



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب

Université d'Ain-Temouchent - Belhadj Bouchaib

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Civil & Travaux Publics

Mémoire pour l'Obtention du diplôme de Master

Filière : GENIE CIVIL

Spécialité : structure

Thème :

**MESURE DU POTENTIEL DE CORROSION AVEC DES METHODES
NON DESTRUCTIVES**

PRESENTE PAR :

BENAMARA RITADJ

LYAKA CATHERINE

SOUTENU LE 22/06/2023

DEVANT LE JURY COMPOSE DE :

PRESIDENTE : BELLABACI ZYNEB

EXAMINATEUR : ABDELBARI SALIMA

ENCADREUR : CHERIFI Wafa NOR EL HOUDA

ANNEE UNIVERSITAIRE 2022/2023

Dédicace

Au nom de Dieu, le Clément et le Miséricordieux, nous tenons à exprimer notre gratitude et à dédier ce travail à nos chers grands-parents. Leur amour inconditionnel, leur sagesse et leur soutien constant ont été des piliers essentiels dans notre parcours. Leurs encouragements et leurs bénédictions ont illuminé notre chemin et ont fait de nous les personnes que nous sommes aujourd'hui.

Nous adressons également nos remerciements et notre dédicace à nos parents bien-aimés. Leurs sacrifices, leur patience et leur soutien indéfectible ont été inestimables tout au long de nos études et spécialement pendant la réalisation de ce projet. Leur amour incommensurable nous a donné la force de persévérer et d'atteindre nos objectifs.

Nous souhaitons également reconnaître nos enseignants, qui ont guidé nos pas et nous ont transmis leur savoir. Leurs enseignements, leur passion et leur dévouement ont été des sources d'inspiration et ont contribué à notre développement intellectuel et personnel.

Enfin, nous adressons nos sincères remerciements à nos familles et à nos amis. Leurs conseils, leurs encouragements et leur présence bienveillante ont été d'une importance cruciale dans notre cheminement. Leur confiance en nous et leur soutien indéfectible ont été des moteurs essentiels pour atteindre nos objectifs.

Que Dieu récompense tous ceux qui ont joué un rôle dans notre parcours et les comble de Ses bénédictions.

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à exprimer notre profonde gratitude envers Dieu pour Ses bénédictions constantes et Son accompagnement tout au long de notre cheminement. De plus, nous sommes extrêmement reconnaissants envers nos encadreurs, Mme CHERIFI WAFANOR EL HOUDA, l'équipe du laboratoire M. KEDO ADELL, Mlle KAWTER et Mme NADJATE, ainsi que notre professeur M. KADOUR HAKIM, pour leur soutien inestimable, leurs conseils précieux et leur engagement indéfectible dans notre croissance et notre réussite

Résumé

De nombreuses infrastructures vitales sont construites en utilisant du béton armé, mais elles rencontrent des problèmes de durabilité en raison de la corrosion des barres d'acier à l'intérieur de ces structures. La corrosion est le principal mécanisme de détérioration de ces structures, réduisant considérablement leur durée de vie, leur fiabilité, leur fonctionnalité et leur sécurité. La corrosion a entraîné un déficit d'infrastructure de plusieurs milliards de dollars.

Par conséquent, nous avons affecté plusieurs bancs d'essai à l'université de Ain t'émouchant avec d'appareil CANIN+ pour mesurer le potentiel de corrosion. Ces mesures sont réalisées sur des échantillons de béton ordinaire Les résultats obtenus à partir de ces mesures révèlent une diminution de potentiel de corrosion pour en enrobage moins important 3.5 par rapport à 5 cm ainsi une augmentation du potentiel dans le milieu (3% de Nacl dans le béton et 5% de Nacl dans le milieu environnements) et (3% de Nacl dans le béton a exposé à l'aire) par rapport à l'environnement basique.

Les éprouvettes qui contenant du chlorure à l'intérieur et dans environnements (milieu 02 et 03) varier entre -400 et -600 par contre le milieu 01 il varie entre -250 et -400.

Mot clés : corrosion, chlorure, béton armé, Canin+. Durabilité.

Abstract

Many vital infrastructures are built using reinforced concrete, but they face durability issues due to the corrosion of steel bars inside these structures. Corrosion is the primary deterioration mechanism for these structures, significantly reducing their lifespan, reliability, functionality, and safety. Corrosion has resulted in a multi-billion-dollar infrastructure deficit.

Therefore, several test benches have been assigned at Ain Témouchent University with the CANIN+ device to measure the corrosion potential. These measurements are carried out on samples of ordinary concrete. The results obtained from these measurements reveal a decrease in corrosion potential for a coating thickness less than 3.5 cm compared to 5 cm, as well as an increase in potential in the environment (3% NaCl in concrete and 5% NaCl in the surrounding environments) and (3% NaCl in concrete exposed to air) compared to the basic environment.

The test specimens containing chloride inside and in environments (environment 02 and 03) range between -400 and -600, while in environment 01, it ranges between -250 and -400.

Keywords: corrosion, chloride, reinforced concrete, CANIN+, durability.

الملخص

تشيد العديد من البنية التحتية الحيوية باستخدام الخرسانة المسلحة، لكنها تواجه مشاكل في المتانة بسبب تآكل قضبان الصلب داخل هذه الهياكل. التآكل هو الآلية الرئيسية لتدهور هذه الهياكل، مما يقلل بشكل كبير من عمرها الافتراضي وموثوقيتها ووظائفها وسلامتها. أدى التآكل إلى عجز في البنية التحتية يبلغ عدة مليارات من الدولارات. لذلك، تم تخصيص العديد من محطات الاختبار في جامعة عين تموشنت باستخدام جهاز CANIN+ لقياس جهد التآكل. يتم إجراء هذه القياسات على عينات من الخرسانة العادية. تشير النتائج التي تم الحصول عليها من هذه القياسات إلى انخفاض في جهد التآكل عند سماكة الطلاء الأقل من 3.5 سم مقارنة بـ 5 سم، بالإضافة إلى زيادة في الجهد في البيئة (3% من كلوريد الصوديوم في الخرسانة و5% من كلوريد الصوديوم في البيئة المحيطة) و (3% من كلوريد الصوديوم في الخرسانة المعرضة للهواء) مقارنة بالبيئة الأساسية. تتراوح العينات التجريبية التي تحتوي على الكلوريد من الداخل وفي البيئات (البيئة 02 و03) بين 400- و 600-، بينما تتراوح في البيئة 01 بين 250- و 400-.

كلمات البحث : CANIN + التآكل، الخرسانة المسلحة، المتانة

Sommaire

Dédicace.....	I
Remerciement.....	II
Résumé.....	III
Abstract.....	IV
LISTE DES FIGURES.....	XII
LISTE DES TABLEAUX.....	XIV
LES ABREVIATIONS.....	XV
INTRODUCTION GENERALE.....	XV
CHAPITRE I :.....	3
1 Introduction :.....	4
2 Histoire du béton :.....	4
3 La structure du béton.....	5
3.1 Ciment :.....	6
3.2 Les granulats :.....	7
3.3 L'eau :.....	7
4 Le béton armé.....	7
4.1 Les armatures :.....	8
4.1.1 Le rôle de l'armature :.....	8
4.1.2 Différents types des aciers à béton et référents réglementaires :.....	8
4.1.3 Différents types des barres d'aciers :.....	9
5 Mécanismes de détérioration du béton.....	9
5.1 Fissuration.....	9
5.1.1 Fissures de retrait plastique :.....	10
5.1.2 Fissures de retrait par séchage :.....	10
5.1.3 Fissures thermiques :.....	11

5.1.4	Fissures de tassement :	11
5.1.5	Fissuration en réseau (craquelage) :	11
5.1.6	La fissuration due à la Réaction Alkali-Granulat (RAG) :	12
5.2	Pénétrabilité	12
5.2.1	L'absorption :	12
5.2.2	La perméabilité :	13
5.2.3	La sportivité :	13
5.3	Détérioration chimique	13
5.3.1	Réaction d'ettringite retardée (RED) dans le béton :	13
5.3.2	Attaque aux ions sulfate sur le béton :	13
5.3.3	Attaque acide :	13
5.3.4	Attaque des sols sulfate :	14
5.3.5	. Attaque au sulfate de thaumasite (TSA) :	14
5.3.6	L'attaque de l'eau de mer :	14
5.3.7	Attaque physique par le sel (APS)	15
5.4	Détérioration physique	16
5.4.1	Gel-dégel :	16
5.4.2	Feu :	16
5.5	Détérioration mécanique	16
5.5.1	Abrasion :	16
5.5.2	. Erosion :	16
5.5.3	. Les chocs :	17
5.6	La détérioration structurelle :	17
5.6.1	Surcharge	17
5.6.2	. L'affaissement	18
5.6.3	La fatigue :	18
5.7	Détérioration biologique	18

6	Influence de qualité du béton sur la corrosion des armatures :	18
6.1	Les ciments et les matériaux cimentaires :	18
6.1.1	Résistance et durabilité :	19
6.1.2	La maniabilité :	19
6.1.3	La résistance chimique :	20
6.1.4	Les propriétés thermiques :	21
6.1.5	La conductivité thermique :	21
7	Influence de l'épaisseur de l'enrobage en béton sur le taux de corrosion :	22
8	Conclusion.....	22
	CHAPITRE II :	23
	LA DETECTION DE LA CORROSION DE LA METHODE NON DESTRUCTIVES	23
1	Introduction :	24
2	La corrosion.....	24
2.1	Définition :	24
2.2	Les effets de la corrosion :	24
2.3	Les types de corrosion :	25
2.3.1	L'attaque uniforme :	25
2.3.2	La corrosion galvanique :	25
2.3.3	La corrosion par piqûres :	25
2.3.4	La corrosion en crevasse :	25
2.3.4	La corrosion intergranulaire :	26
2.4	Causes de corrosion et de détérioration du béton.....	26
2.4.1.	Carbonatation :	26
2.4.2	Attaque de chlorure :	26
2.5	Mécanismes de la corrosion de l'acier dans le béton par les ions chlorures :	27
2.5.1	Processus de corrosion :	27
2.5.2	Taux de corrosion :	29

2.5.3 Passivation / dépassivation :	29
2.6 Produits de corrosion :	30
3 La mesure potentiel de la corrosion :	31
4 Méthodes de contrôle non destructif pour la mesure potentiel de la corrosion :	32
4.1 Inspection visuelle :	33
4.2 Méthodes électrochimiques :	33
4.2.1 Le potentiel à circuit ouvert :	33
4.2.2 La technique du potentiel de demi-cellule :	34
4.2.3 résistances à la polarisation :	34
4.2.4 La méthode d'impulsion galvanostatique :	36
4.2.5 Résistivité du béton :	38
4.3 Les méthodes d'ondes élastiques :	39
4.3.1 La vitesse d'impulsion ultrasonore (VIU) :	39
4.3.2 Echo d'Impulsion Ultrasonore (EIU) :	40
4.3.3 Impact Echo :	40
4.4 Les méthodes électromagnétiques :	41
4.4.1 Radar à Pénétration de Sol (RPS) :	41
4.5 Canin+ :	42
4.5.1 Le principe et le mode opératoire de canin+ :	42
5 Les Méthodes de protection contre la corrosion de l'acier dans le béton :	44
5.1 Protection cathodique :	44
5.1.1 Les effets indésirables de la protection cathodique :	44
5.2 REVÊTEMENT ÉPOXY DES ARMATURES EN ACIER :	45
5.2.1 Effet négatif de la peinture :	45
5.3 Les inhibiteurs :	45
5.3.1 Darex Corrosion inhibiteurs :	45
5.3.2 Ferrogard 901 :	46

5.3.3 Catexol 1000 CI :	46
5.3.4 Rheocrete 222 et Rheocrete 222 + :	46
6 Conclusion :	47
CHAPITRE III :	48
1 Introduction :	49
2 Les composants de béton utilisé :	49
2.1 Types du granulat :	49
2.2 Les essais concernent les granulats :	49
2.2.1 Analyse granulométrique :	49
2.2.2 Gravier 8/16 :	50
2.2.3 Gravier 3/8 :	50
2.2.4 Sable fin (sable 2) :	51
2.2.5 Sable grossier (sable 1) :	51
2.2.6 Le module de finesse :MF=2.5	52
2.3 La masse volumique :	52
2.3.1 La masse volumique absolu :	52
2.3.2 La masse volumique apparente :	53
2.3.3 Essais d'équivalent de Sable :	54
2.4 Le type et utilisation de ciment :	55
2.4.1 Composition de ciment :	55
2.4.2 La masse volumique du ciment :	56
2.5 Eau :	57
2.6 Acier :	57
3 La formulation du béton ordinaire :	58
3.1 Résistance moyenne à 28 jours :	58
3.2 Rapport C/E :	58
3.2.1 Détermination de G :	58

3.3	Dosage en ciment :	59
3.4	Calcul de E :	59
3.5	Correction sur E :	60
4	optimisation du squelette granulaire :	60
4.1	validation du sable :	60
4.2	calcul de YA :	60
4.3	Calculus XA:	61
4.4	Pourcentage de sable et de gravier :	61
4.5	Coefficient de compacité g :	62
4.6	Volume absolu des constituants :	63
4.6.1	Volume absolu du ciment :	63
4.6.2	Volume absolu des granulats V : sable +gravier	63
4.6.3	Volume absolu du sable : $V_1=V\%$	63
4.6.4	Volume absolu du gravier : $V_2=V\%$	63
4.7	Dosage des différents constituants pour 1 m ³ de béton :	63
4.8	Essai d'affaissement au cône d'Abrams :	64
5	Préparation des échantillons :	65
5.1	Les milieux utiliser :	66
5.2	Présentation des résultats :	67
6	Interprétations des résultats :	69
	CONCLUSION GENERALE	72
	REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE	
	ANNEXES A	
	ANNEXES B	

LISTE DES FIGURES

Chapitre I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Figure 1. 1 les Composants D'un Béton Durci [15].	6
figure 1. 2 les différents types des aciers [17].	9
Figure 1. 3 types de fissures modifier [19].	10
Figure 1. 4 FISSURS TYPIQUES DANS LE BETON ARME [20].	12
Figure 1. 5 Le Port En Béton Et Les Produits De Corrosion De l'acier. (A) Le Port En Béton A Yokosuka. (B) La Barre d'acier Corrodée Dans La Poutre En Béton. (C) Le Produit De Corrosion Pelé De La Barre d'acier Corrodée. (D) Des Echantillons De Rouille Ecailleux [21].	14
Figure 1. 6 corrosion dans l'acier du béton [22].	15
Figure 1. 7 DURABILITE DES PIEUX PREFABRIQUES EN BETON PRECONTRAINTE EN MILLIEU MARIN [23].	15
figure 1. 8 la relation entre la résistance aux chocs et la résistance à la compression pour le béton fabriqué avec différents granulats [24].	17

Chapitre II : LA DETECTION DE LA CORROSION PAR LES METHODES NON DESTRUCTIVES

figure 2. 1 les types de corrosion (modifier) [2].	26
figure 2. 2 les réactions anodiques et cathodiques [3].	28
figure 2. 3 diagramme de pourbaix pour Fe-H ₂ O à 25°C [6].	30
figure 2. 4 volume de produits de corrosion par rapport au fer [5].	31
figure 2. 5 appareil de mesure de potentiel (canin+) (prise par les auteurs)	32
figure 2. 6 appareil pour la méthode de potentiel de demi-cellule décrite dans l'ASTM C876 pour mesurer le potentiel de surface associé au courant de corrosion [5].	34
figure 2. 7 illustration schématique de la courbe de polarisation linéaire [5].	35
figure 2. 8 appareil pour la méthode de résistance à la polarisation [7].	36
figure 2. 9 illustration schématique de l'équation [5].	37
figure 2. 10 Plan schématique du GalvaPulse™ avec protection pour limiter la zone polarisée lors de la mesure de la corrosion (modifier) [5].	38
figure 2. 11 Mesure de la résistivité du béton [11].	39

figure 2. 12	Transmission en surface [1.3].....	39
Figure 2. 13	Mesure EIU- plusieurs émetteurs/récepteurs montés dans une seule tête [8.3]... 40	40
figure 2. 14	mesure par IE [8.3].	41
figure 2. 15	mesure RPS [8.3].	41
figure 2. 16	appareil de mesure potentiel canin+ prise par les auteurs	42
figure 2. 17	protection cathodique[5]. modifier	44
Chapitre III : CARACTERISATION DES MATERIAUX ET TRAITEMENT DES RESULTAS		
figure3. 1	les types du granulais prise par les auteurs	49
figure3. 2	les séries des tamis	50
figure3. 3	l'analyse granulométrique de gravier	51
figure3. 4	Analyse granulométrique du défirent sable	52
figure3. 5	les masses volumiques absolu du granulais prise par les auteurs	53
figure3. 6	la masse volumique apparente prise par les auteurs	53
figure3. 7	type de ciment prise par les auteurs	56
figure3. 8	la masse volumique absolu de ciment (prise par auteurs)	57
figure3. 9	nettoyage des aciers (prise par les auteurs).....	58
figure3. 10	graphe pour trouver le dosage du ciment.....	59
figure3. 11	trace courbe granulaire oab.....	62
figure3. 12	essai d'affaissement de CONE D'ABRAMES	64
figure3. 13	les matériaux utilisés prise par les auteurs.....	65
figure3. 14	le moulage des éprouvettes prise par les auteurs	66
figure3. 15	schéma d'une éprouvette cylindrique en béton armé.....	66
figure3. 16	diffèrent type des milieux utiliser pour les éprouvettes prise par les auteurs	67
figure3. 17	les mesures potentiel de différents milieu de enrobage de 3.5cm	68
figure3. 18	les mesures potentiel de différents milieu et de enrobage de 5cm	68
figure3. 19	: présent photo de l'armature après la destruction	70
figure3. 20	les mesures potentiel de différents milieu est différents enrobage	70

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Tableau 1. 1 types de ciments	6
Tableau 1. 2 la classe de résistance	6

Chapitre III : CARACTERISATION DES MATERIAUX ET TRAITEMENT DES RESULTAS

tableau3. 1 la masse volumique absolu	52
tableau3. 2 la masse volumique apparente	54
tableau3. 3 la masse volumique absolu du ciment	56
tableau3. 4 les caractéristiques chimiques de l'eau de gâchage (ade Ain t'émouchent).....	57
tableau3. 5 détermination de g	58
tableau3. 7 tableaux pour déterminer la valeur de terme correcteur k	61
tableau3. 8 évaluation de l'ouvrabilité par rapport à l'affaissement au cône	62
tableau3. 9 tableaux pour déterminer la coefficient de compacité	63
tableau3. 10 dosage des différents constituants pour 1m ³ de béton	64
tableau3. 11 les résultats de essai d'affaissement	64

LES ABREVIATIONS

RAG : la réaction alcali-granulat
RAS : La réaction alcali-silice
RAC : la réaction alcali-carbonate
RED : Réaction d'ettringite retardée
TSA : Attaque au sulfate de thaumasite
APS : Attaque physique par le sel
Fe₃O₄: magnetite
a-FeOOH: goethite
g-FeOOH: lepidocrocite
g-Fe₂O₃: maghemite
b-FeOOH- : akaganéite
BEC : le bruit électrochimique
VIU : la vitesse d'impulsion ultrasonore
EA : l'émission acoustique
EI : l'écho d'impact
DRS : la détection radar de sol
R_p : résistance de polarisation
C_{dl} : capacitance de double couche
R_U : résistance ohmique de la couverture en béton
RBF : le réseau de Bragg en fibre optique
TIR : la thermographie infrarouge
OCP : Le potentiel à circuit ouvert
CSE : l'électrode cuivre/sulfate de cuivre
LPR : résistance à la polarisation linéaire
ΔE : changement de potentiel
ΔI : changement de courant.
I_{corr} : La densité de courant de corrosion
B est la constante de Sterne Geary
B_a : sont les constantes et anodique

b_c : sont les constantes de Tafel cathodique
 I_{corr} : par la surface de la zone polarisée
 I_{app} : la polarisation de l'armature
 V : La différence de potentiel entre les électrodes intérieures
 I : un courant alternatif ou continu passant
 R : la résistivité
 a : la distance entre les deux électrodes
 VIU : La vitesse d'impulsion ultrasonore
 EIU : Echo d'Impulsion Ultrasonore
 RPS : Radar à Pénétration de Sol
 DC : un courant électrique direct
 $FHWA$: la Federal Highways Association
 ACI : l'American Concrete Institute
 DCI et $DCI-S$: Les inhibiteurs de corrosion Darex
 ρ : La masse volumique apparente
 h_2 : La hauteur sable propre + le flocculat
 h_1 : La hauteur sable propre
 ESV : Équivalence de sable
 $C3S$: l'alite
 $C2S$: la belite
 $C3A$: la celite
 $C4AF$: la ferrite
 f_{cm} : Résistance caractéristique moyenne de béton à 28 jours
 f_{c28} : Résistance de béton à 28 jours
 C : masse de ciment
 E : masse d'eau
 G : Coefficient granulaire
 XA : les coordonnées horizontales de OAB
 YA : les coordonnées verticales de OAB
 S_1 : Sable fin
 S_2 : Sable grossier

NaCL : le sel

NaOH : L'hydroxyde de sodium

EC: Correction sur Eau

Ks : correction supplémentaire dépende à la qualité de sable

K : coefficient correcteur

Kp : correction supplémentaire dépende à la qualité de béton

V : Volume absolu des granulats

V sable : Volume absolu du sable optimisé

Vs1 : Volume de sable 1

Vs2 : Volume de sable 2

V gravier : Volume absolu du gravier

Vg3/8 : gravier 3/8

Vg8/16 : gravier 8/16

γ_s : coefficient correcteur de sable

γ_g : coefficient correcteur de gravier

INTRODUCTION

GENERALE

L'invention du béton armé au 19^e siècle a apporté une révolution à l'industrie de la construction. Avec une croissance démographique croissante et des ressources limitées telles que les terrains disponibles, les constructions simples n'étaient plus suffisamment durables. Par conséquent, la technologie de construction a dû innover en adoptant des techniques plus durables.

Le béton simple seul ne pouvait pas résister aux contraintes de traction et de cisaillement prolongées causées par des charges telles que le poids des structures, les forces du vent, les tremblements de terre, les vibrations et autres charges appliquées sur ces ouvrages. Pour remédier à cette limitation, l'acier a été intégré dans le béton frais. Ses propriétés de résistance à la traction et à la compression ont complété celles du béton simple, permettant aux éléments structuraux de supporter ces contraintes sur de longues portées. Ce nouveau matériau, connu sous le nom de béton armé, s'est développé du béton ordinaire utilisé dans la construction de bâtiments au béton précontraint, renforcé soit par précontrainte, soit par post-contrainte, pour supporter des charges plus élevées ou couvrir de plus grandes distances que le béton armé traditionnel.

Cependant, cette nouvelle invention a également entraîné un fléau connu sous le nom de "corrosion de l'acier d'armature", qui reste aujourd'hui la principale cause de défaillance prématurée des structures en béton armé. En 2002, le coût annuel direct de la corrosion dans le département des infrastructures aux États-Unis était estimé à plus de 22,6 milliards de dollars, sans tenir compte des coûts indirects [5].

En raison de l'impact indéniable sur le plan sociétal et économique de la corrosion, les ingénieurs spécialisés dans la corrosion, les ingénieurs des matériaux, les ingénieurs structurels se sont engagés à améliorer leurs connaissances des lois naturelles et des ressources physiques, ainsi que leurs compétences scientifiques et techniques. Ils travaillent ensemble pour concevoir et mettre en œuvre des matériaux, des structures, des dispositifs, des systèmes et des procédures afin de gérer efficacement la corrosion.

Comme on ne peut pas traiter une maladie dont on ne connaît pas la cause, nous concentrons la première partie de notre recherche sur l'étude de la science de la corrosion des armatures - ses différents types, ses causes et son mode de destruction de la structure.

Ensuite, nous détectons la présence et le stade du cancer sans nécessairement détruire la structure en utilisant un Canin Plus, qui utilise le principe de la mesure du potentiel électrique.

INTRODUCTION GENERALE

Avec la science du cancer à l'esprit, nous partageons les différentes méthodes de protection des armatures contre l'infection, l'atténuation du cancer là où il est déjà en cours et la réparation du système immunitaire, le béton.

CHAPITRE I :

ETUDE

BIBLIOGRAPHIQUE

1 Introduction :

La mesure de la civilisation d'un pays est souvent liée aux progrès technologiques réalisés dans les techniques de construction de ses bâtiments. Le béton est un matériau de construction essentiel et la qualité du béton utilisé pour la construction est un indicateur de la progression de la pensée d'ingénierie dans un pays. Bien que le béton soit largement utilisé dans le monde entier en raison de sa résistance et de sa durabilité, il est soumis à divers mécanismes de détérioration au fil du temps. Il est donc crucial de comprendre ces mécanismes et leur relation avec la composition du béton pour élaborer des mélanges de béton durables et résistants à long terme.

2 Histoire du béton :

L'Égypte antique a utilisé du béton dans ses bâtiments et temples, ils utilisaient des pierres

Concassées comme granulats et de l'argile comme liant. Les Grecs utilisaient du béton dans leurs bâtiments et l'appelaient Santorin Tofa [25], les Romains utilisaient un matériau appelé pouzzolane qui ressemblait à du béton. Après cela, la formule pour le béton a été perdue pendant de nombreux siècles. Au XVIIIe siècle, plusieurs scientifiques célèbres ont travaillé pour créer une formule pour le béton [1] :

- John Smeaton a utilisé du béton pour construire le phare d'Eddy stone.
- Joseph Parker a effectué des recherches sur la pierre et son utilisation dans le béton.
- Edgar a effectué des recherches sur l'utilisation de ciment fabriqué à partir de calcaire et d'argile.
- Louis Vicat a également essayé de développer du ciment à partir de calcaire et d'argile.
- Joseph Aspdin a achevé ses recherches en développant le ciment de Portland.

