEURONES ARTIFICIELS GENERALISES**

1 Introduction

La caractérisation électrochimique de la corrosion nécessite de suivre l'évolution du potentiel de l'acier. La mesure du potentiel de corrosion est une technique de mesure non destructive largement utilisée en génie civil pour estimer l'état de corrosion des structures en béton armé par rapport à une électrode de référence. Il fait l'objet de recommandations publiées par ASTM (C876-09) (2009) et RILEM TC154-EMC (2003). Même si nous ne pouvons pas connecter directement le potentiel d'électrode à un état de conservation du ferrailage, nous pouvons estimer les zones les plus corrodées. En effet, le potentiel le plus négatif correspond aux cadres rouillés.

La variabilité du potentiel reflète donc mieux la nature aléatoire des phénomènes régissant la corrosion et le dysfonctionnement de la mesure. Cette observation met en perspective la nécessité de traiter les problèmes de corrosion en termes de modélisation. De nombreux auteurs ont développé des modèles basés sur des techniques d'intelligence artificielle dans le but d'obtenir un modèle efficace d'analyse de la corrosion.

Par conséquent, dans le but de développer un modèle permettant de prédire l'état de corrosion avec un potentiel de corrosion précis, un modèle basé sur des réseaux de neurones artificiels est présenté.

2 Méthodes de surveillance de la durée de vie des structures en béton armé

La dégradation des structures en béton armé est un problème économique majeur et génère des coûts importants d'entretien et de réhabilitation. Il existe diverses structures en béton armé importantes pour notre infrastructure, notamment des ponts et des bâtiments présentant une usure prématurée due à des actions environnementales (NF EN, 2014). Ces actions sont irréversibles et accumulent des agents dangereux dans le béton (ion chlorure). Ils provoquent l'éclatement du béton et l'apparition de fissures dues principalement à la corrosion de l'acier (Bertolini et al, 2003).

Au cours des dernières décennies, la corrosion de l'acier dans le béton est devenue un problème industriel et urbain majeur qui mérite une amélioration continue de la compréhension, de l'atténuation et du contrôle (Angst, 2018). En raison de l'importance de ce problème, les nouveaux textes (Eurocode 2 et NF EN 206) ont pris en compte l'importance de la durabilité du béton dans la définition des classes de structure (Ghomari, 2011). En outre,

plusieurs progrès ont été réalisés à la fois dans les agents retardant ou inhibant la corrosion et dans la mise au point de dispositifs capables d'enregistrer des informations sur l'évolution des agents agressifs et les conséquences de la corrosion des armatures sur le béton armé intégralement.

Compte tenu de l'impact de la corrosion de l'acier sur les économies des pays, plusieurs chercheurs se sont efforcés de créer et de développer des méthodes non destructives nécessaires pour comprendre les pathologies des structures et dresser un bilan général de leur état. L'auscultation d'une structure en service peut être réalisée en mesurant le potentiel de corrosion de son renforcement, qui est la technique non destructive la plus répandue (Elsener, 2001). Compte tenu de ces situations, la stratégie envisagée pour prévenir et lutter contre la dégradation causée par la corrosion reste l'utilisation de CANIN +, ce qui facilite le travail d'investigation des ingénieurs. Cela aidera à préserver et à évaluer la longévité des structures.

L'objectif principal de cette contribution est de souligner l'importance de la prise en compte de méthodes non destructives dans la prévention et la lutte contre la dégradation des structures en béton armé provoquée par les ions chlorures. Dans cette perspective, nous avons mené un programme expérimental sur le béton armé afin d'évaluer son potentiel de corrosion dans le temps.

2.1 Méthode et mesure

Afin d'obtenir une image caractéristique de l'état de corrosion de la surface métallique dans le béton ou le mortier, des mesures de potentiel de demi-cellules, de type non destructif, sont souvent effectuées. C'est une mesure de la différence de potentiel de corrosion E_{corr} (armature demi-cellule / béton) par rapport à une électrode de référence (demi-cellule) (Elsener et al, 2003). Cette technique a été utilisée pour la première fois par Stratful (Stratful, 1957).

L'équipement consiste en une demi-cellule et un voltmètre à haute impédance. La demi-cellule est un tube avec une extrémité poreuse, qui contient une tige métallique dans une solution saturée de son propre sel, par ex. cuivre dans le sulfate de cuivre ou argent dans le chlorure d'argent. Lorsque l'argent est utilisé dans les demi-cellules de chlorure d'argent, l'électrode de référence fournit un système stable, mais plus coûteux (Ferreira, 2004). Pour le dispositif CANIN +, l'électrode de référence est une demi-cellule de Cu / CuSO₄ largement utilisée. Cette électrode est connectée via un voltmètre à haute impédance ($R = 10 \text{ M}\Omega$) à l'induit (Figure V.1).

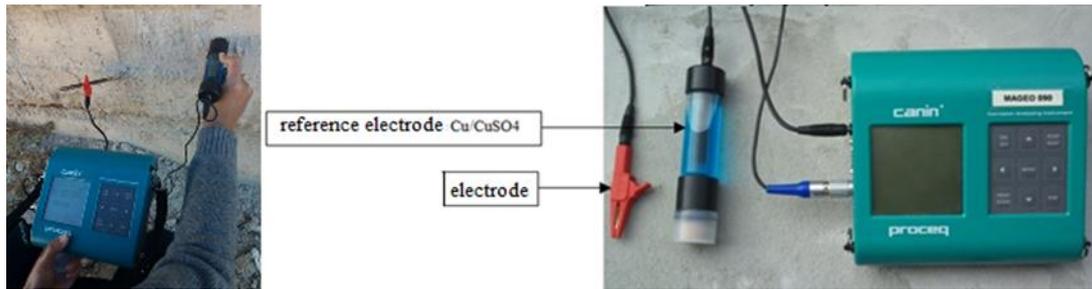


Figure V. 1 Appareil CANIN+.

Tableau V. 1 Valeurs des potentiels citées dans ASTM C-876-09 (ASTM, 2009).

Valeur du potentiel	Activité de corrosion
$E_p \geq -200 \text{ mV}$	Moins de 10% de probabilité de corrosion
$-350 \text{ mV} \leq E_p < -200 \text{ mV}$	probabilité de corrosion de 50%
$E_p < -350 \text{ mV}$	Entre 50 et 90% de probabilité de corrosion

Les valeurs des potentiels mesurés sont comparées aux valeurs citées dans la norme ASTM C-876-09, qui définissent les probabilités de corrosion. Dans le cas d'une électrode de référence Cu / CuSO₄, les valeurs à comparer sont données dans le tableau V.1. Cela nous permet donc d'estimer le degré de rouille des aciers dans le béton.

2.2 Condition expérimentale

2.2.1 Milieux d'étude

Des tests de potentiel de corrosion ont été réalisés dans trois environnements différents :

- Milieu 1 (M1) : solution de référence contenant de la portlandite Ca (OH) ₂ pour assurer les mêmes conditions environnementales d'une structure en béton armé (S1);
- milieu 2 (M2) : une solution contenant des chlorures (S1 + 30 g / l de NaCl, représentant la concentration de sel dans la mer Méditerranée) (Sail et al, 2011);
- Milieu 3 (M3) : ajout d'un inhibiteur dans le troisième milieu (S1 + 3% NaCl + inhibiteur de type SIKAFERROGARD 903) (voir annexe A).

2.2.2 Sélection du matériel

Le diamètre des barres de renforcement est de 10 mm. Il a été brossé à l'aide d'une brosse métallique et nettoyé à l'acide sulfurique à 10%. La préparation des barres visait à uniformiser les surfaces et à éliminer la couche passive formée à la surface de l'acier.

2.2.3 Échantillons d'étude

Deux catégories d'échantillons cylindriques de béton (BO) et de mortier de SIKATOP SF 126 (Mo) (voir annexe B) ont été préparées (Figure V.2) :

- Catégorie 1 : diamètre 60 mm dans lequel les cadres sont positionnés avec un revêtement de 25 mm simulant un environnement de courant recommandé par la norme NF EN206 (revêtement $e = 15$ à 30 mm);
- Catégorie 2 : diamètre 110 mm avec armatures disposées sur un revêtement de 50 mm pour simuler les conditions les plus défavorables à la pénétration d'agents agressifs, d'où la norme NF EN206 préconisant un revêtement $e > 40$ mm (NF EN 206, 2014).

2.3 Procédure expérimentale

Après une cure de 28 jours, les échantillons ont été démoulés et immergés dans un réservoir d'eau thermostatique à 20 ° C. Après le traitement, les corps à tester sont partiellement immergés dans 3 milieux différents. Afin de maintenir des conditions aux limites constantes, les solutions du banc d'essai sont renouvelées régulièrement.

La Figure V.2 montre la géométrie des échantillons soumis aux tests de mesure du potentiel de corrosion à l'aide du dispositif CANIN +. L'acier de l'armature est abaissé à une profondeur de 125 mm. Le revêtement est maintenu au fond du tube à essai, en contact avec la solution saline, afin d'éviter tout risque de corrosion (Sail, 2013). Les armatures en acier sont placées directement dans les éprouvettes pour simuler l'état réel d'une structure en béton armé exposée à un environnement agressif.

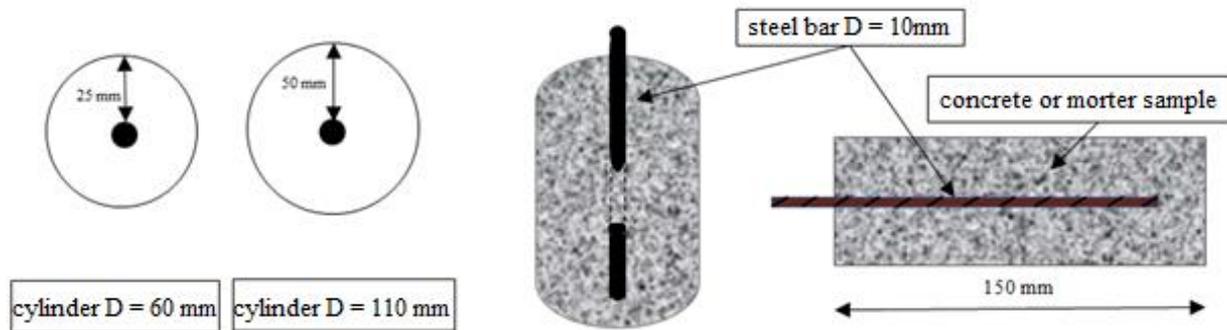


Figure V. 2 Diagramme géométrique des échantillons.

2.4 Résultats et discussion

Les mesures de potentiel ont été effectuées selon ASTM C 876-09 à différents cycles de séchage et d'immersion des échantillons dans les milieux agressifs. Les évolutions du potentiel en fonction du temps d'exposition aux chlorures sont présentées dans les Figures V.3 et V.4.

2.4.1 Influence du cycle

En figure V.3.a et V.4.a, 1er cycle : immersion des échantillons dans le milieu pendant 2 mois. Dans tous les cas, on peut constater que le potentiel diminue au cours des 15 premiers jours de l'essai, de sorte qu'un plateau est observé pendant cette période jusqu'à atteindre une valeur moyenne de -550mV, suivi d'une légère augmentation pour les milieux 2 et 3 (M2, M3) à une valeur moyenne de -450 mV. Par contre, on observe pour le milieu de contrôle (M1) un second pas vers des valeurs de probabilité de corrosion inférieures à 10% selon le tableau V.1. Ce qui est logique puisque le milieu 1 ne contient pas d'agent agressif pour le relâchement de la corrosion.

Sur les figures V.3.b et V.4.b, après un cycle de séchage de 3 mois, les éprouvettes sont immergées dans les milieux à étudier. On peut constater que le potentiel se stabilise respectivement à -100 mV et à -150 mV pour le milieu de contrôle pour le mortier SIKATOP et le béton ordinaire. Par ailleurs, une fluctuation des mesures de potentiel est observée à une moyenne de -400 mV pour le milieu 2 du mortier SIKATOP (Mo) et à une valeur de -550 mV pour le béton ordinaire (BO).

2.4.2 Influence du milieu

Les figures V.3 et V.4 montrent que tous les systèmes obtenus pour les cas traités donnent un potentiel inférieur au potentiel du milieu 1 (milieu de contrôle M1). Lorsque des aciers sont noyés dans du béton frais, une couche d'oxyde se forme suite au contact du béton

avec l'armature. La solution alcaline des pores du béton produit une oxydation rapide à la surface de l'acier pour former un film passif (Sail, 2013), ce qui s'est produit pour les échantillons du milieu 1. Ce phénomène de passivation n'arrête pas la réaction de corrosion, mais la limite à quelques microns par an (Rosenberg et al, 1989). Cependant, la présence d'ions chlore autour du renforcement (cas moyens 2 et 3) compromet la stabilité du film passif et accélère la réaction de corrosion. Le potentiel fluctue donc entre -600 et -350 mV pour le béton et le mortier ordinaires SIKATOP. D'après le tableau 1, nous pouvons dire qu'il existe une probabilité de corrosion de 50 à 90%. Ces valeurs nous indiquent que nos cadres sont corrodés.

2.4.3 Influence de l'enrobage

Nous notons aux Figures V.3 et V.4 pour le milieu contenant les ions chlorure (M2 et M3), que toutes les mesures potentielles effectuées pour un revêtement de 50 mm varient de -500 à -300 mV, contrairement au revêtement de 25 mm, ce dernier a tendance à -600 mV. L'importance du revêtement est minime dans le milieu non agressif (témoin). A cet effet, on note l'importance du revêtement en milieu agressif prouvant que plus le revêtement est important, plus la diffusion des ions chlorure est faible au niveau des armatures. Les résultats obtenus sont cohérents avec ceux de la littérature (NF EN206, 2014, Sail, 2013).

2.4.4 Influence de l'inhibiteur

Au cours du 2ème cycle, le potentiel augmente progressivement de -600 à -400 mV, ce qui peut être justifié par la présence d'inhibiteur dans M3, par rapport à M2 pour le BO. Il résulte du résultat que l'ajout d'inhibiteur dans le milieu agressif entraîne une augmentation du potentiel.

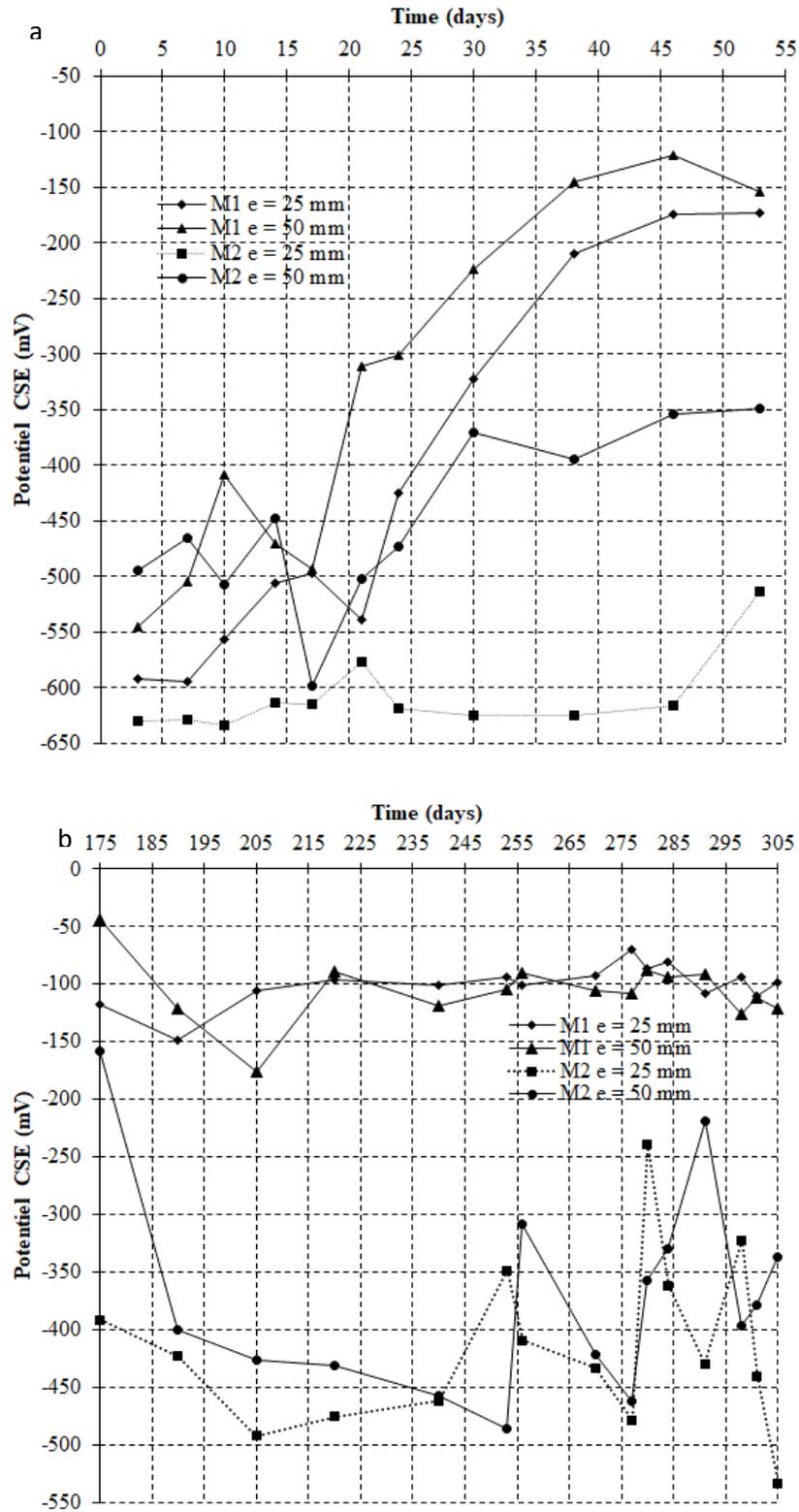


Figure V. 3 valeur du potentiel du mortier SIKATOP SF 126 échantillons en fonction du temps a) 1er cycle avant séchage, b) 2ème cycle, après séchage.

