



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediène

Faculté de Génie civil

MEMOIRE DE MAGISTER

Pour l'obtention du grade de Magister en génie civil

Spécialité Géotechnique

Présenté par M^{lle} Azhar BADAoui

THEME:

**SUR LA
CORROSION DES ACIERS DANS LE BETON ARME**

Soutenu le 20.05.2003 devant le jury suivant :

M M. CHEMROUK	Professeur à l'U.S.T.H.B.	Président.
M ^m c F. KHARCHI	Maître de conférence à l'U.S.T.H.B	Directrice de thèse.
M A. BENYAHIA	Maître de conférence à l'U.S.T.H.B.	Examineur.
M S. KENAI	Professeur à l'université de BLIDA.	Examineur.
M A. BRAHMA	Maître de conférence à l'université de BLIDA	Examineur.
M R. DRAI	Chercheur- CSC/ Chéraga	Invité.

Remerciements

Je voudrais en premier lieu remercier le **BON DIEU** Clément et Miséricordieux que sans lui ce travail ne serait jamais réalisé.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à ma directrice de thèse Mme F KHARCHI qui a bien voulu diriger les travaux de cette thèse de bout en bout. Je la remercie pour les précieux conseils scientifiques qu'elle m'a prodigués sans aucune hésitation, pour sa patience et sa compréhension, qu'il me soit permis de lui exprimer ma reconnaissance.

Je remercie vivement le Professeur M.CHEMROUK qui m'a fait le grand honneur d'avoir accepté de présider le jury de cette thèse.

Mes sincères remerciements vont aussi à Mr A.BENYAHIA, Maître de conférence à l'U.S.T.H.B, à Mr S.KENAI, Professeur à l'université de BLIDA et Mr A. BRAHMA, Maître de conférence à l'université de BLIDA, qui ont bien voulu faire partie du jury et enrichir ce travail avec leur contribution.

Qu'il me soit également permis de présenter mes remerciements les plus sincères à Mr R. DRAI pour l'accueil qu'il m'a réservé au laboratoire de traitement de signale (CSC), pour sa gentillesse, ses conseils scientifiques. Il me fait un grand honneur en acceptant d'examiner ce travail.

Je tiens à exprimer une reconnaissance particulière à Mr A.OULEBSIR , Chercheur au CSC qui a participé à la réalisations des essais. Je le remercie pour le temps qu'il m'a consacré, et les précieuses remarques qu'il m'a données, pour sa grande souplesse et sa patience. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude.

En fin, que toute personne qui a contribué de près ou de loin à la mise au point de ce travail trouve ici ma profonde gratitude.

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE.....	1
-----------------------------------	----------

Première partie: Synthèse Bibliographique

Chpitre1 : Notes fondamentales sur la corrosion.

1-1- Introduction.....	4
1-2- Les matériaux métalliques.....	5
1-3- Définition de la corrosion.....	6
1-4- Les mécanismes de la corrosion.....	6
1-4-1- Le processus de la corrosion à température ambiante.....	6
1-4-2- Formation de la rouille sous une goutte d'eau stagnant depuis quelques temps sur une surface métallique.	8
1-4 -3 - Mécanisme de la corrosion électrolytique dans l'eau de mer.....	9
1-5- Formes de corrosion.....	10
1-5-1- Corrosion uniforme.....	11
1-5-2 - Corrosion localisée.....	11
1-5-3- Corrosion sous contrainte.....	12
1-6- Etude de la corrosion.....	12
1-6-1- La thermodynamique de la corrosion	12
1-6-2-Diagramme de Pourbaix.....	13
1-6-3- Cinétique de la corrosion.....	14
1-6-4- Caractérisation des produits de corrosion.....	16
1-6-5- Les principaux facteurs de la corrosion.....	17
1-7- Méthodes de protection contre la corrosion.....	18
1-7-1 -Les écrans.....	18
1-7-2-Les inhibiteurs.....	18
1-7-3- Les recouvrements obtenues naturellement et le traitements de surfaces.....	19
1-7-4- La protection anodique.....	19
1-7-5- La protection cathodique.....	19

Chapitre2: Corrosion des aciers dans le béton.

2-1- Introduction.....	20
2-2- Les altérations de l'enrobage.....	22
2-2-1- Les principaux types d'altérations.....	22
2-2-1-a- Facteurs d'altérations externes.....	22
2-3 -Types de corrosion de l'armatures dans le béton.....	22
2-3 -1- Conditions particulière concernant la corrosion dans le béton.....	31
2-3 -2- Corrosion par formation d'une pile électrochimique.....	32
2-3 -3- Corrosion sous tension.....	32
2-4- Facteurs influents sur la corrosion des armatures	33
2-4-1- Influence de l'enrobage de béton sur la corrosion des armatures	33
2-4-2- Rôle de l'humidité.....	36
2-4-3- Influence de la teneur en chlorure.....	36
2-4-4- Effet de l'oxygène	38
2-4-5- Influence de la carbonatation.....	38
2-4-6- Influence d'autres agents agressifs.....	39
2-4-7- Effet de la corrosion des armatures sur leurs adhérences.....	39

Chapitre3: Localisation et protection des aciers dans le béton

3 -1- Introduction.....	41
3 -2- Les méthodes utilisées.....	41
3 -2-1- La radioscopie ou la radiographie.....	41
3 -2-2- L'écho d'impact.....	41
3 -2-3- Ondes électromagnétiques	41
3 -2-4- Rayon infra-rouge.....	41
3-2-5- Méthode magnétique.....	42
3-2-6- Mesure de potentiel d'électrode.....	42
3-3- Résistivité électrique du béton.....	43
3-4-La protection apportée par le béton....	44
3-5- La protection par des revêtements sur l'acier.....	44
3-5-1- Utilisation d'armatures en acier inoxydable	44
3-5-2 - Utilisation d'armatures en acier galvanisé.....	44
3-5-3- Utilisation d'armatures recouvertes d'époxy	45

3-5-4- Utilisation d'armatures en fibres de verre.....	45
3-6 - La protection par traitements superficiel du béton.....	46
3-6-1- Les revêtements.....	46
3-6 -2- Imprégnation par de produits hydrophobes.....	46
3-6-3- Les inhibiteurs	46
3-7- La protection cathodique des aciers.....	46
3-8- L'extraction des chlorures du béton.....	47
3-9- Réalcanisation du béton.....	47
3-10- Réparation des bétons éclatés.....	48

Deuxième partie: Etude Expérimentale.

Introduction.....	49
--------------------------	-----------

Chapitre 4: Procédés expérimentaux.

4-1-Matériaux utilisés.....	50
4-1-1- Ciments	50
4-1-2- Granulats.....	50
4-1-3- Acier.....	52
4-2- Les éprouvettes d'essais.....	52
4-2-1- Formulation d'une composition optimale du béton.....	52
4-2-2- Malaxage du béton.....	53
4-2-3- Types et dimensions des éprouvettes.....	53
4-2-4- Conservation des éprouvettes.....	56
4-3- Caractéristiques physiques et mécaniques du béton.....	56
4-3-1- Essais sur béton frais.....	56
4-3-2- Essais sur béton durci.....	56
4-4- Analyse de la corrosion.....	58

Chapitre 5: Résultats et interprétation

5-1- Résultats expérimentaux.....	63
5-2- Interprétation des résultats.....	73

1- Effet de la concentration en NaCl.....	73
2- Effet de la durée de conservation.....	74
3- Effet de l'ouverture des fissures.....	75
4- Effet de l'enrobage.....	75
Conclusion.....	78
CONCLUSION GENERALE	80

Liste des figures

Première partie: Synthèse Bibliographique

Fig1-1: Cohésion d'un solide et comportement des atomes en surface.....	5
Fig1-2: Mécanisme de la corrosion sous une goutte d'eau.....	8
Fig1-3: Mécanisme électrolytique dans l'eau de mer.....	10
Fig1-4: Formes de corrosion.....	10
Fig1-5: Représentation schématisée du cas des piqûres comme cas intermédiaire.....	12
Fig1-6: Diagramme de Pourbaix pour le système Fe/H ₂ O à 25 C ⁰ pour une concentration de F ⁺² = 10mol/l.....	14
Fig1-7: Droite de Tafel.....	15
Fig2-1: Modèle conceptuel de la corrosion des aciers dans le béton	21
Fig2-2: Description de processus de carbonatation.....	26
Fig2-3: Coloration de la zone non carbonatée par le phénolphthaleine.....	28
Fig2-4: Influence du rapport E/C sur la cinétique de la carbonatation.....	29
Fig2-5: Effet de la durée de cure et de conditions d'exposition sur la profondeur de la carbonatation d'un béton âgé de 16 ans.....	30
Fig2-6: Eclatement d'un enrobage à cause de gonflement de la rouille.....	40
Fig3-1: Principe de la mesure de potentiel d'électrode.....	42
Fig3-2: Dispositif permettant de mesurer le potentiel d'électrode des armatures dans le béton immergé	
Fig3-3: Principe de mesure de la résistivité électrique d'un enrobage	43

Deuxième partie: Etude expérimentale

Fig4-1: Courbe granulométrique des différentes classes des granulats.....	51
Fig4-2: Section en flexion simple sous armatures comprimées.....	53
Fig4-3: Eprouvettes (7x7x28) ferrillées et entaillées	54
Fig4-4: Moule (7x7x28) muni d'une entaille.....	55
Fig4-5 Courbe contrainte-déformation à 28 jours.....	57
Fig4-6: Mesure de l'absorption capillaire.....	58
Fig4-7: Chaîne de radioscopie.....	59
Fig4-8: Synoptique de la chaîne de radioscopie.....	60
Fig4-9: Mouvement de support.....	61
Fig4-10: Eprouvette en béton armé testée par le radioscope.....	61
Fig4-11: Barre d'acier entaillée.....	62
Fig5-1-a: Eprouvette E ₄₁ immergée pendant 7 mois dans la solution de 4N.....	63
Fig5-1-b: Eprouvette E ₂₁ immergée pendant 7 mois dans la solution de 4N.....	63
Fig5-1-c: Eprouvette E ₁₁ immergée pendant 7 mois dans la solution de 4N.....	64
Fig5-1-d: Eprouvette E ₄₁ immergée pendant 4 mois dans la solution de 4N.....	64
Fig5-1-e: Eprouvette E ₂₁ immergée pendant 4 mois dans la solution de 4N.....	64
Fig5-1-f: Eprouvette E ₁₁ immergée pendant 4 mois dans la solution de 4N.....	65
Fig5-1: Armatures corrodées à l'intérieur des éprouvettes de béton.....	65
Fig5-2: Taux de corrosion en fonction de la concentration en NaCl, l'ouverture de l'entaille	

et e la durée de conservation des éprouvettes dont l'enrobage est de 1 cm.....	66
Fig5-3: Taux de corrosion en fonction de la concentration en NaCl, l'ouverture de l'entaille et e la durée de conservation des éprouvettes dont l'enrobage est de 3 cm.....	67
Fig5-4: Taux de corrosion des armatures à l'intérieur des éprouvettes dont l'enrobage est de 1 cm, immergées pendant 7 mois dans NaCl... ..	68
Fig5-5: Taux de corrosion des armatures à l'intérieur des éprouvettes dont l'enrobage est de 1 cm, immergées pendant 4 mois dans NaCl... ..	69
Fig5-6: Taux de corrosion des armatures à l'intérieur des éprouvettes dont l'enrobage est de 3 cm, immergées pendant 7 mois dans NaCl... ..	70
Fig5-7: Taux de corrosion des armatures à l'intérieur des éprouvettes dont l'enrobage de 3cm immergées pendant 4 mois dans NaCl	71
Fig5-8: Couche de rouille sur le béton.....	76
Fig5-9: Diffractogramme de rayon X du béton au voisinage de l'armature corrodée pour le cas d'éprouvettes E ₄₁ immergées pendant 2 mois dans la solution de 4N.....	77

Liste des tableaux

Deuxième partie: Etude expérimentale

Tableau 4-1: Composition chimique du ciment.....	50
Tableau 4-2: Résultats d'analyse spectrométrique.....	52
Tableau 4-3: Résultats d'essais de traction pour les ϕ_6	52
Tableau 4-4: Classe de consistance Vébé.....	56
Tableau 5-1: Taux de corrosion des différentes éprouvettes immergées pendant 7 mois dans des solutions de différentes concentrations en NaCl.....	72
Tableau 5-2: Taux de corrosion des différentes éprouvettes immergées pendant 4 mois dans des solutions de différentes concentrations en NaCl.....	72

RÉSUMÉ

Dans cette thèse, nous nous intéressons aux modèles markoviens appliqués au traitement d'image. L'objectif est de segmenter une image bruitée. Notre approche est basée sur les champs de Markov et l'estimation bayésienne en particulier l'estimation de maximum à posteriori (MAP).

Grâce au théorème d'Hammersley-Clifford, l'équivalence entre champs markoviens et champs de Gibbs est établie, ceci nous permet de définir les informations à priori par des potentiels locaux ; d'où le problème d'étiquetage (segmentation) se traduit par la minimisation d'une fonction d'énergie en fonction de coût comprenant des contraintes. Tous les modèles markoviens nécessitent la minimisation d'une fonction d'énergie, dans la plupart des cas non convexe. Cette minimisation est effectuée par des méthodes d'optimisation stochastiques ou déterministes. Nous avons utilisé le Recuit Simulé muni de la dynamique de Métropolis.

Nous avons proposé une méthode de changement de palier de température et d'arrêt du processus. Une autre technique de contrôle a été proposée pour le bon fonctionnement de notre algorithme de Recuit Simulé muni de la dynamique de Métropolis. Un modèle de segmentation est synthétisé suivant les contraintes imposées a priori. En premier lieu, nous avons fait des tests pour obtenir les valeurs des paramètres de contrôle de l'algorithme d'optimisation proposé permettant d'obtenir de bons résultats. Nous avons conclu que plus les valeurs des seuils des compteurs sont élevées plus le processus converge vers le minimum global. Après avoir choisi les valeurs supposées optimales des paramètres du recuit simulé, nous avons fait des tests pour estimer les valeurs des paramètres du modèle adopté et ceci dans le but de délimiter les plages de variations des valeurs de ces paramètres et d'analyser l'influence de chacun des paramètres sur les résultats. Avec les valeurs supposées optimales, nous avons fait des tests à différentes variances de bruit. Nous avons obtenu des résultats satisfaisants avec des variances assez importantes.

Après avoir fixé ces paramètres nous avons traité une image aérienne noyée dans un bruit inconnu et nous avons obtenu des résultats variables suivant le pas d'échantillonnage, utilisé pour la détermination des classes. Nous avons remarqué que plus le pas d'échantillonnage est faible plus les informations sont préservées.

Synopsis

The durability of reinforced concrete constructions primarily depends on their reinforcements against the corrosion, which is the destruction of steel by electrochemical reaction with its surrounding medium.

From our research, we studied the corrosion of reinforced concrete specimens by radiography. We analyzed notched samples and immersed in solutions containing of NaCl. We have studied the case of various concentrations in NaCl and several openings of cracks. The technique of radiography enabled us to visualize the state of corrosion on images and also to quantify the rate of corrosion.

We found that corrosion is maximum along the crack and at 2 cm of the opening of the notch. We also found that the rate of corrosion is about 9% in the case of specimens whose opening of the notch is 4 mm and decreases up to 6% for the specimens whose opening of the notch is 2 mm, and to 4% for the specimens whose opening of the notch is 1mm. We spent only 7 months in our observation.

This study enabled us to determine the factors influencing the rate of corrosion and to calculate the loss of mass in the reinforcements being inside the concrete exposed to chloride.

Key words: Corrosion; Reinforcements; Concrete; Rust; Chlorides; Aggressive agent; Radiography; NaCl; Cracks; Coating.

INTRODUCTION

Le matériau béton armé est l'élément clé dans la construction, son emploi large et intensif en Génie Civil soulève le problème de sa qualité et de sa durabilité, qui dépend essentiellement de celle des armatures.

La corrosion des armatures est actuellement l'une des causes principales de l'endommagement ou de la ruine des ouvrages.

On constate cependant que, statistiquement, un certain pourcentage des ouvrages construits en béton armé souffre de problèmes de corrosion des armatures. Ces problèmes, s'ils sont détectés trop tard, raccourcissent la durée de vie de l'ouvrage.

Les armatures se corrodent lorsqu'elles sont exposées à l'air chargé en polluants par exemple; les chlorures existants en milieu marin et les sulfures en milieu industriel. Plus on s'éloigne de la mer, plus l'action corrosive diminue, car la concentration des sels marins décroît en se réduisant probablement à la présence du NaCl, tant pour l'importante différence de concentration qu'il y a dans l'eau de mer entre Na^+ et Mg^{+2} , si l'eau de mer a une valeur de chlorinité de 19‰, on a; $\text{Na}^+ = 10.55\text{g/l}$, $\text{Mg}^{+2} = 1.27\text{g/l}$ et $\text{Cl}^- = 18.98\text{g/l}$.

Le vent et le soleil ont une action contradictoire sur la corrosion des armatures; le vent a une action activante quand il transforme l'eau de mer en brouillard salin, et il a au contraire une action retardante quand il dilue les polluants dans l'atmosphère, en réduisant la concentration ou bien quand il favorise l'évaporation de l'humidité de la surface exposée. Le soleil retarde le processus de corrosion puisqu'il provoque l'évaporation de l'humidité, mais il l'active avec l'augmentation de la température qui favorise par l'effet de la dilatation thermique le détachement des produits de corrosion.

Les connaissances sur les conditions et l'évolution de la corrosion des aciers à l'intérieur de la matrice cimentaire, en bon état ou dégradée et fissurée, ont beaucoup progressé. En effet, il existe des méthodes pour le diagnostic, sur l'état de conservation des matériaux et des techniques pour protéger ou réparer les structures dégradées qui sont prises en compte et décrites dans des textes sur les règles de l'art.

Notre étude se vaut une contribution aux données larges de la recherche sur la corrosion des armatures dans le béton armé. Nous étudions la corrosion des aciers dans le béton en présence d'ions agressifs qui sont les chlorures. Notre étude est purement expérimentale, nous étudions le phénomène en immergeant des éprouvettes dans des solutions contenant du NaCl. L'ion chlore pénètre à travers des fissures provoquent la corrosion de l'armature. Par des mesures de pertes de masse, nous quantifions la corrosion et étudions son évolution en fonction du temps, de l'enrobage, de la concentration en NaCl et de l'ouverture des fissures.

Nous avons utilisé le radioscope pour la quantification de la corrosion, l'intérêt de cette technique est qu'elle met en évidence la corrosion de façon directe sans destruction de l'échantillon.

Dans notre programme expérimental, nous avons étudié la corrosion sur des éprouvettes entaillées simulant ainsi une fissuration de flexion. Nous avons immergé ces éprouvettes dans des solutions en NaCl de 1N, 2N et 4N jusqu'à 7 mois. Nous avons suivi l'évolution de la corrosion en fonction des ouvertures, des concentrations et de la durée de conservation, nous avons fait varier l'enrobage de 1cm à 3 cm.

A partir d'images très claires fournis par le radioscope, nous avons calculé le taux de corrosion pour les différentes éprouvettes.

Le programme d'essai a été réalisé au laboratoire de béton de la faculté de Génie Civil de l'USTHB et au laboratoire du traitement du signal de centre de recherche de contrôle et de soudage (CSC).

Notre présente étude est composée de deux parties. Nous avons consacré la première partie à une recherche bibliographique que nous avons scindé en quatre chapitres:

- Dans le premier chapitre, nous présentons des notions fondamentales sur le phénomène de la corrosion.
- Dans le deuxième chapitre, nous nous intéressons au phénomène de corrosion des aciers dans le béton.
- Dans le troisième chapitre, nous présentons les méthodes de localisation des armatures corrodées, et les différentes méthodes de protection contre la corrosion.

Nous avons consacré la deuxième partie à l'étude expérimentale. Celle – ci est scindée en deux chapitres :

- Dans le quatrième chapitre, nous présentons les méthodes d'essais et d'expérimentations effectuées sur le matériau béton armé.
- Dans le cinquième chapitre, nous présentons les interprétations et les conclusions.

En définitif, c'est au stade de la conception des ouvrages que doivent être prises les dispositions constructives pour éviter la corrosion des aciers. Il faut contrôler la compacité et l'épaisseur du béton entourant les armatures, et faire des visites de surveillance pour déceler la corrosion avant que l'ouvrage soit inutilisable.

On peut dire que le béton est un bon protecteur de longue durée, s'il est de bonne qualité, et n'est pas fissuré, il reste la protection la plus simple.

CHAPITRE 1

Notes fondamentales sur la corrosion.

1-1 Introduction:

A part les métaux nobles tel que l'or ou le platine que l'on peut trouver à l'état natif, et qui ne se corrodent pratiquement pas, les métaux sont dans la nature sous forme de minerais (oxyde, sulfure, carbonate...), la transformation d'un minerai en métal exige un apport extérieur d'énergie et l'on comprend implicitement que cette énergie sera libérée à nouveau dans le cas d'une transformation inverse du métal en son oxyde, son sulfure ou en son carbonate [1,2].

Les métaux ont donc tendance à retourner à l'état premier, état d'équilibre avec les milieux ambiants où ils se trouvent. Un métal se corrode donc parce que la transformation chimique qui accompagne la corrosion dégage de l'énergie, c'est une réaction qui obéit à des lois thermodynamiques connus, et dont la vitesse obéit aux lois de la cinétique chimique [1,3,4].

Les éléments métalliques qui composent les ouvrages de génie civil sont au contact soit du béton ou d'un coulis d'injection à base de ciment, soit de l'atmosphère dont ils sont souvent séparés par un écran tel qu'une peinture, de l'eau, des sols, ils peuvent se dégrader sous l'action de ces milieux environnants suivant des processus divers, tel que l'enrouillement des aciers, lorsque certaines conditions sont réunies

L'importance de cette dégradation des ouvrages est assez évidente puis quelle influe directement sur leur durabilité.

1-2 Les matériaux métalliques :

Un solide métallique est constitué d'atomes qui, en fait, perdent chacun quelques électrons (un à trois, en général) et sont donc dits ionisés. Ces électrons sont libres au cœur du solide et forment un nuage qui cimente l'ensemble. Comme pour tous les solides, les atomes (ions) qui sont en surface ne sont pas liés de façon stable à leur voisin. Ils peuvent [5,6]:

- Soit attirer les atomes contenus dans le liquide ou le gaz environnant et les retenir par adsorption ;
- Soit quitter le solide et aller dans le gaz (sublimation) ou le liquide (dissolution) qui entoure le solide.

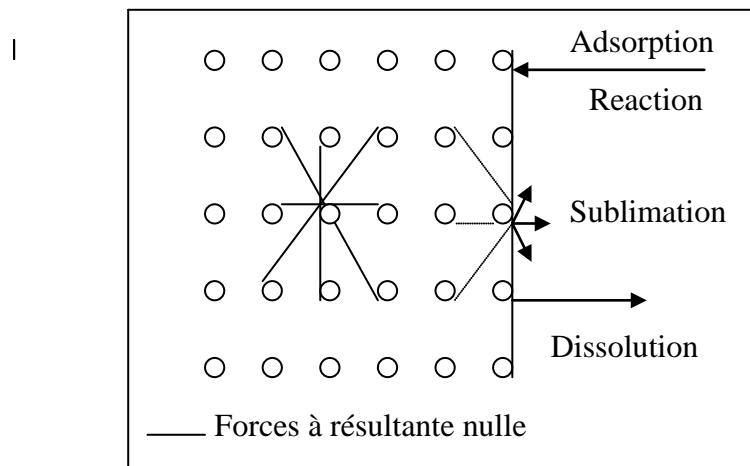


Fig1-1-1: Cohésion d'un solide et comportement des atomes en surface [5].

Ainsi, dans une ambiance gazeuse sous très faible pression (vide), un métal se vaporise par sublimation. Les atomes quittent le solide en emportant tous les électrons qui lui sont associés. Les atomes peuvent aussi quitter le solide en laissant les électrons libres (ils sont donc ionisés), à condition que ces électrons libres soient évacués par un autre processus. Ceci concerne la corrosion à température ambiante, dans un milieu aqueux.

Un acier comporte des grains jointifs de diverses natures. Les propriétés mécaniques d'un acier non allié dépendent de la teneur en carbone, c'est-à-dire en particules dures (martensite, bainite). Ainsi utilisés comme armatures de précontrainte, ont une teneur en carbone dite élevée (de l'ordre de 0.7 à 0.8% en poids) [1,4,7].

Les aciers dont on utilise surtout l'aptitude à la déformation (armatures de béton armé devant être cintrées, etc. .) Ont une teneur en carbone faible (de l'ordre de 0.1 à 0.2%) [5].

Le point commun entre ces aciers utilisés dans les bétons est surtout leur type de corrosion qui est celle de tous les matériaux métalliques. Leur principale différence vient de leur résistance mécanique, celle-ci est liée à leur mode d'élaboration et de leurs microstructures.

Un acier à haute résistance mécanique est différent d'un acier de béton armé. Ainsi, en ce qui concerne la tenue à la corrosion de ces matériaux, le processus est lié à la seule cohésion métallique qui s'observe sur tous les aciers. Par contre, les causes de corrosion qui mettent en jeu des sollicitations mécaniques induisent des réponses différentes de la part des aciers. Plus précisément, certains aciers à haute résistance peuvent se fissurer par corrosion sous contrainte, lorsqu'ils sont tendus.

1-3 Définition de la corrosion :

La corrosion est définie comme étant la destruction d'un matériau par réaction chimique ou électrochimique avec son milieu environnant.

Cela signifie que la corrosion suppose un système matériaux-milieu environnant susceptible d'entrer en réaction [8,9,10,11].

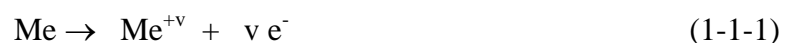
1-4 Les mécanismes de la corrosion :

1-4-1- Le processus de la corrosion à la température ambiante :

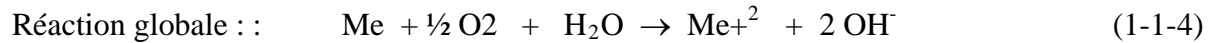
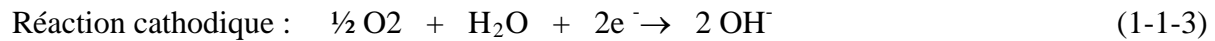
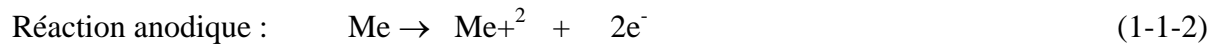
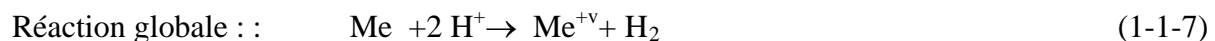
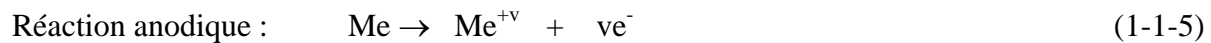
La corrosion des matériaux métalliques à la température ambiante est exclusivement due à l'eau, même si d'autres facteurs sont, par exemple, les sels, oxygène et les autres gaz, dissous dans l'eau.

Un matériau métallique solide plongé dans un liquide aqueux qui peut être neutre, acide ou basique, tend à se dissoudre. La raison en est que, comme indiqué plus haut, la résultante des forces d'interaction d'un atome (au cœur du solide) avec ses voisins est nulle à cœur, alors que pour un atome en surface, cette résultante n'est pas nulle et cet atome tend soit à quitter le solide (dissolution), soit à attirer les atomes (ions, molécules, etc.) du liquide.