À la fin du XIXe siècle et au début du XXe siècle, les formes architecturales des bâtiments ont connu d'importants changements alors que les ingénieurs architecturaux et les Constructeurs ont modifié leurs points de vue. Auparavant, les idées de la Renaissance européenne d'utiliser des colonnes et des arcs ont été mises en œuvre pour se concentrer sur l'utilisation fonctionnelle des bâtiments. Le béton a été considéré comme le meilleur choix pour une utilisation fonctionnelle et pour réaliser les rêves architecturaux en adoptant une approche économique.

Actuellement, le béton armé est considéré comme le matériau le plus populaire et important dans l'industrie de la construction. Il est utilisé pour les bâtiments et pour différents types de projets d'ingénierie civil, tels que les tunnels, les ponts, les aéroports, et les projets de drainage et hydrauliques [1].

Les recherches se concentrent sur l'amélioration des performances du béton pour répondre à la variété des applications. Le béton armé est considéré comme peu coûteux par rapport à d'autres matériaux de construction, il est donc utilisé pour les immeubles de grande hauteur pour les mégaprojets et aussi pour des projets plus petits, tels que les bâtiments d'un étage, tous ces projets étant gérés par des entrepreneurs et des ingénieurs de capacités différentes.

Par conséquent, parfois, le béton armé ne se comporte pas correctement selon les spécifications, dans certains cas, il y a une différence entre la qualité requise par la norme ou le code et celle trouvée sur le site. Ces erreurs sont généralement causées par un manque de compétence du travailleur, du contremaître ou de l'ingénieur.

D'autres erreurs de construction sont causées par un manque de procédures de contrôle de la qualité, des matériaux reçus sur le site qui ne sont pas compatibles avec la norme, une sélection inappropriée de matériaux ou un mélange de béton qui ne convient pas aux conditions environnementales environnantes[1]

3 La structure du béton

Le béton est le matériau de construction le plus utilisé dans le monde. Il est considéré le deuxième matériau le plus utilisé par l'humanité après l'eau.[8]

Le béton est constitué d'un agrégat minéral maintenu ensemble par une pâte de ciment, de sorte que si nous considérons un mélange normal, il sera constitué de ciment, de sable (agrégat fin), d'agrégat grossier et d'eau (et souvent d'autres adjuvants) qui sont mélangés ensemble pour former éventuellement un matériau dur et solide. L'agent liant principal dans le béton est le ciment. L'eau réagit avec le ciment pour former une pâte de ciment qui durcit ensuite et lie l'agrégat ensemble pour former le béton solide et la composition durcie du béton peut être représentée par les proportions indiquées dans la figure 1.1[8].

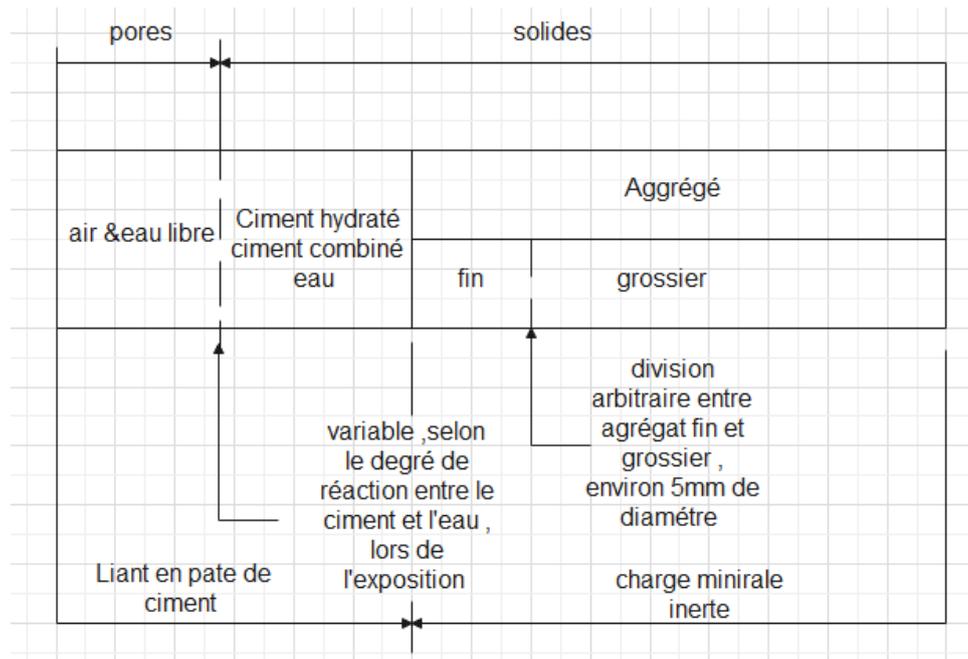


FIGURE 1. 1 LES COMPOSANTS D'UN BETON DURCI [15].

3.1 Ciment :

Le ciment est un matériau de construction couramment utilisé dans le monde entier. Il est fabriqué en mélangeant des matières premières telles que le calcaire, l'argile, le sable et le minerai de fer à des températures élevées pour produire un matériau solide et résistant. Il est disponible sous forme de différents types et différentes classes de résistance.

TABEAU 1. 1 TYPES DE CIMENTS

Classes	Définition
CEM I	Ciment portland
CEM II	Ciment portland composé (au laitier, fumée de silice, pozzolane, cendres volantes, schistes calcinés, calcaire)
CEM III	Ciment de haut fourneau
CEM IV	Ciment pouzzolanique
CEM V	Ciment composé (laitier, cendres)

TABEAU 1. 2 LA CLASSE DE RESISTANCE

Résistance Minimale	Normale (N)		Rapide (R)	
	A 2 jours	A 28 jours	A 2 jours	A 28 jours
Classe 32.5		32.5	≥ 10	32.5
Classe 42.5	≥ 10	42.5	≥ 20	42.5

3.2 Les granulats :

Le granulat est un matériau solide de nature minérale ou artificielle, qui est utilisé dans la construction pour la fabrication de béton, de mortier, d'asphalte et d'autres matériaux de construction.

Les granulats sont des fragments de roche, de pierre ou d'autres matériaux inorganiques de différentes tailles, formes et textures. Ils sont souvent classés en fonction de leur granulométrie, c'est-à-dire de leur taille, et peuvent être divisés en catégories telles que les graviers, les sables, les galets et les granulats concassés.

Les granulats jouent un rôle important dans la qualité et les propriétés des matériaux de construction, et leur choix dépend souvent de leur aptitude à répondre aux exigences techniques et environnementales.

3.3 L'eau :

L'eau est un composant essentiel du béton, car elle est nécessaire pour activer la réaction chimique qui transforme le mélange de ciment, d'agrégats (tels que les granulats) et d'eau en une masse solide et durable. L'eau est utilisée pour hydrater le ciment, ce qui permet aux particules de ciment de former des liaisons solides avec les granulats. Cependant, l'eau doit être ajoutée avec soin et en quantités précises, car un excès ou un déficit d'eau peut avoir des effets négatifs sur la qualité et la résistance du béton.

4 Le béton armé

Le béton armé est un matériau composite composé de béton et de renforts en acier. Les renforts en acier sont utilisés pour augmenter la résistance à la traction du béton et prévenir la fissuration due à des forces externes, telles que la flexion, la compression ou la tension. Les renforts en acier sont généralement constitués de barres d'armatures, également appelées barres d'armatures, qui sont incorporées dans la matrice de béton et maintenues en place par des colliers ou des entretoises.

Le béton armé est un matériau de construction populaire pour divers types de projets de construction, tels que les bâtiments de grande hauteur, les ponts et les structures d'ingénierie civile, en raison de sa grande résistance, de sa durabilité et de sa résistance au feu. Il est également économique par rapport à d'autres matériaux de construction, ce qui en fait un choix rentable pour les projets de grande et de petite échelle.

4.1 Les armatures :

Les armatures sont des éléments métalliques, généralement en acier, qui sont utilisés pour renforcer le béton dans les structures de construction. Elles sont souvent incluses dans le béton frais avant qu'il ne durcisse et sont conçues pour augmenter la résistance à la traction, à la compression et à la flexion du béton.

4.1.1 Le rôle de l'armature :

Les armatures sont particulièrement utiles pour les structures en béton soumises à des charges importantes ou pour les zones de la structure où des fissures peuvent se produire en raison de la contraction ou de l'expansion thermique. Les armatures peuvent également être utilisées pour renforcer des structures en béton existantes qui ont été endommagées ou affaiblies par des charges excessives ou des conditions environnementales défavorables.

Il existe différents types d'armatures, tels que les barres d'armatures en acier, les tiges d'armatures en acier treillissé et les fibres d'armatures en verre. Le choix du type d'armatures dépendra des spécifications de la structure et des charges à laquelle elle sera soumise.

4.1.2 Différents types des aciers à béton et référents réglementaires :

a. Filières de production des aciers pour béton armé :

Les aciers pour béton armé peuvent être élaborés sous la forme de barres (longueurs droites) ou de couronnes selon deux filières dites à chaud et à froid. L'acier de base utilisé pour les deux filières est en général produit par des aciéries électriques sous forme de billettes (demi produit de section carrée, ayant de 100 mm à 150 mm de côté) par coulée continue.

Dans la filière à chaud, les bielles produites sont laminées à chaud avec ou sans traitement thermique en ligne sous la forme de barres droites ou de fils machine lisses ou hautes adhérences. Après laminage à chaud, les fils machines peuvent être repris et étirés à froid à un Niveau d'allongement de l'ordre de 1 %. Quant aux filières dites à froid, elles utilisent comme demi-produit de base des couronnes de fil machine lisse obtenu par laminage à chaud. Ces couronnes de fil machine sont ensuite transformées à froid par tréfilage et /ou laminage à froid incluant la réalisation des reliefs (verrous ou empreintes)[16].

Les produits obtenus selon cette filière sont dénommés fils et sont conditionnés en couronnes à spires rangés ou non rangés. Les produits obtenus selon les deux filières peuvent être utilisés pour la fabrication de treillis soudés qui sont des réseaux plans d'aciers pour

béton armé disposés perpendiculairement les uns aux autres pour former des mailles rectangulaires ou carrées[3].

4.1.3 Différents types des barres d'aciers :

Les différents types des ronds à béton sont les aciers lisses (sans reliefs) la figure 1.2 (a) et haute adhérence

(Avec relief : verrous, nervures, empreintes) la figure (b) ainsi que les treillis soudés la figure (c).



a) acier haute adhérence b) treillis soudés c) aciers lisses

FIGURE 1. 2 LES DIFFERENTS TYPES DES ACIERS [17].

5 Mécanismes de détérioration du béton

Ce film protecteur peut être attaqué par des agents agressifs provenant de l'environnement environnant. Les plus importants de ces agents agressifs sont les ions chlorure qui produisent efficacement des trous dans le film, et le gaz dioxyde de carbone qui se dissout dans l'eau des pores du béton pour produire une solution acide qui neutralise les alcalis et rend ainsi le film passif instable.[8]

Il existe trois voies principales par lesquelles les agents agressifs peuvent atteindre la surface métallique : ils peuvent pénétrer par des fissures dans le béton ou en traversant les pores de la phase ciment ou ils peuvent se diffuser à travers le béton sous une pression. De plus, la détérioration du béton peut être divisée en deux grandes catégories :

- (i) Dégradation du béton ;
- (ii) Corrosion de l'armature en acier.

5.1 Fissuration

Le béton se contracte et développe des contraintes de traction lorsqu'il perd de l'eau pendant le durcissement. Cela peut entraîner des fissures, qui sont une caractéristique intrinsèque du béton, même si une grande partie d'entre elles peuvent être invisibles à l'œil nu.

Différents mécanismes de fissuration se produisent à différentes étapes du processus de durcissement, et une variété de causes peuvent contribuer à la fissuration (Voire la figure 1.4).

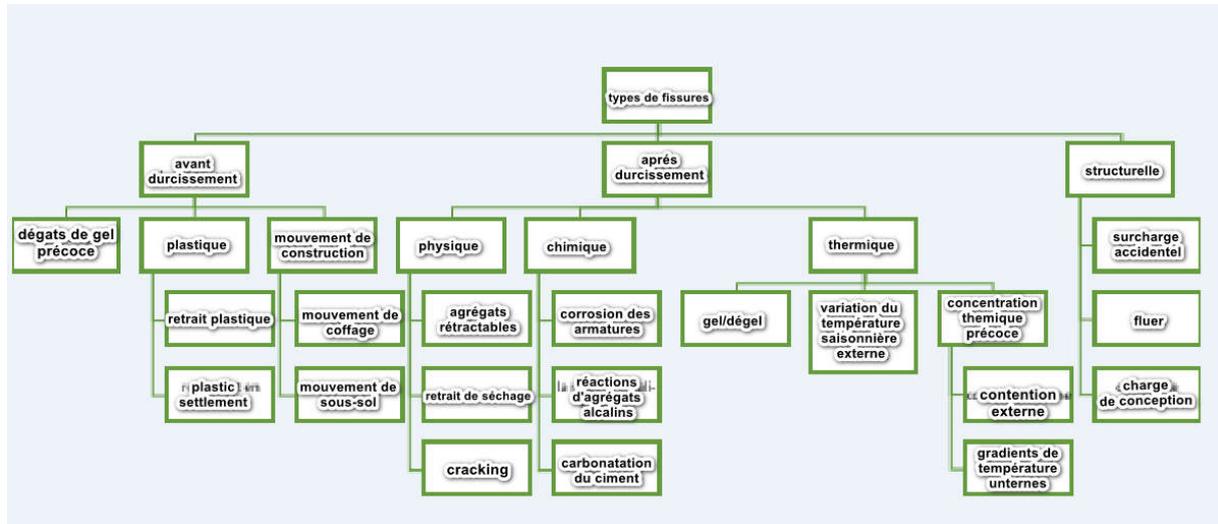


FIGURE 1. 3 TYPES DE FISSURES MODIFIER [19].

5.1.1 Fissures de retrait plastique :

Les fissures de retrait plastique, également appelées fissures de retrait superficiel, se produisent lorsqu'un béton frais est exposé à des conditions environnementales défavorables telles que la chaleur, le vent et une faible humidité relative. L'eau présente dans le béton s'évapore plus rapidement que la quantité d'eau qui est remplacée par le processus d'hydratation, ce qui entraîne une diminution de la quantité d'eau dans le béton. Cette perte d'eau provoque le retrait du béton et peut entraîner des fissures superficielles en forme de losange, qui sont généralement peu profondes et se produisent à proximité de la surface du béton. Les fissures de retrait plastique sont courantes dans les dalles, les murs et les autres éléments en béton. (Voire la figure 1.5(D, E, F))

5.1.2 Fissures de retrait par séchage :

Les fissures de retrait par séchage se produisent lorsque le béton durci subit une perte d'humidité et se rétracte. Cette rétraction peut être due à une baisse de l'humidité relative de l'air ou à une exposition à des températures élevées. La rétraction peut être uniforme dans tout le béton ou peut être plus prononcée dans des zones spécifiques en raison de la variation de la teneur en humidité. Cette rétraction entraîne des tensions internes qui peuvent provoquer des fissures dans le béton. Les fissures de retrait par séchage sont souvent profondes et se

produisent généralement dans les sections minces du béton, telles que les dalles de plancher et les murs minces.

5.1.3 Fissures thermiques :

Les fissures de contraction thermique désignent les fissures qui se produisent dans un matériau en raison de sa contraction lors du refroidissement après avoir été exposé à des températures élevées. Ce type de fissuration est causé par la différence de coefficients de dilatation thermique de différentes parties d'un matériau, ce qui entraîne des contraintes internes et finalement des fissures. Les fissures de contraction thermique peuvent se produire dans une variété de matériaux, y compris le béton, les métaux et les céramiques. C'est un problème courant dans de nombreuses applications industrielles et de construction, et cela peut réduire considérablement la résistance et la durabilité du matériau concerné. (Voire la figure 1.5 (H, G))

5.1.4 Fissures de tassement :

Les fissures de tassement plastique se produisent lorsqu'un béton frais est soumis à un tassement inégal, ce qui provoque une ségrégation des matériaux plus lourds et plus denses vers le fond du béton. Cela peut se produire lorsqu'un béton est coulé dans des colonnes, des piliers ou des murs de grande hauteur. La ségrégation entraîne une accumulation de matériaux plus denses au fond du béton, ce qui peut créer des zones de faible densité et de faible résistance. Ces zones peuvent se fissurer sous leur propre poids ou sous l'effet d'une charge supplémentaire, créant des fissures en forme de losange ou de triangle près de la base de la structure (Voire la figure 1.5 (A, B, C))

5.1.5 Fissuration en réseau (craquelage) :

Fait référence aux fissures fines qui apparaissent à la surface d'un matériau, telles qu'un émail sur la céramique ou un revêtement sur une surface peinte. Ces fissures sont souvent petites et étroitement espacées, ressemblant à un motif de toile d'araignée ou à un réseau de lignes intersectées. Le casing peut survenir pour une variété de raisons, notamment la contraction lors du séchage ou du refroidissement, les contraintes thermiques ou mécaniques, ou l'exposition à des produits chimiques ou des conditions météorologiques rigoureuses. Bien que le crazing soit généralement considéré comme un problème esthétique et n'affecte pas l'intégrité structurelle du matériau, il peut réduire la résistance du matériau à d'autres dommages et le rendre plus susceptible aux taches ou à la corrosion.

5.1.6 La fissuration due à la Réaction Alkali-Granulat (RAG) :

Également connue sous le nom de "cancer du béton", est un type de fissuration qui se produit dans les structures en béton en raison d'une réaction chimique entre la pâte de ciment alcalin et certains types d'agrégats réactifs. Cette réaction peut faire gonfler le béton, entraînant des fissures, des déformations et une perte de résistance.

La RAG peut être de deux types :

La Réaction Alkali-Silice (RAS) et la Réaction Alkali-Carbonate (RAC). Dans la RAS, la réaction se produit entre la silice dans certains types d'agrégats, tels que le chert ou l'opale, et les alcalis dans le ciment. Cela peut produire une substance de type gel qui absorbe l'eau et gonfle, entraînant des fissures et des déformations du béton. Dans la RAC, la réaction se produit entre les minéraux de carbonate dans certains types d'agrégats, tels que le calcaire, et les alcalis dans le ciment. Cela peut produire une substance poudreuse blanche à la surface du béton, ainsi que des fissures et une perte de résistance. (Voire la figure 1.5 (N))

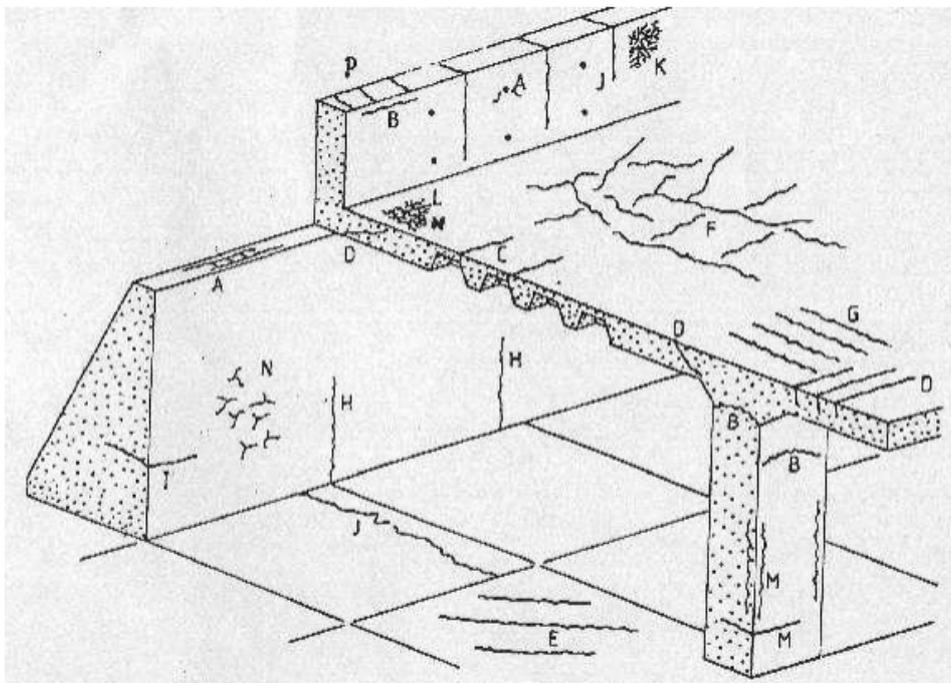


FIGURE 1. 4 FISSURS TYPIQUES DANS LE BETON ARME [20].

5.2 Pénétrabilité

5.2.1 L'absorption :

Se réfère à la capacité d'un matériau à absorber une substance, comme l'eau. Cela signifie que l'eau peut pénétrer dans les pores et les fissures d'un matériau absorbant, comme le béton ou la pierre.

Si le béton est trop poreux, l'eau peut facilement passer à travers, ce qui peut entraîner des problèmes tels que la corrosion des armatures, la fissuration et la perte de résistance.

5.2.2 La perméabilité :

Elle se réfère à la capacité d'un matériau à permettre le passage d'un fluide, tel que l'eau, à travers ses pores ou ses fissures.

Les matériaux ayant une haute perméabilité permettent à l'eau de passer facilement à travers, tandis que ceux ayant une faible perméabilité limitent ou empêchent le passage de l'eau.

Un sol trop perméable peut causer des problèmes tels que l'érosion et le tassement, tandis qu'un ariau de construction perméable peut entraîner des problèmes tels que la corrosion des armatures, la fissuration et la perte de résistance.

5.2.3 La sportivité :

Définie comme la vitesse d'absorption d'un fluide dans un matériau poreux par unité de surface, par unité de temps, dans un ensemble de conditions spécifiques. C'est une mesure de la facilité avec laquelle un matériau peut absorber un fluide, tel que de l'eau, et dépend de facteurs tels que la porosité, la perméabilité et les caractéristiques de surface du matériau. Le coefficient de sportivité peut être calculé expérimentalement en mesurant la quantité de fluide absorbée par le matériau au fil du temps.

5.3 Détérioration chimique

L'attaque chimique sur le béton peut se produire à partir de l'exposition à l'environnement naturel ou à des réactifs industriels stockés dans des réservoirs en béton. L'eau qui traverse le béton, que ce soit à travers des fissures, des pores capillaires ou le matériau en vrac, peut contenir des agents agressifs dissous qui peuvent attaquer le béton.

5.3.1 Réaction d'ettringite retardée (RED) dans le béton :

La RED est une réaction qui peut se produire dans du béton contenant des niveaux élevés d'ions aluminate et sulfate, entraînant la formation de produits expansifs et des fissures.

5.3.2 Attaque aux ions sulfate sur le béton :

Les ions sulfate dans l'eau peuvent réagir avec la pâte de ciment, entraînant la formation de composés expansifs qui causent des fissures et une perte de résistance.

5.3.3 Attaque acide :

Les environnements acides, qu'ils soient naturels ou industriels, peuvent attaquer la pâte de ciment, entraînant une dégradation et une perte de résistance.

5.3.4 Attaque des sols sulfate :

Les sols contenant des niveaux élevés d'ions sulfate peuvent réagir avec la pâte de ciment, entraînant la formation de composés expansifs et des fissures.

5.3.5 . Attaque au sulfate de thaumasite (TSA) :

Le TSA est une forme rare mais grave d'attaque au sulfate qui se produit dans du béton exposé à des environnements agressifs contenant des ions sulfate, carbonate et silicate.

5.3.6 L'attaque de l'eau de mer :

L'exposition du béton à l'eau de mer peut entraîner sa détérioration par attaque de sulfate, en particulier par l'action du sulfate de magnésium, ainsi que par la cristallisation de sels dans les pores du béton. L'eau de mer contient également du dioxyde de carbone dissous, ce qui peut entraîner une carbonatation. Le taux d'attaque par le sulfate est cependant plus lent dans l'eau de mer que dans les eaux souterraines ou les sols riches en sulfate. Les réactions qui se produisent lorsque le béton est exposé aux ions sulfate ou aux solutions de sulfate de magnésium sont censées être les mêmes que dans l'eau de mer. Le sulfate de calcium et le sulfoaluminate de calcium ont cependant une solubilité accrue dans les solutions de chlorure et ont tendance à être lessivés du béton dans l'eau de mer. Des sels peuvent également cristalliser dans le béton au-dessus de la marque de haute eau lorsqu'il y a évaporation. L'expansion résultante peut causer des dommages au béton.[8]

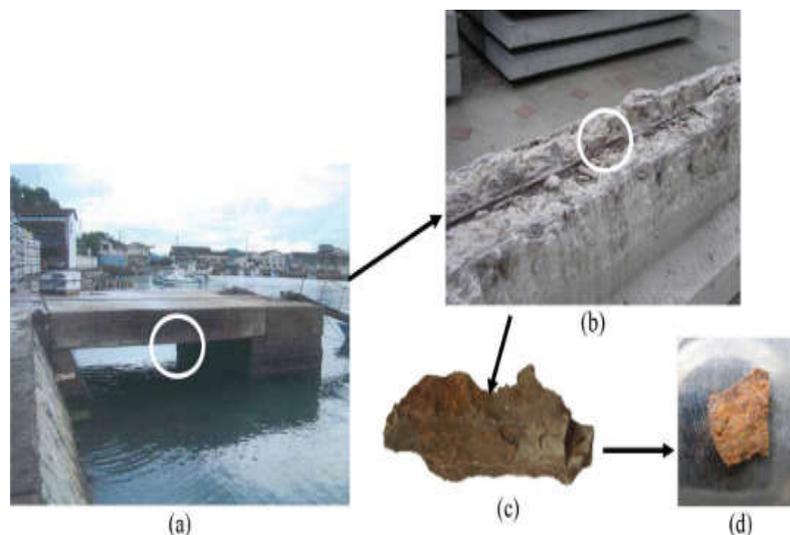


FIGURE 1. 5 LE PORT EN BETON ET LES PRODUITS DE CORROSION DE L'ACIER. (A) LE PORT EN BETON A YOKOSUKA. (B) LA BARRE D'ACIER CORRODEE DANS LA POUTRE EN BETON. (C) LE PRODUIT DE CORROSION PELE DE LA BARRE D'ACIER CORRODEE. (D) DES ECHANTILLONS DE ROUILLE ECAILLEUX [21].