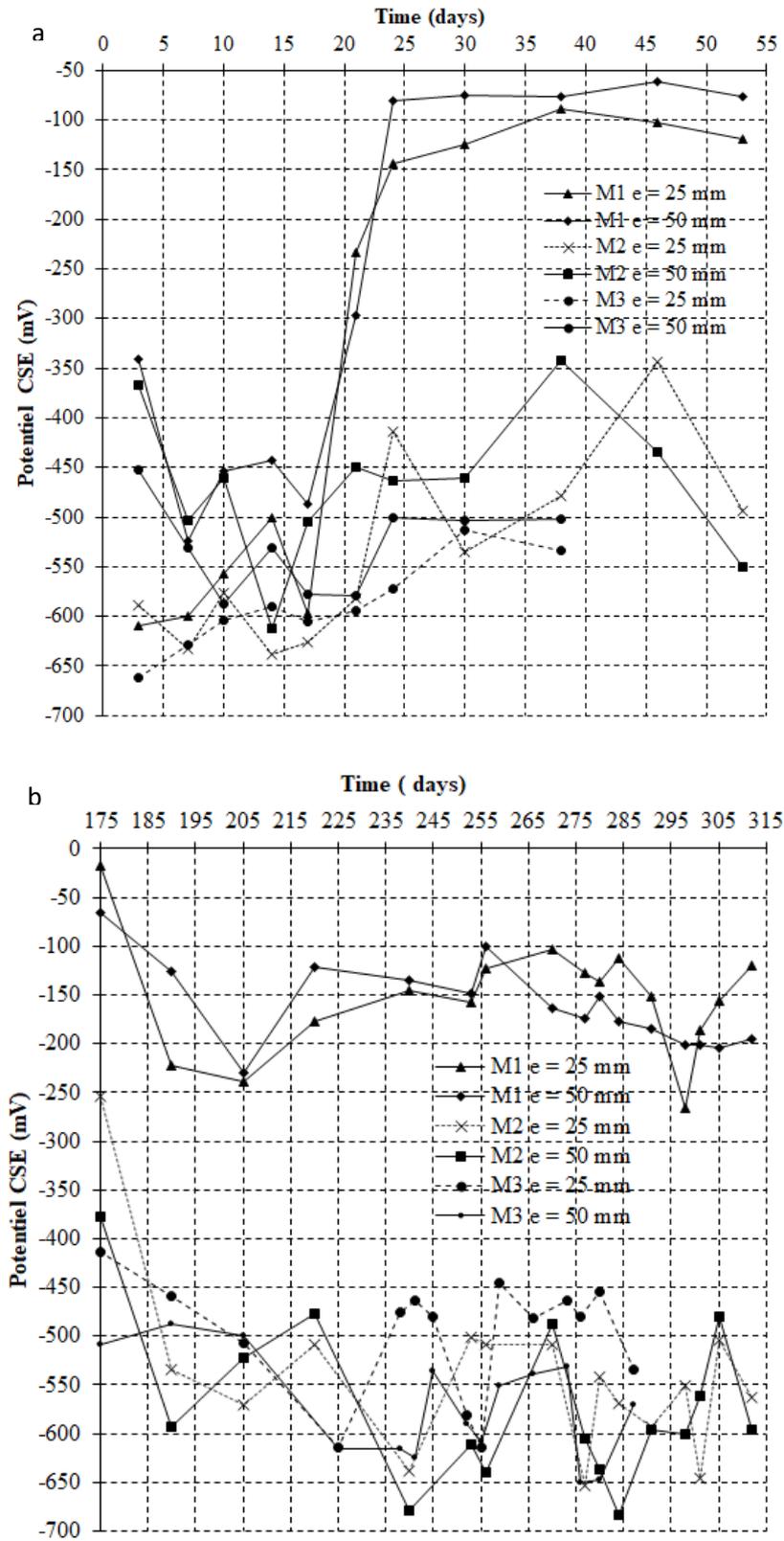


Figure V. 4 valeur du potentiel des échantillons de béton ordinaires en fonction du temps a) 1er cycle avant séchage, b) 2ème cycle, après séchage.

2.5 Conclusion

L'utilisation de dispositifs et de méthodes non destructives est maintenant maîtrisée par les propriétaires et les bureaux d'études. L'étude expérimentale que nous avons menée nous a permis de tirer la leçon suivante à ce stade :

- La présence d'agent agressif (ions chlorures) autour du renforcement compromet la stabilité du film passif et accélère la réaction de corrosion.
- On peut en conclure que plus le temps d'exposition aux chlorures est long, plus le potentiel de corrosion est faible.
- Le potentiel de corrosion est plus élevé dans le cas d'un revêtement d'acier faible, quel que soit l'état de corrosion des barres d'armature en acier.
- Les valeurs sont toujours plus négatives pour le BO que celles obtenues avec le système avec adjuvant (BO avec inhibiteur de corrosion).
- Le dispositif CANIN + est une nouvelle technique qui réduit le temps de détection de la corrosion par la vitesse de mesure. Il est également considéré comme une solution économique.

L'évaluation de la durée de vie des structures en béton armé est un sujet de préoccupation pour le secteur de la construction. Le potentiel de demi-cellules est l'un des indicateurs avancés de probabilité de corrosion et de durabilité estimée d'une structure en béton. La mesure non destructive du potentiel dépend fortement des conditions de mesure. De plus, la fluctuation de nos mesures explique que le potentiel dépend de plusieurs paramètres. Pour ce faire, nous procédons à une analyse statistique afin d'améliorer les points mesurés.

3 Analyse statistique des données de potentiel de corrosion

Pour une bonne estimation du potentiel de corrosion de l'acier armé, une base de données contenant les paramètres élémentaires relatifs aux matériaux étudiés a été réalisée. Une analyse statistique des données disponibles a été réalisée afin de tester la représentativité par variable afin de rechercher des modèles spécifiques à cette étude. Le tableau V.2 représente respectivement : Ecorr (mV potentiel), Ti (jours), T (type de matériaux où 1 pour le mortier, 2 pour le béton), M (3 : un milieu de référence, 4: un milieu contenant des chlorures et 5 : l'ajout d'un inhibiteur au milieu) et C (revêtement 25-50mm).

Tableau V. 2 Analyse statistique du potentiel de corrosion des données des matériaux étudiés.

	E_{corr}	Ti	T	M	C
Nombres	640	640	640	640	640
Minimum	-738,5	0	1	3	25
Maximum	-51,33	312	2	5	50
Moyenne	-391,137	160,45	1,66	3,74	37,5
Ecart type	203,156	120,77	0,475	0,711	12,5

3.1 Modèles proposés pour le potentiel de corrosion

Le tableau V.3 montre la corrélation entre les différents paramètres étudiés. Nous notons que la corrélation entre les paramètres est plus importante entre le paramètre potentiel dépendant de la corrosion et les paramètres indépendants (temps et milieu). A cet effet, une procédure de corrélation à deux variables calcule le τ_{b-b} de Kendall avec le niveau de signification utilisé. Il calcule les associations par paire pour les variables définies (temps, type de matériau, revêtement et support) et affiche les résultats dans une matrice. Ensuite, des courbes d'estimation du potentiel de corrosion en tant que variable dépendante fonction d'autres variables indépendantes (les paramètres ci-dessus) sont établies.

Tableau V. 3 Analyse statistique du potentiel de corrosion des matériaux étudiés.

	E_{corr}	Ti	T	M	C
E_{corr}	1	0,236*	-0,175*	-0,629*	0,072
Ti	0,236*	1	0,005	-0,038	0,004
T	-0,175*	0,005	1	0,209*	0
M	-0,629*	-0,038	0,209*	1	-0,002
C	0,072	0,004	0	-0,002	1

* The correlation is significant at the 0.01 level (bilateral).

Pour cette étude, un modèle distinct est produit pour chaque variable dépendante, mais nous avons remarqué qu'une estimation de courbe était plus appropriée entre le potentiel de

corrosion et le temps de mesure. D'après la figure V.5, il apparaît que le modèle quadratique suit mieux la forme des données. Les résultats du R^2 sont résumés dans le tableau V.4.

Tableau V. 4 Estimation du carré R par rapport au temps avec différents modèles de régression d'estimation des courbes.

	Modèle	R	R^2	R ajusté
Temps	Linéaire	0,225	0,051	0,049
	Quadratique	0,254	0,064	0,061

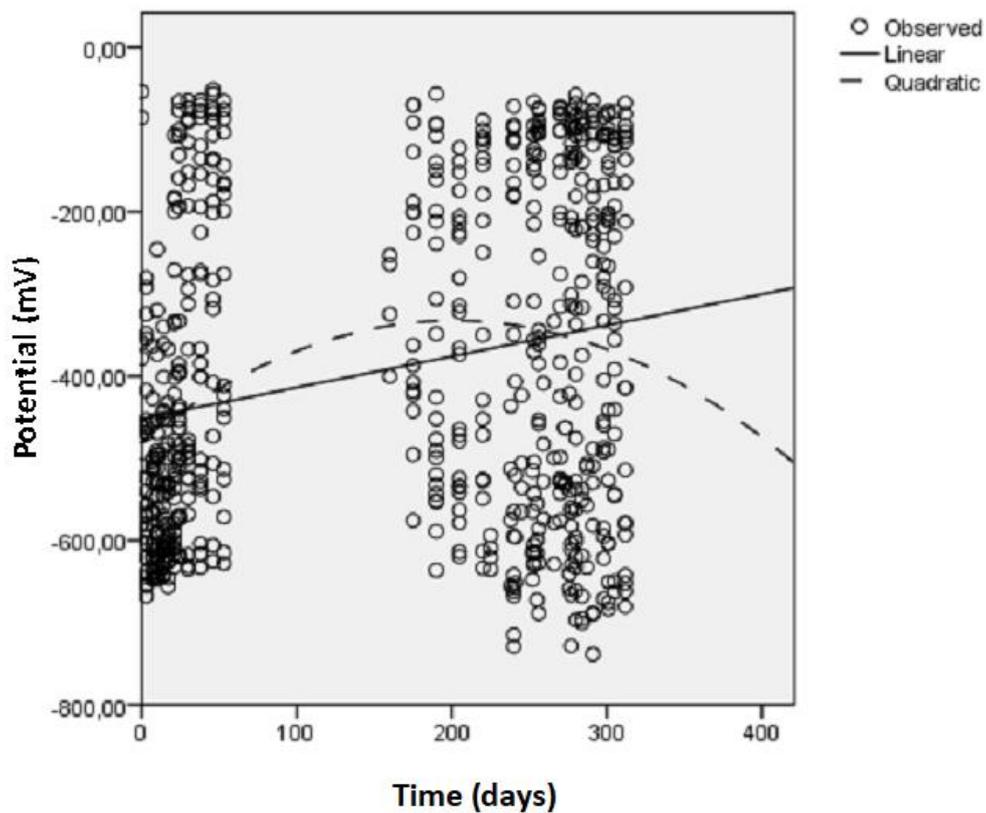


Figure V. 5 Variation du potentiel de corrosion et du temps

Afin de mieux estimer le potentiel de corrosion, une analyse de régression, portant sur tous les paramètres, a été réalisée et développe de nouveaux modèles de prédiction de potentiel spécifiques à l'étude, qui seront plus fiables avec un minimum d'erreurs.

Tableau V. 5 Estimation du R^2 par rapport au temps avec différents modèles de régression d'estimation des courbes.

Modèle MLR	Résultat
$E_{corr} = 0,38 \times Ti - 12,231 \times T - 180,461 \times M + 0,862 \times C + 210,589$	$R^2=46,2\%$

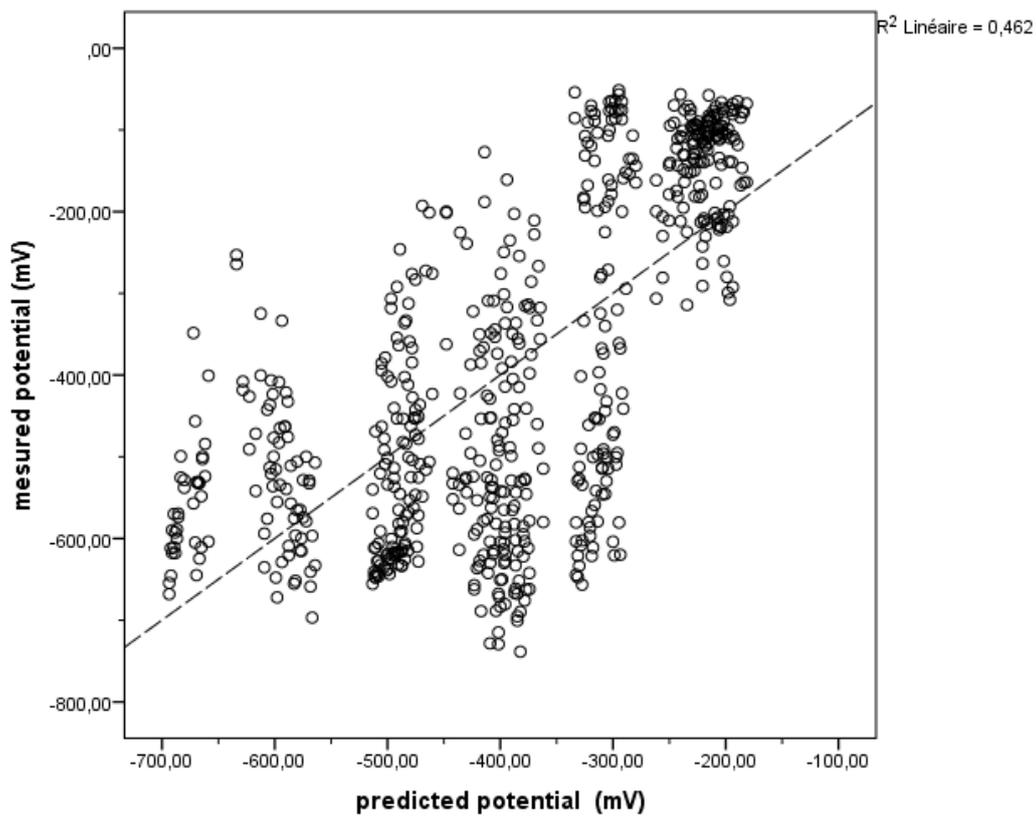


Figure V. 6 Corrélation entre les valeurs prédites et mesurées du potentiel de corrosion.

Pour le potentiel de corrosion, le modèle développé donne des différences remarquables entre les mesures et les calculs avec $R^2 = 46,2\%$ (tableau V.5) (Figure V.6). La modélisation par régression multiple des coefficients du modèle de prévision a permis une légère amélioration des résultats de calcul. La raison en est que le modèle estime le potentiel de corrosion pour quatre paramètres différents en même temps. Cela rend la modélisation plus complexe. Nous notons également que le coefficient de détermination maximal est insuffisant pour l'analyse statistique ($R^2 < 70\%$) (Benjamin et Cornell, 1970).

