

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République algérienne démocratique et populaire
Ministre de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



Mémoire de MASTER

Faculté de sciences et de la technologie

Domaine : **Sciences et Technologie**

Département de : **génie civil et hydraulique**

Spécialité : **génie civil**

Option : **structures**

Présenté par : **SAIDIA** Mohammed Aymen.

SALAH SALAH Mounsif.

**Sujet : Influence de la corrosion dans les ouvrages en
béton armé.**

Sous la direction de : Mme. BENDJAICHE.R.

SEP 2020

RESUME

La dégradation et l'entretien des ouvrages en béton armé sont un constant sujet de préoccupations, entraînant des Frais considérables et causant de graves préjudices dans l'industrie et chez les usages.

Pour l'ingénieur ce problème comporte deux aspects fondamentaux : Prévenir et guérir.

Mis à part la nécessité de connaître dans les deux cas la nature des dommages qui peuvent se produire, ces deux aspects sont distincts et seront traités séparément dans ce mémoire.

Des deux considérations, prévenir et guérir, la première est la plus d'importance. En fait, ce mémoire traite d'une part, les dégradations des ouvrages en béton armé surtout celles causées par la corrosion et d'une autre part, des différentes techniques de prévention et de réparation de ces désordres.

Mots clés : béton, béton armé, acier, durabilité, corrosion, carbonatation, chlorures, diagnostic, réhabilitation.

ABSTRACT

The degradation and maintenance of reinforced concrete structures are a constant subject of concern, entailing considerable costs and causing serious damages in industry and use.

For the engineer, this problem has two fundamental aspects: prevention and cure.

Apart from the need to know in both cases the nature of the damage that may occur, these two aspects are distinct and each dealt with separately in this work.

Between the two considerations, prevention and cure, the first is more important. In fact, this thesis deals on the one hand with the deterioration of reinforced concrete structures, especially those caused by corrosion, and on the other hand, with the various techniques for preventing and repairing these disorders.

Keywords: concrete, reinforced concrete, steel, durability, corrosion, carbonation, chlorides, diagnosis, rehabilitation.

ملخص

يعد تدهور وصيانة الهياكل الخرسانية المسلحة موضع قلق دائم، وينطوي على تكاليف باهظة ويتسبب في أضرار جسيمة في الصناعة والاستخدام.

بالنسبة للمهندس، هذه المشكلة لها جانبان أساسيان: الوقاية والعلاج.

بصرف النظر عن الحاجة إلى معرفة طبيعة الضرر الذي قد يحدث في كلتا الحالتين، فهذان الجانبان متميزان ويتم التعامل مع القسم بشكل منفصل في هذا العمل.

من بين اعتباري الوقاية والعلاج، فإن الأول هو الأكثر أهمية. في الواقع، تتناول هذه الأطروحة من ناحية تدهور الهياكل الخرسانية المسلحة، خاصة تلك الناتجة عن التآكل، ومن ناحية أخرى، مع التقنيات المختلفة للوقاية من هذه الاضطرابات وإصلاحها.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة، الخرسانة المسلحة، التسليح، المتانة، التآكل، الكربنة، الكلوريدات، التشخيص، إعادة التأهيل.

TABLES DES MATIERES

Page

RESUME	1
TABLES DES MATIERES	4
LISTE DES TABLEAUX	7
LISTE DES FIGURES	8
INTRODUCTION GENERALE	12

CHAPITRE 1

PATHOLOGIES DES BATIMENTS	14
--	-----------

1.1 Pathologies existant à l'origine	14
1.1.1 Le retrait plastique	14
1.1.2 Les retraits endogènes	15
1.1.3 Autres types des dégradations	15
1.1.3.1 Déplacement des coffrages	15
1.1.3.2 Décoffrage prématuré	15
1.2 Les dégradations apparaissent dans le temps	15
1.2.1 Les dégradations du béton d'origine chimique	15
1.2.1.1 Action du gaz carbonique (carbonatation du béton)	16
1.2.1.2 Action des chlorures	17
1.2.1.3 Action des sulfates	17
1.2.1.4 Action d'alcali-réaction	18
1.2.1.5 Autres attaques (eau de mer, eaux pures)	18
1.2.2 Les dégradations d'origine physique	19
1.2.3 Les dégradations d'origine mécanique	20
1.2.4 Les dégradations d'origine bactériologique	21

CHAPITRE 2

LA CORROSION DES ACIERS DANS LE BETON ARME	22
---	-----------

2.1 Introduction	22
2.2 Conséquences des désordres	23
2.2.1 L'aspect de l'ouvrage	23
2.2.2 La sécurité vis-à-vis des usagers	23
2.2.3 La stabilité de la construction	23
2.3 Des ouvrages dégradés à cause de la corrosion	24
2.4 Différents types de la corrosion	30
2.4.1 Corrosion chimique (séché)	31
2.4.2 Corrosion biochimique	31
2.4.3 Corrosion avec érosion, avec frottement et par cavitation	32
2.4.4 Corrosion électrochimique	32
2.4.5 La corrosion atmosphérique	32

2.5	Processus de corrosion	33
2.6	Les facteurs de la corrosion	33
2.7	Types de corrosions électrochimiques	34
2.7.1	La corrosion uniforme (généralisé)	34
2.7.2	La corrosion localisée	35
2.7.2.1	Corrosion intergranulaire (intercristalline)	35
2.7.2.2	Corrosion par piqures	36
2.7.2.3	Corrosion sous contrainte (C.S.C)	36
2.7.2.4	Corrosion par crevasses (caverneuse)	37
2.7.2.5	Fragilisation par l'hydrogène	38
2.7.2.6	Corrosion par érosion	40
2.7.2.7	Corrosion galvanique	40
2.7.2.8	Corrosion sélective	41
2.8	Moyens de protection contre la corrosion	41
2.8.1	Prévention par une forme adaptée des pièces	42
2.8.2	Prévention par le choix du matériau	45
2.8.3	Résistance des alliages à la corrosion	45
2.8.4	Protection par revêtements	46
2.8.4.1	Protection par revêtements non métalliques	46
2.8.4.2	Protection par revêtements métalliques	47
2.8.5	Protection par inhibiteurs de corrosion	47
2.8.6	Protection électrochimique	47
2.9	L'influence de la corrosion sur les aciers dans le béton armé	47
2.9.1	Le béton armé	48
2.9.1.1	Le béton	48
2.9.1.2	L'acier	50
2.9.2	Généralités sur la corrosion des aciers dans le béton	50
2.9.3	La passivation des armatures dans le béton	51
2.9.4	Les étapes de corrosion	52
2.9.5	La dépassivation des aciers dans le béton	53
2.9.6	Amorçage de la corrosion par carbonatation	53
2.9.6.1	Généralités	53
2.9.6.2	Les réactions physico-chimiques	53
2.9.6.3	Les facteurs influençant la vitesse de carbonatation	55
2.9.6.4	Conséquence de la carbonatation sur le béton	57
2.9.7	Amorçage de la corrosion par pénétration des ions chlorures	59
2.9.7.1	Généralités	59
2.9.7.2	Les réactions physico-chimiques	59
2.9.7.3	Teneur critique en ions chlorures	60
2.9.7.4	Facteurs influant sur la pénétration des chlorures	61
2.9.8	Formation des produits de corrosion expansifs	64
2.9.8.1	Masse d'acier consommée	64
2.9.8.2	Surface d'acier consommée	64
2.9.9	Densité du courant de corrosion	65

CHAPITRE 3

DIAGNOSTIC	66
3.1 Objectifs du diagnostic	66
3.1.1 Cas particulier de la corrosion des armatures	66
3.3.1.1 L'approche réactive	66
3.3.1.2 L'approche proactive	67
3.1.2 Procédure à suivre	67
3.2 Inspection détaillée	67
3.2.1 Préparation de l'inspection	67
3.2.2 Inspection	67
3.3 Suivi des structures in situ	68
3.3.1 Intérêt technico-économique du suivi des ouvrages	69
3.3.2 Les différentes méthodes de suivi des structures in situ	70
3.3.2.1 Les mesures de potentiel d'électrode	71
3.3.2.2 Les mesures de résistivité	71
3.3.2.3 Capteurs basés sur des mesures électriques	72
3.3.2.4 Capteurs à fibres optiques	75
3.3.3 Exemples d'application	76
3.3.3.1 Sur des structures nouvelles	76
3.3.3.2 Sur des structures existantes	77
3.3.4 Conclusion sur le suivi des structures in situ	79
3.4 Analyses et essais de laboratoire	80
3.4.1 Méthodes de prélèvements	81
3.4.2 Caractérisation chimique	81
3.4.3 Caractérisation minéralogique	81
3.4.4 Caractérisation physique	82
3.5 Rapport de diagnostic	83

CHAPITRE 4

REPARATION DES OUVRAGES EN BETON ARME	85
4.1 Les méthodes électrochimiques	85
4.1.1 La protection cathodique	85
4.1.2 Extraction électrochimique des ions chlorures	86
4.2 Les méthodes non électrochimiques	87
4.2.1 Application de revêtements	87
4.2.1.1 Revêtements pour le génie civil	87
4.2.1.2 Les peintures	88
4.2.1.3 Procédure d'application - acteurs de la mise en œuvre et matériel	89
4.2.1.4 Processus d'exécution et contrôles	90
4.2.1.5 Domaines d'application et limites d'emploi	92
4.2.1.6 Essais de réception	92
4.2.1.7 Durée et efficacité du procédé	92
4.2.2 Les Inhibiteurs de corrosion	93
4.2.2.1 Pénétrabilité	95
4.2.2.2 Influence sur les propriétés du béton	95
4.2.2.3 Mesure de l'efficacité	95
4.2.2.4 Toxicité	96
4.2.2.5 Quelques produits sur le marché	98