A)

B)

FIGURE 1. 6 CORROSION DANS L'ACIER DU BETON [22]

FIGURE 1. 7 DURABILITE DES PIEUX PREFABRIQUES EN BETON PRECONTRAIT EN
MILLIEU MARIN [23]

5.3.7 Attaque physique par le sel (APS)

Le béton et la pierre peuvent être affectés par l'Attaque Physique par le Sel (APS), qui se produit lorsque des cristaux de sel se développent à l'intérieur des pores du matériau et causent des fissures ou un écaillage. Les sels qui peuvent causer l'APS sur le béton comprennent le sulfate de sodium (NaSO_4), le carbonate de sodium (Na_2CO_3) et le chlorure de sodium (NaCl), tandis que le sulfate de magnésium (MgSO_4), le sulfate de calcium (CaSO_4), le chlorure de calcium (CaCl_2) et le nitrate de sodium (NaNO_3) sont connus pour causer l'APS sur la pierre. [8]

5.4 Détérioration physique

La dégradation physique du béton armé se réfère aux dommages physiques qui peuvent se produire sur la surface ou l'intérieur du béton.

5.4.1 Gel-dégel :

Ce type de dommage est causé par la pénétration d'eau dans les couches superficielles du béton, puis par la conversion de cette humidité en glace par des températures inférieures à zéro. L'eau se dilate en gelant, augmentant de volume d'environ 10%, ce qui provoque la désintégration des couches superficielles du béton.

5.4.2 Feu :

Le béton est un matériau incombustible qui possède de bonnes propriétés de résistance au feu, mais il peut être endommagé lorsqu'il est exposé à un incendie. La gravité des dommages dépend des niveaux de température atteints et peut aller de légères traces de suie et de fumée à un écaillage important et à l'exposition du renforcement en acier. Le terme "résistant au feu" ne doit être appliqué qu'à l'élément structurel dont fait partie le béton. Des dommages plus importants causés par un incendie peuvent entraîner des fissures importantes, un flambement du renforcement en acier, voire une fracture et une déviation des composants en béton.

5.5 Détérioration mécanique

5.5.1 Abrasion :

La résistance à l'abrasion du béton est principalement influencée par la force et la dureté de sa zone de surface, qui est soumise à un stress localisé d'intensité élevée. Par conséquent, la résistance à la compression du béton joue un rôle significatif dans le contrôle de sa résistance à l'abrasion. Les opérations de finition et le processus de durcissement affectent fortement les propriétés de la zone de surface du béton, telles que le rapport eau/ciment, la compaction et les caractéristiques de saignement. Un bon durcissement est particulièrement important. De plus, les bétons à base de ciment mélangé avec de la fumée de silice à haute résistance présentent une résistance améliorée à l'abrasion et à l'érosion.

5.5.2 . Erosion :

Ce phénomène se produit lorsque la surface du béton est érodée usée, généralement à cause de l'eau, du vent, de la pluie ou de la neige. Cela peut se produire dans les zones où le béton est constamment exposé aux éléments, tels que les murs de soutènement et les fondations.

5.5.3 . Les chocs :

Un impact violent, tel qu'un accident de voiture ou une collision avec un objet lourd, peut causer des dommages physiques au béton armé tels que des fissures ou des éclatements.

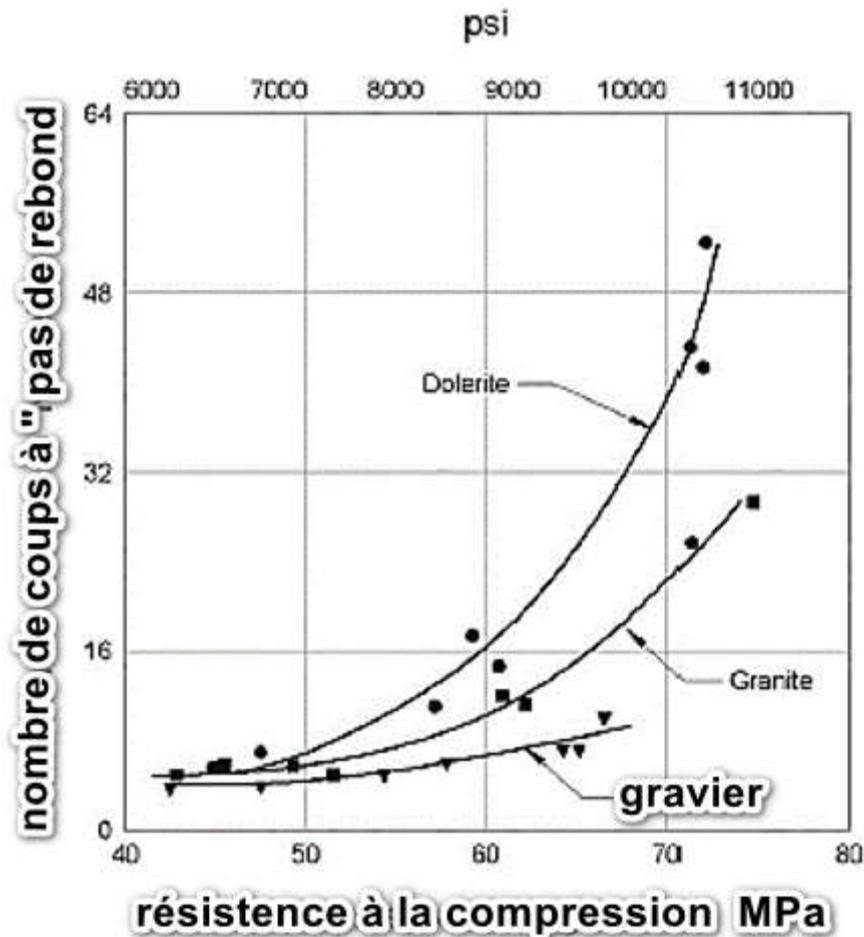


FIGURE 1. 8 LA RELATION ENTRE LA RESISTANCE AUX CHOCS ET LA RESISTANCE A LA COMPRESSION POUR LE BETON FABRIQUE AVEC DIFFERENTS GRANULATS [24].

5.6 La détérioration structurelle :

La détérioration structurelle fait référence à l'affaiblissement et à la dégradation progressive de la structure physique d'un bâtiment, d'un pont ou d'une autre infrastructure au fil du temps en raison d'une combinaison de facteurs environnementaux, mécaniques et chimiques.

5.6.1 Surcharge

Au cours de la durée de vie de conception des structures, les exigences opérationnelles peuvent changer, entraînant une augmentation de la charge sur les éléments renforcés, précontraints ou post-contraints. Si ces éléments sont surchargés, des fissures et des

déformations seraient généralement évidentes. Dans des cas plus graves, comme la corrosion localisée des éléments précontraints ou post-contraints, la surcharge pourrait potentiellement conduire à une défaillance structurelle.

5.6.2 . L'affaissement

Par exemple, l'affaissement des ponts routiers, dû à des conditions changeantes des lacs, peut entraîner des fissures et une déformation significative des éléments en béton armé et précontraint de la structure.

5.6.3 La fatigue :

La rupture par fatigue se produit lorsqu'un matériau échoue sous des charges répétées, chacune étant plus petite que la résistance à la compression statique. Le béton et l'acier sont tous deux susceptibles de connaître une rupture par fatigue. La manifestation de la fatigue dans les structures et éléments de construction en béton armé, précontraints ou post-contraints est souvent visible sous forme de fissures, qui peuvent éventuellement se rejoindre pour former des blocs.

D'autres formes de détérioration structurelle sont dues au cisaillement, à la tension, à la torsion et à la flexion, au fluage et au retrait (fléchissement vers le bas des sections en porte-à-faux de certains ponts routiers, par exemple).

5.7 Détérioration biologique

Les bactéries posent un problème majeur dans les égouts chauds avec une abondance de sulfure et de nutriments organiques. Les tours de refroidissement des centrales électriques offrent également un environnement propice à la croissance de bactéries aérobies, avec des nutriments en béton carbonaté et du sulfure généré par des zones anaérobies où les SRB produisent le sulfure.

6 Influence de qualité du béton sur la corrosion des armatures :

6.1 Les ciments et les matériaux cimentaires :

Les ciments et les matériaux cimentaires sont largement utilisés dans la construction en raison de leur capacité à lier les agrégats ensemble, formant ainsi un matériau solide et durable. Ces matériaux ont une influence significative sur les propriétés et les performances du béton, des mortiers et des coulis, ainsi que sur la durabilité globale des projets de construction. Voici quelques détails sur l'influence des ciments et des matériaux cimentaires :

6.1.1 Résistance et durabilité :

La résistance et la durabilité du béton dépendent de la qualité des matériaux cimentaires utilisés. L'ingrédient principal du ciment est le ciment Portland, qui est produit en chauffant du calcaire et de l'argile dans un four pour produire du clinker. Le clinker est ensuite broyé avec du gypse pour former une poudre fine qui est utilisée comme composant principal du béton. La qualité du clinker, le processus de broyage et la composition chimique du gypse peuvent tous affecter la résistance et la durabilité du béton.

D'autres matériaux cimentaires, tels que les cendres volantes, le laitier et la fumée de silice, peuvent être ajoutés au mélange pour améliorer les propriétés du béton. Les cendres volantes sont un sous-produit de la combustion du charbon et contiennent de la silice, de l'alumine et de l'oxyde de fer. Elles sont souvent utilisées en remplacement du ciment Portland, car elles augmentent la résistance du béton tout en réduisant son empreinte carbone. Le laitier est un sous-produit de la production d'acier et contient du calcium, de la silice et de l'alumine. Il peut également être utilisé en remplacement du ciment Portland, offrant les mêmes avantages que les cendres volantes. La fumée de silice est un sous-produit de l'industrie du métal de silicium et contient des particules de silice hautement réactives. Elle est utilisée comme pouzzolane, réagissant avec l'hydroxyde de calcium dans le ciment pour former du silicate de calcium hydraté, ce qui augmente la résistance et la durabilité du béton.

6.1.2 La maniabilité :

Est une propriété importante du béton, car elle affecte la facilité de mise en place, de compactage et de finition du béton. La maniabilité du béton peut être mesurée à l'aide de divers tests, tels que le test d'étalement ou le test à la table à secousses.

La quantité et le type de matériaux cimentaires utilisés dans le mélange de béton peuvent avoir un impact significatif sur sa maniabilité. Comme vous l'avez mentionné, une quantité élevée de matériaux cimentaires peut augmenter la viscosité du mélange, le rendant plus difficile à travailler. Cela est dû au fait que les particules de ciment peuvent rendre le mélange collant et difficile à déplacer.

Cependant, une quantité moins élevée de matériaux cimentaires peut augmenter la maniabilité du béton, le rendant plus facile à verser et à façonner. Cela est dû au fait qu'il y a moins de particules de ciment dans le mélange, ce qui permet une meilleure fluidité.

En plus de la quantité de matériaux cimentaires utilisés, d'autres facteurs peuvent également affecter la maniabilité du béton. Par exemple, la teneur en eau du mélange peut avoir un

impact significatif sur sa maniabilité. Trop d'eau peut rendre le mélange trop liquide, tandis qu'une quantité insuffisante peut le rendre difficile à déplacer.

Le type d'agrégat utilisé dans le mélange peut également affecter la maniabilité du béton. Des agrégats plus grands et plus anguleux peuvent rendre le mélange plus difficile à travailler, tandis que des agrégats plus petits et plus arrondis peuvent faciliter son déplacement.

En somme, la maniabilité du béton est une propriété importante à considérer lors de la conception et de l'utilisation de mélanges de béton, car elle peut affecter la qualité et la durabilité du produit fini.

6.1.3 La résistance chimique :

Est une considération importante dans la sélection de matériaux cimentaires pour les projets de construction, en particulier dans les environnements où le béton sera exposé à des produits chimiques agressifs, tels que les stations d'épuration des eaux usées et les installations industrielles. Dans ces environnements, le béton peut être sujet à une attaque chimique, ce qui peut entraîner une dégradation et une défaillance prématurée du béton.

Le ciment Portland, qui est le composant principal de la plupart des mélanges de béton, contient de l'hydroxyde de calcium, également connu sous le nom de portlandite. Ce composé est très susceptible à l'attaque par des acides et d'autres produits chimiques, ce qui peut conduire à la formation de sels de calcium et à la dégradation subséquente du béton. C'est ce qu'on appelle la corrosion chimique ou l'attaque chimique.

Pour remédier à ce problème, des matériaux cimentaires alternatifs peuvent être utilisés dans le mélange pour réduire la quantité d'hydroxyde de calcium présent. Par exemple, les cendres volantes et le laitier sont couramment utilisés en remplacement partiel du ciment Portland dans les mélanges de béton. Ces matériaux contiennent de la silice et de l'alumine réactive, qui peuvent réagir avec l'hydroxyde de calcium pour former respectivement des hydrates de silicate de calcium et d'aluminate de calcium. Ces produits sont plus résistants à l'attaque chimique que la portlandite, ce qui contribue à améliorer la résistance chimique globale du béton.

En plus de l'utilisation de matériaux cimentaires alternatifs, d'autres mesures peuvent être prises pour améliorer la résistance chimique du béton. Par exemple, des revêtements et des scellants de Surface spéciaux peuvent être appliqués pour protéger le béton de l'exposition aux produits chimiques. De plus, une attention particulière à la conception du mélange de

béton, y compris la sélection d'agrégats appropriés et l'utilisation d'agents réducteurs d'eau, peut contribuer à améliorer la résistance chimique du produit fini.

Dans l'ensemble, l'utilisation de matériaux cimentaires alternatifs et d'autres mesures visant à améliorer la résistance chimique peuvent contribuer à assurer la durabilité et la longévité du béton dans les environnements où il est exposé à des produits chimiques agressifs

6.1.4 Les propriétés thermiques :

Les propriétés thermiques du béton peuvent être influencées par le type et la quantité de matériau cimentaire utilisé. Le béton a une faible conductivité thermique, ce qui en fait un bon isolant. Cependant, l'utilisation d'un pourcentage élevé de cendres volantes peut améliorer la résistance thermique du béton, le rendant ainsi plus adapté à une utilisation dans des conditions de température extrême.

6.1.5 La conductivité thermique :

Est la mesure de la capacité d'un matériau à transférer la chaleur. Le béton a une faible conductivité thermique, ce qui signifie qu'il a la capacité de ralentir le transfert de chaleur à travers le matériau. Cela le rend utile pour l'isolation thermique dans les bâtiments, les canalisations et les systèmes de chauffage et de refroidissement.

Cependant, l'utilisation de cendres volantes dans le béton peut améliorer encore sa résistance thermique. Les cendres volantes sont un sous-produit de la combustion du charbon dans les centrales électriques. Elles contiennent des particules fines de silice, d'alumine et d'oxydes de fer qui réagissent avec le calcium hydroxyde présent dans le béton pour former des composés hydratés plus résistants à la chaleur.

En utilisant une quantité plus élevée de cendres volantes dans le mélange de béton, la quantité de calcium hydroxyde peut être réduite, ce qui peut améliorer considérablement la résistance thermique du béton. Cela peut être particulièrement important dans les environnements à température élevée ou basse, où la résistance thermique est essentielle pour assurer la durabilité et la stabilité du béton.

En fin de compte, la résistance thermique du béton peut être améliorée en utilisant des cendres volantes dans le mélange de béton. Cependant, il est important de noter que l'utilisation de ces matériaux peut également avoir d'autres effets sur les propriétés du béton, tels que sa résistance à la compression et sa durabilité, qui doivent être pris en compte lors de la sélection des matériaux pour un projet de construction donné.

7 Influence de l'épaisseur de l'enrobage en béton sur le taux de corrosion [1] :

- L'épaisseur de l'enrobage en béton a une influence sur le taux de corrosion. Le béton agit comme une barrière physique qui empêche les agents de corrosion de pénétrer. Ainsi, plus l'enrobage en béton est épais, plus les ions agressifs ou les gaz corrosifs doivent parcourir une distance plus longue avant d'atteindre l'armature en acier.
- L'écart de conductivité thermique entre l'acier et le béton a également un impact sur la corrosion. Une différence de température entre un enrobage en béton mince et l'armature peut provoquer la rupture du béton, exposant ainsi l'armature aux agents corrosifs. Cependant, un enrobage en béton épais offre une meilleure résistance à la compression et une plus grande résistance aux chocs, évitant ainsi la formation de fissures qui pourraient faciliter la corrosion.

8 Conclusion

Une mauvaise utilisation des matériaux cimentaires peut avoir des effets négatifs sur la qualité et la durabilité des structures en béton. Des problèmes tels que le mélange incorrect, un curing insuffisant et des pratiques de construction de qualité médiocre peuvent entraîner différents types de détérioration du béton, tels que des fissures, l'écaillage et l'éclatement. De plus, l'exposition à des conditions environnementales difficiles, telles que les cycles de gel-dégel et l'attaque chimique, peut entraîner la corrosion, qui sera discutée dans le deuxième chapitre. Par conséquent, il est crucial de choisir soigneusement les matériaux cimentaires et de les utiliser correctement dans la construction en béton afin de garantir que les structures en béton fonctionnent bien et restent durables à long terme.

CHAPITRE II :

LA DETECTION DE

LA CORROSION DE

LA METHODE NON

DESTRUCTIVES

1 Introduction :

La détérioration des infrastructures en béton due à la corrosion de l'acier renforcé est un problème sérieux qui a des conséquences économiques importantes. La corrosion se produit par des réactions électrochimiques à l'interface entre le métal et une solution électrolytique, où le métal est oxydé lors de la réaction anodique et libère des électrons. Ainsi, les techniques électrochimiques sont bien adaptées pour étudier les processus de corrosion. La principale préoccupation des chercheurs en corrosion est de détecter et de mesurer les défauts à un stade initial du processus de corrosion. Ce chapitre propose des méthodes pratiques pour caractériser la corrosion dans le béton armé.

2 La corrosion

2.1 Définition :

Le mot "corrosion" vient du latin "corrodere", qui signifie "ronger" ou "grignoter". Il décrit le processus de dégradation ou d'usure d'un matériau en raison de sa réaction chimique avec l'environnement environnant, qui peut être causée par l'oxydation, la réduction, l'électrolyse ou d'autres réactions chimiques.

Le terme "corrosion" est utilisé principalement pour décrire l'usure ou la détérioration des métaux, mais il peut également s'appliquer à d'autres matériaux tels que le béton ou le bois qui subissent des processus similaires de dégradation due à des réactions chimiques.

2.2 Les effets de la corrosion :

La corrosion compromet la sécurité des structures et est le principal facteur de défaillance catastrophique dans les industries des ponts, des transports et de la construction. La corrosion est un phénomène spontané et à programmation lente. La vitesse est principalement gouvernée par l'environnement, la composition métallique et les propriétés métallurgiques, chimiques et électrochimiques. Parce qu'il faut beaucoup de temps pour évaluer l'étendue de la corrosion, elle est souvent sous-estimée dans la conception des structures.

La corrosion représente une dépense importante dans l'estimation des coûts de production et d'investissement dans l'industrie de la construction. Les pertes incluent : le remplacement des structures corrodées et la main-d'œuvre, la perte de produit, l'arrêt, la perte d'efficacité, la contamination de l'eau dans les réservoirs d'eau, la surconception de la structure, par exemple en utilisant des matériaux plus chers ou surqualifiés.

2.3 Les types de corrosion :

La corrosion peut être classée selon la nature, l'environnement, la composition chimique et les propriétés électrochimiques, la température, l'attaque de corrosion et le taux d'attaque. Les différentes formes de corrosion comprennent :

2.3.1 L'attaque uniforme :

Cette forme d'attaque peut souvent être observée sur les métaux tels que l'aluminium et l'acier inoxydable lorsqu'ils sont exposés à des environnements corrosifs tels que des acides, des bases ou des milieux salins. L'attaque uniforme peut entraîner une perte de matière sur toute la surface du métal, ce qui peut affaiblir la structure et réduire sa durée de vie.

2.3.2 La corrosion galvanique :

C'est un type de corrosion électrochimique qui se produit lorsqu'il y a un contact électrique direct entre deux métaux différents dans un milieu électrolytique, tels que de l'eau salée ou de l'humidité. Lorsque ces deux métaux sont en contact, ils forment un couple galvanique où le métal le plus actif (ou le plus réactif) se corrode plus rapidement que le métal le moins actif. La corrosion galvanique peut causer des dommages importants aux structures métalliques, comme la corrosion des coques de bateaux ou la détérioration de la tuyauterie en acier.

2.3.3 La corrosion par piqûres :

C'est un type de corrosion localisée qui se produit sur des métaux en présence d'un milieu électrolytique, tel que de l'eau salée ou de l'humidité. Elle se caractérise par des piqûres sur la surface du métal, qui sont des zones de corrosion qui se propagent rapidement et en profondeur, contrairement à la corrosion uniforme qui se produit de manière homogène sur toute la surface du métal.

Les piqûres sont causées par une concentration locale de l'agent corrosif, qui peut être due à une différence de potentiel entre différentes parties de la surface métallique ou à une accumulation de sels ou de contaminants. Les piqûres peuvent entraîner une perte de matière locale importante et peuvent affaiblir la structure métallique.

2.3.4 La corrosion en crevasse :

Se produit dans les espaces restreints et confinés entre les surfaces métalliques. Ce phénomène est dû à l'accumulation de liquides corrosifs dans ces espaces, créant ainsi un

CHAPITRE II : LA DETECTION DE LA CORROSION PAR LES METHODES NON DESTRUCTIVES

milieu électrolytique. Cependant, ce type de corrosion peut être particulièrement dangereux car il peut se développer sans être visible de l'extérieur.

2.3.4 La corrosion intergranulaire :

Elle est causée par une réaction chimique entre le matériau et son environnement, qui affaiblit les joints de grains et peut entraîner une rupture ou une dégradation de la structure métallique. Les métaux les plus couramment affectés par la corrosion intergranulaire sont l'acier inoxydable, le nickel et le cuivre, ainsi que leurs alliages.

Les types de corrosion sont représentés dans la figure 2.1.

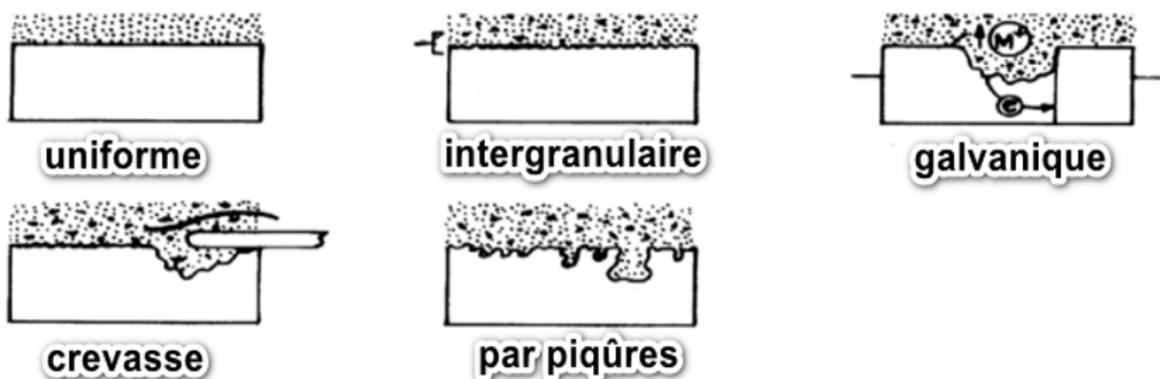


FIGURE 2. 1 LES TYPES DE CORROSION (MODIFIER) [2].

2.4 Causes de corrosion et de détérioration du béton

2.4.1. Carbonatation :

La carbonatation est le résultat de la réaction chimique entre le gaz dioxyde de carbone dans l'atmosphère et les hydroxydes alcalins dans le béton. Comme de nombreux autres gaz, le dioxyde de carbone se dissout dans l'eau pour former un acide. Contrairement à la plupart des autres acides, l'acide carbonique n'attaque pas la pâte de ciment, mais neutralise plutôt les alcalis dans l'eau des pores, formant principalement du carbonate de calcium :



À partir de cette réaction, le carbonate de calcium se forme et la valeur de pH est réduite au niveau qui provoque la corrosion dans l'armature en acier.[1.1]

2.4.2 Attaque de chlorure :

Les chlorures peuvent attaquer le béton de deux manières. La première se produit à l'intérieur du béton pendant le processus de coulage et la deuxième par le mouvement du

CHAPITRE II : LA DETECTION DE LA CORROSION PAR LES METHODES NON DESTRUCTIVES

béton de l'extérieur vers l'intérieur. Lors du coulage, les chlorures sont présents dans le béton en raison des raisons suivantes[1.2]:

- L'eau de mer utilisée dans le mélange de béton
- Le chlorure de calcium utilisé dans les additifs nécessaires pour accélérer le temps de prise
- Les granulats qui contiennent des chlorures qui peuvent être bien lavés
- Les additifs qui ont une teneur en chlorure supérieure à celle définie dans la spécification
- L'eau utilisée dans le mélange de béton qui a un nombre plus élevé d'ions chlorure que ce qui est autorisé dans les spécifications

Les chlorures peuvent se propager à l'intérieur du béton depuis l'environnement externe en raison des raisons suivantes :

- Le béton est exposé à la projection d'eau de mer ou à une exposition continue à l'eau salée.
- Le sel est utilisé pour faire fondre la glace.
- La présence de chlorures dans les substances chimiques qui attaquent la structure du béton, comme le stockage de sel.

