

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
**Centre Universitaire Belhadj Bouchaib - Ain Témouchent**  
المركز الجامعي لعين تموشنت



THESE DE DOCTORAT EN GENIE CIVIL

Option : " Structure "

Présentée par M<sup>elle</sup> Chérifi Wafa Nor El Houda

POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR

Sujet de Thèse :

*Durabilité des éléments en béton armé dans un milieu marin*

Mr. Aissa Mamoune Sidi Mohammed	Professeur	C.U.B.B. Ain Temouchent	Président
Mr. Khelidj Abdelhafid	Professeur	Univ. Nantes	Examineur
Mr. Mouli Mohamed	Professeur	Univ. Oran	Examineur
Mr. Houmadi Youcef	M.C.A	C.U.B.B. Ain Temouchent	Directeur de thèse
Mr. Benali Omar	Professeur	Univ. Saïda	Co-Directeur de thèse

Année Universitaire : 2019/2020

## 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.

**Mot clés :** durabilité, corrosion, probabilité, Monté Carlo, analyse neuronal, essai non destructif.

## 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.

**Keywords:** durability, corrosion, probability, Monte Carlo, neural analysis, non-destructive testing.

## 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 نسبياً وأقل تكلفة، استناداً إلى قياس إمكانية التآكل.

تم تطوير العديد من مضاد 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 حقولاً 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.

**الكلمات المفتاحية:** المتانة ، التآكل ، الاحتمال ، مونت كارلو ، التحليل العصبي ، الاختبار غير المتلف.