4.2.3	La réparation par mortiers	98
4.2.3.1	Elimination des zones dégradées	98
4.2.3.2	Remplacement des armatures fortement corrodées	99
4.2.3.3	Protection des armatures	99
4.2.3.4	Etape de la réfection des bétons	99
4.2.3.5	Précautions particulières à prendre	100
4.2.3.6	Les mortiers de réparation	101
4.2.4	Imprégnations	101
4.2.4.1.	Domaine et limites d'emploi	102
4.2.4.2.	Produits hydrofuges	103
4.2.4.3	Procédure de choix et d'application	104
4.2.4.4	Exemples d'essais de convenance	106
4.2.4.5	Durée et efficacité du traitement	109
4.2.5	Projection du béton	110
4.2.5.1	Principes et définitions	110
4.2.5.2	Rôle des adjuvants, des fibres et des fumées de silice	111
4.2.5.3	Procédure d'application du béton projeté	112
4.2.5.4	Contrôle de la mise en œuvre	113
4.2.5.5	Domaine et limites d'emploi	114
4.2.5.6	Essais de réception	114
4.2.5.7	Durée et efficacité du procédé	114
4.3	Récapitulatif	115
 CONCLUSION GENERALE		119
 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES		120

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE 2

Tableau 2.1 : Les facteurs de la corrosion	36
Tableau 2.2 : Indique la résistance intrinsèque à la corrosion de quelques métaux purs dans les différents milieux.	49
Tableau 2.3 : Teneurs critiques en ions chlorures et rapports Cl ⁻ /OH ⁻ relevés dans la littérature.....	61
Tableau 2.4 : Analyse chimique des ciments de l'étude menée par FRANCY	62

CHAPITRE 3

Tableau 3.1 : Niveau de risque de corrosion en fonction du potentiel d'armature mesuré par rapport à différentes électrodes de référence et selon la norme ASTM C 876	73
--	----

CHAPITRE 4

Tableau 4.1: Les durées de garantie contractuelles à mentionner dans le marché, pour les différentes fonctions visées	92
Tableau 4.2 : Exemples de produits disponibles sur le marché	95
Tableau 4.3: Classification des mortiers par Emersons et Morgan	102
Tableau 4.4 : essais sur site	109
Tableau 4.5 : essais sur prélèvements	110
Tableau 4.6 : Traitements électrochimiques (Protection cathodique)	116
Tableau 4.7 : Traitements électrochimiques (Extraction des chlorures, Ré-alcalinisation des bétons)	117
Tableau 4.8 : Application de revêtements (Peintures, lasures et autres revêtements)	117
Tableau 4.9 : Produits protecteurs (Inhibiteurs de corrosion)	118
Tableau 4.10 : Réparation par mortiers	118
Tableau 4.11 : Imprégnations (Hydrofuges de surface)	118
Tableau 4.12 : Projection du béton	119

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE 1

Figure 1.1 : signes visibles de détérioration des structures [AND 00]	18
Figure 1.1 : Influence de l'humidité sur la profondeur de la carbonatation [AND 00]	25

CHAPITRE 2

Figure 2.1 : Eclats en formation [AFGC 03]	26
Figure 2.2 : Poutre support de réservoir [AFGC 03]	26
Figure 2.3 : Poteau porteur garage sous [AFGC 03]	26
Figure 2.4 : Poteau support de ligne électrifiée [AFGC 03]	27
Figure 2.5 : Pile de pont [AFGC 03]	28
Figure 2.6 : Paroi d'aéroréfrigérant [AFGC 03]	29
Figure 2.7 : Pile en zone de marnage [AFGC 03]	29
Figure 2.8 : Poutre de tablier [AFGC 03]	30
Figure 2.9 : Quai en zone de marnage [AFGC 03]	30
Figure 2.10 : Canal en béton armé [AFGC 03]	31
Figure 2.11 : Parement en béton armé dans un monastère classé [AFGC 03]	32
Figure 2.12 : Exemple de corrosion chimique [AFGC 03]	33
Figure 2.13 : Corrosion électrochimique [AFGC 03]	35
Figure 2.14 : Corrosion uniforme [AFGC 03]	37
Figure 2.15 : Corrosion intergranulaire [AFGC 03]	37
Figure 2.16 : Corrosion par piqure [BEN]	38
Figure 2.17 : la corrosion sous contrainte [AFGC 03]	39
Figure 2.18 : Corrosion par crevasses [AFGC 03]	40
Figure 2.19 : Corrosion par érosion [AFGC 03]	41
Figure 2.20 : Corrosion galvanique [AFGC 03]	41
Figure 2.21 : Corrosion sélective [AFGC 03]	42
Figure 2.22 : Schéma d'une vidange incomplète [AFGC 03]	42
Figure 2.23 : Une vidange complète [AFGC 03]	43
Figure 2.24 : Diminution du risque de corrosion sous contrainte d'un boulon (contrainte locale élevé (a) et Contrainte locale peu élevée (b)) [AFGC 03]	43

Figure 2.25 : Diminution du risque de corrosion-érosion d'un coude (risque plus élevé pour (a) que pour (b)) [AFGC 03]	44
Figure 2.26 : Corrosion caverneuse d'un joint due à la formation d'une pile d'aération L'emploi de pièces soudées, est de ce point de vue, souvent préférable à celui d'assemblages rivetés ou vissés [AFGC 03]	44
Figure 2.27 : Contact entre matériaux différents [AFGC 03]	45
Figure 2.28 : Une pièce sacrificielle en acier, placée entre une conduite en laiton et un échangeur de chaleur en acier [AFGC 03]	45
Figure 2.29 : Procédé de fabrication du ciment et du béton [BEN]	50
Figure 2.30 : Représentation schématique de processus de base de la corrosion des aciers dans le béton [BAG 02]	51
Figure 2.31 : Mécanisme de dissolution de l'acier dans le béton en présence d'ions chlore [MING 05]	51
Figure 2.32 : Passivation [SHAM 03]	52
Figure 2.33 : Etapes de l'évolution de la corrosion des armatures dans le béton [SHAM 03].....	54
Figure 2.34 : Mécanisme de carbonatation de la Portlandite [THIER 05]	55
Figure 2.35 : La progression de la carbonatation [THIER 05]	5
Figure 2.36 : Evolution de la profondeur de carbonatation en fonction du temps et du rapport E/C (20° C-50% HR). [BAR 92]	56
Figure 2.37 : Evolution de la carbonatation dans le béton en fonction du dosage en ciment [OLLI 08]	57
Figure 2.38 : Incidence de l'humidité relative de l'air sur la vitesse de carbonatation [OLLI 08]	60
Figure 2.39 : Modèle de PAGE et al. D'attaque de l'acier par les ions chlorures [PAG 96].....	60
Figure 2.40 : Relation entre le coefficient de perméabilité à l'eau des pâtes de ciment totalement hydraté et le rapport E/C [POW 54]	62
Figure 2.41 : Isotherme de fixation du chlore sur deux mortiers [FRA 98]	62
Figure 2.42 : Profil en chlorure total après imbibition de 48 heures sur matériaux secs par des solutions saines à 20g/l en NaCl [FRA 98]	63

CHAPITRE 3

Figure 3.1 : La place des investigations et du suivi des structures dans les méthodes réactives et proactives de contrôle des structures en béton armé [AFGC 03]	69
Figure 3.2 : Comparaison des coûts respectivement engendrés par les stratégies réactives et proactives de maintenance des structures en béton [AFGC 03]	70
Figure 3.3 : Schéma d'un système de mesure de la résistivité du béton basée composé de 4 électrodes [AFGC 03]	72
Figure 3.4 : Schéma d'un capteur de corrosion basé sur des mesures de courant de corrosion à différentes profondeurs [AFGC 03]	74
Figure 3.5 : Schéma du capteur multiple de corrosion développé par Duffo [AFGC 03]	75
Figure 3.6 : Capteur multiple de corrosion avant d'être incorporé dans un mortier [AFGC 03].....	75
Figure 3.7 : Capteur multiple de corrosion intégré dans une nouvelle structure [AFGC 03] ...	76
Figure 3.8 : L'aéroport de Funchal sur l'île de Madère [AFGC 03]	77
Figure 3.9 : Capteur de corrosion intégré lors de l'extension de la piste d'atterrissage de l'aéroport de Funchal [AFGC 03]	78
Figure 3.10 : Le pont Edgar Cardoso situé à Figueira Da Foz [AFGC 03]	79
Figure 3.11 : Instrumentation d'une zone réhabilitée après corrosion [AFGC 03]	80
Figure 3.12 : Prélèvements par carottage [AFGC 03]	81
Figure 3.13 : Cristal de chloroaluminate [AFGC 03]	82
Figure 3.14 : Spectre EDS associé [AFGC 03]	83

CHAPITRE 4

Figure 4.1 : une protection cathodique [CONS]	85
Figure 4.2 : une extraction électrochimique des ions chlores (réalcalinisation) [CEFRACOR].....	85
Figure 4.3 : Application de la finition [CONS]	86
Figure 4.4 : une application d'une protection d'armatures (mortier anticorrosion) [AFGC 03].....	98
Figure 4.5 : reconstitution de l'enrobage [CONS]	99
Figure 4.6 : Pontage par les fibres des fissures dues aux retraites [MAL 11]	103
Figure 4.6 : Représentation schématique de la formation du film polymère [GRE 11]	105
Figure 4.7 : Modèle de formation de la co-matrice polymère-ciment [VAN 05]	105
Figure 4.8 : Action d'un produit hydrofuge [AFGC 03]	106
Figure 4.9 : Projection de béton [AFGC 03]	110

INTRODUCTION GENERALE

Le domaine de la réparation et de la réhabilitation des ouvrages en béton armé est en pleine évolution. En effet, la plupart des ouvrages en béton armé, en particulier les structures marines, ont plus de 40 ans et beaucoup d'entre eux nécessitent des travaux de maintenance et de réparation vu leur état de dégradation.

La corrosion des armatures occupe le premier rang des dégradations causant ainsi des désordres dans le béton jusqu'à la ruine partielle de l'ouvrage.

Le coût engendré par ces réparations représente de grands enjeux économiques pour les maîtres d'ouvrages qui doivent trouver des solutions et des méthodes optimisées de réparation.

Devant l'augmentation de l'ampleur des travaux de réparation et de maintenance des ouvrages en béton armé dégradés, des guides techniques, des normes et des règles de l'art ont été développés.

En conditions optimales, le béton fournit la résistance à la corrosion au renfort en acier physiquement, en agissant en tant que barrière, et chimiquement, en favorisant la formation d'une couche passive d'oxyde sur l'acier, due à son pH élevé. En présence des ions de chlorure ou des agents de pH-réducteurs (par exemple. Le CO_2), cependant, cette couche passive est détruite et la corrosion est lancée. Une fois que le déclenchement se produit, les décisions concernant la future capacité d'une structure d'être solide et utile dépendent d'une évaluation précise des conditions affectant sa corrosion et le taux d'occurrence de détérioration. En utilisant cette information, une décision au courant peut être prise quant au type, au coût et à l'urgence des mesures possibles de réparation.