La réaction de dissolution s'écrit, pour un constituant métallique Me du solide :



On peut formuler pour les deux types les plus fréquents de la corrosion, les réactions suivantes :

a / Corrosion par dépolariation de l'oxygène :**b / Corrosion par dépolariation de l'hydrogène (en milieu acide) :**

où : Me représente le métal à l'état solide

Me^{+v} est l'ion dessous est v la valence.

Il convient de remarquer que [12,13,14]:

- Tous les électrons formés par la réaction de dissolution doivent être instantanément consommés par une réaction cathodique. Ces deux types de réactions doivent donc avoir la même vitesse.
- Les zones de dissolution d'une part, et les zones cathodiques, d'autre part, sont appelées demi-piles électrochimiques. L'ensemble est appelé pile électrochimique, car il existe une différence de potentiel entre ces deux zones qui une fois reliées entre elles, permettent la circulation d'un courant. Si la taille des zones dépasse le Cm il s'agit de macro-pile.
- Les espèces formées par ces réactions sont surtout des particules électrisées et donc proportionnelle à une quantité d'électricité (en Coulomb) par unité de temps en seconde, c'est à dire à un courant électrique (en Ampère).
- Dans le liquide au contact du métal la répartition des ions n'est pas homogène. Les ions négatifs forment une sorte de couche liquide près de l'interface. A proximité de celle ci les ions positifs sont excédentaires dans une autre couche liquide. Cette double couche forme un condensateur qui induit un champ électrique.
- Dans certains cas, le liquide au contact du métal ne se renouvelle pas facilement. Il s'agit par exemple ; d'une eau retenue sous un revêtement de peinture. La corrosion est alors dite *en cellule occluse*. Très généralement, ce liquide devient acide (PH=4), quelle que soit son acidité quand il est de volume beaucoup plus grand que celui de la cellule, parce qu'il retient les produits de la réaction de dissolution.

1-4-2- Formation de rouille sous une goutte d'eau stagnant depuis quelques temps sur une surface métallique :

Au centre de la goutte, le fer se dissout (réaction anodique) et les électrons passent par le métal au bord de la goutte où il y a formation d'hydroxyle par réaction de l'oxygène, l'oxygène a donc le rôle d'un accepteur d'électron, l'ion d'hydroxyle, l'oxygène et l'ion fer diffusent dans le sens contraire et convergent vers un même point où il y a une précipitation et formation d'un anneau de rouille autour du centre de dissolution anodique du fer. Sous le cercle de la rouille, le métal est intact, si toute fois cette rouille n'est pas enlevée de suite, une corrosion apparaîtra rapidement, la rouille absorbant l'humidité (fig1-1-2).

La séparation des régions anodiques et cathodiques est un des phénomènes les plus importants et dangereux de la corrosion.

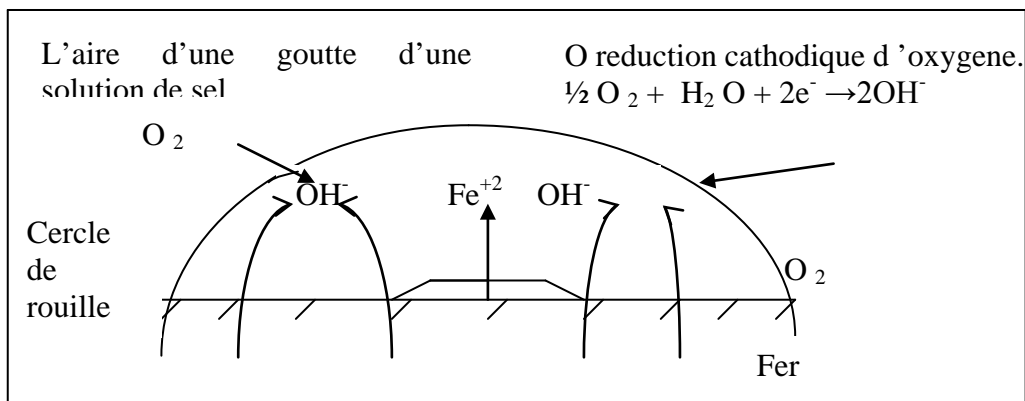


Fig1-1-2: Mécanisme de la corrosion sous une goutte d'eau [12,13]

Les produits des réactions sont des ions qui sont dissous dans l'eau et peuvent parfois réagir, donnant un précipité selon la réaction suivante :



Ce précipité est un hydroxyde qui recouvre la surface métallique. Cette réaction est dite **de recouvrement** ou selon l'ancienne terminologie de **passivation**.

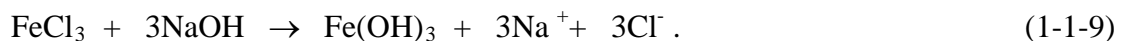
Si cette couche est totalement étanche dès les plus faibles épaisseurs (moins de 10^{-9}m), la passivation est dite parfaite et il s'agit de **passivité**. Dans le cas des produits à base de fer, le produit final de recouvrement est une rouille (ensemble de composés où la valence du fer est égale à 3), alors que le produit initial (ou $v=2$) est l'hydroxyde $\text{Fe}(\text{OH})_2$.

1-4-3- Mécanisme de corrosion électrolytique dans l'eau de mer :

Dans la zone la plus pure; le métal de l'armature libère des ions ferreux positifs (Fe^{+2}), en perdant des charges négatives (électron). Cette zone devient alors l'anode, pôle positif de pile. Les électrons libérés migrent à travers l'armature (qui joue le rôle de circuit extérieur de la pile) vers la zone d'impuretés qui devient alors cathode (pôle négatif de la pile). Dans la solution aqueuse chargée de chlorure de sodium (NaCl), les ions Na^+ et Cl^- se séparent [12,15,16]:

- Les ions Cl^- se dirigent vers l'anode pour donner avec les ions ferreux hydratés, le chlorure ferreux FeCl_2 .
- Les ions Na^+ se combinent à la cathode avec les ions OH^- issus de la réaction cathodique de l'oxygène atmosphérique sur l'eau (il y a formation de la soude (Na OH))

A ce stade de la réaction ; le mécanisme pourrait s'arrêter puisque tous les ions libérés ont été consommés, mais l'oxygène intervient à nouveau pour transformer le chlorure ferreux FeCl_2 en chlorure ferrique FeCl_3 qui, par réaction avec la soude donnera l'hydroxyde ferrique (rouille jaune) insoluble :



L'hydroxyde insoluble va se déposer et les ions Na^+ et Cl^- vont aussi permettre à la réaction de se poursuivre.

L'attaque sera constituée par un certain nombre de cycles identiques avec alternance de départ de métal depuis l'anode et du dépôt de rouille. L'oxydation se produit dans les mêmes conditions lorsque l'eau est chargée de sel.

La première conclusion à tirer est le rôle essentiel de l'oxygène qui alimente la réaction, le rôle des sels dissous est très important et dans une eau parfaitement pure, la corrosion électrolytique n'a pas lieu (Fig1-1-3).

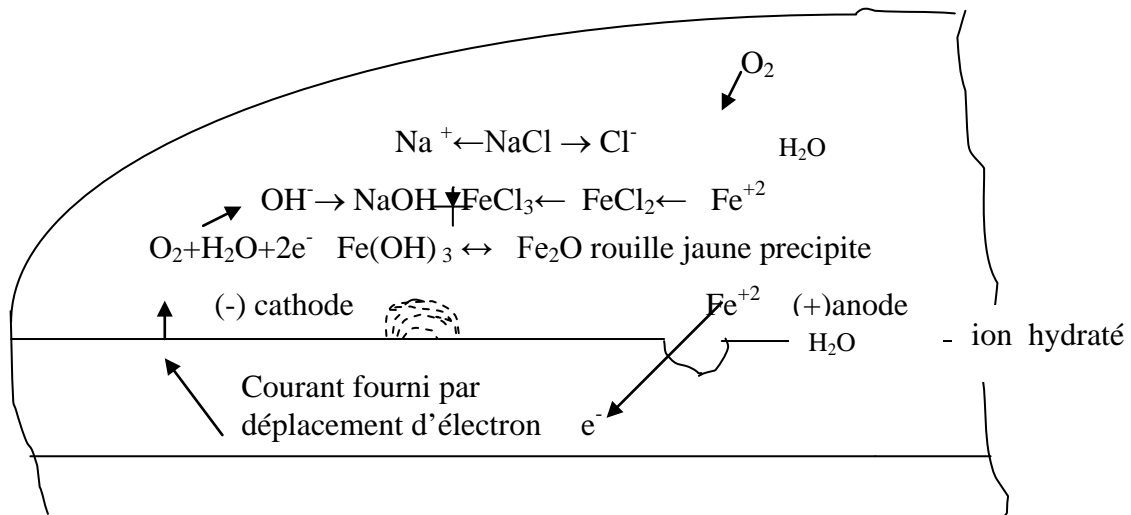


Fig1-3 : mécanisme électrolytique dans l'eau de mer[8,9,12].

Le processus de corrosion est donc de type électrochimique, car il s'agit à la fois de réaction chimique (précipitation, etc.), et de transfert d'électrons.

1-5 Formes de corrosion :

La dissolution d'un métal se produit en des zones très variables et la localisation de celles-ci détermine l'aspect de la corrosion. Il en résulte que l'aspect d'un métal corrodé de différents types (Fig1-1-4) [9].

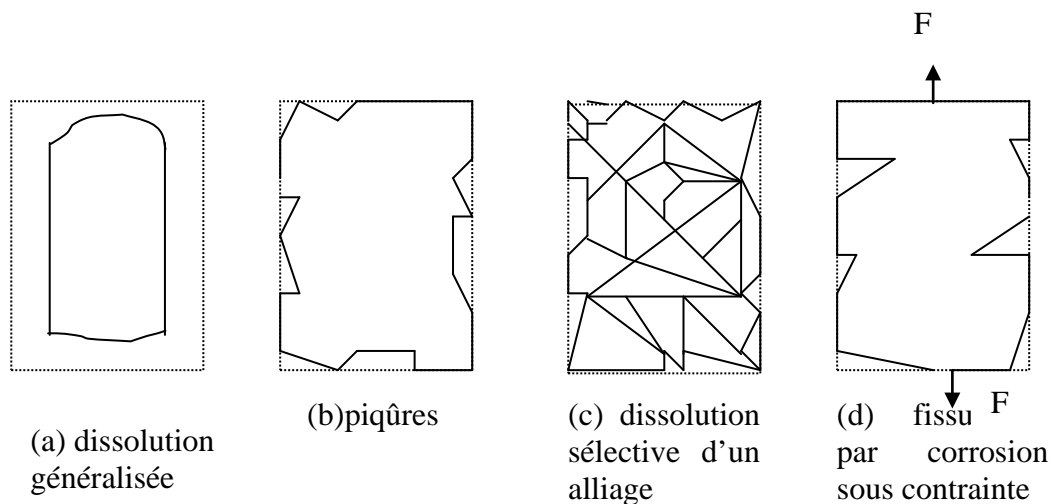


Fig 1-4 : Formes de corrosion [1,9].

1-5-1 Corrosion uniforme :

L'attaque uniforme est la plus courante en corrosion chimique. Elle se caractérise normalement par une réaction chimique ou électrochimique qui se poursuit uniformément sur toute la surface exposée, le métal devient plus mince et se détruit. Dans les liquides cette forme de corrosion comporte une réaction d'oxydo - réduction ; les surfaces anodiques et cathodiques se déplacent régulièrement sur la totalité de la surface du métal [1,8,9].

Cette forme de corrosion cependant n'est pas la plus importante du point de vue technique car la durée de vie des équipements peut être appréciée avec précision par comparaison avec les résultats d'essais simples. La plupart des autres formes de corrosion sont par nature insidieuses et elles sont considérablement plus difficiles à prévoir, ce sont les formes de corrosion qui provoquent les accidents imprévus et prématurés, c'est le cas de la corrosion par piqûre.

1-5-2 Corrosion localisée :

Si les zones anodiques sont petites et se trouvent en des endroits fixes, il apparaît de petites cuvettes ou piqûres de corrosion. Dans le cas où le matériau métallique a des constituants très différents, il peut apparaître une dissolution sélective (des grains ou aux joints de grains). Mais ceci ne concerne pas les aciers placés dans les bétons [12,17].

La corrosion par piqûre est une corrosion localisée qui aboutit au percement du métal. Quant l'anode se limite en un seul point, la corrosion s'installe à cet endroit et il en résulte une pénétration profonde de la corrosion. Ces trous peuvent avoir des petits ou des grands diamètres, les piqûres représentent les formes de corrosion les plus insidieuses et les plus destructrices. Elles provoquent la détérioration des équipements par perforation avec seulement un faible pourcentage de perte de poids de la construction totale. Il est souvent difficile de déceler les piqûres en raison de leur faible dimension et par ce que les piqûres en sont souvent recouvertes par les produits résultant de la corrosion, il est difficile d'apprécier quantitativement l'étendue des piqûres à cause des profondeurs variées et du nombre des piqûres qui surviennent dans des conditions supposées identiques. Il est aussi difficile de prévoir les phénomènes de piqûres par des essais de laboratoire, parfois les piqûres demandent plusieurs mois ou une année pour devenir évidente en cours de service. Les piqûres sont responsables de plus d'avaries imprévues d'installations industrielles que toutes autres formes de corrosion. Les piqûres sont particulièrement dangereuses car elles constituent une forme localisée et intense de corrosion.

Cette étude repose sur l'application de la formule classique de NERNST, donnant la tension d'oxydo-réduction d'un système $ox + v e^- \leftrightarrow red$ [8,9,13].

$$E = E_0 + \frac{RT}{nF} \log \left(\frac{|ox|}{|red|} \right) \quad . \quad (1-1-10).$$

E_0 : tension normale du système.

R: constante de gaz parfait.

n: nombre d'électrons échangés.

T: température à laquelle a lieu la réaction (température de Kelvin).

F: constante de Fraday.

1-6-2 Diagramme de Pourbaix :

On peut estimer le comportement de chaque métal dans les conditions voisines de l'état d'équilibre à l'aide des diagrammes potentiel-PH ou diagramme de Pourbaix. Ils permettent d'établir, de point de vue thermodynamique, les domaines les plus plausibles, de potentiel, de PH et du concentrations en ions métalliques qui correspondent aux divers états électrochimiques du métal considéré. Il ressort entre autres, du diagramme E-PH du fer dans l'eau que dans la région de PH 10 à 13, le fer pourra se recouvrir d'un film d'oxyde et les domaines présumés d'immunité, de corrosion et de passivation sont séparés.

Le diagramme E-PH du fer (Fig1-1-6) présente deux domaines qui correspondent à la dissolution du fer. Cette corrosion est généralisée ; le métal pourra être protégé contre cette corrosion par action réductrice qui abaisserait sa tension d'électrode vers le domaine d'immunité alors par action oxydante qui élèverait sa tension d'électrode jusqu'au domaine de passivation.

Un métal passif ne sera pas lui-même stable, par contre, il sera recouvert d'un film stable, plus au moins protecteur Fe_3O_4 ou Fe_2O_3 selon les conditions expérimentales. Il semblerait que les films de magnétite Fe_3O_4 ne sont pas protecteurs, c'est au film de γFe_2O_3 renfermant un peu d'hydrogène, qu'est due la passivité du fer dans de nombreuses solutions [5,12].

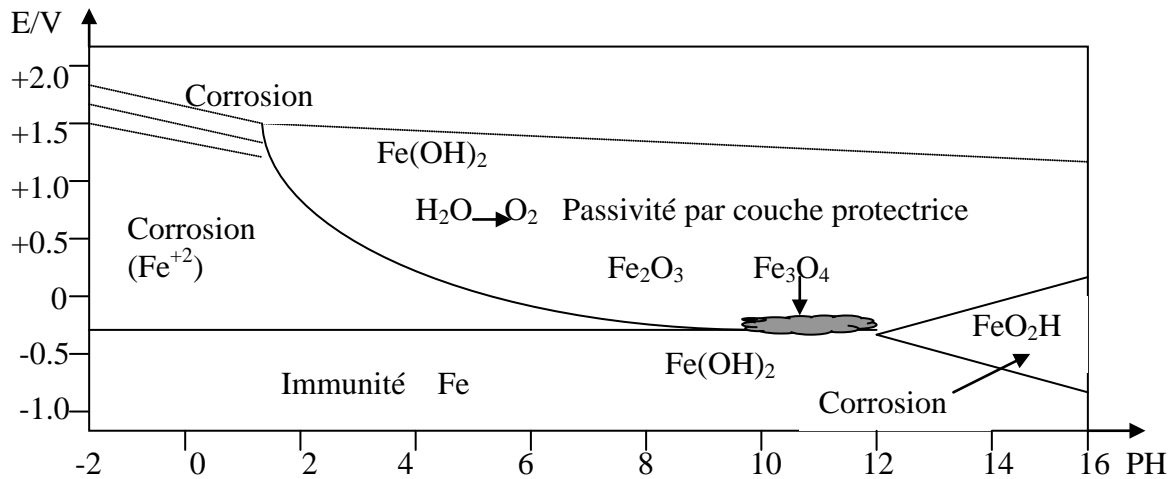


Fig1-1-6: Diagramme de Pourbaix pour le système Fe/H₂O à 25 C⁰ pour une concentration de Fe⁺² = 10 mol/l [12].

Conclusion :

Au vu du diagramme de Pourbaix, on déduit que la passivation est aisée en milieu alcalin.

1-6-3 Cinétique de la corrosion :

Les diagrammes E-PH que nous venons de décrire résument les conditions thermodynamiques de corrosion d'un métal par une solution aqueuse mais, ils ne peuvent pas nous renseigner sur les vitesses effectives des réactions de corrosion.

Ces vitesses peuvent être obtenues par différents essais.

➤ Les méthodes traditionnelles :

Elles comportent l'observation visuelle ou au microscope, les mesures de densité et de profondeur de piqûres et les mesures de perte ou de gain de masse, les résultats de ces mesures ont l'inconvénient de donner l'état de corrosion à un moment donné sans donnée la vitesse d'évolution du phénomène; par ailleurs ces mesures sont généralement destructives de l'état de l'échantillon. La détermination de la vitesse de corrosion par différence de l'état de corrosion à deux moments donnés est donc lourde car elle nécessite de nombreux échantillons, les mesures de densité de piqûres de profondeur de piqûre et de perte de masse nécessitent un décapage des échantillons éliminant les dépôts de produits de corrosion ou de tartre sans attaquer le métal, cette opération introduit une incertitude importante sur les résultats des mesures de perte de poids.

Ces méthodes sont celles qui sont le plus souvent employées pour suivre l'évolution de la corrosion dans les installations de distribution d'eau.

➤ **Les méthodes électrochimiques :**

Les méthodes électrochimiques de la recherche de corrosion se basent sur l'étude des graphes de courant-potentiel :

Les vitesses de corrosion:

La vitesse de corrosion est égale à la quantité de métal dissous pendant l'unité de temps. Cette quantité de métal est proportionnelle à une quantité d'électricité (e^-).

Dans les cas réels, les zones anodiques et cathodiques ont des aires inconnues. Les méthodes rigoureuses de détermination de la vitesse de corrosion peuvent alors être mises en défaut. La vitesse de corrosion s'exprime donc, pratiquement, en :

- masse de métal dissout par unité de temps (par exemple en gramme par an) ;
- perte (moyenne) d'épaisseur par unité de temps (par exemple en millimètre par an) ;
- profondeur (moyenne ou maximale) de piqûre par unité de temps ;
- taille de fissure par unité de temps.

La vitesse de dissolution peut être évaluée par des essais électrochimiques. Elle est inversement proportionnelle à la résistance de polarisation R_p du métal dans le liquide considéré.

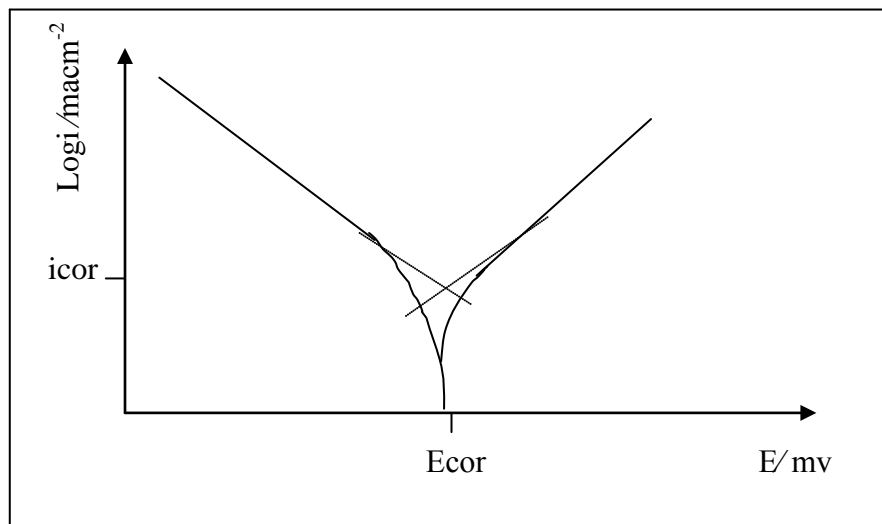


Fig 1-1-7 : Droite de Tafel (Fer en milieu H_2SO_4) [12].

1-6-4 Caractérisation des produits de corrosion :

➤ **Analyses élémentaires:**

Lorsque les produits de corrosion forment une couche très mince (de l'ordre de 10^{-8} m), ils peuvent être analysés par les méthodes applicables pour les surfaces en général. En ce qui concerne la corrosion des aciers dans le béton, ces méthodes ne sont pas utilisées.

Lorsque les produits de corrosion sont assez épais, leurs éléments constitutifs peuvent être analysés. Pour des produits en quantité suffisante (de l'ordre de quelques grammes), ces analyses peuvent se faire par dosage chimique.

Elle peut aussi être faite à l'aide d'une microsonde électronique (dite de Casting) souvent associée à un microscope électronique [5]. Cette méthode permet de déterminer la répartition des éléments dans les produits. Ces éléments permettent de détecter la présence de corps inhabituels ; dans la plupart des cas, des analyses doivent être complétées par des études plus fines.

➤ **Identification des produits cristallisés:**

Lorsque les produits sont sous forme cristallisée, ils peuvent être caractérisés par diffraction de rayon X ou d'électrons. Ces méthodes donnent les caractéristiques des réseaux (maille) cristallins et, par comparaison avec des clichés témoins, elles permettent d'identifier le type de minéral étudié.

Cette méthode est souvent employée car elle est assez simple et donne des informations très utiles. Mais elle ne s'applique pas aux produits amorphes ou peu cristallisés[1].

➤ **Identification des produits non cristallisés:**

Lorsque les produits de corrosion sont formes de cristaux très petits (de l'ordre de 10^{-7} m), ou lorsqu'ils sont amorphes, ils peuvent être identifiés par diverse spectrométrie.

La spectrométrie infrarouge permet de caractériser les liaisons entre les atomes constitutifs du corps. Elle est utilisée parfois pour les produits de corrosion. La spectrométrie Raman consiste à étudier les diverses énergies de relaxation d'électron dans un corps illuminé par une radiation fournie par un laser. Cette méthode est très performante, mais elle est encore assez peu répandue [5].

La spectrométrie Mossbauer consiste à déterminer l'absorption d'un rayonnement gamma émis par le noyau de fer -56 et se déplaçant par rapport à la cible qui est le corps étudié. Cette méthode est la plus performante pour les produits de corrosion du fer. Elle est toutefois peu répandue.

➤ **Caractérisation par des méthodes électrochimiques:**

Les produits formés à l'interface entre le solide et le liquide peuvent être caractérisés par des méthodes électrochimiques. Il s'agit d'appliquer au métal une faible polarisation qui modifie son potentiel (électrode). Si la polarisation se fait en courant alternatif de fréquence f , le courant de polarisation $i(t)$ entraîne une variation $\Delta E(t)$ du potentiel, pour un métal dont l'interface a une aire égale à l'unité. Le rapport $Z = \Delta E(t) / i(t)$ est appelé impédance électrochimique. La valeur de son module aux faibles fréquences (de l'ordre de 1 MHz) correspond au transfert e charge électrique à l'interface, et elle est appelée **résistance de transfert**. Elle est, en première approximation, égale à la valeur obtenue en courant continu (appelée R_p ; résistance de polarisation)[18].

1-6-5 Les principaux facteurs de corrosion:

➤ **Composition du liquide environnant:**

Les milieux liquides qui entourent un métal influent fortement sur les propriétés du produit de corrosion. Ainsi, si ce milieu est très acide, la réaction n'a pas lieu : aucun recouvrement ne se forme sur le métal.

Dans les milieux à peu près neutres, il se forme des produits qui peuvent ou non empêcher l'extension de la corrosion. La nature de ces produits dépend fortement de la nature des anions présents dans le liquide. Ces produits ne sont pas protecteurs lorsque la teneur en chlorure est forte [19,20].

Ainsi, d'une façon générale; ce sont le PH et les teneurs en sels du liquide qui caractérisent l'étanchéité et la stabilité du produit de recouvrement.

➤ **Hétérogénéité du milieu environnant:**

Le liquide en contact d'un métal peut être hétérogène. Il s'agit par exemple, d'une eau dont la teneur en oxygène dissout varie d'un point à un autre de son interface avec le métal. Par exemple, la teneur en oxygène n'est pas constante dans une eau qui n'est aérée qu'à partir de sa surface. Dans le cas d'une telle aération différentielle, la réaction qui consomme l'oxygène se produit dans le liquide aéré. La dissolution métallique a lieu dans le liquide désaéré.

Ainsi, d'une façon générale, l'hétérogénéité du milieu autour du métal favorise la localisation des zones de dissolution ou de réduction [13].

➤ **Effet de la température:**

Les réactions chimiques ou électrochimiques sont accélérées lorsque la température s'élève. Par ailleurs, une élévation de température augmente la solubilité des gaz (oxygène, etc.) et des sels dans l'eau. En ce qui concerne l'oxygène, une corrosion ou intervient la réaction est ainsi accélérée par une élévation de température. Cet effet est réversible.

➤ **Courant vagabond:**

La dissolution d'un métal correspond à la présence d'un champ électrique au niveau de son interface avec le milieu aqueux environnant. Si un autre champ électrique vient s'ajouter à ce premier champ, cette dissolution est accélérée [9]. En pratique, une telle perturbation est produite par des courants électriques continus qui circulent au voisinage et à l'intérieur du métal, de sorte qu'il peut *sortir* de celui-ci. Dans la plupart des cas, ces courants ont des trajets mal connus ; ils sont dits vagabonds. L'origine de ces courants vagabonds est très variable. Il s'agit, par exemple, de défaut de mise à la terre d'installation électrique (poste de soudage, etc.)

1-7 Méthodes de protection contre la corrosion :

Suivant le caractère de la corrosion et les conditions de son évolution, on a recours à diverses méthodes de protections, lesquelles modifient le processus de corrosion, soit en réduisant sa vitesse, soit l'arrêtant totalement.

1-7-a Les écrans :

Les écrans ou protections passives contre la corrosion sont des barrières qui empêchent le liquide de toucher le solide métallique. Ainsi, aucune des réactions électrochimiques liées à la corrosion métallique ne peut se produire.

Il s'agit principalement de peintures, vernis bitumes, graisse, cires et huiles. Des ambiances gazeuses très sèches (azotée, etc.) constituent aussi de telles barrières, mais ce procédé ne s'applique pas aux ouvrages de génie civil.

Ces protections sont efficaces, tant qu'elles restent étanches et adhérentes.