2.5 Mécanismes de la corrosion de l'acier dans le béton par les ions chlorures :

La corrosion sur le béton armé est un phénomène courant et préoccupant dans les Structures en béton armé. La corrosion se produit lorsque l'acier de renforcement est exposé à des environnements agressifs tels que le sel, les acides ou l'humidité, ce qui peut entraîner la formation de produits de corrosion qui occupent un volume plus important que l'acier d'origine. Cette expansion peut causer des fissures dans le béton, affaiblissant ainsi la structure.

2.5.1 Processus de corrosion :

Le processus de corrosion est illustré dans la Fig2.2. Cela montre la formation de sites anodiques et cathodiques sur une barre d'acier. Lorsque l'acier corrode dans le béton, il se dissout dans les solutions de pores et cède des électrons, et la corrosion de l'acier (Fe) se produit à l'anode [4.1] :



Les électrons sont libérés et circulent à travers l'acier jusqu'à la cathode [4.1] :



Eq.2.2

Les électrons sont consommés dans les processus de réduction conduisant à la formation d'ions hydroxyde. La perméabilité de la couverture en béton permet à l'oxygène et à l'humidité de pénétrer dans la couverture pour alimenter la réaction cathodique. Le béton suffisamment saturé en humidité sert d'électrolyte [4].

Les réactions anodique et cathodique présentées dans les équations (2.1 et 2.2) ne sont que les premières étapes du processus de création des produits de corrosion. Plusieurs étapes supplémentaires se produisent pour que la "rouille" se forme, et son occurrence peut être exprimée de plusieurs manières. Une façon typique est lorsque l'hydroxyde ferreux devient l'hydroxyde ferrique, puis devient l'oxyde ferrique hydraté ou la rouille, comme présenté ici [4.1].



L'oxyde ferrique Fe_2O_3 sous-estimé a un volume d'environ deux fois celui de l'acier qu'il remplace lorsqu'il est entièrement dense. Lorsqu'il devient hydraté, il gonfle encore plus. Cela signifie que l'augmentation de volume à l'interface acier-béton est deux fois ou plus grande que le volume d'origine, ce qui conduit à la fissuration et à l'écaillage observés comme conséquence de la corrosion de l'acier dans le béton, la rouille rouge/brune, cassante et floconneuse sur la barre, et les taches de rouille observées aux fissures dans le béton [4].

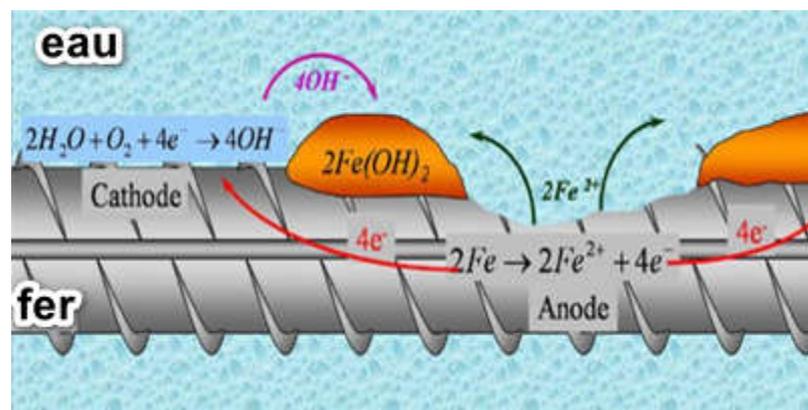


FIGURE 2. 2 LES REACTION ANODIQUES ET CATHODIQUES [3].

2.5.2 Taux de corrosion :

Les processus anodique et cathodique conduisent respectivement à une accumulation de charges positives et négatives, mais cela n'est pas soutenu. Les ions d'hydroxyde diffusent vers l'anode, où ils rencontrent les ions ferreux, et la combinaison résultante entraîne une neutralisation électrique si les processus anodiques et cathodiques sont couplés ensemble sous la forme d'une cellule de corrosion sans excès d'électrons. S'il n'y a pas de source externe d'électrons, alors les électrons produits par l'oxydation seront entièrement consommés par la réduction. Ainsi, le taux d'oxydation à l'anode et le taux de réduction à la cathode doivent être égal, et cette égalité contrôle le taux de corrosion. Par conséquent, le taux de flux d'électrons reflète le taux de corrosion [4].

Un facteur important qui contrôle le taux de corrosion est la disponibilité d'oxygène dissous entourant les zones cathodiques (Eq.2.2.) [4.2]. L'oxygène est consommé dans la réaction cathodique. Si son approvisionnement dans la solution entourant les zones cathodiques du métal n'est pas continuellement fourni, alors les réactions de corrosion peuvent être limitées.

2.5.3 Passivation / dépassivation :

Le béton offre une résistance physique à la corrosion de l'acier de renforcement en agissant comme une barrière, et une résistance chimique à la corrosion grâce à son pH élevé. Le béton qui n'est pas exposé à des influences externes présente généralement un pH entre 12,5 et 13,5. [5.2]. Comme le montre le diagramme de Pourbaix (Figure 2.3), qui définit la plage de potentiel électrochimique et de pH pour le système Fe-H₂O dans un environnement alcalin, à des potentiels et des pH normalement trouvés dans le béton, une couche passive protectrice se forme à la surface de l'acier. On croit que cette couche est un film d'oxyde ou d'hydroxyde protecteur ultra-mince (<10 nm) qui réduit le taux de dissolution de l'acier à des niveaux négligeables.

Cependant, la perte partielle ou complète de la couche passive, connue sous le nom de dépassivation, conduit à la corrosion active des barres d'acier. Les produits corrosifs du fer sont expansifs, et leur formation peut causer des fissures et une détérioration supplémentaire du béton. La zone Hatch montre la plage de pH et de potentiel de l'acier dans le béton [5.1].

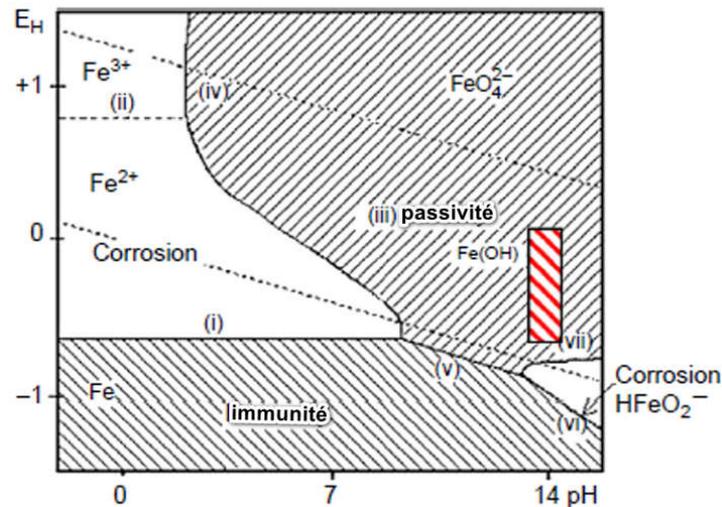


FIGURE 2. 3 DIAGRAMME DE POURBAIX POUR FE-H2O A 25°C [6].

2.6 Produits de corrosion :

Le volume des produits de corrosion affecte directement la proportion des dommages causés au béton et joue donc un rôle important dans la modélisation des performances structurelles et la prédiction de la durée de vie du service. Comme le montre la figure 2.4, les différents produits de corrosion de l'acier occupent des volumes différents. ont détecté Fe_3O_4 (magnétite), α - $FeOOH$ (goethite) et γ - $FeOOH$ (lépidocrocite), tandis que Jaffer et Hansson ont identifié γ - Fe_2O_3 (maghémite) [5.3]. Le produit de corrosion le plus expansif détecté à ce jour dans le béton armé est le β - $FeOOH$ (akaganeite), qui représente environ 3,5 fois le volume initial du fer [5.4]. Les raisons d'une telle variance dans les observations restent cependant peu claires. Le manque d'informations sur le mécanisme de dépolarisation des barres d'acier en présence d'ions chlorure, ainsi que l'interaction entre les régions passive et active (rapport anode/cathode) à l'échelle nano/micro, peuvent en être une raison. Une difficulté pour déterminer le type de produits de corrosion, et par conséquent le volume de ces produits, est que le produit de corrosion de l'acier est instable dans l'air et change presque immédiatement après exposition à l'atmosphère pour l'analyse en laboratoire.

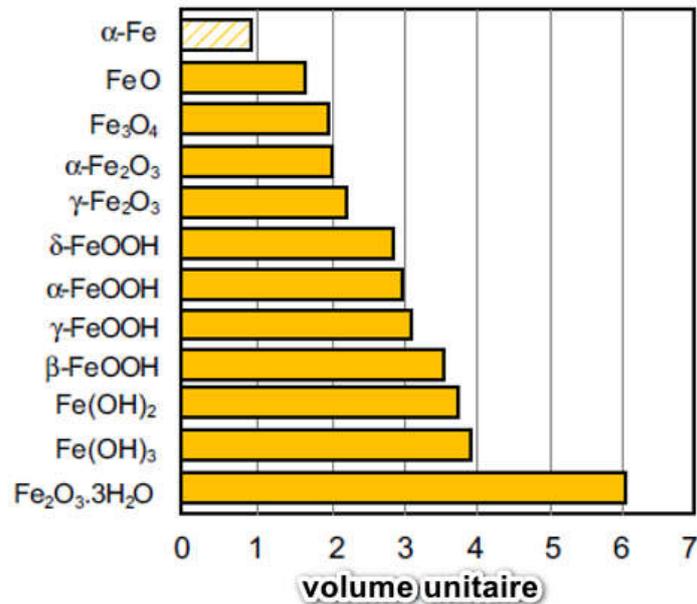


FIGURE 2. 4 VOLUME DE PRODUITS DE CORROSION PAR RAPPORT AU FER [5].

3 La mesure potentiel de la corrosion :

La mesure du potentiel de corrosion est une technique utilisée pour évaluer la Probabilité de corrosion d'un matériau métallique en contact avec un environnement corrosif. Cette mesure est effectuée en mesurant le potentiel électrique du matériau par rapport à une électrode de référence. Des changements dans le potentiel mesuré peuvent indiquer des processus de corrosion en cours, tels que la formation de dépôts, la corrosion uniforme ou la corrosion localisée. Cette technique est largement utilisée dans diverses applications industrielles pour surveiller et prévenir la corrosion des structures métalliques.



FIGURE 2. 5 APPAREIL DE MESURE POTENTIEL (CANIN+) (PRISE PAR LES AUTEURS)

4 Méthodes de contrôle non destructif pour la mesure potentiel de la corrosion :

Récemment, diverses méthodes ont été mises en place pour la surveillance de la corrosion dans les structures en béton armé. Elles sont classées en six catégories principales comme suit [7] :

- L'inspection visuelle
- Les méthodes électrochimiques (c'est-à-dire la surveillance du potentiel de circuit ouvert (PCO), la méthode de résistivité, la résistance de polarisation, la méthode d'impulsion galvano statique ((MIG), le bruit électrochimique (BEC))
- Les méthodes d'ondes élastiques (c'est-à-dire la vitesse d'impulsion ultrasonore (VIU), l'émission acoustique ((EA) et l'écho d'impact (EI))
- Les méthodes électromagnétiques (c'est-à-dire la détection radar de sol (DRS))
- Les méthodes de détection optique (c'est-à-dire le réseau de Bragg en fibre optique (RBF)) et la thermographie infrarouge (TIR). L'inspection visuelle, le PCO, la résistance de polarisation et d'autres méthodes électrochimiques sont plus couramment utilisés pour la surveillance de la corrosion dans les structures en béton armé.

4.1 Inspection visuelle :

Une inspection visuelle permettra de localiser les zones de corrosion avancée de l'armature, les défauts et la détérioration du béton. Elle ne donnera aucune information sur l'état de l'armature dans le béton apparemment sain. Les inspections visuelles se concentreraient généralement sur les caractéristiques suivantes [8.1] :

- Les éclats.
- Les fissures.
- Les taches de rouille.
- L'altération due aux intempéries.
- Un compactage insuffisant et des nids d'abeilles.
- L'humidité.
- L'efflorescence.

L'inspection visuelle peut également impliquer l'examen de surfaces à la recherche de preuves de dommages tels que :

- L'écaillage de surface : qui peut être lié à la circulation ou à l'érosion naturelle combinée à des cycles de gel-dégel, à la cristallisation de sels (action de mèche, capillarité, perméation et transpiration), ou éventuellement à des défauts liés à la construction.
- L'adoucissement de surface : qui peut être lié à l'attaque par une eau douce ou agressive, des acides, des sulfates et des matières organiques.
- L'érosion de surface : liée au trafic ou à l'écoulement de l'eau sur une surface autrement saine.
- Les dépôts de surface : qui peuvent héberger des bactéries et autres micro-organismes.

4.2 Méthodes électrochimiques :

Sont des techniques utilisées pour étudier les processus électrochimiques qui se produisent à l'interface entre une électrode et un électrolyte. Ces méthodes sont basées sur la mesure de quantités électriques telles que le potentiel électrochimique, la densité de courant, la résistance, l'impédance, etc.

4.2.1 Le potentiel à circuit ouvert :

Le potentiel à circuit ouvert (OCP) fait référence à la différence de potentiel qui existe entre deux électrodes ou une surface métallique et une solution électrolytique lorsqu'elles ne sont

CHAPITRE II : LA DETECTION DE LA CORROSION PAR LES METHODES NON DESTRUCTIVES

pas connectées par un circuit externe. Il est également connu sous le nom de potentiel de repos ou potentiel d'équilibre. Est un paramètre important dans les études d'électrochimie et de corrosion car il fournit des informations sur la thermodynamique et la cinétique des réactions électrochimiques.

4.2.2 La technique du potentiel de demi-cellule :

La méthode du potentiel de demi-cellule est largement utilisée pour évaluer la corrosion des barres d'armature en acier dans le béton. Cette méthode a été introduite dans les années 1950 par Richard F. Stratfull en Amérique du Nord et par le Centre de Corrosion Danois en Europe [5.10]. Elle a été approuvée comme norme par ASTM en 1980[5.5]. Cette technique mesure le potentiel électrochimique de la barre d'armature en acier par rapport à une électrode de référence standard (généralement l'électrode cuivre/sulfate de cuivre (CSE) est utilisée) placée sur la surface du béton, ce qui permet d'indiquer le risque de corrosion de l'acier. La figure illustre les principes de cette méthode de mesure.

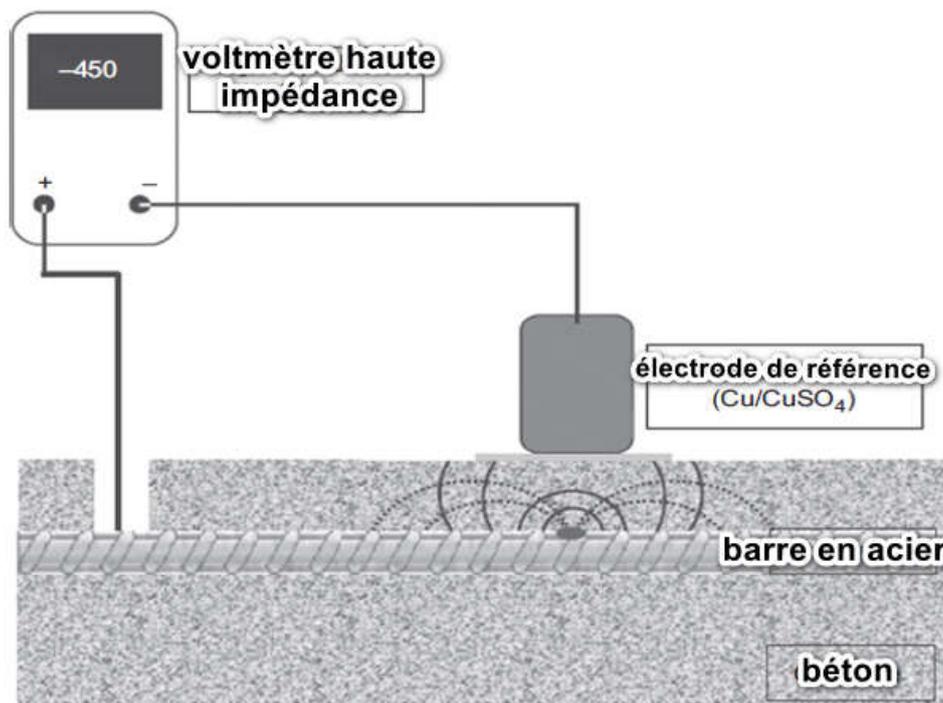


FIGURE 2. 6 APPAREIL POUR LA METHODE DE POTENTIEL DE DEMI-CELLULE DECRITE DANS L'ASTM C876 POUR MESURER LE POTENTIEL DE SURFACE ASSOCIE AU COURANT DE CORROSION [5].

4.2.3 Résistances à la polarisation :

La technique connue sous le nom de résistance à la polarisation (R_p) ou de résistance à la polarisation linéaire (LPR)[7] consiste à mesurer la résistance d'un échantillon à l'oxydation lorsqu'un potentiel externe est appliqué. Les mesures de LPR peuvent être effectuées en

CHAPITRE II : LA DETECTION DE LA CORROSION PAR LES MZTHODES NON DESTRUCTIVES

appliquant un potentiel dans la plage d'environ 10 mV autour de l' E_{corr} , soit par une impulsion constante (potentiostatique) soit par un balayage de potentiel (potentiodynamique), et en enregistrant la réponse en courant. Alternativement, une impulsion de courant (galvanostatique) ou un balayage de courant (galvanodynamique) peut être appliqué, et la réponse de potentiel peut être mesurée. Le courant de corrosion, qui est inversement proportionnel au R_p , peut être calculé à partir de cette mesure[5].

R_p est déterminé en calculant la pente de cette région linéaire :

$$R_p = \frac{\Delta E}{\Delta I}$$

Où ΔE = changement de potentiel et ΔI = changement de courant. L'équation de Sterne-Geary relie le courant de corrosion à R_p [5.6].

$$I_{corr} = \frac{B}{R_p}$$

$$B = \frac{\beta_a \beta_b}{2.3(\beta_a + \beta_b)}$$

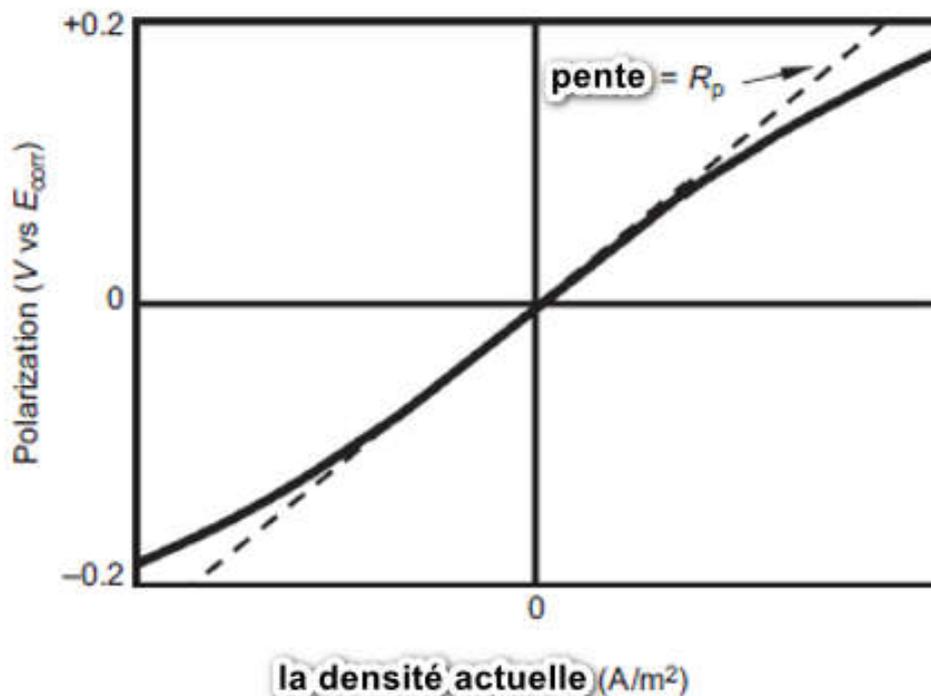


FIGURE 2. 7ILLUSTRATION SCHEMATIQUE DE LA COURBE DE POLARISATION LINEAIRE [5]

La densité de courant de corrosion, i_{corr} , peut être calculée en divisant le courant de corrosion (I_{corr}) par la surface de la zone polarisée (A) :

$$I_{corr} = \frac{B}{R_p A}$$

B est la constante de Stern-Geary et b_a et b_c sont les constantes de Tafel anodique et cathodique, respectivement. La valeur de B doit être déterminée empiriquement. Cependant, pour la plupart des cas, on suppose qu'elle est de 0,026 V pour la corrosion active et de 0,052 V pour la corrosion passive de l'acier dans le béton [5.7].

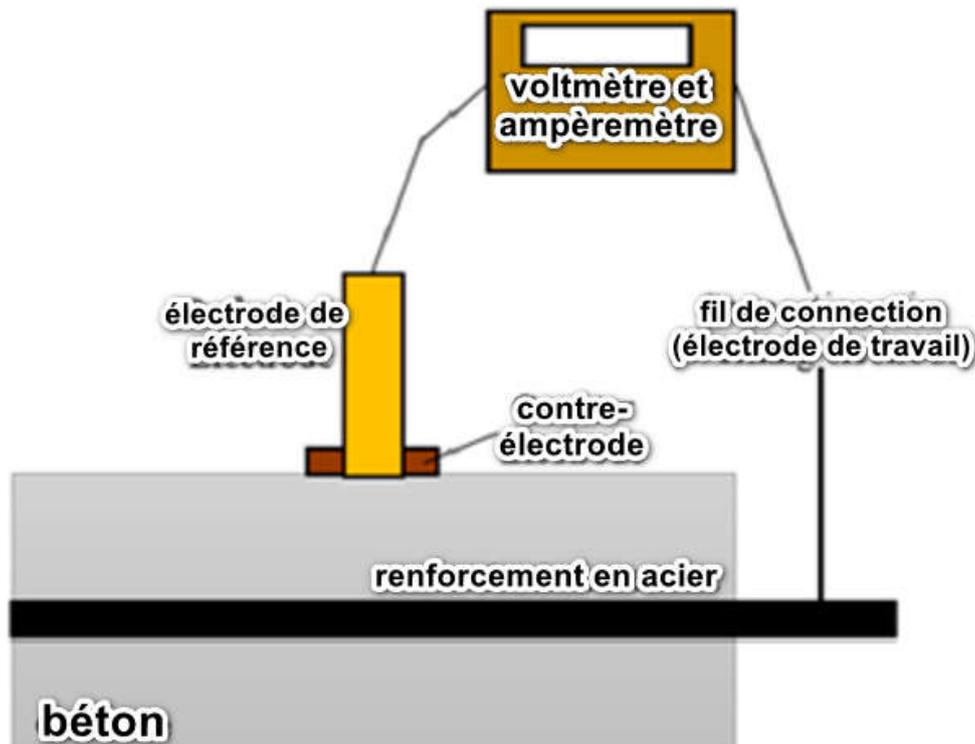


FIGURE 2. 8 APPAREIL POUR LA METHODE DE RESISTANCE A LA POLARISATION [7].

4.2.4 La méthode d'impulsion galvanostatique :

La méthode d'impulsion galvanostatique a été introduite pour une application sur le terrain en 1988[5.8]. Cette méthode est une technique de polarisation rapide et non destructive. Une impulsion de courant anodique de courte durée est appliquée de manière galvanostatique entre une contre-électrode placée sur la surface du béton et l'armature. Le courant appliqué est généralement compris entre 10 et 100 mA et la durée d'impulsion typique est comprise entre 5 et 30 s. L'armature est polarisée de manière anodique et la variation résultante du potentiel électrochimique de l'armature est mesurée par rapport à une électrode de référence et enregistrée en fonction du temps de polarisation. Une réponse potentielle typique pour une armature en train de corroder est montrée dans la Figure2.9.

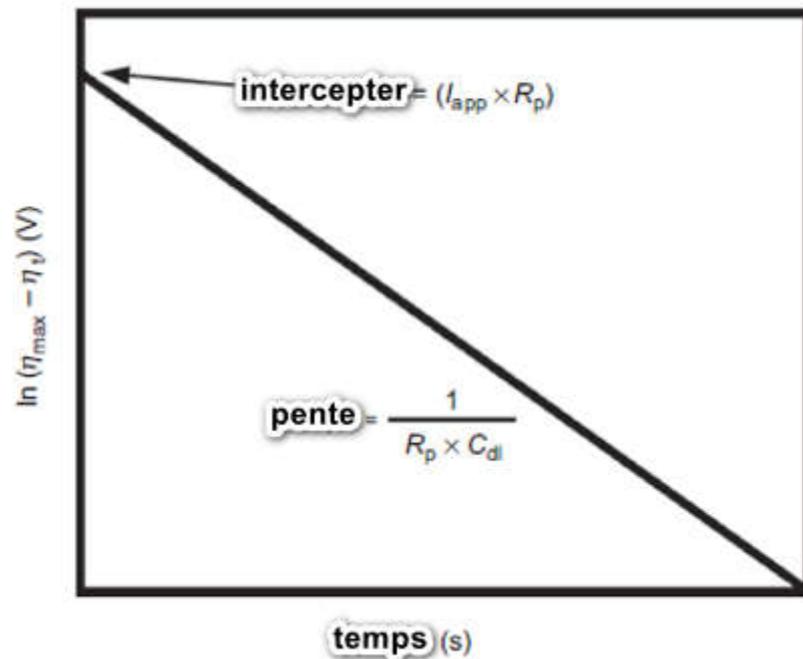


FIGURE 2. 9 ILLUSTRATION SCHEMATIQUE DE L'EQUATION [5].