Dans des décennies récentes, plusieurs techniques électrochimiques non destructives ont été développées, pour surveiller la corrosion de l'acier avant que des signes de la corrosion soient manifestés. Bien que les techniques électrochimiques fournissent une rapide méthode théorique précise pour déterminer les taux de corrosion, ils n'ont été à peine employés dans les chantiers.

La cause principale derrière leur utilisation limitée est que beaucoup d'anomalies ont été rapportées dans les résultats en comparant les résultats obtenus par les techniques au taux de corrosion nuisible obtenu en exposant l'armature.

Dans l'utilisation sur le terrain, les mesures sont habituellement prises dans un environnement non contrôlé, où la quantité des armatures est infiniment grande comparée aux installations expérimentales de laboratoire, les résultats se sont souvent avérés pour égarer des ingénieurs ou des chercheurs.

Les causes primaires des résultats fallacieux sont le manque d'arrangement de l'effet d'examiner les paramètres et l'effet des caractéristiques du béton sur l'exactitude générale des techniques.

Afin de retarder le délai d'amorçage de la corrosion, un certain nombre de stratégies ont été développées dans le passé. Certaines stratégies y parviennent en améliorant la capacité du béton à résister à la diffusion du chlorure, tandis que d'autres stratégies y parviennent en utilisant des armatures avec des seuils de chlorure plus élevés (la quantité de chlorures nécessaire pour initier la corrosion) par rapport à l'acier au carbone conventionnellement utilisé.

Une méthode fréquemment utilisée pour améliorer la capacité du béton à résister à la diffusion du chlorure, et par la suite augmenter la durée de vie du béton, est l'incorporation des additions (tels que les cendres volantes, le laitier granulé de haut fourneau broyé et / ou les fumées de silice).

Ces matériaux sont des sous-produits industriels qui peuvent être utilisés comme remplacement partiel du ciment. Un grand nombre d'études ont établi l'effet avantageux des additions sur la diminution de la perméabilité du béton et l'augmentation du temps nécessaire aux chlorures pour atteindre la surface de l'armature à des concentrations suffisantes pour initier la corrosion. Une autre méthode qui peut être utilisée pour retarder le délai d'amorçage de la corrosion est l'utilisation d'armatures résistantes à la corrosion telle que l'acier inoxydable. L'acier inoxydable a généralement montré un seuil de chlorure qui est significativement plus élevé que celui de l'acier ordinaire au carbone.

Cependant, le coût associé aux éléments d'alliage et les exigences de traitement font de ces armatures une alternative coûteuse par rapport aux armatures en acier au carbone. Par conséquent, il est actuellement nécessaire de quantifier l'étendue de la prolongation de la durée de vie associée à l'utilisation de tels armatures, pour répondre à la question de savoir si le coût significativement plus élevé est justifié en termes de performance et d'évaluation du coût du cycle de vie.

Ce mémoire vise à comprendre la fiabilité d'un certain nombre de techniques de surveillance de la corrosion ainsi que les performances de différentes méthodes d'atténuation de la corrosion.

Ce mémoire fournit des lignes directrices sur l'évaluation du taux de corrosion dans différentes conditions prévalant sur le terrain et en laboratoire. En outre, l'étude sert à découvrir les raisons des incohérences entre les techniques et à fournir un guide aux ingénieurs et aux chercheurs pour optimiser leur utilisation dans des conditions de terrain.

Cette étude est un outil précieux pour répondre à la question de savoir comment on augmente le délai d'initiation de la corrosion ou bien une diminution du seuil de chlorure associée à ces systèmes peut avoir un effet substantiel sur la durée de vie du béton.

Enfin, cette étude est importante pour quantifier l'augmentation du seuil de chlorure, puis la prolongation de la durée de vie du béton.

Comme on le verra plus tard dans le premier chapitre, pour qu'une réparation puisse être effectuée, il faut que l'on se soit rendu compte de la détérioration avant qu'il soit trop tard, c'est à dire connaître les pathologies qui puissent dégrader notre structure.

Puis dans le second chapitre on verra la définition de la corrosion et le mécanisme de ce désordre.

Après dans le troisième chapitre on verra comment on peut diagnostiquer notre ouvrage en béton armé.

Enfin dans le dernier chapitre on verra les différentes méthodes de réparation des ouvrages dégradés par la corrosion.

Ce mémoire était supposée de présenter également les résultats obtenus en étudiant des échantillons de béton armé contenant divers niveaux des additions et des adjuvants après exposition à un milieu agressif, mais malheureusement les essais ont rompu à cause du COVID-19.

CHAPITRE 1

PATHOLOGIES DES BATIMENTS

Pour évaluer la durabilité « potentielle » d'un béton, il est nécessaire de connaître les mécanismes susceptibles de conduire à sa dégradation, et d'étudier la résistance du matériau vis-à-vis de ces dégradations.

Si l'on exclut, d'une part les événements accidentels, et d'autre part les effets à long terme des sollicitations mécaniques, tel que la fatigue due à des sollicitations répétées ou le fluage pouvant engendrer des pertes de précontrainte ou encore l'abrasion [AND 00], la durée de vie des ouvrages en béton armé ou précontraint peut être limitée par:

- La pénétration d'agents agressifs qui peut conduire à l'amorçage (et au développement) du processus de corrosion des armatures;
- Les réactions chimiques internes, mettant en jeu des espèces issues du milieu environnant ou déjà présents dans le matériau, telle que l'alcali-réaction ou les attaques sulfatiques, sources de gonflement et de fissuration du béton.
- **Les cycles de gel-dégel qui entraînent gonflements et fissuration du béton par gel interne et un écaillage des surfaces exposées au sel (déverglaçage).**

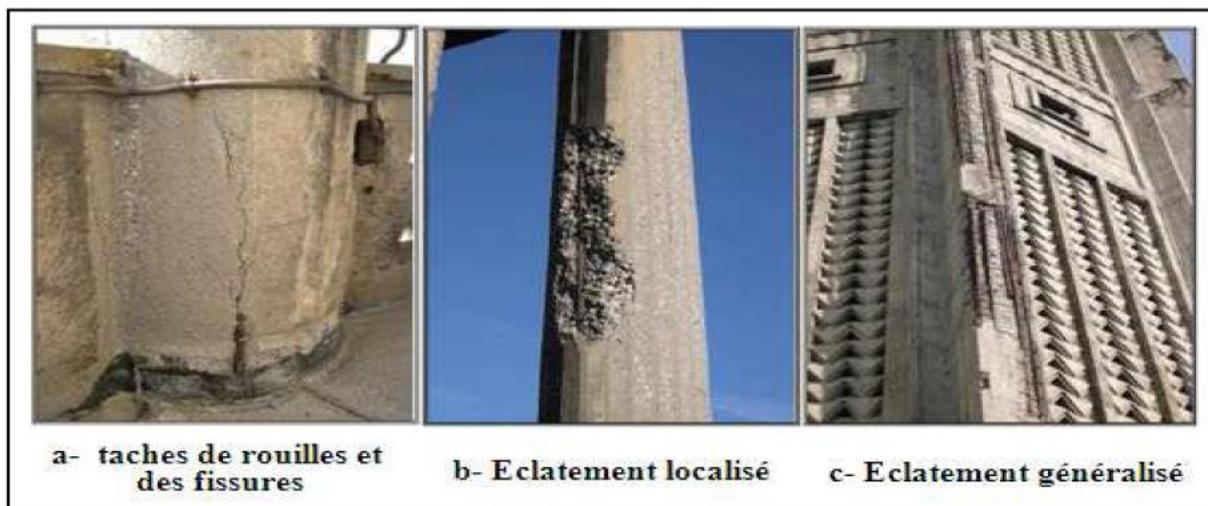


Figure 1.1 : signes visibles de détérioration des structures [AND 00]

1.1 Pathologies existant à l'origine

La réalisation d'un béton durable imposait de réduire les possibilités de transfert et donc de travailler sur l'interconnexion des pores.

Une autre voie de pénétration possible des agents agressifs est les fissures et particulièrement la fissuration précoce qui peut présenter des ouvertures importantes et qui n'a rien à voir avec la fissuration fonctionnelle du béton armé [AND 00].

1.1.1 Le retrait plastique

Le retrait plastique résulte d'une dessiccation exogène qui a lieu avant et pendant la prise et il dépend dans une large mesure de la vitesse de dessiccation qui dépend elle-même de la température de l'air et du béton, de l'humidité relative et la vitesse du vent.

Les risques de fissuration intéressent surtout les pièces fines et résultent d'un béton médiocre (mauvaise rétention d'eau) d'un support mal préparé (trop absorbant) et d'une cure mal conduite (mal ou tardivement appliquée). Il conviendra donc d'éviter une dessiccation trop importante du béton frais, supérieur à environ 1,5 kg/m².h en assurant une cure efficace par une humidification de la surface ou l'interposition d'une feuille de polyane ou encore la projection d'un produit de cure.

En outre. Une humidification des coffrages et des granulats absorbants et le recours à des paravents et parasoleils temporaires sont des précautions complémentaires utiles.

1.1.2 Les retraits endogènes

Nous avons déjà abordé les notions des retraits endogènes thermiques et hydriques (pour ce dernier la question ne se pose que pour des rapports E/C faibles), ainsi que les risques de fissuration' associées. En pratique dans l'exécution de pièces massives (épaisseurs de béton supérieures à 60 ou 80 cm), il sera préférable d'utiliser un ciment présentant une faible vitesse de dégagement de chaleur en restant bien sûr compatible avec les performances requises au jeune âge (ce qui demeure un point délicat).

En résumé, la fissuration précoce est limitée si le béton est composé avec un dosage optimum en éléments fins et une taille des gros granulats compatible avec les dimensions du coffrage et l'encombrement des armatures.

La cure est un facteur essentiel et doit être appliquée correctement et en temps voulu. Il faut donc veiller à la régularité des approvisionnements et de toutes les opérations de la chaîne de mise en œuvre. Enfin il ne faut pas sous-estimer dans tout le processus de fabrication et de mise en place du béton le rôle du facteur humain.

