

République Algérienne Démocratique et Populaire

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Centre Universitaire Belhadj Bouchaib - Ain Témouchent

المركز الجامعي لعين تموشنت



MEMOIRE DE MASTER

SPECIALITE : GENIE CIVIL

OPTION : Travaux Publics

Thème:

Utilisation de l'ultrason dans les milieux agressifs pour les éléments en béton armés

Présenté par :

Iyambo boyengo Jonathan

Mme. KAZI TANI

C.U.B.B.A.T Présidente

Mr. KAMECHE

C.U.B.B.A.T Examineur

Mlle. CHERIFI

C.U.B.B.A.T Encadreuse

Mr. HOUMADI Y

C.U.B.B.A.T Encadreur

Année Universitaire: 2016/2017

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à présenter mes gratitude à mon Dieu car il est l'unique motif de la réussite de ce travail et pour sa grâce, je souhaite remercier mademoiselle CHERIFI qui a Co-encadré ce travail. Elle m'a soutenu tout au long de ce travail, sa grande disponibilité et toutes nos discussions ont été fructueuses pour l'avancée de ce travail et mener à bien ce travail de recherche. Je le remercie également pour les nombreuses heures passées à la relecture et aux corrections du manuscrit. Je remercie monsieur HOUMADI Youcef mon encadreur d'avoir proposé ce sujet délicat. Je remercie tous les membres du jury d'avoir accepté d'être les rapporteurs de ma thèse et les examinateurs pour s'être rendu disponible afin d'en examiner.

Je voudrais aussi exprimer tous mes remerciements aux collègues de ma promotion 2016/2017 de Génie civil (travaux publics) du CUAT pour l'ambiance studieuse et amicale, qui ont été d'un grand réconfort et d'une aide précieuse. Un merci tout particulier aux ingénieurs du laboratoire (CUAT) pour les nombreuses discussions et échanges sur l'essai ultrasonique qui nous ont permis d'avancer dans un domaine complexe qu'est l'auscultation par ultrason et de « tenir bon ».

Toute ma gratitude à toutes les personnes ayant relu, corrigé et commenté mon manuscrit et ayant ainsi participé à son amélioration. Mes remerciements vont aussi à tous les membres du laboratoire, techniciens, secrétaires qui ont participé indirectement ou directement au bon déroulement de ces travaux de recherche et à leur finalité.

Pour finir, je tiens à remercier tout particulièrement mon oncle **DIDIER ETUMBA** pour ses soutiens moraux, financiers et surtout spirituels, mes parents également **PAPA IYAMBO REMY** et **MAMAN MARIE THERESE MPASANI** car ils sont aussi l'un des motifs de cette réussite, mon oncle **ITOKO GILLES** aussi pour leur patience, leur disponibilité, leur aide précieuse et en fin leur soutien au quotidien. Un grand merci s'adresse aussi à mes frères et sœurs, cousins et cousines bref à toute ma famille, sans oublier mes ami(e)s et connaissances qui à tout moment, même difficile, ont su m'apporter réconfort et amour durant toute cette période de travail.

RESUME

La corrosion des armatures est l'une des principales causes de dégradation du béton. Le mécanisme le plus courant contribuant au développement de la corrosion des armatures dans le milieu marin est la pénétration des agents chlorures. Le principal risque identifié en termes de durabilité des bétons armés en milieu marin est lié à la pénétration de ces agents sévèrement agressifs. Comme les dommages résultants de ce phénomène sont très importants financièrement, il paraît essentiel d'améliorer la résistance du béton à la pénétration de ces agents agressifs.

A ce titre, l'objectif de ce travail est de déterminer expérimentalement l'influence de la corrosion des armatures engendrée par la pénétration des chlorures sur la résistance mécanique des bétons en utilisant les ondes ultrasoniques. Des éprouvettes en béton armé sont alors préparées, elles sont mises dans trois différents milieux agressifs dont l'eau de mer après une cure de 28 jours. Par la suite, des essais à l'ultrason sont menés sur ces éprouvettes à des dates différentes. Ces essais à l'ultrason nous permettent de déterminer la résistance mécanique du béton de ces éprouvettes, enfin nous avons comparé cette résistance mécanique par des courbes vitesses des ondes, temps par rapport aux résultats trouvés expérimentalement.

Mots clés : béton armé, corrosion, chlorures, ondes ultrasoniques, armatures.

ABSTRACT

Corrosion of reinforcements is one of the main causes of degradation of concrete. The most common mechanism contributing to the development of corrosion of reinforcements in the marine environment is the penetration of chloride agents. The main risk identified in terms of the durability of marine concretes is related to the penetration of these severely aggressive agents. As the damage resulting from this phenomenon is very important financially, it seems essential to improve the resistance of the concrete to the penetration of these aggressive agents.

The aim of this work is to determine experimentally the influence of the corrosion of the reinforcement caused by the penetration of chlorides on the mechanical strength of concrete using ultrasonic waves. Reinforced concrete specimens are then prepared and placed in three different aggressive media, including sea water after a 28-day cure. Subsequently, ultrasonic tests are carried out on these test specimens at different dates. These ultrasonic tests allow us to determine the mechanical strength of the concrete of these test pieces. Finally, we had determined this mechanical strength by means of time curves, compared with the results found experimentally.

Keywords: reinforced concrete, corrosion, chloride, ultrasonic waves, reinforcements.

المخلص

تآكل التسليح هو واحد من الاسباب الرئيسية لتدهور الخرسانة المسلحة، الألية الاكثر شيوعا التي تساهم في تطوير صدأ حديد التسليح في البيئة البحرية هي عوامل انتشار الكلوريد ، و يرتبط الخطر الرئيسي التي تم تحديدها من حيث الاستدامة بما ان الاضرار الناجمة عن هذه الظاهرة مهمة جدا من .من الخرسانة المسلحة الى تغلغل هذه العوامل ذات عدوانية شديدة لهذا فان الهدف من هذا العمل هو تحديد .الناحية المالية يبدو من الضروري الرفع من مقاومة الخرسانة ضد هذه العوامل تجريبيا تاثير التآكل الناتج عن تغلغل الكلوريدات على مقاومة الخرسانة باستخدام موجات فوق صوتية ، بالتالي تم اعداد عينات من الخرسانة وتم وضعها في ثلاث اوساط مختلفة بعد حفظها لمدة 28 يوم ، و تم اجراء اختبارات في الموجات .الفوق صوتية على هذه العينات في تواريخ مختلفة ، وتسمح لنا هذه الاختبارات بتحديد مقاومة الخرسانة على هذه العينات كلمات البحث : .واخيرا قمنا بمقارنة المقاومة الميكانيكية بواسطة منحنيات السرعة بدلالة الزمن مع النتائج التجريبية خرسانة مسلحة ، التآكل ، كلوريدات ، فوق صوتية

SOMMAIRE

RESUME	III
ABSTACT	IV
LISTE DES TABLEAUX.....	IX
LISTE DES FIGURES.....	X
LISTE DES ABREVIATIONS	XII
INTRODUCTION GENERALE.....	2

Chapitre I : études bibliographiques

1 introduction	5
2 béton armé	5
2.1 Historique	5
2.2 Composants du béton armé	6
2.2.1 Le ciment	6
2.2.2 Le granulat	6
2.2.3 L'eau de gâchage	7
2.2.4 Acier	8
3 durabilité des ouvrages	9
3.1 Action des eaux de mer sur la durabilité des ouvrages.....	11
4 La corrosion	13
4.1 Types de corrosion	13
4.2 Principales causes de corrosion	13
4.2.1 Carbonatation.....	14
4.2.2 Action des chlorures	15
4.2.2.1. Influence des ions chlorures	16
4.2.2.2. Teneur critique en ions chlorures	18
4.2.2.3 Facteurs influents sur la pénétration des chlorures	18
4.3 Phénomène de corrosion	20
4.3.1 Notion de thermodynamique électrochimique	21
4.3.2 Approche cinétique	25
4.4 Rôle du béton	27
4.5 Etat de l'acier dans le béton	28
4.6 Amorçage et propagation de la corrosion	28
4.7 Processus de corrosion	29
4.7.1. Corrosion par micro-piles	31
4.7.2. Corrosion par macro-pile	31
4.8 Produits de corrosion	31
4.9 Facteurs influents sur la corrosion des armatures du béton	32
4.9.1 La température	32
4.9.2 Résistivité du béton (Porosité)	33
4.9.3 La concentration en chlorures	34
4.9 Méthodes de caractérisation de la corrosion des aciers dans le béton	34
4.9.1 Mesure de potentiel de corrosion	35
4.9.2 Les techniques acoustiques	38
5 Bilan des attaques du béton pour un ouvrage maritime	38
6 Conclusion	39

chapitre II : les techniques non destructives

1.Introduction	41
2.Objectif du CND pour le béton	41
3.Intérêt des techniques de CND	41
4.Les méthodes de CND à disposition	42
4.1 Méthode de surface	43
4.1.1 Inspection visuelle	43
4.1.2 Ressuage	44
4.1.3 Magnétoscopie	44
4.1.4 Courants induits	45
4.2. Les méthodes complémentaires	46
4.2.1 Émission acoustique	46
4.2.2 Méthodes volumiques	46
4.2.3 L'ultrason	47
4.2.3.1 Nature de l'onde ultrasonore	49
4.2.3.2 Paramètres de l'onde ultra-sonore	50
4.2.3.3 Faisceau ultra-sonore	53
4.2.3.3.1 Faisceau d'une onde plane	53
4.2.3.3.2 Faisceau focalisé	55
4.2.3.4 Propagation des ondes ultrasonores dans les milieux hétérogènes	55
4.2.3.5 Endommagement et principaux défauts	56
4.2.3.6 Potentiel des méthodes ultrasonores pour le contrôle non destructif	59
4.2.3.7 Types d'ondes ultrasonores	59
4.2.3.8 Interaction des ultrasons avec un milieu hétérogène	61
4.2.3.9 Ondes cohérentes et ondes incohérentes	62
4.2.3.10 Propagation, absorption, réflexion et réfraction des ultrasons	63
4.2.3.11 Emission et détection d'ultrasons	65
4.2.3.12 Les palpeurs pour le contrôle aux ultrasons	66
4.2.3.12 Principe du sondage par ultrasons	67
4.2.3.13 Mesure de l'atténuation et de la vitesse d'onde ultrasonore	67
5Conclusion	69

Chapitre III : Partie expérimentale et interprétation des résultats

1.Introduction	72
2.Objectif	72
3.caractérisations des matériaux	73
3.1 Granulat	73
3.1.1 Les essais	73
3.2 Le sable	76
3.2.1 Les essais	76
3.3 Le ciment	77
3.3.1 Les essais	77
4Dispositifs expérimentaux	77
4.1Matériaux	77
4.1.1 Béton	77
4.1.2 Acier	80
4.1.3 Coffrage	81
4.1.4 Mortier	81
4.1.5 Milieux	82

5. Essais par ultrason	83
5.1 Principe	83
5.2 Mode Opérateur	83
5.3 Travaux préparatoires	84
5.4 Points de mesures	84
5.5 Distances minimales entre points de mesures	84
5.6 Étalonnage de l'appareil	84
5.7 Manières de mesure	84
5.8 Mesure en transparence (directe)	84
5.9 Paramètres influents la vitesse des ultrasons	85
5.10 Résultats et Interprétation des résultats de mesure aux Ultrasons	86
6. conclusion.....	95
Conclusion générale	97

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I-1 : Classes d'environnement en fonction de la résistance à la compression.....	11
Tableau I-2 : Cinétique de corrosion	27
Tableau I-3 : Potentiel d'électrode de référence par rapport au potentiel à hydrogène	35
Tableau I-4 : Niveaux de corrosion en fonction des vitesses de corrosion	37
Tableau II-1 : Equivalence sons et fréquence.....	51
Tableau II-2: Principaux défauts dans les structures en béton	58
Tableau III-1 : résultat analyse granulométrie	76
Tableau III-2 : formulation du béton	78
Tableau III-3 : résultat essai d'affaissement	80
Tableau III-4 : les normes NF en 206-1 classes pour l'affaissement du béton	81

LISTE DES FIGURES

Figure I-1: Modèle de PAGE et al. Attaque de l'acier par les ions chlorure	17
Figure I-2 : Processus de la corrosion de l'acier dans le béton [Moriande, 05]	22
Figure I-3: Réaction d'oxydoréduction et transport du courant (réaction électrochimique) [Torbiero, 06]	23
Figure I-4 : Diagramme de Pourbaix (Potentiel-pH) relatif au fer en milieu aqueux (Fe-H ₂ O) [Pourbaix, 75]	24
Figure I-5 : Modèle de K.Tuutti	28
Figure I-6 : Représentation schématique de processus de base de la corrosion des aciers dans le béton	30
Figure I-7 : Les étapes de la corrosion des aciers dans les bétons, induite par des agents agressifs	30
Figure I-8 : Composés susceptibles d'apparaître au cours du processus d'oxydation du fer selon Misawa et Pons	32
Figure II-1 : Modèle de Ressuage	44
Figure II-2 : Modèle de Magnétoscopie	45
Figure II-3 : Modèle de Courants induits	45
Figure II-4: Echelle des ondes élastiques. Les longueurs d'ondes sont données pour un solide ayant une vitesse du son de 5000 m/s. [Jean Perdijon, Hermes 93]	48
Figure II-5 : Analogie avec un ressort [thèse Université Mohamed Khider – Biskra, 03]	49
Figure II-6 : Déplacement longitudinal engendré par l'onde ultra-sonore	49
Figure II-7 : Déplacement transversal engendré par l'onde ultra-sonore	50
Figure II-8 : Faisceau ultra-sonore [J. Gosalbez]	53
Figure II-9: Géométrie d'un faisceau d'une onde plane [Fraunhofer]	54

Figure II-10: Géométrie d'un faisceau focalisé [L. Vergara,]	55
Figure II-11 : Photo de cavités d'air et microfissures	57
Figure II-12.: Onde de Rayleigh et onde de Love [Z. Wang, A. Nur ,92]	60
Figure II-13.: Répartitions des ondes ultrasonores sur une surface libre [Bond ,10]	61
Figure II-14 : Réfraction et réflexion des ondes ultrasoniques	64
Figure II-15 : Emission d'une onde élastique longitudinale	65
Figure II-16 : Palpeur pour ondes longitudinales	66
Figure II-17: Palpeur pour ondes transversales	66
Figure II-18 : Emission des ondes par ultrason [Berlincourt et al]	68
Figure III-1 : gravier 3/8 utilisé labo CUAT	73
Figure III-2 : dispositifs d'essais d'analyse granulométrie labo du CUAT	75
Figure III-3 : sable fin laboratoire CUAT	76
Figure III-4 : conservation des éprouvettes dans l'eau potable	78
Figure III-5 : Essais d'affaissement au cône Abrams laboratoire CUAT	79
Figure III-6 : Nettoyage acier avec de l'acide sulfurique laboratoire CUAT	81
Figure III-7 : les trois différents milieux laboratoire CUAT	82
Figure III-8 : appareil de mesure ultrason laboratoire CUAT	83
Figure III-9 : mode de transmission directe	85
Figure III-10 : les graphes du milieu 1	86
Figure III-11 : les graphes du milieu 2	89
Figure III-12 : les graphes du milieu 3	91
Figure III-13 : les graphes de la moyenne milieu 1	92
Figure III-14 : les graphes de la moyenne milieu 2	93
Figure III-14 : les courbes ph en fonction du temps	94

LISTE DES ABREVIATIONS

PM : prise mer

ES : eau sulfatée

mm : millimètre

Mn : manganèse

Cr : chrome

Ni : nickel

Mo : molybdène

Fe : fer

DEF : Delayed ettringite formation

BCA : british cement association

CO₂ : gaz carbonique

KOH : hydroxyde de potassium

NaOH : hydroxyde de sodium

E/C : rapport eau ciment

CND : contrôle non destructif

EA : emission acoustique

NF : norme française

PUNDIT : portable ultrasonique non destructive digital Indicating tester

BHP : béton à haute performance

EFIT : Elasto dynamic Finite Integration technique

Moy BO : moyenne éprouvettes béton armé

Moy Mort : moyenne éprouvettes mortier

FeCl₂ : chlorure de fer

Dc : diffusion de chlorure

U : potentiel standard de l'électrode de travail

n : nombre d'électrons

R : constante des gaz parfaits

F : nombre de faraday

T : température

Cox et Cred : concentration des espèces oxydant et réducteur en solution

m : masse

A : masse atomique

Icorr : intensité du courant de corrosion

t : temps

ρ : densité

σ : Longueur d'onde

Z : impédance acoustique

β : compressibilité du milieu

C : célérité

Hz : hertz (unité de la fréquence)

P : pression acoustique

D : diamètre de la source

f : fréquence

d : diamètre de la zone

ϑ : angle de divergence

ρ_{abs} : masse volumique absolue

ρ_{app} : masse volumique apparente

INTRODUCTION

GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

La durabilité des ouvrages en béton armés dépend de leur comportement face aux conditions climatiques et environnementales qui existent dans les milieux où ils sont construits. Ces ouvrages sont souvent exposés à des nombreuses agressions physico-chimiques auxquelles ils doivent résister afin de remplir de façon satisfaisante pendant leur période d'utilisation, toutes les fonctions pour lesquelles ils ont été conçus lorsqu'ils ne peuvent résister à ces agressions, des désordres dont le plus fréquent est la corrosion des armatures apparaissent dans le béton de ces structures, ces désordres sont généralement dus à des défauts de conception, à une mauvaise mise en œuvre ou à des causes accidentelles ; ils hypothèquent la durabilité, la résistance et la stabilité des ouvrages et peuvent entraîner leur dégradation partielle ou totale et par conséquent leur ruine.

La durée de vie de ces structures en béton armé est conditionnée par la réponse aux agressions physiques et chimiques de l'environnement, ainsi que par la capacité des matériaux constitutifs à se protéger contre ces attaques pour optimiser le dimensionnement et réaliser des ouvrages plus résistants et plus durables. Les concepteurs ont besoin de connaître le processus de corrosion et ses interactions environnementales et structurelles. Cependant, l'acier peut être dépassivé par pénétration des ions chlorures provenant de l'eau de mer, des embruns marins ou des sels de déverglaçage, comparativement à la corrosion par carbonatation du béton par le dioxyde de carbone (CO_2). La corrosion due aux chlorures est plus dangereuse à cause de son développement plus rapide et le risque de rupture soudaine pour les cas des environnements sévères.

Dans la durée de vie d'une structure en béton armé, on peut distinguer deux périodes : une période d'initiation et une période de propagation. La durée de la première période est déterminée par la vitesse de neutralisation du béton d'enrobage ou la vitesse de pénétration des agents agressifs tels que les chlorures. Lorsque la concentration en chlorures au niveau des barres d'acier est suffisamment importante, la période de propagation commence, puis l'acier se corrode et sa section diminue et cause la ruine de la structure ; la façon la plus simple et la plus efficace de prédire la durée de vie des ouvrages consiste à évaluer la phase d'initiation (ou d'incubation) de la corrosion.

Pour la corrosion par pénétration des ions chlorures, il s'agit de définir le temps nécessaire pour que le premier lit des armatures soit dépassivé. L'enrobage en plus d'offrir une protection chimique aux armatures, il agit comme barrière physique qui limite la pénétration des ions chlorures.

INTRODUCTION GENERALE

Dans ce travail de recherche, nous nous intéressons à la corrosion par les ions chlorures qui est la principale cause de dégradation des ouvrages en béton armé exposés aux sels marins.

Travail divisé en trois chapitres dont le premier est consacré à l'étude bibliographique du phénomène de corrosion et le second est consacré par les contrôles non destructifs entre autre le contrôle par ultrason et le dernier et troisième consacré aux expériences et interprétation des résultats réalisées au laboratoire pour l'auscultation par l'ultrason.

CHAPITRE I
ETUDE
BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. Introduction

Dans le cas des constructions en béton armé, la durabilité de l'ouvrage dépend essentiellement de la tenue des armatures à la corrosion, et au respect des différentes recommandations possibles à la réalisation, Afin de bien comprendre le phénomène de corrosion des aciers dans le béton, ce présent chapitre est consacré à définir le matériau béton et à étudier brièvement la corrosion afin de décrire les mécanismes de corrosion des aciers dans le béton et les différentes recommandations possibles pour la prévention de la durée de l'ouvrage dans un milieu agressif.

I.2. Béton armé

I.2.1 Historique

Le mot betun au sens de mortier est attesté dans le Roman de Troie (vers 1160-1170). Béton désigne d'abord (1636) une maçonnerie de chaux vive, gros gravier, blocailles, et cailloux, dont on fonde les bâtiments. Philibert Monet le traduit par le terme latin Opus signinum dont la description originale est donnée par Vitruve au Ier siècle av. J.-C. sorte de bétonnage constitué de chaux, de sable et d'éclats de pierre, exempte de tuileaux, dont la compacité était obtenue au terme d'un damage intensif. Il était aussi employé dans des ouvrages de citerne. « Le béton se pétrifie dans la terre et devient dur comme roc ».

Le béton est un assemblage de matériaux de nature généralement minérale. Il met en présence des matières inertes, appelées granulats ou agrégats (graviers, sables, etc.), et un liant (ciment, bitume, argile), c'est-à-dire une matière susceptible d'en agglomérer d'autres ainsi que des adjuvants qui modifient les propriétés physiques et chimiques du mélange. Mêlés à de l'eau, on obtient une pâte, à l'homogénéité variable, qui peut selon le matériau, être moulée en atelier (pierre artificielle), ou coulée sur chantier. Le béton fait alors « prise », c'est-à-dire qu'il se solidifie.

Connu depuis l'antiquité romaine, le béton est aujourd'hui le matériau le plus utilisé dans le monde, d'abord employé en complément ou en substitution de la pierre, le matériau a connu un réel essor dans son association avec l'acier pour les constructions. la complémentarité, à la fois mécanique et chimique, entre ces deux matériaux ,a permis de construire de façon économique et fiable les ouvrages nécessaires à toutes les activités humaines .

Le béton est un matériau capable de supporter des efforts de compression importants (10 à 100 MPa) alors que sa résistance aux efforts de traction est très faible (de l'ordre du dixième de sa résistance à la compression). C'est donc pour pallier cette insuffisance qu'est née l'idée de placer, dans les zones

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

soumises à des efforts de traction, des barres d'acier (armatures) qui sont résistantes aussi bien en compression qu'en traction. Le matériau résultant de l'association du béton et de l'acier est appelé « béton armé ». Il est utilisé comme matériau de construction, en particulier pour le bâtiment et le génie civil. Dans une structure en béton armé, les aciers principaux sont positionnés dans les parties tendues du béton pour compenser la mauvaise résistance du béton en traction.

I.2.2 Composants du béton armé

I.2.2.1 Ciment

Le ciment désigne un liant hydraulique (qui durcit sous l'action de l'eau), aujourd'hui le plus souvent employé dans la confection du béton armé, ou bien de mortier. C'est notamment le ciment Portland et le ciment métallurgique ainsi que leur variantes.

Le ciment est une invention du XIXe siècle. Il est composé de calcaire et d'argile qui, mélangé avec de l'eau, fait prise et permet d'agglomérer entre eux des sables et des granulats et ainsi constituer de véritables roches artificielles, les bétons et les mortiers [Ollivier et Al, 08]. Pour le béton armé, le ciment CPA est actuellement le produit le plus répandu sur le marché. Le CPA c'est le produit de calcination d'un mélange approprié de calcaire et d'argile. On les appelle ciment portland artificiel parce que en durcissant ils prennent l'aspect d'une roche naturelle existant sur l'île appelée Portland en Angleterre.

Les ciments actuels répondent aux exigences des emplois usuels ; les milieux qui présentent des agressions spécifiques nécessitent le recours à des ciments présentant une caractéristique particulière du fait de leur composition. C'est ainsi qu'en présence d'un facteur agressif pouvant entraîner la dissolution de la portlandite (par exemple l'eau pure), on préférera des ciments conduisant à une faible teneur en portlandite. Vis-à-vis des agressions dues aux milieux marins ou aux eaux sulfatées, on utilisera respectivement des ciments prise mer (PM) ou résistant aux eaux sulfatées (ES).

I.2.2.2 Le granulat

a) Définition

Les granulats sont des roches qui ont été naturellement cassées et roulées dans le lit des cours d'eau ou mécaniquement concassées. Ils serviront, avec les liants à la composition des mortiers et bétons, donc ce sont des matériaux inertes, de formes et de dimensions quelconques, appelées aussi par des

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

agrégats. Ils sont issus des roches carbonatées ou siliceuses, aggloméré par le ciment pour former une pierre artificielle, ils constituent le squelette du béton.

b) Rôle du granulat

Les granulats pour bétons sont des grains minéraux classés en fillers, sablons, sables, gravillons, graves ou ballasts, suivant leurs dimensions comprises entre 0 et 125 mm les granulats, qui sont généralement moins déformables que la matrice de ciment, s'opposent à la propagation des microfissures provoquées dans la pâte par le retrait. Ils améliorent ainsi la résistance de la matrice.

La nature des liaisons qui se manifestent à l'interface granulat/pâte de ciment, conditionne les résistances mécaniques du béton. La variété des fonctions remplies par le béton conduit à adopter des granulats qui, selon le cas, présenteront des caractéristiques d'aspect, de densité, de résistances mécaniques différentes.

Les granulats pour béton doivent provenir des roches chimiquement inertes c'est-à-dire la roche ne doit pas faire des réactions chimiques sur le ciment et inaltérable à l'eau. Il faut éviter les roches tendres et friables ainsi que les roches poreuses. Le choix d'un granulat est donc un facteur important de la composition du béton, qui doit toujours être étudiée en fonction des performances attendues, spécialement sur le plan de la durabilité.

I.2.2.3 L'eau de gâchage

L'eau de gâchage est un élément essentiel pour la fabrication du béton. Elle est ajoutée lors du mélange afin d'hydrater le ciment et permet de lier les constituants du béton entre eux. Élément indispensable pour obtenir du béton, l'eau utilisée doit absolument être propre (l'eau potable convient toujours, tandis que l'eau de mer est plutôt à proscrire) et ne doit pas être ajoutée avec excès car elle nuit à sa durabilité. Si ces deux conditions ne sont pas respectées, votre béton risque d'être fragile et ses performances seront altérées.

L'eau de gâchage incorporée lors de la confection du béton, lui confère à l'état frais la maniabilité et l'ouvrabilité et développe la réaction d'hydratation du ciment et contribue à la résistance mécanique et au durcissement.

I.2.2.4 Acier

Un acier est un alliage métallique constitué principalement de fer et de carbone dans des proportions comprises entre 0,02 % et 2 % en masse pour le carbone [Dunod, 02]. C'est essentiellement la teneur

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

en carbone qui confère à l'alliage les propriétés du métal qu'on appelle « acier ». Ce dernier est élaboré pour résister à des sollicitations mécaniques ou chimiques ou une combinaison des deux. Pour résister à ces sollicitations, des éléments chimiques peuvent être ajoutés à sa composition en plus du carbone. Ces éléments sont appelés éléments d'additions, les principaux sont le manganèse (Mn), le chrome (Cr), le nickel (Ni), le molybdène (Mo).

La teneur en carbone a une influence considérable (et assez complexe) sur les propriétés de l'acier : en dessous de 0,008 %, l'alliage est plutôt malléable et on parle de « fer » ; au-delà de 2,1 %, on entre dans le domaine de l'eutectique fer/carbure de fer ou bien fer/graphite, ce qui modifie profondément la température de fusion et les propriétés mécaniques de l'alliage, et l'on parle de fonte [McGraw-Hill, 06]. Entre ces deux valeurs, l'augmentation de la teneur en carbone a tendance à améliorer la dureté de l'alliage et à diminuer son allongement à la rupture ; on parle d'acier « doux, mi-doux, mi-dur, dur ou extra dur » selon la classification traditionnelle.

Outre ces diverses potentialités, et comparativement aux autres alliages métalliques, l'intérêt majeur des aciers réside d'une part dans le cumul de valeurs élevées dans les propriétés mécaniques fondamentales :

- raideur, résistance à la déformation élastique : module d'élasticité E ;
- résistance à la déformation irréversible, à la rupture : limite élastique R_e , résistance minimale à la rupture R_m ;
- dureté H ;
- résistance aux chocs : résilience K .

On peut néanmoins leur reconnaître quelques inconvénients, notamment leur mauvaise résistance à la corrosion à laquelle on peut toutefois remédier, soit par divers traitements de surface (peinture, brunissage, zingage, galvanisation à chaud, etc.), soit par l'utilisation de nuances d'acier dites « inoxydables ». Par ailleurs, les aciers sont difficilement moulables, donc peu recommandés pour les pièces volumineuses de formes complexes (bâti de machines, par exemple). On leur préfère alors des fontes.

Enfin, lorsque leur grande masse volumique est pénalisante (dans le secteur aéronautique par exemple), on se tourne vers des matériaux plus légers (alliages à base d'aluminium, titane, composites, etc.), qui ont l'inconvénient d'être plus chers. Lorsque le prix est un critère de choix important, les aciers restent privilégiés dans presque tous les domaines d'application technique : équipements publics (ponts et chaussées, signalisation), industrie chimique, pétrochimique,

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

pharmaceutique et nucléaire (équipements sous pression, équipements soumis à l'action de la flamme, capacités de stockage, récipients divers), agroalimentaire (conditionnement et stockage), bâtiment (armatures, charpentes, ferronnerie, quincaillerie), industrie mécanique et thermique (moteurs, turbines, compresseurs), etc...

I.3 Durabilité des ouvrages

La durée de vie des structures et ouvrages en béton armé est devenue à la fois une exigence et un souci majeur des constructeurs et des investisseurs. Afin de s'assurer de leur stabilité et de leur utilisation dans le temps, il est nécessaire d'étudier les pathologies dues à plusieurs cas (corrosion, carbonatation, microfissuration, etc...) et ce dans le but de diagnostiquer, évaluer, maintenir, et réparer les éventuels désordres. Une fois les phénomènes amorcés, en fonction des demandes et besoins des maîtres d'ouvrage, un diagnostic s'avère nécessaire. Il portera sur l'analyse des caractéristiques du béton et de son degré de pollution, sur l'état de corrosion des armatures.

Lorsqu'une plus grande durée de vie est demandée (ouvrages d'art exceptionnels, milieu nucléaire), il est alors nécessaire d'adopter une démarche basée sur des indicateurs de durabilité, qui impose au béton de répondre à un certain nombre de critères principalement d'ordre physico-chimiques. On utilisera des méthodes physiques (béton), des méthodes électrochimiques (armatures : détection de la corrosion, vitesse de corrosion, limites), des méthodes de laboratoire (béton principalement).

La seule durabilité intrinsèque du béton ne suffit plus à garantir la durée de service de l'ouvrage. Prescrire un béton durable nécessite donc d'apprécier, dès sa conception, l'ensemble des contraintes environnementales, des agressions et des attaques potentielles, qu'il aura à subir pendant toute sa durée de service, et de respecter et mettre en œuvre les recommandations en vigueur. Il convient de ne pas assimiler la durabilité d'un produit de construction à celle de l'ouvrage.

En effet, il est inutile de formuler un béton intrinsèquement durable, si sa mise en œuvre au sein de la structure n'est pas conforme aux règles de l'art et si les diverses sollicitations auxquelles il est soumis n'ont pas été correctement appréciées, ce qui conduirait à ce que l'ouvrage ne remplisse pas durablement sa fonction pendant sa durée de service requise.

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Il est possible désormais de définir des objectifs de durabilité et de choisir avec précision les caractéristiques du béton en fonction de l'agressivité du milieu dans lequel se trouve l'ouvrage et d'optimiser ses caractéristiques afin de les adapter à la durée de service souhaitée. Les spécifications concernent la nature et le dosage minimal en ciment, la compacité minimale, la valeur maximale du rapport Eau/Ciment, l'enrobage minimal des armatures et la teneur maximale en chlorures dans le béton.

Les connaissances actuelles sur les ciments et les bétons permettent d'optimiser et d'adapter encore mieux la composition et la formulation des bétons aux contraintes environnementales auxquelles ils seront soumis, tout en respectant les critères de performances mécaniques. Un béton durable est souvent un béton compact (présentant une faible porosité) dont les constituants de qualité ont été bien choisis conformément aux normes.

La norme NF EN 206-1 et les normes relatives aux produits préfabriqués en béton intègrent cette nouvelle approche, en mettant à la disposition du prescripteur une définition d'un ensemble de classes d'exposition pour prendre en compte l'environnement dans lequel se trouve l'ouvrage ainsi que les risques d'agressions et d'attaques auxquels il va être exposé pendant sa durée de service. Cette évolution s'inscrit dans une logique de progrès visant à optimiser la qualité des bétons et à maîtriser la durabilité des ouvrages.

Cependant, quelles que soient les précautions prise pour adapter et optimiser sa formulation, il ne pourra assurer sa fonction durablement que si les « règles de l'art » ont été respectées lors de sa fabrication (malaxage efficace adapté à la formulation, respect des tolérances sur les constituants) et de sa mise en œuvre (vibration correcte, cure adaptée, prise en compte des conditions climatiques lors du bétonnage, retraits maîtrisés, respect des valeurs d'enrobage des armatures, etc.).

Pour obtenir la durabilité spécifiée, il convient de respecter les recommandations ou les normes d'exécution des ouvrages tels que le fascicule 65, le DTU 21, ou les normes des produits préfabriqués ainsi que la norme NF EN 13369 pour les produits structuraux.

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Tableau I-1 : Classes d'environnement en fonction de la résistance à la compression.