1-7-b Les inhibiteurs :

Tout constituant qui, ajouté à petite dose au milieu agressif et qui n'est pas indispensable au processus électrochimique ; qui s'adsorbent à la surface des métaux et en diminuant la vitesse de corrosion soit de la réaction partielle anodique (changement d'état à la

surface métal/milieu) ou soit en affaiblissement de l'agressivité des réactions corrosive est appelé inhibiteur de corrosion, ces inhibiteurs doivent être fluides c'est-à-dire être à l'état liquide ou gazeux [12,21,22].

Il s'agit, par exemple, du phosphate de sodium qui inhibe la réaction anodique dans la corrosion du fer. Le sulfate de zinc est un inhibiteur de la réaction cathodique.

Les effets d'inhibition n'apparaissent que si la concentration en inhibiteurs reste dans un certain intervalle.

1-7-c Les recouvrements obtenus naturellement et les traitements de surfaces :

Les produits de recouvrement d'un matériau métallique peuvent être assez étanches pour ralentir, voir arrêter la corrosion. Ainsi, pour les divers aciers, ce type de protection est utilisé avec diverses épaisseurs de produits de recouvrement spontané (rouille).

1-7-e La protection anodique:

La protection anodique consiste à placer certains matériaux métalliques à des potentiels tels que leur recouvrements se forme. Ces potentiels sont légèrement plus élevés que les potentiels d'abandon. Il s'agit ici de matériaux naturellement passifs, (aciers dits inoxydables).

Cette protection nécessite un réglage minutieux pour éviter la piquuration des métaux. Elle ne s'applique pas aux ouvrages de génie civil.

1-7-c La protection cathodique:

La protection cathodique consiste à placer un matériau métallique à un potentiel assez bas pour que la corrosion soit négligeable, Ce potentiel correspond à l'immunité (impossibilité de corrosion) ou à une passivation efficace.

Cette méthode est obtenue de deux façons:

- A l'aide d'anodes solubles dites aussi sacrificielles (par exemple, à base de zinc), directement reliées à la structure à protéger, et mises dans le même électrolyte ;
- A l'aide d'une installation électrique comportant une alimentation de courant continu dont le pôle négatif est relié à l'élément à protéger. Le pôle positif de cette alimentation est relié à une anode mise dans le même électrolyte.

CHAPITRE 2

Corrosion des aciers dans le béton

2-1 Introduction:

Le béton armé consiste en une association dans laquelle l'élément résistant à la compression (le béton) protège contre la corrosion l'élément résistant à la traction (l'acier). En effet, l'alcalinité de l'eau contenue dans les pores de béton permet la formation d'une couche protectrice d'oxydes au niveau de l'acier. Cet aspect physico-chimique de la protection est complété par la barrière physique que constitue le béton d'enrobage entre l'acier et le milieu extérieur.

On constate cependant que, statistiquement, un certain pourcentage des ouvrages construits en béton armé souffre de problèmes de corrosion des armatures. Ces problèmes, s'ils sont détectés trop tard, raccourcissent la durée de vie de l'ouvrage.

La pénétration du CO₂ (carbonatation) et des ions chlorures dans la zone d'enrobage des armatures sont en effet les deux causes majeures de corrosion des armatures du béton armé.

Les mécanismes de corrosion sont toutefois différents : la carbonatation et l'abaissement du pH qui en découle conduit à une corrosion uniforme de l'acier alors que la présence d'ions chlorure entraîne une corrosion d'acier par piqûres. Les conséquences seront, elles aussi différentes : Dans le premier cas l'accumulation de produit de corrosion détruira mécaniquement le béton d'enrobage (par éclatement du au volume des produits de corrosion jusqu'à 14 fois plus importants que celui d'origine) alors que pour la corrosion par piqûre c'est la perte de la résistance mécanique de l'acier qui sera en cause [23].

Dans tout les cas il existe deux étapes, elles sont schématisées sur la figure (2-1): une première, appelée phase d'initiation, qui correspond au temps nécessaire à l'apparition de corrosion depuis la mise en œuvre de l'ouvrage ; la seconde est définie par la durée de la période de propagation de cette corrosion qui conduira à la ruine totale de l'ouvrage [5].

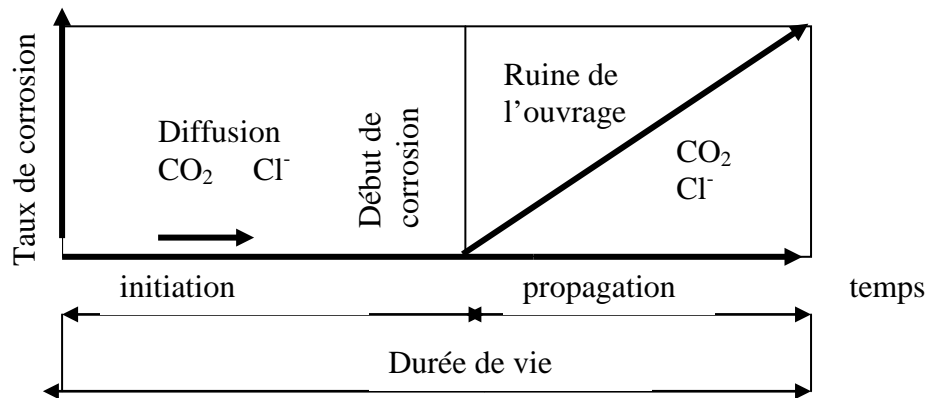


Fig 2-1 : Modèle conceptuel de la corrosion des aciers dans le béton [5].

La détection d'une corrosion des aciers sur un ouvrage en béton armé intervient bien souvent au cours de la phase de propagation, au moment où les destructions sont visibles (couleur brune due à la rouille, gonflement et rupture du béton d'enrobage), c'est à dire tardivement. Il devient alors très difficile de réparer tant sur le plan technique que financier.

Comme la phase d'initiation va dépendre en premier lieu des lois de diffusion dans le béton d'enrobage, les processus moteurs (carbonatation, diffusion des chlorures) et les conséquences (corrosion) seront influencés par différents paramètres [23,24,25]:

- ◆ Intensité des agressions extérieures.
- ◆ Protection ou non contre les agressions extérieures.
- ◆ Enrobage.
- ◆ Porosité de béton elle même fonction de la teneur en ciment, du rapport E/ C de la puissance de vibration du béton frais et de la cure du béton, etc.

De plus, le béton d'enrobage peut subir depuis l'extérieur des modifications par abrasion, par attaque chimique (acides, sulfates, nitrates, etc.), par pénétration d'eau par gel dégel, etc.

Ces modifications, chimiques ou texturales, vont, suivant le cas, amplifier ou freiner les processus de carbonatation et de pénétration des ions chlorures.

2-2 Les altérations de l'enrobage de béton:

Les dégradations du béton peuvent avoir des origines physiques, mécaniques ou chimiques. Les facteurs mécaniques surtout sont des charges excessives et les chocs.

Les facteurs physiques sont les températures extrêmes (gel, incendie).

Par ailleurs, des corps vivants (bactéries, végétaux, etc.) peuvent se fixer sur le béton. De même, des corps chimiques (fumées d'usine, engrais, etc.) peuvent être mis en contact du béton. Dans ce cas, le béton peut se dégrader par réaction (dissolution, gonflement) des constituants du béton. Il s'agit d'abord de problèmes d'esthétique, avant de devenir des questions de durabilité (stabilité) des constructions.

Les facteurs chimiques sont les plus importants dans les altérations en volume de l'enrobage de béton. C'est pourquoi ces types d'altérations seront détaillés.

2-2-1 Principaux types d'altération :

Les altérations du béton peuvent être dues à des agents extérieurs (solutions acides, solutions salines, etc.) ou à des agents internes (gonflement par hydratation de CaO et de MgO dans le ciment, réaction alcali- granulats, etc.) ; les altérations sont deux types :

Soit par érosion, qui entraîne la solubilité de la chaux hydratée du ciment, soit par gonflement et éventuellement fissuration par formation de composés expansifs.

2-2-1- a Facteurs d'altération externes :

➤ Les eaux :

les eaux pures :

Ce sont les eaux de ruissellement provenant des montagnes et des glaciers. L'action de ces eaux s'exerce essentiellement sur la portlandite Ca(OH)_2 présente dans le ciment, et met en jeu plusieurs mécanismes compétitifs :

- Dissolution locale de Ca(OH)_2 selon la réaction :



- Carbonatation et précipitation ultérieure sous forme de calcite CaCO_3
- Transport de nouvelles quantités de Ca(OH)_2 de l'intérieur vers les zones de dissolution, piloté par la microporosité du béton et par les conditions climatiques.

L'épuisement progressif de cette chaux obtenue dans la pâte liante fait apparaître des vides dans le béton, augmente sa porosité, diminue ses résistances mécaniques.

les eaux acides :

L'eau acide peut dissoudre encore plus rapidement la chaux que les eaux pures. Elle peut avoir reçu des déchets industriels, avoir été en contact avec des sols plus ou moins agressifs et contenir de ce fait des acides divers : sulfurique, chlorhydrique, etc. .

L'eau de pluie par exemple souvent à un pH de l'ordre de 5 qui peut descendre à 4 dans les cités industrielles, cette eau est donc corrosive du fait de son acidité.

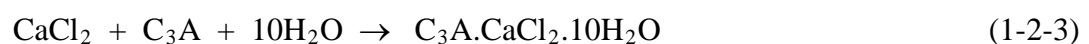
➤ Les solutions salines :

En particulier le NaCl sel très répandu dans la nature.

Action des chlorures :

Les ions chlorures peuvent pénétrer dans le béton par divers mécanismes. Les premiers est un entraînement mécanique de ces corps par l'eau qui pénètre dans le béton sous l'action d'une humidification ou d'une pression[12,26]. Ce mécanisme est lié à la perméabilité du béton. Le second mécanisme concerne un béton saturé d'eau au contact d'une solution saline. La pénétration est alors due à gradient de concentration, donc à une diffusion. Dans certains cas, les mouvements d'eau tels que les cycles d'humidification séchage, sont importants. Comme dans le cas d'une pénétration d'un corps avec réaction chimique, le mécanisme n'est plus une diffusion pure.

Les ions chlorures venant du milieu extérieur et pénétrant dans le béton durci restent, en majorité, à l'état dissous dans la solution interstitielle. Mais ils peuvent aussi réagir soit avec le silicate de calcium hydraté (CSH) surtout par adsorption, soit avec l'aluminate tricalcique (C₃A) pour former du tricolore enluminée, selon par exemple la réaction qui forme des chlorures aluminates:



La présence des chlorures dans le béton peut résulter aussi des matières premières de quelques ciments contiennent une petite quantité de Cl⁻ d'une teneur de 0.1% en Cl⁻ .

Très souvent, on ajoutait des chlorures de calcium au ciment pour améliorer sa résistance initiale.

Depuis longtemps, il est interdit d'utiliser des ciments avec une teneur en chlorure supérieur à 0.1%; de même, il ne faut utiliser que des adjuvants exempts de chlorures, et la teneur en

chlorure de l'eau de gâchage ne doit dépasser 500mg Cl⁻/l [9].

Dans le cas d'un béton constamment entouré d'une solution saline, à un instant donné, la concentration en chlorure dans le béton à une profondeur donnée peut se déterminer expérimentalement ou se calculer.

Le modèle prévisionnel est la loi de diffusion en régime stationnaire, dite loi de FICK ou t est le temps, x la profondeur de pénétration et C la teneur en chlorure :

$$dC/dt = D d^2C/dx^2 \quad (1-2-4)$$

Lorsque le béton subit alternativement une humidification et un séchage, la solution qui contient des chlorures peut pénétrer avec une certaine convection de vitesse β . Ce cas correspond essentiellement aux constructions exposées aux embruns. Dans l'équation le flux dC/dt est simplement diminué de la quantité $\beta \cdot dC/dt$.

Par ailleurs, lorsque l'humidité relative de l'atmosphère autour du béton fluctue, la teneur en eau dans le béton n'est ni homogène ni stable. Ainsi, le cœur du matériau reste saturé d'eau alors que sa teneur en eau varie dans l'espace (gradient) et dans le temps. Ce fait influe sur la pénétration des chlorures dissous dans l'eau.

Au cours d'un séchage du béton, l'eau s'évapore et les chlorures restent dans le matériau soit sous forme adsorbée sur les parois des pores, soit en formant des cristaux de sel. Si par la suite ce béton est ré-humidifié, ces sels sont de nouveau dissous dans l'eau entrante. Le profil de teneur en chlorure peut ainsi différer de ce qui correspond à une pénétration de chlorures en immersion constante.

La fixation de chlorures par adsorption ou formation de cristaux, modifie la loi de pénétration, car la loi de FICK n'est plus alors valable en toute rigueur. Plusieurs modèles explicatifs ont été proposés, ils sont de divers types.

Les trois modèles suivants montrent les différentes méthodes d'approches de la modélisation :

- Modèle empirique de Mangat_Molloy, c'est la loi de FICK qui est appliquée. Mais la diffusivité D est supposée varier avec l'âge du béton, selon l'équation :

$$D = D_i \cdot t^{-m} \quad (1-2-5)$$

Où D_i et m sont des constantes.

- Modèle de Sergi-Yu-Page suppose que les ions chlorures sont fixés par adsorption sur les parois des pores ; ainsi pour une teneur en chlorure C la quantité d'ions adsorbés est s. L'isotherme d'adsorption de Langmuir relie ces deux grandeurs selon l'équation :

$$s = \alpha C / (1 + \beta C) \quad (1-2-6)$$

ou α et β sont les constantes de Langmuir. Si l'adsorption est linéaire, cette équation devient:

$$s = \alpha \cdot C \quad (1-2-7)$$

et l'équation de pénétration est :

$$\partial C / \partial t = w D \partial^2 C / \alpha + w \partial x^2 = D^* \partial^2 C / \partial x^2 \quad (1-2-8)$$

ou w est la teneur en eau et la diffusivité apparente $D^* = w D / (\alpha + w)$

- Modèle de Raharinaivo-Génin admet que les ions adsorbés sur les parois peuvent participer à un processus de diffusion (superficielle).

Ce modèle permet de définir une diffusivité macroscopique effective qui n'est pas constante en général. Mais dans certains cas, cette diffusivité effective est à peu près constante, et la loi de FICK est alors valable, au moins d'une façon approchée ; il faut :

- Un ciment qui ne fixe pas les chlorures ou tous les sites de fixation des chlorures sont occupés (ces ions ne peuvent pas être relâchés).
- Une taille des pores pas trop faible ;
- Une répartition des ions chlorures adsorbés assez homogène.

➤ Les gaz:

Action du gaz carbonique(effet de carbonatation) :

La carbonatation du béton désigne la neutralisation de l'eau dans les pores du béton qui est causée à partir de la surface par les substances acides de l'air.

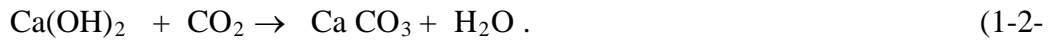
L'air contient environ 0.03% en volume de gaz carbonique ou dioxyde de carbone de formule CO_2 , ce qui correspond à une pression partielle de 30 pascal sous la pression atmosphérique [23]. Cette teneur est principalement régulée par le carbonate acide de calcium contenu dans l'eau de mer suivant l'équilibre :



9)

Elle varie toutes fois avec la température, la pression et le milieu (végétation, industrie ,etc.) et peut atteindre des valeurs de 0,1%.

Le dioxyde de carbone réagit avec certains composés calciques selon la réaction :



10)

La figure (2-2) représente une description du processus de carbonatation:

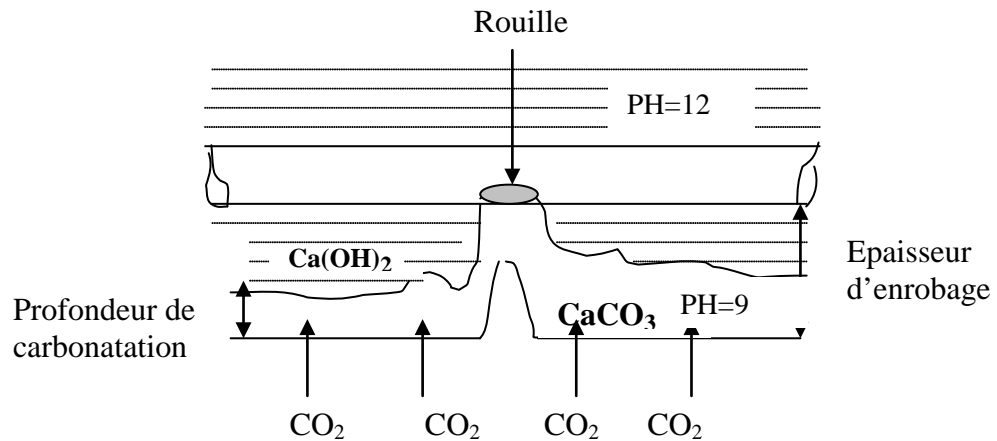


Fig 2-2 : Description du processus de carbonatation.[8,23]

Deux types de pénétration du CO₂ au sein du béton susceptible de se produire :

- ◆ Par l'intermédiaire de la phase liquide lorsqu'il y a transfert d'eau chargé en gaz carbonique dissous ou, lorsque l'eau est déjà présente, par diffusion en phase aqueuse.
- ◆ Par l'intermédiaire de la phase gazeuse lorsque le réseau poreux ne contient plus de phase aqueuse.

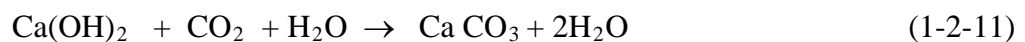
La diffusion de CO₂ dans l'eau se fait par les pores du béton ; l'importance des pores du béton est alors évidente. Pour les valeurs eau/ ciment usuel (0.4 -0.7) on incorpore toujours plus d'eau au mélange de béton que le ciment peut en fixer chimiquement et physiquement. On sait qu'il en résulte une porosité de la pâte de ciment qui a une grande importance pour la résistance contre la carbonatation. L'avancement du front de la zone carbonatée ne se produit pas avant que tous les constituants basiques dans cette région soient saturés d'acide carbonique, excepté dans le cas où la porosité de la pâte de ciment est tellement grande que la diffusion de CO₂ à travers la pâte de ciment est plus rapide que le progrès de sa réaction avec les particules de ciment de la surface à l'intérieur.

Pour évaluer la carbonatation d'un béton, il est dans un premier temps indispensable de définir les constituants susceptibles de réagir. On peut alors citer:

- ◆ La portlandite Ca(OH)_2 qui constitue le réservoir d'alcalinité du béton.
- ◆ Les silicates hydratés (C-S-H) dont la surface spécifique très élevée peut piéger une partie importante des ions carbonate.
- ◆ Les aluminates et les sulfoaluminates avec pour ces derniers, un éventuel relarguage d'ions sulfate.

- **portlandite** :

l'attaque chimique de la portlandite peut se résumer par la réaction globale :



Cette réaction irréversible, qui a lieu en phase liquide, précipite l'hydroxyde de calcium sous la forme de sel insoluble, le carbonate de calcium. Lorsque toute la portlandite sera consommée, le PH initialement voisin de 13, chutera en dessous de 9.

- **C-S-H (silicate)** :

La réaction de carbonatation du C-S-H peut s'écrire de la façon suivante :

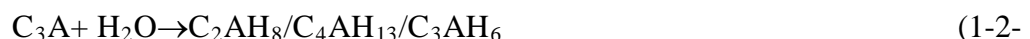


Ont défini trois étapes pour la carbonatation de ce composé :

- ✓ La formation de calcite à partir des ions calcium assurant l'équilibre est solution.
- ✓ La décomposition du C-S-H avec un accroissement de la teneur en ions silicate.
- ✓ La disparition du C-S-H accompagné d'une restructuration des gels de silice formés.

- **Aluminates** :

Le C_3A ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$), composé du ciment anhydre, réagit avec l'eau pour donner trois composés :



13)

Auxquels il faut adjoindre l'ettringite et le monosulfoaluminate de calcium qui se forment à partir des sulfates générés par la dissolution du gypse présent dans le ciment.

La pénétration du dioxyde de carbone dans le béton se fait beaucoup plus vite lorsque le béton est assez sec que lorsqu'il est humide. Mais la réaction de carbonatation n'a pas lieu que s'il reste de la solution interstitielle dans les pores (au moins les plus petits) pour faire dissoudre le CO_2 .

Les conditions les plus favorables à la pénétration du dioxyde de carbone correspondant à une humidité relative de l'ordre de 65% [9]. La définition exacte peut être donnée à l'aide des coupes microscopiques; la biréfringence du carbonate de calcium cause une coloration claire, ce qui permet de suivre exactement la pénétration de l'acide carbonique; mais le repérage des zones exposées à la corrosion est plus sûrement obtenu au moyen de la phénolphthaline, cet indicateur coloré permet de distinguer les zones de pH supérieur et inférieur à 9, c'est à dire les zones de présence et d'absence de portlandite en carbonate en fonction de la profondeur.

Le danger de corrosion ne se provient pas de la calcite mais de la réduction de la valeur de PH dans l'eau des pores du béton. C'est justement cette réduction qui est démontrée par la non coloration de la phénolphthaleine (figure 2-3). Pour cet essai le béton ne devrait pas être scié mais rompu, car au sciage la poussière basique du béton peut se déposer à la surface de la coupe.

..



Fig 2-3 : coloration de la zone non carbonatée par la phénolphthaleine[23].

Un autre indicateur, la thymolphthaleine, peut être également utilisé mais son pH de son virage égale à 10 n'apporte pas vraiment d'indication supplémentaire.

La détermination de profondeur de carbonatation par indication colorée a encore un bel avenir, ne serait-ce que pour leur facilité de mise en œuvre tant sur le chantier qu'en laboratoire. Toutes fois, leur limitation sur le plan de l'analyse quantitative, a conduit les expérimentateurs à envisager des moyens d'études plus performants.

La profondeur X_c de béton carbonaté peut être déterminé par une détection plus fine (diffraction d'électron, etc) de la présence de carbonate dans le béton. D'après l'hypothèse couramment admise, la profondeur de carbonatation correspond à une valeur particulière de la

teneur en dioxyde de carbone dans le béton ; cette pénétration de la carbonatation correspond ainsi à une diffusion du dioxyde de carbone.

Pour déterminer la diffusivité D de la carbonatation X_c est mesurée à divers âges t . Dans une première approximation, ces grandeurs sont reliées à la loi de FICK qui donne :

$$X_c = (D.t)^{1/2} \quad (1-2-14)$$

Cette loi n'est pas rigoureuse car la loi de FICK ne convient pas en présence de réaction chimique (de carbonatation). Toutefois, dans la pratique, c'est la loi qui est utilisée.

Les facteurs influants sur le taux de carbonatation :

- **Influence de rapport (E/C) :**

Le rapport E/C a une importance considérable sur l'interconnexion de réseau poreux et par conséquent sur la perméabilité du béton et la diffusivité des espèces gazeuses ou ioniques au sein du béton.

De nombreuses recherches ont été réalisées pour connaître l'influence de rapport E/C sur la vitesse de carbonatation. PAPADAKIS et al montrent cette influence sur la profondeur de carbonatation qui double lorsque le rapport E/C passe de 0.5 à 0.8. le résultat de l'analyse proposée par ces auteurs présenté dans la figure :

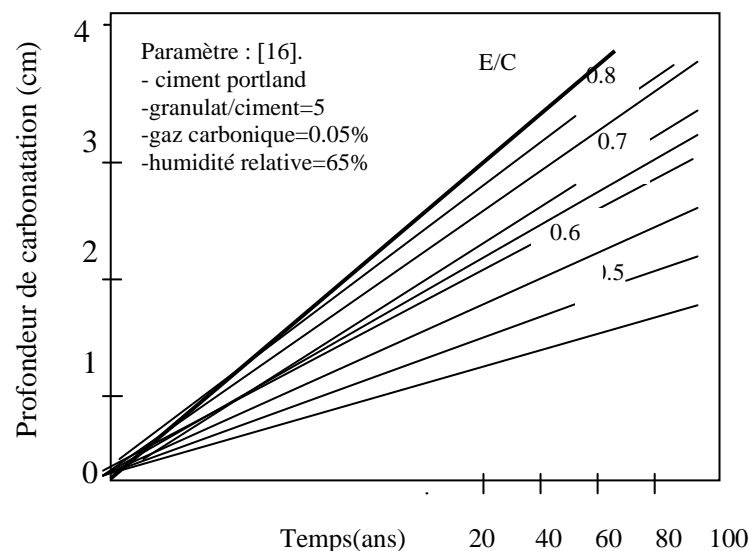


Fig 2-4 : Influence du rapport E/C sur la cinétique de carbonatation.[23]

Un béton complètement saturé d'eau ne peut pas se carbonater ; d'autre part, un béton complètement sec ne pourrait pas se carbonater parce qu'il manquerait de l'eau nécessaire à la carbonatation.

- **Influence du type de ciment :**

Muller et Sickert [5], ont comparé la résistance à la carbonatation du béton fabriqué à partir de ciment portland ordinaire ou de ciment à base de laitier de hauts fourneaux. Il ressort de leur étude que le béton de ciment à base de laitier de haut fourneau se carbonate beaucoup plus vite que les bétons de ciment portland pour un rapport E/C identique. On notera également qu'aux faibles E/C, seuls les bétons de ciment à base de laitier de hauts fourneaux se carbonate.

Ces auteurs ont également regardé l'influence de la teneur en alcalin à différents rapports E/C. Ils en déduisent qu'une augmentation de 0.6% en alcalin est équivalente, de point de vue de la carbonatation à une augmentation de rapport E/C de 0.1.

- **Influence de la cure du béton :**

Loo et al. [23] ont montré que le taux de carbonatation diminue avec la durée d'une cure sous eau et ce, quel que soit la résistance à la compression du béton à 28 jours. Ils notent toute fois, qu'à partir de 14 jours de cure, l'amélioration est moindre. Ils ont également porté le coefficient de carbonatation en fonction de l'inverse de la racine carrée de la résistance à la compression. Les points s'alignent sur une même droite quelque soit la durée de la cure (figure 2-5); ce qui signifie que l'amélioration de la résistance due à la cure est le facteur prépondérant responsable de la diminution de taux de carbonatation.

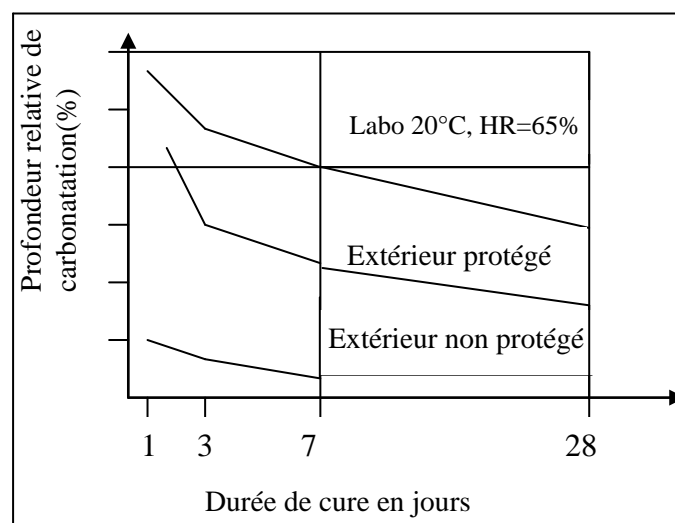


Fig 2-5 : Effet de la durée de cure et de conditions d'exposition sur la profondeur de carbonatation d'un béton âgé de 16 ans[23].