1.1.3 Autres types des dégradations

1.1.3.1 Déplacement des coffrages

L'une des causes de la fissuration du béton est le mouvement des coffrages qui se manifeste pendant le durcissement du béton, précisément entre le moment où le béton commence à prendre sa fluidité et le moment où il fait prise, favorisant l'apparition de fissures internes, et donc invisible à l'examen direct. Dans ce cas, le danger est bien réel et non négligeable parce que ces fissures forment une poche d'eau dans la masse du béton qui provoque également l'éclatement de sa surface.

Ces mêmes poches seront la cause ultérieure de la corrosion des armatures.

1.1.3.2 Décoffrage prématuré

Pour des raisons économiques ou temporelles, on a tendance à retirer le coffrage avant que le béton ait acquis une résistance suffisante il résulte l'apparition de fissures qui peuvent avoir de conséquences négatives. Pour y remédier, il suffira de laisser le coffrage en place jusqu'à ce que le béton soit suffisamment résistant.

1.2 Les dégradations apparaissent dans le temps

1.2.1 Les dégradations du béton d'origine chimique

Les armatures en acier sont naturellement protégées par le béton qui libère une solution basique (PH > 13). L'acier des bétons armés est passif. Cependant, plusieurs agents peuvent s'attaquer à

cette protection de fait et provoquer des fissurations du béton et un risque potentiel de détérioration des armatures.

1.2.1.1 Action du gaz carbonique (carbonatation du béton)

- Mécanisme

Le béton, presque toujours en contact avec l'air ambiant, est soumis à l'action du gaz carbonique (CO₂), a teneur en CO₂ de l'air, naturellement de l'ordre de 0,03 à 0,05% en volume, varie avec la température, et le milieu environnant. Le mécanisme de la réaction qui correspond à la réaction du CO₂ avec tous les hydrates du ciment et plus particulièrement avec les chaux hydrates par l'hydratation des silicates peut se carbonater.

Cette réaction provoque la neutralisation progressive de l'alcalinité du ciment: le milieu basique (PH > 13) perd cette alcalinité et son PH devient (PH < 9) inférieur à 9.

La protection naturelle des armatures n'est plus alors assurée.

Par ailleurs, l'eau chargée de gaz carbonique donne naissance à un acide faible (H₂CO₂ : acide carbonique) et attaque la chaux et le carbonate de chaux.

Le bicarbonate de chaux ainsi formé dans l'eau et la destruction du béton à lieu par délavage progressif du liant avec parfois formation de stalactites.

- Les facteurs qui influent sur la carbonatation

L'épaisseur de la couche carbonatée (x) varie avec le temps (t) selon la loi de **Fick** :

$$x = K\sqrt{t} \quad (1.1)$$

Où

K : coefficient lié au coefficient de diffusion du CO₂ qui dépend de la composition du béton et des conditions environnantes [AND 00].

La profondeur de carbonatation est autant élevée que:

- le dosage en ciment est faible et le rapport E/C est élevé;
- la résistance de béton est faible;
- la durée de cure est faible;
- la teneur en addition pouzzolanique est élevée;
- l'humidité relative est comprise en 40 et 60%.

Un béton ordinaire conservé dans une atmosphère chargée à 65% d'humidité se carbonate à la vitesse suivante:

1 an X=5mm
4 ans X=10mm
25 ans X=25mm

Toutefois, les essais de laboratoire et les mesures effectuées sur les ouvrages réels montrent que les résultats sont très dispersés.

Nous présentons ci-après la variation de la profondeur de carbonatation en fonction d'un certain nombre de paramètres, obtenus essentiellement à partir d'essais sur des éprouvettes de béton ou de mortier au laboratoire et ainsi que les essais in situ (essais. non destructifs).

Les expériences montrent également que la carbonatation est maximale lorsque l'humidité de l'air est voisine de 60%.

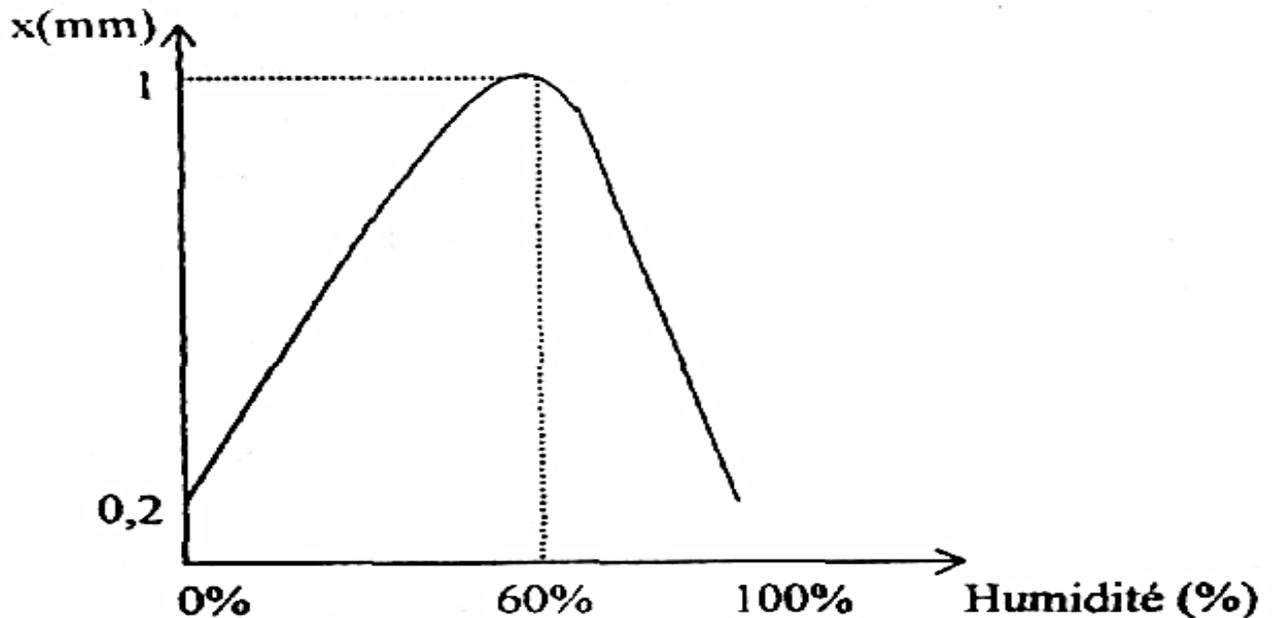


Figure 1.1 : Influence de l'humidité sur la profondeur de la carbonatation [AND 00]

1.2.1.2 Action des chlorures

Les chlorures présents dans un béton sont issus des constituants utilisés lors de la confection du béton, soit issus de l'extérieur (embruns marins ou sels fondants).

A l'intérieur, ils sont soit liés, sous forme de chloroaluminates, soit non liés pouvant alors migrer par capillarité suite aux cycles de mouillage et de séchage, ou par phénomène de diffusion).

La vitesse de pénétration des chlorures dépend encore de la porosité de la pâte de ciment; elle décroît avec le rapport E/C de façon exponentielle et dépend bien sûr de la concentration de la solution environnante en sels.

La présence d'additions, telle que les laitiers, les cendres volantes et les fumées de silice, permet également de réduire sensiblement les coefficients de diffusion des chlorures dans le béton, mais toujours sous réserve d'une cure humide prolongée.

A même classe de résistance, et tant que le dosage en ciment est suffisant, nous pouvons considérer que ces additions diminuent la pénétration des chlorures.

1.2.1.3 Action des sulfates

Les sulfates présentent un risque majeur d'agression chimique pour le béton.

Ces sulfates peuvent être d'origine naturelle, biologique ou provenir de pollution domestique ou industrielle.

La dégradation par les ions sulfates se traduit par une expansion, par exemple le sulfate de magnésium contenu dans l'eau salée qui comporte également des sels de type chlorure de

sodium, Chlorure de magnésium, sulfate de calcium, hydrogénocarbonate de potassium sont les plus nuisibles parmi ces sels.

Il réagit avec la chaux hydratée pour donner du gypse et de la brucite.

Par ailleurs, son action sur les aluminates du ciment se traduit par la formation d'ettringite. L'expansion due à la cristallisation de l'eau de mer jusqu'aux armatures.

1.2.1.4 Action d'alcali-réaction

Le premier cas d'expansion lié à l'alcali-réaction a été identifié dans un barrage californien à l'États Unis en 1940. Depuis le problème a été reconnu dans presque tous les pays du monde, mais son importance reste fort variable d'un pays à un autre.

Il existe trois (03) types de réaction:

- la réaction alcali-silice.
- la réaction alcali-silicate.
- la réaction alcali-carbonate.

La plus fréquente est la première, son mécanisme qui est encore mal défini peut cependant être décrit de la façon suivante:

- dans un premier temps, les alcalins qui proviennent essentiellement du ciment (mais aussi dans certains cas de l'altération des granulats du béton en milieu basique, comme les granulats contenant des feldspaths. Des micas ou des argiles).

La solution interstitielle présente dans les pores du béton peut entrer en contact avec les particules de silice réactive présentes à la surface ou dans les fissures des granulats. Il se forme alors un gel de silicate alcalin.

- Dans un second temps, ce gel de silicate alcalin se combine avec le calcium provenant de la pâte du liant (essentiellement le portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), car c'est la phase la plus réactive) pour former un gel silico-calco-alcalin, ce gel peut absorber une grande quantité d'eau; ces derniers aux propriétés expansives conduisent à des désordres structurels sous la forme de faïençage fissures,..etc.).

1.2.1.5 Autres attaques (eau de mer, eaux pures)

L'eau de mer est probablement l'un des milieux les plus agressifs qui soit pour le béton, son attaque est le résultat de réactions plus ou moins simultanées entre les sulfates, les chlorures et les constituants du ciment. Les sels de magnésium (MgCl_2 et MgSO_4) sont les plus agressifs. La substitution $\text{Mg}^{++} \longrightarrow \text{Ca}^{++}$ se fait aisément dans la portlandite mais aussi dans les C-S-II qui se transforment progressivement en M-S-H silicate de magnésium sans propriétés liantes.