Environnement	Classe d'environnement	Classe de résistance minimale à 28 jours pour béton armé
Sec	1	22
Humide sans gel/ou avec gel faible	2a	25
Humide avec gel modéré	2b1	25
Humide avec gel sévère	2b2	30
Humide avec gel modéré ou sévère avec des produits dégivants	3	32
Marin immergé (sans gel ou avec gel faible)	4a1	32
Marin marnage (sans gel ou avec gel faible)	4a2	35
Marin avec gel modéré ou sévère	4b	35
Faiblement agressif chimiquement	5a	32
Moyennement agressif chimiquement	5b	35
Fortement agressif chimiquement	5c	40

I.3.1. action des eaux de mer sur la durabilité des ouvrages

Un ouvrage peut être soumis à de multiples agressions engendrées par l'action des sels ou des gaz en solution dans l'eau (eaux souterraines, eaux de mer, pluie, etc.). Les eaux peuvent être chargées en sels minéraux les plus divers en fonction des sols traversés. Les milieux les plus agressifs sont soit acides, soit salins (chlorures, nitrates, et surtout sulfates de sodium, de calcium ou de magnésium). L'agressivité des milieux dans lesquels peuvent se trouver les ouvrages en béton est liée à la présence d'eau et à l'aptitude de celle-ci à réagir avec certains minéraux de la matrice cimentaire du béton.

En effet, les agents agressifs dissous dans l'eau constituent une solution chimiquement agressive pour le béton qui peut provoquer plusieurs types de phénomènes lorsque la formulation du béton n'est pas optimisée.

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

▪ **Un béton compact et peu perméable**

Le facteur essentiel qui garantit le bon comportement du béton en site maritime est sa compacité. Plus le béton sera compact, plus les agents agressifs auront des difficultés à pénétrer et à circuler dans son réseau poreux. Ce qui suppose une formulation prévoyant un rapport E/C relativement faible (par l'utilisation de super-plastifiants ou d'adjuvants réducteurs d'eau) et une optimisation du squelette granulaire.

▪ **Une formulation à base d'un ciment adapté suffisamment dosé**

La formulation du béton doit comprendre un ciment de caractéristiques complémentaires PM (Prise Mer), conforme à la norme NF P 15-317(ciments pour travaux à la mer) ou des ciments à base de laitier.

▪ **Le respect des valeurs d'enrobage des armatures**

Le respect des épaisseurs d'enrobage permet de maîtriser la corrosion des armatures de béton armé.

▪ **Une mise en œuvre et une cure soignées**

Une vibration adéquate et une cure efficace permettent d'obtenir les performances souhaitées et éviter la dessiccation de surface du béton.

L'hydratation optimale du ciment permet de réduire la porosité et d'accroître la résistance du béton. Susceptibles de provoquer un gonflement du béton. Les dégradations sont caractérisées par des fissures en surface qui apparaissent après plusieurs années d'exposition à des conditions sévères caractérisées par une forte humidité.

Ce phénomène rare peut se rencontrer, seulement dans des environnements humides, dans des pièces massives en béton coulées en place en période estivale ou sur des pièces de béton ayant subi un traitement thermique. Il est souvent dénommé DEF (Delayed Ettringite Formation), traduction anglaise de Formation Différée d'Ettringite. L'origine du gonflement et la nature des paramètres impliqués sont fait l'objet de nombreuses études.

On a constaté l'incidence importante:

- de la température du béton lors de sa prise et de ses traitements thermiques ;
- de la teneur en alcalin sur la solubilité de l'ettringite;
- de l'humidité (l'eau étant un des facteurs fondamentaux de la réaction).

Les cas de structures concernées par cette pathologie sont peu nombreux.

I.4 La corrosion

La corrosion des armatures est la dégradation la plus courante des ouvrages du génie civil. On estime en effet à 70% les pathologies du béton liées à cette problématique des dégradations observées lors de l'enquête réalisée par la British Cement Association. En 1994, l'IREX a mené une enquête sur des ouvrages très divers. Il en résulte que ce sont les armatures de peau et les armatures les plus sollicitées qui sont les plus corrodées [Taché, 94].

Dans le cas des armatures de peau, la corrosion est reliée à l'épaisseur du béton d'enrobage et à sa porosité. Dans le cas des armatures principales les plus sollicitées, c'est la fissuration du béton qui en est à l'origine. La corrosion ne peut s'initier que lorsque l'environnement est propice à son développement. Par sa forte basicité le béton est un excellent passivant pour les armatures en acier mais si la Carbonatation ou les chlorures parviennent à migrer jusqu'aux armatures, le pH peut s'abaisser suffisamment pour que la corrosion s'initie.

Lors du coulage du béton, l'acier corrodé superficiellement après stockage à l'air libre se trouve plongé dans un milieu très basique ($\text{pH}=12,7$) la solution interstitielle du béton. Cela forme autour de l'armature une fine couche d'oxydes en surface appelée couche de passivation [Duval, 92] qui la protège naturellement de la corrosion. Pour que la corrosion ait lieu, la présence simultanée d'eau et d'oxygène est une condition nécessaire.

I.4.1 Types de corrosion

Il existe plusieurs types de corrosion des armatures du béton dépendant de l'environnement et du milieu agressif. Mais les plus rencontrés dans les ouvrages en béton armé sont :

- Corrosion localisée par piqûres : attaque par les chlorures ;
- Corrosion généralisée par carbonatation du béton : se caractérise par l'existence de plusieurs processus électrochimiques élémentaires.

I.4.2 Principales causes de corrosion

La corrosion des aciers dans le béton est une des premières conséquences liées aux problèmes environnementaux. Ce phénomène de dégradation peut être provoqué par plusieurs facteurs tels que la présence d'agents agressifs (les chlorures ou le dioxyde de carbone de l'atmosphère), l'enrobage des armatures et la qualité du béton. Ce phénomène ne peut se produire que lorsque certaines conditions physico-chimiques sont réunies. L'existence de conditions particulières conduit au

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

démarrage d'un processus électrochimique qui tend à dissoudre localement le fer métallique afin de former des produits plus stables (oxydes, hydroxydes...).

I.4.2.1 Carbonatation

La carbonatation du béton par le gaz carbonique de l'air (CO_2) est un phénomène naturel qui n'est pas nocif pour le béton. Au cours de la prise et du durcissement, les ciments se combinent avec l'eau pour former des produits hydratés de caractère basique. Certains de ces produits [KOH, NaOH et $Ca(OH)_2$] restent dissous dans la solution aqueuse interstitielle du béton (dont le pH est compris entre 12 et 13).

Le gaz carbonique contenu dans l'air a tendance à se combiner avec les produits hydratés, en commençant par les bases alcalines dissoutes dans la solution aqueuse interstitielle, en particulier le $Ca(OH)_2$, selon une réaction produisant du carbonate de calcium $CaCO_3$:



La progression de la carbonatation se fait de l'extérieur de l'ouvrage, en contact avec l'air ambiant, vers l'intérieur. Dans un premier temps, la vitesse de propagation est ralentie par la formation des carbonates qui colmatent partiellement la porosité. Elle diminue donc avec la profondeur atteinte. Dans un second temps, la carbonatation a pour conséquence une neutralisation (chute du pH de la solution interstitielle) du milieu de protection des armatures, qui peuvent alors s'oxyder.

La cinétique du processus dépend de la teneur en dioxyde de carbone et de la facilité avec laquelle le gaz carbonique pénètre dans les pores du béton. Cette progression est fonction de paramètres liés aux caractéristiques du béton (nature et dosage du ciment, dosage en eau, porosité et perméabilité) et au milieu environnant. L'humidité relative de l'air joue, en particulier, un rôle important : la vitesse de carbonatation est maximale pour une humidité relative de l'ordre de 60 %, pratiquement nulle en atmosphère sèche ou pour des bétons complètement saturés en eau.

La cinétique et la profondeur de carbonatation d'un béton sont donc fonction de sa composition, de sa structure poreuse, de la classe d'exposition et de l'humidité relative dans laquelle est situé l'ouvrage. Elle dépend aussi de la concentration en dioxyde de carbone et de la température de l'atmosphère environnant.

L'augmentation de la compacité est obtenue en particulier en réduisant le rapport E/C. Ce rapport conditionne la perméabilité du béton donc l'interconnexion du réseau poreux et par conséquent, la vitesse ainsi que la possibilité de diffusion des gaz et des ions dans le béton. Une cure prolongée

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

permet d'augmenter la résistance du béton à la pénétration du dioxyde de carbone en améliorant les propriétés de surface du béton.

I.4.2.2 Action des chlorures

La corrosion par piqûres, ou corrosion de type pitting (en anglais pitting corrosion) est une attaque très localisée du matériau résultant de conditions de corrosion locales spécifiques. Est une forme extrêmement localisée de corrosion conduisant à la création d'un ou plusieurs petits trous dans le métal [Christian Vargel et Al, 02]. L'origine de ce type de corrosion se trouve d'une part dans le manque d'oxygène sur une partie très réduite, celle-ci devient anodique ; pendant qu'une autre partie bénéficiant d'un excès d'oxygène devient, elle, cathodique. Une corrosion de type galvanique est ainsi initiée sur une partie très localisée du métal et tend à se propager à l'intérieur de celui-ci créant une diffusion d'ions amenant une raréfaction localisée d'oxygène.

La corrosion de type pitting peut être initiée de diverses façons, des résidus présents dans le tube ou véhiculés par l'eau, un défaut de surface interne, un changement très localisé dans la composition du métal, ou une rupture de continuité dans une couche protectrice. On doit noter qu'une surface parfaitement polie est plus résistante au pitting. Les métaux les plus sensibles au pitting sont habituellement ceux qui se protègent de la corrosion par une couche de passivation, l'acier inoxydable, les alliages de nickel et ceux d'aluminium. Les métaux qui forment une couche uniforme de corrosion, l'oxyde de couleur verte à l'intérieur d'un tube de cuivre, la rouille dans un tube d'acier, semblent les moins sensibles au pitting.

La présence de chlorures, l'eau de mer, aggravent de façon très nette la formation de corrosions de type pitting par déclenchement de processus auto-catalytique. Les fosses de corrosion se chargent d'ions métal positifs par dissociation anodique. Les ions Cl^- se concentrent dans les fosses en charge neutre et favorisent la formation d'ions métal positifs avec l'eau formant un produit de corrosion hydroxyde et des ions H^+ . Désormais les fosses de corrosion sont acides, ce qui accélère le phénomène. À cet endroit se crée ainsi une anode et le reste de la surface fait office de cathode. La petite surface de l'anode et la grande surface de la cathode provoque un courant de forte intensité du côté anode et ainsi une vitesse de corrosion élevée.

L'appellation corrosion par piqûres fait référence au fait que la corrosion se manifeste surtout en profondeur dans le matériau et que sa profondeur est bien plus grande que son diamètre. Cette profondeur ainsi que le nombre de piqûres est très variable mais cette attaque est une des formes les plus graves de corrosion. Elle peut s'avérer très rapidement dommageable pour la robustesse du

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

matériau. En outre, la corrosion par piqûres peut-être difficile à détecter car ces petits trous peuvent être masqués par des dépôts de corrosion.

I.4.2.2.1. Influence des ions chlorures

La forme la plus connue de corrosion par piqûres est l'attaque de l'acier inoxydable austénitique par les chlorures. Les ions de chlore sont les déclencheurs de la corrosion par piqûres. Ils se substituent aux groupes OH^- de la couche passive constituée d'un réseau de $\text{CrO}(\text{OH})$. Ils endommagent cette couche protectrice et démarrent la corrosion par piqûres. Des températures ou des taux d'acidité plus élevés accentuent la corrosion par piqûres. Le mécanisme précis de la corrosion par piqûres est mal connu mais des essais ont montré que le phénomène se manifeste plutôt avec des fluides stagnants qu'avec des fluides en mouvement. L'ajout de molybdène à l'acier comme élément d'alliage améliore la résistance à la corrosion par piqûres. Des matériaux comme le laiton et le Monel sont moins sensibles à la corrosion par piqûres.

L'action des chlorures est spécifique à certains environnements dans lesquels peut se trouver le béton comme les ouvrages soumis aux sels de déverglaçage ou situés en site maritime (zone de marnage, surfaces soumises aux embruns). Les ions chlorures peuvent pénétrer par diffusion ou migrer par capillarité à l'intérieur du béton, franchir la zone d'enrobage, atteindre les armatures, et provoquer des corrosions (par mécanisme de dissolution du métal suivant une réaction d'oxydoréduction: $\text{Métal} \rightarrow \text{ions métal Mn}^+ + n \text{ électrons}$), d'abord ponctuelle (corrosion par piqûres) puis généralisée à toute la surface de l'acier.

Des ions chlorures véhiculés par l'eau peuvent être présents dans le béton : ils peuvent être présents dans les composants du béton (granulats marins, ...), être incorporés au moment du malaxage (adjuvants accélérateurs de prise chlorés, ...) ou encore pénétrer dans l'ouvrage au fil du temps par diffusion à partir du milieu extérieur (eau de mer, sels de déverglaçage, ...). Toutefois, des défauts d'enrobage, des bétons mal vibrés et de ce fait trop poreux, ou des milieux très agressifs, risquent de conduire à une dégradation prématurée de l'armature en acier.

On peut distinguer deux sortes des chlorures :

- **Chlorures libres** : se trouvent sous forme ionique dans la solution interstitielle, ils sont extractibles dans l'eau et sont de ce fait appelés « chlorures solubles dans l'eau ».
- **Chlorures totaux** : incluent, outre les précédents ; ceux fortement absorbés sur le C-S-H et ceux chimiquement liés dans la matrice cimentaire sous forme des composés tels que le chloro-aluminate de calcium.

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

A partir d'une certaine teneur en chlorure, la couche de passivation de l'acier est attaquée, la corrosion due aux chlorures est un phénomène très dangereux parce qu'elle se produit localement et entraîne une réduction importante de la section de l'armature.

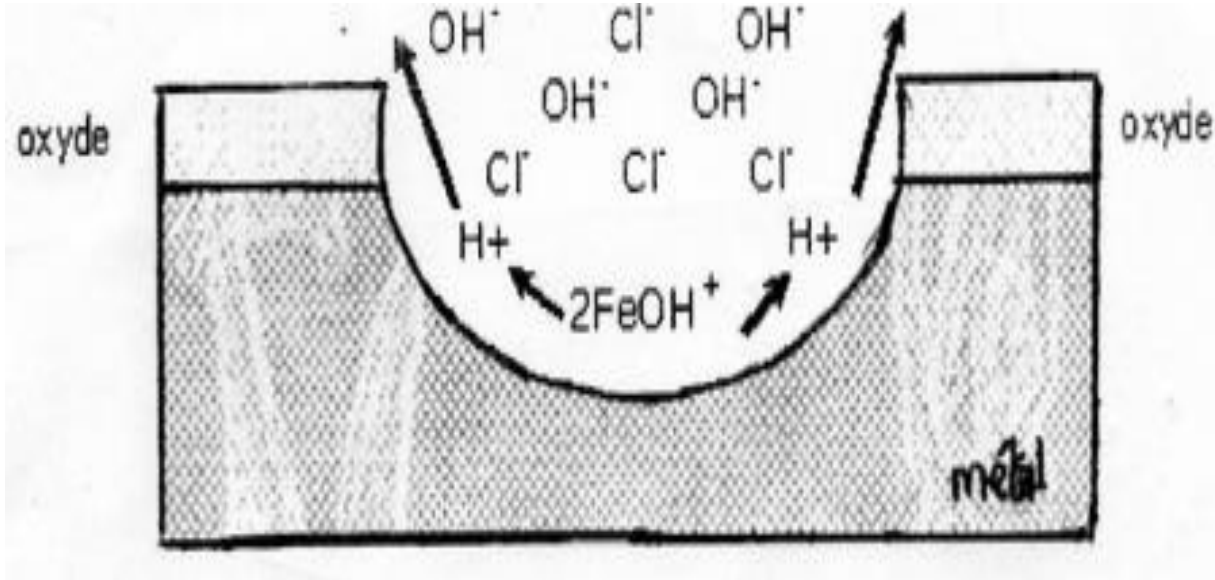
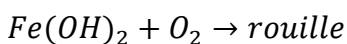
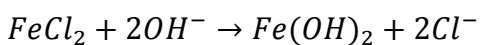


Figure I-1: Modèle de PAGE et al. Attaque de l'acier par les ions chlorure

En effet, les ions Cl^- réagissent avec les ions Fe^{++} pour former du chlorure de fer.

Celui-ci consomme les ions hydroxyle, migre et s'oxyde plus loin en déposant de la rouille. De là, les tâches de rouille en surface du béton, typiques d'une corrosion par les chlorures. Les réactions se déroulent comme suit :



On constate donc que les ions chlore, Cl^- , sont recyclés, ce qui explique que la rouille ne contient pas de chlorures, même si des chlorures ferreux sont formés lors des étapes intermédiaires de la réaction. Ainsi, cette corrosion est susceptible de continuer au même endroit. La corrosion initiée par les chlorures est donc une corrosion localisée par piqûres de l'acier.

I.4.2.2.2. Teneur critique en ions chlorures

Elle est extrêmement dangereuse car elle entraîne une réduction locale de la section d'armature. Lorsque celle-ci devient trop petite, elle se rompra brusquement, ce qui peut avoir des conséquences désastreuses.

En ce qui concerne la teneur critique en chlorures, on a constaté qu'il n'existe pas de valeur limite unique. La corrosion des armatures s'amorce dès que la teneur en ions chlorure au niveau des armatures atteint un certain seuil de dépassivation. Ce seuil peut varier en fonction de nombreux facteurs (cation associé aux chlorures, teneur en oxygène, humidité relative, température, degré d'hydratation du ciment, teneur en C_3A , porosité, ajouts, composition de l'acier, ...).

Toutefois, un rapport $[Cl^-]$ libre/ $[OH^-]$ égal à 0,6 est souvent admis. Cette seule teneur en chlorures limite est insuffisante pour déterminer si la corrosion aura lieu. Comme elle dépend du pH, il y a un rapport indirect avec la carbonatation. Un rapport $[Cl^-]$ libre/ $[OH^-]$ compris entre 0,6 et 1 conduit généralement à une concentration «critique» en ions chlorure totaux de l'ordre de 0,4 % de la masse de ciment pour un béton non carbonaté et donc à des concentrations «critiques» comprises entre 0,04 et 0,1 % par rapport à la masse de béton suivant la formulation.

I.4.2.2.3 Facteurs influents sur la pénétration des chlorures

La pénétration en ions chlorures peut être influencée par des facteurs liés à la composition du matériau ou bien à sa mise en œuvre ou liés au milieu environnant. Les plus essentiels sont :

- **Le rapport E/C :** comme pour le problème de carbonatation, la migration des ions chlorures à travers la structure poreuse d'un béton est fortement liée aux propriétés de transfert de béton (diffusivité et perméabilité).

Powers et Al ont mis en évidence l'importance de la diminution de la perméabilité d'une pâte de ciment lorsque le rapport E/C diminue au-dessous d'un rapport critique $E/C=0,70$.

Pour des rapports E/C plus élevés, le réseau de capillarité reste toujours interconnecté même si l'hydratation du ciment reste complète.

- **Les additions minérales et les ajouts :** les additions minérales et les adjuvants donnent au béton un niveau de la résistance à la compression fixé. la résistance à la compression peut constituer un critère vis-à-vis de la durabilité. Les fillers calcaires ne modifient pas la perméabilité et la

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

diffusivité du béton, cependant, d'autres additions minérales comme les laitiers, cendres volantes ou encore la fumée de silice modifient la nature et la textures de ces hydrates.

Ils réduisent la portlandite dans ces hydrates, cette réduction de la portlandite s'accompagne en général d'un affinement des pores et capillaires et donc une réduction de la perméabilité. Cette action peut prendre quelques jours pour les fumées de silice, quelques semaines pour les laitiers et quelques mois pour les cendres volantes.

- **La nature du ciment :** la nature du ciment joue un rôle important dans la fixation des ions chlorures, en effet les chlorures sont absorbées sur le C-S-H, soit fixé pas les aluminates(C_3A) qui dépendent tous deux de la composition du ciment.

Une augmentation de la teneur en C_3A du ciment conduit donc à une diminution de la teneur en chlorures libres c'est-à-dire une augmentation de la teneur en chlorures fixes.

- **La teneur en eau :** il est naturel de penser que la capacité de fixation du matériau vis-à-vis des ions chlorures est directement liée à la surface spécifique en contact avec la solution interstitielle : elle diminuerait avec l'humidité interne.

Cependant, malgré une diminution de la teneur en eau les parois des pores reste couvèrent d'une couche absorbée d'eau, il en résulte une augmentation de la solution au voisinage de ces pores. Donc pour des faibles teneurs en eau, on aura des chlorures piégés dans une mince pellicule d'eau qui pourront être considérés comme fixés, et une diminution de la mobilité des ions chlorure.

- **Le flux de liquide :** les mouvements d'eau peuvent réduire la fixation des ions chlorure, des essais d'imbibition capillaires par solution saline menés par FRANCKY montre que les ions chlorure sont transportés par l'eau et qu'une durée d'imbibition insuffisante ne permet pas d'atteindre l'équilibre de fixation du chlorure. Ce fait est expliqué par :
 - Les chlorure transportés par l'eau dans les gros pores n'ont pas tout de suite accès aux hydrates avec lesquelles ils interagissent ;
 - La vitesse imposée aux ions peut réduire le nombre de chocs avec les parois des pores et donc le nombre de retentions efficaces ;
 - La forte énergie cinétique de mobilité des ions chlorure dans les pores peut favoriser la désorption par rapport à la fixation ;
 - Un état initial sec du matériau peut rendre les hydrates inaptes à une fixation immédiate.
 - Ainsi, un flux convectif rapide gêne (retardé) la fixation de chlorure sur la matrice.

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

- **La teneur en chlorure :** les chlorures présents dans le béton peuvent soit être introduits lors du gâchage, soit provenir du milieu environnant, lorsque la teneur en chlorure atteint ou dépasse une valeur critique ou une valeur seuil, on dit y a dépassivation de la couche protectrice de l'acier, l'enrobage ne peut plus protéger l'armature et la corrosion s'amorce si la quantité de l'eau et d'oxygène sont suffisante.
- **Coefficient de pénétration des chlorures**

Vu les données disponibles, le coefficient de diffusion des chlorures pour les environnements marins est exprimé en fonction du rapport E/C par le modèle de [Hobbs et Al, 99] donnée par l'équation :

$$D_c = 0,04 \times 1166^{E/C} \times 10^{-12} \quad (3)$$

Pour un béton à base du ciment portland ordinaire et de rapport E/C=0,5, le coefficient de diffusion est égale à $D_c=1,37 \cdot 10^{-12}$.

- **L'enrobage**

L'épaisseur de l'enrobage constitue une barrière physique aux ions chlorures. la plupart des règlements actuels prescrivent des valeurs d'épaisseurs minimales afin d'assurer la durabilité de la structure, cette épaisseur permet de différer l'initiation de la corrosion en augmentant artificiellement le trajet des ions agressifs vers les armatures. Afin de quantifier l'influence de l'enrobage sur le d'initiation de la corrosion, on fera varié « e » de 30mm jusqu'à atteindre le T_{int} égale à 50 ans, car les bâtiments et les ouvrages de génie civil courant sont dimensionnés pour une durée d'utilisation de projet de 50 ans.

I.4.3 Phénomène de corrosion

Cette partie décrit les principes de base de la corrosion qui sont normalement valables pour tous les métaux. Une première partie explique la thermodynamique des réactions de corrosion. Mais l'aspect thermodynamique seul ne permet pas d'interpréter les faits expérimentaux. Il y a d'autres phénomènes qui interviennent comme la cinétique électrochimique qui est l'étude de la vitesse des réactions électrochimiques. Une réaction électrochimique est une réaction d'oxydoréduction qui a lieu à l'interface entre l'électrode et l'électrolyte. Deux processus complémentaires interviennent comme le transfert de charge entre l'électrode et l'électrolyte et le transfert de matière des espèces redox de l'électrolyte à la surface de l'électrode. Ce transport de matière peut avoir lieu par diffusion,

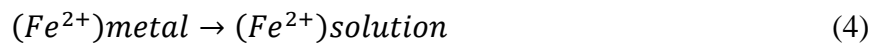
CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

convection et migration. La deuxième partie explique la cinétique des réactions de corrosion qui détermine le taux de corrosion.

I.4.3.1 Notion de thermodynamique électrochimique

• Corrosion électrochimique du fer

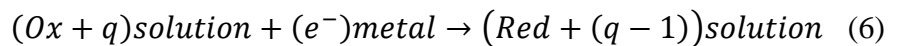
L'état métallique n'est pas thermodynamiquement stable, dans des conditions naturelles d'utilisation, contrairement aux oxydes de fer Fe_2O_3 qui sont thermodynamiquement plus stables que le métal Fe. Le risque de corrosion est donc « naturel ». Le processus de corrosion aqueuse est un processus électrochimique car il se traduit par une réaction à laquelle des espèces chimiques et des charges électriques prennent part. Il est à la fois réaction chimique et transfert d'électrons. La corrosion électrochimique résulte de l'établissement de courants locaux dus à l'existence de piles locales, la réduction cathodique et l'oxydation anodique étant localisées en deux zones distinctes. Il se crée ainsi une différence de potentiel entre ces deux zones. La corrosion correspond à la formation, à partir de l'état métallique, d'ions passant en solution donc à une oxydation. Le plus souvent, un ion en solution est identique à celui existant dans la phase métallique:



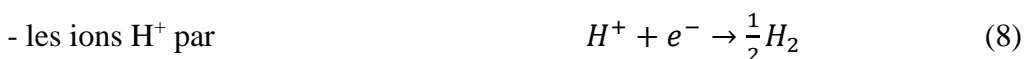
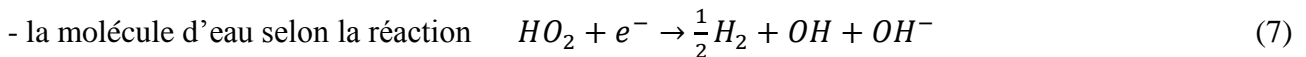
A température ambiante, la corrosion des matériaux métalliques est exclusivement due à l'eau, même si d'autres facteurs peuvent intervenir. La réaction anodique correspond à la dissolution du fer.



La réaction (2 dans le paragraphe I.3.2.2.1) est nécessairement couplée avec une réaction de réduction dite réaction cathodique, éliminant les électrons produits:



Les oxydants les plus communs sont :



CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

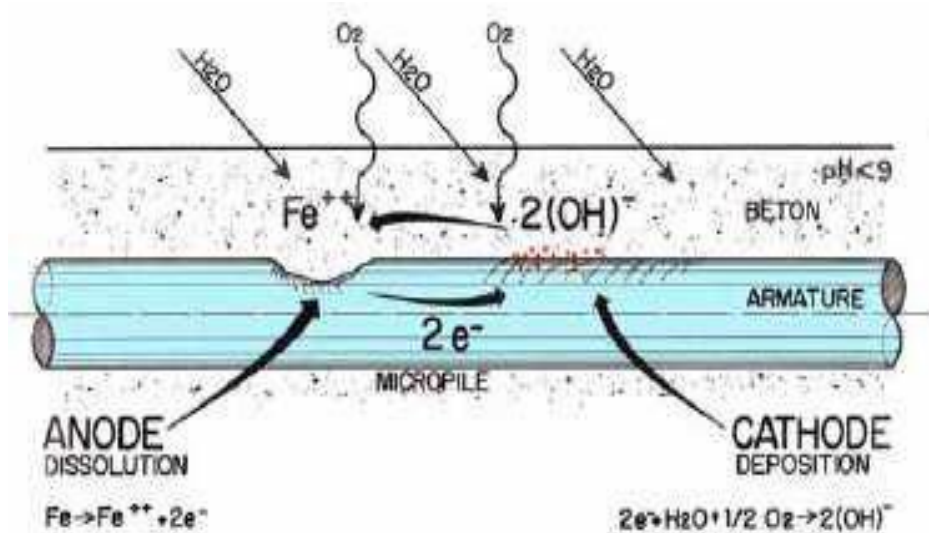


Figure I-2 : Processus de la corrosion de l'acier dans le béton [Moriande, 05]

Le processus électrochimique peut s'écrire sous la forme suivante :



Un métal est formé d'un réseau d'ions positifs et d'un nuage d'électrons pouvant se déplacer par rapport à ces ions. Lorsque le conducteur électronique (Fe) est en contact avec un conducteur ionique par exemple électrolyte (HO), il constitue une électrode.

- **Loi de Nernst**

Les métaux se trouvent en principe à l'état d'oxydes, de sulfates et de carbonates. Une fois réduits à leur état métallique tel le fer, ils ont tendance à revenir à leur état initial, c'est-à-dire à la forme oxydée qui est thermodynamiquement stable. C'est ce phénomène chimique qui est appelé corrosion. Il se crée vite un équilibre dynamique qui correspond à la dissolution du métal (oxydation) :



Cet équilibre correspond à un potentiel E représentant la différence de potentiel entre le métal Ox et l'électrolyte contenant les ions (figure I-3). Ce potentiel est régi par **la loi de Nernst** :

$$U = E + \frac{Rt}{Nf} \ln \frac{C_{ox}}{C_{red}} \quad (12)$$

Avec :

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

U: potentiel standard de l'électrode de travail, le métal.

n : nombre d'électrons.

R : constante des gaz parfaits (8,314 J.mol⁻¹.K⁻¹).

F : nombre de Faraday (96500 C/mol).

T : température absolue.

C_{Ox} et C_{Red} : concentration des espèces Ox et Red en solution.

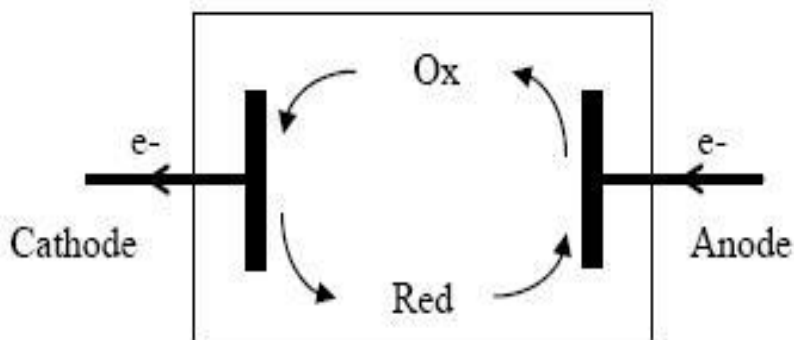


Figure I-3: Réaction d'oxydoréduction et transport du courant (réaction électrochimique) [Torbiero, 06].

Le potentiel standard de l'électrode E^0 est mesuré par rapport à une électrode de référence dite électrode standard à l'hydrogène. Le potentiel d'équilibre n'est mesurable que lorsqu'il n'y a pas de courant.

• Diagramme de Pourbaix

Lorsqu'on plonge un métal, ici, une barre de fer, dans une solution contenant les ions métalliques, il existe une différence de potentiel entre le métal et la solution qui est appelée potentiel d'électrode. Chaque couple oxydo-réducteur (Fe/Fe^{2+} ; $\text{H}_2\text{O}/\text{H}^+$) a un potentiel d'électrode par rapport à une électrode de référence. Lorsque ces deux couples sont mis en jeu, au bout d'un temps suffisamment important pour qu'un régime stationnaire soit établi, il se crée une différence de potentiel entre l'électrode métallique et la solution appelé potentiel de corrosion.

Le métal a un potentiel qui dépend fortement de son environnement. Certains potentiels d'électrode sont influencés par le pH du milieu environnant. C'est le cas de l'armature dans le béton. Le pH de

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

la solution électrolytique a une forte influence sur le potentiel de l'armature. Le pH de la solution interstitielle du béton fortement basique joue le rôle de protecteur de l'armature.

Si l'on fait varier le pH de la solution interstitielle, le potentiel du système acier/béton va varier et modifier l'état de l'armature. On trace ainsi le diagramme de Pourbaix $E = f(\text{pH})$ à partir des équations d'équilibre donnant le potentiel d'équilibre d'une réaction d'oxydoréduction [Duval, 92].

De nombreuses réactions d'électrode dont celles conduisant à la formation d'oxydes en milieu aqueux font intervenir les ions H^+ . Le potentiel E dépend donc du pH de la solution. Les diagrammes de Pourbaix (potentiel-pH) permettent de prévoir les réactions de corrosion métallique (figure I-4). Mais en aucun cas, ces prévisions ne font intervenir de considérations cinétiques.

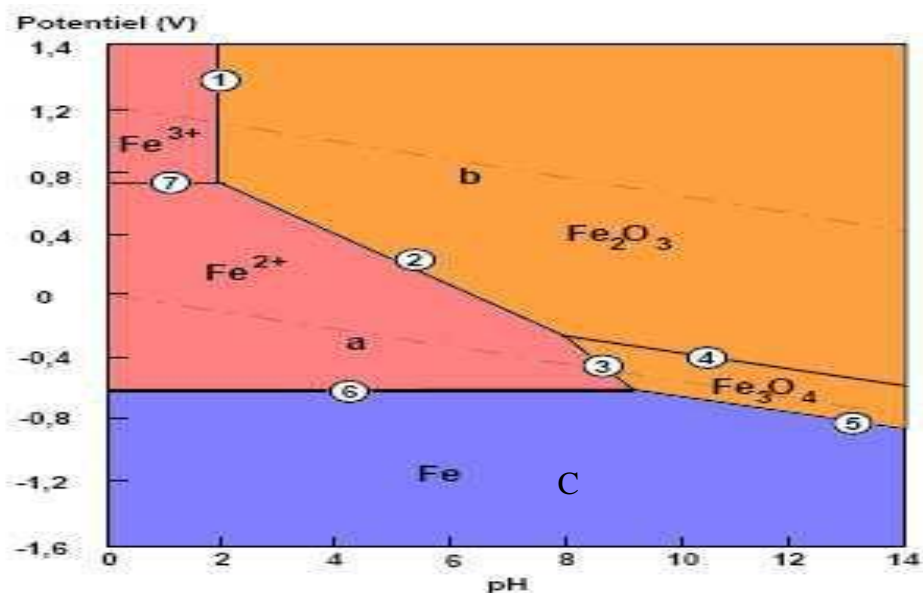


Figure I-4 : Diagramme de Pourbaix (Potentiel-pH) relatif au fer en milieu aqueux ($\text{Fe}-\text{H}_2\text{O}$)

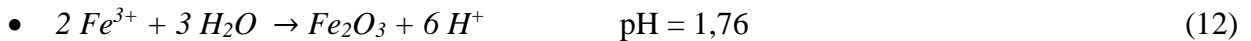
[Pourbaix, 75]

Dans ce diagramme, les zones délimitées par des traits indiquent les couples de valeurs (E , pH) pour lesquelles une espèce est stable. Il met en évidence plusieurs domaines :

- des zones de corrosion (zone a), on est dans une zone de stabilité d'espèces solubles du fer (Fe^{2+}).
- des zones de passivité (zone b), on est dans une zone de stabilité d'un de ses oxydes (Fe O).
- des zones d'immunité (zone c), le métal ne réagit pas, on est dans une zone de stabilité du fer (Fe).