Compte tenu de la complexité du phénomène de corrosion, impliquant l'effet des quatre paramètres sur une sortie unique (potentiel de corrosion), une analyse de régression non linéaire a été réalisée pour mieux ajuster les modèles à la méthode étudiée en utilisant la

méthode des réseaux de neurones artificiels généralisés. C'est l'une des techniques de modélisation les plus puissantes basée sur une approche mathématique (Subir 2012).

4 Modélisation artificielle du réseau neuronal

Le réseau de neurones artificiels (RNA) est un modèle informatisé qui tente de simuler le comportement du cerveau humain. Il fait partie des nombreux outils permettant d'approximer de manière universelle et de comprendre un modèle complexe (Schmitt et al. 2001, Touzet 1992, Hornik et al. 1989), par exemple la corrosion. Un tel modèle prédictif peut être développé à partir du potentiel de corrosion. Les ANN sont modélisées comme une structure mathématique d'unités de calcul interconnectées, des neurones situés dans différentes couches (Horvatić et al. 2016). Ces modèles sont formés afin de comprendre la relation existant entre un ensemble d'entrées et de sorties obtenu à partir d'un processus expérimental (Jiménez-Come et al. 2015).

La représentation de l'information se fait par des interconnexions massives croisées entre les entrées reçues d'autres neurones et la communication de ces sorties à d'autres neurones. Dans un problème étudié, le nombre de neurones d'entrée (qui forment la couche d'entrée) est égal au nombre de variables d'entrée. Il en va de même pour les neurones de sortie de la couche de neurones de sortie. Par conséquent, le problème à étudier détermine la taille des couches d'entrée et de sortie (Horvatić et al. 2016). Entre ces deux couches, une ou plusieurs couches de neurones cachées doivent être placées. En figure V.7 ont déterminé l'architecture de réseau optimale qui contient six neurones cachés. Les types de réseaux étaient différenciés par l'architecture et les règles d'apprentissage et d'organisation (Merouane et Aissa Mamoune 2019).

L'objectif principal du présent travail est d'estimer le potentiel de corrosion des aciers en fonction du type de matériau, de la durée, du milieu et de l'enrobage. La formation est le processus d'adaptation du modèle aux données expérimentales. Il consiste à ajuster les poids associés à chaque connexion entre les neurones. Pour construire un réseau de neurones artificiels réussi, trois processus importants doivent être pris en compte : la formation, la validation et les tests.

Le sous-ensemble de formation est appliqué au réseau de neurones artificiels pour son apprentissage, c'est-à-dire son adaptation au problème spécifié. Dans ce cas, 512 échantillons ont été utilisés comme jeu de données principal, 64 échantillons ont été utilisés pendant le

processus d'apprentissage itératif dans le sous-ensemble de validation et 64 échantillons ont été utilisés dans le sous-ensemble de données de test.

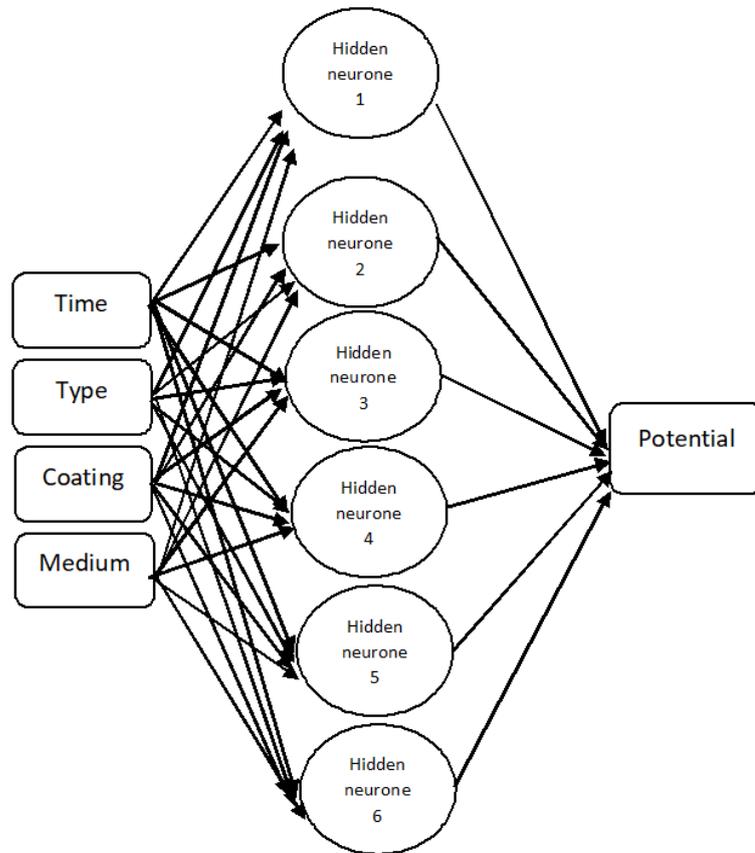


Figure V. 7 L'architecture de réseau neuronal utilisée pour le potentiel de corrosion.

4.1 Évaluation de la performance des modèles formés

Dans ce travail, 640 ensembles de données de mesures expérimentales ont été utilisés pour le potentiel de corrosion, 80% des données ont été choisies pour la formation et les 20% restants ont été sélectionnés en tant qu'ensemble de validation et de test. Dans cette étude, une analyse statistique impliquant l'erreur quadratique moyenne (MSE) (Equation V.1) et coefficient de corrélation (R) (Equation V.2) ont été menées pour évaluer la performance du modèle (Merouane et Aissa Mamoune 2019). MSE et R ont été mesurés entre les résultats et les objectifs. Des valeurs inférieures de MSE sont meilleures. Une valeur de coefficient R proche de 1 signifie une meilleure estimation.

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (Y - Y_j)^2 \quad (V.1)$$

$$R = \frac{\sum_{j=1}^N (Y - \bar{Y})(Y_j - \bar{Y}_j)}{\sqrt{\sum_{j=1}^N (Y - \bar{Y})^2} \sqrt{\sum_{j=1}^N (Y_j - \bar{Y}_j)^2}} \quad (V.2)$$

Où :

Y et Y_j désignent les valeurs observées et les valeurs prédites par ANN;

\bar{Y} et \bar{Y}_j sont les moyennes de Y , Y_j respectivement,

N représente le nombre de données.

Tableau V. 6 Résultats de performance du modèle développé

	Échantillons	MSE	R
Entraînement	512	87,45	0,90
Validation	64	96,49	0,89
Essai	64	93,66	0,89

Au cours de la phase de formation, une meilleure corrélation entre les paramètres potentiels de corrosion mesurés et estimés a été obtenue (tableau V.6). L'ANN estime un coefficient de corrélation élevé (R) de 0,90 avec une erreur quadratique moyenne (MSE) faible de 87,45.

4.2 Validation et test des modèles développés

Les résultats du modèle ANN sont représentés sur la figure V.8, où les mesures sont indiquées en abscisse et les valeurs estimées par les différents modèles en ordonnée. Les résultats d'erreurs entre les cibles et les sorties selon le modèle d'ANN sont présentés à la Figure V.9.

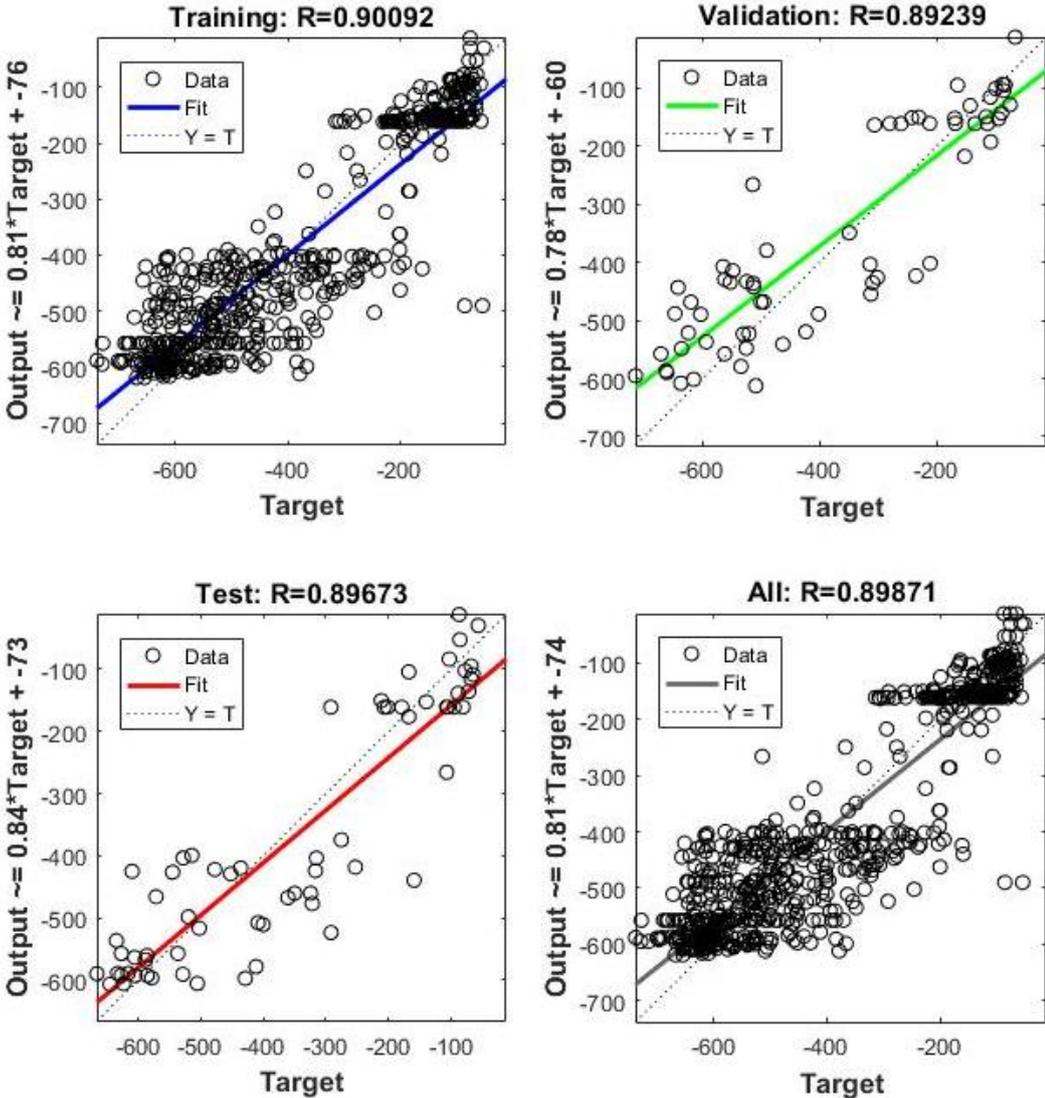


Figure V. 8 Apprentissage, validation et test du modèle ANN pour l'estimation du potentiel de corrosion.

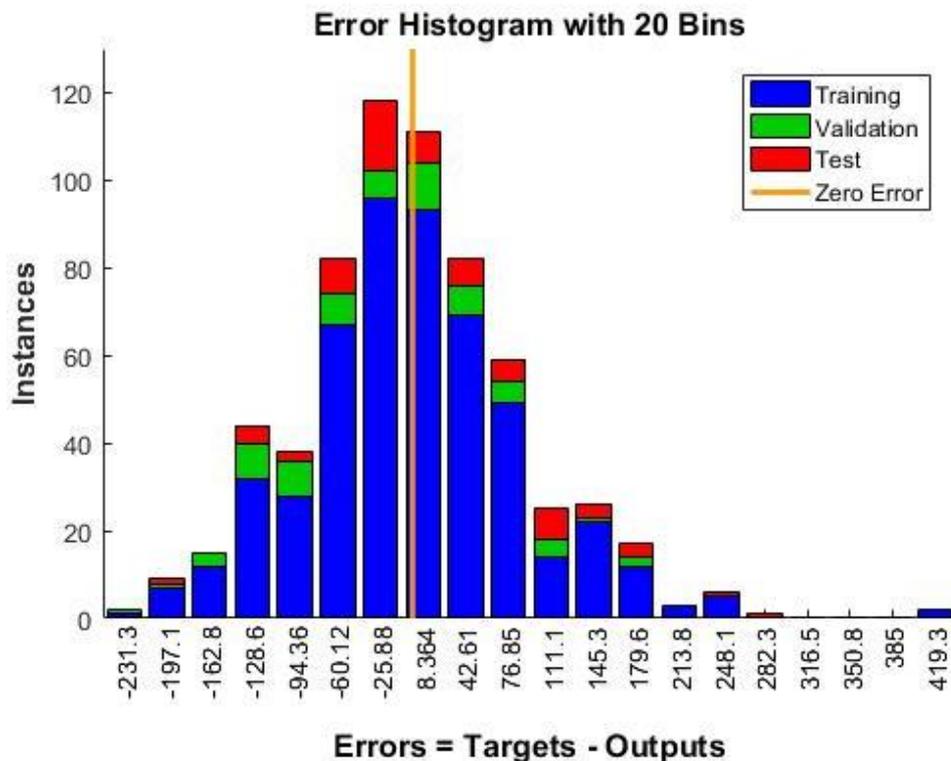


Figure V. 9 Résultats d'erreur entre les cibles et les sorties pour le potentiel de corrosion.

Les sorties du potentiel de corrosion obtenues à partir du modèle ont été comparées à celles des données déterminées expérimentalement pour valider le modèle. Le graphique de régression de la figure V.8 montre la prédiction du modèle ANN formé, validé et testé.

Sur la figure V.8 (a), le potentiel de corrosion atteint à la fois par la formation et par des expériences a été obtenu. Le potentiel de corrosion atteint à la fois par la validation et par les expériences a été obtenu, comme le montre la figure V.8 (b). De même, les résultats potentiels de corrosion obtenus à partir des données expérimentales et test sont représentés sur la figure V.8 (c). Toutes les valeurs d'apprentissage, de validation et de test sont représentées sur la figure V.8 (d). Les coefficients de corrélation pour la formation, la validation et les tests sont respectivement : 90,09%, 89,24% et 89,67%.

La Figure V.9 donne également les taux d'erreur en pourcentage de potentiel de corrosion obtenus par la formation, les essais et la validation dans le modèle ANN. On peut remarquer que le modèle obtenu par ANN présente une bonne corrélation dans la variation des données expérimentales et des valeurs prédites du potentiel de corrosion.

5 Conclusion

Des mesures électrochimiques du potentiel de corrosion ont été obtenues par une méthode non destructive (demi-cellule). Cette technique est utilisée pour estimer un indicateur de durabilité d'une structure en béton.

Compte tenu de la fluctuation des mesures du potentiel de corrosion, une analyse statistique des données disponibles a été réalisée afin de tester leur représentativité. Les résultats ont montré que le modèle de prévision basé sur une analyse statistique était insuffisant pour obtenir une bonne estimation.

L'état de potentiel de corrosion sur l'acier est très bien étudié par modélisation avec réseau neuronal. Le modèle a été formé avec des paramètres expérimentaux importants, à savoir le moment de la mesure, le type de matériau, le revêtement et le support. La capacité prédictive a été testée par la technique E_{corr} pour déterminer le potentiel de corrosion. Les résultats obtenus montrent que les valeurs sont très proches des données expérimentales issues d'apprentissage, des tests et de la validation de réseaux de neurones artificiels.

L'augmentation du nombre d'expériences contribue à améliorer le modèle de prédiction de la corrosion. D'autre part, l'amélioration du modèle ANN est également possible en optimisant ses paramètres en augmentant le nombre de neurones cachés, leurs fonctions de transfert, des algorithmes d'apprentissage ou en modifiant le ratio de données d'apprentissage, de validation et de test. Par conséquent, l'utilisation du réseau de neurones peut aider à résoudre des problèmes complexes, à réduire les coûts expérimentaux globaux et le nombre de tests de laboratoire pour un gain de temps.

CONCLUSION GENERALE

Les résultats présentés dans cette thèse mettent en lumière la relation entre l'estimation du phénomène de corrosion et la durabilité des structures en béton armé. Aussi, dans ce travail de recherche il est démontré l'intérêt de l'utilisation des essais non destructifs au suivi des ouvrages en génie civil et des méthodes probabilistes dans l'étude du phénomène de corrosion, en particulier le temps d'initiation à la corrosion. La stratégie de ce travail a consisté à utiliser et développer une méthode probabiliste pour calculer la probabilité de rupture du problème traité.