La cause de dégradation la plus importante reste cependant la formation d'ettringite qui engendre un gonflement du matériau puis une fissuration. L'attaque se fait d'abord en surface puis pénètre au cœur du matériau. Les zones les plus atteints sont celles soumises au marnage, car aux agressions d'origine chimique se rajoutent les actions mécaniques des vagues qui enlèvent les parties de béton malades, et les actions physiques liées au cycle séchage mouillage.

1.2.2 Les dégradations d'origine physique

D'un point de vue physique il est important de noter que le béton est un matériau hydraulique et poreux et qu'à ce titre, il est sujet à un certain nombre de phénomènes qui sont basés sur le comportement de l'eau en son sein et sur les échanges d'eau avec le milieu extérieur.

- **Retrait, tassement**

Le béton peut présenter des dégradations dont la cause est l'existence d'un retrait mal maîtrisé, le retrait est en effet un phénomène physico-chimique qui existe de façon systématique au sein d'un béton et qui se développe sous diverses formes depuis la prise du béton jusque à son vieillissement. Le symptôme caractéristique de l'action du retrait sur un ouvrage est la fissuration qui peut être soit orientée, soit multidirectionnelle.

Pour identifier les tissures de retrait il faut connaître le moment exact d'apparition de ces fissures en suivant leur ordre chronologique d'apparition:

- Fissures apparaissant une ou deux heures après le bétonnage et parfois visibles à travers l'eau de ressuage (encore cause de béton frais). Ces tissures sont provoquées par le tassement de béton frais dans les coffrages et le ressuage qui l'accompagne ou par une sédimentation du béton résultant d'un défaut de compacité et provoquant un gradient vertical de (ensemble des caractéristiques physiques et mécaniques,

- Fissures apparaissant juste après le décoffrage : Ces fissures affectent aussi bien les surfaces horizontales que les parements verticaux, elles forment un maillage de quelques décimètres de côté reproduisant ou non le ferrailage sous adjacent. Elles sont plus ouvertes lorsque le retrait thermique en est la cause.

- Fissures apparaissant plusieurs mois après le décoffrage: Ces fissures présentées par le retrait de dessiccation (à long terme). Parmi les facteurs qui interviennent dans le développement des tissures de retrait sont:

- la température ;
- l'humidité relative du milieu environnement ;
- le choix de la composition de béton E/C;
- la chaleur d'hydratation du ciment ;
- les adjuvants.

- **Le cycle gel-dégel**

Les dégradations des bétons dues au gel-dégel se rencontrent dans les régions montagneuses, elles se produisent dans les parties non protégées par des revêtements étanches et sont amplifiées par l'utilisation de sels anti-verglas. Les symptômes les plus courants sont l'écaillage, et le gonflement de béton.

Les paramètres qui influent sur la dégradation des bétons due au cycle gel-dégel :

- La porosité;
- Le degré de saturation;
- La transformation de l'eau en glace en fonction de la température;
- La transformation de l'eau en glace par augmentation de volume 9%;
- Influence de taux de refroidissement et donc de la vitesse d'évolution du front du gel.

Quant aux sels anti-verglas, ils peuvent provoquer les quatre (04) types d'agressions suivantes:

- 1- Micro-fissuration du matériau due au choc thermique créé par le sel qui fait fondre la couche de glace en abaissant la température de support, la chaleur de fusion de glace est de 80 cal/g;
- 2- Ecaillage des surfaces qui s'explique habituellement par l'augmentation des pressions osmotiques au voisinage des surfaces en raison de l'augmentation de la teneur en sel;
- 3- Pénétration des chlorures sur plusieurs centimètres de profondeur entraînant la corrosion des aciers;
- 4- Attaque chimique provoquée par la présence d'agents agressifs contenus dans les sels anti-verglas (sulfates alcalins). La gélivité des granulats a aussi une influence sur la résistance au gel des bétons, il s'agit des granulats à forte porosité qui permettent aisément l'expulsion de l'eau qui ne peut être absorbée par la pâte de ciment qui les a encore.

1.2.3 Les dégradations d'origine mécanique

Les désordres apportés par l'utilisation d'un ouvrage constituent une cause non négligeable de dégradation des bétons. Il s'agit le plus souvent d'une attaque de types "mécanique" : chocs, abrasion, érosion, etc.

- Les chocs

Les chocs les plus fréquents sont ceux des poids lourds hors gabarit contre l'intrados des ponts, les chocs de bateaux ou de d'objets flottants contre les piles en rivière, ainsi que les chocs des véhicules contre les barrières de retenue qui constituent une autre source de chocs non négligeable. Ces chocs peuvent créer des épaufrures, des éclats importants de béton, voire même des ruptures d'aciers.

- Abrasion et érosion

Les phénomènes d'abrasion et d'érosion se rencontrent essentiellement dans des structures de génie civil en contact avec des circulations des eaux comme les barrages (érosion des évacuations de crue), ou des galeries d'amenée d'eau, et dans des structures soumises à des charges mécaniques répétées comme les chaussées en béton (glaçage, usure, écaillage, ornière, nid de poule, etc.). Dans le domaine des ponts ce sont principalement les piles en rivière qui peuvent subir des abrasions consécutives dues à l'action du courant et des corps flottants,

- Déamination

La déamination est provoquée par l'action conjuguée des sollicitations climatiques des sels anti-verglas et du trafic circulant directement sur le béton constitutif des hourdis de pont. Dans les cas les plus graves, cette pathologie aboutit à la chute des plaques de béton et à la création de trous dans les tabliers de pont.

1.2.4 Les dégradations d'origine bactériologique

La dégradation des bétons par les micro-organismes se produit essentiellement en milieu anaérobie riche en matière organique tel que les effluents résiduaires, les bactéries qui prédominent dans ces milieux sont de type sulfatoréducteur, elles se développent dans des effluents de PH compris entre 5 et 9,5. A des températures de -5° à 75°C et dans des milieux caractérisés par un potentiel d'oxydoréduction assez bas.

L'augmentation dans le milieu de la teneur en sulfures provenant de la réduction des composés d'oxydés de soufre (sulfate, thiosulfate) par les bactéries sulfurogènes conduit à la formation de sulfures qui dégagent dans l'atmosphère sont formé de H_2S . Dans les ouvrages comportant une partie immergé tel que les ouvrages d'assainissement, les sulfures gazeux se condensent sur les parois de béton et l'oxyde en acide sulfonique et sulfates sont l'action de bactéries aérobies de type thio-bacillus. thio-oxydants.

L'acide ainsi produit conduit à une dégradation du béton par une succession de réactions chimiques qui aboutissent essentiellement à la formation de gypse, ce dernier peut ensuite réagir avec l'aluminate du ciment et former de l'ettringite entraînant le gonflement puis l'éclatement du béton [AND 00].

CHAPITRE 2

LA CORROSION DES ACIERS DANS LE BETON ARME

2.1 Introduction

La corrosion, du latin 'corrodée' signifie ronger, attaquer. C'est une destruction non voulue des métaux sous l'action de milieux corrosifs (agents atmosphérique ou réactifs chimique). Après attaque, les métaux ont tendance à retourner à leur état primitif d'oxyde, sulfure, carbonate etc.... plus stable par rapport au milieu considéré et ainsi à subir une détérioration de leurs propriétés.[BEN]

En service les matériaux métalliques sont souvent en contact avec un milieu agressif liquide ou gazeux, donc le phénomène de corrosion de surface ou plus précisément d'interface entre un métal et un milieu agressif liquide ou gazeux ; comme il a été déjà mentionné ci-dessus le processus de la corrosion entraîne une destruction des matériaux métalliques. Ce phénomène a pris de nos jours une importance considérable, étant donné l'utilisation de plus en plus grande des métaux et alliages dans la vie moderne.

Les métaux se distinguent des autres matériaux par un ensemble de propriétés avantageuses tels que bonne ductilité, résistance élevée à la traction, résistance aux hautes températures, bonne conductibilité électrique et thermique, grande facilité de mise en œuvre etc. Leurs inconvénients est leur instabilité au contact de l'air et de l'eau ce qui diminue leur résistance à la corrosion et à l'usure, c'est-à-dire leur durabilité. Mais pour mieux remplir leur fonction pendant la durée de vie prévue on emploie des techniques de protection adéquates contre la corrosion. L'emploi de nouveaux matériaux résistant à la corrosion ont fait l'objet d'un grand nombre de recherche ces dernières années.

Au point de vue économique la corrosion est d'une importance primordiale. On estime par exemple que chaque année le quart de la production d'acier est détruit par la corrosion, ce qui correspond environ à 150 millions de tonnes/ an ou encore 5 tonnes/ seconde. Ces pertes pouvaient être supérieures s'il n'y avait pas la protection contre la corrosion.

Le remplacement des équipements et matériel corrodés constitue pour l'industrie une charge financière très élevée à laquelle il faut ajouter le manque à gagner correspondant à l'arrêt des installations nécessaires pour effectuer les réparations.

Les couts annuels imputables à la corrosion et à ses conséquences s'élèvent à plusieurs milliards de dollars par un dans la plupart des pays industrialisés. Aux Etats-Unis, les pertes occasionnées par la corrosion sont évaluées à plus de 7 milliards de dollars.

La corrosion ne se limite pas à l'acier, mais affecte tous les métaux ainsi que les polymères et céramiques et elle touche tous les domaines de l'économie du circuit intégré au pont en béton armé. L'évaluation des pertes dues à la corrosion doit prendre en considération :

- Les pertes directes : remplacement des matériaux et équipement corrodés.
- Les pertes indirectes : réparation, pertes de production. Les mesures de protection : utilisation de matériaux plus résistants à la corrosion et plus chers, de revêtement et de protection cathodique
- Les mesures de préventions surdimensionnement des structures porteuses inspection, entretien.

Les pertes directes ne représentent donc qu'une partie des couts de la corrosion .Elles sont souvent inférieures aux pertes indirectes.

Par exemple, si l'on doit arrêter une machine ou un équipement dont l'un des éléments constituant est corrodé, le prix de ce dernier est dérisoire par rapport aux pertes de gain dues au manque de production.

L'emploi des matériaux plastiques ou composites dans les différentes branches d'industrie ont trouvés une grande importance chez les utilisateurs, car ces matériaux résistent bien à la corrosion et n'exigent aucun revêtement de protection.