Les différentes frontières représentées correspondent respectivement aux équilibres suivants [Pourbaix, 75] :

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE



I.4.3.2 Approche cinétique

La thermodynamique n'explique pas à elle seule le processus de corrosion électrochimique. C'est une réaction d'oxydoréduction avec deux processus cinétiques complémentaires comme le transfert de charge et le transfert de matière. Une réaction électrochimique est presque toujours constituée d'une succession d'étapes élémentaires qui sont associées pour former une réaction en chaîne. Chaque étape élémentaire a sa vitesse propre.

La régulation de la réaction en chaîne est assurée par l'étape élémentaire qui a la vitesse plus faible (étape lent limitant). Les étapes plus rapides ont lieu à une vitesse inférieure à leur vitesse maximale propre.

a) Principe de Butler-Volmer : loi fondamentale de la cinétique électrochimique

La loi de Nernst nous a permis de relier l'évolution du système à la différence de potentiel entre les deux couples et de définir le potentiel d'équilibre de l'électrode. Lorsqu'un courant circule dans la cellule galvanique, le système est nécessairement hors équilibre. La vitesse des réactions électrochimiques est reliée au courant i et une réaction ne peut se produire que dans un domaine de potentiel. On peut donc relier le courant (paramètre cinétique) et le potentiel (paramètre thermodynamique).

D'un point de vue cinétique, la vitesse d'une réaction électrochimique correspond au transfert d'un certain nombre d'électrons à l'interface matériau métallique/ solution [Jaubert, 04]. On peut donc l'évaluer à partir de la densité de courant et des cinétiques de chacune des réactions anodiques et cathodiques. La vitesse globale dépend de la cinétique de l'étape la plus lente qui contrôle l'ensemble du processus.

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

La vitesse d'une réaction dépend du transfert de charge, du transfert de matière (diffusion) et du transport de matière (convection). En supposant qu'il n'y a pas d'agitation de l'électrode (pas de convection), la vitesse de la réaction électrochimique du système métal/électrolyte dépendra de la cinétique du transfert d'électrons et de la cinétique du transfert de masse qui contrôle les concentrations inter faciales.

b) Loi de Faraday : étude quantitative (cinétique de corrosion)

La corrosion d'un métal se traduit par une perte de masse. Pour déterminer la durée de vie d'une structure soumise à une attaque électrochimique, il est nécessaire d'évaluer en fonction du temps la quantité de métal passé en solution.

La loi de Faraday permet la détermination de cette perte de masse $m(g)$:

$$m = \frac{A \times I_{corr} \times t}{n \times F} \quad (19)$$

Avec :

- A : masse atomique du métal (g),
- I_{corr} : intensité du courant de corrosion (Ampère),
- t : temps (s),
- n : le nombre d'électrons de valence,
- F : la constante de Faraday égale à 96500C/mole.

Cette relation montre que pour un métal donné, la perte de masse est proportionnelle au courant de corrosion. Dans la pratique la résistance d'un métal en service dans un électrolyte, se caractérise par la cinétique de corrosion exprimée en mm/an.

On classe les métaux en quatre catégories :

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Tableau I-2 : Cinétique de corrosion

Vitesse de corrosion ($\mu\text{m}/\text{an}$)	Résistance à la corrosion	
< 0,05	Très résistant	TB
< 0,5	Résistant	B
0,5 à 1,0	Peu résistant	AB
> 1	Non résistant	M

I.4.4 Rôle du béton

Le béton protège l'acier de la corrosion du fait d'une part de la forte alcalinité (pH élevé de l'ordre de 12,5 à 13) de sa solution interstitielle et d'autre part, de son rôle de barrière contre la pénétration d'agents agressifs. Pour comprendre l'influence du milieu sur la corrosion des armatures, il est nécessaire de connaître la composition de la solution interstitielle au voisinage de l'acier dont les processus électrochimiques dépendent. Le béton enrobant l'acier est un matériau poreux constitué de trois phases : solide, liquide et gazeuse.

- **La phase solide** est constituée de granulats et de la pâte de ciment. Les granulats inactifs en général sur la corrosion des armatures peuvent, par leur présence, ralentir la pénétration d'agents agressifs [Garboczi, 98]. Toutefois la présence de liquides dans leurs pores peut influencer sur la cinétique de corrosion. La pâte de ciment poreuse, composée de silicates de calcium hydraté C-S-H (50 à 70% du volume), de portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et ettringite joue un rôle important parce que la pénétration des agents agressifs se fait par les pores.
- **La phase liquide**, d'après les travaux de Powers et al, se présente sous quatre formes : l'eau liée chimiquement, l'eau adsorbée à la surface des C-S-H, l'eau interfeuillet et l'eau contenue dans les pores capillaires [Powers, 47]. La solution des pores est thermodynamiquement en équilibre avec la phase solide et fortement chargée en ions. Lorsque des agents extérieurs pénètrent, la solution change et des effets sur la matrice cimentaire.
- **La phase gazeuse** est contenue dans la porosité. C'est l'air contenu dans la porosité connectée qui favorise la pénétration des agents agressifs vers les aciers. Cette pénétration s'accompagne de l'acidité de la solution et de la dépassivation de l'acier.

I.4.5 Etat de l'acier dans le béton

L'acier est un alliage passivable c'est-à-dire capable de former une couche protectrice, dense, étanche et isolante électriquement, qui s'oppose au passage de ses ions métalliques vers l'électrolyte. Cette passivation est fonction du pouvoir oxydant de l'électrolyte et de la morphologie de la couche formée.

Les propriétés oxydantes de la solution entraînent une réaction entre la barre de fer et la solution électrolytique qui conduit à la croissance initiale d'adsorbants hydroxylés en surface du métal. Ensuite, il se forme une couche oxydée continue non poreuse qui constitue une phase homogène nouvelle. L'acier est recouvert d'une couche passive, une couche d'oxydes, qui le protègent des agressions extérieures. Dès lors que le milieu environnant change, la stabilité de l'ensemble béton/acier est « modifiée ». La couche passive disparaît et la corrosion peut s'amorcer.

I.4.6 Amorçage et propagation de la corrosion

La corrosion des armatures dans le béton est décrite par le modèle phénoménologique de Tuutti [Tuutti, 82]. Il considère que la corrosion des armatures est divisée en deux phases : une phase d'incubation et une phase de propagation (*figure I-5*).

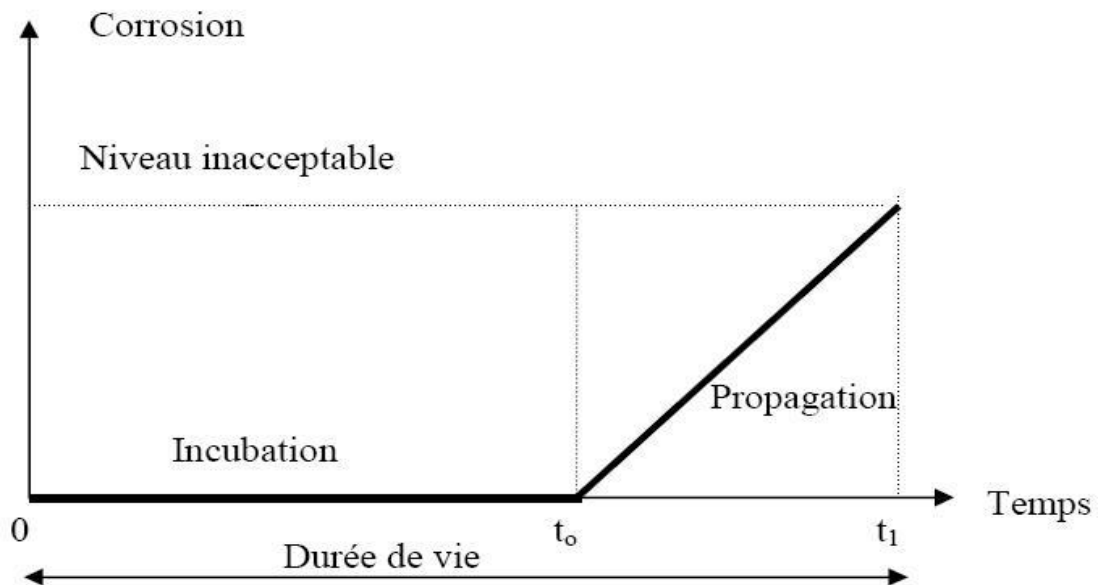


Figure I-5 : Modèle de K.Tuutti [K.Tuutti, 82]

La phase d'incubation correspond à une période pendant laquelle les agents agressifs pénètrent dans le béton d'enrobage jusqu'à l'armature. Quand les agents agressifs atteignent le niveau critique qui va provoquer la dépassivation de l'acier, la corrosion s'amorce puis se développe à une vitesse qui dépend de la température, de la présence d'oxygène et de la conductibilité électrique du béton [François, 94].

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Le temps t_0 correspond au passage de la phase d'incubation à la phase de propagation. Pour accélérer ou retarder l'amorçage, il faut intervenir sur l'épaisseur du béton d'enrobage. En comparant les profondeurs de pénétration des agents agressifs et l'épaisseur du béton d'enrobage, on peut estimer si la corrosion est amorcée. Dès lors que l'amorçage de la corrosion a eu lieu, si les conditions environnementales ne sont pas modifiées, la propagation ne peut pas être interrompue.

I.4.7 Processus de corrosion

Il convient de préciser que la corrosion d'un métal a comme moteur différents processus de corrosion tels que :

- corrosion électrochimique : corrosion aqueuse
- corrosion chimique
- corrosion biochimique
- corrosion par érosion
- corrosion en milieu gazeux : corrosion sèche

Nous nous intéresserons essentiellement à la corrosion aqueuse (corrosion électrochimique) car c'est l'un des phénomènes les plus importants qui correspond en outre au processus de corrosion de l'acier dans le béton. Son existence est conditionnée par la présence simultanée en surface du métal de zones cathodiques et anodiques. Ces zones peuvent subir des réactions d'oxydation et de réduction lorsqu'elles sont en contact avec une solution électrolytique conductrice d'ions. Cette forme de corrosion est due à la formation de micro-piles à l'intérieur du métal lui-même.

Il existe deux types de réaction électrochimique (réaction d'oxydoréduction):

- Réaction chimique directe : métal plongé dans une solution.
- Pile électrochimique : apparition d'un courant entre deux électrodes lorsqu'on les réunit.

Afin de refléter avec précision la corrosion qui se produit au sein de la structure, les actions dues aux micro-piles doivent être ajoutées à celles dues à la macro-pile [Andrade, 91]. De nombreuses recherches ont été effectuées et toutes s'accordent à penser que le courant de corrosion i_{corr} représente l'activité combinée d'une part par la micro-pile et d'autre part par la macro-pile. Nous allons expliquer ces deux mécanismes de corrosion, la corrosion par macro-pile et par micro-piles [Elsener, 02], [Smolinski, 07], [Andrade, 96]

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

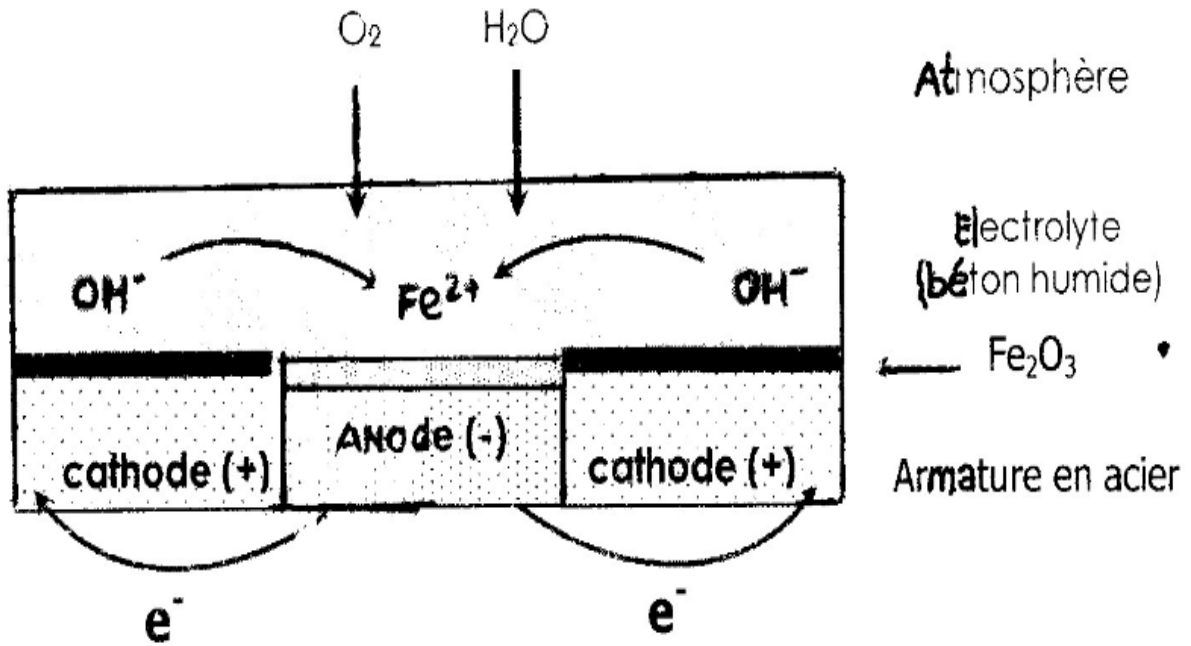


Figure I-6 : Représentation schématique de processus de base de la corrosion des aciers dans le béton.



Figure I-7 : Les étapes de la corrosion des aciers dans les bétons, induite par des agents agressifs.

I.4.7.1. Corrosion par micro-piles

La corrosion par micro-piles est observée lorsque les réactions anodiques et cathodiques ont lieu non loin d'une autre réaction. Elle se produit à des endroits isolés le long de la barre comme des piqûres de corrosion. Les réactions anodiques et cathodiques étant proches les unes des autres sur une petite surface, la dissolution de l'acier se fait sur une zone assez large qui donne l'impression d'avoir une corrosion généralisée. Cette dernière résulte en général de la carbonatation du béton ou d'une très forte attaque par les chlorures concentrés en une zone [Elsener, 02] et [Raupach, 96].

I.4.7.2. Corrosion par macro-pile

Les macro-piles se développent quant à elles lorsqu'il y a de grandes zones anodiques qui sont en contact électrique avec des zones cathodiques [Andrade, 91] et [Keddani, 94]. Le béton agit comme un électrolyte afin de compléter la pile galvanique. La corrosion par macro-pile a une influence sur la corrosion par micro-pile, elle peut en augmenter les effets.

I.4.8 Produits de corrosion

On trouve différents types de produits de corrosion suivant la nature des espèces en solution. On peut les répertorier en fonction de la valence de l'atome de fer dans le réseau cristallin [Huet, 05]. Ainsi pour une valence croissante, on trouve les oxydes de fer II, les rouilles vertes, la magnétite et les oxydes et hydroxydes de fer de valence III. Parmi les oxydes de fer II, en fonction du milieu électrolytique, on trouvera l'hydroxyde ferreux ($\text{Fe}(\text{OH})_2$).

L'oxydation de l'oxyde de fer de valence II mène à la rouille verte. [Raharinaivo, 98] a observé, après avoir fendu une éprouvette corrodée, qu'il existait à l'interface acier-béton en anaérobiose des produits de corrosion verts qui virent immédiatement au brun lors de l'exposition à l'air de l'éprouvette, tandis qu'à l'extérieur de l'éprouvette, il apparaît des produits de corrosion brun à la jonction entre l'acier et le béton. Il peut s'agir de la rouille verte ou des ions ferreux (Fe^{2+}). Puis on trouve des produits d'oxydation des rouilles vertes comme la magnétite, l'akaganéite dans les milieux chlorurés et les oxydes de fer de valence III (*figure I-8*).

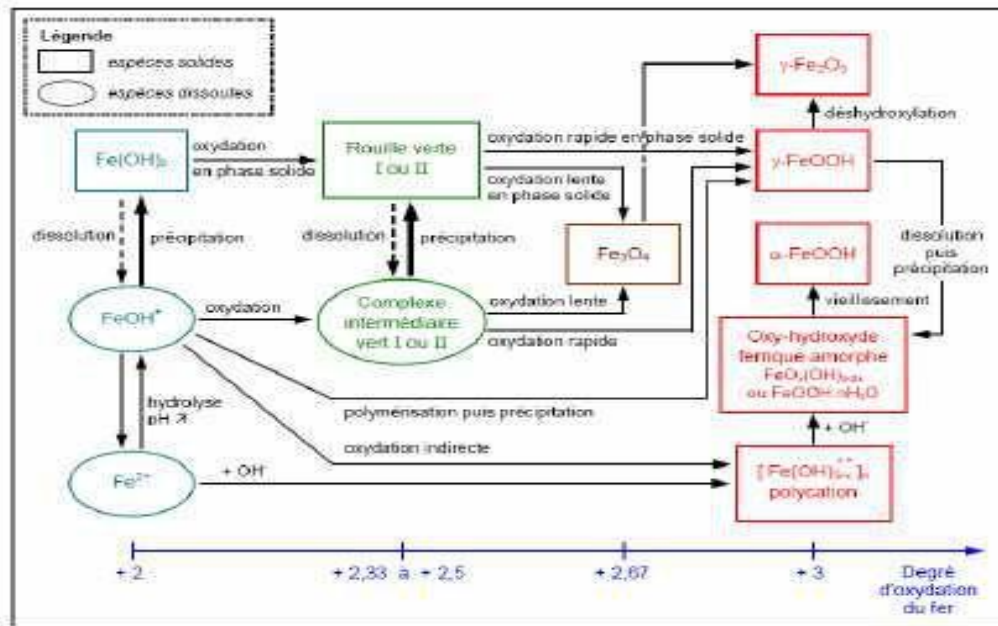


Figure I-8 : Composés susceptibles d'apparaître au cours du processus d'oxydation du fer selon Misawa et Pons.

I.4.9 Facteurs influents sur la corrosion des armatures du béton

Les facteurs qui influencent la pénétration des chlorures ou du dioxyde de carbone et par conséquent la corrosion des armatures sont les propriétés des matériaux (composition du ciment, porosité du béton, pH, ...), la réalisation de la construction (temps de cure, ...) et les actions de l'environnement (concentration en chlorures, en CO_2 , température, humidité relative, ...).

On s'intéresse dans ce paragraphe aux paramètres fortement variables comme la température, la concentration en chlorures, la nature de l'armature et la résistivité du béton (porosité).

I.4.9.1 La température

La variation de température influence le potentiel de la réaction qui est régi par la loi de Nernst selon l'équation ($U = E + \frac{Rt}{Nf} \ln \frac{C_{ox}}{C_{red}}$). D'après Liu et Weyers, une augmentation de la température accroît la vitesse de corrosion [Liu, 1998]. Ce phénomène peut s'expliquer d'une part par le fait que les processus anodiques (oxydations des composants de l'acier) et cathodiques (réduction des protons en milieu acide) sont activés thermiquement.

Il en résulte un courant d'échange c'est-à-dire une vitesse de corrosion augmentant avec la température. Une élévation de 10 à 20°C multiplie par deux la vitesse de corrosion en situation de

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

corrosion active. Le changement de température dans le béton entraîne le changement d'autres paramètres.

Cornell et Schwertmann ont expliqué dans leurs études que la température avait une influence directe sur la nature des oxydes formés dans le béton [Cornell, 03]. L'effet total de la température sur le taux de corrosion dans le béton est très complexe et contrôlé par l'interaction de plusieurs autres facteurs. L'élévation de température augmente la vitesse de la réaction mais peut également agir sur un autre facteur de corrosion. Par exemple, l'abaissement de solubilité de l'oxygène dans l'eau, lorsque la température augmente, est un cas où la corrosion se ralentit par manque d'oxygène.

D'autre part, en milieu aéré, une élévation de température facilite la diffusion de l'oxygène dans la solution augmentant le courant d'échange.

Le modèle développé montre une relation entre le courant de corrosion et la température de la forme suivante :

$$i_1 = i_2 \times e^{22283 \times \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)} \quad (20)$$

Lorsque l'on plonge une éprouvette en béton armé dans un bain à différentes températures, on constate que le courant circulant dans le système électrode/ électrolyte change. La densité de courant de corrosion passe de $1\mu\text{A}/\text{cm}^2$ à $5\mu\text{A}/\text{cm}^2$ lorsque la température s'élève de 5°C à 40°C .

I.4.9.2 Résistivité du béton (Porosité)

Les caractéristiques du réseau poreux (porosité, distribution des tailles de pores,...) déterminent les propriétés de transfert. Ces propriétés de transport du béton vont évoluer dans le temps du fait de la carbonatation et de la fissuration qui modifient le réseau poreux et par conséquent la cinétique de corrosion.

La résistivité du béton a une influence sur le taux de corrosion à une même température. Elle est proportionnelle à la vitesse de corrosion lorsque l'armature est à l'état actif sauf dans le cas de béton saturé, très sec ou dégradé [Huet, 05]. Plus elle sera élevée, moins le béton sera conducteur, et donc le passage du courant sera limité est fortement conditionnée par sa phase liquide. Plus la porosité du béton est forte, plus la phase liquide peut être importante et par conséquent plus la

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

résistivité est faible. Plus le béton n'aura une résistivité élevée, plus la diffusion des ions agressifs seront limitée et le courant de corrosion sera faible.

Dans le cas d'une résistivité infinie, c'est-à-dire un béton sec, le courant de corrosion est très faible et proche de $0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. Pour une résistivité du béton faible, c'est-à-dire un béton très humide dans des conditions normales d'utilisation, le courant de corrosion sera plus élevé et pourra atteindre la valeur de $2,5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

Dans le cas de structures en béton armé totalement immergées dans l'eau, le taux de corrosion est contrôlé par l'oxygène fourni. Le faible taux d'oxygène ralentit le processus de corrosion.

I.4.9.3 La concentration en chlorures

Les ions chlorures conditionnent la solubilité des produits de corrosion et l'existence de dépôts [Marcotte et al, 03]. Leur présence dans le béton armé a une influence sur la corrosion puisque leur présence induit un risque de localisation de la corrosion, notamment par piqûre [Lacombe, 90], augmentant le courant de corrosion.

D'une part, une concentration critique est nécessaire pour que la dépassivation des aciers débute, ce taux limite est fonction du ratio entre les ions chlorures et les ions hydroxydes présents dans la solution interstitielle. D'autre part, lorsque la concentration en ions chlorure augmente, la conductivité du béton augmente, favorisant le passage des ions chlorures vers l'armature.

En milieu chloruré, lorsque la dissolution du métal se poursuit sous le dépôt, l'excès d'ions Fe^{2+} ou Fe^{3+} produits conduit à la diffusion inverse des anions Cl^- pour respecter la neutralité des charges. On note, pour des éprouvettes identiques placées dans des solutions électrolytiques contenant des quantités d'ions chlorure différentes, des courants de corrosion différents.

I.4.9 Méthodes de caractérisation de la corrosion des aciers dans le béton

Les méthodes électrochimiques sont très souvent utilisées. La méthode la plus usitée est la mesure de potentiel de corrosion. Cette méthode s'appuie sur les recommandations (ASTM et RILEM), mais ne donne qu'une évaluation qualitative. Son utilisation est toutefois contestée pour certaines applications particulières notamment dans le cas de béton en présence de chlorures. Une autre méthode : la mesure de résistance de polarisation présente l'avantage de Fournir des données plus quantitatives que précédemment et de renseigner sur la vitesse de corrosion. D'autres outils de

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

mesure utilisant la propagation des ondes sont en cours d'étude comme le radar, l'impact écho et l'émission acoustique.

I.4.9.1 Mesure de potentiel de corrosion

La mesure de potentiel de corrosion ou de potentiel d'électrode est une des techniques les plus utilisées dans le domaine du contrôle non destructif en génie civil. Cette méthode est utilisée dans le but de déterminer l'état de corrosion des aciers dans le béton. Des recommandations ont été publiées par l'ASTM (C876-91) [ASTM, 91] et RILEM TC154-EMC [RILEM, 04].

Pour mesurer le potentiel d'une électrode, il est nécessaire d'introduire dans la solution électrolytique un second conducteur électronique qui va constituer une deuxième électrode ; c'est la différence des potentiels internes des deux conducteurs électroniques qui représente le potentiel de l'électrode. A condition de choisir comme sonde toujours la même électrode appelée électrode de référence, il est possible, à une température donnée, de comparer le potentiel de différentes électrodes dites de travail ou de suivre le potentiel d'un système.

Il existe plusieurs électrodes de référence. En pratique, trois d'entre elles sont utilisées, la plus stable étant celle au calomel. Elles ont un potentiel défini par rapport à l'électrode à hydrogène normal (EHN) à 20°C (*tableau I-2*)

Tableau I-3 : Potentiel d'électrode de référence par rapport au potentiel à hydrogène.

Cuivre-sulfate de cuivre saturé Cu/ Cu SO ₄ (ESC)	+0,318 VEHN
Calomel saturé Hg ₂ Cl ₂ (ECS)	VEH +0,241N
Argent-chlorure d'argent saturé Ag/ Ag Cl(ESS)	+ 0,199 VEHN

Dès qu'une armature est immergée dans le béton, qui se comporte comme un électrolyte, sa surface est instantanément portée à un certain potentiel électrochimique du fait de l'apparition d'une

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

double couche électrochimique en surface. La différence mesurée entre le potentiel de l'armature et celui de l'électrolyte est appelée potentiel de l'électrode. Les propriétés de l'électrolyte variant généralement en fonction de l'environnement, son potentiel varie également. Cela génère des différences de potentiel d'électrode le long de l'armature, ce qui amorce le mécanisme de corrosion.

Le potentiel de corrosion E_{corr} du système acier-béton est une tension mesurée par rapport à une électrode de référence placée à la surface du parement de béton. Les différences de potentiel mesurées dépendent d'une part de l'état de corrosion dans lequel se trouve l'acier, d'autre part de l'électrode de référence utilisée. L'électrode de référence étant placée à la surface du béton, les valeurs mesurées ne représentent pas le potentiel au contact de l'armature.

En effet le potentiel mesuré à la surface est plus positif que celui que l'on aurait à l'anode, là où l'armature est corrodée. Suivant l'endroit où est placée l'électrode de référence, la valeur du potentiel évolue et plus l'on s'éloigne de la zone corrodée, plus le potentiel est positif du fait de la chute ohmique due à la résistivité du béton d'enrobage.

Evaluation de la vitesse de corrosion par la mesure de résistance de polarisation. Pour les mêmes raisons que pour la mesure du potentiel, tout courant imposé nécessite une électrode auxiliaire. On mesure alors « i » directement sur le circuit électrique extérieur reliant les deux électrodes.

Il est nécessaire pour comprendre l'évolution de la corrosion, donc sa cinétique, de connaître l'évolution des potentiels aux électrodes en fonction du courant de corrosion. On trace ainsi les courbes de polarisation. Une vitesse de perte d'épaisseur de $1\mu\text{m}/\text{an}$ correspond à un courant de corrosion de $0,1\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$.

Les prévisions quantitatives nécessitent le calcul d'une vitesse de corrosion efficace et un niveau de risque de corrosion (*tableau I-3*).

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Tableau I-4 : Niveaux de corrosion en fonction des vitesses de corrosion.

Vitesse de corrosion ($\mu\text{m}/\text{an}$)	Niveau de corrosion
Inf. à 1	Négligeable
De 1 à 5	Faible
De 5 à 10	Modéré
Sup. à 10	Elevé

Il s'agit d'appliquer à l'armature un faible courant continu changeant l'état initial du système. Le dispositif nécessite une électrode de travail, une électrode de référence par exemple au calomel, une contre-électrode, un générateur de tension et un système d'acquisition des mesures. On détermine ainsi le paramètre électrique du système acier-béton : la résistance de polarisation R_p .

On en déduit en appliquant la formule de Stern-Geary, le courant de corrosion :

$$I_{corr} = B/R_p \quad (21)$$

La loi de Faraday nous donne la relation entre la vitesse de corrosion p et le courant de corrosion I_{corr} .

$$P = \frac{M \times I_{corr} \times t}{\rho \times A \times n \times F} \quad (\text{mm/an}) \quad (22)$$

Avec

- M : masse atomique du fer en (gr/mol),
- I_{corr} : intensité du courant de corrosion (Ampère),
- t : temps (s),
- ρ : densité du fer (g/mm),
- A : masse atomique du métal (g),
- n : le nombre d'électrons de valence,
- F : la constante de Faraday égale à 96500C/mole.

I.4.9.2 Les techniques acoustiques

Les méthodes acoustiques pour l'auscultation du béton s'appuient sur la propagation d'onde mécanique à des fréquences inférieures à 300 kHz. Les techniques acoustiques utilisées ou à l'étude pour détecter la corrosion dans le béton sont :

- Radar ;
- Émission acoustique ;
- le contrôle par ultrasons.

C'est à cette dernière méthode que nous allons plus nous intéresser dans le deuxième chapitre.

I.5 Bilan des attaques du béton pour un ouvrage maritime

La situation de l'ouvrage par rapport au milieu marin est un paramètre déterminant des risques des dégradations encourus.

Quatre zones de dégradation peuvent ainsi être définies :

- Les zones d'embruns marins sont celles qui ne sont pas en contact direct avec le milieu liquide.
- L'ouvrage est soumis aux embruns et brouillards marins qui peuvent transporter des sels sur des distances importantes.
- Les zones d'aspersion sont situées au-dessus du niveau de l'eau à marée haute. Le béton est soumis aux éclaboussures provoquées par les vagues sur une hauteur variable.
- La zone de marnage s'étend sur une hauteur déterminée par la différence entre le niveau de l'eau à marée haute et celui à marée basse. Cette zone est alternativement immergée et émergée.
- La zone d'immersion se situe sous le niveau de l'eau à marée basse. Le béton est alors continuellement immergé.

I.6 Conclusion

L'objectif de cette partie était de démontrer l'état de l'art sur la durabilité de l'ouvrage en béton armé dans le milieu agressif en général et particulièrement dans le milieu marin dépendait essentiellement de la tenue des armatures à la corrosion, et d'expliquer brièvement le mécanisme de la corrosion c'est-à-dire ses causes, son origine et son processus et ses différents types et sa façon de propagation pour confirmer que la non prise en considération de la corrosion peut générer des pathologies qui peuvent induire une dégradation structurale, fonctionnelle ou esthétique de l'ouvrage dans un milieu agressif, cette dégradation peut avoir comme conséquence une perte de valeur ou de qualité de service de l'ouvrage à un niveau élémentaire ou global qui pourra nuire à la durée de vie l'ouvrage et des différentes recommandations usuelles pour la prévention de l'ouvrage.

Le chapitre suivant est consacré aux techniques non destructifs entre autre l'appareil ultrason.

CHAPITRE II
LES TECHNIQUES NON
DESTRUCTIVES

II.1 Introduction

Cette partie concerne plus les méthodes de contrôles non destructifs plus les ultrasonore, Tout ouvrage contient des défauts et des anomalies dès sa phase de fabrication (retassures, inclusions, fissures,...). Comment alors assurer la sécurité et évaluer l'impact d'une anomalie ou d'un défaut? Les Contrôles Non Destructifs (CND) apportent un moyen de répondre à cette question. Ils constituent un outil essentiel pour le contrôle de la qualité. Ces contrôles mettent en œuvre des techniques d'évaluation permettant d'apprécier sans destruction l'état de santé des ouvrages et ainsi de formuler un avis sur leur aptitude à remplir la fonction à laquelle elles sont destinées.

Ainsi, le CND vise des aspects d'assurance qualité, d'aptitude au bon fonctionnement et de sécurité. Ces derniers nécessitent une bonne connaissance de tous les phénomènes mis en jeux, en particulier de la nocivité des défauts et de leur évolution dans le temps. Sous cet angle, l'absence de contrôle peut conduire à des conséquences catastrophiques.

II.2 Objectif du CND pour le béton

Les méthodes de contrôle non destructif (CND) constituent l'une des voies adaptées pour établir et actualiser la connaissance d'un ouvrage au fil du temps. Ces techniques reposent sur des principes physiques bien connus (propagation d'ondes mécaniques ou électromagnétiques, mesures de champs électriques, etc.) et les sociétés de service en proposent aujourd'hui un emploi courant, mais de nombreux verrous subsistent.

L'objectif principal des méthodes non destructives appliquées au béton est de fournir une évaluation correcte de la qualité du matériau dans sa structure même, quels que soient son âge et son état de dégradation, sans avoir à s'en rapporter uniquement aux résultats d'éprouvettes qui ne représentent pas forcément la structure exacte du béton d'ouvrage.

II.3 Intérêt des techniques de CND

Lors de l'évaluation d'un ouvrage réel en béton, les essais destructifs sur prélèvements (carottes) ont l'avantage de fournir des données mécaniques, physiques ou chimiques qui sont directement exploitables. Toutefois, il existe les limitations de cette solution directe :

- Il n'est pas toujours possible de réaliser des prélèvements, soit pour des raisons d'accessibilité, soit pour des raisons de sensibilité de l'ouvrage (ex. une centrale nucléaire).