Lorsque le courant constant, I_{app} , est appliqué à l'armature, la polarisation de l'armature, η_t , à un temps donné t peut être exprimée comme suit [5.9] :

$$|\eta_t = I_{app} \times \left[R_p \times \left[1 - e^{\left(\frac{-t}{R_p C_{dl}} \right)} \right] + R_{\Omega} \right] \quad \text{Équation 9.11 dans [5.9]. (1)}$$

a) Matériel avec la bague de garde :

Une électrode auxiliaire de comptage, appelée électrode de garde, peut être utilisée pour confiner la polarisation à une longueur connue de barres d'armature. L'électrode de comptage et la bague de garde sont généralement disposées sous forme d'anneaux métalliques annulaires avec une électrode de référence au centre. Le potentiel ou le courant appliqué depuis la bague de garde est destiné à repousser les signaux provenant de l'électrode de comptage centrale et les confine à une zone de la structure située approximativement sous l'électrode de comptage, comme illustré schématiquement dans la Figure 2.10 [5].

Il existe deux instruments commerciaux bien connus basés sur la technique d'impulsions galvanostatiques :

1. Le GECOR est considéré comme un instrument de technique de pouls galvanostatique bien qu'il soit souvent appelé dispositif LPR [9]. L'ensemble électrode dispose d'un total de trois électrodes de référence, une située au centre et deux situées entre l'électrode de comptage et la

bague de garde. Ces dernières sont utilisées pour ajuster le courant de l'électrode de garde afin de maintenir la différence de potentiel entre les deux électrodes de référence constante pendant la procédure de polarisation[5].

2. Le GalvaPulse est un instrument à impulsions galvanostatiques développé par l'Institut FORCE au Danemark. La confinement du signal se fait sur une longueur de barre de 70 mm, et les mesures peuvent être effectuées avec ou sans l'électrode de bague de garde. La cellule de mesure dispose d'une électrode de référence Ag/AgCl au centre avec une électrode de comptage en zinc et une bague de garde en zinc [5].

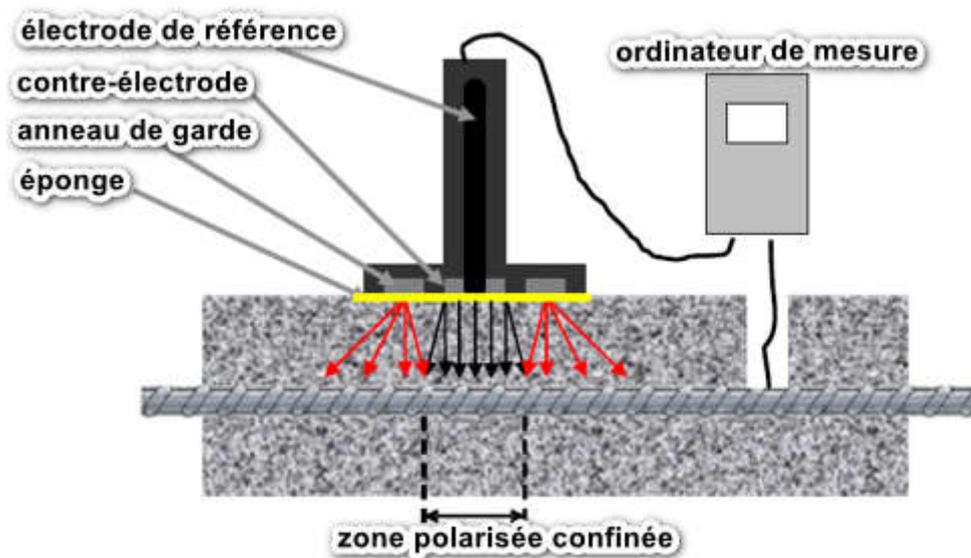


FIGURE 2. 10 PLAN SCHEMATIQUE DU GALVAPULSE™ AVEC PROTECTION POUR LIMITER LA ZONE POLARISEE LORS DE LA MESURE DE LA CORROSION (MODIFIER) [5].

4.2.5 Résistivité du béton :

La résistance de la béton peut servir d'indicateur de sa capacité à conduire un courant électrique et à faciliter la corrosion. décrit la méthode des quatre électrodes de Wenner comme moyen de mesurer la résistivité du béton. Cette méthode implique quatre électrodes disposées linéairement sur la surface du béton, avec un courant alternatif ou continu passant I, à travers les électrodes les plus éloignées. La différence de potentiel entre les électrodes intérieures V , est ensuite mesurée pour déterminer la résistivité, R . La figure illustre la configuration expérimentale de cette méthode[8.2].

La résistance du matériau entre les électrodes internes est donnée par [8.2] :

$$R = \frac{V}{I}$$

Est la résistance du béton donnée par [8.1] :

$$\rho = 2\pi aR$$

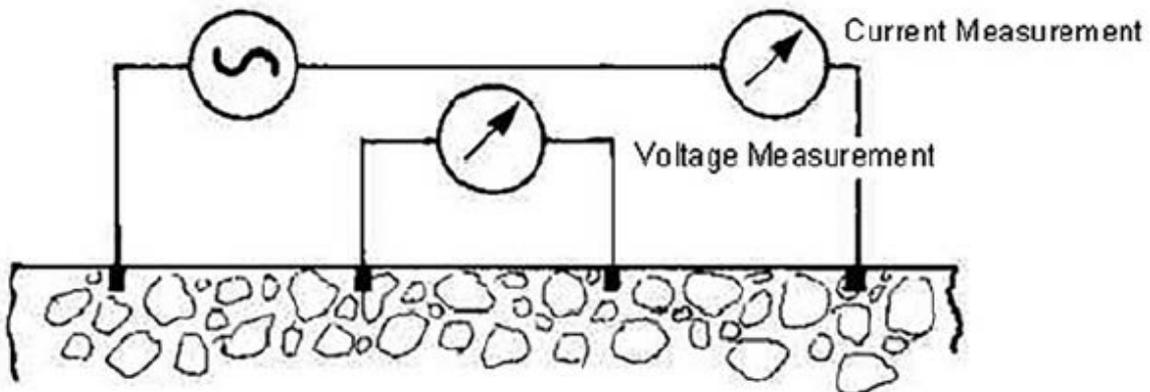


FIGURE 2. 11 MESURE DE LA RESISTIVITE DU BETON [11]

4.3 Les méthodes d'ondes élastiques :

4.3.1 La vitesse d'impulsion ultrasonore (VIU) :

Cette méthode consiste à mesurer la vitesse de propagation d'impulsions ultrasonores dans un matériau de construction, et fait partie des méthodes de test non-destructives. Le principe de cette méthode est de mesurer le temps requis pour que les impulsions soient transmises à travers le matériau. Lorsque la distance entre l'émetteur et le récepteur est connue, la vitesse d'impulsion peut être calculée. Ces vitesses sont étalonnées en connaissant la résistance et les caractéristiques mécaniques du béton. Elles peuvent ensuite être utilisées pour tout autre type de béton en utilisant la même procédure pour identifier la résistance à la compression, les modules d'élasticité dynamiques et statiques, ainsi que le coefficient de Poisson[1.3].



FIGURE 2. 12 TRANSMISSION EN SURFACE [1.3].

4.3.2 Echo d'Impulsion Ultrasonore (EIU) :

Echo d'Impulsion Ultrasonore (EIU) fait référence à une technique utilisée pour évaluer l'état des structures en utilisant des ondes ultrasonores. L'EIU est utilisé pour détecter et évaluer les défauts ou les anomalies dans les matériaux de construction tels que le béton, le métal ou la pierre. Il est particulièrement utile pour détecter des problèmes tels que les fissures, les vides, les délaminations, ou les zones de corrosion dans les éléments structuraux. est une technique non destructive qui permet d'inspecter les structures de manière précise et rapide, sans endommager les matériaux. Elle est utilisée dans des domaines tels que l'évaluation des ponts, des tunnels, des barrages, des fondations, des structures en béton armé, et d'autres éléments de génie civil afin d'assurer leur intégrité structurelle et de prévenir les défaillances potentielles.



Figure 2. 13 Mesure EIU- plusieurs émetteurs/récepteurs montés dans une seule tête [8.3].

4.3.3 Impact Echo :

Lors d'un essai de type Impact Echo, des ondes de contraintes transitoires élastiques, de basse fréquence, sont générées en tapant légèrement sur la surface du béton à tester à l'aide d'un petit poids. Ces ondes se propagent à travers le béton et sont réfléchies par les discontinuités dues aux changements d'impédance acoustique (en partie affectée par la densité du béton). Un transducteur placé sur la surface adjacente au point d'impact détecte les ondes réfléchies lorsqu'elles rebondissent entre la surface du béton et les discontinuités.

Lorsque des défauts tels que des vides ou des délaminations offrent une barrière significative à l'onde, des réflexions de l'énergie de l'onde provoquent un pic d'amplitude à la fréquence correspondante et la distance jusqu'au défaut peut être calculée.



FIGURE 2. 14 MESURE PAR IE [8.3].

4.4 Les méthodes électromagnétiques :

4.4.1 Radar à Pénétration de Sol (RPS) :

Le Radar à Pénétration de Sol (RPS) utilise des ondes radio pour détecter les variations dans les propriétés diélectriques des matériaux.

Cette technique implique un émetteur qui envoie des ondes radio dans le matériau, et un récepteur qui enregistre les ondes réfléchies. Les ondes sont réfléchies aux points où il y a un changement de la constante diélectrique du matériau [8.4].

Les changements de constante diélectrique, tels que ceux causés par des vides ou des délaminations, peuvent indiquer la présence de défauts. La profondeur de tels défauts peut être déterminée en calculant le temps de parcours de l'onde et en estimant la vitesse de l'onde.

Le RPS peut également être utilisé pour localiser les renforcements en acier dans le béton, en particulier dans les zones où le renforcement est particulièrement dense, y compris la détermination de la couverture de béton [8.4].



FIGURE 2. 15 MESURE RPS [8.3].

CHAPITRE II : LA DETECTION DE LA CORROSION PAR LES METHODES NON DESTRUCTIVES

4.5 Canin+ :

Le Proceq CANIN+ est un instrument de contrôle non destructif (CND) utilisé pour détecter et localiser des objets cachés tels que des vides, des cavités, des tuyaux et des câbles dans les structures en béton. Il utilise la technologie du radar à pénétration de sol (GPR) pour émettre et recevoir des ondes électromagnétiques qui pénètrent le béton et se reflètent lorsqu'elles rencontrent un objet caché. Les ondes réfléchies sont ensuite analysées par le logiciel de l'instrument pour créer une image de l'emplacement et de la taille de l'objet.

Le CANIN+ est conçu pour une utilisation facile, avec une interface simple et des commandes intuitives. Il est également hautement portable, avec un design léger et ergonomique qui permet une utilisation à une main. L'instrument convient à un large éventail d'applications, notamment les inspections de bâtiments et de ponts, les évaluations de routes et de chaussées, et la cartographie des services publics.



FIGURE 2. 16 APPAREIL DE MESURE POTENTIEL CANIN+ PRISE PAR LES AUTEURS

4.5.1 Le principe et le mode opératoire de canin+ :

Le principe de mesure de potentiel de demi-cellule est une méthode utilisée par le Proceq Canin+ pour évaluer le risque de corrosion des barres d'armature en acier (barres d'armature) dans les structures en béton armé. Le principe est basé sur le fait que lorsque l'acier est exposé à un électrolyte (comme l'humidité dans le béton), il peut développer une différence de potentiel par rapport à une électrode de référence. Le Proceq Canin+ mesure cette différence de potentiel à l'aide d'un capteur de demi-cellule et d'une électrode de référence pour déterminer la probabilité de corrosion sur les barres d'armature.

CHAPITRE II : LA DETECTION DE LA CORROSION PAR LES METHODES NON DESTRUCTIVES

les étapes de base impliquées dans le principe de mesure de potentiel de demi-cellule à l'aide du Proceq Canin+ :

Tout d'abord, nettoyez la surface du béton autour de la zone où se trouvent les barres d'armature. Cela garantit qu'il n'y a pas de débris ou de contamination pouvant interférer avec la mesure.

Placez une électrode de référence sur la surface de béton nettoyée. Cela sert de norme par rapport à laquelle le capteur de demi-cellule mesure la différence de potentiel des barres d'armature en acier.

Connectez le capteur de demi-cellule à l'instrument Proceq Canin+ et placez-le sur la surface de béton près des barres d'armature. Le capteur de demi-cellule est une petite sonde qui contient une électrode sulfate de cuivre-cuivre.

Appuyez sur le capteur de demi-cellule contre la surface de béton et attendez que la lecture se stabilise. Le Proceq Canin+ affichera la différence de potentiel mesurée entre le capteur de demi-cellule et l'électrode de référence.

Une tension négative indique un risque élevé de corrosion, tandis qu'une tension positive indique un faible risque de corrosion. Le Proceq Canin+ fournit également une valeur numérique pour la différence de potentiel qui peut être utilisée pour comparer les mesures prises à différents endroits.

Enfin, enregistrez la mesure et son emplacement. Répétez le processus à différents endroits sur la surface de béton pour obtenir une évaluation complète du risque de corrosion des barres d'armature dans la structure.

Les ordres typiques de magnitude pour le potentiel de la demi-cellule de l'acier dans le béton mesuré par rapport à une électrode de référence Cu/CuSO₄ se situent dans la plage suivante (RILEM TC 154-EMC) :

- Béton saturé en eau sans O₂ : de -1 000 à -900 mV ;
- Béton humide, contaminé par du chlorure : de -600 à -400 mV ;
- Béton humide, sans chlorure : de -200 à +100 mV ;
- Béton humide carbonaté : de -400 à +100 mV ;
- Béton sec carbonaté : de 0 à +200 mV ;
- Béton sec non carbonaté : de 0 à +200 mV ;

5 Les Méthodes de protection contre la corrosion de l'acier dans le béton :

5.1 Protection cathodique :

En 1957, le premier exemple de protection cathodique utilisée sur des structures en béton a été rapporté. La technique a commencé à être largement utilisée pour protéger les tabliers de ponts contaminés par des sels de déneigement à partir de 1973 en Amérique du Nord [5.12]. La protection cathodique fonctionne en modifiant le potentiel électrochimique de l'acier pour des valeurs plus négatives, comme le montre la Figure. Pour atteindre cette modification de potentiel, une anode externe est connectée à l'acier et un courant électrique direct (DC) est passé à travers l'armature en utilisant une alimentation électrique redressée. Cette anode externe est montée sur la surface du béton, et la borne positive d'une source de courant continu basse tension est connectée au treillis, tandis que la borne négative est connectée aux barres d'acier [5.11].

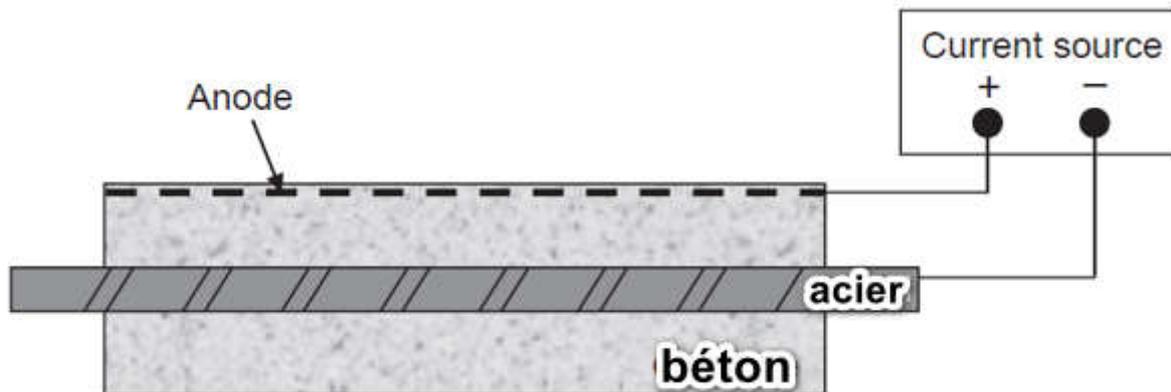


FIGURE 2. 17 PROTECTION CATHODIQUE[5]. MODIFIER

5.1.1 Les effets indésirables de la protection cathodique :

Si le béton utilisé pour la protection cathodique contient des granulats réactifs aux alcalis, l'augmentation de l'alcalinité autour de l'armature pourrait potentiellement causer des dommages. Il est donc important de prendre en compte le risque de réaction alcali-granulat si la structure à protéger contient de tels granulats. Un autre effet négatif de la protection cathodique est la perte potentielle d'adhérence entre l'armature et le béton à des potentiels très négatifs, qui peut se produire à des densités de courant élevées. Cependant, l'effet secondaire le plus significatif est la fragilisation de l'acier due à l'évolution critique de l'hydrogène dans le béton précontraint. L'évolution de l'hydrogène ne peut se produire qu'à des potentiels plus négatifs d'environ 950 mV par rapport à une électrode de calomel saturée (SCE) dans l'environnement alcalin du béton. Les effets de fragilisation ne sont pas produits à des

CHAPITRE II : LA DETECTION DE LA CORROSION PAR LES METHODES NON DESTRUCTIVES

potentiels plus positifs que 900 mV (vs SCE). Par conséquent, pour éviter le risque de fragilisation de l'hydrogène dans l'acier sensible, il convient de fixer une limite inférieure de potentiel de 900 mV (vs SCE) pour l'acier in[10].

5.2 REVÊTEMENT ÉPOXY DES ARMATURES EN ACIER :

L'utilisation de types spécifiques de revêtements époxy pour peindre les barres d'acier est essentielle pour protéger l'acier contre la corrosion. Cette méthode s'est révélée particulièrement efficace pour l'acier exposé à l'eau de mer, comme le démontre une étude menée par la Federal Highways Association (FHWA), qui a évalué l'application de revêtements époxy sur des renforcements en acier soumis à une attaque par les chlorures. De plus, plusieurs études de recherche, notamment celles menées par Pike et al. ont souligné l'importance de peindre les renforcements en acier. Les revêtements époxy ont été utilisés pour peindre l'acier renforcé dans les ponts et les structures offshore depuis 1970[12].

5.2.1 Effet négatif de la peinture :

La peinture peut également réduire la résistance de liaison entre l'acier et le béton, ce qui peut avoir un impact négatif sur l'intégrité structurelle du béton. Cette diminution de la résistance de liaison peut être compensée en augmentant la longueur de développement des barres d'acier, comme le prescrit le code de l'American Concrete Institute (ACI). Dans l'ensemble, les effets de la peinture des barres d'armature en acier sur les structures en béton doivent être soigneusement considérés et évalués pour assurer la sécurité et la durabilité de la structure [13].

5.3 Les inhibiteurs :

Les inhibiteurs de corrosion sont des adjuvants chimiques ajoutés au béton de ciment Portland pendant le mélange, généralement en très faibles concentrations. Les inhibiteurs de corrosion peuvent être classés en deux catégories : organiques et inorganiques. Les inhibiteurs de corrosion organiques sont généralement des composés qui contiennent des atomes d'azote, de soufre ou d'oxygène et forment un film protecteur à la surface du matériau pour prévenir la corrosion. Les inhibiteurs de corrosion inorganiques sont généralement des ions métalliques qui réagissent avec le matériau pour former une couche protectrice [14].

5.3.1 Durex Corrosion inhibitors :

Les inhibiteurs de corrosion Durex (DCI et DCI-S) sont des adjuvants inorganiques pour béton qui agissent comme des inhibiteurs de corrosion. Le DCI c

CHAPITRE II : LA DETECTION DE LA CORROSION PAR LES METHODES NON DESTRUCTIVES

contient du nitrite de calcium, tandis que le DCI-S a la même composition mais inclut également un retardateur de prise. Ces adjuvants sont disponibles commercialement depuis 1978 et sont utilisés pour ralentir ou prévenir la corrosion dans les structures en béton armé. Le DCI et le DCI-S agissent en passivant l'anode grâce à un mécanisme de protection électrochimique d'oxydation-réduction. Ils réduisent la vitesse de pénétration (migration) des ions chlorure et augmentent le seuil d'initiation de corrosion, inhibant ainsi la corrosion. Lorsqu'ils sont combinés avec une fine de silice, la vitesse de pénétration des ions chlorure est encore plus réduite, ce qui se traduit par un gain net de résistivité[14].

5.3.2 Ferrogard 901 :

Ferrogard 901 est un inhibiteur de corrosion liquide utilisé dans la protection des structures en béton armé. Il s'agit d'un inhibiteur de corrosion à base d'eau, organique et chimiquement actif qui peut être appliqué par pulvérisation ou par brossage sur la surface du béton. Il est efficace pour réduire le taux de corrosion de l'armature en acier dans les structures en béton exposées à des conditions environnementales difficiles, telles que les zones marines ou côtières. Il peut être appliqué pendant la construction de nouvelles structures en béton ou en tant que traitement d'entretien pour les structures existantes. Il fonctionne en formant une couche protectrice à la surface de l'armature en acier, ce qui empêche l'eau et d'autres substances corrosives de pénétrer et d'atteindre l'acier. La couche protectrice est formée par un processus d'adsorption, qui est l'adhésion de molécules à une surface. Est fabriqué par Sika [14].

5.3.3 Catexol 1000 CI :

Utilisé dans la protection des métaux contre la corrosion. C'est un composé organique qui peut être ajouté à divers processus industriels, tels que les fluides de travail des métaux, les revêtements et les lubrifiants, pour prévenir ou ralentir la corrosion des métaux. Catexol 1000 CI fonctionne en formant une couche protectrice sur la surface du métal, ce qui inhibe la réaction du métal avec des substances corrosives, telles que l'eau ou les acides. Il est efficace pour réduire le taux de corrosion et prolonger la durée de vie des métaux dans diverses applications industrielles.

5.3.4 Rheocrete 222 et Rheocrete 222⁺ :

Rheocrete 222⁺ est un adjuvant organique pour béton inhibiteur de corrosion. Il est fabriqué et commercialisé par Master Builders, Inc. C'est une formulation améliorée de Rheocrete 222 et contient des amines et des esters dans un milieu aqueux. Rheocrete 222 est un inhibiteur combiné, à la fois anodique et cathodique (type mixte passif-actif). Il protège les barres

CHAPITRE II : LA DETECTION DE LA CORROSION PAR LES METHODES NON DESTRUCTIVES

d'armature en acier de deux manières : premièrement, il forme un film organique résistant à la corrosion qui est adsorbé sur la surface de l'acier. Deuxièmement, il recouvre également les pores de la matrice de béton, ce qui ralentit la migration des ions chlorure. Rheocrete 222 et Rheocrete 222⁺ n'ont pas été disponibles pendant très longtemps, comparé au nitrite de calcium. Par conséquent, il y a moins de données publiées sur leur performance. Rheocrete 222 a été utilisé dans un certain nombre de parkings, ainsi que dans quelques ponts et structures marines. Le taux de dosage recommandé est de 5 L/m (1 gal yd³). Il est généralement ajouté à l'eau de la bétonnière. Le taux de dosage n'est pas ajusté en fonction de la corrosivité anticipée de l'environnement de service prévu[14].

6 Conclusion :

La corrosion des armatures est un problème majeur dans l'industrie de la construction. Elle peut causer des dommages importants aux structures en béton armé, compromettant leur durabilité et leur sécurité.

Pour contrer ce phénomène, il est essentiel de comprendre les différents types de corrosion, leurs causes et leur mode de destruction. La mesure du potentiel électrique à l'aide d'appareils tels que le Canin Plus permet de détecter la présence et le stade de la corrosion sans endommager la structure. Cela permet une intervention précoce et ciblée pour limiter les dégâts.

Dans le troisième chapitre de notre étude, nous utiliserons cette méthode de mesure du potentiel électrique pour évaluer l'étendue de la corrosion dans les structures étudiées. Cela nous permettra de recueillir des données précises sur le niveau de corrosion et d'adapter nos stratégies de protection en conséquence.

CHAPITRE III :
CARACTERISATION DES
MATERIAUX ET
TRAITEMENT DES
RESULTATS

1 Introduction :

La principale raison de la dégradation des structures de pont en béton armé est la corrosion de l'acier d'armature due aux chlorures. Ce problème peut considérablement entraver la facilité de maintenance et la sécurité, tout en augmentant les coûts de réparation et d'entretien. Le temps d'initiation à la corrosion joue un rôle essentiel dans la prédiction de la durée de vie d'un élément en béton, car le risque de corrosion de l'acier dépend grandement de la qualité de la conception et de la construction de la couche de protection en béton. Ainsi, le béton agit comme une barrière physique contre les agents agressifs externes.

2 Les composants de béton utilisé :

2.1 Types du granulat :

La dimension du granulat entre 0 et 125 mm, donc les granulats proviennent de l'ENG (carrière de TARGA) :

- Types de sable concassé, de bonne qualité.
- Gravillons concassés, de bonne qualité, le premier de dimension 3/8 et le deuxième de dimension 8/16.