2.2 Conséquences des désordres

2.2.1 L'aspect de l'ouvrage

Les efflorescences et les taches de rouille conséquence de la pénétration d'agents agressifs dans l'enrobage de béton, altèrent l'aspect de l'ouvrage. Ce point est parfois considéré comme étant de peu d'importance, par le gestionnaire des ouvrages. Par contre, ce sont les fissurations et les fracturations du béton qui commencent à inquiéter le gestionnaire, car des éclats de béton peuvent se produire.

2.2.2 La sécurité vis-à-vis des usagers

Les éclats de béton présentent un risque pour les personnes qui circulent près de l'ouvrage. Leur prévention et leur élimination doivent donc être traitées avec soin.

2.2.3 La stabilité de la construction

Des essais effectués sur des éprouvettes ont permis d'estimer les valeurs des forces d'adhérence pour des éléments en béton dont les armatures sont corrodées. Il est apparu que ni la qualité du béton, ni le rapport enrobage/diamètre d'armature n'influent sur la force résiduelle d'adhérence, même si l'enrobage est fissuré par la corrosion de l'armature sans qu'il ne soit détruit par éclatement.

En ce qui concerne les moments fléchissant et les efforts tranchants, une recherche expérimentale a porté sur l'effet de la corrosion sur ces grandeurs mécaniques. Elle a montré que pour prévoir de façon conservatrice la tenue des éléments en béton armé, il suffit d'appliquer les modèles de calculs classiques, en considérant la section réduite des armatures ainsi que la section réduite de béton. [AFGC 03]

Ainsi, tant que les diminutions de section des armatures restent faibles et que l'enrobage reste cohésif, la corrosion de ces armatures ne modifie pas significativement la tenue au moment fléchissant ou aux efforts tranchants.

Mais lorsque la corrosion a atteint un stade avancé, des calculs plus précis doivent être faits pour évaluer la tenue résiduelle de l'ouvrage.

2.3 Des ouvrages dégradés à cause de la corrosion :

Les ouvrages et éléments concernés par la corrosion des armatures sont les suivants : [AFGC 03]

- **Bâtiments** : acrotères et balcons, dans toutes les atmosphères, éléments verticaux et terrasses, en milieux industriel et maritime. Ce sont bien sûr les éléments les plus sensibles des bâtiments, du fait soit de leur minceur, soit de la difficulté à maintenir des enrobages suffisants.



Figure 2.1 : Eclats en formation [AFGC 03].

- **Bâtiments industriels** : poteaux et dalles. Ces éléments sont en effet soumis assez souvent à des expositions d'agents chimiques. Les poutres sont également des éléments particulièrement sensibles des constructions industrielles, car supportant parfois les dalles de plancher. Certaines d'entre elles sont parfois dans des états assez surprenants.



Figure 2.2 : Poutre support de réservoir [AFGC 03].

- **Parkings** : poutres et dalles, en milieu maritime ou montagneux. Cela est lié dans les deux cas à la présence des chlorures (provenant respectivement de l'eau de mer et des sels de déverglaçage).



Figure 2.3 : Poteau porteur sous garage [AFGC 03].

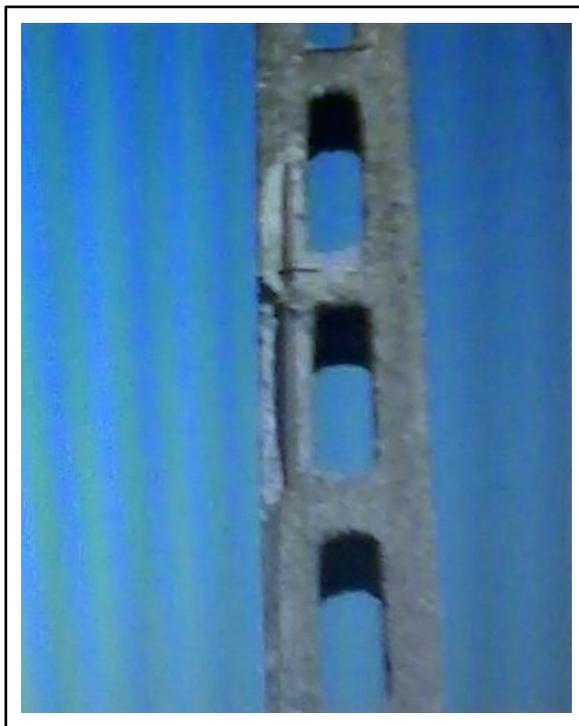


Figure 2.4 : Poteau support de ligne électrifiée [AFGC 03].

- **Composants de structures préfabriquées** : il ne semble pas que des problèmes importants soient à signaler dans cette rubrique, du fait probablement que les bétons sont mieux soignés et mieux mis en œuvre. Toutefois, les poteaux de lignes électriques par exemple semblent être un objet de préoccupation. Il existe également une importante pathologie touchant divers éléments de construction, due à l'utilisation dans les années 60-80 d'accélérateurs de prise à base de chlorures de calcium. Cela concerne des panneaux de façade, des acrotères, jardinières, etc.
- **Ponts et ouvrages d'art** : dans cette catégorie d'ouvrages, il apparaît que les zones les plus sensibles soient les tabliers, les appuis en superstructures, et les équipements de tablier où l'influence des sels de déverglaçage est importante.



Figure 2.5 : Pile de pont [AFGC 03].

- **Réservoirs (enterrés, au sol, aériens)** : le principal problème de ces structures est lié aux circulations d'eau dues soit à la présence de fissures d'origines diverses (thermiques, mécaniques,...) ou de défauts d'enrobages des armatures, notamment si le milieu contient des sels agressifs (chlorures notamment). Sur les structures existantes souffrant de fissures, ou de fuites diffuses, les réparations consistent à colmater les défauts ou à installer une étanchéité.

- **Silos** : les silos pour le stockage des matériaux granuleux ou poudreux (céréales, ciments,...) sont soumis à de fortes contraintes, notamment pendant les périodes de chargement et de déchargement. Ces contraintes induisent des fissures, verticales ou horizontales. Celles-ci peuvent être à l'origine de pénétration d'eau, engendrant une corrosion des armatures.
- **Aéroréfrigérants industriels, de centrale nucléaire** : ces structures sont soumises à un environnement sévère (brouillard d'eau sous forme de vapeur ou de gouttelettes entraînées à l'intérieur, soleil, pluie ou gel à l'extérieur) engendrant des contraintes amorçant des fissures. Par ailleurs le fort gradient hydrique est à l'origine d'un transfert de vapeur d'eau pouvant être la source d'altération du béton.



Figure 2.6 : Paroi d'aéroréfrigérant [AFGC 03].

- **Cheminées** : les cheminées (industrielles notamment) sont soumises à un environnement très sévère, acide particulièrement (acide sulfurique et acide chlorhydrique)
- **Structures portuaires** : celles situées en bord de mer souffrent de l'agression due aux chlorures. L'intensité de la corrosion est liée à l'agressivité du milieu (zone de marnage, d'éclaboussures, d'embruns). Des défauts d'enrobage ou de qualité du béton sont alors immédiatement mis en évidence.



Figure 2.7 : Pile en zone de marnage [AFGC 03].



Figure 2.8 : Poutre de tablier [AFGC 03].



Figure 2.9 : Quai en zone de marnage [AFGC 03].

- **Canalisations en béton armé et précontraint :** la plupart sont enterrées, et des ruptures surviennent lorsque la protection du béton n'est plus suffisante (défauts locaux d'enrobage, présence de chlorures).



Figure 2.10 : Canal en béton armé [AFGC 03].

- Il faut également signaler les **monuments historiques protégés** (églises ou autres ouvrages des architectes tels que A. Perret ou Le Corbusier), en béton armé, de plus en plus nombreux, qui possèdent leurs contraintes propres, notamment en termes de réparation.



Figure 2.11 : Parement en béton armé dans un monastère classé [AFGC 03].

Certaines structures sont au contact de l'atmosphère : il s'agit, par exemple, des piles et tabliers de ponts, des silos ou des réservoirs. D'autres sont au contact avec le sol et éventuellement de l'eau : il s'agit, par exemple, de canalisations ou de pieux pour fondations. Enfin certaines structures sont au contact à la fois du sol et de l'eau ou de l'atmosphère et de l'eau. Il s'agit, par exemple, de culées de ponts, de quais (fluviaux ou maritimes), de tunnels ou de murs de soutènement.

Les milieux naturels que sont l'atmosphère, les sols ou les eaux, peuvent également contenir des produits qui sont agressifs vis-à-vis du béton armé, par exemple, des engrais ou des sels de déverglaçage.

2.4 Différents types de la corrosion :

Les causes de la corrosion sont multiples et complexes et elles résultent d'interactions chimiques et /ou physiques entre le matériau et son environnement. La corrosion jusqu'à ce jour n'est pas complètement éclairée et cela est expliqué par les essais de laboratoire qui ne permettent pas de prévoir avec certitude le comportement d'un métal ou d'un alliage donné lorsqu'il est exposé à la corrosion et de même il n'y a pas de métal résistant, d'une manière générale un métal résiste à la corrosion dans des conditions bien déterminées. [BEN]

En général on peut résumer les différents types de la corrosion comme ci –dessous :

- Corrosion chimique (séchée).
- Corrosion électrochimique (humide).

- Corrosion biochimique.
- Corrosion accompagnée d'érosion (mécanique).
- Corrosion atmosphérique.

2.4.1 Corrosion chimique (séchée) :

Il s'agit d'une réaction hétérogène entre une phase solide (le métal) et une phase gazeuse.

Le processus d'oxydoréduction de la corrosion chimique se déroule dans le domaine atomique avec le milieu ambiant sans présence d'électrolyte. Donc la corrosion purement chimique ne fait donc pas intervenir le passage d'un courant électrique, un flux électronique cesse, car l'échange d'électrons entre les différents partenaires de réactions s'effectue directement.