CHAPITRE II : LES TECHNIQUES NON DESTRUCTIVES

- L'évaluation acquise sur carottes est locale. Elle ne peut pas être généralisée sans hypothèse supplémentaire pour une évaluation globale et pertinente à grande échelle de l'ouvrage ausculté.
- Les prélèvements peuvent être réalisés au hasard dans les zones qui ne sont pas forcément représentatives des indicateurs (propriétés utiles) à évaluer.

Les limitations liées aux prélèvements, à la fois pratiques et analytiques, justifient l'intérêt des techniques de CND pour l'auscultation des ouvrages réels, donc l'évaluation des propriétés du matériau. Ces techniques sont adaptées aux conditions de mesures sur site. Elles sont généralement rapides à mettre en œuvre et d'un coût raisonnable.

Les objectifs de ces techniques peuvent être classés [Breysse, 08] :

- détecter un défaut, une des propriétés de petite échelle d'éprouvettes à grande échelle d'ouvrages.
- établir un classement des éléments (zones) d'un ouvrage ou entre ouvrages, fournissant un panorama de l'ouvrage.
- quantifier les propriétés, par exemple sur des éventuelles zones à problème en prélevant des carottages.

Ainsi, la détection, le classement et la quantification peuvent être considérés comme trois niveaux d'exigence, le dernier étant le plus sévère [Breysse, 09].

II.4 Les méthodes de CND à disposition

En génie civil, les techniques de CND sont utilisées depuis de nombreuses années pour l'auscultation du béton, mais elles ne sont pas encore totalement reconnues sur leur capacité, leur précision et leur fiabilité. Plusieurs synthèses sont réalisées [Davis 98, IAEA 02, Malhotra 04] fournissant les informations générales et les applications principales des techniques. Les études récentes se font en continu pour la maîtrise des techniques, notamment pour l'auscultation d'ouvrages réels de grandes dimensions sous des contraintes pratiques (ex. budget, temps, niveau de précision).

Les experts français du domaine se sont mobilisés depuis une dizaine d'années sur les problématiques de CND. Après avoir rédigé un état de l'art collectif sur les possibilités des techniques [Breysse 05], ils se sont engagés dans des projets collaboratifs de recherche SENSO [SENSO 09, Balayssac 2012]. Ils coordonnent aussi une réflexion internationale très active sur les

CHAPITRE II : LES TECHNIQUES NON DESTRUCTIVES

mêmes thèmes, au sein de la RILEM [Breysse, 12]. Mais, l'évaluation des propriétés du matériau reste un défi, du fait des multiples phénomènes qui induisent des perturbations lors des mesures sur les ouvrages et du caractère intrinsèquement variable des bétons, composites constitués de matériaux naturels extrêmement divers.

Les contrôles non destructifs peuvent se classer en trois catégories :

- **Les méthodes dites de surface** pour lesquelles l'anomalie est localisée, soit en surface, soit dans une zone proche de la surface (Examen visuel, le ressuage, la magnétoscopie, les courants induits);
- **Les méthodes complémentaires** (Etanchéité, thermographie, émission acoustique) ;
- **Les méthodes dites volumiques** pour lesquelles l'anomalie est localisée dans le volume de la pièce (Ultrasons, rayonnements ionisants).

Nous donnons ci-dessous le principe des principaux contrôles non destructifs.

II.4.1 méthode de surface

II.4.1.1 Inspection visuelle

L'inspection visuelle est le premier moyen de contrôle non destructif à la reconnaissance et au diagnostic d'ouvrages en béton armé. Elle permet de fournir immédiatement des données utiles et globales sur le degré de détérioration visible, comme l'écaillage des surfaces de béton, l'apparition de la fissuration et des défauts, la corrosion avancée des armatures, etc. Les données observées peuvent être utilisées dans les méthodes d'aides à la décision afin d'établir un diagnostic global d'un ouvrage ou d'un parc d'ouvrages [Taillandier et Al ,13].

Les inspections visuelles peuvent être effectuées aujourd'hui par des appareils photographiques, ainsi que l'interprétation par des méthodes d'analyse d'image. La technologie a repoussé les limites de l'inspection visuelle par l'observateur humain. Dans certains cas, il est nécessaire de faire l'inspection visuelle par la photographie, par exemple dans une ambiance nucléaire ou un climat inclément.

La topographie est aussi un moyen d'inspection, qui permet de suivre les déplacements ou les déformations d'un ouvrage. Mais, la seule inspection visuelle n'est pas en mesure d'évaluer la résistance ou les dégradations internes de la structure. A l'étape de pré-auscultation, l'inspection visuelle peut s'accompagner de l'emploi de techniques de CND simples, tels que le scléromètre et/ou l'ultrason [Kenai, 03].

CHAPITRE II : LES TECHNIQUES NON DESTRUCTIVES

II.4.1.2 Ressuage

Le ressuage comprend trois étapes :

- Après un nettoyage soigné, la pièce est soumise à l'action d'un pénétrant qui diffuse dans le défaut.
- On procède au rinçage de l'excès du pénétrant à la surface de la pièce.
- Le pénétrant contenu dans le défaut diffuse sur le révélateur appliqué à la surface de la pièce. On observe la tache résultante sous un éclairage adapté.

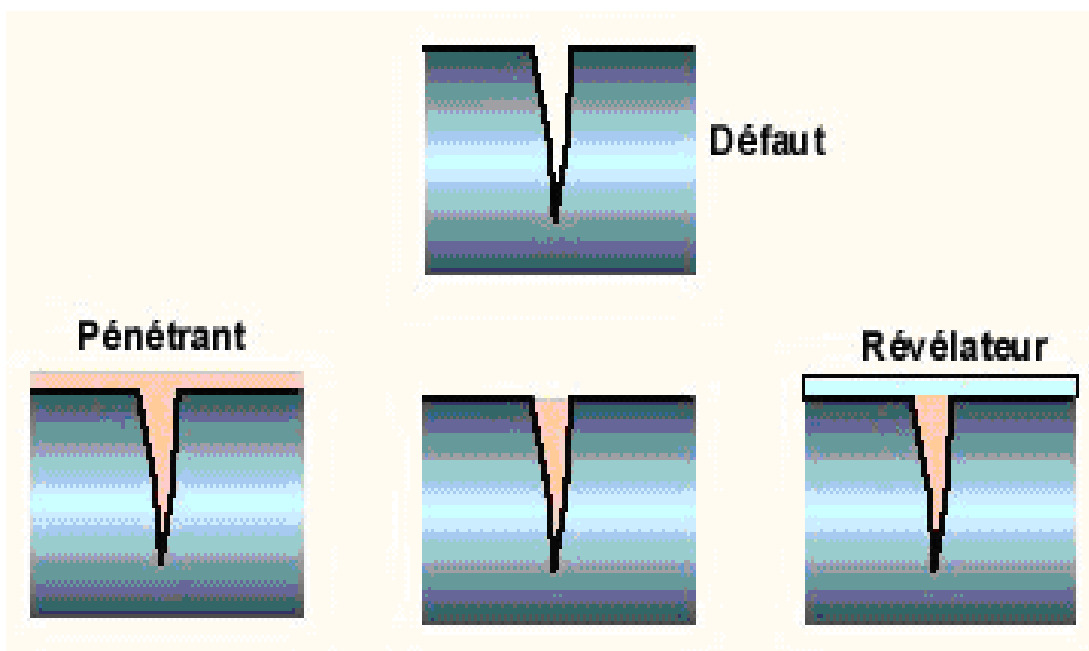


Figure II-1 : Modèle de Ressuage [Thèse Contrôles Non destructifs RACHID BOURAS-UMMTO].

II.4.1.3 Magnétoscopie

Le principe de la magnétoscopie est le suivant :

- La pièce est aimantée partiellement ou totalement. Les particules magnétiques contenues dans le révélateur s'accroissent au droit du défaut par suite de la perturbation locale des lignes d'induction.
- On observe le spectre résultant sous un éclairage adapté.

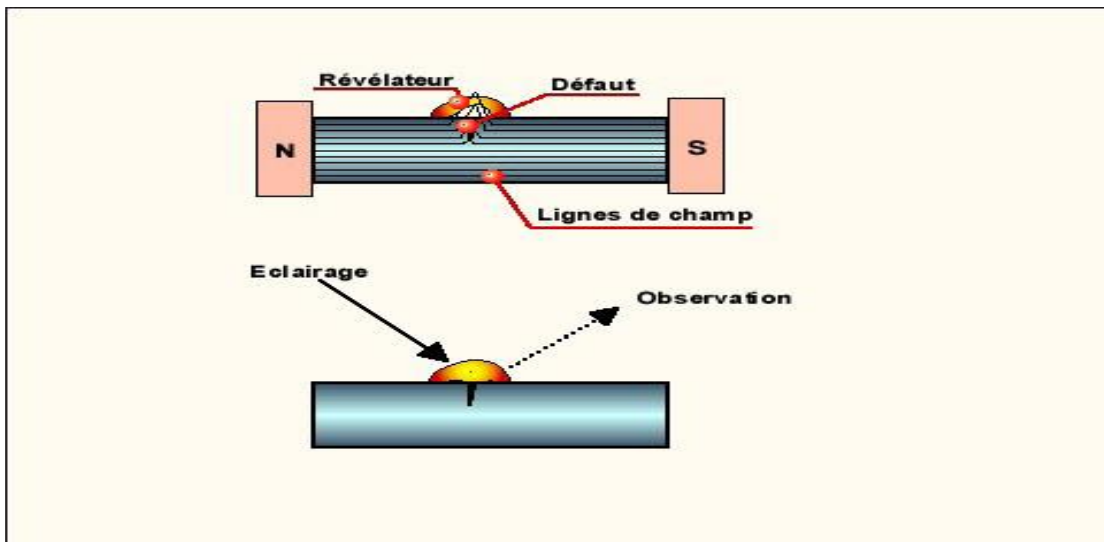


Figure II-2 : Modèle de Magnétoscopie [Thèse Contrôles Non destructifs RACHID BOURAS-UMMTO].

II.4.1.4 Courants induits

Le principe du contrôle par courants induits est le suivant :

- Des courants en opposition de phase sont induits dans deux sections voisines du produit à contrôler.

En l'absence de défaut, en regard des bobines d'excitation le système est en équilibre.

- La présence d'un défaut en regard d'une des bobines modifie la répartition des courants induits et provoque un déséquilibre du système.
- On observe sur l'écran de visualisation une signature caractéristique du signal déséquilibré.

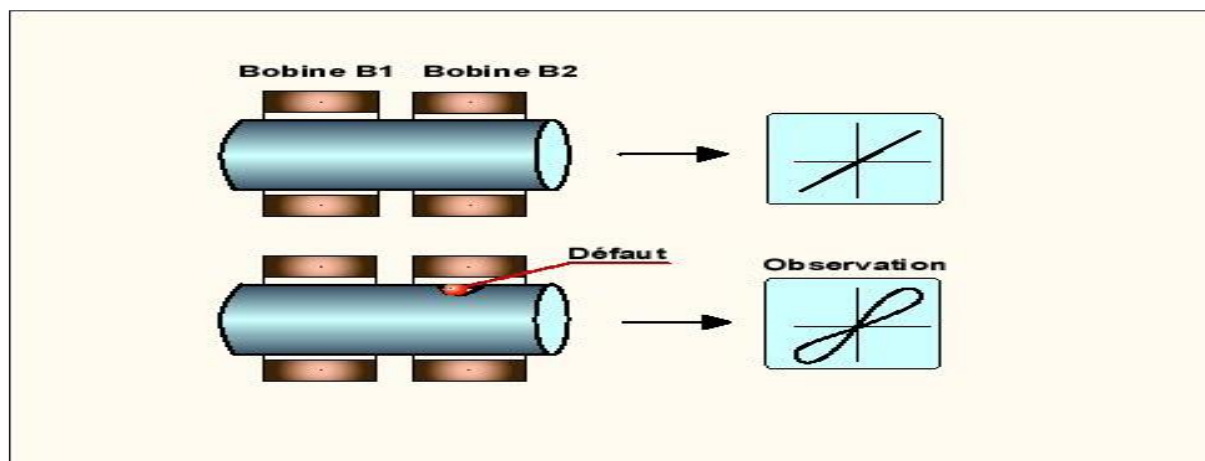


Figure II-3 : Modèle de Courants induits [Thèse Contrôles Non destructifs RACHID BOURAS-UMMTO].

II.4.2. Les méthodes complémentaires

II.4.2.1 Émission acoustique

C'est une technique consistant à détecter un événement acoustique et à localiser son lieu d'émission. Ces événements sont générés par une libération brutale d'énergie mécanique pouvant être attribuée, dans le cas du béton, à la fissuration locale du matériau. Le temps d'arrivée du signal est différent pour chaque capteur, et dépend de la distance entre le capteur et le lieu de la fissuration. En s'appuyant sur ce principe, il est possible en confrontant les temps d'arrivée des signaux et en connaissant la position des capteurs de localiser géométriquement l'événement détecté.

Une des orientations actuelles de l'utilisation de l'émission acoustique en génie civil consiste à étudier les corrélations entre la densité d'événements acoustiques et l'activité de corrosion des armatures, de manière à détecter précocement les phénomènes de corrosion [Li, 98]. Cette approche a également été à l'étude en France [Proust, 01]. Le mode de détection des capteurs utilisés en Emission Acoustique (EA) est basé sur l'effet direct de la piézo-électricité. On mesure donc des quantités de charge qui se traduisent, une fois amplifiées et conditionnées, en un signal transitoire dont l'amplitude s'exprime en dB (NF EN 1330-9).

II.4.2.2 méthodes volumiques

Ces méthodes sont fondées sur l'analyse soit en temps soit en fréquence du signal issu d'une onde mécanique de base fréquence, typiquement inférieure à 300 KHz, qui se propage à travers ou en surface d'un matériau. En génie civil, les techniques disponibles sont listées comme suivantes : l'ultrason, l'impact-écho, l'émission acoustique, les ondes de surface, la tomographie sismique, et plus localement le rebond.

Parmi eux, le contrôle par ultrasons (auscultation sonique), l'impact-écho, l'émission acoustique et le rebond sont les techniques les plus usuelles depuis de nombreuses années (ex. à partir d'années de 1950 pour la technique de rebond). Les autres techniques sont également étudiées pour l'auscultation des structures en béton, par exemple la tomographie sismique [Kharrat ,97], [Côte ,88] ou les ondes de surface [Hevin 98 et Al ,05], mais elles sont encore moins utilisées sur site [Garnier ,05].

CHAPITRE II : LES TECHNIQUES NON DESTRUCTIVES

Les techniques d'ondes de surface sont développées à l'aide de dispositifs automatisés permettant d'ausculter sans contact [Piwakowski ,08], [Abraham ,12]. Les techniques par la propagation d'ondes mécaniques permettent de suivre la maturité du matériau, de déterminer le degré de son homogénéité, et détecter des défauts (fissures, vides, etc.). Elles sont sensibles aux propriétés mécaniques telles que la résistance à la compression, le module d'élasticité, et aussi à certaines propriétés physiques (ex. saturation, porosité). Ces techniques sont couramment utilisées, soit en laboratoire [SENSO ,09], soit sur ouvrages réels.

Les propriétés mécaniques et physiques du matériau sont évaluées en termes de valeur moyenne, en recalant des mesures de CND par prélèvements. Il est possible aujourd'hui de combiner des techniques dans le même groupe d'ondes mécaniques ou entre différents groupes des techniques, afin de qualifier une évaluation adaptant aux exigences (ex. niveau de confiance, budget modéré). La combinaison entre ultrason et rebond est déjà reconnue pour une évaluation non destructive de la résistance mécanique du béton sur site [Breysse et Al, 12].

II.4.2.3 L'ultrason

Les ultrasons sont des ondes acoustiques ou élastiques dont la fréquence est supérieure à celle des sons audibles par l'oreille humaine et inférieure aux vibrations thermiques des atomes. Les sons audibles sont compris entre 10 et 20000 Hz et la gamme de vibrations thermiques s'étend de 109 à 10¹³ Hz (1 GHz - 10 THz). Les fréquences utilisées lors d'exams aux ultrasons ne comprennent pas toute la gamme des ultrasons, mais varient entre 0,5 à 12 MHz. Pour un solide ayant une vitesse de son c de 5000 m/s ceci correspond à l'intervalle des longueurs d'ondes ($\lambda = c/v$) de 1 cm à 0.4 mm. La limite inférieure de 0.5 MHz est déterminée par la perte totale en résolution des défauts qui ont une taille inférieure à la longueur d'onde.

Dans les solides (vitesse du son $c \approx 5000$ m/s), une onde d'une fréquence de 0,5 MHz ne permet que de percevoir les défauts qui sont plus grands qu'un centimètre. En général on s'intéresse aussi à des défauts beaucoup plus petits. L'augmentation de fréquence qui s'impose alors, à comme effet d'augmenter l'absorption et donc de limiter la profondeur accessible aux ultrasons.

Le nom vient du fait que leur fréquence est trop élevée pour être audible pour l'oreille humaine de la même façon que les infrasons désignent les sons dont la fréquence est trop faible pour être perceptible par l'oreille humaine. Lorsque la fréquence est audible pour l'oreille humaine, on parle

CHAPITRE II : LES TECHNIQUES NON DESTRUCTIVES

tout simplement de son [Encyclopédie Larousse, 15]. C'est SPALLANZANI qui le premier en 1794 soupçonna l'existence des ultrasons en observant le vol des chauves-souris.

En 1880 CURIE découvre le principe de la piézo-électricité et le moyen de produire des ondes ultrasonores. Il faut attendre la première guerre mondiale avec LANGEVIN pour que l'homme les utilise à la détection des sous-marins en plongée. Les ondes ultrasonores, qui sont des vibrations mécaniques prenant naissance et se propageant dans tout le matériau ayant une certaine élasticité. Les techniques ultrasonores sont largement utilisées pour le contrôle des bétons ordinaires, mais aussi pour les bétons spéciaux comme autoplaçant et le béton fibré à ultra haute performance [Bian, 09].

Le matériel est constitué d'un générateur couplé à deux transducteurs piézoélectriques (émetteur-récepteur) et d'un oscilloscope numérique en option permettant d'enregistrer des signaux de mesure. Il est possible aujourd'hui de réaliser des mesures sur site à l'aide d'un matériel portable tel que le PUNDIT (Portable Ultrasonique Non destructive Digital Indicating Tester). La mesure est essentiellement basée sur la transmission d'onde ultrasonore et la mesure de son temps de transfert. Trois types de configuration de deux transducteurs peuvent être utilisés : (a) direct, (b) semi-direct, et (c) indirect.

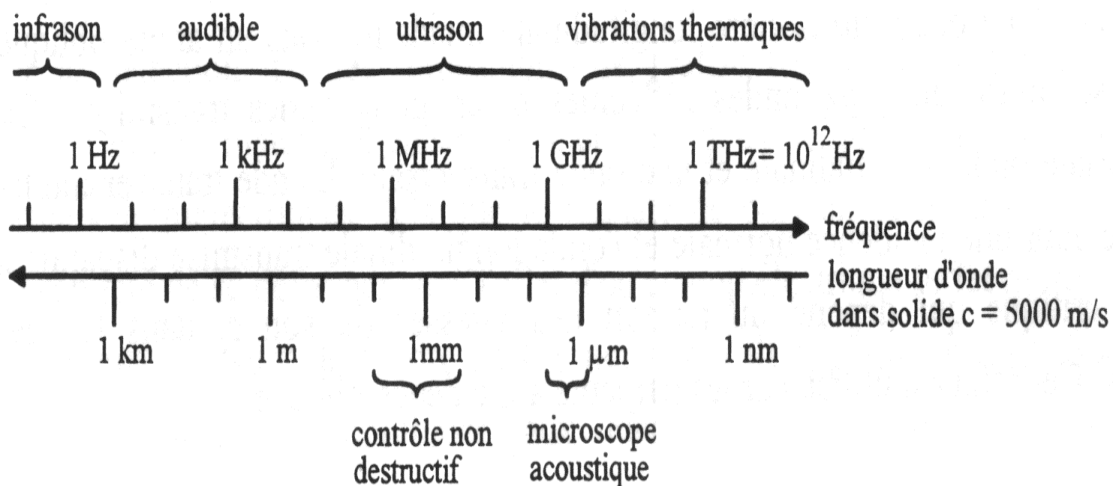


Figure II-4: Echelle des ondes élastiques. Les longueurs d'ondes sont données pour un solide ayant une vitesse du son de 5000 m/s. [Jean Perdijon, Hermes 93]

CHAPITRE II : LES TECHNIQUES NON DESTRUCTIVES

II.4.2.3.1 Nature de l'onde ultrasonore

C'est une onde sonore ou onde acoustique, c'est-à-dire un mode de propagation de l'énergie dans un milieu matériel sans transport de matière. L'onde ultrasonore est une onde de pression se propageant dans un milieu élastique: variation de pression qui se déplace. Il s'agit de la propagation d'une énergie mécanique dans un milieu matériel : ce déplacement ne peut se faire dans le vide (à la différence des ondes électromagnétiques). Le milieu de propagation de l'onde ultrasonore est soumis à une succession de surpressions et de dépressions et ses particules constitutives sont alors animées d'un mouvement de va-et-vient dans l'axe de déplacement des ultrasons, de type sinusoïdal.

Une comparaison peut être faite avec un ressort que l'on comprime à une extrémité à une cadence donnée, ces compressions engendrent des déformations qui se propagent le long du ressort.

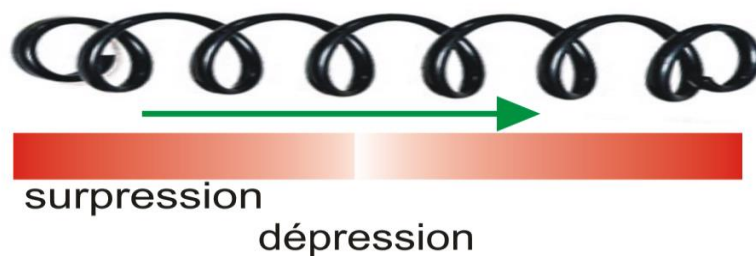


Figure II-5 : Analogie avec un ressort [thèse Université Mohamed Khider – Biskra, 03]

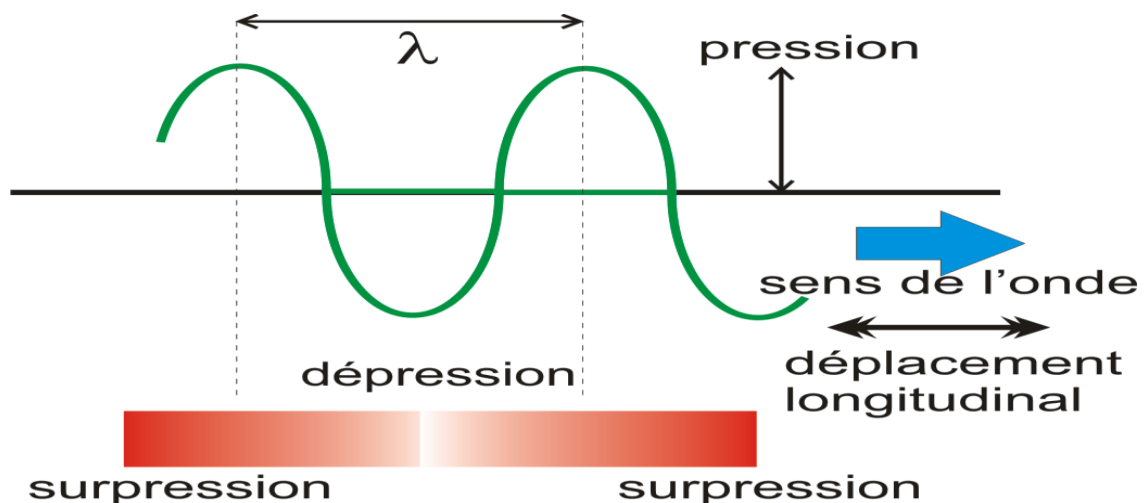


Figure II-6 : Déplacement longitudinal engendré par l'onde ultra-sonore [thèse Université Mohamed Khider – Biskra, 03]

CHAPITRE II : LES TECHNIQUES NON DESTRUCTIVES

Le front de l'onde ou surface d'onde est une surface telle qu'en tous points la vibration sonore est la même.

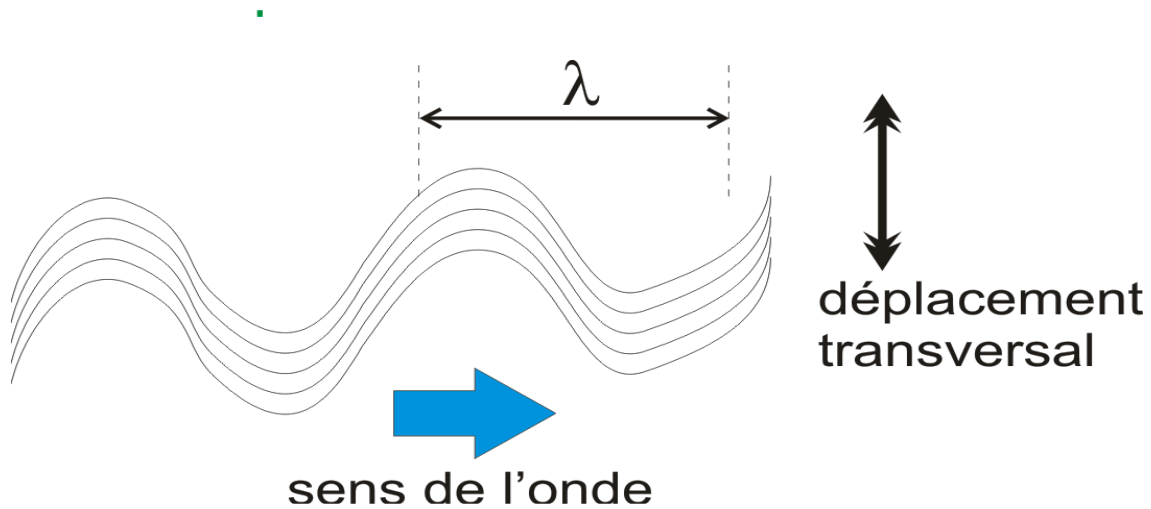


Figure II-7 : Déplacement transversal engendré par l'onde ultra-sonore [thèse Université Mohamed Khider – Biskra, 03]

Mais dans les milieux solides, il se forme en plus une vibration transversale (déplacements de cisaillement) perpendiculairement à l'axe de propagation des ultrasons.

II.4.2.3.2 Paramètres de l'onde ultra-sonore

Plusieurs paramètres sont nécessaires pour caractériser cette onde ultra-sonore.

a) Célérité et impédance

La célérité de l'onde acoustique est la vitesse de propagation de la variation de pression dans le milieu : elle dépend uniquement du milieu. Le comportement d'un milieu matériel vis-à-vis des ultrasons est exprimé par une constante appelée impédance acoustique, Z .

L'impédance acoustique dépend de la masse volumique et de la compressibilité du milieu, c'est-à-dire de son aptitude à reprendre sa forme originale après déformation.

$$Z = \sqrt{\beta/\rho} \quad (1)$$

Avec :

- Z = impédance acoustique ;
- β = compressibilité du milieu ;

CHAPITRE II : LES TECHNIQUES NON DESTRUCTIVES

- ρ = masse volumique.

Elle est d'autant plus grande que la densité est importante et que la compressibilité est faible.

Elle traduit la plus ou moins grande aptitude d'un milieu donné à la pénétration des ultrasons et s'exprime en $\text{kg/m}^2/\text{s}$.

Cette impédance conditionne avec la masse volumique la célérité de l'onde ultra-sonore :

$$C = \frac{Z}{\rho} \quad (2)$$

Avec :

- Z =impédance acoustique ;
- C = célérité ;
- ρ = masse volumique.

Plus l'impédance est grande, plus grande est la célérité de l'onde ultra-sonore.

b) Fréquence et longueur d'onde

Les sons sont classés en quatre catégories selon leur fréquence (f) ou nombre de variations de pression (périodes) par seconde ($1 \text{ Hz} = 1 \text{ cycle/s}$) :

Tableau II-1 : équivalence sons et fréquences [thèse Université Mohamed Khider – Biskra, 03]

sons	Fréquence
infrasons	0 à 20 Hz
sons audibles	20 Hz à 20 kHz
ultrasons	20 kHz à 1 GHz
hypersons	> 1 GHz

CHAPITRE II : LES TECHNIQUES NON DESTRUCTIVES

La distance séparant à un instant donné deux points du trajet de l'onde où la pression est la même (tout en variant dans le même sens) correspond à la longueur d'onde λ . Dans un milieu donné, elle est reliée à la fréquence par la formule :

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (3)$$

Avec :

- λ : longueur d'onde
- c = célérité
- f = fréquence

L'onde ultra-sonore dans un milieu homogène est cohérente, c'est-à-dire en phase : il n'y a pas superposition décalée de plusieurs ondes de fréquences et longueur d'onde identiques.

c) Pression et intensité

En chaque point, la pression acoustique p varie selon la fréquence de l'onde ultra-sonore.

L'énergie délivrée dépend de ces variations de pression qui soumettent les particules du milieu à des mouvements vibratoires. On appelle intensité ultra-sonore l'énergie qui traverse perpendiculairement l'unité de surface pendant l'unité de temps. Elle est reliée à la pression acoustique par la formule:

$$I = \frac{p^2}{\rho \cdot c} \quad (4)$$

Avec :

- p = pression acoustique
- ρ = masse volumique
- c = célérité

Elle s'exprime en **W/cm²**

Les différences d'intensité s'expriment en décibels (unité relative) : si deux ondes ultra-sonores ont des intensités absolues I_1 et I_2 , on dit que la différence de leurs niveaux d'intensité est de D décibels avec $D = 10 \log I_2 / I_1$. Ainsi si $I_2 = 4I_1$, $D = 6,02$ dB.

II.4.2.3.3 Faisceau ultra-sonore

L'onde ultra-sonore peut se déplacer dans toutes les directions de l'espace (sifflet à ultrasons) : le front de l'onde est alors sphérique et l'on parle d'onde sphérique. Plus on est éloigné de la source ultra-sonore, plus l'intensité est faible car l'énergie se répartit, la distance augmentant, sur une surface plus grande. L'intensité ultra-sonore décroît donc, dans un milieu homogène comme l'inverse du carré de la distance.

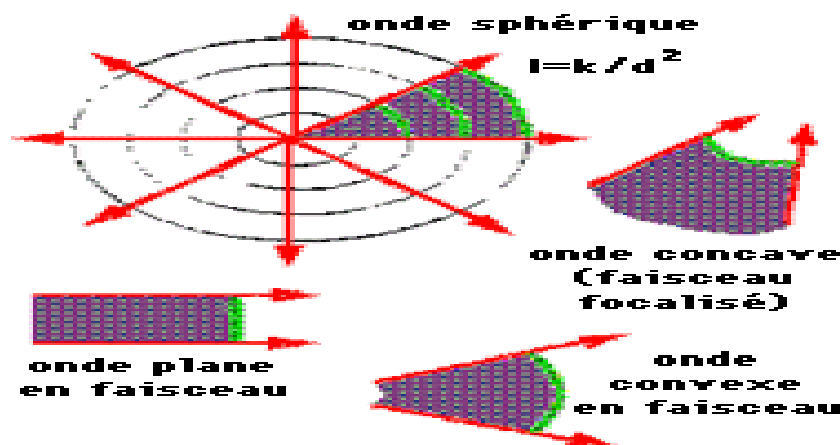


Figure II-8 : Faisceau ultra-sonore J. Gosalbez [thèse Université Mohamed Khider – Biskra, 03].

Mais les grandes fréquences des ultrasons autorisent la création de faisceaux, c'est-à-dire d'une onde directionnelle. Pour obtenir un faisceau ultra-sonore, il faut que la longueur d'onde soit inférieure à la source : notion de longueur d'onde maximale et donc de fréquence minimale ultra-sonore en dessous de laquelle on ne peut produire de faisceau (1 MHz).

Lorsque la source est plane, le front de l'onde est plan et l'on parle d'onde plane. La surface n'augmente pas avec la distance et donc l'intensité ne décroît pas en s'éloignant de la source : ceci permet d'améliorer la pénétration des ultrasons en concentrant l'énergie dans une direction.

Il est possible également de modifier le front d'onde afin d'obtenir une surface d'onde concave : cela permet une focalisation du faisceau.

II.4.2.3.3.1 Faisceau d'une onde plane

La géométrie du faisceau dépend de la distance à laquelle on se place de la source, ainsi que de sa forme, il est possible de définir deux zones différentes.

CHAPITRE II : LES TECHNIQUES NON DESTRUCTIVES

- **la zone de FRESNEL** : si la source est circulaire, toute l'énergie est concentrée dans une zone cylindrique. Son diamètre d est celui de la source D et sa longueur l est donnée par la formule :

$$d = D \quad l = \frac{D^2}{4c} f \quad (5)$$

Avec :

- D =diamètre de la source,
- d = diamètre de la zone
- f =fréquence,
- c =célérité,
- l =longueur de la zone.

Zone de Fresnel



Zone de Fraunhofer

Figure II-9: Géométrie d'un faisceau d'une onde plane Fraunhofer et Fresnel [thèse Université Mohamed Khider – Biskra, 03]

- **La zone de FRAUNHOFER** : elle est plus éloignée de la source et sa forme est conique. Le faisceau va en s'élargissant selon un angle de divergence qui est constant. Cette divergence est inversement proportionnelle à la fréquence et au diamètre de la source :

$$\sin \theta = \frac{1,22 c}{d f} \quad (6)$$

Avec :

- d =diamètre de la source,
- c =célérité,
- f = fréquence ultra sonore,
- θ =angle de divergence.

CHAPITRE II : LES TECHNIQUES NON DESTRUCTIVES

Le front d'onde est convexe dans cette zone et il y a diminution rapide de l'intensité car la surface sur laquelle elle se répartit augmente.

Deux paramètres conditionnent donc la géométrie du faisceau ultra-sonore, la fréquence et le diamètre de la source : quand ils augmentent, la zone de FRESNEL s'allonge et la divergence de la zone de FRAUNHOFER diminue, ce qui améliore la géométrie du faisceau.