La prévision de la corrosion de l'acier exposés dans des conditions agressifs (ex. ions chlorures) dépend de divers facteurs tels que la diffusion effectif des ions chlorures, le rapport eau/ciment, la perméabilité, etc. Ces facteurs étant très complexes, les fonctions analytiques et mathématiques classiques ont une fonction limitée pour décrire ce type de système fortement non linéaire en fonction de divers facteurs et de leurs interactions, ainsi que de paramètres matériels. A cet effet, il est possible de prédire une perte de corrosion des matériaux par les réseaux de neurones artificiels. Ils sont principalement utilisé pour les systèmes réels complexes avec une non linéarité élevée et une grande difficulté pour leur description mathématique formelle.

La première partie du travail a consisté à présenter une analyse probabiliste du temps d'initiation de la corrosion causé par les ions chlorure à l'aide de la méthode de simulation de Monte Carlo. Les champs aléatoires étaient le revêtement, la concentration en surface de chlorure, la concentration de seuil en chlorure et le coefficient de diffusion. Le modèle déterministe était basé sur la deuxième loi de Fick décrivant de manière classique le temps de corrosion du réseau initié par le logiciel Matlab. Les principales conclusions du document peuvent être résumées comme suit :

Le coefficient de variation du coefficient de diffusion (D_c) et de la concentration superficielle en chlorure (C_s) s'est révélé beaucoup plus grand que les champs aléatoires C_{th} et c_t . Par conséquent, les paramètres d'entrée incertains qui pèsent de manière significative dans la variabilité de cette réponse (c.-à-d. t_{ini}) doivent être examinés de manière approfondie dans la pratique. Les paramètres d'entrée pour lesquels les valeurs de variation ont la plus grande contribution, ont la réponse du système.

Aussi il est montré qu'il y a une proportion avec le type de distribution choisis et les résultats calculés. L'utilisation de la distribution log-normale dans les champs aléatoires

d'entrée donne un t_{ini} beaucoup plus grand que dans le cas de la prise en compte d'une distribution normale. Le temps d'initiation à la corrosion peut être surestimé par le choix du type de distribution des champs d'entrée aléatoires. Cette surestimation peut conduire à une estimation du temps de maintenance incorrect.

Pour les faibles COV des différents champs aléatoires, l'impact des distributions de probabilité sur les PDF de la réponse système (t_{ini}) est négligeable. Par contre pour les champs aléatoires (D_c et C_s), les valeurs de leurs COV sont considérables.

La dernière partie du manuscrit présente l'évaluation de la durée de vie des structures en béton armé par les mesures du potentiel de corrosion. Ces mesures se font à l'aide de la demi-cellule (appareil CANIN+) et dépendent fortement des conditions de mesure. Le principe de ce dispositif est de mesurer la différence du potentiel de corrosion (E_{corr} armature de demi-cellules / béton) par rapport à une électrode de référence (demi-cellule). Les mesures ont été prises dans trois solutions différentes où : milieu 1: une solution de référence (S1); milieu 2: une solution contenant des chlorures (S1 + 30 g / l NaCl, représentant la concentration de sel en mer Méditerranée) et milieu 3: l'ajout d'un inhibiteur (S1 + 3% NaCl + inhibiteur). Deux matériaux différents sont utilisés (béton et mortier) avec un revêtement variant entre 25 et 50 mm. Pour inclure tous les paramètres sélectionnés et couvrir toutes les combinaisons possibles, 640 mesures expérimentales ont été effectuées en 312 jours

L'étude expérimentale que nous avons menée nous a permis de déduire que :

Plus le temps d'exposition aux ions chlorures est long plus le potentiel de corrosion est faible, en particulier pour un béton ordinaire où les valeurs sont toujours plus négatives comparé à ceux obtenues pour le même milieu mais qui contient un béton ordinaire avec un inhibiteur de corrosion.

Pour un cas de revêtement faible le potentiel de corrosion est toujours plus élevé vers des valeurs négatives.

Certes, le dispositif CANIN + est une nouvelle technique qui réduit le temps de détection de la corrosion par la vitesse de mesure et également considéré comme une solution économique. Mais la fluctuation de nos mesures nous a mené à une analyse neuronale afin d'améliorer les points mesurés. L'intelligence artificielle a démontré sa capacité à obtenir de meilleures performances que les méthodes conventionnelles. Elle présente donc un certain

nombre d'avantages importants qui en font un outil puissant et pratique pour résoudre de nombreux problèmes dans le domaine du génie civil.

A l'aide des méthodes statistiques, l'utilisation des réseaux de neurones pour toute application nécessitant de trouver une relation non linéaire entre des données de mesure du potentiel de corrosion à l'aide de l'appareil CANIN+, est d'une importance majeure et d'une fiabilité assez remarquable. Une procédure de corrélation est calculée par paire pour les variables définies (temps, type de matériau, revêtement et support). La corrélation entre les paramètres est plus importante entre le paramètre potentiel dépendant de la corrosion et les paramètres indépendants (temps et milieu). Ensuite, la modélisation par régression multiple des coefficients du modèle de prévision a permis une légère amélioration des résultats de calcul mais insuffisant pour une analyse statistique avec $R^2 = 46,2\% < 70\%$. Compte tenu de la complexité du phénomène de corrosion, impliquant l'effet des quatre paramètres sur une sortie unique (potentiel de corrosion), nous avons opté pour une méthode des réseaux de neurones artificiels généralisés.

Les ANN sont basées uniquement sur les données d'entrée (type de matériau, temps, milieu et l'enrobage) et de sortie (potentiel de corrosion) grâce auxquelles le modèle peut être formé facilement. Trois sous-ensembles importants sont pris en compte : 512 échantillons ont été utilisés dans la formation qui est appliquée pour son apprentissage, c'est-à-dire son adaptation au problème spécifié, 64 échantillons ont été utilisés pendant le processus d'apprentissage itératif dans le sous-ensemble de validation et 64 échantillons ont été utilisés dans le sous-ensemble de données de test.

L'ANN estime un coefficient de corrélation élevé (R) de 0,90 avec une erreur quadratique moyenne (MSE) faible de 87,45. Les sorties du potentiel de corrosion obtenues à partir du modèle ont été comparées à celles des données déterminées expérimentalement. A partir des coefficients de corrélation pour la formation, la validation et les tests sont respectivement : 90,09%, 89,24% et 89,67% nous pouvons dire que le modèle est validé. Aussi, le modèle obtenu par ANN présente une bonne corrélation dans la variation des données expérimentales et des valeurs prédites du potentiel de corrosion.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Chapitre I

(ACI, 2000) ACI Committee 365, (2000), “ACI 365 Service Life Prediction - State of the Art Report”, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich.

(Alonso et al, 2000) Alonso, C., Andrade, C., Castellote, M., Castro, P., (2000), “Chloride threshold values to depassivate reinforcing bars embedded in a standardized OPC mortar”, Cement and Concrete Research, Vol.30, pp.1047-1055. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00265-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00265-9)

(Amarni, 2012) Amarni, L., (2012), “Durabilité des éléments en béton armé en milieu agressif : corrosion des armatures”, Mémoire de magister, Université Mouloud Mammeri de TIZI OUZOU.

(Angst et al, 2009) Angst, U., Elsener, B., Larsen, C.K., Vennesland, O., (2009), “Critical chloride content in reinforced concrete - A review”, Cement and Concrete Research, VOL. 39, pp. 1122-1138. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.08.006>

(Baroghel-Bouny, 1994) Baroghel-Bouny, V., (1994), « Caractérisation des pâtes de ciment et des bétons, Méthodes, analyse, interprétations », ED. LCPC, Paris, pp. 467.

(Baroghel-Bouny et al, 2008) Baroghel Bouny, V., Capra B., Laurens S., (2008), « La durabilité des bétons », Association Technique de l'industrie des liants hydrauliques, Paris, pp. 840.

(Bastidas-Arteaga, 2009) Bastidas-Arteaga, E., (2009), “Probabilistic service life model of RC structures subjected to the combined effect of chloride-induced corrosion and cyclic loading”, Doctoral thesis, University of Los Andes.

(Blankwoll, 1997) Blankwoll, A., (1997), “History of the gimsoystaumen bridge repair project”, International Conference-Repair of Concrete Structures, From Theory to Practice in a marine Environment, Norvège, pp. 35.

(Bouregaya, 2018) Bouregaya, S. (2018), « Synthèse d'un ciment alitique à moindre impact environnemental à partir de vase de barrage et utilisant le sulfate de zinc comme minéralisateur », Thèse de doctorat, INSA de Toulouse, Université des Sciences et de la Technologie Mohamed Boudiaf USTO-ORAN.

(Cather et Marsh, 1997) Cather, B. and Marsh, B., (1997), “Service Life of Concrete Structures – Current and Emerging Approaches”, International Seminar on the Management of Concrete Structures for Long Term Serviceability, Sheffield, pp. 21-32.

(Cornell et Schertmann, 2003) Cornell, R.M., Schertmann, U., (2003), “The Iron Oxides”, WILEY-VCH, Germany, pp. 664. <https://doi.org/10.1002/3527602097>

(CSEP, 1995) CSEP. (1995), “Introduction to Monte Carlo methods”, Computational Science Projects.

(Deby, 2008) Deby, F., (2008), « Approche probabiliste de la durabilité des bétons en environnement marin », Thèse de doctorat, l'Université Toulouse III - Paul Sabatier.

(DURACRETE, 1999) DURACRETE. (1999), “Probabilistic Performance based durability design of concrete structures”, Brit Euram Project, n°1347.

(Faber et Vrouwenvelder, 2008) Faber, M. H. and Vrouwenvelder, A.C.W.M., (2008), “Interpretation of Uncertainties and Probabilities in Civil Engineering Decision Analysis”, Joint Committee of Structural Safety.

(Ferreira, 2004) Ferreira, R.M. (2004), “probability-based durability analysis of concrete structures in marine environment”, Doctoral thesis, University of Minho, Guimarães, November 2004. ISBN: 972 – 8692 – 16 – 1

(Ghods et al, 2009) Ghods, P., Isgor, O.B., McRae, G., Miller, T., (2009), “The effect of concrete pore solution composition on the quality of passive oxide films on black steel reinforcement”, Cement & Concrete Composites, Vol. 31, pp. 2–11. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.10.003>

(Ghosh et Handoo, 1980) Ghosh, S.N., Handoo, S.K., (1980), “Infrared and Raman spectral studies in cement and concrete”, Cement and Concrete Research, Vol. 10, pp.771-782. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(80\)90005-8](https://doi.org/10.1016/0008-8846(80)90005-8)

(Gjørsv, 2003) Gjørsv, O.E., (2003), “Durability of Concrete Structures and Performance-Based Quality Control”, International Conference on Performance of Construction Materials in the New Millennium, Cairo.

(Gjørsv, 2004) Gjørsv, O.E., (2004), “Durability Design and Construction Quality of Concrete Structures”, Fourth International Conference on Concrete Under Severe Conditions – Environment and Loading, Seoul, Korea, pp.44-55.

(Gjørsv, 2011) Gjørsv, O.E., (2011), “Durability of Concrete Structures”, REVIEW ARTICLE - CIVIL ENGINEERING, Arab J Sci Eng, Vol. 36, pp. 151–172. <https://doi.org/10.1007/s13369-010-0033-5>

(Guyader, 2018) Guyader, A., (2018), « Méthodes Monte-Carlo », Sorbonne Université. On ligne : (www.lsta.upmc.fr/guyader/files/teaching/MonteCarlo/MonteCarlo.pdf)

(Hammersley et Handscomb, 1975) Hammersley, J.M. and Handscomb, D.C., (1975), “Monte Carlo Methods”, Methuen & Co Ltd, London.

(Haugen, 1980) Haugen, E.B., (1980), “Probabilistic Mechanical Design”, John Wiley & Sons, Inc., New York.

(Haussmann, 1967) Haussmann, D.A. (1967), “Steel corrosion in concrete, How does it occur?”, Journal of Materials Protection, Vol. 6, pp. 19-23.

(Houmadi, 2011) Houmadi, Y., (2011), « Prise en compte de la variabilité spatiale des paramètres géotechniques », Thèse de doctorat, université de Tlemcen, p167, 2011.

(Hyvert, 2009) HYVERT, N., (2009), « Application de l’approche probabiliste à la durabilité des produits préfabriqués en béton », Thèse de doctorat, université de Toulouse, soutenue Le 10 Avril 2009.

(ISO, 2008) ISO 13823, (2008), “General Principles on the Design of Structures for Durability”, International Organization for Standardization.

(Koleva et al, 2006) Koleva, D.A., Hu, J., Fraaij, A.L.A., Stroeven, P., Boshkov , N., De Wit, J.H.W., (2006), “Quantitative characterisation of steel/cement paste interface microstructure and corrosion phenomena in mortars suffering from chloride attack”, Corrosion Science, Vol. 48, pp. 4001- 4019. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2006.03.003>

(Liu et Wayer, 1998) Liu, T., Weyer, R.W., (2008), “Modeling the Dynamic Corrosion Process in Chloride Contaminated Concrete Structures”, Cement and Concrete Research, Vol. 28, pp. 365-379. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00259-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00259-2)

(Lounis, 2003) Lounis, Z., (2003), « Modélisation probabiliste de la contamination par le chlorure et de la corrosion des structures de ponts en béton », Proceedings of International Symposium on Uncertainty Modeling and Analysis, College Park, MD., Sept. 21-24, pp. 447-451.

(Lounis et Daigle, 2008) Lounis, Z. et Daigle, L., (2008), « Outil d'aide à la décision fondé sur la fiabilité pour la conception et la gestion du cycle de vie des ponts de ponts routiers », Paper prepared for presentation at the “Bridges – Links to a Sustainable Future” Session of the 2008 Annual Conference of the Transportation Association of Canada. Toronto, Ontario.

(Mai-Nhu, 2013) Mai-Nhu, J., (2013), «Corrosion des armatures du béton : couplage carbonatation/chlorures en présence de cycles hydriques », Thèse de doctorat, L'université de Toulouse, 04 juillet 2013.

(McDonald et al, 1995) McDonald, D. B., Sherman, M. R., Pfeiffer, D.W., Virmani, Y.P., (1995), “Stainless steel reinforcing as corrosion protection”, Concrete International, Vol. 5, pp. 65-70.

(Mehta, 1991) Mehta, P.K., (1991), “Concrete in the Marine Environment”, Elsevier Applied Science, Essex.

(Montanaro et al, 1988) Montanaro, L., Negro, A., Regourd, M., (1988), “Action de CaCO_3 , CaSO_4 et $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ sur l'hydratation de C_3S ”, Cement and Concrete Research, Vol. 18, pp. 431-437. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(88\)90077-4](https://doi.org/10.1016/0008-8846(88)90077-4)

(Naess, 1995) Naess, A., (1995), “Structural reliability”, Lecture Notes Fag 37078, NTNU, Norway.

(Nahali, 2015) Nahali, H., (2015), « Evaluation de l'efficacité inhibitrice de Na_3PO_4 contre la corrosion des armatures du béton, Apport de l'émission acoustique dans la caractérisation et le contrôle de l'anticorrosion », Thèse de doctorat, L'institut national des sciences appliquées de Lyon, École doctorale matériaux.

(Ollivier et Vichot, 2006) Ollivier, J-P., Vichot, A., (2006), « La durabilité des bétons », Les Presses de l'École nationale des ponts et chaussées.

(Pietro, 1996) Pietro, P., (1996), « Cathodic protection and cathodic prevention », Construction and Building Materials, vol 10, pp. 391-402. [https://doi.org/10.1016/0950-0618\(95\)00017-8](https://doi.org/10.1016/0950-0618(95)00017-8)

(Polder, 2001) Polder, R.B. (2001), “Test methods for on site measurement of resistivity of concrete - a RILEM TC-154 technical recommendation”, Construction and Building Materials, VOL. 15, pp. 125-131, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(00\)00061-1](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(00)00061-1)

(Poupard, 2001) Poupard, O. (2001), « Étude de transfert de chlorures et de l'initiation de la corrosion d'un acier au sein d'un matériau cimentaire saturé - Suivi par spectroscopie d'impédance », Thèse de doctorat, Université de La Rochelle.

(Renaut, 2017) Renaut, M. (2017), « Calcination des déchets industriels : synthèse de ciment et stabilisation/solidification des résidus de combustion », Thèse de doctorat, Département Génie Civil et Environnemental Mines Douai, L'université d'Artois, pp.183.

(Saheb, 2004) Saheb, N. (2004), « La simulation : Génération des nombres aléatoires », IUP Miage Bordeaux. En ligne : (<http://dept-info.labri.fr/ENSEIGNEMENT/formation-a-distance/cibermiage-processus/c1.7/ch04/seq12/sequence.htm#Section04>).