C'est très difficile de donner des exemples de corrosion purement chimique, puisque le plus souvent elle est accompagnée de corrosion électrochimique. On peut considérer comme corrosion chimique l'attaque d'un métal par un autre métal liquide, par un seul fondu ou par une solution aqueuse l'exemple de la corrosion séchée en atmosphère. [BEN]

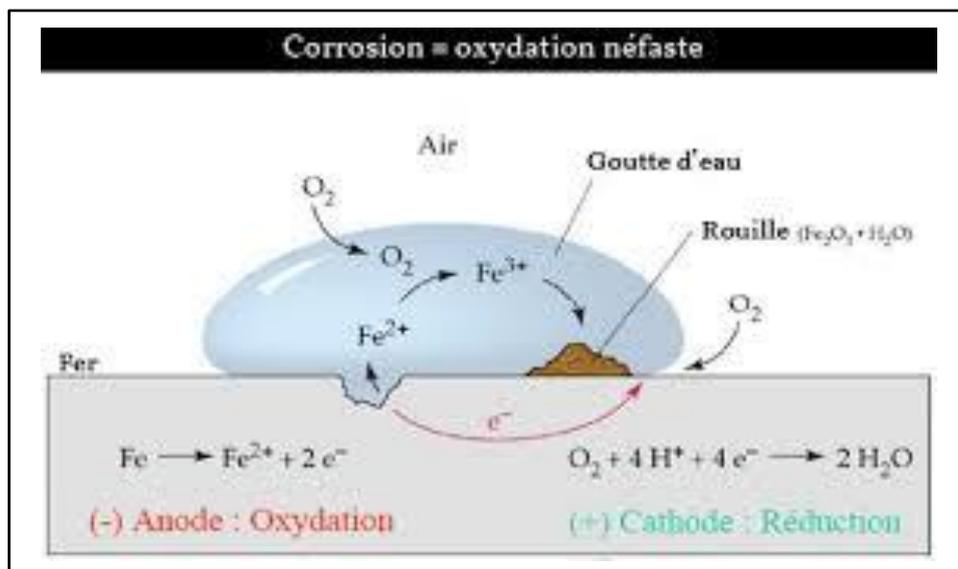


Figure 2.12: Exemple de corrosion chimique [AFGC 03].

2.4.2 Corrosion biochimique :

Les bactéries présentes dans le milieu, modifient l'environnement en produisant par exemple de l'acide sulfurique qui vient consommer le métal

Le mécanisme de ce mode de corrosion peut être de plusieurs types :

- Chimique par production de substances corrosives telles que CO₂
- Certaines bactéries peuvent réduire les sulfates par l'intermédiaire d'hydrogène.
- Dans certains cas, on peut observer sur les canalisations des dépôts adhérents résultant de l'attaque, non pas du métal lui-même, mais celle de certains constituants du milieu ambiant par des bactéries. Cela résulte de la formation de piqures sur le métal, à l'endroit où s'est produit le dépôt, suivant un processus de corrosion par différence de concentration en oxygène.

2.4.3 Corrosion avec érosion, avec frottement et par cavitation

Dans ce cas les produits de corrosion forment un dépôt adhérent et continu à la surface de métal. Ils ralentissent en général la vitesse de la corrosion. Cette couche peut être éliminée en certains points par abrasion du métal due au mouvement du liquide lui-même ou bien à celui des particules solides qu'il contient, il y a accélération de la corrosion. Il en est de même lorsque deux pièces se déplacent l'une par rapport à l'autre (frottement).

La corrosion par cavitation est due à la présence de bulles de vapeurs qui se forment dans une canalisation, ou au voisinage d'une pièce tournante lorsque par suite de l'augmentation locale de la vitesse du liquide ou la pression statique devient inférieure à la tension de vapeur du liquide, il en résulte un violent martèlement de la surface métallique et une destruction locale du film de corrosion protecteur, la corrosion peut donc se développer à nouveau.

2.4.4 Corrosion électrochimique :

C'est une réaction électrochimique entre la surface des armatures et un liquide électrolyte. C'est le phénomène de corrosion le plus important dans le béton armé.

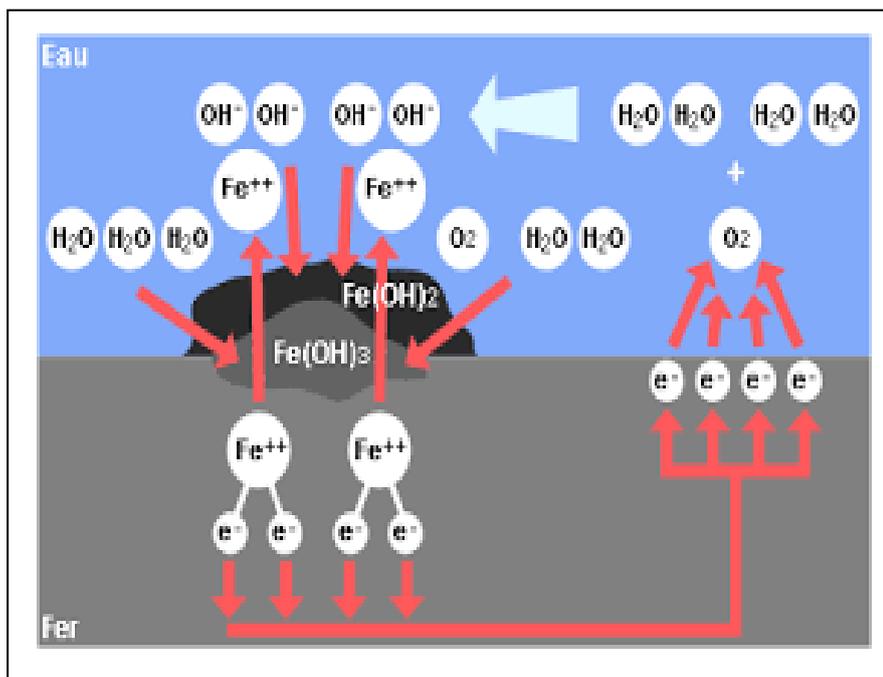


Figure 2.13 : Corrosion électrochimique [AFGC 03].

2.4.5 La corrosion atmosphérique :

Elle désigne la réaction de l'oxygène de l'air à température ambiante avec un métal lorsqu'à la surface de ce dernier l'humidité et les polluants forment un film d'électrolyte.

2.5 Processus de corrosion

En milieu aqueux, le processus de corrosion électrochimique de l'acier peut être décrit par deux réactions électrochimiques instantanées.

Dans la zone anodique, l'acier se dissout :



Les ions ferreux Fe^{2+} peuvent s'oxyder ultérieurement en ions ferrique Fe^{3+} .

Dans la zone cathodique, les électrons libérés sont consommés par deux réactions chimiques, la réaction (2.2) correspond à la réduction du proton avec dégagement d'hydrogène :



Les ions hydroxydes OH^- formés dans la solution peuvent ensuite se combiner aux ions ferreux Fe^{2+} et se précipiter en hydroxyde ferreux à la surface de l'acier, lorsque les concentrations en ions ferreux et hydroxydes le permettent.



Ce composé peut ensuite s'oxyder pour former de l'oxyde ferrique Fe_2O_3 hydraté ou de la magnétite Fe_2O_4 ou évoluer en oxydes hydratés : γ - FeOOH (lépidocrocite) qui représente la rouille fraîchement formé, ou bien en goethite α - FeOOH qui représente la rouille vieillie. Ces composés, en recouvrant l'acier, forment une couche qui peut s'avérer protectrice selon son étanchéité.

2.6 Les facteurs de la corrosion

Les phénomènes de corrosion dépendent de plusieurs facteurs qui peuvent être classés en quatre groupes principaux tels que les :

- Facteurs métallurgiques,
- Facteurs définissant les conditions d'emploi,
- Facteurs dépendant du temps.
- Facteur définissant les modes d'attaques

Tous ces facteurs sont représentés sur le tableau suivant :

Tableau 2.1 : Les facteurs de la corrosion [BEN]

Facteur définissant les modes d'attaques	Facteurs métallurgiques	Facteurs définissant les conditions d'emploi	Facteurs dépendant du temps
-concentration du réactif -teneur en oxygène -pH du milieu -additions d'inhibiteurs -température -pression	-composition de l'alliage -procédé d'élaboration -impuretés -traitements thermiques -traitement mécaniques -addition protectrices	- état de surface -forme des pièces solllicitations mécaniques -emploi d'inhibiteurs -procédés d'assemblage	-vieillessement -tension mécaniques -température -modification des revêtements protecteurs

2.7 Types de corrosions électrochimiques

Le comportement de la corrosion d'un matériau en service, dépend d'une multitude de facteurs :

- Composition chimique et microstructure du métal.
- Composition chimique de l'environnement.
- Paramètres physiques (température, convection, irradiation, etc.).
- Sollicitations mécaniques (contraintes, chocs, frottements, etc.).

La résistance à la corrosion n'est donc pas une propriété intrinsèque du métal, mais plutôt une propriété de l'interface métal-milieu, d'où la nécessité de caractériser la composition chimique et la microstructure de celle-ci, ainsi que son comportement électrochimique. La corrosion dépend donc d'un système extrêmement complexe dont les effets se manifestent, en pratique, sous une multitude d'aspect, parfois inattendus. [BEN]

La corrosion peut être classifiée suivant les formes et types. Une simple observation visuelle ou au microscope est apte à identifier la forme et le type de corrosion. Selon les formes, on distingue :

- La corrosion uniforme.
- La corrosion localisée.

2.7.1 La corrosion uniforme (généralisé)

Est une perte de matière plus ou moins régulière sur toute la surface. Ce type de corrosion est observé sur les métaux exposés aux milieux acides.

C'est l'aspect de corrosion le plus rencontré dans la pratique, mais c'est l'aspect aussi le moins dangereux, car le métal est attaqué sur toute la surface et avec la même vitesse de corrosion. Les causes peuvent être chimiques, électrochimiques ou encore mécaniques.

L'attaque de la surface sera très importante si cette dernière est rugueuse. A l'échelle macroscopique on ne distingue pas les lieux cathodiques des lieux anodiques, la surface entière du métal est simultanément cathode et anode (figure 3.14). La corrosion non uniforme est celle qui n'est pas répartie sur toute la surface.

La corrosion uniforme peut être évitée par l'utilisation d'un revêtement ou par l'addition d'inhibiteur de corrosion ou encore par l'application de la protection cathodique. [BEN]



Figure 2.14: Corrosion uniforme [AFGC 03].