II.4.2.3.2 Faisceau focalisé

Il existe plusieurs moyens pour donner à l'onde un front concave et assurer ainsi sa focalisation, s'est-il dire la concentration de son énergie sur une zone restreinte. Le moyen le plus simple est d'utiliser une source de surface concave.

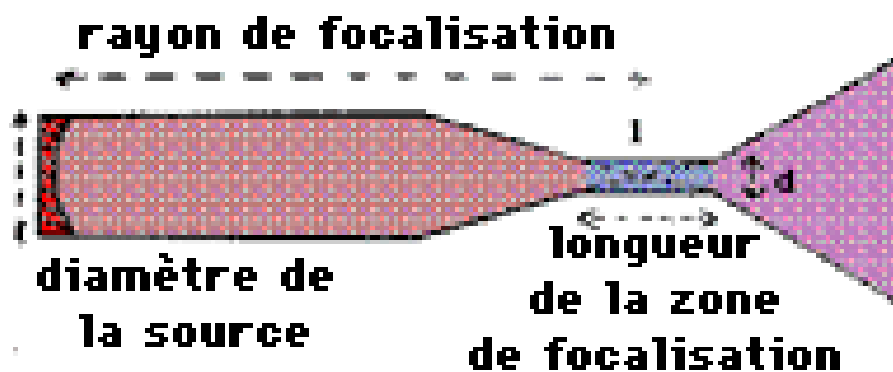


Figure II-10: Géométrie d'un faisceau focalisé L. Vergara [Thèse Université Mohamed Khider – Biskra, 03].

II.4.2.3.4 Propagation des ondes ultrasonores dans les milieux hétérogènes

La propagation des ondes ultrasonores dans les milieux hétérogènes engendre de nombreux phénomènes qui contribuent à la diffusion ou l'atténuation, qu'il est nécessaire de décrire. Afin de d'exposer ces phénomènes, nous présentons les milieux hétérogènes et le cas particulier du béton, puis nous définissons les types d'ondes ultrasonores utilisés pour l'auscultation des structures.

Enfin nous nous intéressons aux équations de propagation à la base de nombreux modèles actuellement utilisés. D'une manière générale nous supposons que les milieux hétérogènes sont composés d'inclusions liquides, solides ou gazeuses homogènes noyées dans une matrice homogène liquide, solide ou gazeuse.

CHAPITRE II : LES TECHNIQUES NON DESTRUCTIVES

a) Propagation des ondes ultrasonores dans le béton

Ce paragraphe, consacré au matériau « béton », définit les constituants, la composition du milieu et les principaux endommagements ou défauts résultant de la fabrication ou de l'exploitation des structures. Nous montrons également que les méthodes de contrôle non destructif par ultrasons sont porteuses d'informations sur la géométrie ou sur les caractéristiques mécaniques du milieu inspecté.

Lors de sa fabrication, le béton met en relation un liant (ciment), des granulats (gravillons), du sable et de l'eau. D'autres éléments, comme les adjuvants, sont parfois ajoutés en faible quantité pour améliorer les caractéristiques générales. Le rapport en masse Eau/Ciment, donnée essentielle dans l'obtention des caractéristiques finales du béton, est généralement compris entre 0,3 et 0,6. Certains bétons présentant de très bonnes caractéristiques mécaniques, appelés Bétons Hautes Performances (BHP), contiennent, en plus des éléments déjà cités, des grains de silice dont la dimension est cent fois plus petite que celle des grains de ciment.

L'ensemble des composants qui constituent le béton offre ainsi une répartition étendue et continue de tailles d'obstacles. Les espaces vides sont ainsi minimisés, la résistance mécanique et le module d'élasticité sont alors largement améliorés ($R_c=90\text{MPa}$; $E=50\text{GPa}$). Le béton n'en reste pas moins susceptible de subir des endommagements.

II.4.2.3.5 Endommagement et principaux défauts

A l'origine de l'altération des caractéristiques mécaniques se trouvent de nombreux phénomènes. Nous classons en deux catégories ces endommagements : ceux qui sont apparus pendant la prise du béton et ceux qui sont venus des suites de l'exploitation de la structure.

La prise du béton met en jeu des mécanismes de différentes natures. Ils peuvent être chimiques, mécaniques et/ou thermiques. Par exemple, une partie de l'air, présent lors de la fabrication, reste emprisonnée dans la pâte de ciment et aux interfaces pâte/granulats sous forme de cavités (*Figure II-10*). Pour éviter cela, le béton est généralement vibré après la coulée.

De plus des micros fissures sont générées lors du retrait thermique de dessiccation.



Figure II-11 : Photo de cavités d'air et microfissures [thèse Université Mohamed Khider – Biskra, 03]

Ces cavités initialement présentes dans des proportions volumiques de l'ordre de 5 à 25%, influent sur les caractéristiques mécaniques du béton ainsi que sur leurs évolutions lors de sollicitations. Dans sa deuxième phase de vie, au cours de son exploitation, le béton subit diverses agressions chimiques, thermiques ou mécaniques. Les causes d'apparition sont très variées. Les principaux défauts rencontrés dans les structures en béton sont synthétisés dans le tableau suivant :

CHAPITRE II : LES TECHNIQUES NON DESTRUCTIVES

Tableau II-2: Principaux défauts dans les structures en béton

Causes	Défauts
Attaque chimique	
<ul style="list-style-type: none"> Alcali réaction 	<ul style="list-style-type: none"> Fissuration
<ul style="list-style-type: none"> Attaque du ciment par les sulfates 	<ul style="list-style-type: none"> Fissuration
<ul style="list-style-type: none"> Efflorescence 	<ul style="list-style-type: none"> Porosité
<ul style="list-style-type: none"> Attaque acide du ciment basique 	<ul style="list-style-type: none"> Erosion
<ul style="list-style-type: none"> Cristallisation des sels 	<ul style="list-style-type: none"> Fissuration
Attaque physique	
<ul style="list-style-type: none"> Variation d'humidité 	<ul style="list-style-type: none"> Fissuration,
<ul style="list-style-type: none"> Cycle gel - dégel 	<ul style="list-style-type: none"> Fissuration,
<ul style="list-style-type: none"> Cycle température 	<ul style="list-style-type: none"> fragmentation Fissuration,
<ul style="list-style-type: none"> Irradiation 	<ul style="list-style-type: none"> fragmentation Fissuration,
<ul style="list-style-type: none"> Abrasion 	<ul style="list-style-type: none"> fragmentation Erosion
<ul style="list-style-type: none"> Fatigue et Vibration 	<ul style="list-style-type: none"> Fissuration
<ul style="list-style-type: none"> Gonflement 	<ul style="list-style-type: none"> Fissuration

Globalement, les endommagements du béton se présentent sous la forme de fissurations et de porosités. Toute la complexité de la caractérisation non destructive de l'endommagement de structure en béton réside dans la forte hétérogénéité du milieu liée à la composition et aux défauts produits lors de la fabrication et de l'exploitation.

CHAPITRE II : LES TECHNIQUES NON DESTRUCTIVES

II.4.2.3.6 Potentiel des méthodes ultrasonores pour le contrôle non destructif

Les méthodes de contrôle non destructif de structure en béton sont nombreuses et variées : les techniques visuelles, la thermographie, les méthodes radar, la radiographie X et gamma et les méthodes acoustiques dont les ultrasons font partie. Les méthodes ultrasonores présentent de très bonnes aptitudes à la mesure d'épaisseur, à la détection de vides et de fissure, Il est possible de relier les paramètres ultrasonores à ceux mécaniques en se basant sur les équations de propagation synthétisées par Helmholtz.

En effet, que ce soit expérimentalement ou théoriquement, les modifications géométriques et physiques de la microstructure ont des répercussions sur les caractéristiques mécaniques et ultrasonores. De plus, le contrôle par ultrasons est une technique souvent utilisée en raison de la grande facilité apparente de mise en oeuvre et de sa capacité à prospecter une structure en profondeur.

Plus théoriquement, Langenberg utilise pour la première fois un modèle numérique de propagation des ondes ultrasonores dans le cas du béton : l'Elasto dynamic Finite Integration Technique (EFIT). Il modélise le béton comme un milieu hétérogène, isotrope, élastique non absorbant composé d'une matrice de ciment et d'inclusions de différents matériaux, différentes tailles et formes réparties aléatoirement.

Schubert utilise cette technique de modélisation numérique pour étudier la propagation des ondes ultrasonores dans les milieux hétérogènes. Il conclut qu'il est possible d'utiliser les simulations numériques pour prédire un modèle de propagation des ondes ultrasonores. Par contre l'utilisation du modèle révèle les effets dominants de la porosité et remet en question l'applicabilité d'un modèle de propagation d'ondes ultrasonores pour le contrôle non destructif dans les milieux à fort taux de porosités comme le béton.

Des études plus approfondies résident dans la détermination de la propagation des ondes ultrasonores dans les milieux hétérogènes comme le béton, en prenant en compte à la fois les effets liés à la composition, et ceux dus aux endommagements et défauts apparus lors de la fabrication et exploitation de la structure.

II.4.2.3.7 Types d'ondes ultrasonores

Les ultrasons existent sous différentes formes : les ondes de volume, les ondes de surface... Dans la première famille, les ondes longitudinales font vibrer les particules parallèlement à la direction de propagation. La matière subit une déformation volumique entraînant une alternance de

CHAPITRE II : LES TECHNIQUES NON DESTRUCTIVES

compression et de dilatation. L'onde transversale, pour sa part, déplace les particules perpendiculairement à la direction de propagation. Cette onde est généralement décomposée en deux polarisations : l'onde TH (respectivement TV) dont le mouvement particulaire est contenu dans un plan horizontal, (respectivement vertical). Nous parlerons aussi d'onde T_2 et T_3 lorsqu'il n'y a pas de plan particulier, comme c'est notre cas.

D'autres types d'ondes peuvent également se développer, c'est la deuxième famille : les ondes de surface. Elles résultent de l'interaction d'ondes longitudinales et transversales avec une surface libre. Ces ondes sont très pratiques dans le cas 'in situ' où l'épaisseur du milieu n'est pas toujours connue. Les deux principaux types d'ondes de surface sont les ondes de Rayleigh et les ondes de Love (*figure II-11*). L'amplitude de ces ondes décroît rapidement avec la profondeur.

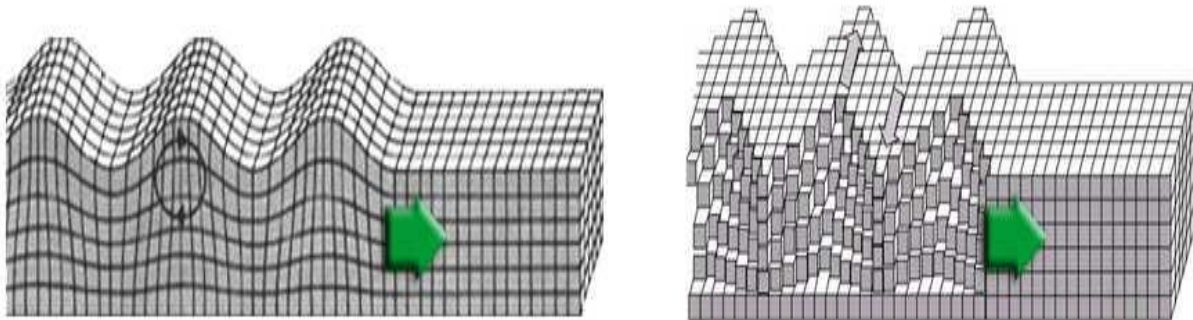


Figure II-12.: Onde de Rayleigh et onde de Love [thèse Université Mohamed Khider – Biskra, 03].

Le déplacement des ondes de Love est essentiellement le même que celui des ondes de cisaillement sans mouvement vertical. Elles résultent de l'interaction des ondes longitudinales horizontales et des ondes transversales horizontales. Par exemple, lors des tremblements de terre, elles provoquent un ébranlement horizontal qui est la cause de nombreux dégâts.

Les ondes de Rayleigh sont polarisées dans un plan perpendiculaire à la surface et dans le sens de propagation. Leur mouvement peut être décomposé en deux polarisations : une composante de compression et une composante plus importante de cisaillement. Ces ondes sont dispersives, et leur profondeur de propagation varie avec la fréquence. Si les caractéristiques mécaniques du milieu changent avec la profondeur, nous observons une variation de la vitesse des ondes de Rayleigh en fonction de la fréquence.

CHAPITRE II : LES TECHNIQUES NON DESTRUCTIVES

L'amplitude de l'onde de Rayleigh à une longueur d'onde de la surface ne représente plus que 20% de l'amplitude de surface. La zone d'exploration des ondes de surface dépend de la fréquence de l'onde mais reste à proximité de la surface (profondeur < longueur d'onde).

La répartition des ondes ultrasonores sur une surface libre dans le béton est étudiée par [Bond ,10] sur une structure de type barrage. L'importante quantité d'énergie véhiculée par ces ondes montre à quel point elles sont potentiellement porteuses d'informations.

Les expériences [Guda ,11] sur les ondes de Rayleigh dans les bétons mettent en évidence l'influence de l'inclinaison de l'émetteur et du récepteur et de la rugosité sur la vitesse de l'onde de surface. Les résultats montrent les nombreux avantages de la caractérisation non destructive par propagation des ondes de surface dans le cas de pièces de faibles épaisseurs. Dans le cas des mesures in situ, l'épaisseur du milieu n'est pas toujours connue. Ceci nous amène donc à considérer l'étude des ondes de surface, et plus particulièrement des ondes de Rayleigh, pour sa mise en pratique simple sur des structures réelles. La connaissance et la maîtrise des phénomènes de diffusion des ondes longitudinale et transversales dans un milieu hétérogène permettront, à terme, de décrire et de prédire la propagation des ondes de surface.

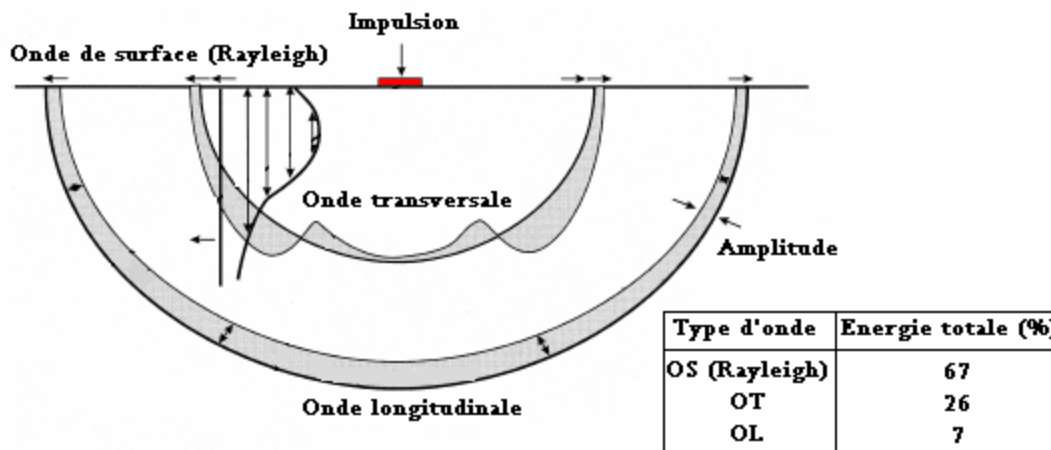


Figure II-13.: Répartitions des ondes ultrasonores sur une surface libre Bond [thèse Université Mohamed Khider – Biskra, 03]

II.4.2.3.8 Interaction des ultrasons avec un milieu hétérogène

Comme nous l'avons vu précédemment le béton met en relation de nombreux composants : ciment, granulats, sable... et peut présenter plusieurs types de défauts : fissures, cavités porosités... La

CHAPITRE II : LES TECHNIQUES NON DESTRUCTIVES

capacité à diffuser l'onde incidente de l'ensemble de ces composants et de ces défauts nous amène à les regrouper sous le nom de « diffuseurs ». De nombreux phénomènes dans la diffusion dépendent du taux et de la taille des diffuseurs, de la fréquence, de la composition de chacun des milieux...

Lorsque le milieu traversé par l'onde est à fort taux de diffuseurs et que la longueur d'onde est de l'ordre de grandeur de la taille caractéristique de l'obstacle, alors l'onde est diffusée sur chaque obstacle et engendre de la diffusion multiple. Cela amène une dispersion spatiale d'une partie de l'onde incidente. En fait, il existe trois domaines fréquentiels :

- **Domaine de Rayleigh** : A basse fréquence la longueur d'onde λ est grande par rapport à l'obstacle. Ce type d'investigation est équivalent à homogénéiser le milieu et ne permet pas d'obtenir une information quantitative sur les diffuseurs. On appelle ce domaine fréquentiel le domaine de Rayleigh ;
- **Domaine Stochastique** : Lorsque la longueur d'onde est du même ordre de grandeur que la taille caractéristique des diffuseurs, nous sommes dans le domaine stochastique. C'est dans ce domaine que nous observons principalement les phénomènes de diffusion ;
- **Domaine Géométrique** : A haute fréquence, l'obstacle est grand par rapport à la longueur d'onde et il agit comme si l'onde rencontrait une interface entre deux milieux. C'est le domaine géométrique.

Dans notre intérêt qui est de caractériser l'endommagement, il est important de privilégier le domaine stochastique dans lequel la diffusion est la plus importante. C'est en effet une source potentielle d'informations sur le milieu.

Nous avons vu précédemment que la composition du béton présente une répartition étendue et continue des tailles d'obstacles.

II.4.2.3.9 Ondes cohérentes et ondes incohérentes

La propagation des ondes ultrasonores dans un milieu hétérogène donne naissance aux ondes cohérentes et incohérentes. Les ondes cohérentes sont les portions d'ondes dont la phase est monotone mais où l'amplitude décroît de manière exponentielle du fait de la dissipation de l'énergie par les diffuseurs et la matrice. En d'autres termes, c'est l'onde qui résiste à la moyenne

CHAPITRE II : LES TECHNIQUES NON DESTRUCTIVES

sur le désordre. Les ondes incohérentes sont les ondes qui n'ont aucune relation de phase entre elles [Ishimaru, 15].

Généralement, on fait l'hypothèse que la propagation dans le milieu d'étude est sans perte par absorption. Dans un tel milieu, l'onde cohérente n'est donc « atténuée » que par la diffusion. L'atténuation correspond au rapport entre la partie de l'onde diffusée mesurée et l'onde plane incidente.

II.4.2.3.10 Propagation, absorption, réflexion et réfraction des ultrasons

Dans un milieu homogène, les ultrasons se propagent de manière rectiligne. La vitesse de propagation c (vitesse du son) dépend du milieu traversé (densité, modules élastiques) et des dimensions géométriques si celles-ci sont du même ordre de grandeur que la longueur d'onde.

De plus, elle n'est pas la même pour les ondes longitudinales que pour les ondes transversales (=ondes de cisaillement). Dans les solides la vitesse des ondes transversales est approximativement la moitié de celle des ondes longitudinales.

L'atténuation des ondes ultrasonores suit la même loi que celle de l'absorption des rayons X lorsqu'on substitue l'intensité par l'amplitude de l'onde. Le coefficient d'absorption μ dépend des propriétés anélastiques et viscoélastiques du matériau et augmente généralement avec la fréquence. L'atténuation des ultrasons, dans la gamme de fréquence utilisée pour le contrôle non destructif, est nettement moins forte que celles des rayons X ou γ . Dans le fer, p. ex., l'atténuation des ultrasons devient importante après quelques mètres, alors que les rayons X se trouvent pratiquement absorbés après quelques centimètres.

La réflexion et la réfraction des ultrasons, lors d'un changement de milieu (interface ou surface), sont plus complexes que celles des rayons lumineux (= ondes transversales uniquement). Une onde ultrasonore longitudinale incidente sous un angle oblique α sur une interface se divise en deux ondes réfléchies et en deux ondes transmises. Chaque paire comprend une onde longitudinale et une onde transversale. L'onde transversale transmise est supprimée pour une incidence normale et l'onde longitudinale transmise disparaît si α dépasse un angle critique qui dépend du rapport des vitesses du son c_L dans les deux milieux considérés. Cet effet est utilisé par les palpeurs à incidence oblique.

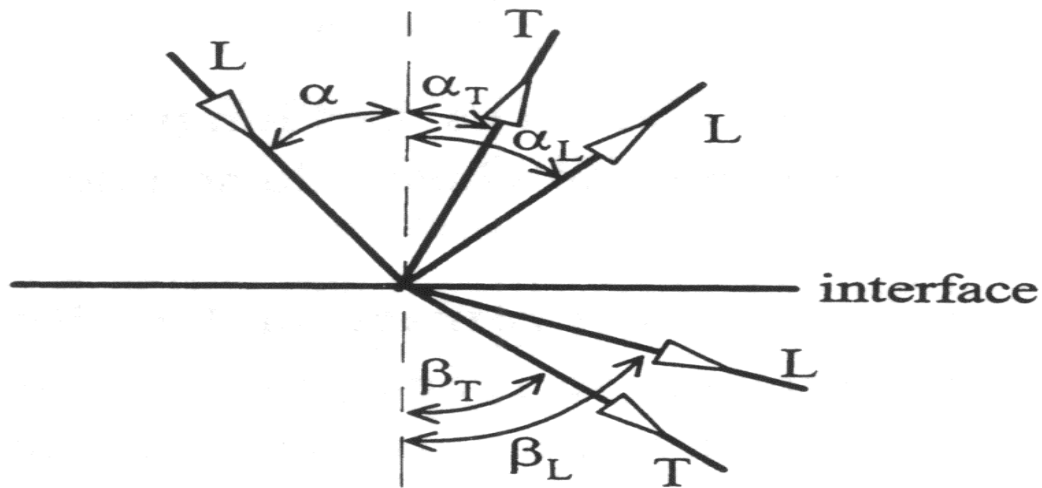


Figure II-14 : Réfraction et réflexion des ondes ultrasoniques [thèse Université Mohamed Khider – Biskra, 03]

Pour le contrôle par ultrasons, on utilise normalement les ondes longitudinales en incidence normale et les ondes transversales en incidence oblique (au-delà de l'angle critique). Pour une incidence normale, le coefficient de réflexion R , défini comme le rapport entre l'amplitude de l'onde réfléchie A_r et l'amplitude de l'onde incidente A_i

$$R = \frac{A_r}{A_i} \quad \text{Avec } A_r = v_1 c_1 - v_2 c_2 \text{ et } A_i = v_1 c_1 + v_2 c_2 \quad (7)$$

v_1, v_2 sont les masses volumiques et c_1 et c_2 les vitesses du son (longitudinales ou transversales selon le type de l'onde). Le produit $v \cdot c$ est appelé impédance acoustique.

On en déduit facilement que la réflexion est quasiment totale, c.-à-d. que $R \approx 1$, pour une fissure (= interface solide-air ou solide-vide), et que, en raison de la conservation de l'énergie transportée par les ondes, l'amplitude de l'onde transmise devient très petite. Pour les rayons X et γ , par contre, on aura selon une loi semblable, utilisant l'indice de réfraction au lieu d l'impédance acoustique, une réflexion négligeable.

Le pouvoir réflecteur élevé d'une fissure est à l'origine de la grande sensibilité des ultrasons pour la détection des défauts des matériaux. Malheureusement, le coefficient de réflexion élevé pose aussi des problèmes dans la pratique. En général, les ultrasons sont excités par des sondes placées à la surface de la pièce à contrôler.

CHAPITRE II : LES TECHNIQUES NON DESTRUCTIVES

En raison de la rugosité de surface, le contact n'est pas parfait. La couche d'air présent à l'interface, entre la sonde et la pièce, réfléchit fortement l'onde et ne la laisse pas passer. Pour améliorer le couplage entre sonde et pièce, on doit appliquer un agent de contact (graisse, eau, huile) sur la surface et veiller à ce qu'ils ne se forment pas de bulles sous la sonde. La valeur plus élevée de l'impédance acoustique $v \cdot c$ des liquides fait diminuer le coefficient de réflexion à des valeurs acceptables.

II.4.2.3.11 Emission et détection d'ultrasons

L'émission et la détection d'ondes ultrasonores se réalise très facilement grâce à l'effet piézoélectrique. Certains matériaux anisotropes, comme p. ex. le quartz monocristallin, ainsi que les matériaux ferroélectriques, tels que le titanate de baryum et le titanate de plomb, possèdent la propriété de se déformer sous l'effet d'un champ électrique (effet piézo-électrique direct). Les déformations sont de l'ordre de 0,1 nm par Volt appliqué aux électrodes. Une tension électrique alternative, appliquée aux électrodes, fait vibrer le transducteur piézoélectrique. Les vibrations, ainsi créées, se transmettent à tout solide en contact avec le transducteur et vont se propager dans celui-ci avec la vitesse du son caractéristique de ce milieu.

Réciproquement, une compression ou une dilatation d'un matériau piézoélectrique, provoquée par une onde incidente, fait apparaître des charges électriques sur les électrodes qui se mesurent facilement par la tension créée entre les électrodes (effet piézoélectrique inverse). L'effet inverse peut alors servir pour la détection d'ondes. Il suffit pour cela de remplacer dans la (*figure II-13*) la tension d'alimentation par un oscilloscope.

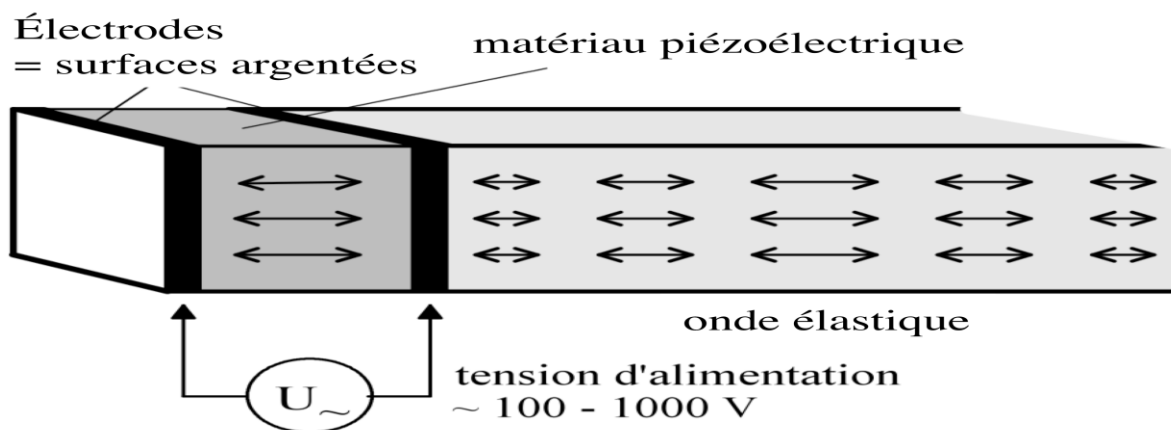


Figure II-15 : Emission d'une onde élastique longitudinale [Le contrôle non destructif par ultrason Jean Perdijon, Hermes 1993].

CHAPITRE II : LES TECHNIQUES NON DESTRUCTIVES

II.4.2.3.12 Les palpeurs pour le contrôle aux ultrasons

Le contrôle aux ultrasons s'effectue le plus souvent avec un palpeur à incidence normale ou un palpeur à incidence oblique.

- Les palpeurs à incidence normale émettent des ondes longitudinales avec comme direction de propagation la normale à la surface.

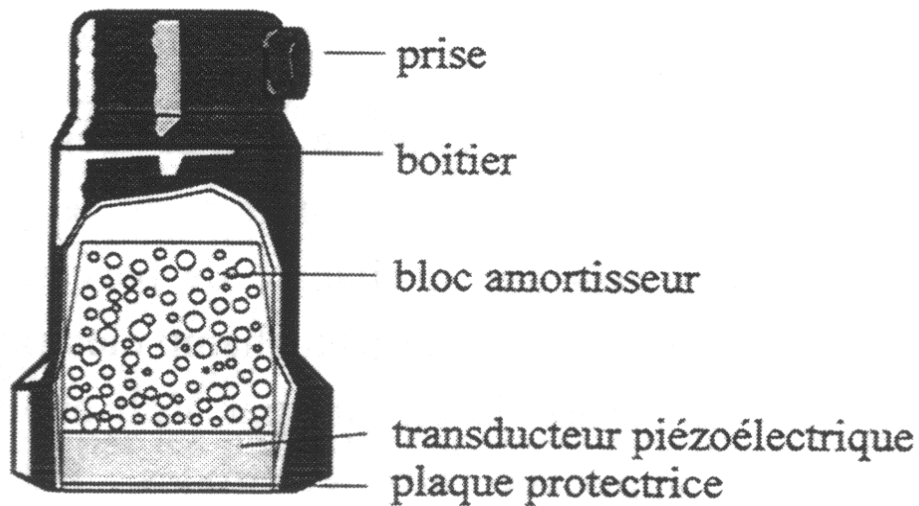


Figure II-16 : Palpeur pour ondes longitudinales [Le contrôle non destructif par ultrasons

Jean Perdijon, Hermes 1993].

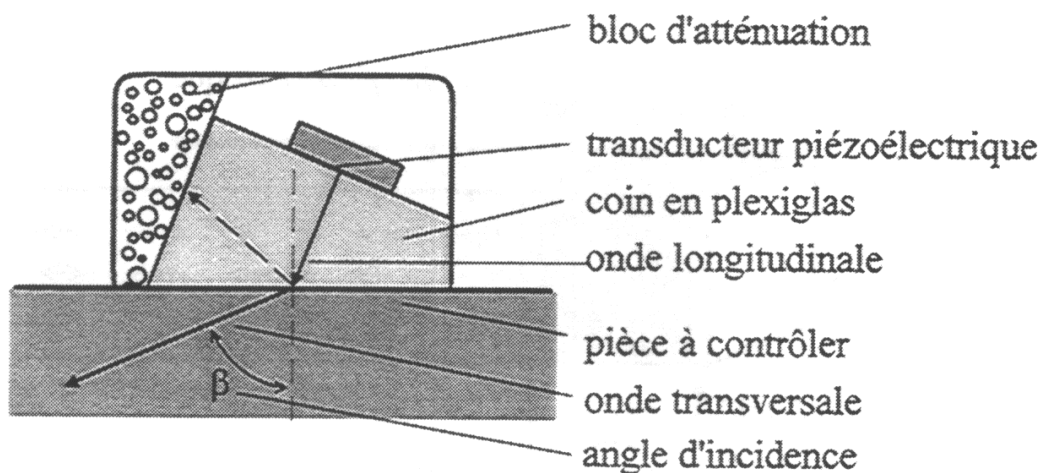


Figure II-17: Palpeur pour ondes transversales [Le contrôle non destructif par ultrasons Jean Perdijon, Hermes 1993].

CHAPITRE II : LES TECHNIQUES NON DESTRUCTIVES

Les palpeurs d'angle émettent des ondes transversales dont la direction de propagation est inclinée par rapport à la normale de la surface. Pour l'excitation de ce type d'onde, on utilise le fait qu'une onde longitudinale, créée dans le palpeur, se divise en une onde transversale et une onde longitudinale lors de la réfraction à l'interface entre le palpeur et la pièce. Pour faciliter l'interprétation des échos, on choisit l'angle d'incidence de manière à ce que seule l'onde transversale puisse exister. L'onde qui est réfléchiée à l'interface et reste dans la sonde doit être amortie dans le bloc d'atténuation pour éviter d'éventuels échos fantômes.

Les palpeurs d'angle s'emploient surtout pour sonder les cordons de soudures. La surface irrégulière du cordon lui-même empêche normalement un contact satisfaisant avec un palpeur normal. L'angle d'incidence β dépend de la construction et du matériau du palpeur ainsi que du matériau de la pièce à sonder. La valeur indiquée sur le boîtier (angles standards 35°, 45°, 60°, 70°, 80°) est valable uniquement pour les aciers.

II.4.2.3.12 Principe du sondage par ultrasons

Le sondage par ultrasons peut servir à plusieurs buts:

- Détection de défauts de toutes sortes (fissures, inclusions, porosités)
- Mesure de profondeur ou épaisseur (par exemple: pièce dont un seul côté est accessible, sondage des fonds marins etc.)
- Mesure des constantes élastiques par l'intermédiaire d'une mesure de la vitesse du son.
- Sondage médical (échographie), etc.

Les intensités couramment utilisées en contrôle non destructif et en sondage médical sont de l'ordre de 1 mW/cm² et ne sont pas dangereuses. Cependant, l'exposition à des intensités dépassant 1 W/cm² comme on les utilise dans les bains à ultrasons pour le nettoyage et pour la soudure des polymères peuvent causer des traumatismes et des graves lésions.

II.4.2.3.13 Mesure de l'atténuation et de la vitesse d'onde ultrasonore

Pour la détermination des atténuations et vitesse des ondes ultrasonores dans l'échantillon, on peut employer d'autres méthodes que la résonance. Beaucoup d'entre elles utilisent des trains d'onde mais ces méthodes sont entourées de difficultés Tant dans la technique que dans l'interprétation des résultats. Le principe est le suivant : des trains d'onde sont envoyés dans les échantillons à tester, les vitesses sont mesurées par des méthodes de temps et de phase tandis que les atténuations

CHAPITRE II : LES TECHNIQUES NON DESTRUCTIVES

sont obtenues à partir de la rapidité avec laquelle les trains d'onde transmis et réfléchis diminuent en amplitude avec la distance.

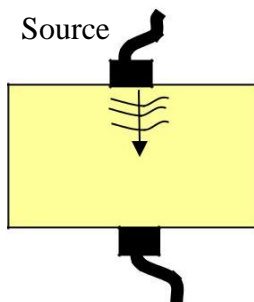
On peut utiliser un seul transducteur fonctionnant en émetteur récepteur ou deux transducteurs, l'un émetteur situé sur une des faces de l'échantillon, l'autre récepteur situé sur la face opposée parallèle. Le choix de l'arrangement dépend de l'expérience. Le choix du matériau constituant les transducteurs est discuté en détail par Berlincourt et al.