- **Influence des additions minérales :**

Fumée de silice :

Skenderovic montre que le remplacement d'une partie de ciment (10%) par des fumée de silice augmente la vitesse de carbonatation naturelle de béton bien que la porosité soit considérablement diminuée. Cet auteur explique ce fait par la moindre quantité de portlandite dans les bétons avec fumée de silice. L'étude Richardson et al [5]. Indiquent à contrario que l'addition de fumée de silice limite la profondeur de carbonatation du béton. Ces résultats assez contradictoires nécessitent une investigation plus approfondie afin d'évaluer ces additions dans des conditions similaires de rapport E/C et de cure des échantillons du béton.

Laitier de haut fourneau :

En ce qui concerne l'addition de laitier de haut fourneau Skenderovic et Malami et al [9]. N'obtiennent aucune modification significative de la vitesse de carbonatation pour un remplacement des ciments jusqu'à respectivement 30% et 15%. Malami et al observent un accroissement important de la carbonatation uniquement pour le remplacement de 50% de ciment par de laitier.

Les cendres volantes :

De la même manière que pour l'addition de laitier, Malami et al [23]; observent que, jusqu'à un remplacement de ciment par 15% de cendre volante aucun effet significatif n'est mis en évidence sur le taux de carbonatation. Pour 30%, ce taux est très nettement augmenté.

Papadakis et al. ont aussi étudié l'influence sur la profondeur de carbonatation du béton des cendres volantes, en remplacement du ciment ou des granulats. Les résultats de leur analyse montrent l'influence négative des cendres volantes en remplacement du ciment cette influence est très marquée lorsque l'en dépasse 15%. Le remplacement des granulats par les cendres volantes entraînent un effet opposé mais avec une tendance moindre.

2-3 Types de corrosion de l'armature dans le béton :**2-3-1 Condition particulière concernant la corrosion dans le béton :**

Le béton est fabriqué à partir d'eau, de ciment et d'agrégats minéraux qui constituent après durcissement une structure des agrégats et des matières d'hydratation du ciment, traversée par des pores de différentes longueurs, selon la largeur de ces pores et leurs caractéristiques, on distingue[9] :

- Microspores $\phi \leq 10^{-2} \mu\text{m}$ (1-2-11)
- pores capillaires $10^{-2} \mu\text{m} \leq \phi \leq 1 \mu\text{m}$ (1-2-12)
- bulles d'air $\phi \geq 1 \mu\text{m}$ (1-2-13)

Les pores capillaires et aériens sont relativement larges et peuvent s'assécher, les pores gélatineux de la pâte de ciment sont remplis d'eau, le béton renferme toujours une quantité dans d'eau évaporable et la teneur en eau dans le béton est en équilibre avec l'humidité ambiante.

Une propriété caractéristique du béton est son alcalinité (pH=12), ce caractère basique est du au Ca(OH)_2 qui résulte de l'hydratation du ciment. C'est ainsi que l'eau se trouve dans les microspores et en partie dans les pores capillaires, se sature en Ca(OH)_2 . Les agrégats du béton et les armatures sont enrobées avec une bonne adhésivité dans le gel de ciment, pour cette raison la surface d'un acier dans le béton est entourée directement d'une solution saturée. De telles conditions déterminent une passivation de la surface de l'acier dont la conséquence est la protection anticorrosion des armatures.

2-3-2 Corrosion par formation d'une pile électrochimique :

La dissolution uniforme des armatures du béton n'existe pas, car le béton n'est pas homogène et les conditions électrochimiques ne sont pas les mêmes sur toute la surface de l'acier et des réactions anodiques et cathodiques ne se passe pas dans la même région.

C'est la corrosion piquante qui est importante pour le béton armé, et la corrosion par chlorure. Les aciers enrobés par le béton se corrodent en présence de chlorures, il est évident que tous les ions d'halogène à l'exception des fluorures, sont capables de supprimer la passivation de l'acier dans de petites zones. Il n'est pas possible d'indiquer la limite pour la concentration critique en chlorures du béton qui finalement cause les dégâts de corrosion par chlorures.

2-3-3 Corrosion sous tension (fissuration par corrosion anodique, fragilisation par hydrogène) :

- **fissuration par corrosion anodique :**

La fissuration par corrosion sous tension est une fissuration inter-cristalline ou trans-cristallines des matériaux métalliques. Elle se produit sous tension ou sous l'influence d'un agent de corrosion. Le danger de ce type de corrosion réside dans le fait que le métal se fissure sans dommage extérieur visible.

Un examen de poutres en béton armé âgées de 10ans montrées dans une étable a révélé la présence de nitrates dans le béton due à l'action de NH, les frettes de ces poutres soumises à la traction sur le côté intérieur de la courbure présentaient les fissures typiques d'une corrosion sous tension et se rompaient pendant l'essai de flexion, l'armature était un acier à faible teneur en carbone ($\leq 0.05\%c$).[21,22]

- **Corrosion des armatures aux fissures du béton :**

Les moyens précités de protection anti-corrosive de l'armature dans le béton s'appliquent à un béton sans fissure. Des constructions en béton armé habituelles révèlent, en état de service des fissures dans le béton allant jusqu'à l'armature, ceci est dû au fait que le béton par opposition à l'acier qui doit supporter la tension ne se déforme pratiquement pas sous l'effet de la traction. Les fissures formées laissent pénétrer des gazes corrosifs de l'atmosphère qui causent une carbonatation des bords des fissures. L'attaque par corrosion de l'armature dépend de leur largeur, car on constate une réalcalinisation des fissures dans le cas où celles-ci sont remplies d'eau. Pour démontrer l'influence de la largeur des fissures sur la corrosion des armatures du béton armé, des essais ont été réalisés sur une importante série de poutres fissurées en béton armé exposées à des conditions climatiques différentes, qu'ils ont pu constater que pour les largeurs de fissures $< 0.1\text{mm}$, l'armature n'était atteinte que très rarement et même dans ce cas faiblement par la corrosion [9].

2-4 Facteurs influents sur la corrosion des armatures :

2-4-1 Influence de l'enrobage de béton sur la corrosion des armatures :

- **Structure et description de l'interface entre l'acier et le béton :**

Avant d'être placé dans le coffrage, une armature est exposée à l'atmosphère. Elle est ainsi recouverte d'une rouille qui est assez poreuse. Lorsque le béton frais est versé autour de cet acier, la réaction entre l'eau de gâchage et cet acier se résume de la façon suivante. L'eau de gâchage du béton pénètre par capillarité à travers les pores de la rouille présente sur l'acier. Elle forme dans ces pores, des cristaux de ferrite de calcium hydraté ($4.CaO.Fe_2O_3.13H_2O$). L'hydroxyde ferreux $Fe(OH)_2$ peut aussi se déposer en couche assez fine sur l'acier. Tous ces produits donnent un PH élevé à la solution interstitielle. La présence de gypse favorise la formation de sulfoferrites de calcium hydraté. Au contact de la couche de rouille d'origine atmosphérique, l'hydratation du ciment est perturbée. Ceci se traduit, dans cette zone, par une plus faible résistance mécanique de cette pâte de ciment. Au-delà de cette zone de transition,

le béton a des caractéristiques plus homogènes. Ainsi, l'interface entre le béton sain et l'acier comporte des couches superposées[1,5,8]:

- A une distance de l'ordre du millimètre de l'interface géométrique, se trouve le béton non perturbé par la présence du métal ;
- au niveau de la rouille formée sur l'acier lors de son stockage préalable, le ciment n'a pas les propriétés du béton voisin. Il s'agit d'une zone épaisse de quelques dizaine de micromètre qui assure une transition au niveau à la fois des propriétés mécaniques et des microstructures ;
- au contact direct de l'acier se forme une couche, de l'ordre du millimètre, qui est très liée à la passivation du métal, dans le béton sain.

Ces différentes couches s'étudient soit directement, par observation et identification au microscope électronique, soit par des mesures indirectes, par exemple de type électrochimique.

Les produits au voisinage de l'acier dans le béton dépendent de son état de corrosion. Si cet acier est passivé, aucun produit à base de fer, autre que la rouille formée lors du stockage antérieur, n'est présent. Cette armature peut être recouverte de produit blanc à base de ferrite et d'hydroxyde de calcium.

L'eau de gâchage du béton permet de former autour d'un acier des produits, tels que la ferrite de calcium hydratée, qui passive ce métal.

Ainsi dans un béton sain et le plus fréquemment, les aciers sont protégés contre la corrosion, sauf si la solution interstitielle a disparu(cas des grandes fissures qui atteignent les armatures) ou ne correspond plus à un béton sain.

Plus l'acier est corrodé, plus épaisse est la couche de produits de corrosion. Les produits à base de fer se mêlent aux constituants du ciment et remplissent les pores. La nature de ces produits dépend des causes de la corrosion. Par exemple, si cette corrosion est due à une forte teneur en chlorure dans le béton, en plus des produits usuels, de l'alkaganeite (β -FeOOH) peut être présente.

- **Caractérisation de l'interface à l'aide d'essais électrochimique :**

Les produits formés sur un acier enrobé de béton ne peuvent être analysés qu'après destruction de l'enrobage. Des méthodes non destructives, indirectes ont été mises au point pour étudier ces produits. Ainsi, les essais de polarisation par mesure d'impédance

électrochimique ou en courant continu permettent de caractériser l'interface entre l'acier et le béton.

Une impédance électrochimique est représentée par un ensemble d'élément électrique classique (capacité, résistance) ou particuliers (élément de diffusion de Warberg). La figure

- **La formation de rouille sur les armatures :**

La corrosion avec formation de rouille des armatures dans le béton comporte deux étapes; dans un premier temps les éléments agressifs contenus dans le milieu environnant de béton pénètre dans celui ci. C'est le stade d'incubation. La seconde étape commence lorsque ces corps agressifs se trouvent dans des concentrations assez forte au niveau des armatures. Elle correspond à la croissance de la rouille, qui peut ensuite faire éclater le béton d'enrobage.

Ainsi, pour décrire la corrosion des aciers dans les bétons, il convient de préciser les deux points qui sont, d'une part, la pénétration des agents agressifs à travers l'enrobage du béton et, d'autre part, les conditions de dépassement de ces matériaux métalliques et leurs vitesses d'enrouillement.

2-4-2 Rôle de l'humidité :

Les réactions de corrosion ne se produisent qu'en présence d'une solution qui est ici contenue dans les pores du ciment durci. Cette solution peut s'évaporer puis rentrer dans le béton dans les zones proches de la surface. Par contre, à cœur pour une profondeur supérieure à 35 mm en général, le béton reste saturé d'eau.

Par ailleurs, la composition de cette solution dépend fortement des agents qui ont pu entrer dans le béton et l'altéré. La pénétration des gaz est plus rapide si le béton n'est pas saturé de liquide.

Ainsi, l'humidité du béton influe de deux façons sur la corrosion ou la passivation des armatures. En premier lieu, si l'humidité du béton est faible, la pénétration de certains gaz est facilitée. Par contre, la corrosion des armatures ne se produit qu'en présence de liquide.

2-4-3 Influence de la teneur en chlorure (seuil critique):

Les chlorures présents dans le béton peuvent soit être introduits lors du gâchage, soit provenir du milieu environnant. Le cas considéré ici est celui des ions chlorures venant du milieu extérieur et pénétrant dans le béton durci; la teneur en chlorures non liés par réaction

chimique est assez élevée et elle augmente au cours du temps au niveau d'une armature. Selon Hausmann la teneur critique est donné par: $[Cl^-]_{cr} = 0.6 [OH^-]$. [1,7]

La validité de la notion de seuil critique est fondée sur des études qui ont caractérisé la corrosion du fer dans un milieu basique contenant des chlorures. Il apparaît que lorsque le rapport $[Cl^-] / [OH^-]$ est inférieur à 1, les chlorures n'ont pas d'effet sur cette solution qui reste donc stable. Dès que le rapport $[Cl^-] / [OH^-]$ devient supérieur à 1, la solution est instable : elle devient plus acide. Ces instabilités correspondent à la formation de produits de corrosion et les principaux résultats de ces études sont les suivants: [5,9]

Sur le plan pratique, il apparaît que si un acier est préalablement protégé par un revêtement passivant, cette protection est altérée par l'introduction de trop de chlorure autour du métal. Il se produit alors une dépassivation dont le mécanisme se résume ainsi.

Dans un premier stade de la corrosion, c'est-à-dire que lorsque le fer commence à se dissoudre, il se forme d'abord de l'hydroxyde ferreux $Fe(OH)_2$ ou le fer est divalent (Fe^{II}). Ensuite ce corps se transforme en des produits qui ont une couleur verte, dits rouilles vertes, et qui ne sont stable qu'en l'absence d'oxygène. Ces rouilles vertes comportent à la fois du fer divalent (Fe^{II}). La formule de composition de la rouille verte formée en présence de chlorure est $[Fe^{II}_3 Fe^{III}(OH)_8]^+ . [Cl.H_2O]$. Au niveau de la structure cristalline, l'ion chlore est inclus dans la maille de la rouille verte.

Par oxydation, cette rouille verte se transforme en composés plus fréquent, dans lesquels le fer est trivalent, qui sont la lépidocrocite ($\gamma FeOOH$), la goethite ($\alpha - FeOOH$), l'akaganeite ($\beta - FeOOH$) ou la magnétite (Fe_3O_4) et dont la nature dépend de la teneur en chlore et d'autres facteurs tel que la température.

Ces transformations des produits de corrosion formés en présence de chlorures expliquent les constatations pratiques suivantes :

- La corrosion des armatures sous une chape d'étanchéité se produit en l'absence d'oxygène. Dans ce cas, les produits de corrosion sont de couleur très sombre et sont mous. Ceci correspond à la transformation de la rouille verte en magnétite ;
- Lorsque les produits de corrosion sont assez épais, ils se forment des strates ou la teneur en chlore est variable. Ceci correspond aux diverses transformations de la rouille verte. En effet, à cause des transformations de la rouille verte, les ions chlores sont en grand partie éjectés de la structure cristalline et se trouvent à l'état dissous dans la solution ;

La teneur en chlorure dans le béton au voisinage d'une armature se corrodant est plus élevée qu'ailleurs. Ceci correspond, comme indiqué ci- dessus, à la sortie des ions chlores hors des

produits de corrosion, laquelle produit ainsi une sorte de recyclage dans le processus de corrosion du fer.

L'étude thermodynamique de cette rouille verte a permis de définir son domaine d'existence dans le diagramme de Pourbaix (figure 1-6). La rouille verte due aux chlorures est stable à des PH de l'ordre de 7 ou de 9. Ceci n'est pas en contradiction avec le fait qu'un béton à un PH de l'ordre de 12, mais pollué par des chlorures, peut provoquer la corrosion des armatures. En effet l'expérience a montré qu'une telle solution provoque une dépassivation de l'acier si sa teneur en chlorure est assez élevée, parce que la partie de cette solution est instable.

Son PH tend spontanément vers des valeurs plus faibles. Ainsi, la dépassivation des aciers par les chlorures dépend du rapport $[Cl^-] / [OH^-]$. Ceci entraîne que:

- Cette dépassivation ne se produit pas si l'alcalinité du milieu est suffisamment élevée. Ceci revient à dire, en terme pratiques, que l'armature ne se corrode pas si la réserve d'alcalinité du béton est suffisante pour annihiler l'effet des agents agressifs ;
- Dans un milieu dont le PH est inférieur à 9.5 environ, la teneur critique en chlorure est de l'ordre de grandeur de la concentration en chlorure dans une eau potable, ainsi, la corrosion des armatures dans un béton carbonaté se fait même en absence de chlorure.

2-4-4 Effet de l'oxygène :

L'oxygène dissous dans un liquide aqueux joue un rôle primordial dans la réaction dite cathodique de la corrosion des aciers :



Ainsi, plus la teneur en oxygène est élevée, plus grande est la vitesse de cette réaction, laquelle vitesse égale à celle de la dissolution du métal.

Parallèlement, plus la teneur en oxygène est élevée, plus le potentiel mixte du métal se rapproche de la valeur correspondant à la réduction de l'oxygène. En d'autres termes, ce potentiel mixte se déplace vers les valeurs plus positives.

Par ailleurs, l'oxygène a aussi un autre effet dans la corrosion des matériaux à base de fer en présence de chlorure ou de carbonate. En effet, dans ces cas, les produits intermédiaires de

corrosion ne sont pas stables. Ils se transforment en produits non passivants et relâchent un peu de chlorure dans le liquide.

2-4-5 Influence de la carbonatation :

Le dioxyde de carbone provenant du milieu entourant le béton, peut pénétrer dans celui-ci. Cette pénétration est beaucoup moins rapide dans les pores remplis de liquide que ceux qui sont *vide*. Ce gaz peut réagir avec le liquide interstitiel du ciment et former du carbonate de calcium CaCO_3 à partir de $\text{Ca}[\text{OH}]_2$. Cette réaction diminue le PH de la solution interstitielle qui atteint alors des valeurs de l'ordre de 9.

Dans un tel béton, qui n'est pas totalement sec, une armature peut se corroder selon un processus analogue à celui de la corrosion en présence de chlorures. Le produit intermédiaire est une rouille verte dans la composition est $[\text{Fe}^{\text{ii}}_4\text{Fe}^{\text{iii}}_2(\text{OH})_{12}]^{+2} \cdot [\text{CO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}]^{-2}$. Le domaine d'existence dans le diagramme de Pourbaix est presque superposé à celui qui correspond aux chlorures. Les produits finals sont ceux de la rouille classique ou ceux dus à la corrosion en présence de chlorure, à l'exception de l'alkageneite($\beta\text{-FeOOH}$)[5]. Lorsque le béton carbonaté est pollué par des chlorures, l'expérience a montré que c'est la rouille verte due au carbonate qui est la plus stable et qui se forme périodiquement.

2-4-6 Influence d'autres agents agressifs :

L'eau qui entoure le béton ou pénètre par intermittente dans celui –ci peut contenir divers sels. Ceux-ci contribuent à la formation des produits de corrosion de l'acier enrobé. C'est ainsi, par exemple que les sulfates réagissent comme les chlorures au niveau qualitatif. Une rouille verte peut se former en l'absence d'oxygène. Celle ci peut ensuite se transformer en produits classiques en relâchant les sulfates solubles. Mais au niveau quantitatif, l'effet des sulfates reste négligeable.

En pratique, sauf en cas de pollution d'origine industrielle, seul les chlorures et le dioxyde de carbone sont les facteurs de dépassivation des aciers dans le béton.

2-4-7 Effet de la corrosion des armatures sur leur adhérence :

Dans un béton sain la rupture d'adhérence d'une armature lisse se situe au niveau de la zone de transition, à quelques microns de l'interface acier-béton. Pour une armature nervurée ou pour les fils toronés, cette rupture d'adhérence se localise au sein du béton. Lorsque la

couche de rouille sur l'acier s'épaissit du fait de la corrosion métallique, une perte d'adhérence peut se produire.

D'une façon générale les produits de corrosion ont une masse plus élevée que le métal qui leur donne naissance. Si de plus ces produits sont poreux et rigides, comme c'est le cas de la rouille usuelle sur les armatures, ils sont plus volumineux que le métal et exercent une pression sur le béton d'enrobage. selon la géométrie (épaisseur d'enrobage, diamètre des armatures et les caractéristiques mécaniques du béton, celui ci peut soit se fissurer longitudinalement à l'aplomb de l'acier, soit se détacher (épaufrure) comme l'indique la figure (2-8) [5]:

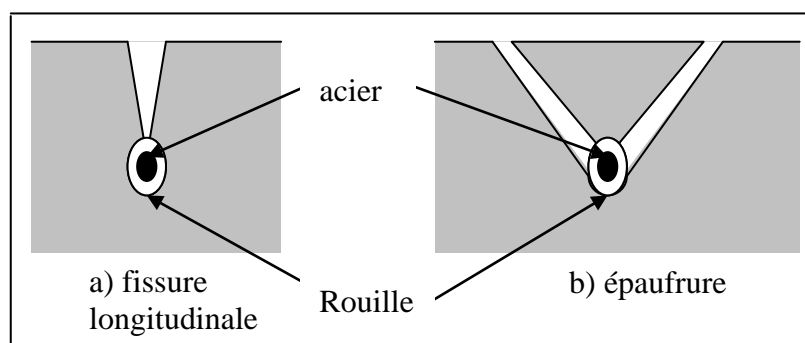


Fig 2-8: Eclatement d'un enrobage à cause du gonflement de la rouille.[5]

CHAPITRE 3

Localisation et protection des aciers dans le béton

3-1 Introduction:

Pour établir le diagnostic de l'état de conservation d'un ouvrage en béton armé, il convient d'évaluer l'étendue des désordres qui sont parfois visibles sous forme de fissures. Toute fois la corrosion peut avoir commencé dans les zones voisines sans avoir provoqué de désordres visibles. Les méthodes utilisées sont des méthodes non destructives, applicables sur site.

Pour réduire ou effacer la corrosion des armatures d'acier, différentes solutions et agents anticorrosion sont proposés.

3-2 Les méthodes utilisées:

Plusieurs méthodes sont utilisées pour la localisation des armatures corrodées :

3-2-1 La radioscopie ou la radiographie:

Elle permet de détecter les armatures sous des enrobages épais. Elle permet de localiser les armatures, détecter les vides et les ruptures franches d'acier de diamètre important.

Pour notre travail, nous avons utilisé un radioscope de laboratoire, il est assimilé à une radiographie applicable sur site.

3-2-2 L'écho d'impact:

Un impact provoqué par un marteau spécial placé à la surface du béton. Cet impact est renvoyé vers cette surface par des discontinuités telles que les armatures. Cet impact est analysé et permet ainsi de localiser la corrosion. Elle permet aussi de détecter les vides et certaines ruptures d'acier.

3-2-3 Ondes électro-magnétiques:

Cette méthode utilise des ondes de très haute fréquence (radar). Son objet est surtout de localiser les armatures.

3-2-4 Rayon infra-rouge:

Les rayons infra-rouges sont émis à travers le béton par les armatures préalablement chauffées. Elle est peu exploitée, son objet est de localiser les armatures et parfois même d'évaluer l'état de chape d'étanchéité placée sur le béton.

3-2-5 Méthode magnétique:

L'appareil est du type magnétique, un électro-aimant mis sous une tension V_0 est placé sur le parement de béton. Cette tension varie lorsque l'appareil s'approche de l'aplomb d'une armature, la variation de cette tension dépend à la fois de la profondeur et du diamètre de l'armature.

3-2-6 Mesure de potentiel d'électrode:

La méthode la plus utilisée pour localiser les zones de corrosion des armatures est de mesurer le potentiel d'électrode. IL s'agit de mesurer la différence de potentiel qui existe spontanément entre une armature et une référence placée sur le parement, à l'aplomb de l'armature, cette méthode s'applique à des aciers au carbone, non alliés et non revêtus.

Lorsqu'une armature se corrode, il apparaît une dissolution dite anodique qui provoque la formation d'électrons qui sont consommées dans les zones dites cathodiques; les courants électriques provoqués par des réactions anodiques et cathodiques sont de signes contraires et sont égaux en valeur absolue. L'électrode de référence est placée à divers endroits sur le parement, elle permet de localiser l'intersection des courbes équipotentielles ente les zones anodiques et cathodiques d'une armature avec la surface du béton assez sec (figure1-3-1).

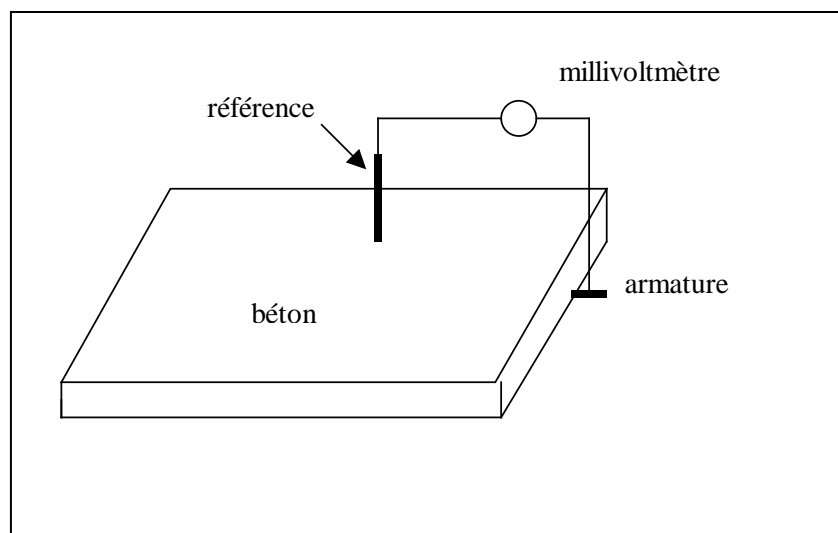


Fig 3-1: Principe de la mesure de potentiel d'électrode.[5, 28]

Par mis les chercheurs qui ont utilisé cette méthode, on cite les travaux de Pierre La Fontaine[28], qui a utilisé le montage illustré à la figure (3-1), il a mesuré l'évolution du potentiel de corrosion et du courant en fonction du temps d'exposition en NaCl pour mesure

par la suite le taux de corrosion. Gagné et Collaborateurs (1993) [26] ont aussi utilisé cette technique pour évaluer le taux de corrosion.

Dans le cas d'un béton immergé, la résistance électrique du béton est très faible. Il n'est plus possible de mesurer des variations de potentiel électrochimique en plaçant une référence simplement à la surface du béton ; cette difficulté a été résolue en utilisant un appareil qui est représenté sur la figure (3-2), qui permet de chasser l'eau du béton qui se trouve ainsi dans les conditions atmosphériques.

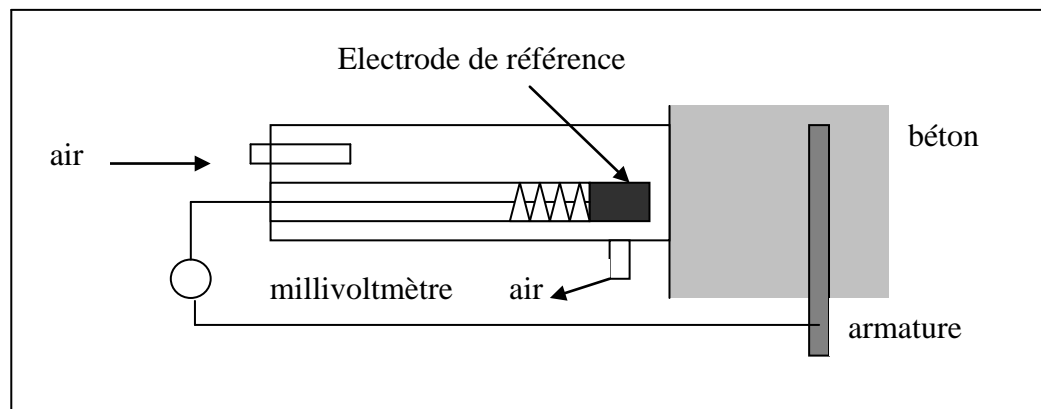


Fig 3-2: Dispositif permettant de mesurer le potentiel d'électrode des armatures dans le béton immergées.[5]

3-4 Résistivité électrique du béton :

Les mesures de résistivité se font de préférence dans les endroits sans armatures, pour éviter toutes perturbations. Ces mesures servent à localiser les zones de forte humidité ou à forte teneur en chlorures venant du milieu environnant qui correspond aux plus faibles valeurs de la résistivité électrique de l'enrobage, il s'agit donc des zones critiques pour la corrosion des armatures.

La méthode la plus répandue pour mesurer la résistivité électrique d'un béton d'enrobage est celle de Wernner, elle utilise un appareil dit à quatre pointes qui est plaqué sur le parement, le courant alternatif I qui à une fréquence comprise entre 50 et 1000Hz est envoyé dans le béton à partir des deux pointes extrêmes. La différence de potentiel V est mesurée entre deux points internes. Le rapport V/I donne la résistance électrique de l'enrobage (voir figure 3-3-a). La résistivité (ρ) est déduite de ce rapport grâce à la formule suivante:

$$\rho = 2 \Pi a V/I \quad (1-3-1)$$

Avec a : la distance entre deux points voisins.