(Sail, 2013) Sail, L., (2013), « Etude de la performance d'inhibiteurs de corrosion à base de phosphate pour les constructions en béton armé », Thèse de doctorat, Université de Tlemcen.

(ŞENGÜL, 2011) ŞENGÜL, Ö. (2001), "Probabilistic Design for the Durability of Reinforced Concrete Structural Elements Exposed to Chloride Containing Environments", Technical Journal - Digest 2011, Turkish Chamber of Civil Engineers, Vol.22, pp. 1461-1475.

(Shamsad, 2003) Shamsad, A. (2003), "Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction-a review", Cement and Concrete Composites, vol 25, pp. 459-471. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00086-0](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00086-0)

(Shayanfar et al, 2015) Shayanfar, M.A., Barkhordari, M.A., Ghanooni-Bagha, M. (2015), «Estimation de l'occurrence de la corrosion dans la structure de RC utilisant l'optimisation de PSO basée sur la fiabilité ». Periodica Polytechnica Civil Engineering, Vol. 59 (4), pp. 531-542. (<https://doi.org/10.3311/PPci.7588>)

(Soufi, 2013) Soufi, A. (2013), « Etude de la durabilité des systèmes béton armé : mortiers de réparation en milieu marin », Thèse de doctorat, Université de La Rochelle.

(Struble et al, 1980) Struble, L., Skalny, J., Mindess, S. (1980), "A review of the cement-aggregate bond", Cement and Concrete Research, Vol. 10, pp. 277-286, 1980. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(80\)90084-8](https://doi.org/10.1016/0008-8846(80)90084-8)

(Tuffin, 2010) Tuffin, B. (2010), « La simulation de Monte Carlo ». Edition Hermès.

(Tuutti, 1982) Tuutti, K. (1982), "Corrosion of steel in concrete", CBI Research Report n°4.82, Swedish Cement and Concrete, Research Institute, Stockholm, Sweden.

(Uhlig, 1983) Uhlig, H.H. (1983), "Corrosion and corrosion control", New York: John Wiley and Sons.

(Xingguo et al, 2011) Xingguo, F., Yuming, T., Yu, Z. (2011), "Influence of stress on passive behaviour of steel bars in concrete pore solution", Corrosion Science, Vol. 53, pp. 1304-1311. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2010.12.030>

(Zivica et al, 1997) Zivica, V., Kraj, L., Bágel, L., Vargová, M. (1997), "Significance of the ambient temperature and the steel material in the process of concrete reinforcement corrosion", Construction and Building Materials, Vol. 11, pp. 99-103. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(97\)00001-9](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(97)00001-9)

Chapitre II

(Agred, 2017) Agred, K. (2017), « Localisation automatique des aciers et caractérisation de la teneur en eau du béton armé par radar double-offset à grand rendement », Thèse de doctorat, université de Toulouse, France.

(Alonso et al, 2000) Alonso, C., Andrade, C., Castellote, M., Castro, P. (2000), "Chloride threshold values to depassivate reinforcing bars embedded in a standardized OPC mortar", Cement and Concrete Research, 9p. , 30:1047-1055.

(Amaarni, 2012) Amarni, L. (2012), « Durabilité des éléments en béton armé en milieu agressif : corrosion des armatures », Mémoire de magister, Université Mouloud Mammeri de TIZI OUZOU, pp.69, 2012.

(Andrade et Gonzalez, 1978) Andrade, C., Gonzalez, JA. (1978), "Quantitative measurements of corrosion rate of reinforcing steels embedded in concrete using polarization resistance measurements", Materials and corrosion, vol. 29, pp. 515-519.

(Andrade et Alonso, 1996a) Andrade, C., Alonso, C. (1996), "Electrical methods used in the characterization of reinforced concrete and steel corrosion", International conference on concrete: From material to structure, Arles, France, pp. 196-206, 11-12 September 1996.

(Andrade et Alonso, 1996b) Andrade, C., Alonso, C. (1996), "Corrosion rate monitoring in the laboratory and on-site", Construction and Building Materials, vol. 10, pp. 315-328.

(Andrade et al, 2000) Andrade C., Alonso C., Arteaga A., Tanner P. (2000), "Methodology based on the electrical resistivity for calculation of reinforcement service life", 5th CANMET/ACI International Conference, pp. 899-915.

(Andrade et al, 2004) Andrade, C., Alonso, C., Gulikers J., Polder, RB., Cigna, R, Vennesland, Ø., Salta, M., Raharinaivo, A., Elsener, B., (2004), “Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method”, *Materials and Structures*, vol. 37, pp. 623-643.

(ASTM, 1982) ASTM, E610-82, (1982), “Standard definitions of terms relating to acoustic emission”, American Society for Testing and Materials designation E 610-82, Philadelphia PA.

(ASTM, 2009) ASTM C876-09, (2009), “Standard Test Method for Half-cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete”, ASTM International, West Conshohocken. <https://doi.org/10.1520/C0876-09.2>

(AusculteCH, 2013) Le bulletin d’AusculteCH, Evaluation de l’activité de corrosion des armatures par le relevé de potentiel de corrosion, Québec, numéro 3, Juillet 2013.

(Balayssac et al, 2007) Balayssac, J.-P. Kringkaï, V. Sbartai, M. Klysz, G. Laurens, S. Arliguie G. (2007), « Contribution au développement du radar pour la caractérisation non destructive du béton », 25e rencontres de l’AUGC, Bordeaux, France.

(Balayssac et al, 2009) Balayssac JP, Laurens S, Arliguie G, Ploix MA, Breysse D, Piwakowski B et Villain G. (2009), « Stratégie d’évaluation non destructive pour la surveillance des ouvrages en béton - Rapport final », Projet ANR SENSO, 274 pages.

(Baroghel-Bouny, 2004) Baroghel-Bouny V. (2004), « Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages – indicateurs de durabilités », Documents scientifiques et techniques, AFGC.

(Bommersbach, 2005) Bommersbach, P. (2005), « Evolution des propriétés d’un film inhibiteur de corrosion sous l’influence de la température et des conditions hydrodynamiques : caractérisation par techniques électrochimiques », thèse de doctorat, institut national des sciences appliquées de Lyon : école doctorale Matériaux, 147p.

(Bourreau, 2017) Bourreau, L. (2017), « Diagnostic de corrosion sur ouvrage : Fiabilité et aide à la décision », Thèse de doctorat, université de Nantes, France.

(Breysse et Lataste, 2009) Breysse, D., Lataste J.F. (2009), « Variabilité des matériaux de construction et sécurité des ouvrages : l’apport de l’évaluation non destructive », 19ème Congrès Français de Mécanique, Marseille, France, 24-28 août 2009.

(Bungey et al, 2006) Bungey, J. H., Millard, S. G., Grantham, M. G. (2006), "Testing of concrete in structures". 4th éd. London and Newyork : Taylor & Francis, pp. 353, 2006. ISBN : 0-415-26301-8.

(Constantin, 2011) Constantin, F. (2011), « Etude de l'efficacité d'inhibiteurs de corrosion utilisés dans les liquides de refroidissement », Thèse de doctorat, Institut national des sciences appliquées, Lyon, France, 173p.

(Conway et al, 1951) Conway, B.E., Bockris, J.O.M., Ammar, I.A. (1951), "The dielectric constant of the solution in the diffuse and Helmholtz double layers at a charged interface in aqueous solution", Transactions of the Faraday Society, vol. 47, pp. 756-766.

(Cremona, 2012) Cremona, C. (2012), « Durée de vie des ouvrages en béton armé Approche prédictive », performantielle et probabiliste, Recommandations du projet APPLLET.

(Deby, 2008) Deby, F. (2008), « Approche probabiliste de la durabilité des bétons en environnement marin », Thèse de doctorat, l'Université Toulouse III - Paul Sabatier, France, 174p.

(Din Stribu, 2005) Din Stirbu, E.L. (2005), « Comportement à la corrosion des alliages d'aluminium utilisés dans l'industrie automobile pour la fabrication de radiateur de chauffage », Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées, Lyon, France, 2005.

(Dous et al, 2002) Dous O., Rhazi J., Bertrand L. (2002), « Auscultation des dalles en béton armé par des techniques de contrôle non destructif », Sherbrooke.

(Elsener et al, 1999) Elsener, B. Buchler, M. Stalder, F. et Bohni, H. (1999), "Migrating corrosion inhibitor blend for reinforced concrete : Part 1- Prevention of corrosion", Corrosion, Vol.55, N°12, P.1155-1163.

(Elsener et al, 2000) Elsener, B. Buchler, M. Stalder, F. et Bohni, H. (2000), "Migrating corrosion inhibitor blend for reinforced concrete : Part 2- Inhibitor as repair strategy", Corrosion, Vol.56, N°7, P.1155-1163.

(Elsener et al, 2003) Elsener, B., Andrade, C., Gulikers, J., Polder, R., Raupach, M. (2003), "Half-cell potential measurements – Potential mapping on reinforced concrete structures", Materials and Structures, Vol. 36, pp. 461-471.

(Eydelnant et al, 1993) Eydelnant, A. Miksic, B., Gelner, L. (1993), "Migrating corrosion inhibitors for reinforced concrete", *ConChem-Journal*, P.38-43.

(Fattah-Alhosseini et al, 2009) Fattah-Alhosseini A., Saatchi A., Golozar M.A. et Raeissi K., (2009), "The transpassive dissolution mechanism of 316L stainless steel", *Electrochimica Acta*, Vol. 54, 3645-50.

(Fedrizzi et al, 2004) Fedrizzi, L., Azzolini, F., Bonora, P.L. (2004), "The use of migrating corrosion inhibitors to repair motorways' concrete structures contaminated by chlorides", *Cement and concrete research-Elsevier*, P. 551-561.

(Feliu et al, 1996) Feliu, S., Andrade, C., González, J. A., Alonso, C. A new method for in-situ measurement of electrical resistivity of reinforced concrete. *Mater. Struct.*, Vol. 29, n°6, pp. 362-365, 1 juillet 1996. Disponible sur : < <http://dx.doi.org/10.1007/BF02486344> >

(Ferreira, 2004) Ferreira, R.M. (2004), "probability-based durability analysis of concrete structures in marine environment", Doctoral thesis, University of Minho, Guimarães, November 2004. ISBN: 972 – 8692 – 16 – 1.

(Fiaud, 1990) Fiaud, C. (1990), « Inhibiteurs de corrosion », *Technique de l'ingénieur*, M160, 15p.

(Gabrielli et al, 2007) Gabrielli C., Beitone L., Mace C., Ostermann E. et Perrot H., (2007), "On the behaviour of copper in oxalic acid solutions", *Electrochimica Acta*, Vol. 52, 6012-22.

(Galicía et al, 2009) Galicía G., Pebere N., Tribollet B. et Vivier V., (2009), "Local and global electrochemical impedances applied to the corrosion behaviour of an AZ91 magnesium alloy", *Corrosion Science*, Vol. 51, 1789-94.

(Garciaz et Marie-Victoire, 2008) Garciaz, JL., Marie-Victoire E. (2008), « Synthèse documentaire des matériels de contrôles in-situ », *Projet APPLET : Durée de vie des ouvrages : Approche Prédictive Performantielle et probabiliste*, Livrable L3-1/2, 22 pages.

(Girault, 2007) Girault, H.H. (2007), « Electrochimie physique et analytique », deuxième édition (Presses Polytechniques et Universitaires Romandes), Lausanne. ISBN 978-2-88074-673-5.

(Godart, 2005) Godart, B. (2005), « Gestion des ponts en Europe - Projet européen BRIME », *Etudes et recherches des Laboratoires des ponts et chaussées - Série Ouvrages d'art*, Ouvrage d'art OA 49, 273 pages.

(Gonzalez et al, 1985) Gonzalez, J.A., Molina, A., Escudero, ML., Andrade, C. (1985), "Errors in the electrochemical evaluation of very small corrosion rates - Part I", Polarization resistance method applied to corrosion of steel in concrete, Corrosion Science, vol. 25, pp. 917-930.

(Goszczyńska, 2014) Goszczyńska, B. (2014), "Analysis of the process of crack initiation and evolution in concrete with acoustic emission testing", Archives of Civil and Mechanical Engineering, Vol. 14, p 134-143.

(Hausmann, 1967) Hausmann, D.A. (1967), "Steel corrosion in concrete. How does it occur? ", Journal of Materials Protection, Vol. 6, pp 19-23.

(Holloway et al, 2004) Holloway, L., Nairn, K., Forsyth, M. (2004), "Concentration monitoring and performance of a migratory corrosion inhibitor in steel-reinforced concrete", Cement and concrete research-Elsevier, P. 1435-1440.

(Hugenschmidt et al, 2012) Hugenschmidt, J. et Balayssac, JP. Géoradar, (2012), Dans D. Breyse (Ed.), « Évaluation non destructive de structures en béton : fiabilité et limites des techniques simples et combinées: rapport sur l'état de la technique du comité technique RILEM 207-INR », Dordrecht, vol. 1, pp. 63-71.
<https://www.dora.lib4ri.ch/empa/islandora/object/empa:7995>

(Hunkeler, 1996) Hunkeler, F. (1996), "The resistivity of pore water solution - A decisive parameter of rebar corrosion and repair methods", Construction and Building Materials, vol. 10, pp. 381-389.

(IAEA, 2002) Guidebook on non-destructive testing of concrete structures. International Atomic Energy Agency (IAEA), Vienna, Austria, 2002.

(Ichchou, 2011) Ichchou, I. (2011), « Étude électrochimique de l'inhibition classique ou par des monocouches auto-assemblées d'un dérivé de la thiourée, vis-à-vis de la corrosion en milieu acide de l'acier au carbone XC38 », Mémoire de magistère, université Abou-Bekr Belkaid Tlemcen, Algérie, 104p.

(Ihamouten, 2011) Ihamouten, A. (2011), « Caractérisation physique et hydrique de bétons d'ouvrage par propagation d'ondes électromagnétiques », Thèse de doctorant, Université de Nantes, 249 p.

(ISO, 2015) ISO (standard), 8044 : 2015 : définition des termes relatifs à la corrosion (2015). (Consulté le 7/03/2016). Disponible à : <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:8044:ed-4:v1:fr>

(Koleva et al, 2006) Koleva, D.A., Hu, J., Fraaij, A.L.A., Stroeven, P., Boshkov, N., De Wit, J.H.W. (2006), "Quantitative characterisation of steel/cement paste interface microstructure and corrosion phenomena in mortars suffering from chloride attack", *Corrosion Science*, Vol.48, pp 4001-4019, 2006.

(Langford et Broomfield, 1987) Langford, P., Broomfield, J. Monitoring the Corrosion of Reinforcing Steel, *Construction Repair*, vol. 1, issue 2, pp. 32-36, May 1987.

(Laurens, 2001) Laurens, S. (2001), « Aptitude de la technique radar à la caractérisation du béton d'enrobage – Aide au diagnostic de la corrosion des armatures », Thèse de doctorat, INSA de Toulouse.

(Lédion et Blériot, 2013) Lédion, J. et Blériot, P. (2013), « Inhibiteurs de corrosion dans le traitement des circuits d'eau », *Technique de l'ingénieur*, cor1000, 10/06/2013.

(Li et al, 1998) Li Z., Li F., Zdunek A., Landis E., Shah S. (1998), "Application of Acoustic Emission Technique to Detection of Reinforcing Steel Corrosion in Concrete", *ACI MATERIALS JOURNAL*, no. 95, January/February 1998.

(Macdonald, 2009) Macdonald, D.D. (2009), "Why electrochemical impedance spectroscopy is the ultimate tool in mechanistic analysis", *ECS Transactions*, vol. 19, pp. 55-79.

(Millard, 1991) Millard, S.G. (1991), "Reinforced concrete resistivity measurement techniques, Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Part 2", *Research and theory*, vol. 91, pp. 71-88.

(Millet, 2008) Millet, J. P. (2008), « Durabilité et corrosion (cours Master Science et Technologie des Matériaux) », In Constantin, F. « Etude de l'efficacité d'inhibiteurs de corrosion utilisés dans les liquides de refroidissement ». Thèse de doctorat, Institut national des sciences appliquées de Lyon, 173p, 2011.

(Morris et al, 1996) Morris, W., Moreno, E.I., Sagués, A.A. (1996), "Practical evaluation of resistivity of concrete in test cylinders using a Wenner array probe", *Cement and Concrete Research*, vol. 26, pp. 1779-1787.

(Muller, 2010) Muller, J. (2010), « Etude électrochimique et caractérisation des produits de corrosion formés à la surface des bronzes Cu-Sn en milieu sulfate », Thèse de doctorat, institut de chimie et des matériaux, Paris-Est. 217p, soutenue le 2 avril 2010.