L'émetteur peut engendrer des ondes longitudinales ou transversales. il envoie dans l'échantillon un train d'onde de durée relativement courte comparée à son temps de propagation dans l'échantillon, ceci afin d'éviter tout phénomène de superposition, mais de durée relativement longue comparée à la période afin de pouvoir appliquer le formalisme des ondes planes.

Pour la mesure de l'atténuation nous distinguons deux cas :

- lorsque les dimensions transversales de l'échantillon sont grandes comparées à celle de l'émetteur, on peut considérer que les ondes sont libres,
- lorsque les dimensions transversales de l'échantillon sont comparables à celle de l'émetteur, il faut considérer que les ondes sont guidées.

Transmission



Réflexion

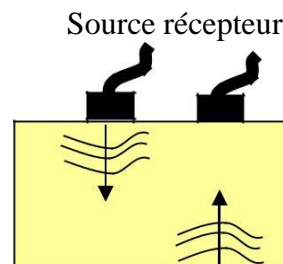


Figure II-18 : Emission des ondes par ultrason [Berlincourt et al].

Suivant la position du récepteur en mode transmission ou réflexion (figure II-16), cela permet d'avoir des informations sur les couches superficielles du béton dégradé, de connaître la mesure d'épaisseur du béton par exemple et de rechercher des défauts comme la corrosion de l'acier.

CHAPITRE II : LES TECHNIQUES NON DESTRUCTIVES

II.5 Conclusion

Les travaux réalisés dans le domaine contrôle non destructifs en général et par ultrasons ne permettent pas de classer les défauts d'une façon suffisamment fiable pour pouvoir rendre cette classification automatisable dans une configuration de chantier. En effet la plupart des travaux concluants ont été réalisés sur des défauts artificiels, ou bien sur un trop petit nombre d'échantillon, ou encore uniquement dans des conditions de laboratoire inadaptables au cas du chantier. De plus, certains types de défauts posent toujours problème.

Le troisième chapitre concerne la partie expérimentale disons les différents essais effectués au laboratoire.

CHAPITRE III
PARTIE
EXPERIMENTALE

III.1 Introduction

La partie bibliographique a permis de constater la faisabilité du suivi par ultrason d'endommagements tels que la résistance, la fissuration du béton, la déformation sous chargement ou la corrosion sous contrainte, c'est-à-dire des événements très énergétiques. Des développements, visant à obtenir un essai de corrosion accélérée reproduisant des conditions les plus proches possibles de la corrosion naturelle qui sont présentés dans ce chapitre.

La première partie de ce chapitre concerne la présentation des différents dispositifs mis en œuvre pour le développement des essais ainsi que les matériaux utilisés lors des études expérimentales et les différents matériels et techniques utilisés. La deuxième partie de ce chapitre est consacrée à la méthodologie des essais. En utilisant trois environnements agressifs pour l'armature.

III.2 Objectif

L'objectif de ce travail est de déterminer expérimentalement l'influence de la corrosion des armatures engendrée par la pénétration des chlorures sur la résistance mécanique des bétons en utilisant les ondes ultrasoniques. Des éprouvettes en béton armé et mortier sika sont alors préparées, Par la suite, des essais à l'ultrason sont menés sur ces éprouvettes à des âges différents.

III.3 caractérisation des matériaux

III.3.1 Granulat

Le gravier utilisé du type 3/8



Figure III-1 : gravier 3/8 utilisé labo CUAT

III.3.1.1 Les essais effectués

✚ Masse volumique apparente (ρ_{app})

Le but de cette manipulation est la détermination de la masse volumique apparente du gravier utilisé.

• Matériels utilisés

- Récipient jaugé d'un volume de 1L ;
- Balance mécanique ;
- Gravier dont on veut déterminer la masse volumique ;
- Règle à raser.

Après la manipulation nous avons trouvé : la masse volumique apparente $\rho_{app} = \frac{M_1 + M_2}{2V}$

Avec $V=1L$

CHAPITRE III : PARTIE EXPERIMENTALE

Donc la masse volumique apparente est $\rho_{app} = 1,31 \text{ kg/L}$

✚ Masse volumique absolue (ρ_{abs})

Le but de cette manipulation est la détermination de la masse volumique absolue d'un granulat avec la méthode de l'éprouvette graduée.

• Matériels utilisés

- Une éprouvette graduée ;
- Une poignée de gravier dont on veut en déterminer la masse volumique absolue ;
- De l'eau ;
- Une balance mécanique.

Après manipulation nous avons trouvé la masse volumique absolue $\rho_{abs} = \frac{M_a}{V_{eau}} = 2,5 \text{ g/ml}$

Avec :

- M_a : poids du granulat pesé à l'air ;
- V_{eau} : volume d'eau déplacée.

✚ Analyse granulométrie

Cette manipulation consiste à déterminer la distribution dimensionnelle des grains constituant un granulat dont les dimensions sont comprises entre 0,063 et 125 mm

• Principe de l'essai

- L'essai consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis un matériau en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes.
- Les masses des différents refus et tamisats sont rapportées à la masse initiale du matériau. Les pourcentages ainsi obtenus sont exploités sous forme graphique.



Figure III-2 : dispositifs d'essais d'analyse granulométrie labo du CUAT.

- **Matériels utilisés**

- Gravier ;
- Les dimensions de mailles et le nombre de tamis sont choisis en fonction de la nature de l'échantillon et de la précision attendue.
- La norme actuelle (EN 933-2) préconise, pour l'analyse granulométrique, la série de tamis suivante en (mm): 0.063, 0.125, 0.25, 0.50, 1, 2, 4, 8.

CHAPITRE III : PARTIE EXPERIMENTALE

• Résultats de l'analyse granulométrique gravier 3/8

Tableau III-1 : résultat analyse granulométrique

Tamis (mm)	Refus partiels (g)	Refus cumulés (g)	tamisât %
8	0	0	100
5	211,3	211,3	78,87
4	424,6	635,9	36,41
2.5	305 ,4	941,3	58,7
Fond	47,6	988,9	1,11

III.3.2 Le sable

Dans le cadre de cette étude, un seul sable fut utilisé. Il s'agit du sable fin. Ce sable était provenu de terga, il n'y a aucune variabilité entre les mélanges du point de vue de la granulométrie.



Figure III-3 : sable fin laboratoire CUAT.

III.3.2.1 Les essais effectués

✚ Analyse granulométrique.

Même principe que celui de gravier

III.3.3 Le ciment

Dans le cadre de ce travail, le ciment utilisé est Portland au calcaire NA 442 de type CEM II/B-1 ,42.5 N.

Plus des informations voir fiche annexe A.

III.4 Dispositifs expérimentaux

III.4.1 Matériaux

III.4.1.2 Béton

Pour se rapprocher le plus de la corrosion naturelle in situ et contrairement aux diverses études de la littérature, il n'a pas été introduite Na Cl dans le béton au moment du malaxage. Mais le pourcentage assez élevé de chlorures dans la pâte de ciment ne répond pas à la norme et le choix de ne pas introduire de chlorure dans le béton s'est imposé. On utilise volontairement un béton poreux, de façon à faciliter la pénétration des agents agressifs. Un tel milieu de faible compacité est également défavorable à la transmission des ondes acoustiques.

D'après Austin et Lyons, certains paramètres du béton influencent les mesures de l'émission acoustique, comme par exemple la porosité du béton [Austin et al, 04]. Comme précisé ci-après, le fort rapport eau sur ciment utilisé ici 0,55) (confère au béton une porosité élevée) ce qui nous place dans une situation contraignante pour étudier la sensibilité de l'émission acoustique, les ondes se propageant moins bien dans un béton fortement poreux (faible compacité) que dans un béton peu poreux (forte compacité). Mais si cette sensibilité est avérée dans ces conditions elle le sera également dans un environnement mettant en œuvre un béton de plus grande compacité.

Composition

La composition du béton est donnée ci-après :

- Ciment Portland CEM II/B 42 ,5 N ;
- Sable fin
- Gravier 3/8
- Eau : 5litres
- E/C =0,55cm

Ces éprouvettes en béton sont armées avec des armatures des diamètres 10cm et 6cm. Les distances d et d' entre les armatures sont calculées de façon à ce qu'elles soient égales et centrées.

CHAPITRE III : PARTIE EXPERIMENTALE

✚ Formulation du béton

Tableau III-2 : formulation du béton

Constituants	Quantités de MT (Kg/m ³)
Ciment	400
Gravier 3/8	1069
Sable de mer (fin)	620
Eau de robinet	156
Rapport E/C	0.55
Rapport C/S	0.64

Les éprouvettes sont conservées dans de l'eau potable pendant 28 jours, Après on les a placé dans trois différents milieux, les essais à l'ultrason sont commencés.



Figure III-4 : conservation des éprouvettes dans l'eau potable laboratoire CUAT.

✚ Essai d'affaissement

L'essai d'affaissement au cône d'Abrams est un essai réalisé sur le béton frais peu fluide pour déterminer sa consistance. L'affaissement est aussi connu sous le nom de slump provenant de l'anglais.

• Résultat

Les résultats d'essais d'affaissement sont récapitulés dans le tableau ci-dessus :

CHAPITRE III : PARTIE EXPERIMENTALE

Tableau III-3 : résultat essai d'affaissement

Pâte	Affaissement
01	60mm
02	55mm
03	65 mm



Figure III-5 : Essais d'affaissement au cône Abrams laboratoire CUAT.

- **Interprétation des résultats**

La norme NF EN 206 1 classe l'affaissement du béton en cinq groupes

CHAPITRE III : PARTIE EXPERIMENTALE

Tableau III-4 : les normes NE en 206 classes pour l'affaissement du béton

Classe	Affaissement en mm	Propriété du béton frais	Mise en oeuvre
S1	10 – 40	Ferme, très secs et peu maniable	Fabrication de routes, fondations à armature légère
S2	50 – 90	Plastique, à humidité moyenne et à maniabilité moyenne	Béton armé normal placé avec vibration
S3	100 – 150	Très plastique, très humide et à maniabilité élevée	
S4	160 – 210	Fluide, très humide et à maniabilité élevée	
S5	≥ 220	Très fluide, très humide et à maniabilité élevée	

L'affaissement peut prendre différentes formes :

- un effondrement complet du béton ;
- un affaissement par cisaillement, la partie supérieure du béton cisaille et glisse latéralement ;
- un véritable affaissement, le béton s'abaisse simplement, en gardant plus ou moins de forme.

III.4.2 Acier

Les barres d'armature qui ont été utilisées sont des barres 10cm (diamètre) et de nuance 400R (acier d'armature régulier) provenant d'une même coulée. Deux types de préparations de barres ont été étudiées : des barres brossées à l'aide d'une brosse métallique au fils d'acier et des barres nettoyées avec de l'acide sulfurique (voir Figure III-6). La préparation des barres avait pour but d'uniformiser les surfaces à l'étude en enlevant toute trace de corrosion et de saleté.

Les barres ont été préparées avec beaucoup de soin. Afin de pouvoir réaliser le montage, elles ont été coupées en tiges de 16cm de longueur.

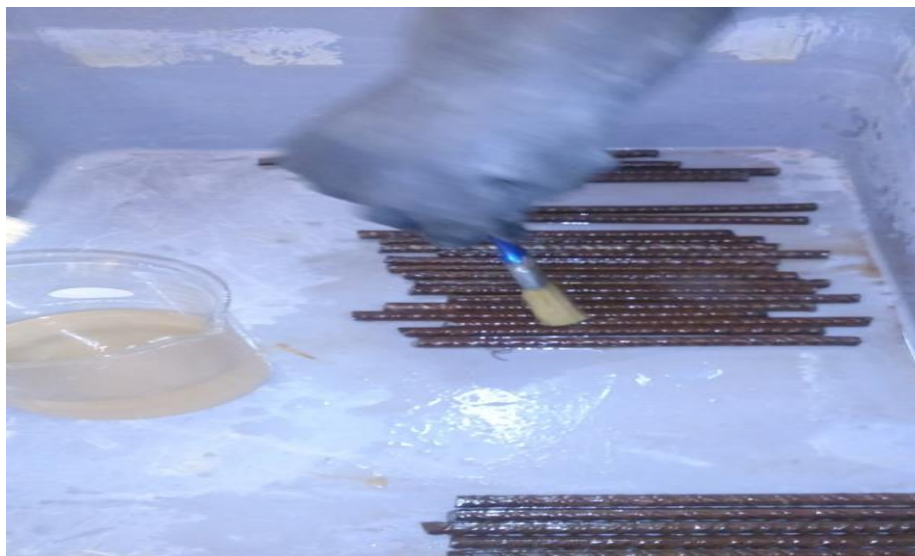
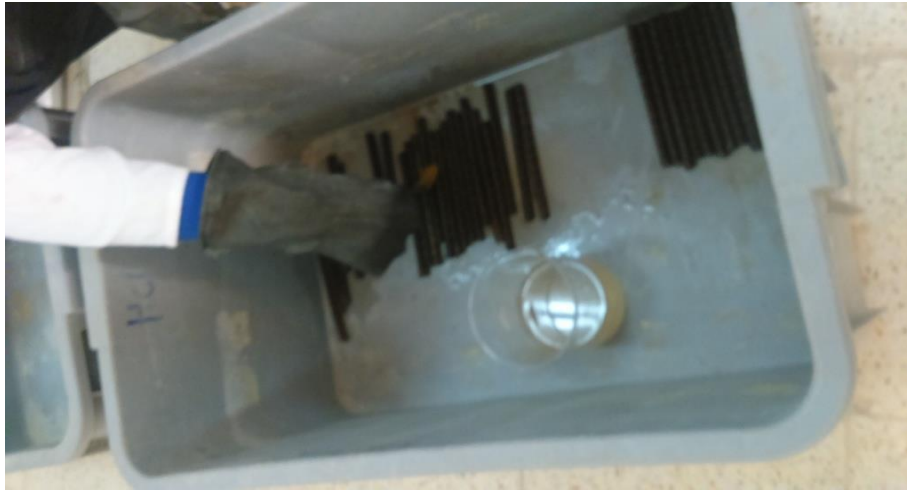


Figure III-6 : Nettoyage acier avec de l'acide sulfurique laboratoire CUAT

III.4.3 coffrage

Les coffrages utilisés étaient des cylindres en PVC de 10cm et de 6 cm de diamètre et 15cm de hauteur.

III.4.4 Mortier

Le mélange de mortier était préparé déjà (voir annexe III-1), nous on a juste ajouté une quantité d'eau de gâchage et le mélangés dans un malaxeur ayant une capacité de 5L.

CHAPITRE III : PARTIE EXPERIMENTALE

+ Essais de consistance (Vicat)

La finalité de l'essai est de déterminer la teneur en eau conventionnelle que devra avoir le ciment lors de l'essai de prise.

L'objectif est de définir une telle consistance dite «consistance normalisée »

• Principe d'essai

La consistance est évaluée ici en mesurant l'enfoncement dans la pâte, d'une tige cylindrique sous l'effet d'une charge constante. L'enfoncement est d'autant plus important que la consistance est plus fluide.

La consistance évaluée de cette manière sera appelée « CONSISTANCE VICAT».

III.4.5 Milieux

Trois différents milieux ont été préparés, qui sont :

1. Milieu 1 : $\text{Ca}(\text{OH})_2$;
2. Milieu 2 : $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{NaCl}$;
3. Milieu 3 : $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{NaCl} + \text{Inhibiteur}$.



Figure III-7 : les trois différents milieux laboratoire CUAT.

III.5 Essais par ultrason

5.1 Principe

Le principe de la méthode consiste à mesurer le temps mis par une onde, d'où le nom de la méthode (essai de vitesse de propagation d'ondes sonores) à parcourir une distance connue. D'après LESLIE et CHEESMAN, l'état du béton totalement inconnu peut se déterminer approximativement selon la vitesse mesurée.

Les impulsions sont produites par des cristaux piézo-électriques à excitation par choc des cristaux semblables sont utilisées dans le récepteur [Jons R et Al ,69].

La fréquence de générateur d'ondes est comprise entre 10 et 150 HZ, le temps de propagation des ondes dans le béton est mesuré par des circuits de mesure électroniques.



Figure III-8: appareil de mesure ultrason laboratoire CUAT

5.2 Mode Opérateur

➤ Préparation de l'élément

Pour qu'il y ait un contact parfait entre le béton et les transducteurs, il est recommandé d'employer un matériau intermédiaire entre les deux et en prenant soin de vérifier que l'appareil est bien appliqué contre la surface à tester. Les matériaux d'interposition sont la vaseline, un savon liquide ou une pâte constituée de Kaolin et de glycérol. (Dans notre cas c'était de la vaseline).

CHAPITRE III : PARTIE EXPERIMENTALE

Lorsque la surface de béton est très rugueuse, il est nécessaire de poncer et d'égaliser la partie de la surface où le transducteur sera fixé.

➤ Points de mesures

Le nombre de points de mesures dépend des dimensions de l'ouvrage testé. On recommande une distance minimale de parcours de 400 mm pour les mesures en surface.

5.3 Travaux préparatoires

- Poncer et égaliser la partie de la surface de l'élément à ausculter où le transducteur sera fixé,
- Employer un matériau intermédiaire entre les deux et en prenant soin de vérifier que l'appareil est bien appliqué contre la surface à tester à l'aide d'un matériaux d'interposition comme la vaseline, un savon liquide ou une pâte constituée de Kaolin et de glycérol.

5.4 Étalonnage de l'appareil

L'ultrason doit toujours être contrôlé par des essais d'étalonnage avant chaque utilisation. L'étalonnage consiste à vérifier le temps de propagation à travers la tige étalon dont le temps est connu à l'avance. Il faut ajuster l'ultrason dans le cas où le temps mesuré ne correspond pas à celui marqué sur la tige étalon.

5.5 Manières de mesure

La détermination de la vitesse de propagation des ultrasons se fait de trois manières, suivant le type de l'élément à tester.

5.6 Mesure en transparence (directe)

Les mesures en transparence sont utilisées dans le cas des éprouvettes, des poteaux ou de certaines poutres. Les transducteurs sont appliqués sur les deux faces de l'élément à tester. (Figure III-9). Est celle utilisée dans notre travail.

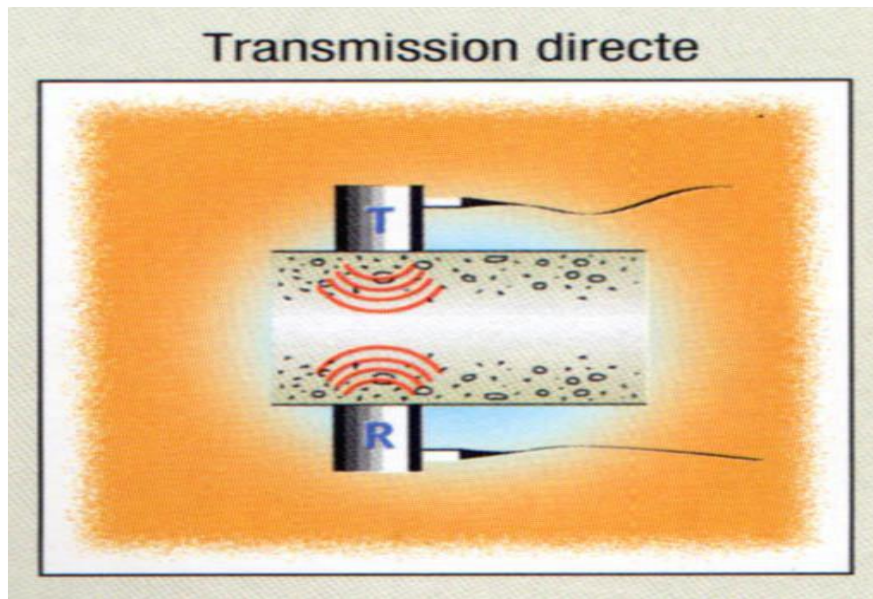


Figure III-9 : mode de transmission directe

5.7 Paramètres influents la vitesse des ultrasons

La vitesse des ondes ultrasoniques à travers le béton résulte du temps mis par les ondes pour traverser la pâte de ciment durci et les granulats. Elle dépend énormément du module d'élasticité des granulats et de leur quantité dans le béton. Par ailleurs, la résistance du béton ne dépend pas nécessairement du dosage en gros granulats ou de leur module d'élasticité. Cependant pour un granulat donné et une composition donnée, la vitesse de propagation des ondes dépend des modifications de la pâte de ciment durci, telles qu'un changement du rapport Eau/Ciment qui influe le module d'élasticité de la pâte. De plus d'autres facteurs influencent la propagation des ondes sonores à savoir :

- Le type de ciment ;
- Le dosage en ciment ;
- La nature des granulats;
- La granulométrie ;
- L'humidité du béton ;
- La maturité du béton ;
- Les adjuvants.

5.10 Résultats et Interprétation des résultats de mesure aux Ultrasons

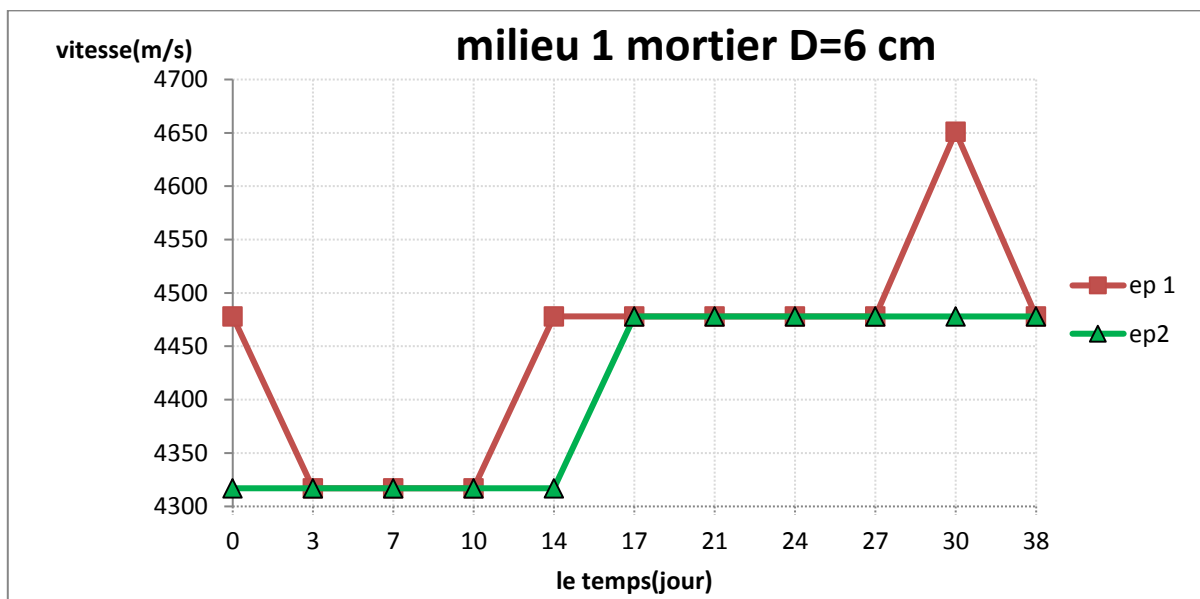
Dans un milieu homogène et isotrope, la vitesse des ondes longitudinales des ultrasons est reliée au module d'élasticité et à la masse volumique. Cette relation donne une base logique pour utiliser des mesures de vitesse des ondes pour estimer la résistance à la compression du béton et du mortier. Mais il faut mentionner qu'il n'y a pas de relation physique unique entre les deux paramètres compte tenu de l'influence des différents constituants entrant dans la composition du béton et mortier. Par conséquent une corrélation plus fiable entre la vitesse de propagation des ultrasons et la résistance du béton à la compression ne peut être établie que dans des limites strictes.

A partir de ces données ultrasonores, nous allons maintenant observer les résultats expérimentaux et les interprétés. Les expériences que nous avons réalisées ont pour objectif de comparer les vitesses de propagation des ondes ultrasonore à des différents temps et de définir certaines de ses limites, notamment en termes de la résistance et la qualité. Nous souhaitons également observer l'influence de chaque milieu de conservation sur les éprouvettes.

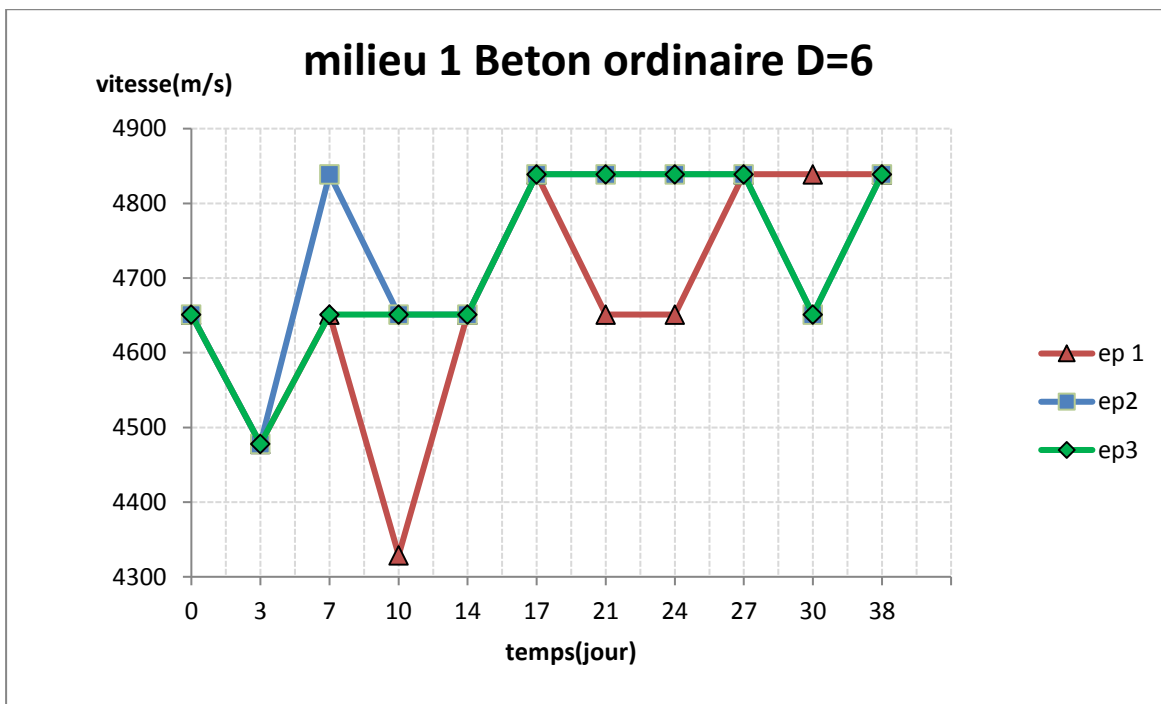
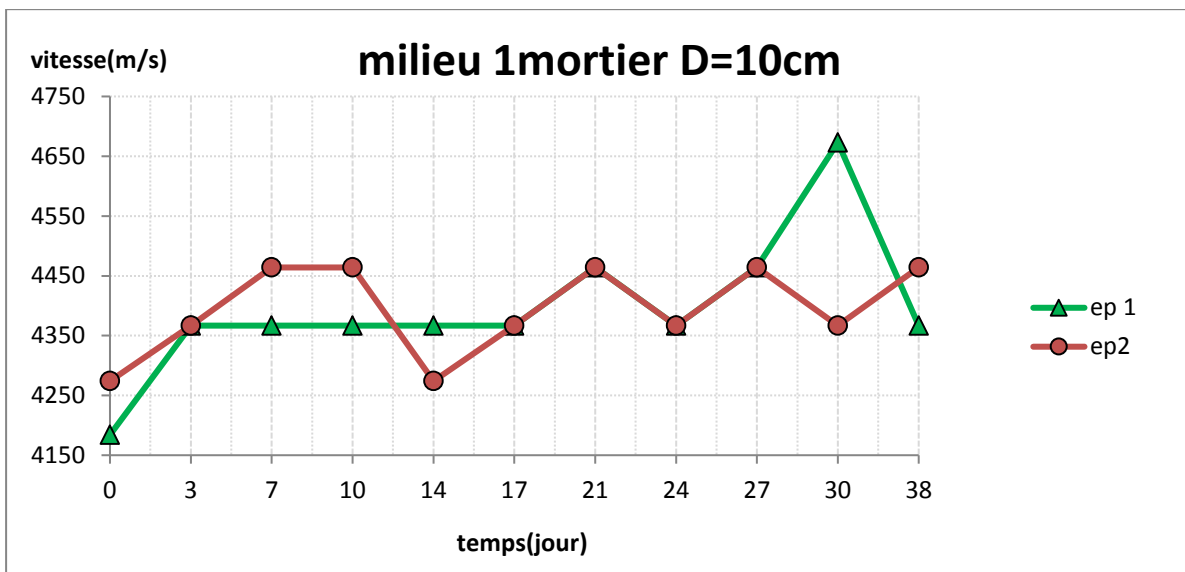
A partir de cela, nous allons, dans un premier temps, donner les graphes de chaque milieu expérimental et comparer les résultats puis, dans un deuxième temps, comparer les courbes des moyennes des éprouvettes en béton et celles en mortier .

- **Milieu 1 : $Ca(OH)_2$**

Les premiers graphes $f(t)=$ vitesse



CHAPITRE III : PARTIE EXPERIMENTALE



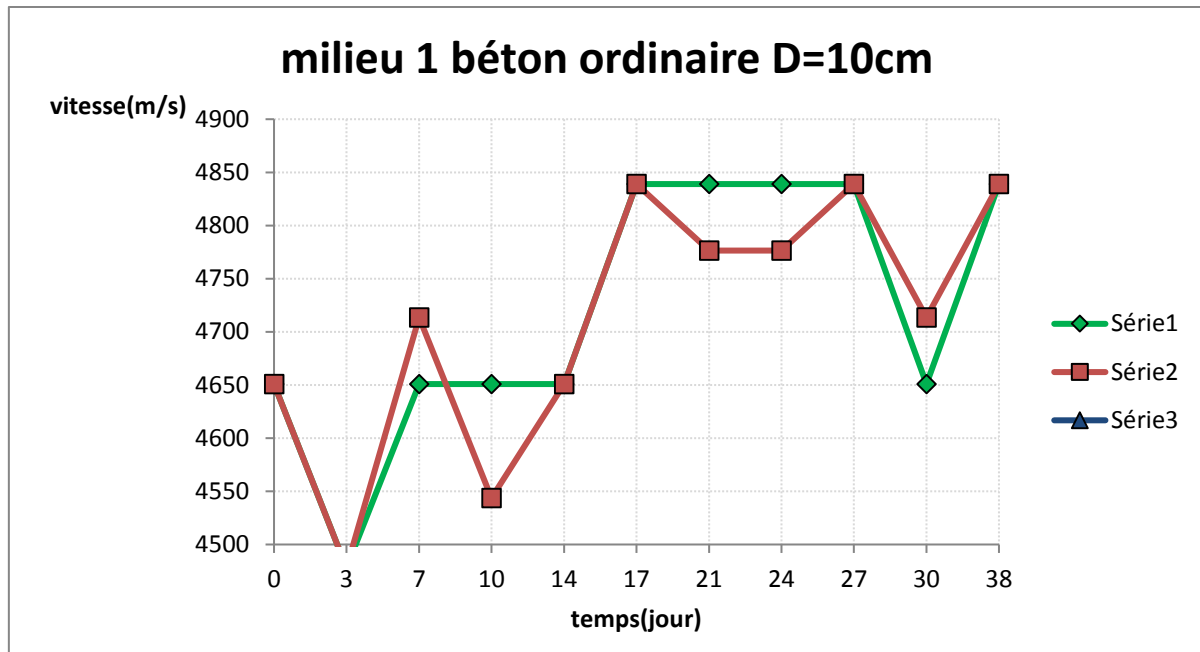


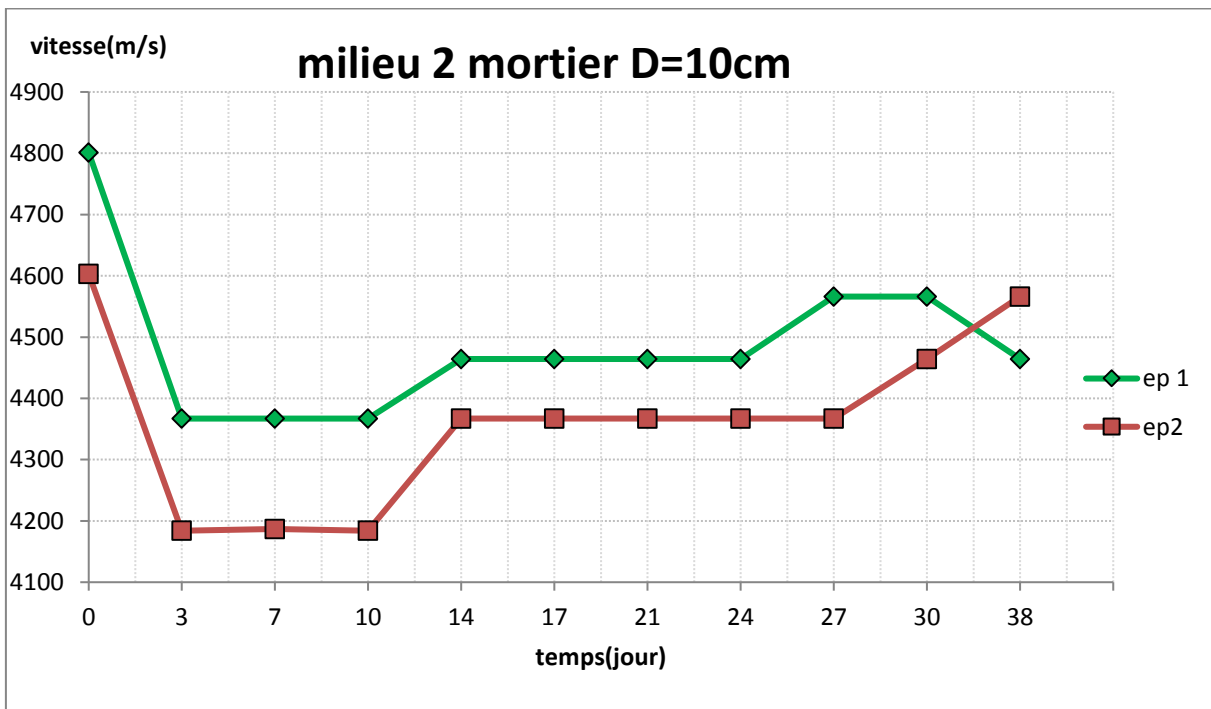
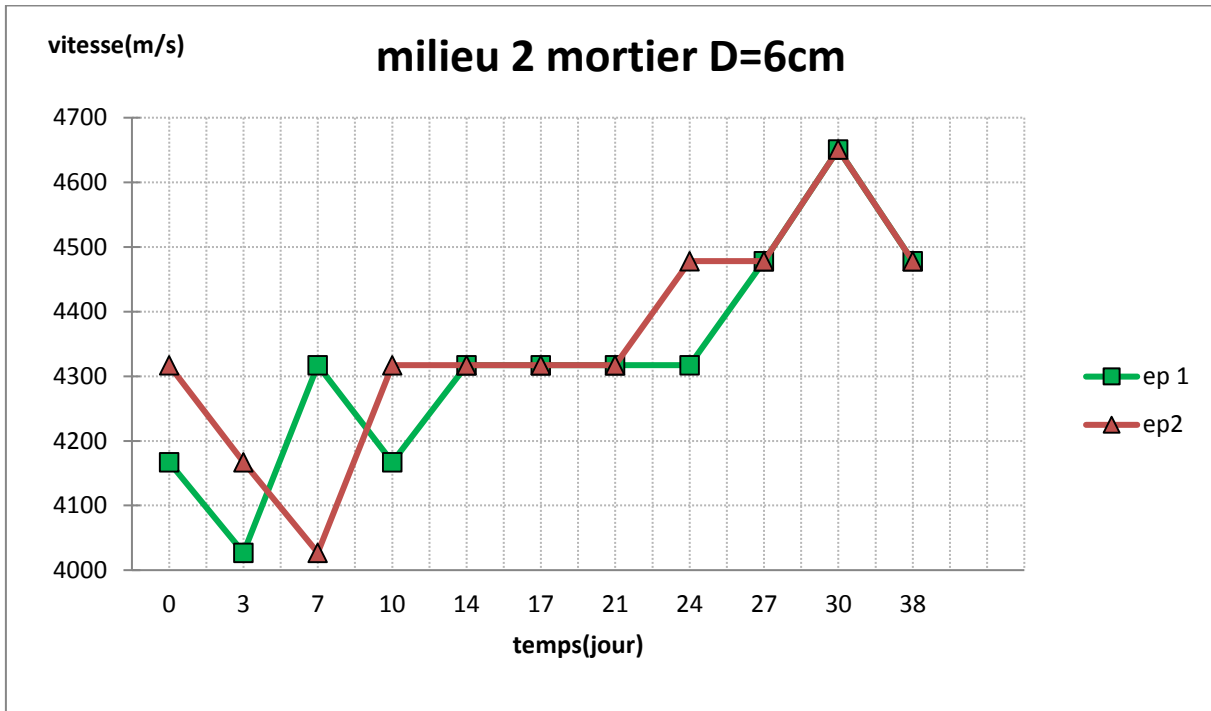
Figure III-10 : les graphes du milieu 1

Nous constatons sur les graphiques que les vitesses sur différents points varient, cette variation est due à la modification de la pâte de ciment durci, telles qu'un changement qui influe le module d'élasticité de la pâte dans le milieu Ca(OH)_2 , ce qui nous amène à dire que l'onde se propage dans un milieu qui est considéré quasi hétérogène donc dispersif. Nous remarquons aussi que l'ordre de grandeur des vitesses expérimentales dans le milieu 1 varie entre 4150m/s et 5100m/s c'est qui amène à dire que les bétons ont une très haute résistance et sont d'une très bonne qualité donc pas des fissures et déformations.