La résistivité peut être mesurée en polarisant une armature à l'aide d'une contre-électrode placée à la surface du béton.(figure 3-3-b).

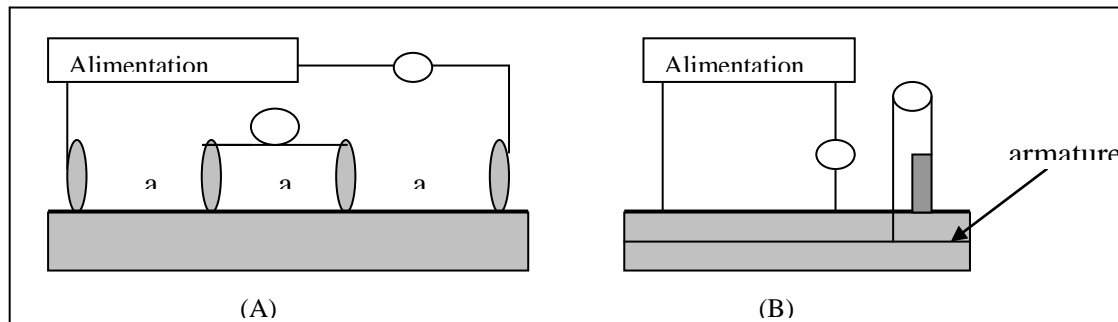


Fig 3-3: Principe de mesure de la résistivité électrique d'un enrobage[5].
(A) par la méthode de Wenner; (B) par polarisation d'une armature.

3-5 La protection apportée par le béton :

Pour améliorer la résistance à la corrosion des armatures, il faut limiter la porosité du béton, il convient d'obtenir un squelette granulaire compact associé à un faible rapport E/C. Le béton obtenu est alors très difficile à mettre en place en absence d'adjuvant plastifiant, qui doivent répondre à certaines exigences pour leur teneur en éléments préjudiciable à la durabilité du béton armé. Il faut aussi utiliser des ciments spéciaux qui ont des teneurs limitées en C_3A et qui permet au béton de bien résister à l'agression des ions chlore[5,29].

3-6 La protection par des revêtements sur l'acier :

Cette protection est régulièrement proposée pour résoudre le problème de la corrosion des armatures :

3-6-1 Utilisation d'armature en acier inoxydable:

Ping Gu et coll.(1996) ont récemment montré que des armatures en acier inoxydable présentent un excellent comportement dans des bétons contaminés par des chlorures, mais le coût de ces armatures est très élevé [27]. Ils ont un module élastique et une résistance à la traction supérieure à celle d'un acier ordinaire. Leur adhérence au béton est cependant plus faible que celle de l'acier ordinaire.

3-6-2 Utilisation d'armature en acier galvanisé:

L'acier est recouvert d'une couche de zinc qui améliore la résistance à la corrosion. Le zinc est alors attaqué au lieu de l'acier, mais au moment où le recouvrement a été consommé, l'acier n'est plus protégé et le processus normal de corrosion reprend [30].

L'utilisation de ces armatures présente quelques inconvénients pratiques :

- Si le recouvrement n'est pas assez épais, il peut se fissurer quand les armatures sont courbées.
- L'acier galvanisé ne doit pas entrer en contact avec l'acier ordinaire, parce qu'une cellule galvanique se forme immédiatement et entraîne une corrosion rapide de l'acier non protégé.
- Il ne peut pas être soudé parce que la protection de zinc s'évapore durant la soudure et les vapeurs de zinc sont souvent nocives.
- Le zinc peut réagir avec de la chaux libre contenue dans le ciment pour produire de l'hydrogène qui peut créer des bulles qui restent piégées sur les armatures et diminuent l'adhérence entre l'acier et le béton.
- Le zinc réagit avec le C_3S pour former un retardateur de l'hydratation de C_3S , cet effet très localisé dans le béton se développe juste autour des armatures. Ce retard de prise peut avoir un effet néfaste sur l'adhérence entre les armatures et le béton.

3-6-3 Utilisation d'armatures recouvertes d'époxy:

L'époxy est un matériau fragile qui adhère mal à l'acier, et comme dans le cas du zinc, dès que le recouvrement disparaît, des zones préférentielles de corrosion apparaissent et l'acier ordinaire peut se corroder très rapidement.

Par ailleurs, la pâte de ciment n'adhère pas très bien aux armatures recouvertes d'époxy.

3-6-4 Utilisation d'armature en fibres de verre:

Ces armatures sont obtenues en collants des fibres de verre avec une résine polyester, elles adhèrent mal au béton et elles ne sont pas ductiles. Leur rupture se produit d'une façon brutale sans que l'on voie se développer des déformations plastiques comme dans le cas des aciers ordinaires.

Les armatures en fibres de verre coûtent plus cher que les armatures d'acier. Cependant, l'utilisation simultanée d'armatures en fibre de verre dans la partie du béton la plus exposée à la corrosion et d'armature d'acier dans la partie la moins exposée peut constituer une solution intéressante pour améliorer la résistance à la corrosion des structures en béton armé.

3-7 La protection par traitement superficiel du béton:

Ces traitements sont appliqués à la surface du béton, et comptent deux grandes catégories. Dans la première, les produits appliqués restent à la surface du béton: ce sont des revêtements. Dans la seconde catégorie, les produits pénètrent dans le béton et l'imprègnent.

3-7-1 Les revêtements :

Les revêtements ont pour but d'assurer une imperméabilisation soit à l'eau, soit aux gaz. Il s'agit de chape et de revêtement épais de résine.

3-7-2 Imprégnation par des produits hydrophobes:

Le traitement d'un enrobage par imprégnation avec un produit hydrophobe consiste à introduire dans les pores de ce béton un produit organique à base de silice; qui empêche l'adsorption et la pénétration par capillarité de l'eau. Mais au niveau des armatures, la composition de la solution interstitielle n'est pas changée.

3-7-3 Les inhibiteurs:

Les inhibiteurs de corrosion sont de produits relativement nouveaux, les inhibiteurs les plus utilisés sont du type *adjuvant* (utilisé comme adjuvant au béton), et du type *migrateur* (produits qui s'appliquent sur une surface de béton durcie et qui pénètrent jusqu'aux aciers).

Pierre La Fontaine a utilisé la méthode électrochimique pour évaluer la performance des inhibiteurs du type adjuvants [31]; il a constaté que l'utilisation des ces inhibiteurs retarde l'apparition de la corrosion, pour le béton témoin la corrosion débute après 35 semaines alors qu'elle est retardée à 80 semaine lorsque l'adjuvant est utilisé.

H.Justnes a utilisé les nitrates de calcium $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ qui sont du type adjuvant comme inhibiteur de corrosion, il a remarqué que l'introduction de 2 à 4% de cet inhibiteur dans la pâte de ciment offre une bonne protection à l'acier contre les chlorures venant du milieu extérieur ou se trouvant à l'intérieur du béton [31].

3-8 La protection cathodique des aciers:

Le dernier moyen de protéger les armatures est la protection cathodique. Elle permet d'arrêter la corrosion grâce à l'application d'une polarisation qui abaisse le potentiel des aciers. Elle consiste à abaisser en tout point de l'armature le potentiel de ce métal jusqu'à une

valeur dite potentiel de protection, qui est telle que la vitesse de corrosion de l'acier devient négligeable. La protection cathodique vise à empêcher toute dissolution métallique, et restaurer la couche protectrice (passivation) autour du métal.

L'abaissement de potentiel est obtenu en imposant le passage d'un courant électrique qui va de l'enrobage vers l'armature, la polarisation est souvent obtenue grâce à une alimentation à basse tension, dont le pôle négatif est relié à l'armature et le pôle positif à une anode placée à la surface du béton d'enrobage; ce procédé est actuellement normalisé (A05-612)[5,27].

3-9 L'extraction des chlorures du béton:

Une polarisation électrique assez forte est appliquée pour que des ions dissous dans la solution interstitielle du béton, puissent se déplacer. Les anions, chargés négativement vont de l'armature vers l'anode. Le profil de teneur en chlorure dans le béton est alors modifié. Ainsi surtout, la teneur en chlorure au voisinage de l'armature peut être inférieure au seuil qui provoque la corrosion métallique.

Ce traitement peut avoir des effets secondaires non désirables s'il est appliqué trop brutalement, la porosité du béton peut être augmentée, ce qui le rend plus susceptible à la pénétration des agents agressifs.

A cause de ces risques, le traitement d'extraction des chlorures est limité dans le temps, mais il est répété plusieurs fois dans la vie de l'ouvrage. Après chaque traitement, une imprégnation peut être appliquée pour diminuer la porosité du béton.

3-10 Réalcalinisation du béton:

Une polarisation électrique assez forte est appliquée pour provoquer autour de l'armature une réaction qui augmente le PH du béton, cette polarisation permet à une solution, qui au départ entoure l'anode, de traverser le parement du béton et augmenter le PH du béton à cet endroit.

Ainsi, deux zones du béton sont réalcalinisées, l'une est autour d'armatures, alors que l'autre est près du parement. Si l'enrobage est mince et le traitement est bien conduit, ces deux zones se rejoignent.

S'il est mal conduit, ce traitement peut avoir des effets secondaires non désirables analogues au cas de l'extraction des chlorures du béton.

3-11 Réparation des bétons éclatés:

De nombreux moyens existent pour réparer les bétons éclatés par corrosion des armatures autres les inhibiteurs ou passivants cités ci dessus. La réparation fait appel à des mortiers de réparation qui sont les suivants:

a) Polymère thermodurcissable (résine) :

Dans ces produits de réparation, 30% du volume du mortier est en général à base de sable siliceux; le polymère appartient à l'un des trois types suivants [5,26]:

- **Polyester:**

Ces résines sont peu utilisées du fait que leur coefficient de dilatation thermique est 4 à 9 fois supérieure à celui du béton [26].

- **Polyuréthanes :**

Ils ont des propriétés mécaniques adaptables en fonction de nombreuses possibilités de combinaisons, ce qui accroît leur champ d'application ; par contre, ils sont peu adhérents aux supports humides.

- **Epoxydes:**

Leurs polymérisations forment un maillage tridimensionnel très résistant. Les avantages de ces produits sont le gain d'une haute résistance mécanique en un temps très court, une forte adhérence, une bonne résistance à l'abrasion et aux agents chimiques. Ces mortiers ne subissent pas de retrait.

Leurs inconvénients sont; un coefficient de dilatation 2 à 3 fois celui du béton; une forte sensibilité à la température, leurs sensibilité à l'eau pendant la polymérisation, leurs prix élevé et leurs toxicité[27]. De plus, elles ne peuvent être appliquées à basse température et la tolérance sur le dosage est faible. Vis-à-vis de la corrosion, la protection préalable des armatures s'impose, car bien que la résine soit imperméable, les polluants peuvent continuer à s'introduire par le béton avoisinant et le milieu reconstitué n'a plus de caractéristiques de PH alcalin facilitant la passivation des armatures.

b) Liant hydraulique avec résine miscible:

Ces polymères sont en poudre ou en suspension dans l'eau, ils sont des résines thermoplastiques. Grâce à leurs petites tailles, ils s'intègrent dans la matrice ciment et confèrent à la réparation une bonne adhérence[5,26].

Ce sont l'acétate de polyvinyle, les copolymères vinyliques et les copolymères acryliques.

Vis-à-vis de la corrosion, ce type de réparation a le mérite de reconstituer un milieu de PH alcalin, facilitant la passivation des armatures.

CHAPITRE 4

Procédés expérimentaux

4-1 Matériaux utilisés:

4-1-1 Ciment:

Le matériau utilisé est un CPJ45 provenant de la cimenterie de **Mefteh**.

Les résultats de l'analyse de ce ciment sont illustrés dans le tableau suivant:

Elément	SiO ₂	AlO ₃	FeO ₃	CaO	MgO	CAO (libre)	SO ₃	P.F	Insoluble
%pondérale	19.48	5.06	3.72	61.95	0.85	1.63	1.1	3.44	1.26

Tableau 4-1: Composition chimique du ciment.

4-1-2 Granulats:

➤ **Le sable:**

Le sable utilisé est un sable de rivière, son module de finesse est égal à 2.93.

Avant le lavage, l'équivalent de sable était de $E_s=87.5\%$, nous avons donc décidé de le laver avant de l'utiliser.

➤ **Le gravier:**

Le gravier utilisé est issu de la carrière Jobert, c'est un gravier concassé de classe 3/8.

Caractérisation de granulats:

➤ **Analyse granulométrique:** (NF P18-560)

Elle permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles des grains constituant l'échantillon.

La courbe granulométrique de chaque famille de granulats est représentée sur la figure (4-1).

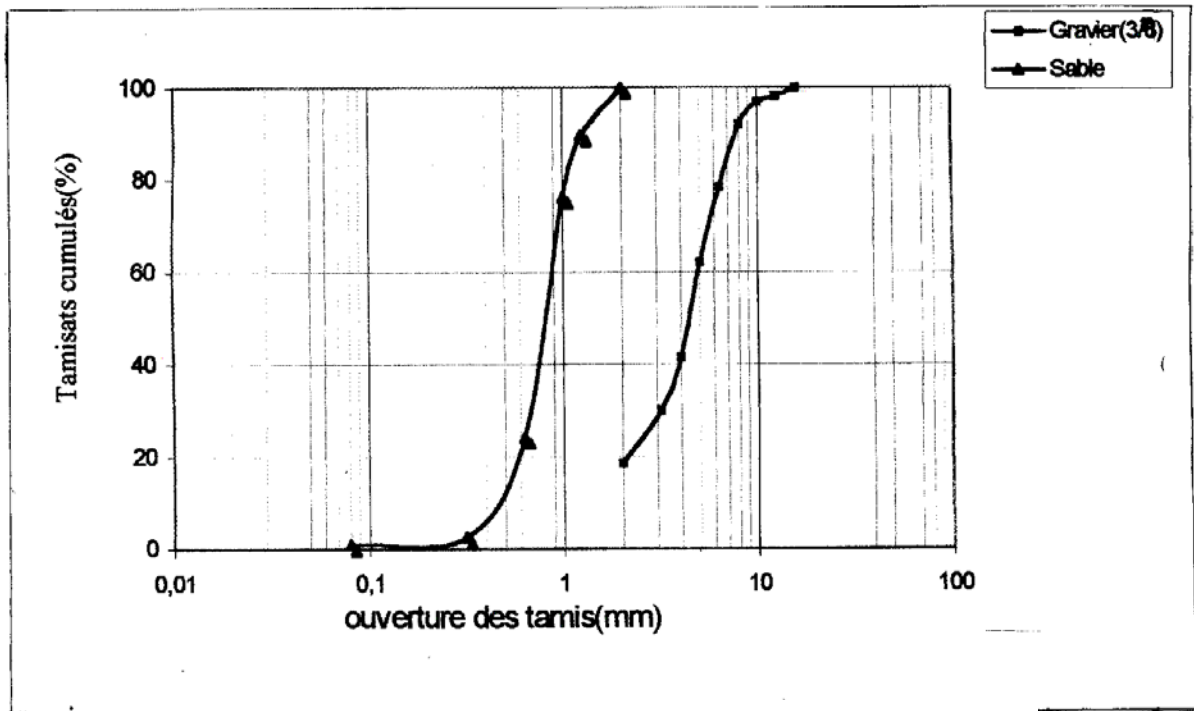


Fig 4-1 : Courbe granulométrique des différentes classe de granulats

➤ **Essai de porosité:**

Toutes les roches présentent des fissures ou des petits vides, certaines cavités communiquent avec l'extérieur, elles constituent la porosité ouverte. Dans notre cas; la pénétration des agents agressifs à travers ces fissures joue un rôle important dans la corrosion des armatures, donc l'essai de porosité est d'un intérêt majeur. Pour les granulats, on exprime la porosité ouverte par la capacité d'absorption massique donnée par la formule suivante:

$$P\% = \frac{M_1 - M_0}{M_0} \times 100 \quad (2-4-1)$$

Avec: M_1 est la masse du matériau à l'état saturé d'eau.

M_0 est lamasse du matériau à l'état sec.

Selon la norme NF P 18-301: la porosité des agrégats doit être inférieure à 5% pour les bétons des résistances élevées.

Pour le gravier d classe 3/8, nous avons trouvé une valeur de 2.47, donc un gravier très compact.

4-1-3 Acier:

L'acier utilisé provient du complexe de HADJAR, le tableau résume l'analyse spectrométrique des aciers.

Produits moyen	C%	Mn%	Si%	P%	S%	Cr%	Ni%	MO%	Cu%	Ceq%
φ 06 mm	0.11	0.60	0.06	0.013	0.012	-	-	-	-	0.230

Tableau 4-2: Résultats d'analyses spectrométriques.

Essai sur acier:

Les essais de traction réalisés sur trois échantillons de ronds à béton ont révélé les caractéristiques mécaniques (limite élastique, résistance à la rupture et allongement) suivantes:

Les résultats sont récapitulés dans le tableau suivant:

Limite élastique (N/mm ²)	Résistance/rupture (N/mm ²)	Allongement%
250.80	360.60	31.33
230.30	310.80	33.40
283.60	394.10	30.66

Tableau 4-3: Résultats d'essais de traction pour les φ 06.

4-2 Les éprouvettes d'essais:**4-2-1 Formulation d'une composition optimale du béton:**

Nous avons utilisé la méthode de Dreux-gorisse, ceci nous a conduit à la composition suivante:

- Un ciment de type CPJ avec un dosage de 400Kg/m³.
- Un rapport eau / ciment de 0.5.
- Un pourcentage respectif de sable et de gravillons a utilisé pour le mélange: 38% de sable qui correspond à 614.5Kg/m³ et 62% de gravillons qui correspond à 1040.05Kg/m³.

4-2-2 Malaxage du béton:

Pour fabriquer le béton, on introduit les constituants dans la cuve dans l'ordre suivant: Les gros granulats, liants, sable. Après un malaxage à sec de l'ordre de 1 mn, on ajoute l'eau, le malaxage est alors poursuivi pendant 2mn. Après le malaxage, on remplit les moules à raison de deux couches, la vibration du béton a été effectuée à l'aide d'une table vibrante. La surface du béton a été arasée à l'aide d'une truelle, les éprouvettes sont ensuite maintenues dans des moules pendant 24 heures. Après démoulage, les éprouvettes sont pesées et conservées dans l'eau à 20°C jusqu'à la date d'essai.

4-2-3 Type et dimensions des éprouvettes:

Nous avons d'abord pensé étudier la corrosion à partir d'éprouvettes sollicitées en flexion simple sous un chargement réel, immergées dans une solution agressive. Les calculs conduits à ELS sont les suivants:

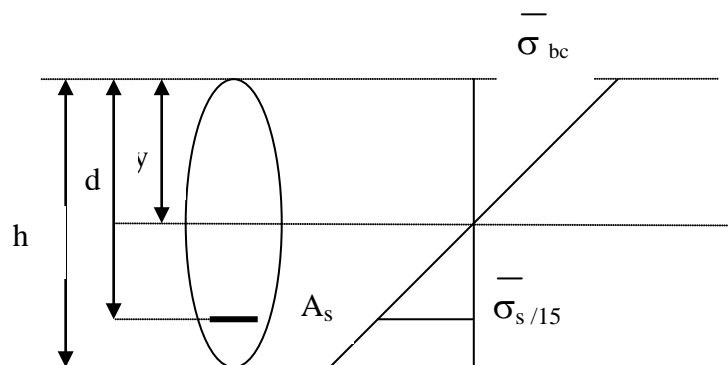


Fig 4-2: Section en flexion simple[32].

$$A_{ser} = M_{ser} / d(1 - \alpha/3) \sigma_s \quad (2-1-2)$$

$$\alpha = 15 \sigma_{bc} / (15 \sigma_{bc} + \sigma_s) \quad (2-1-3)$$

Pour la section d'acier A_s de 2.26cm^2 , la charge F appliquée pour maintenir la fissure ouverte est égale à 126 kN.

Pour avoir une fissure de 1mm, il est nécessaire d'appliquer une charge F de 126 kN, vu l'impossibilité de réaliser cette opération, nous avons choisi d'étudier des fissures artificielles (entailles) allant jusqu'à l'armature. A ce moment là, il n'était plus utile d'utiliser de grandes éprouvettes. Nous avons donc opté pour des raisons de manutentions les éprouvettes de $7 \times 7 \times 28$, les barres utilisées comme armatures doivent être plus égale au $1/10$ de l'épaisseur de l'élément. [32]

$$\phi \leq a / 10. \text{ on prend : } \phi = 6\text{mm. et un enrobage: } C = 1\text{cm, } 3\text{cm.}$$

Les éprouvette sont armées avec deux barre de ϕ_6

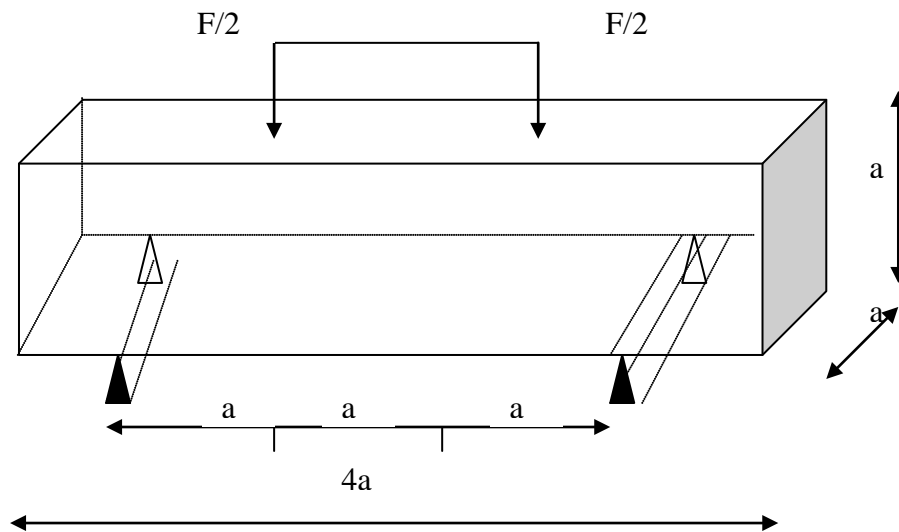


Fig 4-3: Eprouvette ($7 \times 7 \times 28$) cm ferrillées et entaillées.

Les essais de corrosion portent sur deux séries d'éprouvettes armées:

- La première se compose de six éprouvettes sans entaille.
- Dans la deuxième série, nous considérons trois types d'échantillons entaillés de même rapport profondeur d'entaille sur hauteur de l'éprouvette (b/a) représenté sur la figure (2-1-3). Nous avons gardé la profondeur d'entaille constante, nous avons fait varier l'ouverture de cette fissure ; nous avons adopté les ouvertures de 1mm, 2mm et 4 mm et une profondeur de 30mm.

Ceci nous a amené au programme expérimental suivant:

- Le premier type se compose de neuf éprouvettes portant chacune une entaille d'une ouverture de 1mm et un enrobage de 1cm, et de neuf éprouvettes portant chacune la même ouverture d'entaille et un enrobage de 3cm; ces éprouvettes sont nommées respectivement E_{11} et E_{13} .
- Le deuxième type se compose de neuf éprouvettes portant chacune une entaille d'une ouverture de 2mm et un enrobage de 1cm, et de neuf éprouvettes portant chacune la même ouverture d'entaille et un enrobage de 3cm; ces éprouvettes sont nommées respectivement E_{21} et E_{23} .
- Le troisième type se compose de neuf éprouvettes portant chacune une entaille d'une ouverture de 4mm et un enrobage de 1cm, et de neuf éprouvettes portant chacune la même ouverture d'entaille et un enrobage de 3cm; ces éprouvettes sont nommées respectivement E_{41} et E_{43} .

Les entailles sont réalisées dès la mise en place du béton à l'aide des plaques en aluminium fixées en haut du moule, ces plaques ont une épaisseur de 1mm, 2mm et 4mm, le moule est représenté sur la figure (4-4):

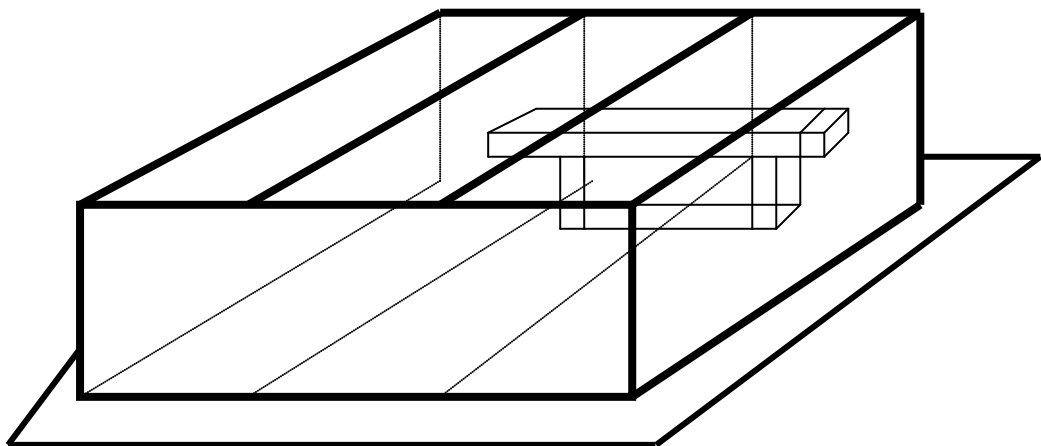


Fig 4-4: Moule (7x7x28) muni d'une entaille

On a préparé aussi des éprouvettes témoins sans entailles qui n'ont pas été immergées dans les différentes solutions de NaCl, pour comparer les résultats d'essais.

4-2-4 Conservation des éprouvettes:

La corrosion est un phénomène très long,; dans le cadre de ce magister, nous n'avons pas suffisamment le temps pour l'analyser. Nous avons choisi d'accéléré le processus en immergeant les éprouvettes dans les solutions de différente concentration en NaCl. Nos éprouvettes ne sont donc pas exposées à une ambiance agressive ordinaire (air marin) par exemple).

La solution est composé d'eau dans laquelle en fait dissoudre du sel (NaCl), nous avons choisi trois solutions avec différentes concentrations (1N, 2N, 4N); le 1N représente la normalité qui est la concentration du NaCl donnée en g/l simulée à celle qui se trouve dans la méditerranée, et qui a pour valeur 27.2 g/l [5, 12], 2N et 4N représentent les concentrations en NaCl de 2 et 4 fois plus que la normalité 1N.

4-3 Caractéristiques physiques et mécaniques du béton:

4-3-1 Essais sur béton frais:

➤ **Mesure de la consistance:**

La mise en place du béton dans les moules doit pouvoir se faire avec le maximum de facilité d'abord, pour raccourcir le temps de travail nécessaire à la mise en place, ensuite, pour éviter de découvrir au moment du décoffrage un mauvais enrobage des armatures.

Pour notre cas, nous avons utilisé l'essai Vébé dont les résultats sont les suivants:

Classe Vébé	V ₀	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄
Temps à l'essai Vébé	≥31s	30s à 21s	20s à 11s	10s à 5s	≤4s

Tableau 4-4: Classe de consistance Vébé.[33]

Le temps de l'essai Vébé pour notre béton a pour valeur de 20s qui correspond à une classe V₂.

4-3-2 Essai sur béton durci:

➤ **Masse volumique du béton durci:**

La valeur de la masse volumique a été trouvée égale à 2443Kg/m³.

➤ **Module d'élasticité statique:**

Le module d'élasticité statique est déterminé à partir de la courbe contrainte déformation représentée sur la figure (4-5).