(Naar, 2006) Naar, S. (2006), « Evaluation non destructive du béton par mesures de résistivité électrique et thermographie infrarouge passive », Thèse de doctorat, Universités de Borbeaux, France, PhD Thesis, University of Sherbrooke, Canada, 248 pages.

(Nahali et al, 2014) Nahali, H. Dhouibi, L. Idrissi, H. (2014), “Effect of phosphate based inhibitor on the threshold chloride to initiate steel corrosion in saturated hydroxide solution”, *Construction and Building Materials*, Vol. 52, p 87-94.

(NEA, 2002) NEA. (2002), “Electrochemical techniques to detect corrosion in concrete structures in nuclear installations”, Nuclear Energy Agency, OCDE Technical note 21.

(Nguyen, 2014) Nguyen, N.T. (2014), « Évaluation non destructive des structures en béton armé : étude de la variabilité spatiale et de la combinaison des techniques », Thèse de doctorat, Université de Bordeaux, France.

(Nguyen, 2016) Nguyen, A.Q. (2016), « Evaluation non destructive du gradient de teneur en eau dans les structures en béton armé par résistivité électrique », thèse de doctorat, université de Toulouse.

(Ollivier et Vichot, 2006) Ollivier, J-P. et Vichot, A. (2006), « La durabilité des bétons ». Les Presses de l'École nationale des ponts et chaussées.

(Ormellese et al, 2005) Ormellese, M., Berra, M., Bolzoni, F., Pastore, T. (2005), “Corrosion inhibitors for chlorides induced corrosion in reinforced concrete structures”, *Cement and concrete research-Elsevier*, pp. 536-547.

(Perrin et al, 2010) Perrin, M. Gaillet, L. Tessier, C. Idissi, H. (2010), “ Hydrogen embrittlement of prestressing cables”, *Corrosion Science*, Vol. 52, p 1915-1926.

(Proust et al, 2001) Proust A., Leroy D., Lenain J.C. (2001), « Apport de la technique d'émission acoustique pour l'étude de la corrosion des armatures et de la corrosion sous contraintes des câbles », CEFRACOR.

(Pruckner et GjØrv, 2004) Pruckner, F., GjØrv, O.E. (2004), “Effect of CaCl₂ and NaCl additions on concrete corrosivity”, *Cement and Concrete Research*, vol. 34, pp. 1209-1217.

(Polder et al, 2000) Polder R., Andrade C., Elsener B., Vennesland Ø., Gulikers J., Weidert R., Raupach M. (2000), “Rilem tc 154-emc: electrochemical techniques for measuring metallic corrosion”, *Materials and Structures*, Vol. 33, n°10, p. 603-611. Disponible sur : < <http://dx.doi.org/10.1007/BF02480599> >

(Polder et Peelen, 2002) Polder R.B., Peelen, W.H.A. (2002), “Characterisation of chloride transport and reinforcement corrosion in concrete under cyclic wetting and drying by electrical resistivity”, *Cement and Concrete Composites*, Vol.24, pp. 427–435.

(Poupard, 2001) Poupard, O. (2001), « Étude de transfert de chlorures et de l'initiation de la corrosion d'un acier au sein d'un matériau cimentaire saturé - Suivi par spectroscopie d'impédance », Thèse de doctorat, Université de La Rochelle.

(Rahmouni, 2005) Rahmouni, K. (2005), « Corrosion et protection des bronzes recouverts de patine : étude électrochimique et spectroscopique de la surface d'objets archéologiques et synthèse d'une patine équivalente sur un bronze du commerce », Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie (Paris 6) - Université IBN Tofail (Maroc).

(Randles, 1947) Randles, J.E.B. (1947), “Kinetics of rapid electrode reactions”, *Discussions of the faraday society*, vol. 1, pp. 11-19.

(Sail, 2013) Sail, L. (2013), « Etude de la performance d'inhibiteurs de corrosion à base de phosphate pour les constructions en béton arme », Thèse de doctorat, Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, Algérie, 212p.

(Sbartai et al, 2005) Sbartai, Z. M., Laurens S., Rhazi J., Balayssac J-P., Ballivy G., Arliguie G. (2005), « Evaluation non destructive du risque de corrosion par mesures radar et de résistivité électrique : expérimentation en laboratoire et application in situ », *Congres International, Réhabilitation des Construction et Développement Durable*, Alger, Algérie, pp 25-33, 3-4 mai 2005.

(Seah et al, 1993) Seah, K. H. W. Lim, K. B. C. Chew, H. Teoh, S. H. (1993), “The correlation of acoustic emission with rate of corrosion”, *Corrosion Science*, Vol. 34, p 1707-1713.

(Soufi, 2013) Soufi, A. (2013), « Etude de la durabilité des systèmes béton arme : mortiers de réparation en milieu marin », Thèse de doctorat, Université de La Rochelle, France, 209p.

(Soylev et al, 2007) Soylev, T.A., McNally, C., Richardson, M. (2007), “Effectiveness of amino alcohol-based surface-applied corrosion inhibitors in chloride-contaminated concrete”, *Cement and concrete research-Elsevier*, pp.972-977.

(Stern et Geary, 1957) Stern M., Geary A. L., (1957), “A Theoretical analysis of the shape of polarization curves”, *Journal of the Electrochemical Society*, 104 , pp. 56.

(Stratful, 1973) Stratfull, R. F., (1973), “Half-Cell Potentials and the Corrosion of Steel in Concrete,” *Highway Research Record* 433.

(Taillandier et al, 2013) Taillandier, F., Sbartai, ZM., Breysse, D. (2013), « Hiérarchisation de la maintenance d’un parc immobilier – Développement méthodologique et étude de cas », 31èmes Rencontres de l’AUGC, ENS Cachan, 29 au 31 mai 2013.

(Vervisch-Fortuné, 2009) Vervisch-Fortuné, I. (2009), « Sensibilité de la technique d’émission acoustique à la corrosion des armatures dans le béton », Université de Toulouse, France.

(Wenner, 1915) Wenner, F. (1915), “A method for measuring earth resistivity”, *Journal of the Franklin Institute*, vol. 180, pp. 469-478.

(Woodward et al, 2001) Woodward, R., Cullington, D.W., Daly, A.F., Vassie, P.R.W., Haardt, P., Kashner, R., Astudillo, R., Velando, C., Godart, B., Cremona, C., Mahut, B., Raharinaivo, A., Lau, Markey, I., Bevc, L., Perus, I. (2001), “Bridge management in Europe (BRIME)-Deliverable D14- Final Report”, BRIME Project, RO-97-SC.2220, 228 pages.

(Yuma et al, 2013) Yuma, K. Tomoyo, W. Tomoe, K. Masayasu, O. (2013), “Corrosion mechanisms in reinforced concrete by acoustic emission”, *Construction and Building Materials*, Vol. 48, p 1240-1247.

Chapitre III

(Agrawal et al, 1997) Agrawal, G., Chameau, J. A., and Bourdeau, P. L. (1997), “Assessing the liquefaction susceptibility at a site based on information from penetration testing”. *Artificial neural networks for civil engineers: Fundamentals and applications*, N. Kartam, I. Flood, and J. H. Garrett, eds., New York, pp. 185-214.

(Ali et Nejjar, 1998) Ali, H. E., and Najjar, Y. M. (1998), “Neuronet-based approach for assessing liquefaction potential of soils”, *Transportation Research Record*, Vol. 1633(1), pp. 3-8. <https://doi.org/10.3141/1633-01>.

(ASCE, 2000) ASCE. (2000), "Artificial neural networks in hydrology. I: Preliminary concepts." J. Hydrologic Engineering, Vol. 5(2), pp. 115-123. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2000\)5:2\(115\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2000)5:2(115))

(Coolen et al, 2005) Coolen, A. C. C., Kühn, R., Sollich, P. (2005), "Theory of Neural Information Processing Systems", Oxford University Press.

(Cottis et al, 1999) Cottis, R.A., Li, Q., Owen, G., Gartland, S.J., Helliwell, I.A. and Turega, M. (1999), "Neural Network Methods for Corrosion Data Reduction", Mater Des, Vol. 20(4), pp. 169-178. [https://doi.org/10.1016/S02613069\(99\)00026-6](https://doi.org/10.1016/S02613069(99)00026-6).

(Da Silva et al, 2017) da Silva, D.I.N., Spatti, D.H., Flauzino, R.A., Bartocci Liboni L.H., dos Reis Alves S.F. (2017), "Artificial Neural Networks", Springer International Publishing Switzerland. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-43162-8>

(Din et al, 2015) Din, M.M., Ithnin, N., Zain, A.M., Noor, N.M. Siraj, M. and Rasol, R. (2015), "An artificial neural network modeling for pipeline corrosion growth prediction", ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, Vol. 10(2), pp. 512-519.

(Flood, 1990) Flood, I. (1990), "Simulating the construction process using neural networks", Proceedings of the 7th ISARC – International Association for Automation and Robotics in Construction / Bristol, pp. 374-382. <https://doi.org/10.22260/ISARC1990/0048>

(Flood et Nabil, 1994) Flood, I. & Nabil, K. (1994), "Neural networks in civil engineering II: Systems and application", Computing in Civil Engineering. Vol. 8(2), pp. 149-162. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-3801\(1994\)8:2\(149\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3801(1994)8:2(149))

(Flood et Paul, 1996) Flood, I. & Paul, C. (1996), "Modelling construction processes using artificial neural networks". Automation in Construction. Vol. 4(4), pp. 307-320. [https://doi.org/10.1016/0926-5805\(95\)00011-9](https://doi.org/10.1016/0926-5805(95)00011-9)

(Haykin, 1999) Haykin, S., (1999), "Neural Networks, A Comprehensive Foundation", second ed. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.

(Horvatić et al, 2016) Horvatić, A., Alar, V., Žmak, I. and Runje, B. (2016), "Development of Models for Prediction of Corrosion and Pitting Potential on AISI 304 Stainless Steel in Different Environmental Conditions", Int. J. Electrochem. Sci., Vol. 11, pp. 7674-7689. <https://doi.org/10.20964/2016.09.26>.

(Jančíková et al, 2013) Jančíková, Z., Zimný, O. and Košťál, P. (2013), “Prediction of Metal Corrosion by Neural Networks”, METABK, Vol. 52(3), pp. 379-381.

(Jeng et al, 2003) Jeng, D. S., Cha, D. H., & Blumenstein, M. (2003), “Application of Neural Networks in Civil Engineering Problems”, Proceedings of the International Conference on Advances in the Internet, Processing, Systems and Interdisciplinary Research.

(Kwon et Kim, 2012) Kwon, S.J. and Kim, S.C. (2012), “Concrete mix design for service life of RC structures exposed to chloride attack“, Computers and Concrete, Vol. 10(6), pp. 587-607. <http://dx.doi.org/10.12989/cac.2012.10.6.587>

(Lazarevska et al, 2014) Lazarevska, M., Knezevic, M., Cvetkovska, M. & Trombeva-Gavriloska, A. (2014), “Application of artificial neural networks in civil engineering”, Technical Gazette 21, Vol. 6, pp. 1353-1359.

(Masters, 1993) Masters, T. (1993), “Practical neural network recipes in C++”, Academic Press, San Diego, California. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-051433-8.50017-3>.

(Min-Der et al, 2017) Min-Der, L., Hsiang-Teng, L. and Chien-Ming, L. (2017), “Application of Artificial Neural Networks on Predicting Corrosion Rates of Carbon Steel in Taiwan Industrial Zones”, 2nd International Conference on Modelling, Simulation and Applied Mathematics, Advances in Intelligent Systems Research, Published by Atlantis Press, Vol. 132, pp. 278-282.

(Öztaş et al, 2006) Öztaş, A., Pala, M., Özbay, E., Kanca, E., Çağlar, N. and Bhatti, M. A. (2006), “Predicting the compressive strength and slump of high strength concrete using neural network”, Construction and Building Materials, vol. 20, no. 9, pp. 769-775. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.01.054>

(Pandya et Shaha, 2014) Pandya D., Shaha D. (2014), “Experimentation and Its Prediction of Process Parameters Effects on Elongation in Tensile Test of AISI 1008 Steel Using ANN Model”, Procedia Technology, 14, pp. 282 – 289. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2014.08.037>.

(Parthiban et al, 2005) Parthiban, T., Ravi, R., Parthiban, G.T., Srinivasan, S., Ramakrishnan, K.R. and Raghavan, M. (2005), “Neural Network Analysis for Corrosion of Steel in Concrete”, Corros Sci, Vol. 47(7), pp. 1625-1642. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2004.08.011>.

(Pradeep et Nitin, 2002) Pradeep, U. and Nitin K. Dudani. (2002), “Neural Networks for Profiling Stress History of Clays from PCPT Data”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, pp. 569-579. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2002\)128:7\(569\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2002)128:7(569)).

(Pu et Mesbahi, 2006) Pu Y. and Mesbahi E. (2006), “Application of ANN to evaluation of ultimate strength of steel panels”, *Engineering Structures*, Vol. 28, pp. 1190-1196. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2005.12.009>.

(Rahali et al, 2018) Rahali, B., Aissa Mamoune, S.M. and Trouzine, H. (2018), “Using Artificial Neural Networks Approach to Estimate Compressive Strength for Rubberized Concrete”, *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, Vol. 62 (4), pp. 858-865. <https://doi.org/10.3311/PPci.11928>.

(Ramana et al, 2009) Ramana, K.V.S., Anita, T., Mandal, S., Kahappan, S., Shaikh, H. and Sivaprasad, P.V. (2009), “Effect of Different Environmental Parameters on Pitting behavior of AISI type 316L Stainless Steel: Experimental Studies and Neural Network Modeling”, *Mater Des*, Vol. 30(9), pp. 3770-3775. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.01.039>.

(Reddy, 2014) Reddy, N.S. (2014), “Neural Networks Model for Predicting Corrosion Depth in Steels”, *Indian Journal of Advances in Chemical Science*, Vol. 2(3), pp. 204-207.

(Shahin et al, 2002) Shahin, M.A., Holger R. M. and MARK B.J. (2002), “Predicting Settlement of Shallow Foundations using Neural Networks”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, pp. 585-793. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2002\)128:9\(785\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2002)128:9(785)).

(Shang et al, 2004) Shang, J. Q., Ding, W., Rowe, R. K., and Josic, L. (2004), “Detecting heavy metal contamination in soil using complex permittivity and artificial neural networks”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 41(6), pp. 1054-1067. <https://doi.org/10.1139/t04-051>.

(Shirkhani et al, 2019) Shirkhani, A., Davarnia, D. and Azar, B.F. (2019), “Prediction of bond strength between concrete and rebar under corrosion using ANN”, *Computers and Concrete*, Vol. 23(4), pp. 273-279. <http://dx.doi.org/10.12989/cac.2019.23.4.273>.

(Singh et al, 2019) Singh, V., Bano, S., Kumar Yadav, A. & Ahmad, S. Feasibility of (2019), “Artificial Neural Network in Civil Engineering”, *International Journal of Trend in Scientific Research and Development (ijtsrd)*, ISSN: 2456-6470, Vol. 3(3), pp. 724-728. <https://doi.org/10.31142/ijtsrd22985>.

(Subir, 2012) Subir, P. (2012), “Modeling to Study the Effect of Environmental Parameters on Corrosion of Mild Steel in Seawater Using Neural Network”, international Scholarly Research Network, ISRN Metallurgy, 6 pages. <https://doi.org/10.5402/2012/487351>.

(Sutton et Barto, 1990) Sutton, R. S., Barto, A. G. (1990), “Time-derivative models of Pavlovian reinforcement”. In M. Gabriel and J. Moore (eds.), *Learning and Computational Neuroscience: Foundations of Adaptive Networks*, MIT Press, Cambridge, MA, pp. 497–537.

(Yang et Rosenbaum, 2002) Yang, Y., and Rosenbaum, M. S. (2002), “The artificial neural network as a tool for assessing geotechnical properties”, *Geotechnical Engineering Journal*, Vol. 20(2), pp. 149-168. <https://doi.org/10.1023/A:1015066903985>.

Chapitre IV

(Bamforth et Price, 1993) Bamforth, P.B. & Price, W.F. Factors Influencing Chloride Ingress into Marine Concretes, International Conference - Concrete 2000, University of Dundee, Scotland, pp. 1105 – 1118, 1993. isbn:(0419189904).

(Bastidas-Arteaga et Schoefs, 2012) Bastidas-Arteaga, E. & Schoefs, F. (2012), „Stochastic improvement of inspection and maintenance of corroding reinforced concrete structures placed in unsaturated environments”, *Engineering Structures*, Vol. 41, pp. 50-62. **<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.03.011>**.