FIGURE3. 1 LES TYPES DU GRANULAIIS PRISE PAR LES AUTEURS

2.2 Les essais concernent les granulats :

2.2.1 Analyse granulométrique :

L'analyse granulométrique est l'opération qui consiste à étudier la répartition des différents grains d'un échantillon. On dénomme les granulats, fines, sables, gravillons ou caillou.

On appelle :

Refus : c'est la quantité de matériau qui est retenue sur le tamis après l'analyse.

Tamisât (Ou Passant) : c'est la quantité de matériau qui passe à travers le tamis après l'analyse.

Les résultats de l'analyse granulométriques dans Annexe A



FIGURE3. 2 LES SERIES DES TAMIS

2.2.2 Gravier 8/16 :

Poids initial d'échantillon sec : 1000g

2.2.3 Gravier 3/8 :

Poids initial d'échantillon sec : 1000g

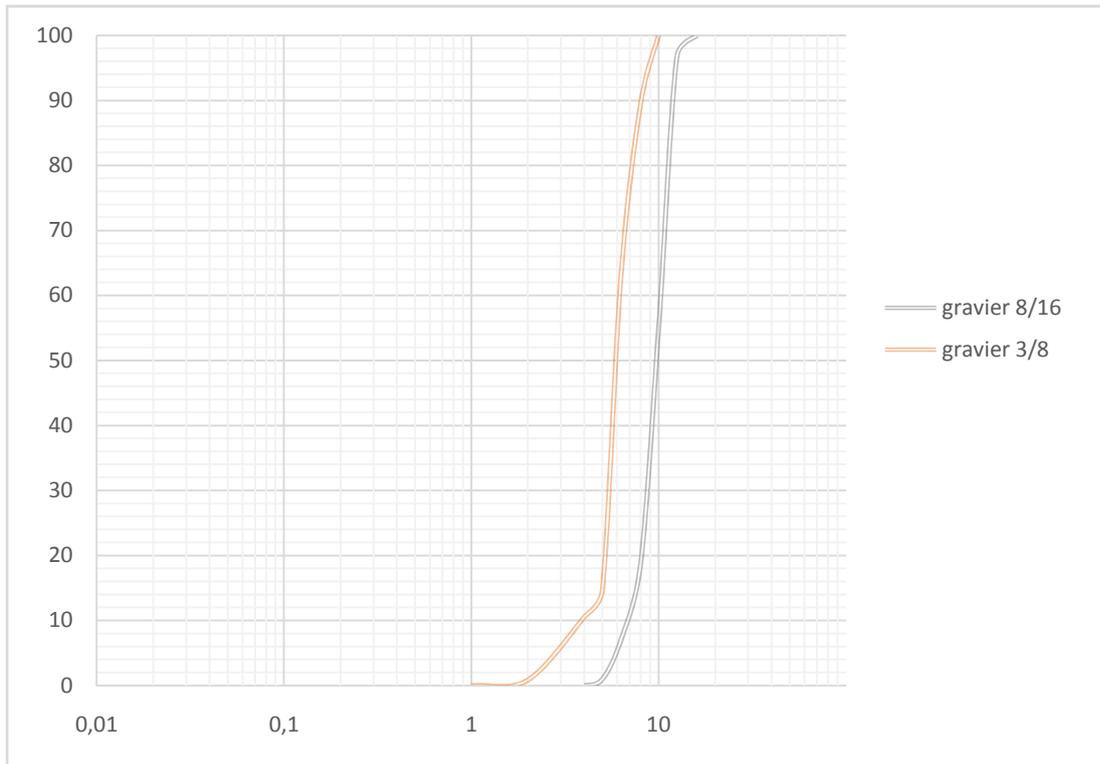


FIGURE3. 3 L'ANALYSE GRANULOMETRIQUE DE GRAVIER

2.2.4 Sable fin (sable 2) :

Poids initial d'échantillon sec : 1000g

2.2.5 Sable grossier (sable 1) :

Poids initial d'échantillon sec : 1000 g

2.2.6 Le module de finesse :MF=2.5

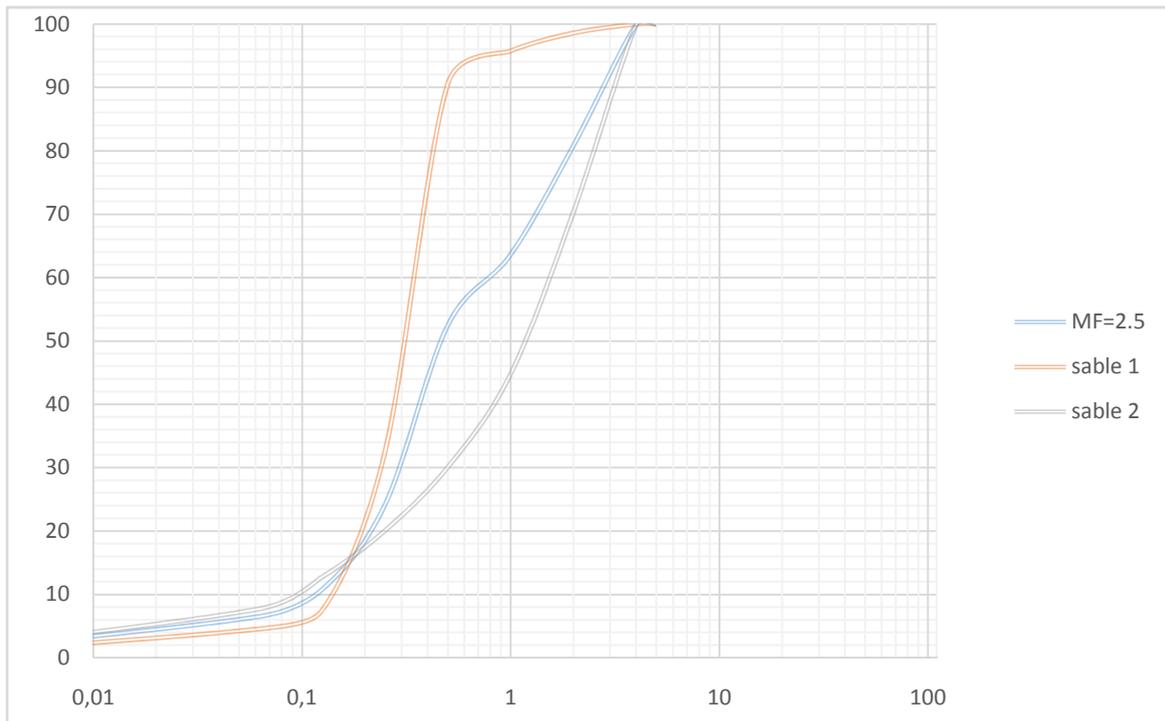


FIGURE3. 4 ANALYSE GRANULOMETRIQUE DU DEFIRENT SABLE

2.3 La masse volumique :

2.3.1 La masse volumique absolu :

Les résultats proviennent de la méthode du l'éprouvette graduée.

TABLEAU3. 1 LA MASSE VOLUMIQUE ABSOLU

La masse volumique absolue			
Sable fin	Sable grossier	Gravier 3/8	Gravier 8/16
$\rho=2.66$	$\rho=2.66$	$\rho=2.6$	$\rho=2.5$



FIGURE3. 5 LES MASSES VOLUMIQUES ABSOLU DU GRANULAIIS PRISE PAR LES AUTEURS

2.3.2 La masse volumique apparente :

Est une mesure de la masse d'un matériau par unité de volume total occupé par le matériau



FIGURE3. 6 LA MASSE VOLUMIQUE APPARENTE PRISE PAR LES AUTEURS

TABLEAU3. 2 LA MASSE VOLUMIQUE APPARENTE

La masse volumique apparente			
Sable fin	Sable grossier	Gravier 3/8	Gravier 8/16
$\rho=1.32$	$\rho=1.65$	$\rho=1.34$	$\rho=1.32$

2.3.3 Essais d'équivalent de Sable :

L'équivalent de sable est une méthode de test utilisée pour mesurer la propreté des granulats fins tels que le sable dans les matériaux de construction. Cette méthode est basée sur la mesure de la quantité de particules fines présentes dans le sable, qui peuvent affecter les propriétés du béton.

Pour effectuer le test d'équivalent de sable, il faut d'abord tamiser un échantillon de sable avec un tamis de 5 mm afin de séparer les particules fines de la taille souhaitée. Ensuite, préparez une quantité de solution lavante (100 ml) que vous versez dans un cylindre gradué, puis ajoutez le sable tamisé (120 g). Utilisez un agitateur pour mélanger le sable et la solution lavante. Après 30 secondes de mélange, laissez la suspension reposer pendant 20 minutes, puis mesurez les éléments suivants :

La hauteur h_1 : sable propre + le floculat

La hauteur h_2 : sable propre

Le sable grossier (sable 1) :

*La mesure visuelle :

$$h_1=9.9$$

$$h_2 =8.5$$

$$\frac{h_2}{h_1} \times 100 = \frac{8.5}{9.9} \times 100 = 85.85\%$$

*la mesure avec le piston :

$$h_1 = 9.9$$

$$h_2 = 8.2$$

$$\frac{h_2}{h_1} \times 100 = \frac{8.2}{9.9} \times 100 = 82.82\%$$

Donc les granulats fins sont propres et conviennent à la fabrication de béton de haute qualité.

2.4 Le type et utilisation de ciment :

Le ciment utilisé dans la fabrication de notre béton est un produit **GICA** de haute qualité de classe **II/A-L 42.5 N**, conforme aux normes et spécifications locales en vigueur. Ce type de ciment a été soigneusement sélectionné pour garantir les meilleures performances de notre béton dans différentes applications de construction. Du groupe industriel des ciments **d'Algérie**. Sa résistance accrue et sa durabilité supérieure en font un choix idéal pour nos projets de construction. Nous veillons à utiliser uniquement du ciment de classe II/A pour assurer la qualité et la fiabilité de notre béton, et ainsi garantir la satisfaction de nos clients.

Le ciment de classe II/A est principalement utilisé dans plusieurs applications de construction, notamment :

Construction de bâtiments résidentiels et commerciaux : Le ciment de classe II/A est couramment utilisé dans la construction de fondations, de dalles, de murs et de planchers de bâtiments résidentiels et commerciaux en raison de sa résistance et de sa durabilité.

Ouvrages d'infrastructure : utilisé dans la construction d'infrastructures routières telles que les chaussées, les trottoirs et les pistes cyclables, ainsi que dans la construction de ponts, de tunnels et d'autres structures d'ingénierie civile en raison de sa résistance élevée.

Construction de barrages et de canaux : la construction de barrages, de canaux et d'autres ouvrages hydrauliques en raison de sa capacité à résister à l'eau et à offrir une durabilité accrue dans des environnements humides et humides.

Projets de génie civil : est utilisé dans la construction de divers projets de génie civil tels que les ouvrages de soutènement, les murs de soutènement, les tunnels, les stations d'épuration, etc., en raison de sa résistance et de sa durabilité.

Projets de construction industrielle : utilisé dans la construction d'usines, d'entrepôts et d'autres structures industrielles qui nécessitent une résistance accrue et une durabilité supérieure.

Projets de construction maritimes : également utilisé dans la construction de structures maritimes telles que les quais, les jetées et les structures de protection côtière en raison de sa résistance à l'eau et à l'humidité.

2.4.1 Composition de ciment :

Chimique :

La composition chimique du clinker de ciment peut varier, mais en général, elle est principalement composée de calcaire (CaCO_3), d'argile ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$), de silice (SiO_2) et de

CHAPITRE III : CARACTERISATION DES MATERIAUX ET TRAITEMENT DES RESULTAS

fer (Fe_2O_3). Les ajouts tels que le gypse ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) sont ajoutés pour réguler la prise et le durcissement du ciment.

Minéralogique :

La composition minéralogique du ciment dépend également de la source des matières premières et du processus de fabrication utilisé. Cependant, les minéraux les plus couramment présents dans le clinker de ciment sont l'alite (C_3S), la belite (C_2S), la celite (C_3A) et la ferrite (C_4AF).



FIGURE3. 7 TYPE DE CIMENT PRISE PAR LES AUTEURS

2.4.2 La masse volumique du ciment :

Nous avons utilisé la méthode de pycnomètre pour déterminer la masse volumique du ciment

TABLEAU3. 3 LA MASSE VOLUMIQUE ABSOLU DU CIMENT

La masse		La masse volumique Absolue
M1=344,14	M2=403,47	$\gamma = 3,01 \text{ g/cm}^3$
Le volume		
V1=0,1	V2=20,2	



FIGURE3. 8 LA MASSE VOLUMIQUE ABSOLU DE CIMENT (PRISE PAR AUTEURS)

2.5 Eau :

TABLEAU3. 4 LES CARACTERISTIQUES CHIMIQUES DE L'EAU DE GACHAGE (ADE AIN T'EMOUCHENT)

CA	MG	NA	K	CL	SO4	NO3	PH	T(°C)
37.7	23.7	145.05	11.06	203.85	25.50	1.29	8.4	24.30

2.6 Acier :

Nous avons utilisé des barres métalliques solides de 10 cm de large et de bonne qualité. Nous avons nettoyé les barres avec une brosse spéciale métallique. Nous voulions nous assurer que les bars étaient tous propres et lisses. Nous avons coupé les barres en petits morceaux de 20 cm de long afin de pouvoir les utiliser pour la construction. (Voire la figure 3.8)



a) après le nettoyage

b) avant le nettoyage

FIGURE3. 9 NETTOYAGE DES ACIERS (PRISE PAR LES AUTEURS)

3 La formulation du béton ordinaire :

3.1 Résistance moyenne à 28 jours :

$$\text{Calcul de } f_{cm} = f_{c28} * 1.15 = 28.75 = 29 \text{MPa}$$

3.2 Rapport C/E :

3.2.1 Détermination de G :

TABLEAU3. 5 DETERMINATION DE G

Qualité du granulats	Granulats fins D _{max} <16mm	Granulats moyens 25mm<D _{max} <40mm	Granulats gros D _{max} >63mm
Excellente	0.55	0.60	0.65
Bonne, Courante	0.45	0.50	0.55
Passable	0.40	0.40	0.45

D_{max}=15mm

G=0.45

*formule de BOLOMEY donne :

$$\rightarrow \frac{C}{E} = \frac{f_{cm}}{G * \sigma_{c28}} + 0.5 \quad \frac{C}{E} + \frac{29}{0.45 * 42.5} + 0.5 = 2.016$$

3.3 Dosage en ciment :

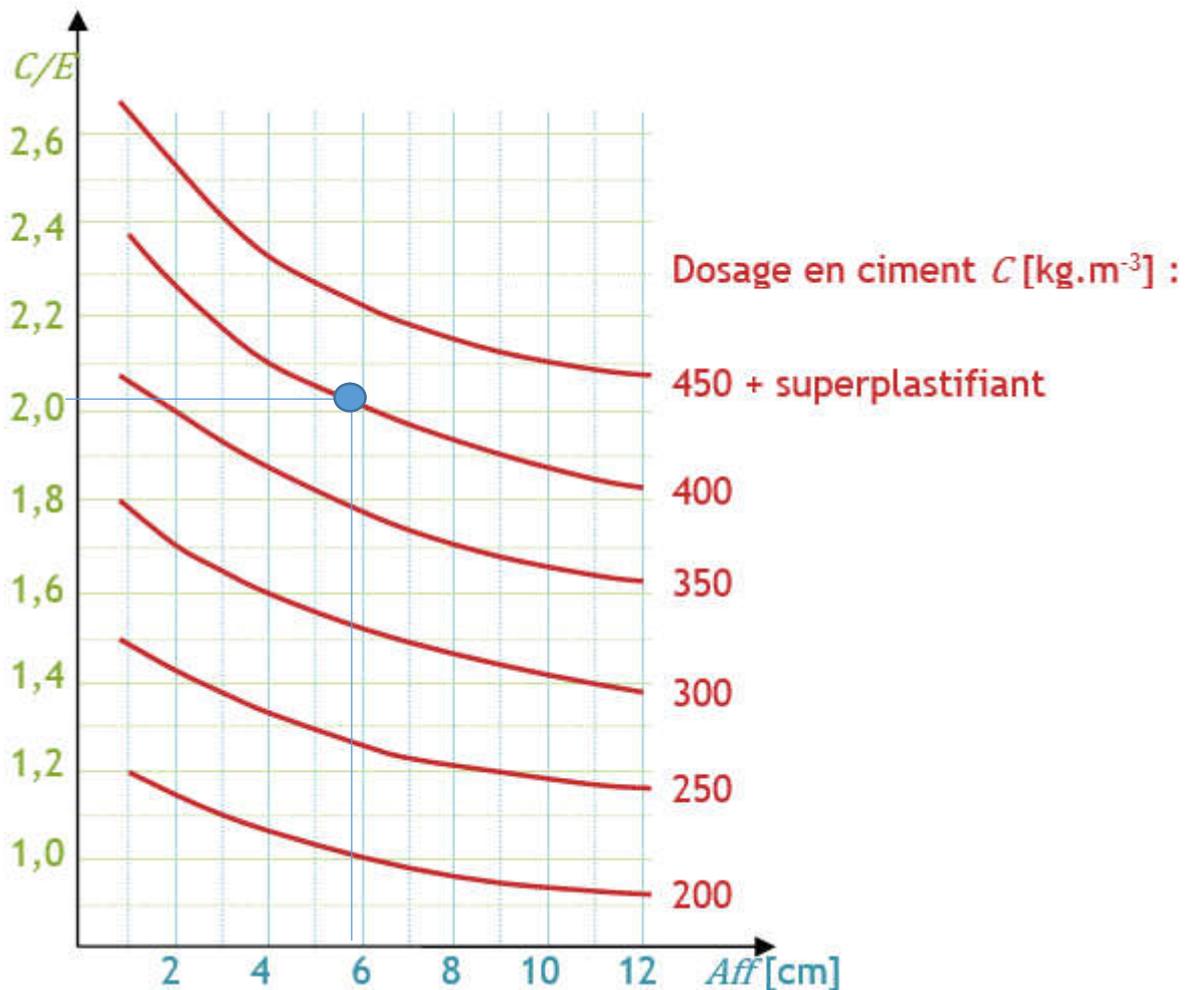


FIGURE3. 10 GRAPHE POUR TROUVER LE DOSAGE DU CIMENT

Aff=6cm

C/E=2.016

3.4 Calcul de E :

$$\frac{E}{C} = 2.016 \Rightarrow E = \frac{C}{2.016} \Rightarrow E = 198.41 \text{L/m}^3$$

3.5 Correction sur E :

tableau3. 6 3.5 Correction sur E

Dimension maximale des granulats D en mm	5	10	16	25	40	63	100
Correction sur le dosage en eau	+15	+5	+4	0	-4	-8	-12

Après interpolation :

$$\text{Eau}=198.41 \Rightarrow E+E \times 4.83\% \Rightarrow EC= 208 \text{ L/m}^3$$

4 optimisation du squelette granulaire :

4.1 validation du sable :

$$\text{Proportion du sable } S_1 = \frac{MF_{opt}-MF_2}{MF_1-MF_2} \text{ et proportion du sable } S_2 = \frac{MF_1-MF_{opt}}{MF_1-MF_2} \quad (1)$$

Les équations (1) viennent de deux équations traduisant que la somme des deux quantités de sable représente la quantité le sable utilisé, et que le module de finesse optimal est proportionnel à la quantité de chaque sable :

Sable 1 \longrightarrow MF=3.1(sable grossier)

Sable 2 \longrightarrow MF=1.45(sable fin)

$$S_1 + S_2 = 1 \quad \text{Et} \quad S_1 \cdot MF_1 + S_2 \cdot MF_2 = (S_1 + S_2) \cdot MF_{opt}$$

$$S_1 \cdot (MF_1 - MF_{opt}) + S_2 \cdot (MF_2 - MF_{opt}) = 0$$

$$S_1 = S_2 \cdot \frac{(MF_{opt} - MF_2)}{(MF_1 - MF_{opt})}$$

$$S_2 \cdot \left[\frac{(MF_{opt} - MF_2)}{(MF_1 - MF_{opt})} + 1 \right] = 1$$

$$S_2 = \frac{(MF_1 - MF_{opt})}{(MF_1 - MF_2)}$$

$$\text{Soit } S_2 = \frac{(3.1-2.5)}{(3.1-1.45)} = 0.37, \text{ donc } 37\% \text{ de sable fin et } 63\% \text{ de sable grossier}$$

4.2 calcul de YA :

CHAPITRE III : CARACTERISATION DES MATERIAUX ET TRAITEMENT DES RESULTAS

TABLEAU3. 6 TABLEAUX POUR DETERMINER LA VALEUR DE TERME CORRECTEUR K

Vibration	Faible		Normale		Puissante	
	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé
Forme des granulats (sable en particulier)						
Dosage en Ciment						
400 + Fluidt	-2	0	-4	-2	-6	-4
400	0	+2	-2	0	-4	-2
350	+2	+4	0	+2	-2	0
300	+4	+6	+2	+4	0	+2
250	+6	+8	+4	+6	+2	+4
200	+8	+10	+6	+8	+4	+6

Note 1 : Correction supplémentaire K_s : Si le module de finesse du sable est fort (sable grossier), une correction supplémentaire sera apportée de façon à relever le point A, ce qui correspond à majorer le dosage en sable et vice versa. La correction supplémentaire sur K peut être effectuée en ajoutant la valeur $K_s = 6 Mf - 15$ (Mf étant le module de finesse du sable qui peut varier de 2 à 3 avec une valeur optimale de l'ordre de 2.5).

Note 2 : Correction supplémentaire K_p : Si la qualité du béton est précisée pompable, il conviendra de conférer au béton le maximum de plasticité et de l'enrichir en sable par rapport à un béton de qualité courante. On pourra pour cela majorer le terme correcteur K de la valeur $K_p = +5$ à $+10$ selon le degré de plasticité désiré.

Valeur de terme correcteur k

$$K=0$$

$$K_s = 6MF - 15 = 6 \cdot 2.5 - 15 = 0$$

$$K_p = 0$$

$$\rightarrow Y_A = 50 - \sqrt{15} + 0 + 0 = 46.12$$

4.3 Calculus XA:

$$X_A = \frac{15}{2} = 7.5$$

4.4 Pourcentage de sable et de gravier :

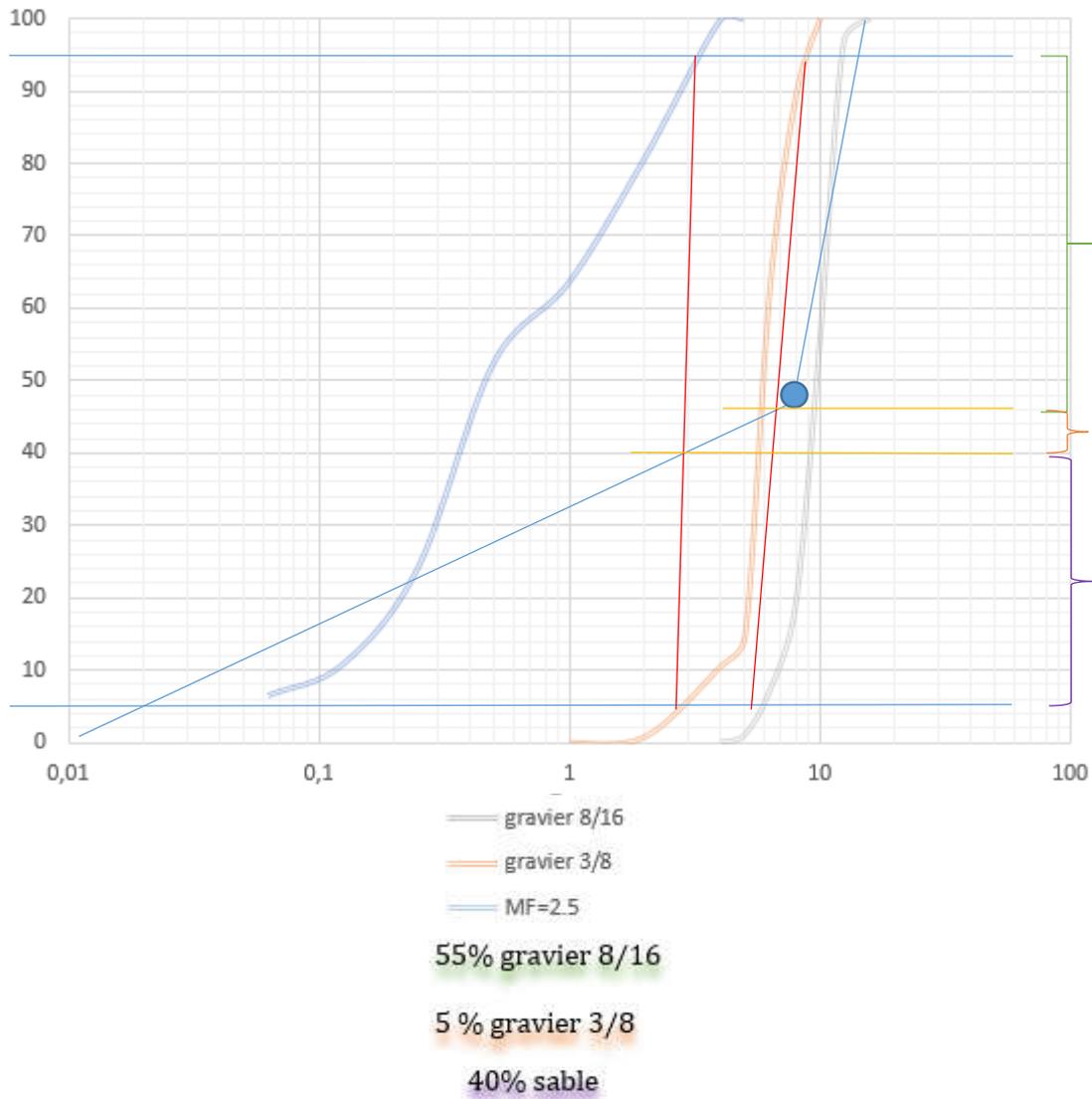


FIGURE3. 11 TRACE COURBE GRANULAIRE OAB

4.5 Coefficient de compacité g :

TABLEAU3. 7 EVALUATION DE L'OUVRABILITE PAR RAPPORT A L'AFFAISSEMENT AU CONE

Plasticité	Serrage	Affaissement A (cm)
Béton très ferme	Vibration puissante	0 à 2
Béton ferme	Bonne vibration	3 à 5
Béton plastique	vibration courante	6 à 9
Béton mou	Piquage	10 à 13
Béton très mou	Piquage léger	13 à 15
Béton liquide (fluide)		≥ 16

Aff=6 béton plastique

CHAPITRE III : CARACTERISATION DES MATERIAUX ET TRAITEMENT DES RESULTAS

TABLEAU 3. 8 TABLEAUX POUR DETERMINER LA COEFFICIENT DE COMPACTITE

Consistance	Serrage	γ coefficient de compacité						
		D = 4	D = 8	D = 12.5	D = 20	D = 31.5	D = 50	D = 80
Molle	Piquage.....	0.750	0.780	0.795	0.805	0.810	0.815	0.820
	Vibration faible.....	0.755	0.785	0.800	0.810	0.815	0.820	0.825
	Vibration normale.....	0.760	0.790	0.805	0.815	0.820	0.825	0.830
Plastique	Piquage.....	0.760	0.790	0.805	0.815	0.820	0.825	0.830
	Vibration faible.....	0.765	0.795	0.810	0.820	0.825	0.830	0.835
	Vibration normale.....	0.770	0.800	0.815	0.825	0.830	0.835	0.840
	Vibration puissante.....	0.775	0.805	0.820	0.830	0.835	0.840	0.845
Ferme	Vibration faible.....	0.775	0.805	0.820	0.830	0.835	0.840	0.845
	Vibration normale.....	0.780	0.810	0.825	0.835	0.840	0.845	0.850
	Vibration puissante.....	0.785	0.815	0.830	0.840	0.845	0.850	0.855

NOTA (simplifié) :
 Ces valeurs sont convenables pour des granulats roulés, sinon il conviendra d'apporter les corrections suivantes :
 Sable roulé et gravier concassé = - 0.01
 Sable et gravier concassés = - 0.03
 Pour des granulats légers on pourra diminuer de 0.03 les valeurs de γ qui correspondent dans ce tableau à des granulats denses ordinaires.