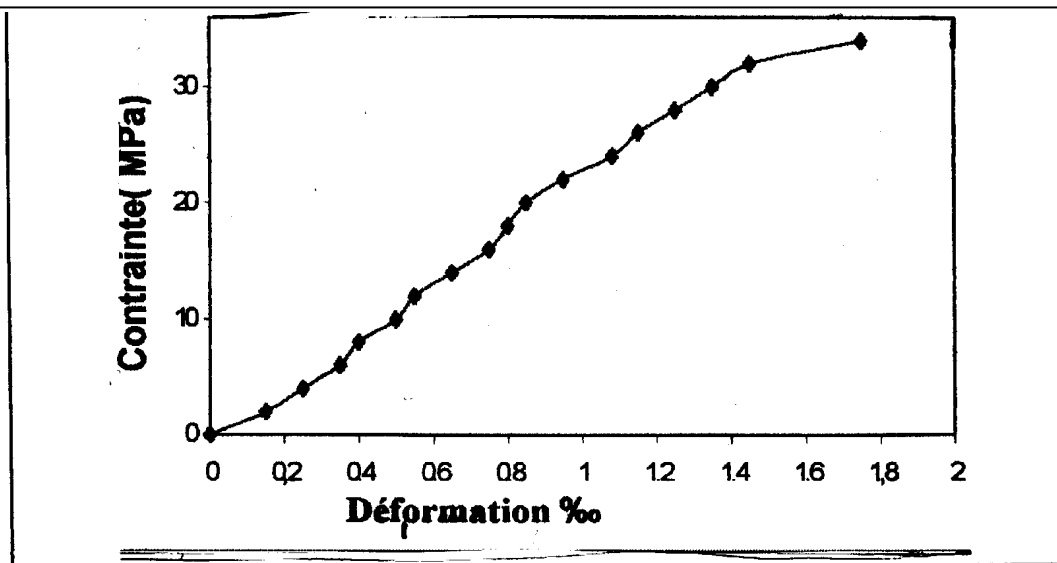


Fig 4-5: Courbe contrainte déformation à 28 jours.

A partir de cette courbe, nous avons trouvé une valeur de module secant égale à 23 GPa

➤ **Mesure de l'absorption capillaire:**

L'essai d'absorption capillaire est réalisé sur une éprouvette de 7x7x28, la mesure se déroule comme suit [34]:

- Scier une face de l'éprouvette et imperméabiliser les autres faces à l'aide de résine d'époxy ou de paraffine.
- Poser l'éprouvette dans un bac de sable saturé sur sa face sciée (voir figure 5-6).
- Mesure ensuite en fonction du temps l'accroissement du poids de l'éprouvette due à la montée capillaire.

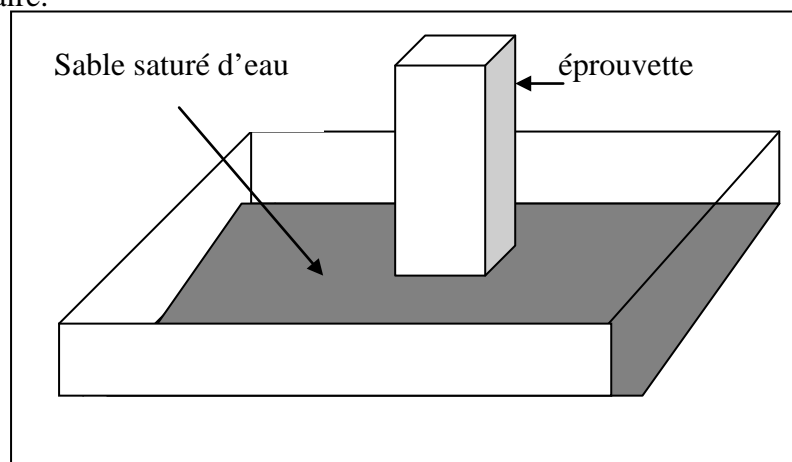


Fig 4-6: Mesure de l'absorption capillaire[34].

L'absorption d'eau est estimée à 72 heures par l'expression suivante:

$$AC = \frac{100P}{S\sqrt{t}} \quad (2-4-5)$$

Ou: P : poids d'eau absorbée en g.

S : surface de la face sciée en cm².

t : temps en heures (t=72 heure).

Le résultat de mesure a donné une valeur 11.06%, qui correspond à un béton peu perméable.[12]

4-4 Analyse de la corrosion:

La corrosion est généralement quantifiée par la perte de masse du métal étudié qui conduit dans le cas du béton armé à une diminution du diamètre de la barre. Nous avons choisi le radioscope pour mesurer cette perte de masse.

Ces essais sont effectués à l'aide d'un radioscope du laboratoire de traitement d'image au centre de recherche et de contrôle de Chéraga.

Le radioscope est un système de contrôle à rayon X pour de échantillons de l'industrie Il est fortement utilisé dans le contrôle de soudage, en industrie électronique, en industrie automobile et en aéronautique. Cet équipement se présente ou deux unités, la première est la chambre à rayonnement et l'ensemble de support de la pièce, la deuxième est l'unité de commande et le PC d'acquisition et le traitement de l'image.

L'analyse avec l'unité se base sur le spectre continue du faisceau de rayon X issu d'un générateur avec un cible en Tungstène. La tension d'acquisition du tube générateur peut être variée de 10 à 160KN.

Sur le schéma de la figure suivante on décrit le composants les plus importants du systeme synoptique de la chaîne de radioscopie.

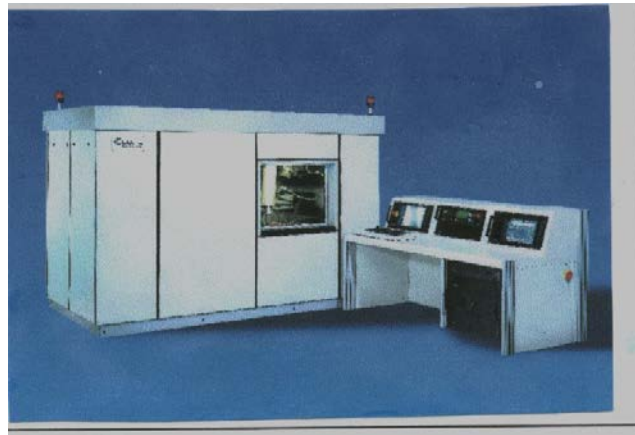


Fig 4-7: Chaîne de radioscopie Fein Focus (Allemagne).

On distingue donc quatre parties importantes dans cet équipement, le générateur de rayons X, le détecteur et convertisseur de rayonnement, le système de mouvement de l'échantillon et le système d'acquisition et de traitement d'image.

Le générateur étant l'élément fondamental, il est composé d'un tube sous vide ou un filament émet des électrons qui, sous une tension élevée sont accélérés et bombardent une cible composée d'un élément connu, dans le cas de ce système il s'agit du Tungstène. Le faisceau de rayon X émis est du à l'effet physique de freinage des électrons, ce qui forme le spectre continue et à l'effet des transitions radiatives des électrons des couches profondes des atomes de la cible. Cette dernière donne des raies caractéristiques qui dépendent principalement de l'atome qui forme la cible.

On dépose l'échantillon à tester sur un support qui admet plusieurs mouvements (translations, rotations et inclinaisons), pour l'examen en temps réel des images par transmission des rayonnements X à travers cet échantillon. Avec les mouvements possibles, il est facile de choisir des positions convenables qui donnent les détails des images et on peut aller loin dans une analyse d'une région précise sur l'échantillon.

Le détecteur est formé par la surface de détection qui est en césium iodide sur quelques millimètres d'épaisseur . cette couche permet de convertir l'énergie des rayonnement X incidents en une lumière visible. Une caméra connecté à la sortie des photons pour convertir le signal en signal vidéo, ce signal est injecté dans l'entrée vidéo de la carte d'acquisition de PV pour la sauvegarde et le traitement, en parallèle l'image peut être

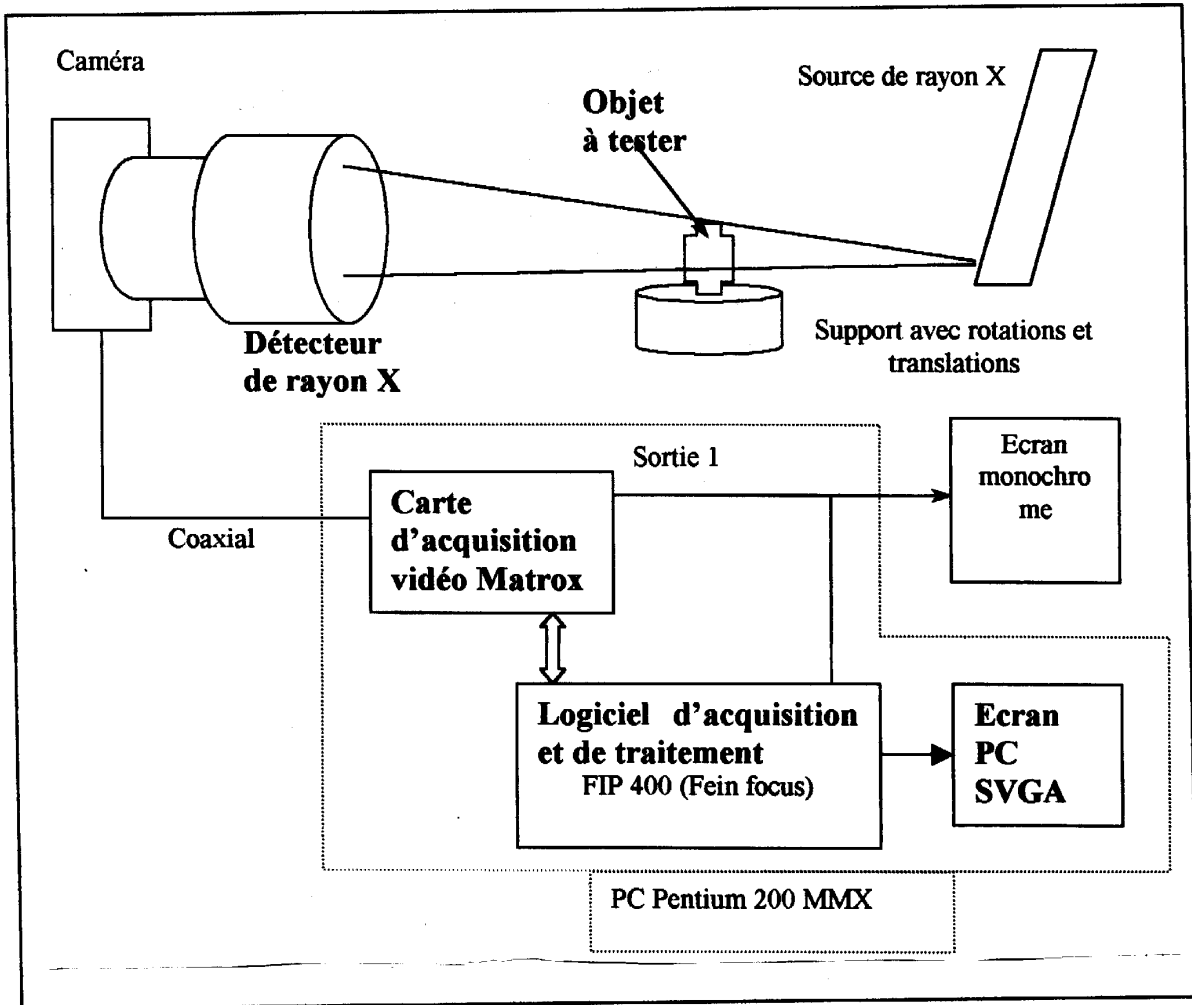


Fig 4-6 : Synoptique de la chaîne de radioscopie

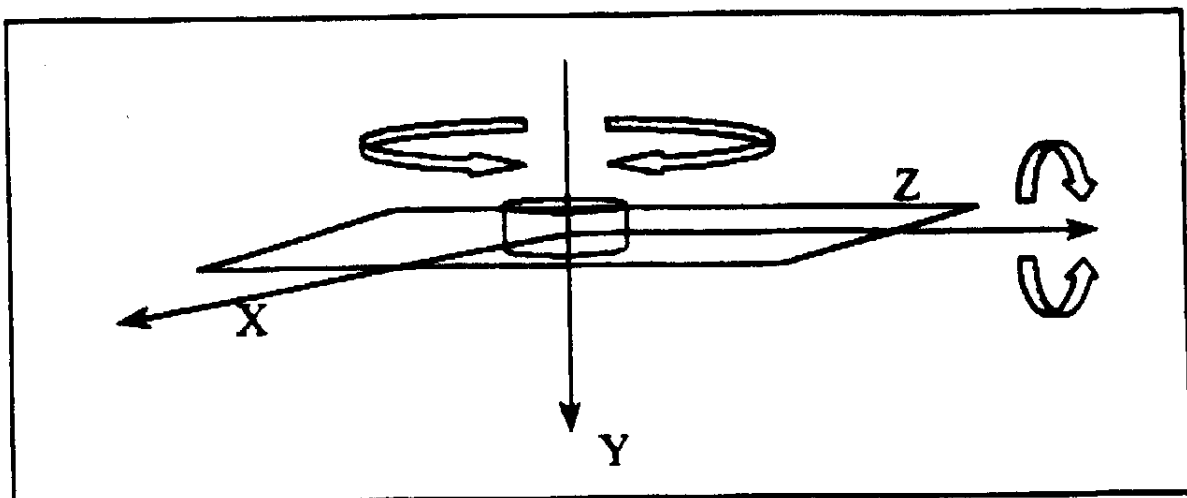


Fig 4-7. : Mouvement de support.

L'appareil à rayon X à micro foyer est complet pour le test des modules de formes géométriques diverses des éprouvettes en béton armé (figure4-10).

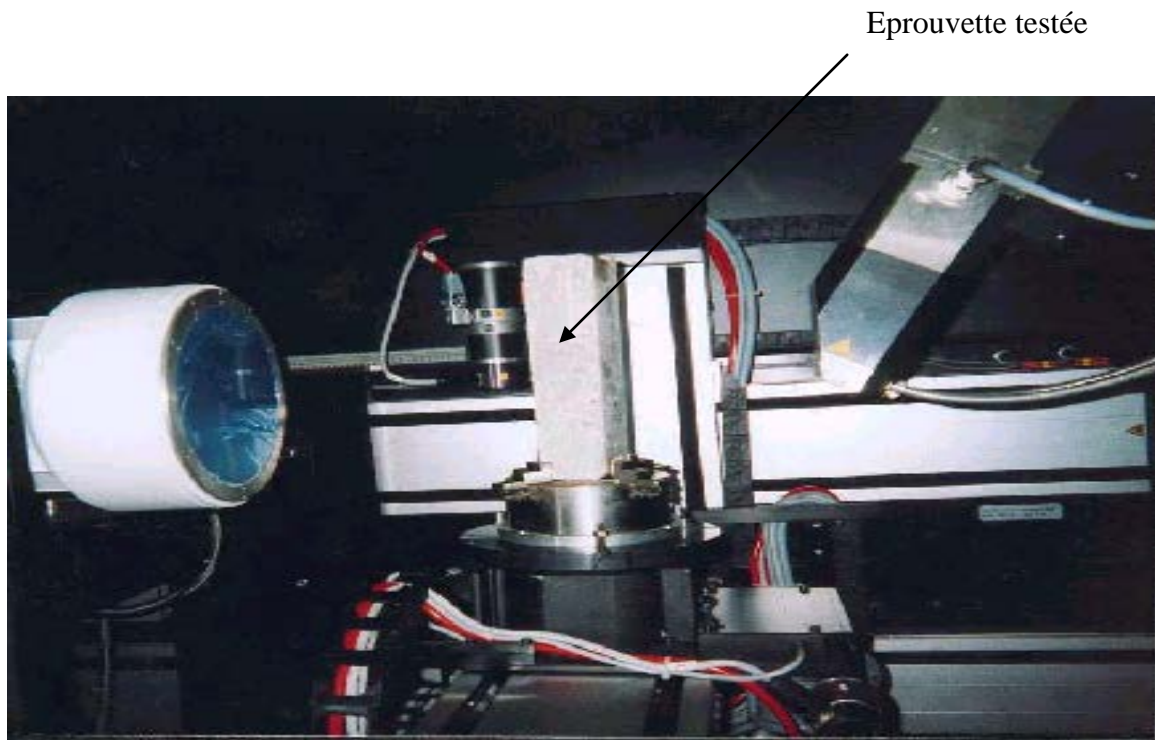


Fig 4-10: Epreuve en béton armé de (7x7x28) testée par le radioscope.

On a d'abord validé la méthode en analysant une éprouvette avec une barre d'acier entaillé, la photo est représentée sur la figure (4-11):

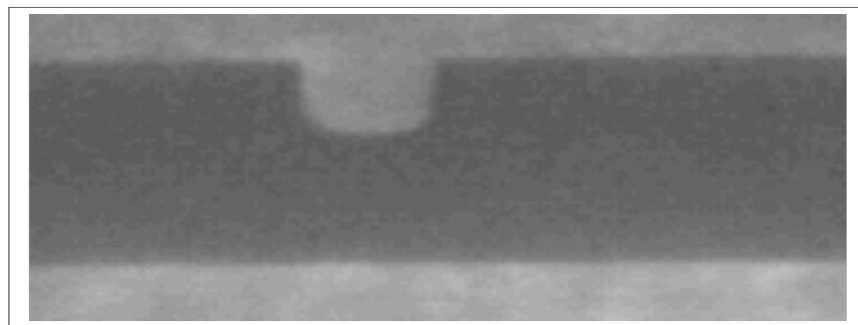


Fig 4-11: Barre d'acier entaillée.

Les essais sont effectués sur toutes les éprouvettes y compris les éprouvettes témoins, les photos de chaque essai sont estoquées sur une disquette pour les comparer.

our le cas d'éprouvettes ou la perte de masse (diminution de diamètre) n'est pas claire, nous avons analysé des fragments du matériau aux rayons X, ceci pour vérifier s'il y a ou non initiation de la corrosion.

L'analyse est faite par la méthode la plus couramment utilisé de Debeye-Scherrer , dite méthode des poudres.(voir annexe)

Les essais sont effectués sur toutes les éprouvettes y compris les éprouvettes témoins, les photos de chaque essai sont stockés sur une disquette pour les comparer.

Pour le cas d'éprouvettes ou la perte de masse (diminution de diamètre) n'est pas très claire, nous avons analysé des fragments du matériau par diffraction aux rayons X, ceci pour vérifier s'il y a ou non-initiation de la corrosion.

L'analyse est faite par la méthode de plus couramment utilisée de Debye_Scherrer, dite méthode des poudres. (voir annexe)

HAPITRE 5 Résultats et interprétations

5-1 Résultats expérimentaux:

Avec notre dispositif expérimental (radioscope), nous avons localisé et visualisé la corrosion. Les résultats brutes des analyses au radioscope sont des images; nous présentons quelques une sur la figure (5-1). A travers ces images, nous quantifions la corrosion en mesurant le diamètre de la barre corrodée, on le note ϕ_f , le diamètre initial étant noté $\phi_i = 6$ mm.

La valeur de ϕ_f est donnée par le dispositif, elle est mesurée avec une précision de 0.1%.

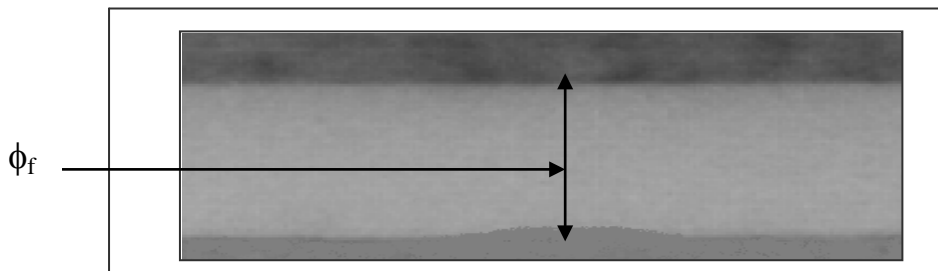


Fig 5-1-a: Eprouvette E₄₁ immergée pendant 7 mois dans la solution de 4N.

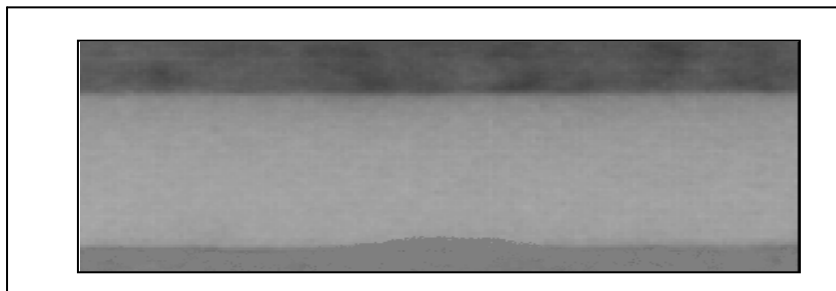


Fig 5-1-b: Eprouvette E₂₁ immergée pendant 7 mois dans la solution de 4N.

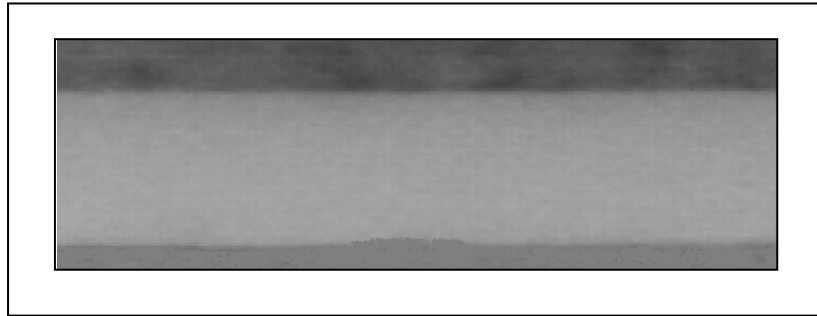


Fig 5-1-c: Epreuve E₁₁ immergée pendant 7 mois dans la solution de 4N.

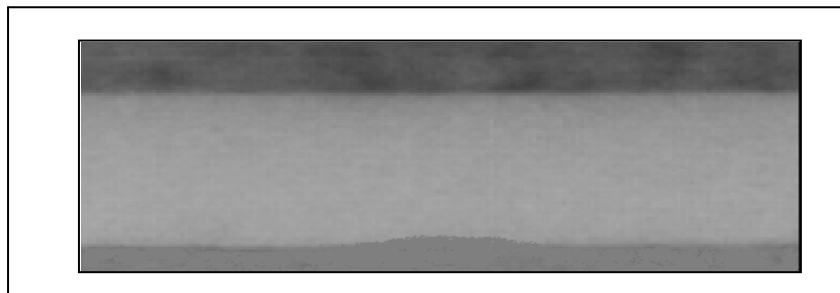


Fig 5-1-d: Epreuve E₄₁ immergée pendant 4 mois dans la solution de 4N.

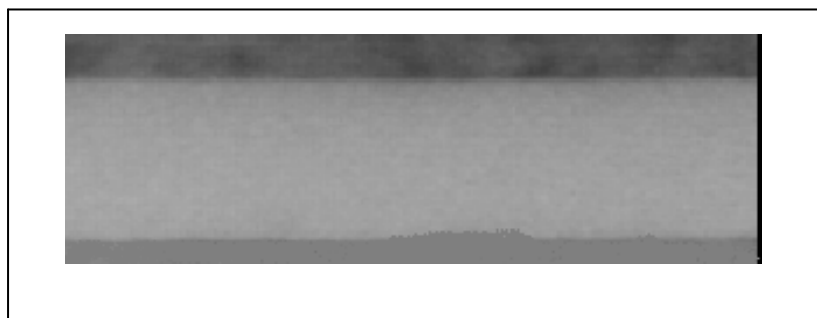


Fig 5-1-e: Epreuve E₂₁ immergée pendant 4 mois dans la solution de 4N.

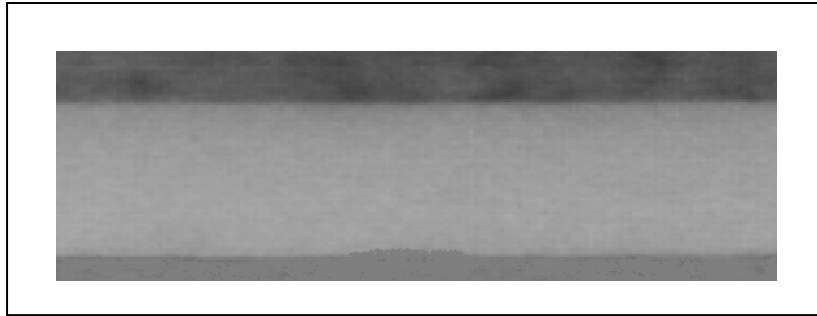


Fig 5-1-f: Eprouvette E₁₁ immergée pendant 4 mois dans la solution de 4N.

Fig 5-1: Armature corrodée à l'intérieur des éprouvettes.

Sur l'ensemble des images dont nous disposons, nous avons remarqué que:

- Les éprouvettes sans entaille ne présentent aucune détérioration au niveau de l'armature.
- Les éprouvettes entaillées sont franchement corrodées à l'endroit de l'entaille car on voit une nette diminution du diamètre de l'armature. Elles présentent également dans les régions voisines de l'entaille un endommagement de la liaison acier-béton, on le voit sur les photographies par la présence d'un film à l'interface acier béton. Ici il y aurait une simple amorce de la corrosion.

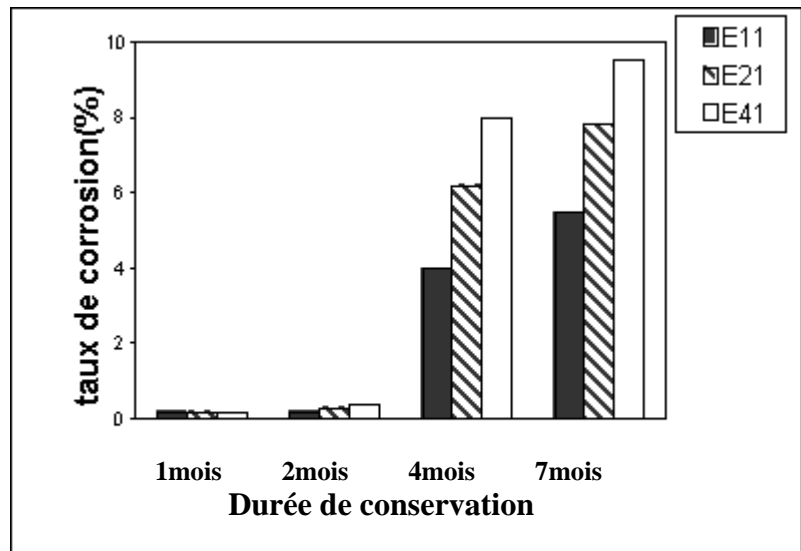
Nous avons choisi d'exprimer la corrosion par un taux C % :

$$C\% = \frac{\phi_f - \phi_i}{\phi_i} \% \quad (2-5-1)$$

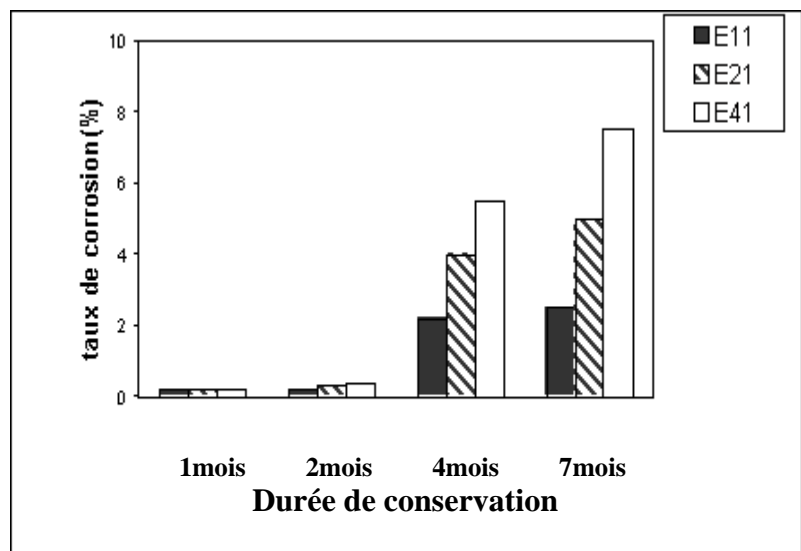
Sur les figures (5-2) (5-3), nous avons exprimé le taux de corrosion en fonction de la durée de conservation, de la concentration en NaCl et de l'ouverture de l'entaille. Nous avons mesuré le diamètre final au milieu de l'entaille.