(Bastidas-Arteaga et Schoefs, 2015) Bastidas-Arteaga, E. & Schoefs, F. (2015), ”Sustainable maintenance and repair of RC coastal structures”, *Maritime Engineering*, Vol. 168(4), pp. 162-173. <https://doi.org/10.1680/jmaen.14.00018>.

(Daigle et al, 2004) Daigle, L., Lounis, Z. & Cusson, D. (2004), Numerical prediction of early age cracking and corrosion in high performance concrete bridges”, *Innovations in bridge engineering session of the annual conference of the transportation association of Canada*, Québec, Canada.

(Darmawan et Stewart, 2006) Darmawan, M.S. & Stewart, G.M. (2006), Effect of Spatially Variable Pitting Corrosion on Structural Reliability of Prestressed Concrete Bridge Girders, *Australian Journal of Structural Engineering*, Vol. 6(2), pp. 147-158. <https://doi.org/10.1080/13287982.2006.11464951>.

(Duracrete, 2000) Duracrete. (2000), Statistical quantification of the variables in the limit state functions. Technical report, The European Union - Brite EuRam III - Contract BRPR-CT95-0132- Project BE95-1347/R9, 2000.

(EICC, 1992) Euro-International Concrete Committee. (1992). Durable concrete structures, 2nd edition, Thomas Telford ed. n°183 ISBN 978-0-7277-1620-0.

(Estes et Frangopol, 1999) Estes, A.C., & Frangopol, D.M. (1999), Repair optimisation of highway bridges using system reliability approach, *Structure Engineering*, Vol. 125(7), pp. 766-775. Retrieved 15 December 2018, from: https://digitalcommons.calpoly.edu/cgi/viewcontent.cgi?referer=https://scholar.google.com/&httpsredir=1&article=1018&context=aen_fac. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1999\)125:7\(766\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1999)125:7(766))

(Faber et Sørensen, 2002) Faber, M. H. & Sørensen, J. D. (2000), Indicators for Inspection and Maintenance Planning of Concrete Structures, *Journal of Structural Safety*, Vol. 4 (120), pp. 377-396. [https://doi.org/10.1016/S0167-4730\(02\)00033-4](https://doi.org/10.1016/S0167-4730(02)00033-4).

(Glass et Buenfeld, 1995) Glass, G.K. & Buenfeld, N.R. (1995), Chloride levels for corrosion induced deterioration of steel in concrete, 1st RILEM workshop on Chloride Penetration into Concrete, St-Remy-Les-Chevreuses, France, October 15-18.

(Groeneveld et Meeden, 1984) Groeneveld, R.A. & Meeden, G. (1984), Measuring Skewness and Kurtosis, *The Statistician*. Vol. 33 (4), pp. 391–399. <https://doi.org/10.2307/2987742>.

(Houmadi et al, 2012) Houmadi, Y., Ahmedb, A. & Soubrab, A. (2012), Probabilistic analysis of a one-dimensional soil consolidation problem, *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, Vol. 6(1), pp. 36-49. <https://doi.org/10.1080/17499518.2011.590090> .

(Koch et al, 2016) Koch, G.H., Thompson, N.G., Moghissi, O., Payer, J.H., & Varney, J. (2016), IMPACT (International Measures of Prevention, Application, and Economics of Corrosion Technologies Study, Houston, TX: NACE International, Report No. OAPUS310GKCOCH (AP110272).

(Lemaire et al, 2009) Lemaire, M. Chateaufneuf, A. & Mitteau, J.C. (2009), Preliminary Approach to Reliability in Mechanics, In: Structure Reliability, Jacky Mazars (Eds.), pp. 19-37. <https://doi.org/10.1002 / 9780470611708>.

(Lounis, 2003) Lounis, Z. (2003), Probabilistic modeling of chloride contamination and corrosion of concrete bridge structures, In: Proceedings of International Symposium on Uncertainty Modeling and Analysis, College Park, USA, pp. 447-451. <https://doi.org/10.1109/ISUMA.2003.1236199>.

(Lounis et Amleh, 2003) Lounis, Z. & Amleh, L. (2003), Reliability based prediction of chloride ingress and reinforcement corrosion of aging concrete bridge decks, the 3rd international IABMAS workshop on life cycle cost analysis and design of civil infrastructure systems, Lausanne, Switzerland, pp. 139-147. <https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/accepted/?id=b9ee359e-59da-4b31-acc7-1852de809064>

(Lounis et Daigle, 2008) Lounis, Z. & Daigle, L. (2008), Reliability-based decision support tool for life cycle design and management of highway bridge decks, In : Bridges – Links to a Sustainable Future Session of the 2008 Annual Conference of the Transportation Association of Canada, Toronto, Canada, Sep, 21-24, pp. 1-19.

(Malioka, 2009) Malioka, V. (2009), Condition Indicators for the Assessment of Local and Spatial Deterioration of Concrete Structures. Institute of Structural Engineering Swiss Federal Institute of Technology, Zurich. Retrieved 20 January 2017, from: <https://www.research-collection.ethz.ch/handle/20.500.11850/151976> .

(Morcous et al, 2002) Morcous, G., Lounis, Z. & Mirza, M.S. (2002), Service-life prediction of concrete bridge decks using case-based reasoning, In: Proceedings of 6th International Conference on Short and Medium Span Bridges, Vancouver, Canada, pp. 769-776. Retrieved 15 December 2018, from: <https://pdfs.semanticscholar.org/c6c7/989a254ae3e2fe3b9c0a8ed8122379f1a9fa.pdf>

(Neville, 1995) Neville, A.M. (1995), Chloride Attack of Reinforced Concrete: An Overview, Materials and Structures, Vol. 28(2), pp. 63-70. <https://doi.org/10.1007/BF02473172>.

(Nguyena et al, 2017) Nguyena, P.T., Bastidas-Arteagaa, E., Amiria, O., & El Soueidyaa, C. (2017), An efficient chloride ingress model for long-term lifetime assessment of reinforced concrete structures under realistic climate and exposure conditions, International Journal of

Concrete Structures and Materials, Vol. 11(2), pp. 199-213. <https://doi.org/10.1007/s40069-017-0185-8>.

(Polder et Rooij, 2003) Polder, R.B. & Rooij, M.R. (2003), Investigation of the concrete structure of the Eastern Scheldt Barrier after 20 years of exposure to marine environment, TNO-Report 2002-CI-R2118-3 final version.

(Polder et Rooij, 2005) Polder, R.B. & Rooij, M.R. (2005), Durability of marine concrete structures – field investigations and modelling, HERON, Vol. 50 (3), pp. 133-153, 18 december 2018, from: <https://repository.tudelft.nl/view/tno/uuid:89ae49ea-71a3-418b-a399-7efc3e5b4d45>.

(Shayanfar et al, 2015) Shayanfar, M.A., Barkhordari, M.A. & Ghanooni-Bagha, M. (2015), Estimation of Corrosion Occurrence in RC Structure Using Reliability Based PSO Optimization, Periodica Polytechnica Civil Engineering, Vol. 59(4), pp. 531-542. <https://doi.org/10.3311/PPci.7588>.

(Spanos et Ghanem, 1989) Spanos, P.D. & Ghanem, R. (1989), Stochastic Finite Element Expansion for Random Media, Journal of Engineering Mechanics, Vol. 115(5), pp. 1035-1053. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1989\)115:5\(1035\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1989)115:5(1035)).

(Stewart et Mullard, 2007) Stewart, M.G. & Mullard, J.A. (2007), Spatial time-dependent reliability analysis of corrosion damage and the timing of first repair for RC structures, Engineering structures, Vol. 29(7), pp. 1457-1464. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2006.09.004>.

(Sudret, 2008) Sudret, B. (2008), Global sensitivity analysis using polynomial chaos expansion, Reliability Engineering And System Safety, Vol. 93(7), pp. 964-979. <https://doi.org/10.1016/j.res.2007.04.002>.

(Sudret et Berveiller, 2008) Sudret, B. & Berveiller, M. (2008), Stochastic finite element methods in geotechnical engineering, In : Reliability-Based design in Geotechnical Engineering: Computations and applications, Taylor & Francis (Eds.), New York, USA, pp. 260-297. ISBN 0203934245.

(Vanmarcke et Grigoriu, 1983) Vanmarcke, E.H. & Grigoriu, M. (1983), Stochastic finite element analysis of simple beams, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 109(5), pp. 1203-1214. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1983\)109:5\(1203\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1983)109:5(1203)).

(Ying et Vrouwenvelder, 2007) Ying, L. & Vrouwenvelder, A.C.W.M. (2007), Service life prediction and repair of concrete structures with spatial variability, *Heron*, Vol. 52(4), pp. 251-268. Retrieved 15 December 2018, from: https://www.researchgate.net/publication/27343534_Service_life_prediction_and_repair_of_concrete_structures_with_spatial_variability.

Chapitre V

(Angst, 2018) Angst, U.M. (2018), “Challenges and opportunities in corrosion of steel in concrete”, *Materials and Structures*, Vol.51, <https://doi.org/10.1617/s11527-017-1131-6>.

(ASTM, 2009) ASTM C876-09, (2009), “Standard Test Method for Half-cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete”, ASTM International, West Conshohocken. <https://doi.org/10.1520/C0876-09.2>.

(Benjamin et Cornell, 1970) Benjamin, J.R. and Cornell, C.A. (1970), “Probability, Statistics and Decision for Civil Engineers”, McGraw-Hill Book Company, New York, USA. ISBN 07004549-6

(Bertolini et al, 2003) Bertolini, L. Elsener, B., Pedferri, P. Polder, R.B. (2003), “Corrosion of Steel in Concrete”, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, FRG. <https://doi.org/10.1002/3527603379>.

(Elsener, 2001) Elsener, B. (2001), “Half cell potential mapping to assess repair work on RC structures”, *Construction and building materials*. Vol. 15, pp. 133-139.

(Elsener et al, 2003) Elsener, B., Andrade, C., Gulikers, J., Polder, R., Raupach, M. (2003), “Half-cell potential measurements – Potential mapping on reinforced concrete structures”, *Materials and Structures*, Vol. 36(7) , pp. 461-471. <https://doi.org/10.1007/BF02481526>.

(Ferreira, 2004) Ferreira, R.M. (2004), “probability-based durability analysis of concrete structures in marine environment”, Doctoral thesis, University of Minho, Guimarães. ISBN: 972 – 8692 – 16 – 1.

(Ghomari, 2011) Ghomari, F. (2011), « Maladies des ouvrages en béton armé, Etude expérimentale », 8^{ème} séminaire Technique de Lafarge, Alger, pp. 178-190, 13-14 décembre 2011.

(Hornik et al, 1989) Hornik, K., Stinchcombe, M. and White, H. (1989), “Multilayer Feedforward Networks are Universal Approximators”, *Neural Networks*, 2(5), 359-366. [https://doi.org/10.1016/0893-6080\(89\)90020-8](https://doi.org/10.1016/0893-6080(89)90020-8).

(Horvatić et al, 2016) Horvatić, A., Alar, V., Žmak, I. and Runje, B. (2016), “Development of Models for Prediction of Corrosion and Pitting Potential on AISI 304 Stainless Steel in Different Environmental Conditions”, *Int. J. Electrochem. Sci.*, 11, 7674 – 7689. <https://doi.org/10.20964/2016.09.26>.

(Jiménez-Come et al, 2015) Jiménez-Come, M.J, Turias, I.J. and Ruiz- Aguilar, J.J. (2015), “A Two-Stage Model based on Artificial Neural Networks to Determine Pitting Corrosion Status of 316L Stainless Steel”, *Corrosion Reviews*, 34(1), 113-125. <https://doi.org/10.1515/corrrev-2015-0048>.

(Merouane et al, 2019) Merouane, F.Z., Aissa Mamoune, S.M. (2019), “Prediction of Swelling Parameters of Two Clayey Soils from Algeria using Artificial Neural Networks”, *Mathematical Modelling in Civil Engineering*, 14(3), 11-26. <https://doi.org/10.2478/mmce-2018-0008>.

(NF EN, 2014) NF EN 206/CN Béton - Spécification, performance, production et conformité - Complément national à la norme NF EN 206, Décembre 2014.

(RILEM, 2003) RILEM TC 154-EMC – “Electrochemical techniques for measuring metallic corrosion”. Recommendations, Half-cell potential measurements - Potential mapping on reinforced concrete structures, *Materials and Structures*. 36 August - September (2003). <https://doi.org/10.1617/13718>.

(Rosenberg et al, 1989) Rosenberg A., Hansson C.M., Andrade C., (1989), “Mechanism of corrosion of steel in concrete”, *Materials Science of Concrete*, American Ceramic Society, Vol. 1, pp. 285-314.

(Sail et al, 2011) Sail L., Ghomari F., Bezzar A., Benali O., (2011), Mass loss for assessment of the inhibitory efficiency of products to basis of phosphate, *Canadian Journal on Environmental, Construction and Civil Engineering*, vol. 2, pp.111-117.

(Sail, 2013) Sail, L. (2013), « Etude de la performance d'inhibiteurs de corrosion à base de phosphate pour les constructions en béton armé », Thèse de Doctorat, université de Tlemcen, Algérie, pp. 212.

(Schmitt et al, 2001) Schmitt, A., Le Blanc, B., Corsini, M.M., Lafond, C. and Bruzek, J. (2001), "Artificial Neural Network: A relevant Data Processing Tool for Anthropology". Bull. et Mém. de la Société d'Anthropologie de Paris, 13(2), 143-150.

(Stratful, 1957) Stratful, R.F., (1957), "The corrosion of steel in a reinforced concrete bridge", Corrosion, Vol.13, pp.43-48. <https://doi.org/10.5006/0010-9312-13.3.43S>.

(Subir, 2012) Subir, P. (2012), "Modeling to Study the Effect of Environmental Parameters on Corrosion of Mild Steel in Seawater Using Neural Network", international Scholarly Research Network, ISRN Metallurgy, 6 pages. <https://doi.org/10.5402/2012/487351>.

(Touzet, 1992) Touzet, C. (1992), "Artificial Neural Networks Introduction to Connexionism –Courses", Exercises and Practical Work. page 6.

ANNEXES

Annexe A

Notice technique
Edition juin 2009
Numéro 6.09
Version n°112.2009



Sika® FerroGard®-903+

Sika® FerroGard®-903+

Imprégnation inhibitrice de corrosion (formule améliorée)

Enquête Technique SOCOTEC (CCT n° 15)

Conforme à la norme EN 1504-9, Principe 11, Méthode 11.3 (application d'inhibiteur sur le béton)

Description du produit

Sika® FerroGard®-903+ est une imprégnation en phase aqueuse à base d'inhibiteurs de corrosion, conçue pour le béton armé.

Sika® FerroGard®-903+ est à base de composés organiques. Il pénètre le béton et forme sur l'armature interne en acier une couche protectrice monomoléculaire.

La protection apportée par le Sika® FerroGard®-903+ permet de retarder le démarrage de la corrosion, de réduire le taux de corrosion, et d'accroître la durée de vie de l'ouvrage d'environ 15 ans (dès lors que le produit est utilisé comme partie intégrante du système complet Sika® de réparation et de protection).

Utilisation

- Protection contre la corrosion des armatures internes des structures en béton armé enterrées ou non.
- Traitement de contrôle de la corrosion pour le béton armé non endommagé, dans des zones où les armatures sont en cours de corrosion ou situées en zones non passives de béton carbonaté ou contaminées par des chlorures.

- Sika® FerroGard®-903+ est particulièrement adapté pour prolonger la durée de vie des ouvrages en béton.

Caractéristiques / Avantages

- Conforme au principe 11 de la norme EN 1504-9 ; Méthode 11.3 (application d'inhibiteur sur le béton)
- Conserve l'apparence, l'aspect de surface du support
- Conserve les propriétés de diffusion de la vapeur d'eau du béton
- Protection à long terme et durabilité
- Peut être appliqué sur des réparations existantes et dans les zones environnantes afin de prévenir la formation d'anodes latentes
- Protège à la fois les zones anodiques (EN 1504-9, principe 11) et cathodiques (EN 1504-9, principe 9)
- Peut être utilisé quand les autres options de réparation / prévention ne sont pas applicables
- Prolongation économique de la durée de vie des ouvrages en béton armé
- Application, entretien et maintenance faciles et économiques
- Contrôle qualité sur chantier : mesure de la profondeur de pénétration grâce à la Procédure Sika® d'Analyse Qualitative (nous consulter).