Après l'interpolation on a trouvé que $g = 0.82$

g corrigé = $0.82 - 0.03 = 0.79$

4.6 Volume absolu des constituants :

4.6.1 Volume absolu du ciment :

$$c = \frac{c}{3.01} \rightarrow \frac{400}{3.01} = 132.89$$

4.6.2 Volume absolu des granulats V : sable + gravier

$$V = 1000 * \gamma - c = 1000 * 0.79 - 132.89 = 657.11 \text{ L/m}^3$$

4.6.3 Volume absolu du sable : $V_1 = V \%$

$$\text{Volume de sable 1 : } V_{s1} = 657.11 * 0.63 * 0.40 = 165.9517$$

$$\text{Volume de sable 2 : } V_{s2} = 657.11 * 0.37 * 0.40 = 97.25228$$

4.6.4 Volume absolu du gravier : $V_2 = V \%$

$$V_{g3/8} = 657.11 * 0.05 = 32.8555$$

$$V_{g8/16} = 657.11 * 0.55 = 361.4105$$

4.7 Dosage des différents constituants pour 1 m³ de béton :

CHAPITRE III : CARACTERISATION DES MATERIAUX ET TRAITEMENT DES RESULTAS

TABLEAU3. 9 DOSAGE DES DIFFERENTS CONSTITUANTS POUR 1M3 DE BETON

Ciment		400
Gravier 3/8	$G=v1 \times \gamma g$	85.42
Gravier 8/16	$G=v2 \times \gamma g$	903.52
Sable grossier	$S=v1 \times \gamma s$	440.47
Sable fins	$S=v2 \times \gamma s$	258.69
Eau		208

4.8 Essai d'affaissement au cône d'Abrams :

TABLEAU3. 10 LES RESULTATS DE ESSAI D'AFFAISSEMENT

La pâte	Affaissement
01	60mm
02	50 mm



FIGURE3. 12 ESSAI D'AFFAISSEMENT DE CONE D'ABRAMES

5 Préparation des échantillons :

Première étape :

Au chapitre 02, lors de l'attaque par les chlorures, il a été découvert que les chlorures s'infiltraient dans le béton pendant le coulage. Par exemple, lors du mélange de l'eau avec le béton, il est possible que de l'eau de mer se mélange, surtout dans les zones proches de la mer. En tenant compte de cela, nous avons essayé de reproduire ces conditions dans notre éprouvette. Dans la première formulation, nous avons ajouté 3% de sel pour simuler les conditions de la Méditerranée. Dans la deuxième formulation, nous n'avons rien ajouté, le laissant dans son état normal.



FIGURE3. 13 LES MATERIAUX UTILISES PRISE PAR LES AUTEURS

Deuxième étape :

Nous avons utilisé deux types d'éprouvettes de béton cylindriques, l'une mesurant 80 Centimètres de large et l'autre mesurant 110 centimètres de large, toutes deux ayant une hauteur de 15 centimètres. Nous avons appliqué une armature HA 10 sur les deux éprouvettes afin d'obtenir un enrobage de 3,5 centimètres pour la première et de 5 centimètres pour la deuxième. Cet enrobage joue un rôle essentiel dans la protection du béton contre les éléments indésirables extérieurs. Conformément à la norme NF EN206-1, il est recommandé d'avoir un enrobage d'une épaisseur comprise entre 1,5 et 3 centimètres pour empêcher la pénétration de substances nocives à l'intérieur du béton. Il s'agit de la meilleure protection nécessaire pour les ouvrages en béton armé.



FIGURE3. 14 LE MOULAGE DES EPROUVETTES PRISE PAR LES AUTEURS

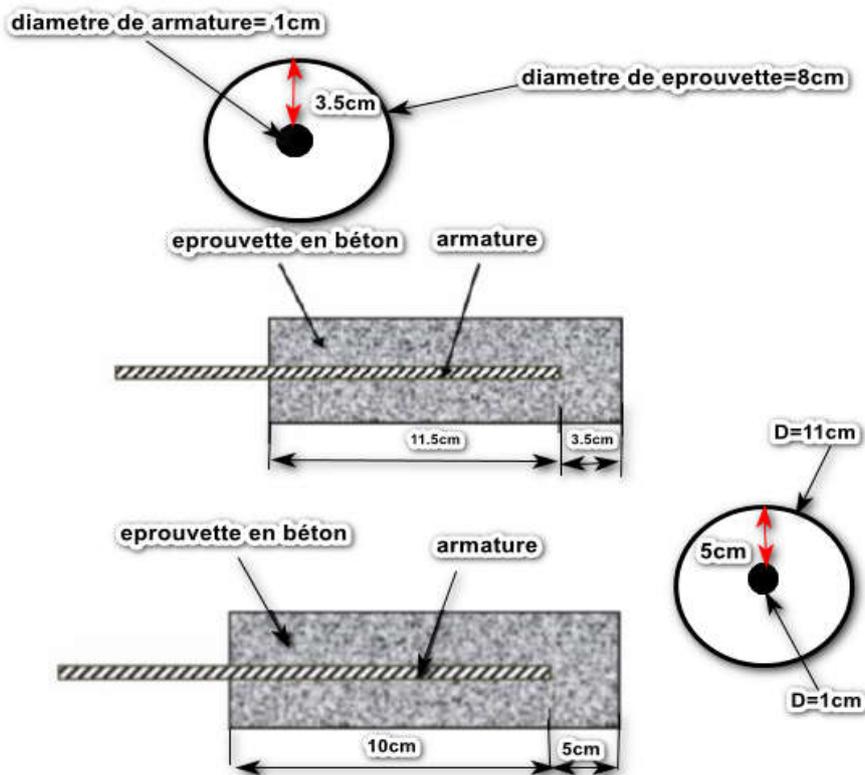


FIGURE3. 15 SCHEMA D'UNE EPROUVETTE CYLINDRIQUE EN BETON ARME

5.1 Les milieux utilisés :

Nous avons utilisé divers types de milieux lors de notre fabrication afin de simuler nos échantillons de manière réaliste, et les résultats obtenus sont cohérents :



FIGURE3. 16 DIFFERENT TYPE DES MILIEUX UTILISER POUR LES EPROUVETTES PRISE PAR LES AUTEURS

Milieu 01 (NAOH) : C'est un milieu de simulation du béton qui inclut l'utilisation de NaOH Afin de reproduire les mêmes conditions environnementales que celles présentes dans une structure en béton armé.

Milieu 02(%5 NACL) : Nous créons une réplique d'océan agressif et rigoureux. Pour qu'il ressemble à l'océan réel près de la Méditerranée, nous devons ajouter une petite quantité de sel (5%). Cela nous permettra de réaliser des tests dans des conditions similaires à celles de l'océan réel

Milieu 03(l'air) : Il est positionné dans un environnement aéré afin de reproduire l'apparence de bâtiments en bord de mer.

5.2 Présentation des résultats :

Après le durcissement des différents éprouvettes on bétons pendant 28 jours, nous les avons introduits dans les trois milieux : milieu 1 (5% de NaOH), milieu 2 (5% de NaCl à l'intérieur + 3% de NaCl à l'extérieur), milieu 3 (sec + NaCl dans le béton). Nous avons commencé à prendre les mesures de potentiel des éprouvettes on béton armée le 10ème jours pour le premier et troisième milieu. Par contre pour les échantillons exposés à l'air, nous avons commencé à mesurer après 13 jours. Les résultats sont exposés dans les tableaux ANNEXE B. Nous avons ensuite tracé des graphes qui sont présentés dans la figure 3.17et 3.18.

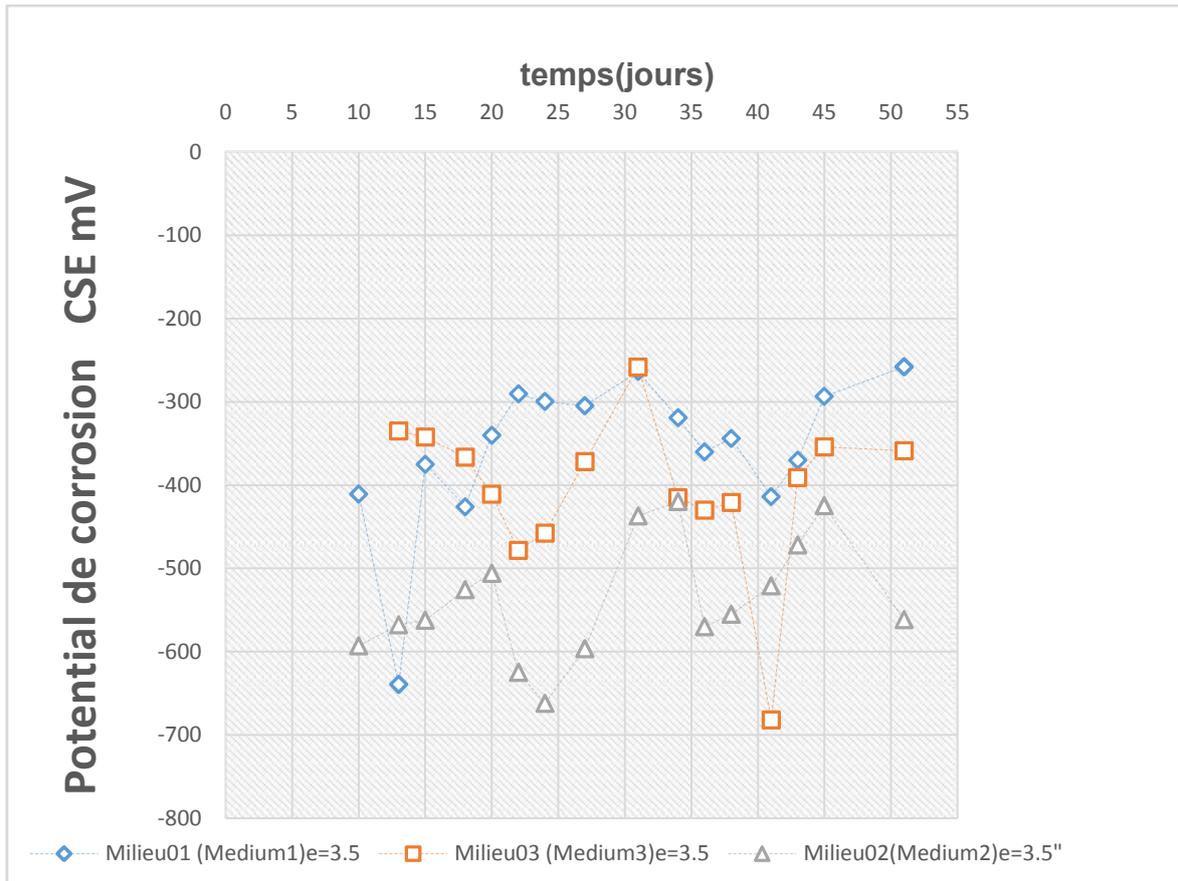


FIGURE3. 17 LES MESURES POTENTIEL DE DIFFERENTS MILIEU D'ENROBAGE DE 3.5CM

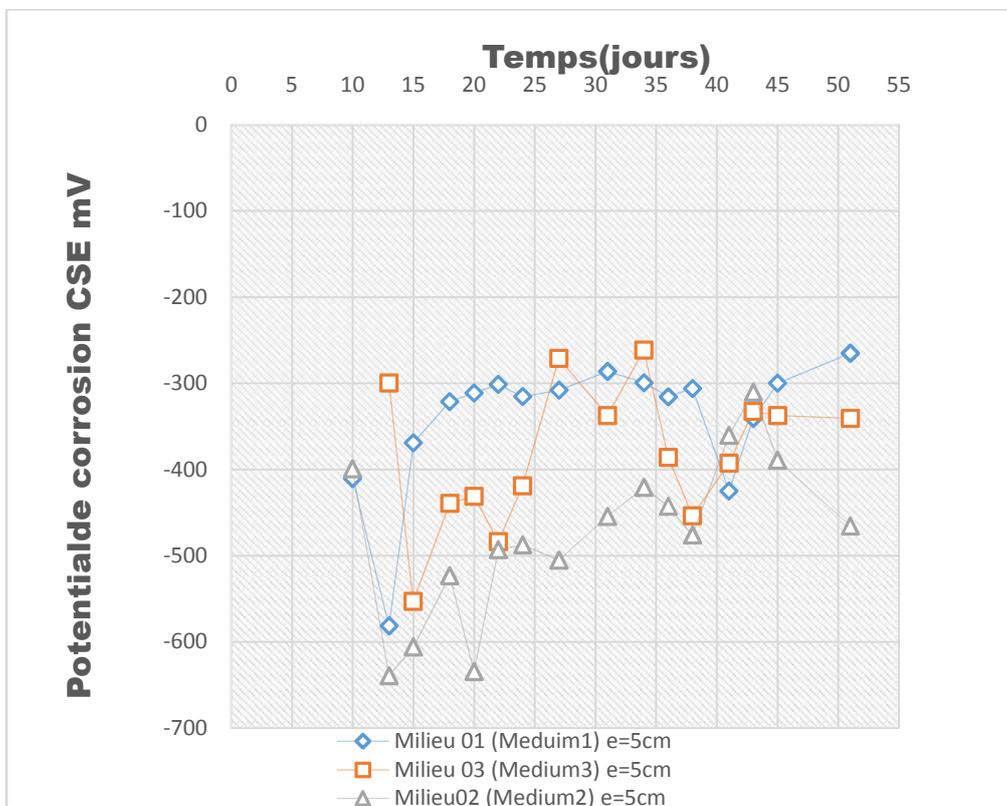


FIGURE3. 18 LES MESURES POTENTIEL DE DIFFERENTS MILIEU ET D'ENROBAGE DE 5 CM

6 Observation et Interprétations des résultats :

Influence du milieu :

Les figures 3.17 et 3.18 représentent la variation du potentiel de corrosion en fonction du temps pour les différents enrobages dans les trois milieux. Nous avons observé que le potentiel de corrosion des échantillons dans le milieu 1 est resté presque constant pendant la durée des mesures, parce que le ph du milieu 1 est presque le même à celui de béton, l'exposition continue de l'armature à l'environnement passivant stabilise le film passif. Se situant entre -250 et -400. Cependant, en comparant ces résultats avec ceux d'autres études [26], qui ont utilisé du (ça (OH)₂ gypses) pour le milieu basique, nous avons remarqué qu'ils ont trouvé un potentiel presque stable entre -100 et -200, ce qui est cohérent pour un milieu basique. De plus, ils ont également trouvé un pourcentage de corrosion atteignant 10%. Cependant, nos mesures de potentiel de corrosion diffèrent de celles des autres auteurs. Après la distraction des échantillons, nous avons constaté que les armatures n'étaient pas corrodées, comme le montre la figure 3.19.

Ainsi, l'utilisation de 5% de Noah a influencé nos résultats. Selon les connaissances générales sur la chimie du béton et les propriétés du Noah en tant que substance alcaline, il est généralement recommandé d'utiliser une concentration plus faible de NaOH, telle que 1% à 3%, pour obtenir une solution basique similaire à celle présente dans le béton, à la qualité du béton (rapport E/C, la nature du ciment) conformément à [27]., à des erreurs de mesure.

Dans le milieu 2, nous observons des valeurs significativement plus négatives par rapport à celles rapportées par les auteurs [26]. De plus, nous notons une fluctuation des valeurs de potentiel entre 10ème jours jusqu'à 45 jours. Nous expliquons cela par les différentes concentrations de sel présentes dans le milieu (5%), le béton (3%), qui entraînent automatiquement l'absorption des ions à l'intérieur du béton afin d'atteindre le même pourcentage que dans le milieu environnant. Une fois que leur concentration atteint un seuil critique, ils commencent à corroder l'acier. Aussi Selon [27]. Lorsque les chlorures pénètrent dans le béton et entrent en contact avec l'acier, leur concentration augmente progressivement.

Les valeurs de potentiel de milieu 03 sont moins négatives qu'en le milieu 02 en raison de sa sécheresse. Le chercheur [27] découvert que la diffusion des ions est moins importante en l'absence d'eau, ce qui signifie que les ions chlorure ne peuvent pas se déplacer rapidement (prendre plus de temps) La raison des valeurs négatives qui se forment à partir de l'humidité

peut être due à la période après le durcissement du béton ou au moment où nous humidifions le béton avant d'obtenir des résultats. Par conséquent, en l'absence d'eau, le déplacement du NaCl dans le béton sera difficile. Les ions devront donc se déplacer lentement, en s'appuyant sur l'air libre.



FIGURE3. 19 : PRESENT PHOTO DE L' ARMATURE APRES LA DESTRUCTION

6.1 Influence de l'enrobage :

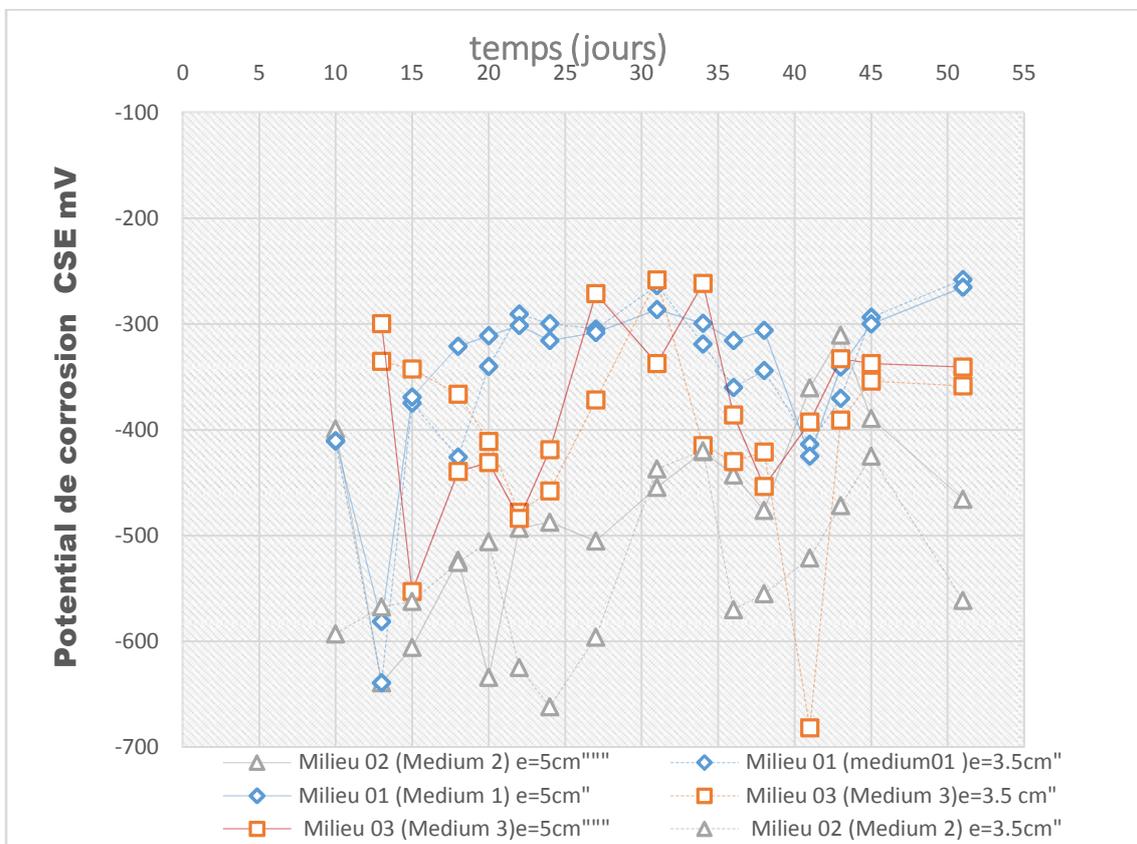


FIGURE3. 20 LES MESURES POTENTIEL DE DIFFERENTS MILIEU ET DIFFERENTS ENROBAGE

La figure 3.20 représente la mesure du potentiel en fonction du temps pour différents enrobage. Nous observons que les valeurs pour une d'enrobage de 3,5 cm généralement sont plus négatives que celles pour 5 cm, c'est car la distance qui dois parcourir les ions (chlorures et hydroxyde) et l'humidité à arriver aux aciers est moins en enrobage de 3.5cm qu'en 5cm. Nous en concluons donc que l'enrobage en béton armé joux en rôle important pour la protection dès l'armature contre la corrosion et d'autres formes de dégradation. et Cela en réduisant les risques liés aux agents agressifs et prolonge la durée de vie de la structure.

De plus, en comparant nos résultats avec ceux des autres auteurs [26], nous avons confirmé l'idée avancée dans le premier chapitre, selon laquelle plus l'enrobage en béton est épais, plus la distance que les ions agressifs ou les gaz corrosifs doivent parcourir avant d'atteindre l'armature en acier est longue [1].

CONCLUSION GENERALE

Conclusion Générale

Lorsque nous installons nos structures en béton armé dans des environnements spécifiques, elles sont exposées à divers processus de détérioration qui peuvent compromettre leur durabilité. Dans les cas les plus graves, ces processus peuvent conduire à une perte d'intégrité structurelle et engendrer un risque pour la sécurité. Parmi les dommages les plus courants subis par les structures en béton armé, on trouve la corrosion des armatures en acier.

Les résultats exposés dans ce mémoire mettent en évidence la corrélation entre l'estimation de la corrosion et la durabilité des structures en béton armé. Elle démontre l'intérêt de l'utilisation des essais non destructifs dans le suivi des ouvrages de génie civil, dans l'étude du phénomène de corrosion. Cela nous a permis de souligner l'importance de prendre en considération les critères environnementaux lors de la conception de structures dans des environnements agressifs.

Les mesures de potentiel sont largement privilégiées parmi les méthodes électrochimiques pour détecter le risque de corrosion des armatures dans le béton. Le CANIN+ représente une nouvelle technique qui permet de réduire considérablement le temps nécessaire à la détection de la corrosion, grâce à sa rapidité de mesure. De plus, cette méthode est également reconnue pour sa rentabilité économique.

A cet effet nous avons choisies 3 différents milieux. Milieu 1 : une solution basique de 5% de NaOH ; et le Milieu 2 : une solution contenant des chlorures, avec 5% de NaCl dans la solution et 3% de NaCl dans le béton, Milieu 3 : une solution contenant 3% de NaCl dans le béton exposé à l'air. A un seul matériau (béton ordinaire) avec deux types des éprouvettes 3.5 et 5 cm pour mesurer le potentiel à l'aide de canin+.

Dans notre expérience, nous avons constaté que le béton placé dans des environnements contenant de 5% de NaOH enregistre des valeurs de potentiel de corrosion presque constantes mais elle est plus négative à milieu basique. Cela signifie que le film passif est stabilisé par une exposition continue de l'acier à l'environnement passivant. Nous avons également constaté que le béton en contact ou bien mélangé avec de l'eau salée présente un risque élevé de corrosion, comme en témoignent ses valeurs de potentiel très négatives. Pour cette raison, il est nécessaire de prendre des mesures de protection contre la corrosion supplémentaire. Nous avons également remarqué que la contamination du béton par des chlorures lors du mélange augmente le potentiel de corrosion de l'acier d'armature. Par conséquent, la possibilité de corrosion. Il convient d'éviter l'eau salée et les granulats contaminés par des chlorures lors du mélange. Les résultats ont également montré une corrélation légèrement positive entre le potentiel de corrosion et l'épaisseur de la couverture en béton. L'exactitude

Conclusion Générale

des valeurs de potentiel enregistrées dépend de nombreux facteurs tels que la résistivité du béton, les erreurs de l'appareil, la qualité du béton (rapport E/C, Type de ciment, eau...etc.), les variations de température, la concentration et le volume de la solution de sulfate de cuivre (II) utilisée.