Sur les figures (5-4) (5-5) (5-6) et (5-7), nous avons exprimé le taux de corrosion sur toute la longueur de la poutre endommagée en fonction de la concentration en NaCl, de l'épaisseur de l'enrobage et de l'ouverture de l'entaille.

a) Concentration de 4N



b) Concentration de 2N



c) Concentration de 1N

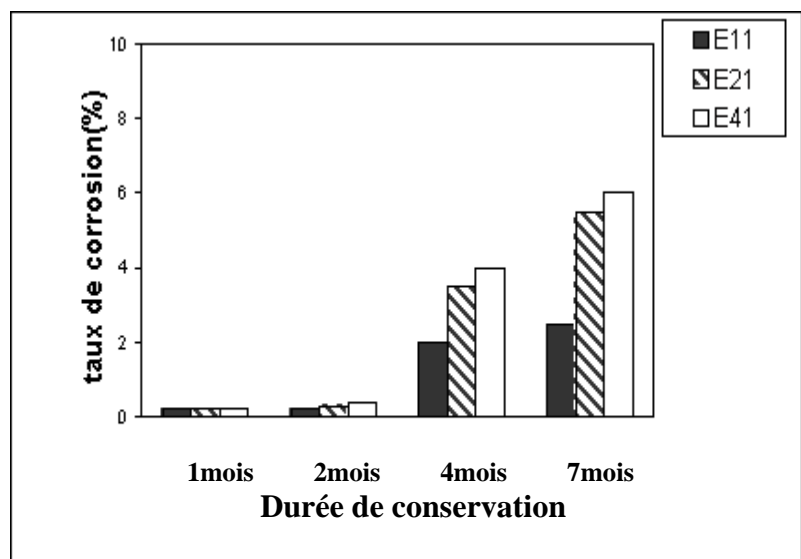
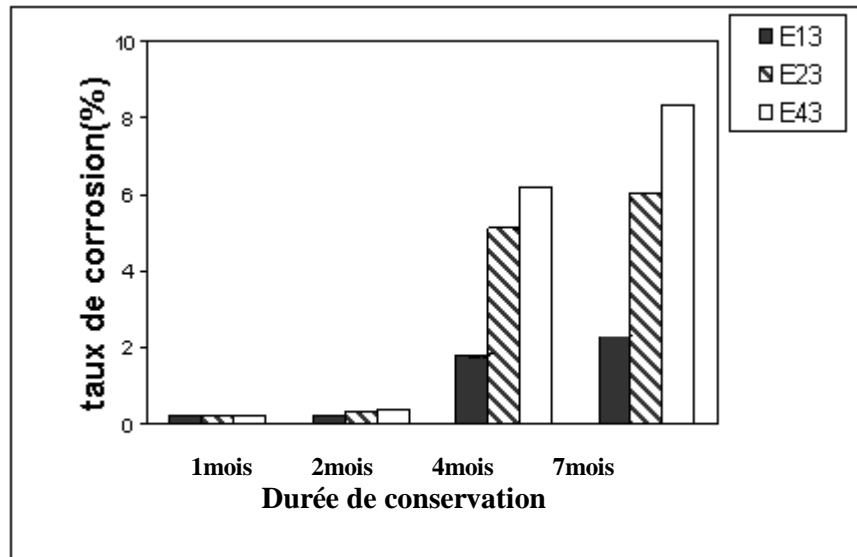
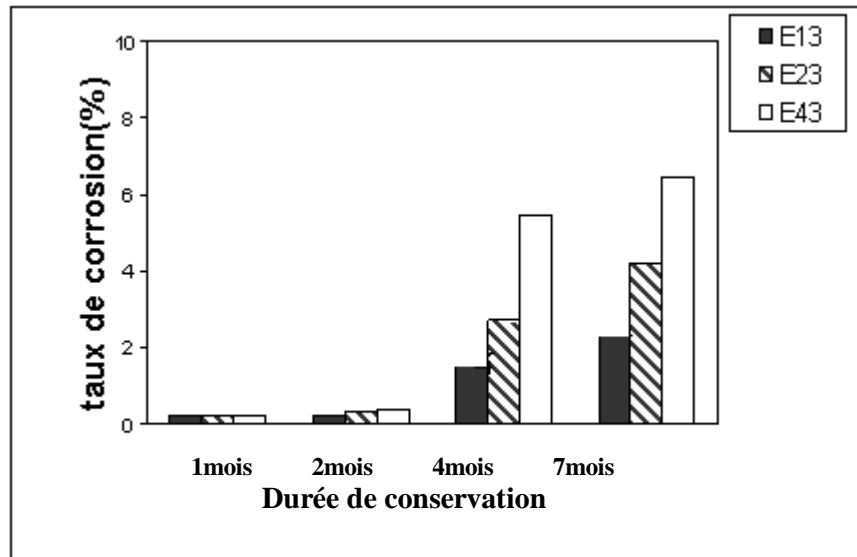


Fig 5-2: Taux de corrosion en fonction de la concentration en NaCl, l'ouverture de l'entaille et la durée de conservation des éprouvettes dont l'enrobage est de 1cm.

a) Concentration de 4N



b) Concentration de 2N



c) Concentration de 1N

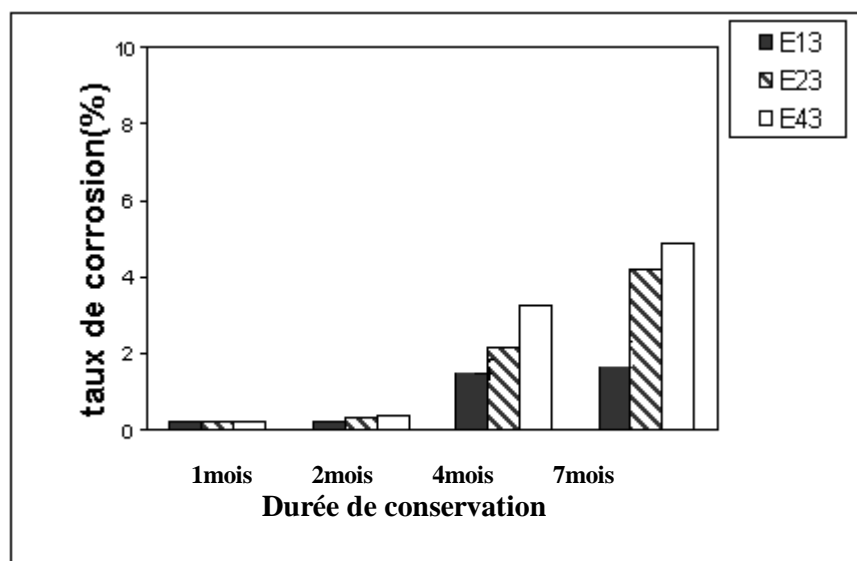
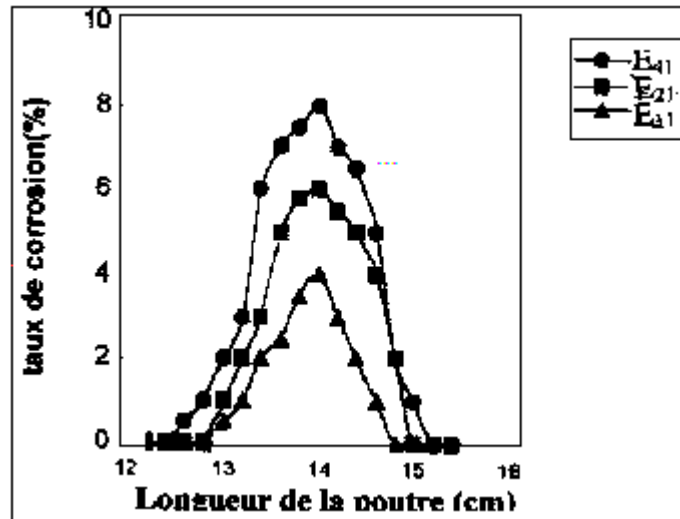
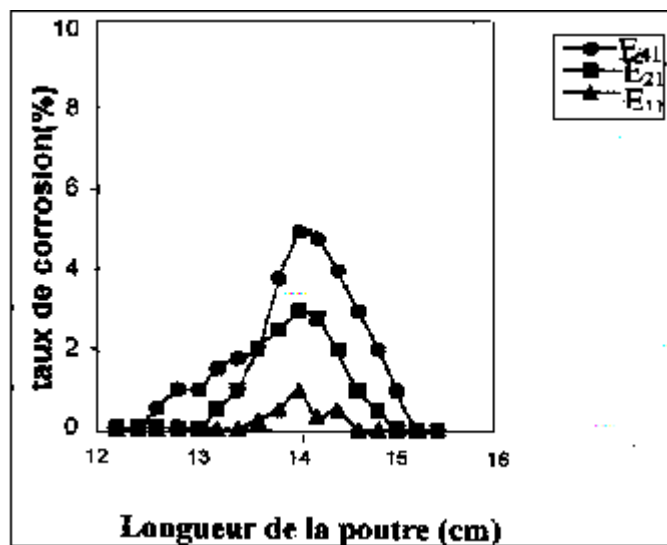


Fig 5-3: Taux de corrosion en fonction de la concentration en NaCl, l'ouverture de l'entaille et la durée de conservation des éprouvettes dont l'enrobage est de 3cm.

a) Concentration de 4N



b) Concentration de 2N



c) Concentration de 1N

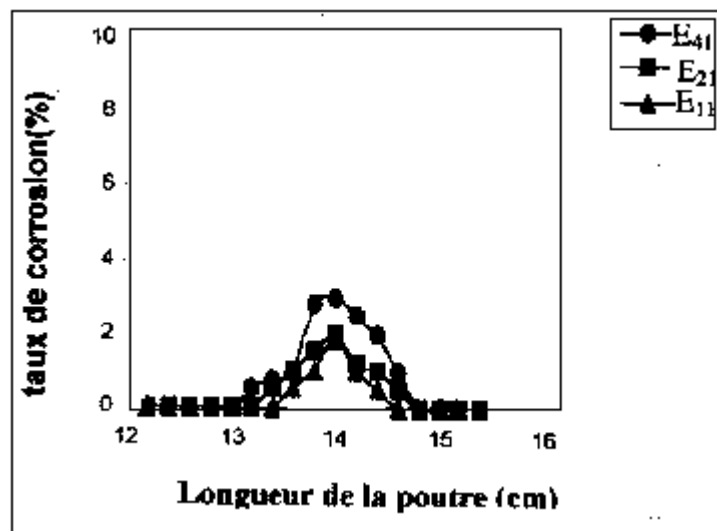
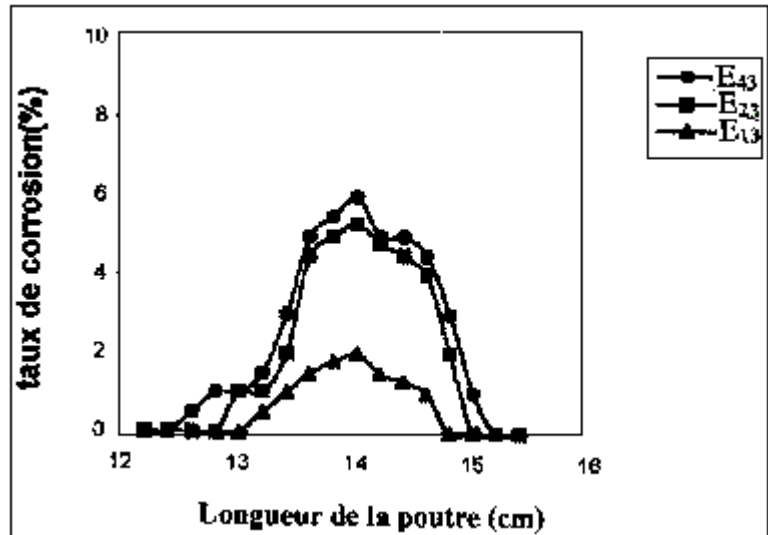
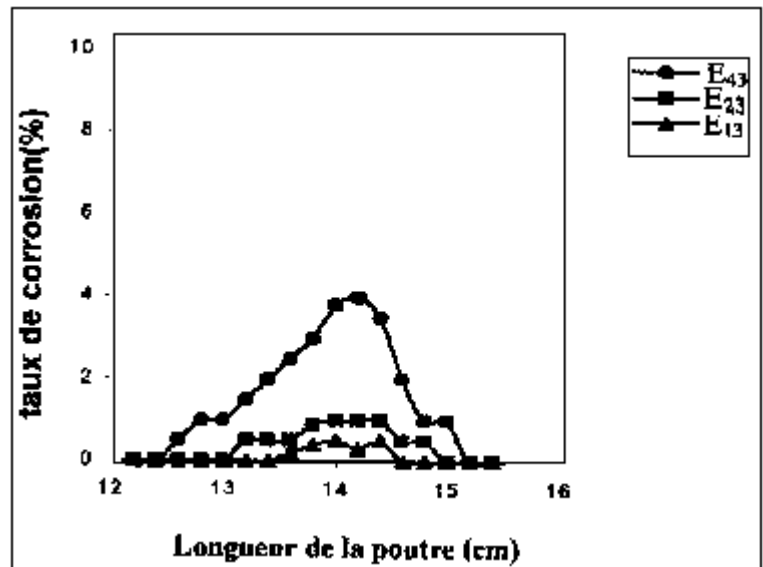


Fig 5-4: Taux de corrosion des armature à l'intérieur des éprouvettes dont l'enrobage est de 1cm, immergées pendant 7 mois dans NaCl.

a) Concentration de 4N



b) Concentration de 2N



c) Concentration de 1N

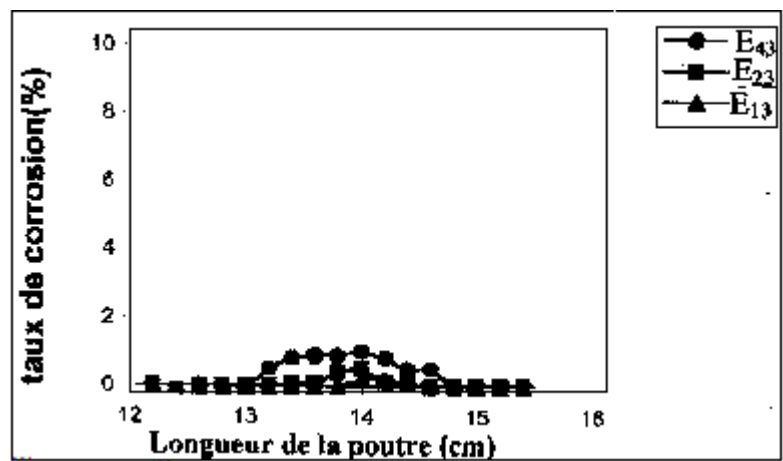
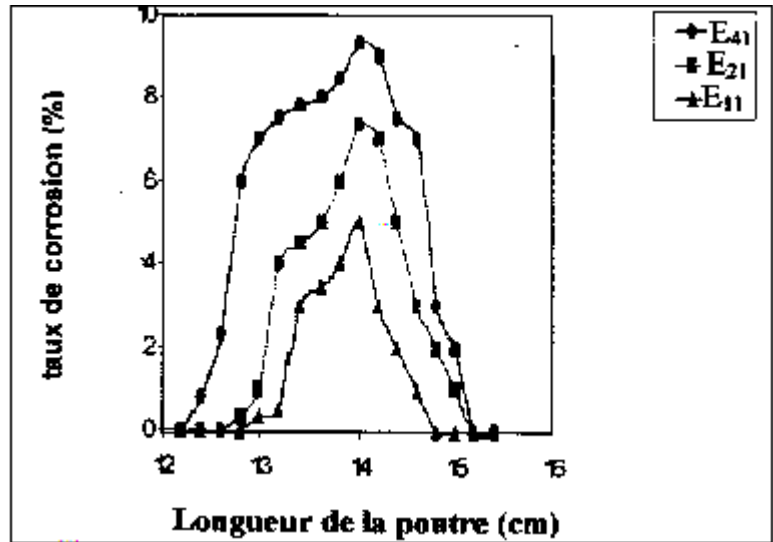
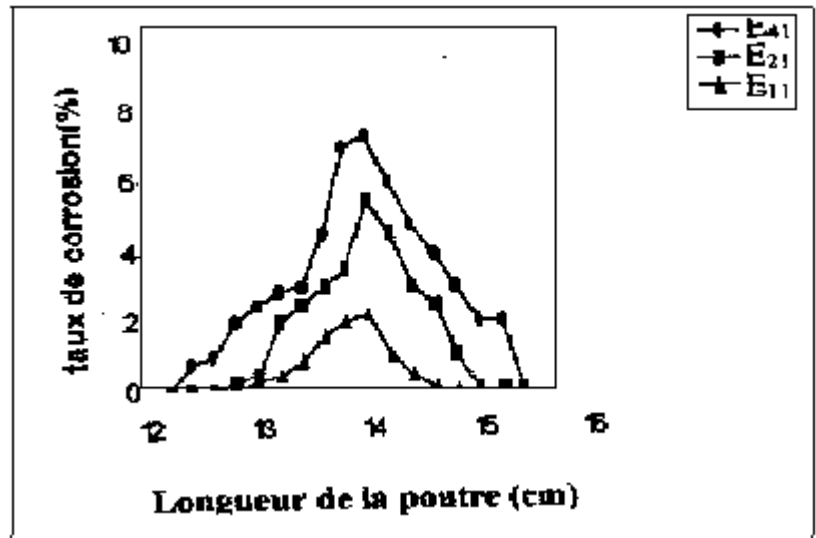


Fig 5-5: Taux de corrosion des armature à l'intérieur des éprouvettes dont l'enrobage est de 1cm, immergées pendant 7 mois dans NaCl.

a) Concentration de 4N



b) Concentration de 2N



c) Concentration de 1N

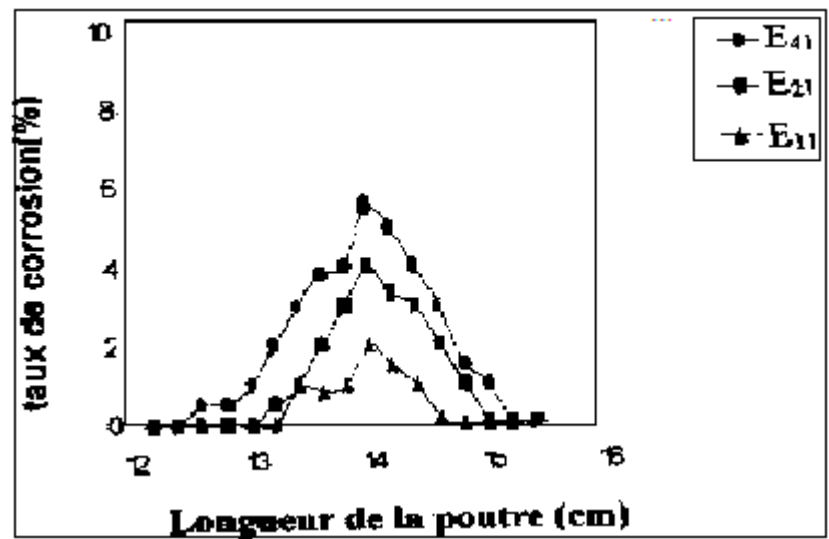
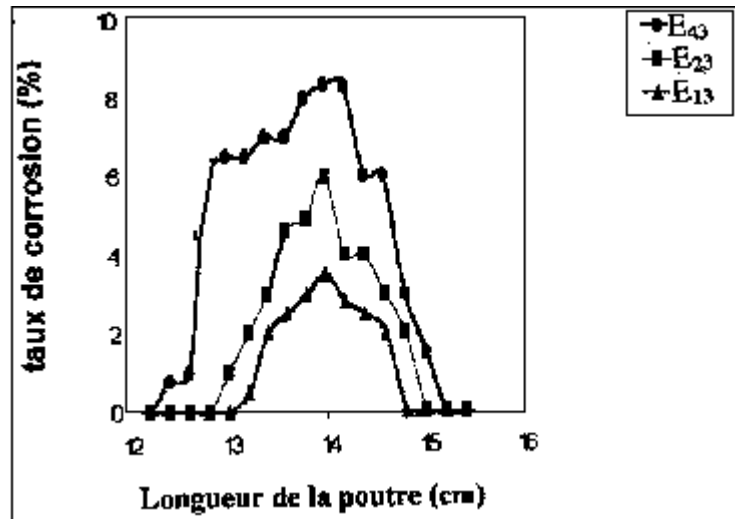
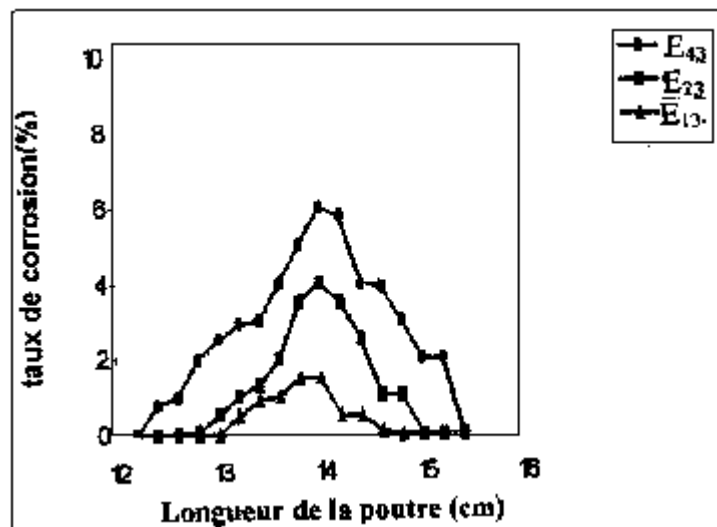


Fig 5-6: Taux de corrosion des armature à l'intérieur des éprouvettes dont l'enrobage est de 3 cm, immergées pendant 7 mois dans NaCl.

a) Concentration de 4N



b) Concentration de 2N



c) Concentration de 1N

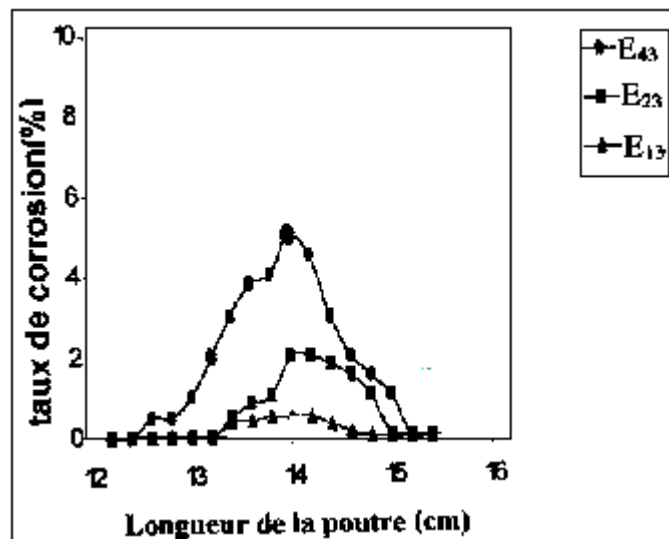


Fig 5-7: Taux de corrosion des armature à l'intérieur des éprouvettes dont l'enrobage est de 3cm, immergées pendant 4 mois dans NaCl.

Les figures (5-2) et (5-3) montrent que la corrosion augmente avec l'augmentation de la concentration en NaCl, de la durée de conservation et de l'ouverture de l'entaille.

D'après les figures (5-4) (5-5) (5-6) et (5-7). Nous remarquons que la perte de masse n'est pas la même sur toute les longueurs des poutres, la corrosion se développe au droit de l'entaille, se propage quelque fois sur une distance de 2 cm et diminue progressivement en s'éloignant de la fissure.

Très loin de l'entaille, vers les extrémités de la poutre, les armatures ne sont pas corrodées; les chlorures ont avancé seulement à travers l'entaille. Quel que soit l'enrobage, l'agent agressif n'a pas pénétré le béton.

Le taux de corrosion calculé pour l'ensemble des éprouvettes est représenté sur les tableaux (5-1) et (5-2):

épreuve	1N	2N	4N
E ₁₁	1.5%	2%	5%
E ₁₃	0.5%	1.8%	3.5%
E ₂₁	4%	5%	7.5%
E ₂₃	2%	4%	6%
E ₄₁	5.5%	7.5%	9.5%
E ₄₃	5%	6%	9%

Tableau 5-1: Taux de corrosion des différentes éprouvettes immergées pendant 7 mois dans des solutions de différentes concentrations en NaCl.

épreuve	1N	2N	4N
E ₁₁	0.5%	1%	3.8
E ₁₃	0.5%	1%	2%
E ₂₁	2%	3%	5.8%
E ₂₃	1%	1%	5%
E ₄₁	3.5%	5%	8.5%
E ₄₃	2%	4%	6%

Tableau 5-2: Taux de corrosion des différentes éprouvettes immergées pendant 4 mois dans des solutions de différentes concentrations en NaCl.

5-2 Interprétation des résultats:

Nos résultats montrent que la perte de masse n'est pas la même pour les différentes éprouvettes. Elle est liée clairement à l'ouverture de l'entaille, à la concentration en NaCl et à la durée de conservation dans les solutions salines.

a. Effet de la concentration en NaCl:

Sur une durée de 7 mois; le taux de corrosion pour les éprouvettes E₄₁ passe de 5.5% pour une concentration de 1N à 7.5% pour une concentration de 2N et à 9.5% pour une concentration de 4N, il est plus important que le taux calculé pour le cas des éprouvettes E₂₁, qui varie entre 4% et 7.5% et n'est pas comparable à celui calculé pour les éprouvettes E₁₁, qui varie entre 1% et 5%.

Le taux de corrosion des éprouvettes E₄₃ passe de 5% pour une concentration de 1N à 6% pour une concentration de 2N et à 9% pour une concentration de 4N, il est plus important que le taux calculé pour le cas des éprouvettes E₂₃ qui varie entre 2% et 6% et à celui des éprouvettes E₁₃, qui varie entre 0.5% et 3.5%.

Sur une durée de 4 mois; le taux de corrosion pour les éprouvettes E₄₁ passe de 3.5% pour une concentration de 1N à 5% pour une concentration de 2N et à 8.5% pour une concentration de 4N, il est plus important que le taux calculé pour le cas des éprouvettes E₂₁, qui varie entre 2% et 5.8% et n'est pas comparable à celui calculé pour les éprouvettes E₁₁, qui varie entre 0.5% et 3.8%.

Le taux de corrosion des éprouvettes E₄₃ passe de 2% pour une concentration de 1N à 4% pour une concentration de 2N et à 6% pour une concentration de 4N, il est plus important que le taux calculé pour le cas des éprouvettes E₂₃ qui varie entre 1% et 5% et à celui des éprouvettes E₁₃, qui varie entre 0.5% et 2%.