Essais

Agréments / normes

- Enquête SOCOTEC - CCT n° 15 Réparation - Prévention - Protection ■ PV du CEBTP n° 2393.6 100 - Octobre 2000.
- Rapport BRE n° 224-346, 2005 (effets préventifs de l'inhibiteur en milieu chloré)
- Rapport d'évaluation Mott Mac Donald n° 26063/001 Rev A Programme d'essai des inhibiteurs de corrosion Sika FerroGard - Avril 1996.
- SAMARIS (Sustainable and Advanced Materials for Roads Infrastructures) rapport final, rapports D17a, D17b (analyse bibliographique et étude en laboratoire), D21 (suivi activité de corrosion in situ), D25a (recommandations de spécifications).
- Inhibiteurs de corrosion pour les structures de béton armé à hautes performances- Université de Surrey, 1999. Mulheron, M., Nswaubani, SO.
 - C-Probe Systems Ltd., Performance des inhibiteurs de corrosion en pratique, 2000



Caractéristiques

Aspect /Couleur

Liquide incolore

Conditionnement

Bidon 25 kg
Fût 220 kg (sur commande spéciale – nous consulter)

Stockage

Conditions de stockage / Conservation

24 mois après la date de fabrication, quand le produit est stocké dans son emballage d'origine intact, non entamé, à l'abri du gel.
En cas de gel (< -5°C) une cristallisation peut apparaître. Ce phénomène est réversible ; pour cela, stocker le produit à une température comprise entre +15°C et +25°C. Bien remuer jusqu'à disparition complète des cristaux.

Caractéristiques techniques

Nature chimique

Solution en phase aqueuse d'amino alcools et sels amino alcools.

Densité (à 23°C)

~ 1.6 kg/l à 20°C

pH

~ 10

Viscosité ~ 24 mPa.s

Profondeur et vitesse de pénétration Des analyses sur échantillons prélevés sur chantier ont montré que Sika® FerroGard®-903+ pénètre le béton de plusieurs millimètres par jour et jusqu'à une profondeur de 25 à 40 mm en 1 mois. La vitesse de pénétration peut être accélérée ou retardée suivant la porosité du béton. Sika® FerroGard®-903+ migre par mécanismes de diffusion à la fois sous forme vapeur et liquide.

Procédés

Composants du procédé Sika® FerroGard®-903+ fait partie des procédés de réparation et protection du béton.

Procédés de réparation SikaTop®, Sika MonoTop®, SikaRep®	Contrôle de la corrosion Sika® FerroGard®-903+	Protection du béton Revêtements ou hydrofuges Sikagard®
---	---	---

Application

En complément de la présente notice technique, consulter le Cahier des Clauses Techniques de Pose.

Consommation / Dosage

Généralement ~ 0,500 kg/m² (480 ml/m²)
Dans le cas de béton compacte à faible porosité, la consommation peut être réduite mais ne doit pas être inférieure à 0,300 kg/m² (290 ml/m²).
Afin d'évaluer la consommation et la profondeur de pénétration pour un projet précis, utiliser la procédure Sika® d'analyse qualitative – Nous consulter.

Qualité du support Le support en béton doit être propre, sain, débarrassé de toute partie non ou peu adhérente, exempt de trace d'huile, de laitance, de graisse, de produit de cure, de salissure, de poussière, d'ancien revêtement, de ragréage, de laitance,... qui peuvent réduire et limiter la pénétration et la migration du Sika® FerroGard®-903+.

Dans le cas où le support doit être recouvert d'un revêtement (peinture de protection ou enduit de finition), la rugosité du support doit être suffisante pour favoriser l'adhérence.

Préparation du support Les points faibles et les dégradations (fissures, éclats, ...) doivent être réparés au préalable : élimination des parties non adhérentes, traitement des armatures, reprofilage à l'aide de mortiers de la gamme SikaTop®, Sika® MonoTop®, SikaRep®.

Pour les bétons devant être protégés par revêtements Sikagard® ou imprégnations hydrofuges Sikagard®, préparer la surface par jet d'eau sous pression (jusqu'à 18 MPa – 180 bars).

Pour les bétons devant être recouverts par des mortiers à base de ciment, préparer le support par sablage, sablage humide, jet d'eau sous pression (jusqu'à 60 MPa 600 bars).

Ne pas utiliser d'eau chaude.

Pour favoriser la pénétration et la migration du Sika® FerroGard®-903+ (absorption par le support), laisser sécher la surface du béton avant l'application.

Conditions d'applications

Température du support +5°C min. / +40°C max.

Température ambiante +5°C min. / +40°C max.

Mise en œuvre

Préparation du mélange

Le Sika® FerroGard®-903+ est livré prêt à l'emploi et ne doit pas être dilué. Ne pas secouer avant emploi.

Application / Outils

Appliquer le produit à saturation sur toute la surface à l'aide d'une brosse, d'un rouleau, par pulvérisation basse pression / projection (y compris avec un équipement airless).

Après l'application de la dernière couche, dès que la surface devient mate, faire un nettoyage à l'eau à basse pression (tuyau d'arrosage)

Le jour suivant l'application, les surfaces traitées doivent être nettoyées à l'eau sous pression (~ 10 MPa – 100 bars).

Nettoyage des outils

Les outils se nettoient avec de l'eau immédiatement après l'emploi.

Temps d'attente / recouvrement

Nombre de couches :

Il dépend de la porosité, de l'humidité du support, et des conditions ambiantes.

Surfaces verticales :

Normalement, 2 à 3 couches sont nécessaires pour atteindre la consommation requise. Dans le cas de béton compacte peu poreux, il peut être nécessaire d'appliquer plusieurs couches complémentaires. **Surfaces horizontales :**

Appliquer à saturation en 1 à 2 couches sans laisser de film en surface.

Temps d'attente entre couches :

Il dépend de la porosité du support, et des conditions ambiantes ; normalement il varie de 1 à 6 heures. Avant d'appliquer la (les) couche(s) suivante(s), attendre que la précédente soit d'apparence mate. **Recouvrement :**

Si l'application est réalisée comme décrit précédemment, aucun traitement complémentaire n'est nécessaire avant le recouvrement par les imprégnations hydrofuges ou par les revêtements de protection Sikagard. (se référer à la notice technique correspondante pour l'application des produits).

Quand le Sika® FerroGard®-903+ doit être utilisé sur une réparation ou avant un revêtement de protection à base de ciment, les procédés Sika® de réparation et de protection seront appliqués après préparation classique (humidification des supports).

Quand un produit de surfacage ou de protection complémentaire doit être appliqué sur un support préalablement traité au Sika® FerroGard®-903+, utiliser le SikaTop® 121, Sikagard®-720 EpoCem, SikaTop®-107. Ces mortiers à base de ciment nécessitent une préparation adaptée du support afin d'ouvrir la porosité de surface.

Si d'autres produits des gammes Sika® doivent être utilisés, des essais de convenance sont recommandés sur chantier pour confirmer la compatibilité.

Pour les produits autres que ceux de la gamme Sika, contacter le service technique du fabricant pour obtenir la confirmation de la compatibilité du produit avec le Sika® FerroGard®-903+, ou à défaut entreprendre des essais de convenance sur chantier afin d'évaluer la compatibilité et l'adhérence.

Notes sur l'application / Limites

Ne pas appliquer quand il y a risque de pluie ou de gel.

Les matériaux absorbants suivants, adjacents à la zone traitée en Sika[®] FerroGard[®] -903+, doivent être couverts et protégés des projections et éclaboussures pendant l'application : aluminium, zinc, cuivre, acier galvanisé, marbre, pierre naturelle,

Les défauts du béton doivent être réparés en utilisant les méthodes conventionnelles de réparation (repiquage et enlèvement du béton dégradé et/ou contaminé, traitement de l'armature interne, réparation et reprofilage de l'ouvrage,...)

En alternative à la méthode décrite précédemment, le Sika[®] FerroGard[®] -903+ peut être appliqué après les travaux de réparation (après durcissement du produit de réparation), mais pas après les couches de protection.

Les zones venant d'être réparées (produit de réparation en cours de prise et de durcissement) ne doivent pas être traitées immédiatement par l'imprégnation inhibitrice Sika[®] FerroGard[®] -903+. Si cette recommandation n'est pas respectée, une plus faible migration est attendue dans ces zones.

Il est nécessaire que la teneur en ions chlorure dans le béton au niveau des barres d'armatures soit inférieure à 1 % (ce qui correspond à 1,7 % de chlorure de sodium) par rapport au poids de ciment.

Au dessus de cette limite, selon les conditions climatiques de chantier et le niveau d'activité de corrosion, une augmentation de consommation de Sika[®] FerroGard[®] -903+ est à considérer. Des essais et le relevé des taux de corrosion sur chantier doivent être menés pour confirmer la consommation et l'efficacité du procédé.

Afin d'apporter une protection efficace, la concentration en Sika[®] FerroGard[®] -903+ au niveau de la barre d'armature du béton armé doit être au minimum de 100 ppm mesurée par chromatographie ionique (nous consulter - méthode détaillée applicable par des laboratoires spécialisés).

Ne pas appliquer dans les zones de marnage, ou sur les supports saturés en eau.

Eviter l'application en plein soleil et/ou plein vent.

Ne pas appliquer sur béton en contact direct avec de l'eau potable.

Suivant la structure du support, l'application de Sika[®] FerroGard[®] -903+ peut conduire exceptionnellement à un léger assombrissement de l'aspect de surface. Si besoin, prévoir des essais préliminaires.

Le traitement préliminaire du support doit se faire exclusivement au moyen d'un nettoyage à haute pression avec de l'eau froide.

Durcissement / Séchage

Le Sika[®] FerroGard[®] -903+ ne nécessite pas délai de durcissement spécifique, mais doit être protégé de la pluie pendant au moins 4 h à 20°C.

Notes

Les données techniques figurant dans cette notice technique sont basées sur des essais de laboratoires

Mentions légales

Produit réservé à un usage strictement professionnel.

N

os produits bénéficient d'une assurance de responsabilité civile.

«Les informations sur la présente notice, et en particulier les recommandations relatives à l'application et à l'utilisation finale des produits SIKA, sont fournies en toute bonne foi et se fondent sur la connaissance et l'expérience que la Société SIKA a acquises à ce jour de ses produits lorsqu'ils ont été convenablement stockés, manipulés et appliqués dans des conditions normales. En pratique, les différences entre matériaux, substrats et conditions spécifiques sur site sont telles que ces informations ou toute recommandation écrite ou conseil donné n'impliquent aucune garantie de qualité marchande autre que la garantie légale contre les vices cachés. Notre responsabilité ne saurait d'aucune manière être engagée dans l'hypothèse d'une application non conforme à nos renseignements. Les droits de propriété détenus par des tiers doivent impérativement être respectés. Toutes les commandes sont acceptées sous réserve de nos Conditions de Vente et de Livraison en vigueur. Les utilisateurs doivent impérativement consulter la version la plus récente de la fiche technique correspondant au produit concerné, qui leur sera remise sur demande.»

Sika El Djazair
08 route de l'Arbaa, 16111 Eucalyptus
Alger/ ALGERIE
Web : dza.sika.com
Tel.: 213 (0) 21 50 21 84
213 (0) 21 50 16 92 à 95
Fax: 213 (0) 21 50 22 08



Annexe B

Notice produit

Edition février 2015 Numéro

6.70

Version n° 102.2015

Sika Monotop® SF 126

Sika Monotop SF 126®

Mortier hydraulique mono-composant fibré à base de fumée de silice pour la réparation des bétons soumis à des atmosphères agressives avec inhibiteurs de corrosion.

Mortier de Classe R4 Selon la Norme EN NF 1504-3

Présentation

Le SIKA MONOTOP SF 126 est un mortier mono-composant fibré à base de ciment, charges spéciales, fumée de silice et adjuvants. Après gâchage à l'eau, on obtient un mortier de couleur gris clair.

Domaines d'application

- Réparation des bétons armés exposés à des milieux agressifs (sites industriels, bord de mer, montagne).
- Réparation d'épaufrures d'ouvrages d'art (ponts, barrages, etc).
- Réparation d'épaufrures d'ouvrages de génie civil (silos, réservoirs, écluses, etc).
- Réparation d'épaufrures de bâtiments.
- Réparation de nids de poule (sols industriels, ateliers, garages).
- Pour la remise en état du béton, comme mortier de réparation, sur supports en béton, en pierre et en mortier. Spécialement indiqué pour l'application en surplomb et sur les surfaces verticales pour la réparation d'éléments sous charges statiques et dynamiques.

Caractères généraux

- Mise en œuvre simple et aisée.
- Bonne adhérence sur béton, mortier, brique, pierre.
- Applicable sur des épaisseurs de 3 à 100 mm par passe.
- Excellente imperméabilité.
- Excellent comportement au retrait.
- Excellente tenue au gel et aux sels de déverglaçage.
- Excellente résistance aux sulfates et aux eaux de mer.
- Très bonne protection du béton armé contre les environnements agressifs.
- Contient des inhibiteurs de corrosion.

Agréments, essais de laboratoire

PV CNERIB : DTEM : 187/2015.

Caractéristiques

Coloris

- Gris.

Conditionnement

- Sac de 25 kg.

Construction



Stockage / Conservation

En emballage d'origine non entamé, stocké à des températures entre +5 °C et +25 °C: 12 mois à partir de la date de production. Protéger de l'humidité.

Données techniques

Densité

Densité du mortier frais : environ 2,1.

Granulométrie

0 à 1,6 mm.

Épaisseur d'application

3 à 100 mm.

Résistances mécaniques

Selon la norme **EN NF 12190**

	2 jours	28 jours
Compression	> 18 MPa	> 50 MPa
Flexion	> 4.5 MPa	> 8,5 MPa

Adhérence

Adhérence sur béton \geq 2 MPa à 28 jours selon la **EN 1542**.

Conditions d'application

Consommation

compression suffisante (min. 25 N/mm²) ainsi qu'une résistance à la traction Elle dépend de la rugosité du support ainsi que de l'épaisseur de la couche appliquée. Il faut compter environ 2,1 kg par m² et mm d'épaisseur.

Nature du support

Le support en béton doit être porteur et présenter une résistance à la traction de 1.5 N/mm². Le support doit être propre, exempt d'huiles et de graisses, sans particules friables ou adhérant mal. Enlever complètement la laitance de ciment, les anciennes couches de peinture et autres agents de traitement de surface.

Bien humidifier le support au préalable jusqu'à saturation capillaire et maintenir le support humide jusqu'au moment de l'application. Enlever l'eau stagnante.

Les surfaces métalliques doivent être propres, exemptes d'huiles et de graisses, ainsi que sans rouille et calamine.

En cas de doute, effectuer une surface-échantillon.

Mise en œuvre

Conditions d'utilisation

La température d'application (produit, support et ambiance) doit se situer entre +5°C et + 30°C.

Instructions pour la mise en œuvre

Rapport de mélange

env. 2,65 L d'eau par sac de 25 kg.

Durée du mélange	Verser la quantité d'eau conforme au rapport de mélange dans un récipient approprié. Ajouter lentement toute la poudre sans cesser de remuer. Mélanger ensuite durant au minimum 3 minutes à l'aide d'un mélangeur électrique tournant à faible vitesse (max. 500 t/min.) pour entraîner le moins d'air possible.
Outillage pour le mélange	On recommande des malaxeurs à un ou deux agitateurs en forme de panier, Des malaxeurs à action forcée ou des mélangeurs statiques.
Application	Le SIKA MONOTOP SF 126 s'applique, soit à la truelle en veillant à bien serrer le mortier, soit par projection. Revenir éventuellement surfacier à la taloche ou au polystyrène expansé dès que le mortier commence à tirer. Le SIKA MONOTOP SF 126 peut supporter la pluie environ 4 heures après application à + 20°C. Epaisseur minimale par couche : 3 mm. Grâce aux fumées de silice, il est possible d'appliquer en vertical le SIKA MONOTOP SF 126 sans coffrage jusqu'à une épaisseur d'environ 10 cm en une seule passe.
Nettoyage des outils	Nettoyer les outils immédiatement après utilisation avec de l'eau. Le matériau durci ne peut être enlevé que mécaniquement.
Temps d'utilisation	Env. 40 minutes à +23 °C.
Protection contre la dessiccation	Comme tout mortier hydraulique, le SIKA MONOTOP SF 126 doit être protégé du sel.
Précautions d'emploi	Manipulation analogue à celle d'un mortier de ciment. Eviter le contact avec la peau et les yeux. Ne pas respirer les poussières. Consulter la fiche de données de sécurité pour les précautions d'emploi et