CHAPITRE III : PARTIE EXPERIMENTALE

- **Milieu 2 : $Ca(OH)_2 + NaCl$**

Les deuxièmes graphes $f(t)$ = vitesse



CHAPITRE III : PARTIE EXPERIMENTALE

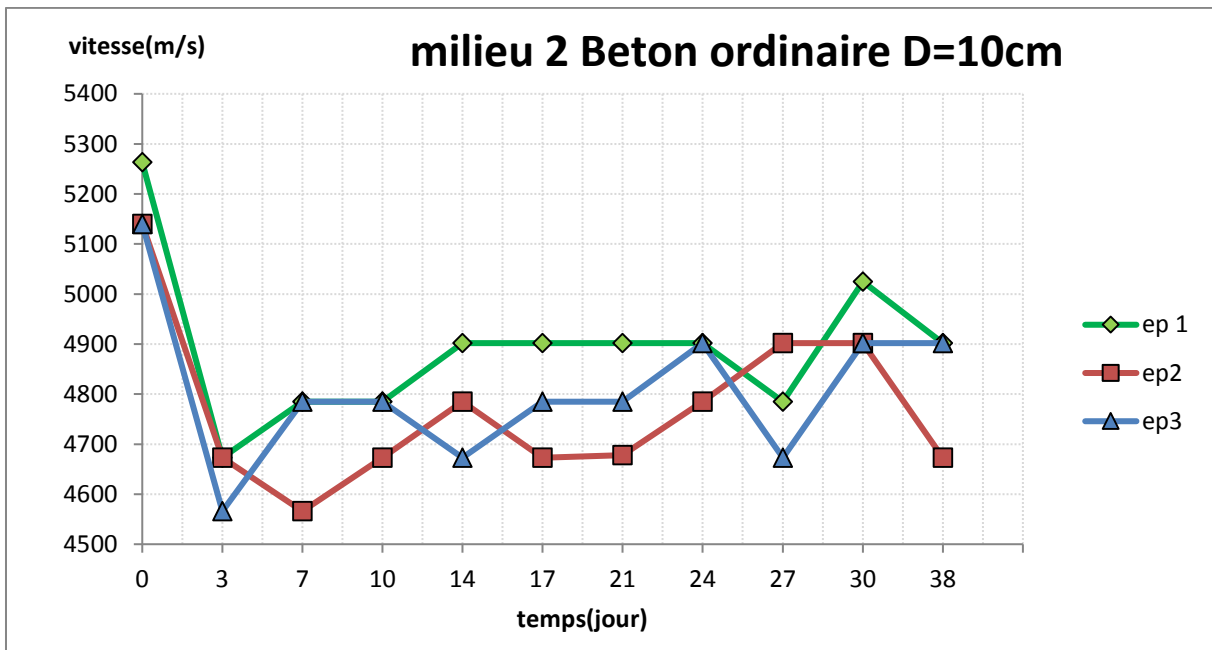
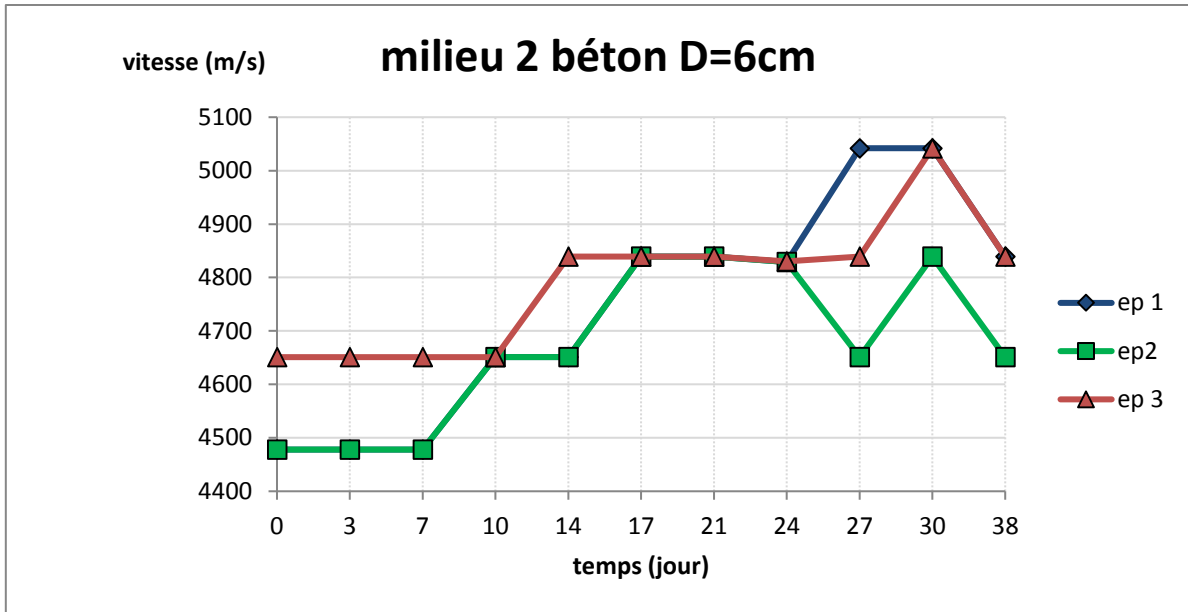


Figure III-11 : les graphes du milieu 2

Nous constatons sur les graphiques que les vitesses sur différents points varient, cette variation est due au changement du pourcentage de la teneur du Na Cl aux différentes dates dans le milieu, Nous remarquons aussi que l'ordre de grandeur des vitesses expérimentales dans le milieu 2 varie entre 4000m/s et 5400m/s c'est qui amène à dire que les bétons ont une très haute résistance et sont d'une très bonne qualité donc pas des fissures et déformations.

CHAPITRE III : PARTIE EXPERIMENTALE

- **Milieu 3 : $Ca(OH)_2 + NaCl + Inhibiteur$**

Les deuxièmes graphes $f(t)$ = vitesse

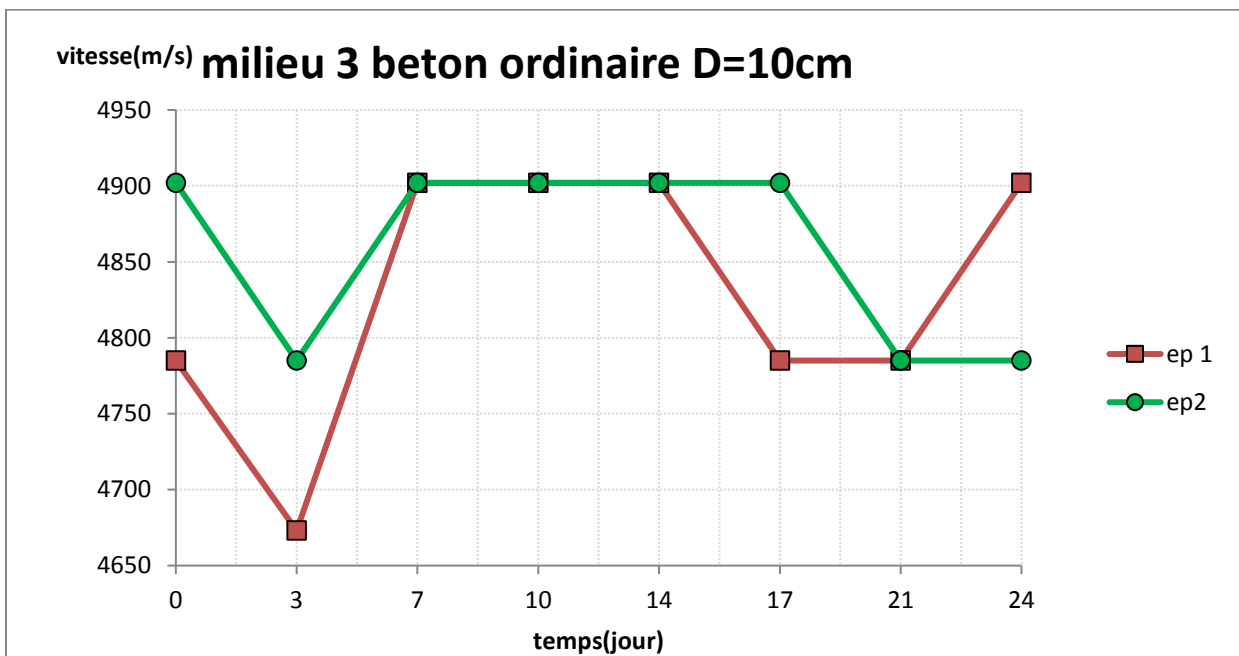
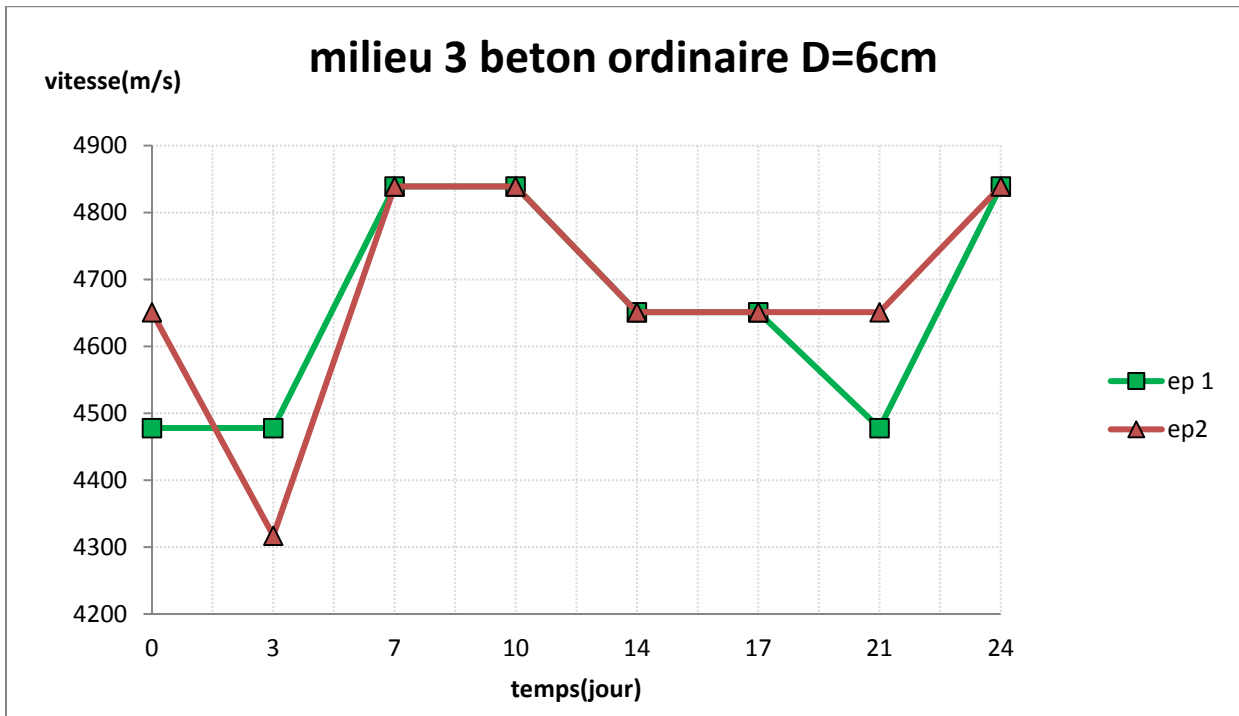


Figure III-12 : les graphes du milieu 3

CHAPITRE III : PARTIE EXPERIMENTALE

Nous constatons sur les graphiques que les vitesses sur différents points varient, cette variation dépend énormément du module d'élasticité des granulats et de leur quantité dans chaque éprouvette et aussi de l'effet de l'humidité des éprouvettes à des différentes dates de conservation dans le milieu, Nous remarquons aussi que l'ordre de grandeur des vitesses expérimentales dans le milieu 3 varie entre 4200m/s et 4900m/s c'est qui amène à dire que les bétons ont une très haute résistance et sont d'une très bonne qualité donc pas des fissures et déformations.

- **Milieu 1 Ca(OH)₂ moyenne des éprouvettes**

Les troisièmes graphes f(t)= vitesse

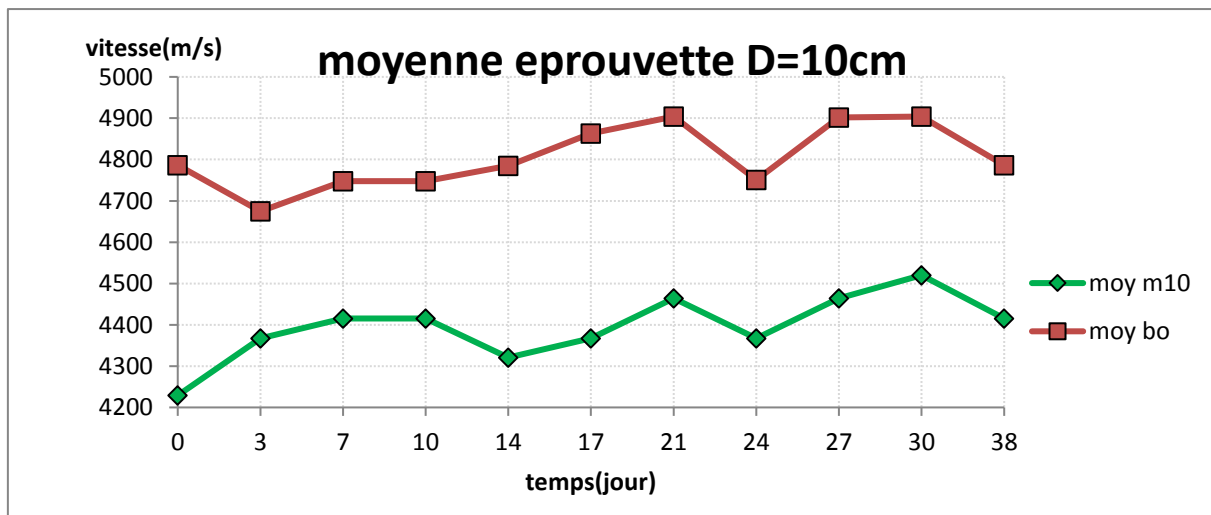
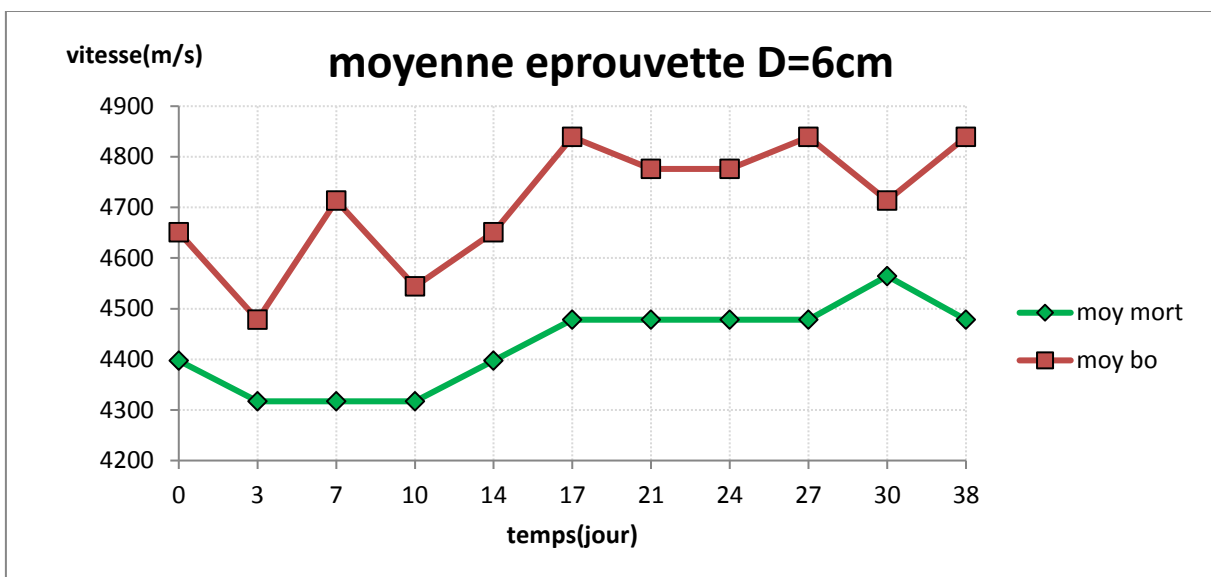


Figure III-13 : les graphes de la moyenne des éprouvettes du milieu 1

CHAPITRE III : PARTIE EXPERIMENTALE

- Milieu 2 $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{NaCl}$ moyenne des éprouvettes

Les quatrièmes graphes $f(t) = \text{vitesse}$

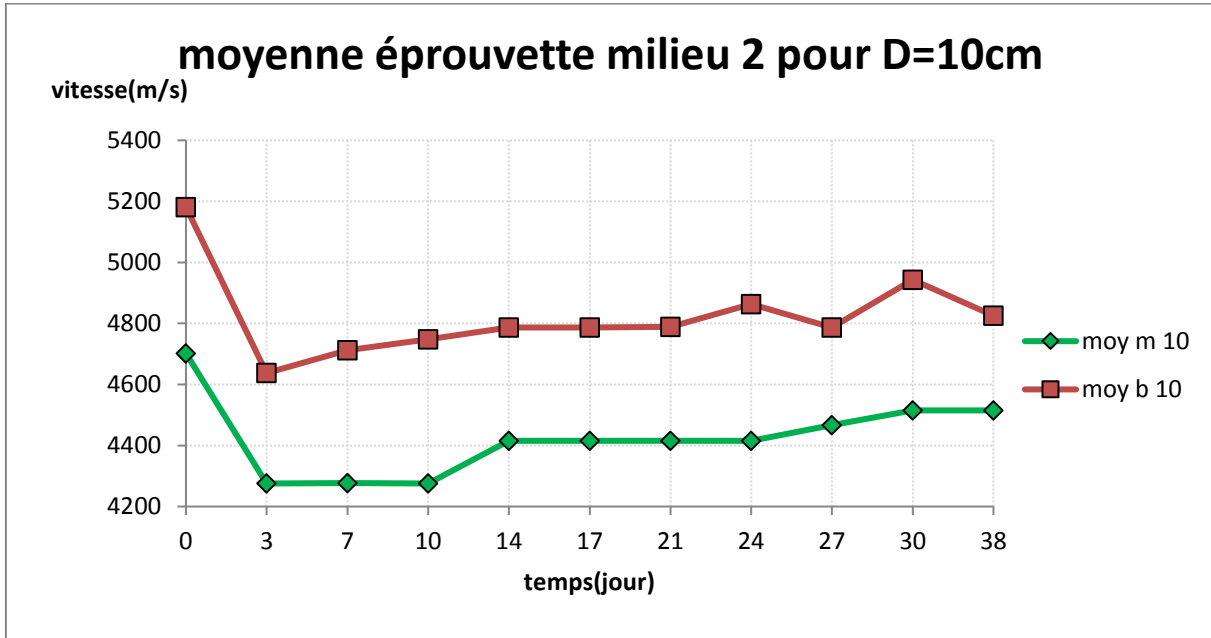
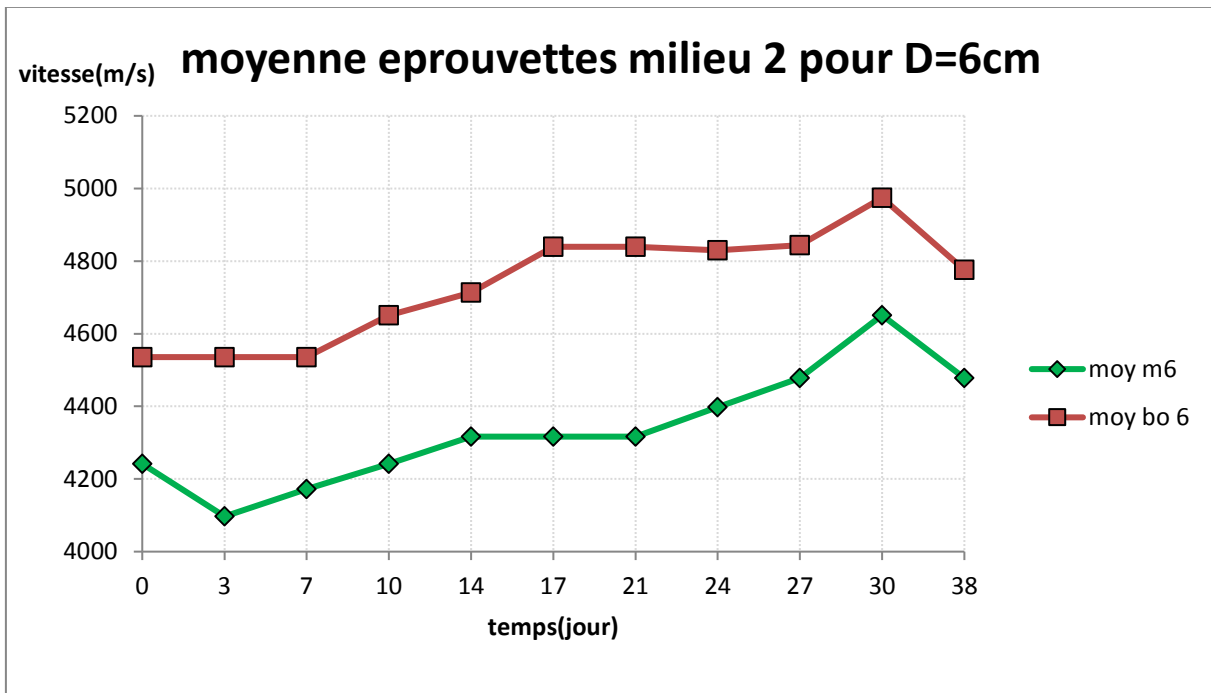


Figure III-14 : les graphes de la moyenne des éprouvettes du milieu 2

Nous observons sur les graphes de la (figure III-13) et (Figure III-14) un écart très important entre les courbes, les courbes (Moy B.O) sont au-dessus des courbes (Moy Mortier) c'est qui nous amène

CHAPITRE III : PARTIE EXPERIMENTALE

à dire que les vitesses des propagations des éprouvettes en béton sont plus grandes que celles des mortiers car l'influence de la présence et la quantité des granulats dans le béton et aussi parce que l'onde se propage dans un milieu qui est considéré quasi hétérogène donc dispersif.

- **Les graphes influence du ph.**

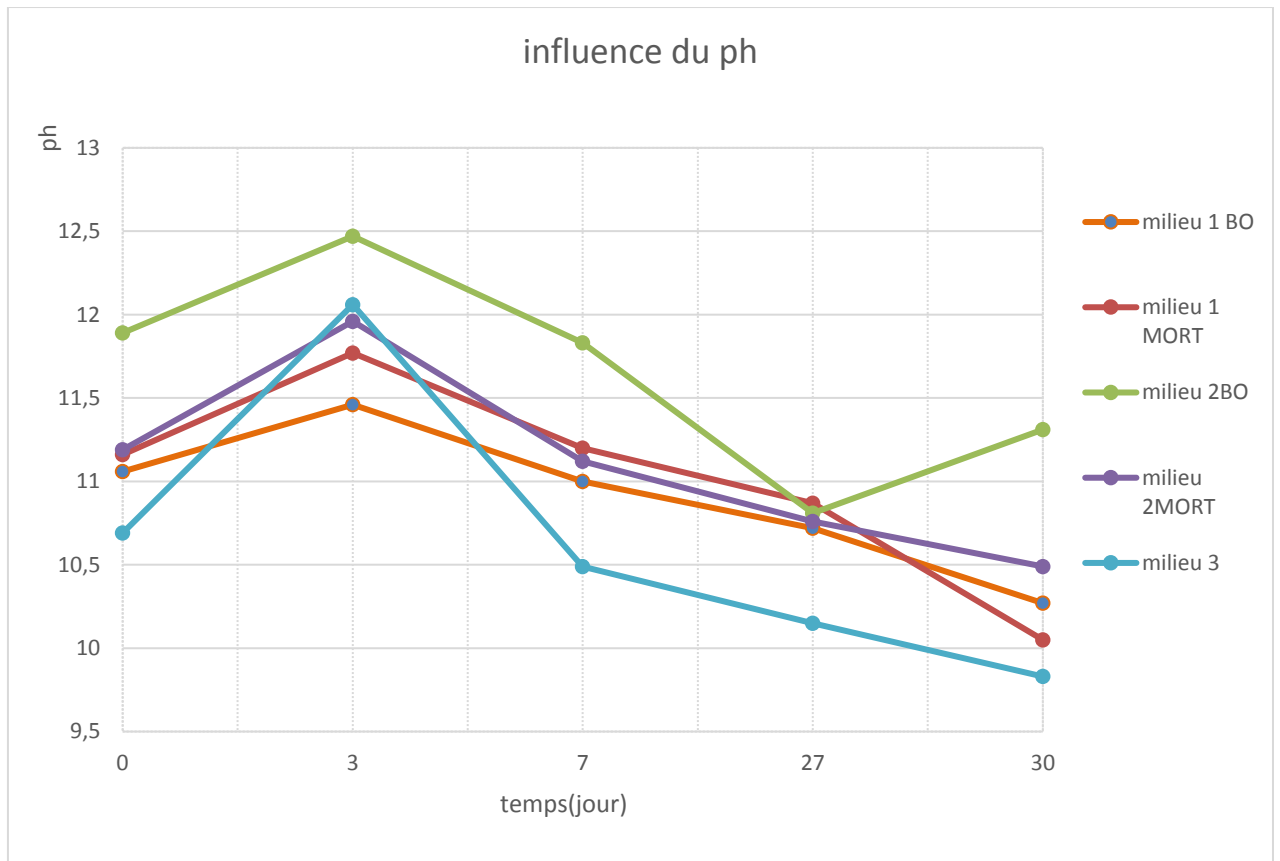


Figure III-15 : influence du ph.

Nous observons sur le graphe de la (figure III-15) que les courbes ont presque une même allure c'est-à-dire que les potentiels d'hydrogène (ph) sont presque les mêmes dans ces milieux à des différentes dates mais il faut surtout signaler que dans le milieu 3, l'allure n'est pas la même puisque il y a l'influence d'inhibiteur sur le potentiel d'hydrogène.

6 Conclusion

Cette partie s'inscrit dans la thématique des études expérimentales de la propagation des ondes ultrasonores dans les milieux hétérogènes tel que le béton et le mortier en vue, à terme, de juger de la tenue mécanique des structures du génie civil exposés dans le milieu marin par contrôles non destructifs. Nous avons pu déterminer expérimentalement l'influence de la corrosion des armatures engendrée par la pénétration des chlorures sur la résistance mécanique des bétons en utilisant les ondes ultrasoniques.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

La corrosion par pénétration des ions chlorures est la principale cause de dégradation des ouvrages en béton armé exposés dans les milieux marins et pour cela, elle doit être prise très sérieuse en compte. De nombreux ouvrages nécessitent très souvent de nouvelles interventions contre cette pathologie alors qu'ils venaient d'en être traités. Cette situation peut être imputée soit au non maitrise du phénomène de corrosion par les techniciens et les ingénieurs, soit à une mauvaise démarche adoptée lors des réparations ou au choix d'une méthode de réhabilitation inadéquate et inefficace.

L'objectif visé ici était celui de mettre à la portée des techniciens et ingénieurs un document pouvant leur permettre d'aborder avec compétence et savoir-faire, le problème de corrosion des ouvrages en béton armé dans les milieux marins, d'adopter une démarche appropriée pour une réhabilitation durable et efficace de ces ouvrages dégradés par la corrosion des armatures.

Pour y parvenir, nous avons jugé bon :

- De présenter le matériau béton armé et les différentes pathologies dont il peut être atteint car on ne peut pas prétendre soigner un mal dans un corps sans connaître le corps en question,
- D'expliquer le mécanisme de la corrosion par pénétration des ions chlorures et les dommages qu'elle peut causer aux ouvrages,
- De donner les étapes à suivre pour pouvoir établir un diagnostic fiable sur un ouvrage en béton armé.
- De donner quelques mesures préventives contre la corrosion, car prévenir vaut mieux que guérir.

Ce précieux et délicat document, nous espérons que sera un outil pour les techniciens et ingénieurs en ce qui concerne la « **DURABILITE DES OUVRAGES EN BETON ARMES DANS LE MILIEU MARIN** ».

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

[Abraham O et Al, 02] ABRAHAM O., COTE P. ; LCPC- Juillet/Août 2002- Réf.4428, p.41-50 Méthode impact-écho basse fréquence pour la détection de vide dans les gaines de précontrainte.

[AFNOR, 00] NF EN 12696 : Protection cathodique de l'acier dans le béton Norme publiée sous l'indice A 05 668 et sous le statut de norme française homologuée en juillet 2000. AFNOR Norme NF EN206-1

[Ollivier et Al, 1997] OLLIVIER J.P., RAHARINAIVO A., ARLIGUIE G. ; Journées techniques de l'AFPC-AFREM ; DURABILITE DES BETONS ; «méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité » 11-12 déc. 1997 ; INSA Toulouse.

[Alonso et Al, 02] ALONSO C., CASTELLOTE M., ANDRADE C. ; Chloride threshold dependence of pitting potential of reinforcements; Received 10 February 2002; revised 29 April 2002. Available online 16 August 2002

[Andrade et Al, 91]; ANDRADE, MARIBONA, FELIU, GONZALEZ and FELIEU; "The Effect of Macrocells Between Active and Passive Areas of Steels Reinforcements." Corrosion Science 33 (1991): 237-249.

[Andrade et Al, 96] ANDRADE C., ALONSO C.; "Corrosion rate monitoring in the laboratory and on-site"; Construction and Building Materials; Vol.10, N°5, pp.315-328; 1996.

[Andrade et Al ,08] ANDRADE C., GARCES M., MARTINEZ I.; "Galvanic currents and corrosion rates of reinforcements measured in cells simulating different pitting areas caused by chloride attack in sodium hydroxide"; Corrosion Science; pp.2959-2964; 2008.

[Arliguie, 97] Données tirées du document (AFPC-AFREM (DURABILITE DES BETONS) Ginette ARLIGUIE ; « Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité » ; Laboratoire des Matériaux et Durabilité des Constructions (L.M.D.C.) ; 1997.