Ce résultat a été confirmé par plusieurs chercheurs, S.K.Kaushik et S.Islam [35] ont testé des éprouvettes en béton armé cubiques de (10x10x10)cm³ sans entaille, avec un enrobage de 1.5 cm, ces éprouvettes ont été immergées dans des solutions de différentes concentrations en NaCl (1N, 5N, 10N) pendant 18 mois, ils ont remarqué que le taux de corrosion augmente de 10% à 18% en passant de 1N à 5N et de 18% à 28% en passant de 5N à 10N.

Le taux de chlorure dans la solution de 1N qui entoure les armatures est d'environ 2% de la masse de liant, c'est-à-dire 4 fois supérieur au seuil d'amorçage couramment admis [35].

Donc pour le cas des solutions en NaCl de concentrations de 2N et 4N, le seuil d'amorçage est largement dépassé.

On remarque que la corrosion est maximale au milieu de l'entaille qui atteint l'armature, cette corrosion s'explique par la présence des ions chlore en contact direct avec l'acier, ces ions avancent à travers l'entaille, dépassent l'acier et conduisent à la corrosion sur une distance de 2 cm. Au delà de cette distance, les armatures sont intactes, le béton peu perméable les a protégé et les ions chlores donc se trouvent en petite quantité, l'alcalinité du béton est suffisante pour annihiler leurs effets et protéger l'armature contre la corrosion. Cette protection est altérée par l'introduction de trop de chlorures, si les éprouvettes restent toujours immergées dans les solutions agressives. [5,8,35]

Il est naturel que le taux de corrosion augmente en fonction de la concentration en NaCl; dans notre cas, lorsqu'on double la concentration de 1N à 2N et de 2N à 4N le taux de corrosion pour le cas des éprouvettes dont l'entaille est de 4 mm se multiplie par un facteur de 1.3, il atteint sa valeur maximale qui est de 9.5%. Ceci veut dire pratiquement que si l'on avait une section d'acier initiale de 10 cm^2 , après une durée de 7 mois, la section se réduit à 9.05 cm^2 . Ces résultats démontrent qu'il existe une relation étroite entre le taux de corrosion et la concentration en NaCl, en augmentant la concentration en NaCl, le taux de corrosion augmente, mais cette augmentation n'est pas proportionnelle.

b. Effet de la durée de conservation:

On remarque que la perte de section des armatures à droite et à gauche de l'entaille commence à partir du 4^{ème} mois, qui correspond au temps nécessaire à l'apparition de la corrosion; cette étape est appelée la phase d'initiation. A partir du 7^{ème} mois, la perte devient considérable, cette étape représente la période de propagation de la corrosion, le taux de corrosion augmente avec le temps et conduira par la suite à la ruine totale des éléments en béton armé.

Pierre La Fontaine [28,37,38] a remarqué à partir de ces résultats expérimentaux basés sur des essais électrochimiques de corrosion sur une armature recouverte de 1.9cm de béton sans entaille contenant 356 Kg/m^3 de ciment avec un rapport E/C=0.5, immergé dans une solution en NaCl de 6N pendant 2 ans, que la corrosion apparaît un peu plus tard, elle débute après 35 semaine (8^{ème} mois) et ne devient considérable qu'à partir de la 70^{ème} semaine (17mois).

L'essai électrochimique réalisé par Gagné et collaborateurs[26] sur des éprouvettes de $(2 \times 4 \times 6) \text{cm}^3$ non fissurées dont l'enrobage est 2 cm, immergées dans une solution de 5N montre que la corrosion apparaît le 7^{ème} mois.

c. Effet de l'ouverture des fissures:

On remarque que pour les différentes concentrations en NaCl, le taux de corrosion des éprouvettes E_{41} et E_{43} est plus important que celui des éprouvettes E_{21} et E_{23} , il est incomparable à celui du type E_{11} et E_{13} . Dans tous les cas que nous avons étudié, l'ouverture de fissure considérée est plus grande que la valeur de 0.4 mm donnée par l'Eurocode2 [5]. Pour celui ci, sur un ouvrage réel, il suffit de s'assurer donc que les ouvertures des fissures sont fines.

En comparant nos résultats à ceux de Pierre La Fontaine et Gagné et collaborateurs cités ci dessus, nous avons remarqué que la corrosion est retardé de 3 à 4 mois par rapport à ce qu'on a trouvé, la corrosion a débuté le 4^{ème} mois pour nos éprouvettes, ceci est dû à la présence des fissures (entailles), qui facilitent la pénétration des ions chlorures jusqu'à atteindre l'armature et accélère la corrosion.

d. Effet de l'enrobage:

L'enrobage constitue une barrière vis-à-vis des ions chlorures, il constitue une première défense pour la protection des aciers contre la corrosion.

Nous avons utilisé des armatures qui ont été exposées à l'atmosphère, elles sont ainsi recouvertes d'une couche de rouille assez poreuse qui entre en réaction avec l'eau de gâchage du béton et forme une couche assez fine de $\text{Fe}(\text{OH})_2$ et $\text{Ca}(\text{OH})_2$ sur l'acier. Ces produits donnent un PH élevé à la solution interstitielle de l'ordre de 12 qui passive le métal et offre une protection aux armatures.

Pour notre cas, et sur une durée de conservation de 7 mois, l'agent agressif n'a pas pénétré le béton quel que soit l'enrobage. Cependant, sur l'ensemble des éprouvettes, la corrosion s'est produite au droit de l'entaille qui laisse pénétrer les chlorures dans les parties enrobées. Nous avons relevé les résultats suivants:

Le taux de corrosion maximal pour les éprouvettes (E_{41} , E_{43}) est du même ordre de grandeur, il est de l'ordre de 9%, les éprouvettes (E_{21} , E_{23}) ont aussi un taux qui est de l'ordre de 6% et les éprouvettes (E_{11} , E_{13}) ont un taux de l'ordre de 4%.

On a remarqué que les éprouvettes sans entailles ne présentent aucune détérioration au niveau des armatures.

Le béton utilisé pour confectionner ces éprouvettes a une absorption capillaire AC égale à 11.06%, qui correspond à un béton peu perméable aux ions chlorures [34,39,40], mais il protège toujours les armatures contre la corrosion.

Dans notre cas, le temps est insuffisant pour initier une première fissure produite par l'expansion des produits de corrosion autour de l'armature. Dans un premier lieu les chlorures pénètrent dans le béton, c'est le stade d'incubation, la seconde étape commence lorsque ces ions se trouvent à des concentrations assez fortes au niveau des armatures; elle correspond à la croissance de la rouille, qui fait éclater le béton d'enrobage et offre par la suite une large avenue à la pénétration de chlorures et conduit à la détérioration des armatures. Donc il fallait plus de temps pour que le béton éclate et les armatures se corrodent.

Ce résultat montre le rôle essentiel que joue le béton dans la protection des aciers, il les protège de deux façons: par une protection physique, il constitue une barrière vis-à-vis des agents agressifs et par la protection chimique grâce au PH élevé de la solution interstitielle du béton lequel maintient stable la couche de protection formée sur les aciers.

Avant 4 mois, n'ayant pas détecté la corrosion par la radioscope, nous avons analysé les échantillons par la diffractométrie de rayons X. Après l'écrasement du béton, nous avons remarqué une couche de rouille sur une distance d'environ 2 cm de part et d'autre de l'entaille, elle est représentée sur la figure (5-8).

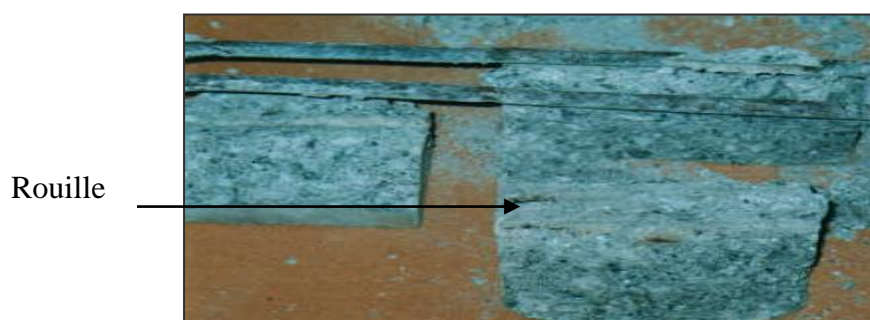


Fig 5-8: Couche de rouille sur le béton.

Le diffractogramme de rayon X est représenté ci-après sur la figure (5-9).

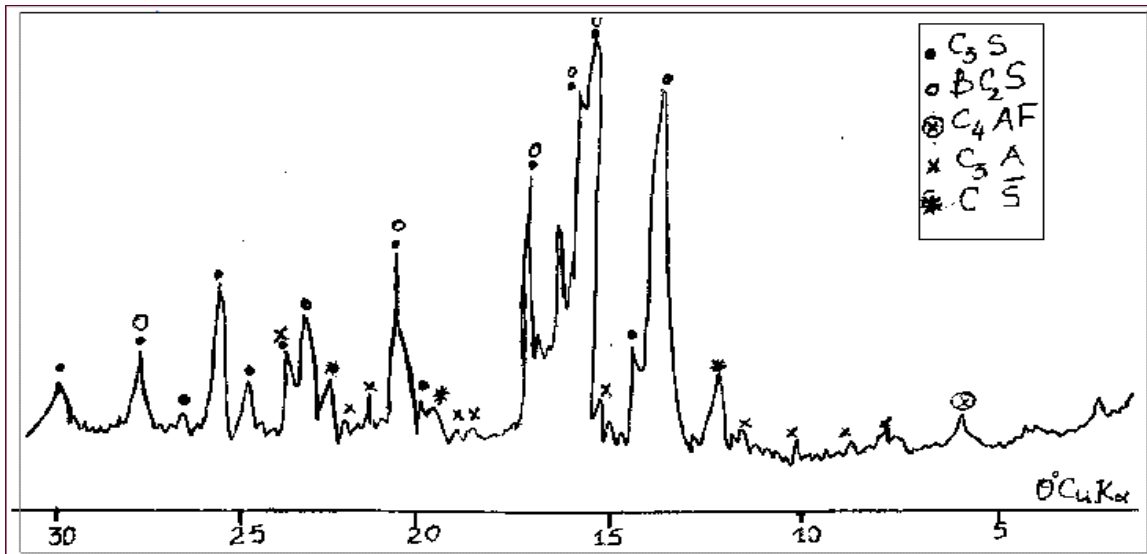


Fig 5-9: Le diffractogramme de rayon X du béton au voisinage de l'armature corrodée pour le cas d'éprouvettes E₄₁ immergée pendant 2 mois dans la solution de 4N.

A partir de diagramme, on remarque une absence des produits à base de fer; ceci est expliqué par la faible quantité de fer par rapport à celle des silices contenues dans la poudre de béton broyé qui se sont cristallisées en premier et ont empêché par la suite le fer de se cristalliser.

Conclusion

Les résultats obtenus par notre recherche sont:

- Les éprouvettes sans entailles ne présentent aucune détérioration au niveau de l'armature, les armatures sont toujours protégées contre la corrosion.
- Les éprouvettes entaillées sont franchement corrodées à l'endroit de l'entaille car on voit une nette diminution du diamètre de l'armature. Elle présentent également dans les régions voisines de l'entaille un endommagement de la liaison acier-béton, on le voit sur les photographies par la présence d'un film à de l'interface acier- béton, c'est une simple amorce de la corrosion.
- La corrosion est lié à l'ouverture de l'entaille, à la concentration en NaCl, à la durée de conservation dans les solutions agressives et à l'enrobage.

Le taux de corrosion augmente en fonction de la concentration en NaCl; dans notre cas, lorsqu'on double la concentration de 1N à 2N et de 2N à 4N le taux de corrosion pour le cas des éprouvettes dont l'entaille est de 4 mm se multiplie par un facteur de 1.3, et atteint sa valeur maximal qui est de 9.5%. Ces résultats démontrent qu'il existe une relation étroite entre le taux de corrosion et la concentration en NaCl. En augmentant la concentration en NaCl, le taux de corrosion augmente, mais cette augmentation n'est pas proportionnelle.

Pour une question de temps, nous avons arrêté nos observations à 7 mois. Jusqu'à 7 mois, le béton protège les armatures contre la corrosion, loin des entailles, les armatures sont intactes, les ions chlore se trouvent en petite quantité, l'alcalinité du béton est suffisante pour annihiler leurs effet et protéger l'armature contre la corrosion.

Par l'entaille l'ion chlore a corrodé l'armature au niveau de celle ci et même de part et d'autre jusqu'à une longueur d'environ 2cm. Le taux de corrosion est maximal pour les éprouvettes dont l'entaille est de 4 mm, il atteint la valeur de 9% et diminue par le reste c'est à dire à 6% pour les éprouvettes dont l'entaille est de 2mm et à 4% pour les éprouvettes dont l'entaille est de 1mm.

Nos résultats ont indiqué un début effectif de la corrosion à 4 mois seulement pour le cas de solution de 4 N, mais le phénomène est amorcé avant par la rupture de la liaison acier-béton que nous avons obtenue.

La mesure de la réduction de diamètre des aciers, nous a permis de déterminer le temps nécessaire pour initier la corrosion des aciers, nous avons trouvé qu'il est de 4 mois en fonction des fissures. Cela permet d'estimer la résistance d'une structure fissurée située dans un milieu agressif.

D'après les résultats trouvés dans ce travail; on peut tirer les conclusions suivantes:

Les ions chlorures pénètrent facilement à l'intérieur du béton par les fissures (entailles). Les chlorures ont avancé à travers l'entaille le long de la liaison acier- béton.

Par conséquent, tous les moyens qui permettent de diminuer ou éliminer la fissuration du béton doivent être mis en oeuvre dans le cas des bétons pour faire face à un environnement agressif.

Conclusion Générale

Notre travail présente une contribution à l'étude de la corrosion des armatures dans le béton en présence des chlorures.

Nous avons entamé notre recherche par une large étude bibliographique qui nous a permis de bien cerner le phénomène de la corrosion d'abord dans sa présentation la plus élémentaire et ensuite au sein du béton armé. Nous avons présenté ceci aux chapitres 1 et 2. Dans les chapitres 3 et 4, nous avons présenté respectivement les méthodes de localisation des armatures corrodées ainsi que différentes techniques de protection contre la corrosion.

L'originalité de notre travail expérimental est l'utilisation du radioscope pour la quantification de la corrosion. A notre connaissance, cette méthode n'a pas été encore utilisée. L'intérêt de cette technique est qu'elle met en évidence la corrosion de façon directe sans destruction de l'échantillon.

Dans notre programme expérimental, nous avons étudié la corrosion sur des éprouvettes entaillées simulant ainsi une fissuration de flexion. Nous avons immergé ces éprouvettes dans des solutions en NaCl de 1N, 2N et 4N jusqu'à 7 mois. Nous avons suivi l'évolution de la corrosion en fonction des ouvertures, des concentrations et de la durée de conservation, nous avons fait varier l'enrobage de 1cm à 3 cm.

A partir d'images très claires fournis par le radioscope, nous avons calculé le taux de corrosion. Nous avons remarqué que le taux de corrosion est maximum au milieu de l'entaille pour les différentes éprouvettes. Ce résultat n'est pas surprenant puisque les ions chlorures pénètrent à travers l'entaille et atteignent l'acier nu, en s'éloignant de l'entaille, la corrosion diminue jusqu'à s'éliminer à environ 2 cm vers les extrémités. Ailleurs les armatures sont bien protégées par le béton.

Le taux de corrosion est considérable pour les éprouvettes (E_{41} , E_{43}) par rapport à celui calculé pour le cas des éprouvettes (E_{21} , E_{23}) et (E_{11} , E_{13}), ceci est dû à l'ouverture des entailles qui favorisent la pénétration des chlorures jusqu'à l'acier. Le taux de corrosion est maximal et du même ordre de grandeur pour les éprouvettes (E_{41} , E_{43}), il est de l'ordre de

9%, il est de l'ordre de 6% pour les éprouvettes (E_{21} , E_{23}) et de l'ordre de 4% pour les éprouvettes (E_{11} , E_{13}). Ce résultat montre le rôle essentiel que joue le béton dans la protection des aciers, il les protège grâce au PH élevé de la solution interstitielle du béton lequel maintient stable la couche de protection formée sur les aciers.

Dans notre programme expérimental, nous n'avons pas étudié le cas d'entaille inférieure à 1mm à cause de difficultés pratiques. D'après quelques résultats de la littérature, il y a de la corrosion dans le cas de ou l'ouverture de la fissure est inférieure à 1mm. L'Eurocode 2[5] recommande une ouverture limite de 0.4 mm.

En définitif, notre étude permis d'introduire la technique du radioscope comme moyen efficace pour l'analyse de la corrosion du béton armé. Il faut cependant, dans un proche avenir la faire valoir en la comparant aux techniques usuelles. Il est nécessaire également de compléter ces travaux en étudiant le cas des fissures inférieure à 1mm et surtout en intégrant le paramètre temps, en prolongeant la durée de conservation à plus de 7 mois voir des années, et de faire des observations à des périodes très rapprochées, surtout au début de l'apparition de la corrosion. Ceci devrait permettre de mieux quantifier la corrosion pour mettre en évidence un seuil limite de temps d'ouverture de fissure, et également de concentration en ions agressifs à partir duquel il y aura ou non la corrosion.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]: **F.Derrien:** « La corrosion des matériaux métalliques dans le bâtiment ». Publié par Collection Sciences du bâtiment CSTB Paris 1990.
- [2]: **A.Raharinaivo:** « Armatures élaboration, mise en oeuvre, propriétés mécaniques, durabilité ». P17, Presse de l'école nationale des ponts et chaussées (LCPC) Novembre 2001.
- [3]: **T.Kyost:** « Corrosion of steel in concrete ». P: 23-24, 3rd Edition E et FN Spoon 1997.
- [4]: **M.Laurrain:** « Adhérence acier-béton de haute résistance dans les BHP (caractérisation, durabilité et applications) ». Presse de l'ENPC. Paris 1992.
- [5]: **A.Raharinaivo et G.Arligrine:** « La corrosion et la protection des aciers dans le béton ». Collection du laboratoire central des ponts et chaussées. Presses de l'école nationale des ponts et chaussées (LCPC) 1998.
- [6]: **F.Offenstein:** « Compatible et incompatible ou comment associer les matériaux de constructions ». Editeur de Moniteur 1983.
- [7]: **V.Baroghet-Bouny, T.Chaussadent et A.Rahariniavo:** « Etude expérimentale des effets couples des transferts d'humidité et d'ions chlorures dans le béton jeune ». Bulletin de liaison des LCPC, N° 206, P:75-83. Novembre-Décembre 1996.
- [8]: **I.Soroka:** « Concrete in Hot Environments ». Publié par Modern Concrete Technology Series. London 1993.
- [9]: **J.F.Bosich:** « Prévention de la corrosion ». 2^{ème} Edition mise à jour. Technique et documentation. Entreprise Moderne d'Édition Paris 1977.
- [10]: **F.Kellou:** « Comportement d'un acier ordinaire en milieu tampon basique en présence d'ions agressifs ». Mémoire de Magister USTHB 1992.
- [11]: **N.Kedjour:** « Propriétés et pathologie du béton ». Office des publications universitaires 1993.
- [12]: **C.Basalo:** « Les canalisations d'eau et de gaz, corrosion, dégradation et protection ». Travaux de commission Française. Technique et documentation -Lavoisier- 1993.

- [13]: **T.Lorenez et C.French:** « Corrosion of reinforcing steel in concrete: effects of materialism mix composition and cracking ». P: 19-23. Publié par ACI Materials Journal Mars-Avril 1995.
- [14]: **P.D.Bentz:** « fibbers, percolation, and spalling of high performance concrete». P: 351-354, Vol 97, N°3. ACI Materials Journal. Mai, Juin 2000.
- [15]: **M.A.Aziz et al:** «Deterioration of marine concrete structures with special emphasis on corrosion of steel and its remedies». P: 91. Proceeding on corrosion of reinforcement in concrete construction. London, Juin1983.
- [16]: **J.Skalny et M.Marieta:** « 7^{eme} congrès international de la chimie des ciments ». Vol I. Paris 1980. University of Tllioros Urbana USA.
- [17]: **G.Nezzal:** « Contribution à l'étude de la corrosion du fer en milieu carbonaté ». Thèse Docteur-ingenieur INSA de Toulouse 1972.
- [18]: **J.Abdul-Hamid et M.Al-Tayib:** « Corrosion rate measurements of reinforcing steel concrete by electrochemical techniques ». P20-23. Edité par ACI Materials Journal, Mai-Juin 1988
- [19]: **K.Ravindra, J.Effrey et W.Green:** « Protection of concrete ». P: 29-30. Proceeding of the International conference Held at University of Dundee Scotland-UK. 13 Septembre1990.
- [20]: **I.Smis:** « Diagnosing and avoiding the causes of concrete degradation ». P: 15-17. Proceeding of the international conference on corrosion and corrosion protection of steel in concrete, Sheffield, UK. Octobre 2002.
- [21]: **G.Batis et K.K Sideris:** « Influence of calcium nitrate inhibitor on the corrosion of steel reinforcement due to carbonation». P: 301-303. Proceeding of the international conference on corrosion and corrosion protection of steel in concrete, Sheffield, UK. Octobre 2002.
- [22]: **H.Justness:** «Concrete corrosion problems solved by calcium nitrate ». P: 350-356. Proceeding of the the 25th conference on our world in concrete and structures. Singapore 23-24 Août 2000.
- [23]: **T.Chaussadent:** « Etat des lieux et réflexions sur la carbonatation du béton armé ». Etudes et recherches des laboratoires des ponts et chaussées. Presse de l'école nationale des ponts et chaussées (LCPC) Septembre1999.

- [24]: **J.Baron et J.P.Olivier:** « La durabilité des bétons ». Presses de l'école nationale des ponts et chaussées. Paris1982.
- [25]: **A.Steopoe:** « La durabilité du béton » . Edition Eyrolles. Paris 1970.
- [26]: **P.C.Aitcin:** « Béton de hautes performance». Edition Eyrolles. Janvier 2001.
- [27]: **B.Fiorio:** « Experimental study of the wear of a concrete surface under ice friction ». P: 340-342. Proceeding of the international conference on corrosion and corrosion protection of steel in concrete, Sheffield, UK. Octobre 2002.
- [28]: **P.La Fontaine et D.Vézina:** « Performance des inhibiteurs de corrosion ». P: 28-29. Bulletin d'information technique, direction du laboratoire des chaussées; Vol.2,n°7,Juillet 1997.
- [29]: **P.C.Aitcin:** « La technologie des bétons à très haute résistance en Amérique du nord ». P180-189. Materials and structures. N°20 1987.
- [30]: **R.Fratesi, G.Moriconisi et F.Tittarelli:** « Corrosion protection by galvanised reinforcement in cracked concrete structures containing Fly ash». P: 384– 385. Proceeding of the internatioanal conference on corrosion and corrosion protection of steel in concrete, Sheffield, UK. Octobre 2002.
- [31]: **H.Justness:** « Calcium nitrate as corrosion inhibitor for reinforced concrete ». Vol 1, P: 491. Proceeding of the international conference on corrosion and corrosion protection of steel in concrete, Sheffield, UK. Octobre 2002.
- [32]: BAEL 91.Edition Eyrolles, 2^{ème} tirage. Paris 1993.
- [33]: **R.Dupain,R.Lanchon et J.C.Saint-Arroman:** « Granulats, sols, ciments et bétons ». Edition Casteilla. Paris 1995.
- [34]: **F.Gorisse:** « Essai et contrôle des bétons ». Edition Eyrolles. Paris 1995.
- [35]: **S.K.Kaushik et S.Islam:** « Suitability of sea water for mixing strutral concrete exposed to a marine environment ». P: 177-179. National Seminar on use of concrete in offshore structures. University of Roorkee. India. Publié par Elsevier Science Limited 1995.
- [36]: **G.Dreux:** « Nouveau guide du béton ».Edition Eyrolles. Paris1995.

WEBOGRAPHIE

- [37]: **C.Gérard:** « La carbonatation du béton armé »; <http://st-div.web.cern.ch/st-div/st98ws/technology/cgirard.pdf>.
- [38]: **G.Ping et J.J.Beaudoin:** « Pour bien mesurer la corrosion de l'armature du béton à l'aide de relevés de potentiel par demi-pile »; <http://www.nrc.ca/irc/ctus/ctu18f.pdf>
- [39]: **P.Lazard et B.Gérard:** « Mechanical behaviour of corrosion products formed at the steel concrete interface ». <http://www.ce.utexas.edu/em2000/papers/plazard.pdf>
- [40]: **R.Francois, A.Castel et T.Vidal:** « Prédiction de la durée de vie du béton armé ». <http://gc1.insa-tlse.fr/insagc/perso/raoul/gr2-2001.html>

Annexe

I-Essai sur liant:

➤ Mesure de la surface spécifique Blaine (SSB):

La surface spécifique est mesurée à l'aide du periametre de Blaine, elle est calculée par l'équation suivante:

$$SSB = \frac{K}{\rho(1-e)} \sqrt{\frac{t \cdot e^3}{\eta}} \quad (1)$$

- Avec:
- K : constante de l'appareil (K=23.65).
 - e : porosité (en général e=0.5).
 - η : viscosité de l'aire à la température de l'essai en poise.
 - t : temps de passage de l'aire dans la couche de la poudre en seconde.

La surface spécifique du ciment utilisé est 3100 cm/g.

II- Essai sur granulats:

➤ Essai d'équivalent de sable: (NF P18-598)

Cet essai est utilisé pour évaluer la propreté des sables entrant dans la composition des bétons. Il consiste à séparer les particules fines de éléments sableux plus grossier, l'échantillon est lavé selon un processus normalisé puis on mesure les hauteurs H_1 et H_2 .

Avec: H_1 : la hauteur du sable propre + éléments fin.

H_2 : la hauteur du sable propre.

L'équivalent de sable est donné par:

$$E_s = \frac{H_2 \times 100}{H_1} \quad (2)$$

Le sable utilisé dans ce travail a un équivalent de sable $E_s = 88.75\%$.

➤ **Module de finesse:**

Le module de finesse d'un sable est égale à $1/100^{\text{eme}}$ de la somme des refus exprimés en pourcentage issue de différents tamis de la série suivante: 0.16, 0.315, 0.63, 1.25, 2.5, 5.

Pour notre sable le module de finesse est M_f est égale à 2.93.

➤ **Masse volumique:**

Pour déterminer la masse ou le volume des différentes classes granulaires malaxées pour l'obtention d'un béton dont les caractéristiques sont imposées, o, doit déterminer la masse volumique des granulats.

Il s'agit de mesurer le volume occupé (apparent ou réel) pour masse sèche M du matériau à tester.

Pour nos granulats, nous somme arrivées aux résultats suivants:

Masse volumique (g/cm ³)	Classe	
	Sable	3/8
Réelle (ρ_1)	2.31	2.47
Apparente (ρ_2)	-----	2.37

Tableau 1: Masses volumiques des granulats.

III- Essais sur béton:

➤ **Masse volumique du béton frais:**

Cet essai consiste à:

- Remplir un récipient de volume V et de masse M_r d'un échantillon de béton frais.
- Araser et laisser la surface du béton à l'aide d'une truelle.
- Peser le récipient rempli de masse totale M_t .
- La masse volumique du béton frais sera alors:

$$\rho_{bf} = \frac{M_t - M_r}{V} \quad (3)$$

Dans notre cas la masse volumique trouvée égale à 2406Kg/m^3

- **Masse volumique du béton durci:**