En raison des irrégularités constatées dans les résultats obtenus, il est recommandé d'utiliser d'autres méthodes chimiques sur l'influence de NaOH dans un milieu agressif.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

- 1] Mohamed Abdallah El Reedy ,2018. Steel-Reinforced Concrete: Structures: Assessment and Repair of Corrosion.2 éd. Taylor & Francis Group, p1-208.
- [1.1] Mohamed Abdallah El Reedy ,2018. Steel-Reinforced Concrete: Structures: Assessment and Repair of Corrosion.2 éd. Taylor & Francis Group.chapitre03, Causes of Corrosion and Concrete Deterioration, p16-17.
- [1.2] Mohamed Abdallah El Reedy ,2018. Steel-Reinforced Concrete: Structures Assessment and Repair of Corrosion.2 éd. Taylor & Francis Group.chapitre03, Causes of Corrosion and Concrete Deterioration, p22.
- [1.3] Mohamed Abdallah El Reedy ,2018. Steel-Reinforced Concrete: Structures Assessment and Repair of Corrosion.2 éd. Taylor & Francis Group.chapitre04, Assessment Methods for Reinforced Concrete Structures, p.54.
- [2] Student Survey, 2021. Disponible
 Sur : <https://www.chegg.com/auth?type=simplifiedstudy&action=signup&data=&redirect=/cspofferinterstitial/ib> [consulté le 20 mars 2023].
- [3] Prasad, 2019.Disponible sur : <https://www.structuralguide.com/carbonation-of-concrete/> [consulté le 04 avril 2023]
- [4] YUXI Zhao, Weiliang Jin, 2016.steel corrosion in concrete. China, p.1-180.
- [4.1] YUXI Zhao, Weiliang Jin, 2016.steel corrosion in concrete.In:Broomfield JP. Corrosion of steel in concrete: understanding, investigation and repair.London and New York, NY: E & FN Spon Press; 1997,p.35.
- [4.2] YUXI Zhao, Weiliang Jin, 2016.Steel corrosion in concrete.In: Bentur A, Diamond S, Berke NS. Steel corrosion in concrete: fundamentals andCivil engineering practice. London and New York, NY: E & FN Spon Press; 1997, P.36
- [5] Amir Poursaee ,2016. Corrosion of steel in concrete structures. Jones (Éd), p.1-287.
- [5.1] Amir Poursaee ,2016. Corrosion of steel in concrete structures. In: Zakroczymski, T., Fan, C.-J., Szklarska-Smialowska, Z., Kinetics and mechanism of film formation on iron in 0.05M NaOH. 1985, p.19-20.
- [5.2] Amir Poursaee ,2016. Corrosion of steel in concrete structures. In: Hansson. Comments on electrochemical measurements of the rate of corrosion of steel in concrete.1984, p.19-20.
- [5.3] Amir Poursaee ,2016. Corrosion of steel in concrete structures.In: Jaffer, S.J., Hansson, C.M., 2009. Chloride-induced corrosion products of steel in cracked-concrete subjected to different loading conditions. Cement and Concrete Research39, 116e125, p.34
- [5.4] Amir Poursaee ,2016. Corrosion of steel in concrete structures.In:Marcotte, T.D., Hansson, C.M., 2003. The influence of silica fume on the corrosion resistance of steel in high performance concrete exposed to simulated sea water. Journal of Materials Science 38, 4765-4776, p.34.
- [5.5] Amir Poursaee ,2016. Corrosion of steel in concrete structures.In: ASTM, 2009. C876-09: Standard Test Method for Half-cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, 03.02, pp. 446-451, p167-168.
- [5.6] Amir Poursaee ,2016. Corrosion of steel in concrete structures..In: Stern, M., Geary, A.L., 1957. Electrochemical polarisation: I. A theoretical analysis of the shape of polarisation curves. Journal of the Electrochemical Society 104 (1), 56-63, p.169

- [5.7] Amir Poursaei ,2016. Corrosion of steel in concrete structures. In: Andrade, C., Gonzalez, J.A., 1978. Quantitative measurements of corrosion rate of reinforcing steels embedded in concrete using polarization resistance measurements. *Werkstoffe und Korrosion* 29, 515-519, p.170.
- [5.8] Amir Poursaei ,2016. Corrosion of steel in concrete structures. In: Newton, C.J., Sykes, J.M., 1988. A galvanostatic pulse technique for investigation of steel corrosion in concrete. *Corrosion Science* 28 (11), 1051-1074, p.172.
- [5.9] Amir Poursaei ,2016. Corrosion of steel in concrete structures. In: Jones, D.A., Greene, N.D., 1966. Electrochemical measurement of low corrosion rates. *Corrosion* 22, pp.173.
- [5.10] Amir Poursaei ,2016. Corrosion of steel in concrete structures. In: Stratfull, R.F., 1954. The corrosion of steel in a reinforced concrete bridge.” *Corrosion* 13, p.168
- [5.11] Amir Poursaei ,2016. Corrosion of steel in concrete structures. In: Polder, R.B., 2005. Electrochemical techniques for corrosion protection and maintenance. In: Bohni, H. (Ed.), *Corrosion in Reinforced Concrete Structures*. Woodhead publishing Ltd., Cambridge, England and CRC Press LLC, Boca Raton, pp. 215-241.
- [5.12] Amir Poursaei ,2016. Corrosion of steel in concrete structures. In: Stratfull, R.F., 1974. *Experimental Cathodic Protection of a Bridge Deck*. California Department of Transportation, Sacramento, California, p.235
- [6] Pourbaix, M., 1974. *Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions*. National Association of Corrosion Engineers, Houston, TX
- [7] Ahmad Zaki , Hwa Kian Chai , Dimitrios G. Aggelis and Ninel Alver.,2015. Non-Destructive Evaluation for Corrosion Monitoring in Concrete: A Review and Capability of Acoustic Emission Technique. *Sensors*,2015. p. 19069-19101; doi :10.3390/s150819069.
- [8] Brian Cherry and Warren Green,2021. *Corrosion and Protection of Reinforced Concrete*, pp.1-367.
- [8.1] Brian Cherry and Warren Green,2021. *Corrosion and Protection of Reinforced Concrete*, p.158-159.
- [8.2] Brian Cherry and Warren Green,2021. *Corrosion and Protection of Reinforced Concrete*, p.170-171.
- [8.3] Brian Cherry and Warren Green,2021. *Corrosion and Protection of Reinforced Concrete*, p.174.
- [8.4] Brian Cherry and Warren Green,2021. *Corrosion and Protection of Reinforced Concrete*, p.175.
- [9] Broomfield, J.P., 1996. Field Measurement of the Corrosion Rate of Steel in Concrete Using a Microprocessor Controlled Unit with a Monitored Guard Ring for Signal Confinement. ASTM International.
- [10] Pedefferri, P., 1996. Cathodic protection and cathodic prevention. *Construction and Building Materials* 10 (5), 391e402 Reinforcement. *Proceedings of the Institute of Civil Engineering Structures and Buildings* 4(2):93–102
- [11] Pullar-Strecker, P (1987), ‘Corrosion Damaged Concrete’, Butterworths, London, UK.
- [12] Cairns, J. 1992. Design of concrete structures using fusion-bonded epoxy-coated

- [13] ACI Committee 318. 1988. Revisions to building code requirements for reinforced concrete. American Concrete Institute Structures Journal 85(6), PP.645–674.
- [14] Smith, J. L., and Y.P. Virmani. 2000. “Materials and Methods for Corrosion Control of Reinforced and Prestressed Concrete Structures in New Construction.” Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation (FHWA-RD-00-081): 82. <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/00081.pdf>.
- [15] Troxell, G E, and Davies, H E (1956), ‘Composition and Properties of Concrete’, McGraw Hill, New York, USA.
- [16] Mme N. RABAHI eps. TOULOU, 2013. LES ACIERS POUR BETON ARMÉ. décembre 2013, Centre National d’Études et de Recherches Intégrées du Bâtiment. oran, p12-13.
- [17] Rive acier. Disponible sur : https://www.rivaacier.com/fr/produits/treillis_soudes [consulté le 02 janvier 2023
- [18] Bertolini, L, Elsener, B, Pedferri, P and Polder, R P (2004), ‘Corrosion of Steel in Concrete’, WILEY VCH Verlag GmbH & Co KGaA, Weinheim.
- [19] Concrete Society (2010), ‘Non-Structural Cracks in Concrete’, Technical Report No. 22 – Fourth Edition, Camberley, England.
- [20] Beeby, A W (1984), ‘Causes of Cracking’ in ‘Durability of Concrete Structures’, RILEM, Budapest.
- [21] YUXI Zhao, Weiliang Jin, 2016. Steel Corrosion-Induced Concrete Cracking. Ed: Simon Tian. China. Chapter 3, The Expansion Coefficients and Modulus of Steel Corrosion Products, pp.61.
- [22] GK, sep, 202. Disponible sur : <https://www.linkedin.com/pulse/everything-you-need-know-spalling-concrete>. Consulté le [02. Janvier 2023]
- [23] Griggs RD. Structural concrete in Georgia coastal environment. Atlanta, GA: Georgian GDOT. 1987.
- [24] Neville, A M (1995), ‘Properties of Concrete’, Fourth Edition, Longman Group Limited, Harlow, England.
- [25] El-Arian, A. A. and A. M. Atta. 1974. Concrete Technology. Giza, Egypt: World Book
- [26] MELLOUK Ibrahim, BELABDELLI OUSSAMA, 2017. Utilisation du corrosimètre Canin+ pour déterminer le potentiel de corrosion dans les structures en béton armées. (Mémoire), université Belhadj Bouchaib. Ain Témouchent.
- [27] AMARNI Lynda, 2012. Durabilité des éléments en Béton Armé en milieu agressif Corrosion des Armatures. (Mémoire de magister). Université mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

ANNEXES

A

Résultats de l'analyse granulométrique :

Gravier8/16

les Tamis	M tamis	M REFUS	R CUMULÉ	%REFUS	%Tamis
16	476,7	0	0	0	100
12,5	466,2	32,2	32,2	3,22	96,78
10	490,9	414,7	446,9	44,9	55,02
8	499	363,4	810,3	81,3	18,7
6,3	456,2	119,4	929,7	92,97	7,03
5	564,9	60,6	990,3	99,03	0,97
Fond	411,8	9,7	1000	100	0

GRAVIER 3/8

Les Tamis	M tamis	M refus	refus cum	%REFUS	% Tamis
8	499	104,3	104,3	10,43	89,43
6,3	456	265,4	369,7	36,97	63,03
5	564,9	483,5	853,2	85,97	14,58
4	346	131	984,2	98,42	10,58
2	329,8	7,3	991,5	99,15	0,85
Fond	411,6	8,5	1000	100	0

SABLE FIN (SABLE 02)

les tamis	M tamis	M refus	R cumulé	%refus	%tamis
5	565	0	0	0	100
4	345,4	0	0	0	100
2	329,6	14,3	14,3	1,43	98,57
1	344,8	28,2	42,5	4,25	95,75
0,5	258,5	51,1	93,6	9,36	90,64
0,25	239	585,9	679,5	67,95	32,05

Annexes A

0,125	288,1	245,1	924,6	92,46	7,54
0,063	317	29,8	954,4	95,44	4,56
fond	411,6	45,6	1000	100	0

SABLE GROSSIER (SABLE 01)

les tamis	M tamis	M refus	R cumulé	%refus	%tamis
5	546	0.4	0.4	0.0396	100
4	355.1	1.7	2.1	0.2079	99.97
2	392	297.4	299.5	29.653	70.34
1	345.1	258	557.5	55.198	44.802
0,5	258.4	148.5	706	96.9	30.099
0,25	23809	101	807	97.9	20.09
0,125	288,1	73.7	880.7	87.19	12.8
0,063	214.9	50.8	931.5	92.228	7.77
fond	349.5	78.5	1010	100	0

LE MODULE DE FINESSE

Les Tamis	MF =2,5
5	100
4	99,87
2	80,78
1	63,64
0,5	52,49
0,25	24,21
0,125	10,84
0,063	6,57
fond	0

ANNEXES B

Milieu1		Béton ordinaire D=8cm													
		EP 2							EP 3						
date	jours	PT 1	PT2	PT3	PT4	PT5	PT6	Moyen	PT 1	PT2	PT3	PT4	PT5	PT6	moyen
13/04/2023	10	-406	-416	-418	-416	-417	-416	-414,8	-342	-338	-339	-333	-333	-344	-338,2
16/04/2023	13	-655	-654	-653	-648	-648	-654	-652	-622	-621	-622	-621	-624	-621	-621,8
18/04/2023	15	-365	-363	-366	-364	-369	-369	-366	-418	-425	-416	-414	-420	-424	-419,5
21/04/2023	18	-355	-364	-368	-363	-354	-355	-359,8	-420	-433	-424	-433	-408	-388	-417,7
23/04/2023	20	-357	-352	-355	-359	-362	-360	-357,5	-263	-261	-262	-263	-266	-266	-263,5
25/04/2023	22	-315	-315	-324	-324	-313	-318	-318,2	-238	-235	-235	-235	-235	-236	-235,7
27/04/2023	24	-327	-325	-327	-324	-328	-327	-326,3	-234	-239	-242	-235	-239	-241	-238,3
30/04/2023	27	-345	-342	-343	-342	-344	-345	-343,5	-275	-276	-273	-280	-280	-281	-277,5
04/05/2023	31	-287	-282	-280	-283	-291	-296	-286,5	-218	-217	-220	-216	-220	-217	-218
07/05/2023	34	-433	-433	-432	-432	-431	-432	-432,2	-222	-220	-220	-220	-221	-221	-220,7
09/05/2023	36	-441	-440	-440	-439	-440	-441	-440,2	-315	-319	-315	-314	-312	-318	-315,5
11/05/2023	38	-450	-449	-450	-450	-451	-449	-449,8	-335	-335	-354	-352	-350	-355	-346,8
14/05/2023	41	-483	-485	-485	-486	-487	-488	-485,7	-425	-422	-422	-420	-419	-416	-420,7
16/05/2023	43	-462	-462	-465	-466	-467	-467	-464,8	-401	-403	-402	-404	-403	-359	-395,3
18/05/2023	45	-298	-297	-296	-297	-296	-297	-296,8	-283	-285	-287	-296	-296	-296	-290,5
24/05/2023	51	-254	-261	-269	-255	-255	-254	-258	-247	-257	-257	-254	-257	-254	-257,83

Milieu 01 D=11cm		EP 1							
date	JOURS	PT 1	PT2	PT3	PT4	PT5	PT6	moyen	
13/04/2023	10	-432	-425	-426	-435	-438	-435	-432	
16/04/2023	13	-557	-557	-562	-564	-566	-554	-560	
18/04/2023	15	-322	-330	-328	-328	-332	-328	-328	
21/04/2023	18	-331	-330	-331	-332	-338	-330	-332	
23/04/2023	20	-302	-302	-306	-311	-302	-307	-305	
25/04/2023	22	-317	-320	-319	-312	-316	-321	-318	
27/04/2023	24	-316	-316	-302	-307	-313	-317	-312	
30/04/2023	27	-297	-287	-285	-307	-280	-277	-289	

Annexes B

Millieu03
D=11cm

date	JOURS	PT 1	PT 2	PT 3	PT 4	PT 5	PT 6	Moyen
13/04/2023	10	-432	-425	-426	-435	-438	-435	-431,833
16/04/2023	13	-647	-648	-645	-643	-645	-637	-644,167
18/04/2023	15	-596	-594	-593	-586	-572	-593	-589
21/04/2023	18	-569	-581	-573	-557	-551	-566	-566,167
23/04/2023	20	-636	-631	-630	-637	-654	-651	-639,833
25/04/2023	22	-365	-356	-358	-373	-370	-391	-368,833
27/04/2023	24	-336	-342	-357	-358	-353	-349	-349,167
30/04/2023	27	-549	-548	-557	-559	-552	550	-369,167
04/05/2023	31	-425	-422	-423	-433	-427	-356	-414,333
07/05/2023	34	-282	-284	-283	-285	-277	-297	-284,667
09/05/2023	36	-499	-509	-511	-506	-502	-512	-506,5
11/05/2023	38	-484	-481	-481	-484	-480	-481	-481,833
14/05/2023	41	-478	-476	-475	-475	-476	-475	-475,833
16/05/2023	43	-329	-326	-331	-218	-329	-326	-309,833
18/05/2023	45	-439	-443	-444	-442	-439	-442	-441,5
24/05/2023	51	-532	-533	-537	-537	-543	-442	-520,667

EP 2							EP 3							MEAN
PT 1	PT 2	PT 3	PT 4	PT 5	PT 6	moyen	PT 1	PT 2	PT 3	PT 4	PT 5	PT 6	moyen	
-422	-415	-419	-412	-418	-419	-417,5	-355	-345	-344	-350	-349	-347	-	-399,222
-655	-653	-653	-648	-648	-654	-	-621	-622	-622	-621	-621	-624	-	-639,278
-581	-577	-576	-566	-571	-566	651,833	-662	-655	-656	-662	-654	-644	-655,5	-605,778
-541	-537	-526	-335	-534	-533	572,833	-498	-494	-507	-506	-507	-504	-	-523,278
-587	-593	-592	-591	-587	-583	-501	-651	-682	-677	-672	-676	-688	-	-634,333
-512	-505	-496	-485	-503	-508	588,833	-611	-603	-608	-609	-610	-612	-	-493,056
-527	-528	-530	-529	-531	-329	-501,5	-619	-619	-619	-615	-614	-618	-	-487,389
-592	-590	-587	-587	-589	-585	495,667	-565	-556	-538	-557	-565	-566	-	-505,111
-538	-539	-530	-516	-543	-544	588,333	-356	-433	-427	-423	-422	-425	-	-454,556
-320	-318	-321	-515	-514	-512	-535	-561	-561	-557	-561	-563	-561	-	-420,667
						416,667							560,667	

Annexes B

-471	-475	-476	-456	-457	-458	-465,5	-383	-386	-359	-345	-333	-330	-356	-442,667
-518	-299	-521	-530	-512	-584	-494	-453	-434	-453	-453	-456	-467	-	-476,167
-322	-329	-335	-335	-335	-324	-330	-272	-274	-275	-277	-279	-275	-	-360,389
-353	-353	-348	-355	-343	-341	-	-274	-271	-273	-274	-273	-271	-	-310,444
-433	-436	-434	-435	-439	-428	-	-288	-282	-299	-297	-295	-290	-	-389,167
-557	-551	-561	-557	-539	-559	-554	-299	-292	-313	-345	-345	-339	-	-465,611

Milieu03 D=8cm

date	JOURS	EP 1						moyen
		PT 1	PT2	PT3	PT4	PT5	PT6	
13/04/2023	10	-690	-685	-683	-683	-688	-677	-684,333
16/04/2023	13	-467	-474	-471	-471	-459	-461	-467,167
18/04/2023	15	-665	668	-661	-340	-659	-663	-386,667
21/04/2023	18	-569	-590	-577	-552	-565	-573	-571
23/04/2023	20	-564	-557	-548	-552	-550	-553	-554
25/04/2023	22	-672	-58	-661	-668	-656	-665	-563,333
27/04/2023	24	-663	-650	-656	-661	-658	-662	-658,333
30/04/2023	27	-607	-613	-612	-610	-601	-599	-607
04/05/2023	31	-300	-298	-295	-296	-293	-296	-296,333
07/05/2023	34	-282	-284	-283	-285	-277	-279	-281,667
09/05/2023	36	-555	-564	-558	-552	-548	-560	-556,167
11/05/2023	38	-645	-641	-649	-651	-652	-649	-647,833
14/05/2023	41	-648	-623	-651	-651	-651	-650	-645,667
16/05/2023	43	-495	-500	-501	-499	-500	-498	-498,833
18/05/2023	45	-441	-440	-446	-450	-444	-376	-432,833
24/05/2023	51	-658	-663	-674	-667	-674	-657	-665.3

EP 2							EP 3							MEAN
PT 1	PT2	PT3	PT4	PT5	PT6	moyen	PT 1	PT2	PT3	PT4	PT5	PT6	moyen	
-	-	-	-	-	-	-667	-	-	-	-	-	-	-	-593,056
671	668	665	665	667	666	-667	429	428	430	427	426	427	427,833	-567,611
-	-	-	-	-	-	-619,5	-	-	-	-	-	-	-	-562,222
621	610	620	629	627	610	-619,5	622	617	613	607	611	627	616,167	-562,222
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-562,222
659	646	642	662	656	652	652,833	652	654	649	646	638	644	647,167	

Annexes B

-	-	-	-84	-	-	-503,5	-	-	-	-	-	-	-	-525,556
618	608	588	-	590	533	-	504	507	506	504	494	498	502,167	-505,833
-	-	-	-	-	-	-569,5	-	-	-	-	-	-	-394	-624,778
572	569	571	569	568	568	-	431	430	429	240	412	422	-	-662
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-596,278
670	666	666	666	670	671	668,167	666	652	571	669	666	633	642,833	-437
-	-	-	-	-	-	-657,5	-	-	-	-	-	-	-	-419,722
654	662	651	658	659	661	-	668	670	669	673	672	669	670,167	-570,056
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-557,5	-555,222
602	636	633	636	604	635	624,333	610	619	536	526	526	528	-	-521,111
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-471,833
485	480	481	484	488	482	483,333	535	532	534	534	519	534	531,333	-424,833
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-561,444
320	318	321	515	514	512	416,667	562	561	557	561	563	561	560,833	
-	-	-	-	-	-	-592,5	-	-	-	-	-	-	-561,5	
592	606	600	586	584	587	-	561	566	548	561	565	568	-513,5	
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
623	641	451	442	436	433	504,333	546	547	553	555	552	328	-	
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
384	384	386	388	386	381	384,833	514	597	520	521	523	522	532,833	
-	-	-	-	-	-	-348	-	-	-	-	-	-	-	
349	341	344	348	360	346	-	557	577	563	575	570	570	568,667	
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
362	361	362	395	363	367	368,333	331	537	545	535	541	351	473,333	
-	-	-	-	-	-	-559	-	-	-	-	-	-	-	
631	624	631	427	419	622	-	356	371	556	563	347	566	459,833	

Milieu 02
D=11cm

EP 1

PT 1	PT2	PT3	PT4	PT5	PT6	moyen
-227	-220	-224	-220	-223	-230	-224
-422	-4017	-418	-416	-418	-420	-1018,5
-543	-545	-548	-548	-553	-551	-548
-524	-515	-505	-521	-524	-519	-518
-522	-515	-519	-525	-529	-528	-523
-456	-465	-468	-462	-468	-468	-464,5
-312	-310	-317	-316	-321	-310	-314,333
-303	-304	-306	-312	-308	-306	-306,5
-335	-335	-347	-348	-347	-297	-334,833
-391	-391	-396	-397	-397	-382	-392,333
-447	-449	-446	-448	-447	-444	-446,833
-395	-394	-395	-398	-399	-396	-396,167
-356	-357	-357	-357	-360	-363	-358,333
-366	-368	-370	-370	-367	-371	-368,667
-374	-379	-379	-377	-375	-377	-376,833

Annexes B

date	JOURS	EP 2							moyen	EP 3							moyen	MEAN
		PT 1	PT2	PT3	PT4	PT5	PT6	PT 1		PT2	PT3	PT4	PT5	PT6				
16/04/2023	13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-299,5
		211	207	210	207	208	210	208,833	434	430	429	432	431	434	431,667			
18/04/2023	15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-553	
		473	477	478	473	472	475	474,667	295	293	301	294	294	295	295,333			
21/04/2023	18	-	-	-	-	-	-	-468	-	-	-	-	-	-	-	-307	439,333	
		496	476	495	464	462	415		295	318	341	301	293	294				
23/04/2023	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-431	
		501	504	505	504	502	500	502,667	426	432	424	421	424	427	425,667			
25/04/2023	22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		415	414	415	415	422	422	417,167	378	365	377	379	373	376	374,667	483,778		
27/04/2023	24	-	-	-	-	-	-	-292	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		297	297	289	289	288	292		210	207	202	203	204	214	206,667	418,778		
30/04/2023	27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-280	-271	
		428	426	426	424	428	420	425,333	280	274	273	290	284	279				
04/05/2023	31	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		270	271	270	276	268	276	271,833	130	170	173	195	197	201	177,667	337,278		
07/05/2023	34	-	-	-	-	-	-	-398,5	-	-	-	-	-	-	-	-366,5	261,444	
		444	444	444	316	304	439		380	341	369	369	372	368				
09/05/2023	36	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		453	454	454	455	458	451	454,167	468	464	458	457	458	453	459,667	385,778		
11/05/2023	38	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-286,5	453,556	
		492	495	493	496	495	497	494,667	284	280	278	295	284	298				
14/05/2023	41	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-358,5	392,444	
		327	276	272	274	270	268	281,167	363	360	357	357	357	357				
16/05/2023	43	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-212	332,667	
		425	433	430	434	433	432	431,167	209	213	213	212	212	213				
18/05/2023	45	-	-	-	-	-	-	-423,5	-	-	-	-	-	-	-	-221,5	337,278	
		429	426	423	419	420	424		220	218	221	224	229	217				
24/05/2023	51	-	-	-	-	-	-	-554	-	-	-	-	-	-	-	-322,17	340,611	
		557	551	561		567	539		299	292	313	345	345	339				