[ASTM, 72] American Society for Testing and Materials ; « Recommended Practice for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals » ; ASTM,G1-72.

[ASTM, 82] American Society for Testing and Materials ; « Standard definition of terms relating to AE » ; ASTM, E610-82.

[Austin et Al, 04] AUSTIN et LYONS. "Electrochemical Behavior of Steel-Reinforced Concrete During Accelerated Corrosion Testing"; Corrosion; Vol.60; N°2; pp.203-212; 2004.

[Balayssac et Al, 98] BALAYSSAC J.P., DETRICHE Ch.H., DIAFAT N. ; « Influence de la durée de cure humide sur la durabilité du béton de peau », RILEM, Matériaux et Constructions, Vol.31, N°209, 1998.

[Bary et Al, 04] B.BARY, A.SELLIER ; »Coupled moisture-carbon dioxide-calcium transfer model for carbonation of concrete », Cement and Concrete Research, 2004, 34, pp.1859-1872.

[Bellenger, 02] BELLENGER F. ; « Etude et contrôle de la corrosion feuilletant des alliages d'aluminium 2024 et 7449 par bruit électrochimique et émission acoustique. Analyse microstructurale et caractérisation de l'endommagement » ; Thèse de doctorat INSA Lyon ; 2002.

[Beranger et Al, 94] BERANGER G., DABOSI F., BAROUX B.; "Corrosion localisée"; Ecole d'automne Banyuls, 1992; Les Editions de Physique; 1994.

[Bollon, 96] BOLLON A. ; Bulletin IUFM, Limousin, "Evaluer".

[Breysse et Al, 05] BREYSSE D., ABRAHAM O. ; « Méthodologie d'évaluation non destructive de l'état d'altération des ouvrages en béton » ; AFGC-COFREND ; PressesLCPC ; 2005.

[Briant, 89] BRIANT J.; « Phénomènes d'interface, agents de surface : principe et modes d'action » ; Ecole Nationale Supérieure du Pétrole et des moteurs ; Editions Technip ; 3ème trimestre 1989.

[Briant et Al, 97] J. G. M. Wood and J. Crerar; "Tay road bridge: Analysis of chloride ingress variability & prediction of long term deterioration "; 10 novembre 1997. Structural Studies & Design Ltd, Chiddingfold, UK Paper to seminar at Building Research Establishment; Construction and Building Materials; Volume 11, Issue 4, June 1997, Pages 249-254; Corrosion and Treatment of Reinforced Concrete.

[Calibe, 02] « Les parements en béton », fascicule de documentation rédigé dans le cadre du projet national CALIBE, 2002.

[Castel A, 00] CASTEL A., « couplage mécanique et corrosion dans les éléments de béton armé », doctorat de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, 2000.

[Cornell RM et Al, 03] CORNELL R.M., SCHERTMANN U.; “The Iron Oxides”; WILEY-VCH; Germany; 2003; 664 p.

[Dous O et Al, 02] DOUS O., RHAZI J., BERTRAND L. ; «Auscultation des dalles en béton armé par des techniques de contrôle non destructif » ; Sherbrooke ; 2002

[Duval R, 92] DUVAL R.-« La durabilité des armatures et du béton d’enrobage ». La durabilité des bétons, Presses des Ponts et Chaussées, 1992, p.173-226.

[El Maaddawy, 03] EL MAADDAWY T. SOUDKI K.; “Effectiveness of Impressed Current Technique to Simulate Corrosion of Steel Reinforcement in Concrete”; Journal of Materials in Civil Engineering ; February 2003; Volume 15, Issue 1, pp. 41-47.

[Elsener, 02] ELSENER; “Macrocell Corrosion of Steel in Concrete- Implications for Corrosion Monitoring.” Cement & Concrete Composites 24 (2002): 65-72.

[Elsener et Al, 03] ELSENER B., ANDRADE C., GULIKERS J., POLDER R., RAUPACH M.; “ Half-cell potential measurements- Potential mapping on reinforced concrete structures”; RILEM TC 154-EMC: Electrochemical techniques for Measuring Metallic Corrosion; Materials and Structures, Vol.36; August-September 2003; pp.461-471.

[François R et Al, 94] FRANCOIS R., ARLIGUIE G., MASO J.C. ; « Durabilité du Béton Armé » ; Rapport de synthèse ; LMDC INSA UPS Toulouse ; 1994.

[Frégonèse et Al, 01] FREGONESE M., IDRISSE H., MAZILLEH., RENAUD L., CETRE Y. ; « Initiation and propagation steps in pitting corrosion of austenitic stainless steels : monitoring by acoustic emission » ; Corrosion Science ; 2001 ; vol.43 ; N°4 ; pp.627-641.

[Garboczi et Al, 98] GARBOCZI, BENTZ, 1998- Multiscale analytical/ numerical theory of the diffusivity of concrete pp. 77-88.

[Girard C, 98] GIRARD C., 1998; La carbonatation du Béton Armé; Division ST-Technical Facilities Management, CERN, workshop, Genève, Suisse.

[Godard B, 05] GODARD B., 2005; « Les techniques d’auscultation des ouvrages en béton armé » ; LCPC ; Colloque sur les OA, LE PONT, Toulouse, 19 et 20 Octobre 2005.

[Gonzalez et Al, 95] GONZALEZ J.A., ANDRADE A., ALONSO C., FELIU S.; “Comparison of rates of general corrosion and maximum pitting penetration on concrete embedded steel reinforcement”; Cement and Concrete Research; Volume 25, N°2, February 1995, pp. 257-264.

[Gulikers, 00] GULIKERS J.- « Service life management of a concrete structure exposed to a marine environment ». Procedure of the international RILEM Workshop Life Prediction and Aging Management of Concrete Structures, Cannes, France, octobre 2000.

[Hamdan, 93] HAMDAN Z. ; « Evolution de la corrosion des aciers du béton armé en ambiances agressives » ; LMDC INSA Toulouse ; Thèse N° ordre 237 ; 1993.

[Huet, 05] B.HUET; “ Comportement à la corrosion des armatures dans un béton carbonaté. Influence de la chimie de la solution interstitielle et d’une barrière de transport » ; Thèse INSA Lyon ; 28 octobre 2005.

[Idrissi et Al, 05] IDRISSE H., ASSOULI B., SIMESCU F., DEBICKI G. ; « Detection and identification of concrete cracking during corrosion of reinforced concrete by acoustic emission Coupled to the Electrochemical techniques » ; NDT&E ; 17 avril 2005

[Jaubert, 04] JAUBERT L. ; « Etude de la corrosion uniforme d’aciers non alliés et inoxydables : utilisation conjointe de l’émission acoustique et des techniques électrochimiques » ; Thèse INSA Lyon ; 2004.

[Johnson M, 02] JOHNSON M. ; « Waveform based clustering and classification of AE transients in composite laminates using principal component Analysis » NDT&E International, 2002, vol.35, n°3, p.367-376.

[Klysz, 04] KLYSZ G., « Caractérisation du béton d’enrobage par technique radar : exploitation de l’onde directe émetteur-récepteur » ; Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier- Toulouse III.

[Lacombe et Al, 90] LACOMBE P., BAROUX B., BERANGER G. : Les aciers inoxydables ; 2ème édition ; Les Ulis : Les éditions de physique ; p 190.

[Laurens et Al, 02] LAURENS S., BALAYSSAC J.P., RHAZI J., ARLIGUIE G. (2002) ; « Influence of concrete moisture up on radar Waveform » RILEM Materials and structures, V.35, p.198-203.

[Le Bescop et Al, 00] ; P. LE BESCOP, F.ADENOT, C.GALLE, P.LOVERA ; Dégénération des matériaux à base de liants hydrauliques en milieu saturé- Application au comportement à long terme des colis « béton » ; CE Saclay et CE Caradache, France.

[Lemaignan, 03] LEMAIGNAN C. ; « La rupture des matériaux » ; EDP Sciences.

[Li Z, 98] LI Z., LI F., ZDUNEK A., LANDIS E., SHAH S. ; “Application of Acoustic Emission Technique to Detection of Reinforcing Steel Corrosion in Concrete”; ACI MATERIALS JOURNAL, January/February 1998 ; Title no. 95.

[Liu T et Al, 98] ; LIU T.et WEYERS R.W.; “Modeling the Dynamic Corrosion Process in Chloride Contaminated Concrete Structures”; Cement and Concrete Research; Vol.28; Issue 3; Mars 1998; pp.365-379.

[Lyons R et Al, 04] LYONS R.; AUSTIN S.; “Influence of diurnal and seasonal temperature variations on the detection of corrosion in reinforced concrete by acoustic emission”; Corrosion Science; Vol.47; pp.413-433; 11 septembre 2004.

[Mazille et Al, 95] MAZILLE H., ROTHEA R., TRONEL C.; “ An acoustic emission technique for monitoring pitting corrosion of austenitic stainless steels”; Corrosion Science; 1995; vol.37; N°9; pp.1365-1375.

[Moriande, 2005] MORIANDE « Electrochimie ». Editions Dunod, 2005.

[Miinshiou, 98] Miinshiou Huang ; « Using Acoustic Emission in Fatigue and Fracture Materials Research”, Non destructive evaluation; Novembre 1998; (vol. 50, no. 11).

[Neville, 01] NEVILLE A.; Consideration of durability of concrete structures: past, present and future. Materials and structures, 34:114-118.

[OCDE, 89] OCDE- Recherches routières. Durabilité des ponts routiers en béton. Paris, 1989.

[Petre Lazar, 00] PETRE-LAZAR I.; “Evaluation du comportement en service des ouvrages en béton armé soumis à la corrosion des aciers”; Thèse Université Laval ; Québec ; Novembre 2000.

[Pollock, 86] ; POLLOCK A.A. ; Acoustic emission capabilities and applications in monitoring corrosion. ASTM Special technical publ.908, Philadelphia; 1986; pp.30-42.

[Pourbaix, 75] POURBAIX M. ; « Notions fondamentales, Aspects électrochimiques de la corrosion » Chapitre III ; matériaux Métalliques- Phénomènes de Corrosion. Leçons en Corrosion Electrochimique (Cefracor Ed) ; 1975.

[Powers et Al, 47] POWERS T.C., BROWNYARD T.L. ; « Studies of the Physical properties of hardened cement paste. American Concrete Institut Journal; 1947; vol.43; Parties 1 à 9.

[Proust, 92] PROUST A. « Etude par la technique d'émission acoustique de la corrosion sous contrainte de trois nuances d'acier inoxydable en milieu chloruré chaud » ; Thèse de doctorat INSA de Lyon ; 1992 ; 286 p.

[Raharinaivo et Al, 98] RAHARINAIVO A., ARLIGUIE G., CHAUSSADENT T.; « La corrosion et la protection des aciers dans le béton» ; Presses du LCPC ; 1998.

[Ramniceanu, 04]; Ramniceanu; "Correlation of Corrosion Measurements and Bridge Conditions with NBIS Deck Rating." Master of Science Thesis in Civil and Environmental Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University.

[Reguer, 05] REGUER Solenn; « Phases chlorées sur les objets archéologiques ferreux corrodés dans les sols : caractérisations et mécanismes de formation » Thèse, 2005. Université paris XI Orsay.

[Rothea et Al, 90] ROTHEA R., MAZILLE H. Méthodes de contrôles non destructifs. Ecole CNRS Bombannes, Editions de physique ; 1990 ; pp.515-535.

[Sansalone, 86] SANSALONE Mary ; « Non destructive Testing and evaluation for manufacturing and construction » ; 1986

[Sbartai et Al, 04] Z.M. Sbartai, G. Klysz, S. Laurens, J-P. Balayssac, G. Ballivy, G. Arliguie 'Aptitude de l'onde directe radar à la détection des gradients d'humidité dans le béton: Essais en laboratoire et étude de cas. 'INFRA 2004, 15-17 Nov. 2004, Montréal, Québec, Canada.

[Sbartai et Al, 05] SBARTAI Z. M., LAURENS S., RHAZI J., BALAYSSAC J-P., BALLIVY G., ARLIGUIE G. ; « Evaluation non destructive du risque de corrosion par mesures radar et de résistivité électrique : expérimentation en laboratoire et application in situ » ; Congres International, Réhabilitation des Construction et Développement Durable, Alger, 3-4 mai 2005, pp 25-33.

[Tache G et Al, 98] TACHE G., VIE D., « Diagnostic des ouvrages en béton armé. Facteurs de vieillissement des ouvrages ». Annales de l'ITBTP, février 1998, p.27-37.

[Tessier et Al, 05] ; TESSIER C., GAILLET L., BRUHAT D., MICHEL R., NOBLET S., BARBIER V. ; « Les moyens d'auscultation et de surveillance : Applications au viaduc de Merlebach » Journée « Cables 2005 » ; LCPC/ MACOA.

[Thiery et Al, 03] ; THIERY, VILAIN, PLATRET ; "Effect of carbonation on density, microstructure and liquid water saturation concrete", Proc. 9 th Eng. Conf. On Advances in cement and concrete, USA, 2003, pp.481-490.

[Toulminet, 02] ASI 2002-2003 Gwenaëlle TOULMINET – cours sur les capteurs.

[Tuutti, 82] TUUTTI K. ; « Corrosion of Steel in Concrete »; Swedish Cement and Concrete Research Institute; S-100 44; Stockholm (1982).

[Valls et Al, 02]; VALLS S., VASQUEZ E.; “Accelerated carbonation of sewage sludge-cement-sand mortars and its environmental impact”; Article; 2002.

[Rothea, 1990] ROTHEA R., MAZILLE H. Méthodes de contrôles non destructifs. Ecole CNRS Bombannes, Editions de physique ; 1990 ; pp.515-535.

[J. Frohly et Al, 1982] M Gazalet, C Bruneel, R. Torguet, J. Lefebvre, Critère d'exploitation des signaux ultrasonores en contrôle non destructif des milieux hétérogènes, Journée Nationale du Cofrend – Paris, 1982, pp. 176-182

[W.F et Al, 00] W.F. Kepler, D.M. Frangopol, Improved assessment of mass concrete dams using acoustic travel time tomography. Part I - theory, Construction and building materials, 2000, pp. 133-146.

[J. Gosalbez et Al, 02] J. Gosalbez, R. Miralles, Time-Frequency analysis of ultrasonics backscattering noise for non destructive characterisation on cement pastes, 8th European Conference on Non Destructive Testing, June 17-21, Barcelona 2002

[Z. Wang, et Al, 92] Seismic and acoustic velocities in reservoir rocks - Volume 2, theoretical and model studies, Geophysics reprint series, 1992, 457 pages.

[Taché, 1994] enquête IREX-“Durabilité des armatures du béton armé et précontraint”, 1994.

[Taché, 1998] TACHE G., VIE D., « Diagnostic des ouvrages en béton armé. Facteurs de vieillissement des ouvrages ». Annales de l'ITBTP, février 1998, p.27-37.

[A. Ishimaru, 1978] Wave propagation and scattering in Radom media, Vol. 1&2, Academic Press, New York, 1978, 572 pages.

[These Université Mohamed Khider – Biskra, 03]

[These Contrôles Non destructifs RACHID BOURAS-UMMTO]

Sites Web:

[HAL] Ressuage des bétons hydrauliques (Laurent Josserand. Ressuage des bétons Hydrauliques. Mechanics. Ecole des Ponts paristech, 2002. French.)
https://www.google.dz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwjx-IK33eLMAhXEchQKHZOvCXMqFggaMAA&url=https%3A%2F%2Ftel.archivesouvertes.fr%2Ftel00005679%2Fdocument&usg=AFQjCNG1QjP3kLyH_6FXLYa2itSI5PvFWA&sig2=wJP9qg7HsAKBeGixjig&bvm=bv.122129774,d.d24&cad=rja

https://www.google.dz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=7&ved=0ahUKEwjFyqKk7-TMAhVGSBQKHQkhC3YQFghIMAY&url=https%3A%2F%2Ftel.archivesouvertes.fr%2Ftel-01194787%2Fdocument&usg=AFQjCNGuHUB6ueI0zfMICEqHWkn0rZ_gQ&sig2=XjoPqkLv5RNJpU3rg6-hVw&cad=rja

http://www.memoireonline.com/07/12/6023/m_Rehabilitation-des-ouvrages-en-betonarme6.html

<http://www.memoireonline.com/07/12/6023/Rehabilitation-des-ouvrages-en-betonarme.html>
http://www.memoireonline.com/07/12/6023/m_Rehabilitation-des-ouvrages-en-betonarme10.Html

ESSAIS NON DESTRUCTIFS DU BETON

https://www.google.dz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwiDhtT7-eTMAhWLQBQKHV4TDxsQFggbMAA&url=http%3A%2F%2Fthesis.univbiskra.dz%2F1328%2F5%2FpartieI%2520chapitre%252003.pdf&usg=AFQjCNEvH69yRTTY3OKcjk5_o3SszRpFg&sig2=8S-Fe3UJjQxQzbA1pmSEsw&cad=rja

ANNEXES

ANNEXE A

Fiche technique « ciment matine »

APPLICATIONS RECOMMANDÉES

- Construction d'ouvrage d'art (ponts, viaducs tunnels...)
- Préfabrication lourdes
- Béton à haute performance
- Applications techniques



FORMULATION CONSEILLÉE

	Ciment 	Sable (sec) 	Gravillons (sec) 	Eau (litres) 
Dosage pour béton	+ X 1 	+  X7	+  X5 +  X4	+ 25 L

CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

• Analyses chimiques

	Norme
Perte au feu (%) (NA5042)	10.0±2
Teneur en sulfates (SO3) (%)	2.5±0.5
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%)	1.7±0.5
Teneur en Chlorures(NA5042) (%)	0.02-0.05

• Temps de prise à 20° (NA 230)

	Norme
Début de prise (min)	150±30
Fin de prise (min)	230±50

• Composition minéralogique du Clinker (Bogue)

	Norme
C3S (%)	60±3
C3A (%)	7.5±1

• Résistance à la compression

	Norme
2 jours (MPa)	≥ 10.0
28 jours (MPa)	≥ 42.5

• Propriétés physiques

	Norme
Consistance Normale (%)	26.5±2.0
Finesse suivant la méthode de Blaine (cm ² /g) (NA231)	3 700 - 5 200
Retrait à 28 days (µm/m)	< 1 000
Expansion (mm)	≤ 3.0

CONSIGNES DE SÉCURITÉ

1- **PROTÉGEZ VOTRE PEAU** : Portez les équipements adaptés dans vos chantiers: casques, lunettes, gants, genouillères, chaussures et vêtements de sécurité.

2- **MANUTENTION** : levez le sac en pliant les genoux et en gardant le dos droit.



LAFARGE ALGÉRIE

Centre commercial Bab Ezzouar, Tour n°02,
Etages 05 & 06, Bab Ezzouar Alger, Algérie
Tél: + 213 (0) 21 98 54 54
Fax: + 213 (0) 23 92 42 94
www.lafargealgerie.com



ANNEXE B

Fiche technique inhibiteur de corrosion

Construction

Product Data Sheet

Edition: 11/12/2014

Identification no:

02 03 03 04 001 0 000001

Sika® FerroGard®-903+

Sika® FerroGard®-903+

Corrosion inhibiting impregnation

Product Description

Sika® FerroGard®-903+ is a surface applied mixed corrosion inhibitor, designed for use as an impregnation of steel reinforced concrete and is an improved formulation of the original Sika® FerroGard®-903.

Sika® FerroGard®-903+ is based on organic compounds. Sika® FerroGard®-903+ penetrates the concrete and forms a protective monomolecular layer on the surface of the reinforcing steel.

Protection with Sika® FerroGard®-903+ both delays the start of corrosion and reduces the corrosion rate. Corrosion protection with Sika® FerroGard®-903+ increases the service and maintenance life cycles by up to 15 years when used as a part of a complete Sika Concrete Repair and Protection System.

Uses

- For the corrosion protection of steel reinforced concrete structures above and below the ground
- As a corrosion control treatment for undamaged reinforced concrete where reinforcing steel is corroding, or is at risk from corrosion due to the effects of carbonated or chloride contaminated concrete
- Sika® FerroGard®-903+ is especially suitable for extending the service life of aesthetically valuable fair-faced concrete surfaces such as historic structures

Characteristics / Advantages

- Complies to principle 11 of EN 1504-9 method 11.3 (applying inhibitor to the concrete)
- Does not change the appearance of the concrete structure
- Does not alter the water vapour diffusion properties of concrete
- Long term protection and durability
- Can be applied to the surface of existing repairs and to surrounding areas to prevent the development of incipient anodes
- Protects both, cathodic (principle 9) and anodic (principle 11) zones of reinforcing steel
- Can be applied where other repair/prevention options are not viable
- Economic extension of the service life of reinforced concrete structures
- Easy, economical application, renewable
- Can be used as part of a simple yet effective concrete repair and protection system
- Penetration depth can be tested on site using the Sika "Qualitative Analysis Test" - refer to your local Technical Service Department for details



Tests

Approval / Standards	<p>BRE, The use of surface applied FerroGard 903+ corrosion inhibitor to delay the onset of chloride induced corrosion in hardened concrete, BRE Client Report No. 224-346, 2005</p> <p>Mott MacDonald, Evaluation of Sika FerroGard 901 and 903+ Corrosion Inhibitors, Ref. 26063001 Rev A, April 1996.</p> <p>SAMARIS (Sustainable and Advanced Materials for Road Infrastructure) - Final Report, Deliverables D17a, D17b, D21 & D25a, Copenhagen, 2006</p> <p>Mulheron, M., Nwaubani, S.O. , Corrosion Inhibitors for High Performance Reinforced Concrete Structures, University of Surrey, 1999</p> <p>C-Probe Systems Ltd., Performance of Corrosion Inhibitors In Practice, 2000</p>
-----------------------------	--

Product Data

Form

Appearance / Colour Transparent liquid

Packaging 25 kg pall
220 kg drum

Storage

Storage Conditions / Shelf life 24 months from date of production if stored properly in undamaged and unopened, original sealed packaging. Store in a cool environment. In case of - frost ($< -5^{\circ}\text{C}$), - reversible crystallisation may occur. If this happens, let the product warm up at room temperature ($+15$ to $+25^{\circ}\text{C}$), then stir well to re-dissolve the crystals.

Technical Data

Chemical Base Aqueous solution of amino alcohols & salts of amino alcohols.

Density ~ 1.04 (at $+20^{\circ}\text{C}$)

pH Value ~ 10

Viscosity ~ 24 mPa.s

Penetration Rate Site surveys and experimental tests have shown that Sika[®] FerroGard[®]-903+ can penetrate through concrete at a rate of a few millimetres per day and to a depth of approximately 25 to 40 mm in 1 month. This penetration rate can be faster or slower dependent on the porosity of the concrete. Sika[®] FerroGard[®]-903+ penetrates through both liquid and vapour phase diffusion mechanisms.

Note:

If after application of Sika[®] FerroGard[®]-903+, the concrete surface is coated with protective coatings (cement based, acrylic or impregnation) or hydrophobic impregnation, the rate of diffusion of the inhibitor is reduced but not stopped as the mechanism of diffusion continues in the vapour phase.

As concrete quality and permeability differ, it is recommended to perform some preliminary depth profile testing by the Sika "Qualitative Analysis" to assess the specific penetration rate.

System Information

System Structure	Sika [®] FerroGard [®] -903+ is part of the Sika [®] Concrete Repair & Protection Systems:	
	Repair system:	Sika [®] MonoTop [®]
	Reinforcement corrosion control:	Sika [®] FerroGard [®] -903+
	Concrete protection:	Sikagard [®] Coatings and or Sikagard [®] Hydrophobic Impregnations

Application Details	
Consumption / Dosage	<p>Generally ~0.500 kg/m² (~480ml/m²).</p> <p>For very dense concrete with low permeability, the rate of application of Sika® FerroGard®-903+ can be reduced but must not be lower than 0.300 kg/m² (290ml/m²).</p> <p>To assess project requirements, consumption and depth of penetration shall be checked on site using the Sika "Qualitative Analysis" Test carried out by Sika Ltd.</p>
Substrate Quality	<p>The concrete shall be free from dust, loose material, surface contamination, existing renders, laitance, coatings, oil and other materials which reduce or prevent penetration.</p> <p>If the substrate is to be overcoated, the surface profile shall be sufficient to provide the required adhesion.</p>
Substrate Preparation	<p>Delaminated, weak, damaged and deteriorated concrete shall be repaired using Sika® MonoTop® mortars.</p> <p>For fair-faced concrete or concrete to be further overcoated by coatings or hydrophobic impregnation, water blast the concrete surface with pressure (up to 18 MPa – 180 bars).</p> <p>For concrete surface to be further overcoated by cementitious material, roughen the surface using suitable abrasive blast cleaning techniques or high pressure water-blasting (up to 50 MPa – 500 bars).</p> <p>For optimum penetration the substrate shall be allowed to dry out prior to the application of Sika® FerroGard®-903+.</p>
Application Conditions / Limitations	
Substrate Temperature	+5°C min. / +40°C max.
Air Temperature	+5°C min. / +40°C max.
Application Instructions	
Mixing	Sika® FerroGard®-903+ is supplied ready for use and must not be diluted. Do not shake the material prior to use.
Application Method / Tools	<p>Sika® FerroGard®-903+ shall be applied to saturation by brush, roller, low pressure or airless spray equipment.</p> <p>After the application of the last coat, as soon as the surface become mat, do a low pressure water cleaning (water hose).</p> <p>The day after application, the treated surfaces shall be cleaned by pressure washing (~ 10 MPa – 100 bars).</p>
Cleaning of Tools	Use water to clean application equipment

**Waiting Time /
Overcoatability**

Number of coats:

This is dependent on the porosity and moisture content of the substrate and the weather conditions.

Vertical surfaces:

Normally, 2 to 3 coats are necessary to achieve the required consumption. In case of dense concrete, additional coats may be required.

Horizontal Surfaces:

Saturate surface by 1-2 coats, take care to avoid ponding.

Waiting time between coats:

This is dependent on the porosity of the concrete and the weather conditions, normally 1-6 hours. Allow the surface to dry out between coats to a matt damp appearance.

OVERCOATING:

If the application is carried out as described above, no further treatment is required before over-coating with Sikagard® hydrophobic impregnations, Sikagard® breathable coatings or Sikafloor® products (Refer to appropriate Product Data Sheet for application details)

If non Sika coatings are to be applied, please contact the manufacturers technical department for confirmation of compatibility with Sika® FerroGard®-903+ or undertake compatibility and adhesion site trials.

When Sika® FerroGard®-903+ is used within a patch repair or before a cementitious overlay, Sika repair or overlay system can then be used. Standard preparation (pre-wetting) shall then be applied.

When using a smoothing coat/pore filler over surface treated with Sika® FerroGard®-903+, products such as Sikagard®-720 EpoCem® or Sika® MonoTop®-620, etc can be used. Cementitious levelling mortars shall only be used if there is a well prepared open textured surface that is completely cleaned of residue to achieve the required adhesion value.

If other Sika products are to be used, site trials are recommended to confirm preparation and suitability

If non Sika products are to be used, please contact the manufacturer technical department for confirmation of compatibility with Sika® FerroGard®-903+ or undertake compatibility and adhesion site trials.

**Notes on Application /
Limitations**

Do not apply when rain or frost is expected.

The following construction materials have to be protected from splashes of Sika® FerroGard®-903+ during application:

- Aluminium, copper, galvanised steel, marble and other similar natural stone

Visible concrete defects (spalling, cracks etc) must be repaired using conventional repair methods (removal of delaminating or loose concrete, treatment of reinforcement, reprofiling etc.)

Alternatively to the method described above, Sika® FerroGard®-903+ can be applied after repair works (but not overlay) has been carried out (after hardening of the repair material) – freshly repaired area might not need to be treated with the inhibitor. If this is nevertheless done, lower diffusion is then expected at the zones that were repaired.

Typical maximum chloride content at rebar level is 1% by weight of cement of free chloride ions (corresponding to 1.7% of sodium chloride). Above this limit, according to site conditions and level of corrosion activities, increased consumption of Sika® FerroGard®-903+ can be considered. Trials and corrosion rate monitoring to confirm consumption and effectiveness shall be carried out.

To provide efficient protection of free chloride ion levels between >0.5 < 1.0% concentration, Sika® FerroGard®-903+ at rebar level shall be a minimum 100ppm when measured by chromatography ionic method – detailed method available upon request.

Do not apply in tidal zones or to substrates saturated with water.

Avoid application in direct sun and/or strong wind and/or rain.

Do not apply to concrete in direct contact with drinking water.

Depending on substrate conditions, the application of Sika® FerroGard®-903+ may lead to a slight darkening of the surface. Proceed with preliminary testing.

All surface treatments are to be carried out using cold potable water.

Curing Details

Curing Treatment	Sika® FerroGard®-903+ does not require any special curing but must be protected from rain for at least 4 hours
Notes	All technical data stated in this Product Data Sheet are based on laboratory tests. Actual measured data may vary due to circumstances beyond our control.
Local Restrictions	Please note that as a result of specific local regulations the performance of this product may vary from country to country. Please consult the local Product Data Sheet for the exact description of the application fields.
Health and Safety Information	For information and advice on the safe handling, storage and disposal of chemical products, users shall refer to the most recent Material Safety Data Sheet containing physical, ecological, toxicological and other safety-related data.
Legal Notes	The information, and, in particular, the recommendations relating to the application and end-use of Sika products, are given in good faith based on Sika's current knowledge and experience of the products when properly stored, handled and applied under normal conditions in accordance with Sika's recommendations. In practice, the differences in materials, substrates and actual site conditions are such that no warranty in respect of merchantability or of fitness for a particular purpose, nor any liability arising out of any legal relationship whatsoever, can be inferred either from this information, or from any written recommendations, or from any other advice offered. The user of the product must test the product's suitability for the intended application and purpose. Sika reserves the right to change the properties of its products. The proprietary rights of third parties must be observed. All orders are accepted subject to our current terms of sale and delivery. Users must always refer to the most recent issue of the local Product Data Sheet for the product concerned, copies of which will be supplied on request.



SIKA LIMITED

Head Office - Watchmead - Welwyn Garden City -
Hertfordshire - AL7 1BQ - United Kingdom
Phone: +44 1 707 394444 - Fax: +44 1 707 329129 - www.sika.co.uk

Résumé

La corrosion des armatures est l'une des principales causes de dégradation du béton. Le mécanisme le plus courant contribuant au développement de la corrosion des armatures dans le milieu marins est la pénétration des agents chlorures, Le principal risque identifié en termes de durabilité des bétons armés en milieu marin est lié à la pénétration de ces agents sévèrement agressifs. Comme les dommages résultants de ce phénomène sont très importants financièrement, il paraît essentiel d'améliorer la résistance du béton à la pénétration de ces agents agressifs.

A ce titre, l'objectif de ce travail est de déterminer expérimentalement l'influence de la corrosion des armatures engendrée par la pénétration des chlorures sur la résistance mécanique des bétons en utilisant les ondes ultrasoniques. Des éprouvettes en béton armé sont alors préparées, elles sont mises dans trois différents milieux agressifs dont l'eau de mer après une cure de 28 jours. Par la suite, des essais à l'ultrason sont menés sur ces éprouvettes à des dates différentes. Ces essais à l'ultrason nous permettent de déterminer la résistance mécanique du béton de ces éprouvettes, enfin nous avons pu déterminer cette résistance mécanique par des courbes vitesses, temps par rapport aux résultats trouvés expérimentalement.

Mots clés : Béton armé, corrosion, chlorures, ondes ultrasoniques, armatures.

Abstract

Corrosion of reinforcements is one of the main causes of degradation of concrete. The most common mechanism contributing to the development of corrosion of reinforcements in the marine environment is the penetration of chloride agents. The main risk identified in terms of the durability of marine concretes is related to the penetration of these severely aggressive agents. As the damage resulting from this phenomenon is very important financially, it seems essential to improve the resistance of the concrete to the penetration of these aggressive agents.

The aim of this work is to determine experimentally the influence of the corrosion of the reinforcement caused by the penetration of chlorides on the mechanical strength of concrete using ultrasonic waves. Reinforced concrete specimens are then prepared and placed in three different aggressive media, including sea water after a 28-day cure. Subsequently, ultrasonic tests are carried out on these test specimens at different dates. These ultrasonic tests allow us to determine the mechanical strength of the concrete of these test pieces. Finally, we have been able to determine this mechanical strength by means of time curves, compared with the results found experimentally.

Keywords: reinforced concrete, corrosion, chloride, ultrasonic waves, reinforcements.

الملخص

تآكل التسليح هو واحد من الاسباب الرئيسية لتدهور الخرسانة المسلحة ، الآلية الاكثر شيوعا التي تساهم في تطوير صدأ حديد التسليح في البيئة البحرية هي عوامل انتشار الكلوريد ، ويرتبط الخطر الرئيسي التي تم تحديدها من حيث الاستدامة بما ان الاضرار الناجمة عن هذه الظاهرة مهمة جدا من .من الخرسانة المسلحة الى تغلغل هذه العوامل ذات عدوانية شديدة لهذا فان الهدف من هذا العمل هو تحديد .الناحية المالية يبدو من الضروري الرفع من مقاومة الخرسانة ضد هذه العوامل تجريبيا تاثير التآكل الناتج عن تغلغل الكلوريدات على مقاومة الخرسانة باستخدام موجات فوق صوتية ، بالتالي تم اعداد عينات من الخرسانة وتم وضعها في ثلاث اوساط مختلفة بعد حفظها لمدة 28 يوم ، و تم اجراء اختبارات في الموجات .الفوق صوتية على هذه العينات في تواريخ مختلفة ، وتسمح لنا هذه الاختبارات بتحديد مقاومة الخرسانة على هذه العينات كلمات البحث : .واخيرا قمنا بمقارنة المقاومة الميكانيكية بواسطة منحنيات السرعة بدلالة الزمن مع النتائج التجريبية خرسانة مسلحة ، التآكل ، كلوريدات ، فوق صوتية