2.7.2 La corrosion localisée

C'est une corrosion qui se déroule en un lieu spécifiquement anodique d'une surface ou d'une structure métallique. Elle diffère de la corrosion uniforme par la direction claire des endroits anodiques et cathodiques. En pratique la corrosion localisée provient d'une hétérogénéité du matériau ou de l'environnement et souvent elle pose beaucoup de problèmes

Les principales causes de cet aspect de corrosion sont :

- Surface de métal chimiquement hétérogène.
- Différence de potentiel dans les différentes zones du métal créée par la déformation.
- Endommagement local de la couche passive.

Les différents types de la corrosion localisée sont :

- Corrosion par piqures.
- Corrosion intergranulaire (intercristalline).
- Corrosion sous contrainte.
- Corrosion avec érosion.
- Fragilisation par l'hydrogène.
- Corrosion sélective.
- Corrosion galvanique.
- Corrosion par crevasses.

2.7.2.1 Corrosion intergranulaire (intercristalline)

C'est une attaque sélective aux joints de grains, souvent, il s'agit de phases qui ont précipitées lors d'un traitement thermique. Donc le produit de corrosion se trouve aux joints de grains. L'attaque du métal s'effectue en profondeur, le long des joints de grains, ce qui conduit à une micro-fissure, alors la surface ne présente aucune altération.

La perte du métal est insignifiante, mais les caractéristiques sont sensiblement affectées, le métal peut se rompre sous un effort très faible. [BEN]

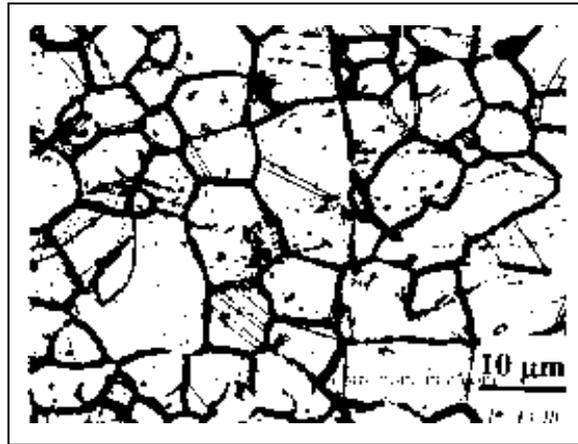


Figure 2.15 : Corrosion intergranulaire [AFGC 03].

2.7.2.2 Corrosion par piqures :

C'est un type de corrosion localisée (figure 3.16), qui se traduit à la surface du métal par la formation de trous étroits, et qui peuvent progresser rapidement en profondeur. L'origine de piqures est liée à la présence d'hétérogénéité, qui en surface, détermine la formation de piles locales.

Bien que la quantité du métal corrodé soit faible, ce type de corrosion est très dangereux car il se produit en profondeur et peut conduire à la perforation des tôles même épaisses. L'hétérogénéité de la surface est due à des défauts du film passif qui favorisent la mise à nu locale du métal, il en résulte la formation d'une micro-pile entre le métal mis à nu qui joue le rôle d'anode, donc se corrode et le métal passif qui constitue la cathode. Les défauts du film passif ont pour origine la présence d'inclusion dans le métal d'ions agressifs tels que les chlorures provenant de la solution et absorbés à la surface métallique ou une cause extérieure liée à l'utilisation du matériau (rayures). [BEN]



Figure 2.16 : Corrosion par piqure [BEN].

2.7.2.3 Corrosion sous contrainte (C.S.C)

Il s'agit d'un type de corrosion tout à fait général qui se produit sous l'action commune d'une contrainte mécanique et d'un milieu corrosif (figure 3.17). En l'absence de la contrainte, le

phénomène ne se produit pas. La C.S.C se manifeste sous la forme de fissures qui peuvent être intergranulaires, soit transgranulaires. Les contraintes peuvent être, d'origine interne, provenant des opérations de mises en forme et des traitements thermiques, ou d'origine externe, qui résultent des conditions d'utilisation. [BEN]

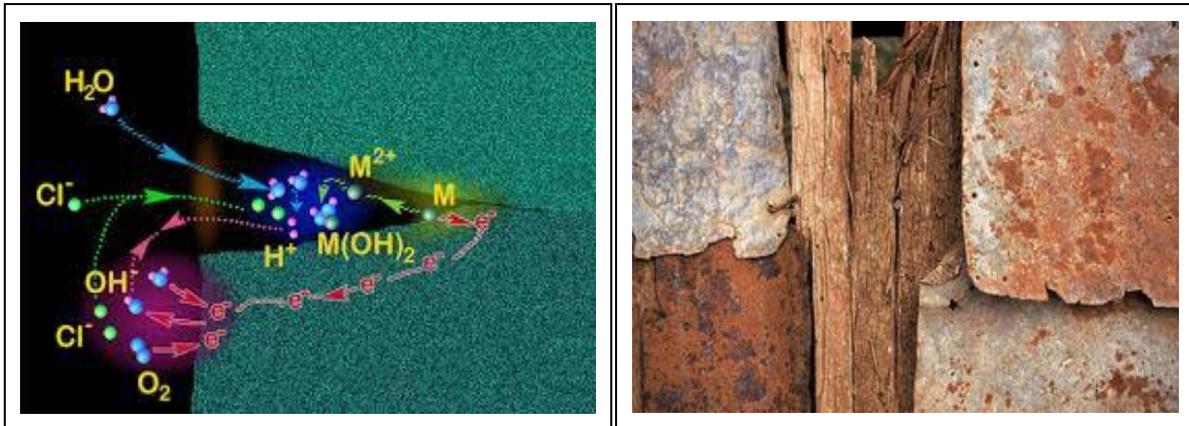


Figure 2.17: la corrosion sous contrainte [AFGC 03].

Les pertes de poids des matériaux corrodés sont en général très faibles car la corrosion est localisée. Ce type de corrosion a des conséquences pratiques importantes, les facteurs qui influent sur la C.S.C sont les contraintes, la nature du milieu environnant, le temps, l'état de surface et la température. La protection contre la C.S.C, notamment :

- ✓ Elimination ou diminution des contraintes par traitement thermique.
- ✓ Elimination des ions agressifs spécifiques.
- ✓ Traitement de surface éliminant les contraintes dues à l'usage.
- ✓ Diminution de la température d'emploi.
- ✓ Protection cathodique.
- ✓ Utilisation d'inhibiteurs de corrosion.
- ✓ Choix judicieux du matériau et des traitements thermiques et mécaniques convenables.

2.7.2.4 Corrosion par crevasses (caverneuse)

Est due à une différence d'accessibilité de l'oxygène entre deux parties d'une structure, créant ainsi une pile électrochimique. Cette attaque sélective du métal est observée dans les fissures et autres endroits peu accessibles à l'oxygène. [BEN]

Elle peut apparaître lorsqu'une pièce métallique est au contact d'un électrolyte dont le renouvellement n'est pas assuré : interstices entre matériaux de même nature, dépôts divers, sous matériau isolants, etc. Le processus de développement de la corrosion par crevasse (caverneuse), n'est pas fondamentalement différent de celui de la corrosion par piqûres. Cependant, la cinétique et la morphologie de l'attaque sont toutes autres. Celle-ci s'étend en largeur à la surface de l'interstice ou sous le dépôt, et non pas en profondeur comme pour les piqûres (figure 2.16).



Figure 2.18: Corrosion par crevasses [AFGC 03].

La corrosion par crevasses peut prendre un caractère dangereux, notamment dans l'eau de mer. La prévention contre la corrosion caverneuse impose l'utilisation d'assemblages sans interstices, soudés par exemple. Le nettoyage des dépôts et salissures, l'utilisation de joints solides et non poreux.

2.7.2.5 Fragilisation par l'hydrogène

L'hydrogène est un élément qui peut aisément diffuser dans les métaux et altérer leurs propriétés mécaniques. Ce phénomène a des conséquences pratiques considérables car il a de multiples occasions de pénétrer dans les aciers (élaboration, décapage, soudage, dépôts galvaniques, utilisation en milieu humide, hydrogène sulfuré, etc.) et il en résulte parfois, des ruptures catastrophiques immédiates ou différées selon les moyens de s'en prémunir, il existe trois types de fragilisations :

- a. **La fragilisation par décarburation :** qui survient à partir de 200°C et s'accompagne de formation de méthane et elle est bien connue. Pour s'en prémunir, il faut utiliser des aciers alliés pour que le carbone se trouve engagé dans des carbures plus stables que la cémentite. Il faut avoir à l'esprit que toute installation fonctionnant à une température supérieure à 200°C passe forcément par la température ambiante lors des arrêts et est alors, susceptible de subir les autres types de fragilisation.
- b. **La formation de soufflures :** pouvant amener une fissuration en gradins. Ce phénomène est dû à la recombinaison de l'hydrogène qui a pénétré dans le métal sous forme atomique en hydrogène moléculaire susceptible d'établir des pressions très élevées dans des poches à l'intérieur du métal. Ces poches peuvent communiquer, amenant un dédoublement de la tôle. Pour s'en prémunir contre cet effet, on préconise des additions de Ca dans l'acier (pour globaliser les précipités) de 0.3 % surtout en milieu H₂S et l'utilisation d'aciers contenant peu de petites inclusions réparties uniformément.
- c. **La fragilisation par l'hydrogène dissous en présence de contrainte :** C'est de loin, le phénomène le plus dangereux (car sa propagation est très rapide), le plus complexe (car on ne peut pas définir une cause mais des facteurs de risque). Aussi il est le moins

connu (car il existe beaucoup de théorie qui ne sont pas susceptibles de décrire le tout). Tous les aciers sont atteints à des degrés divers. Toutes les propriétés mécaniques sont altérées à l'exception de la résilience sur l'état recuit.

La fragilisation peut se traduire par une rupture immédiate pour une contrainte très inférieure à la limite d'élasticité du métal exempt d'hydrogène. Elle peut intervenir au bout d'un certain temps, c'est la rupture différée. Les contraintes appliquées ou provenant d'écroutissage, changement de phase, etc., peuvent être à l'origine de la rupture. Les facteurs de risque sont le teneur en H_2 , la structure et la composition de l'acier, sa limite d'élasticité, sa mise en œuvre. Pour lutter contre ce phénomène, on doit limiter les possibilités de pénétration de l' H_2 , utiliser les structures stables et peu sensibles comme les structures martensitiques. Les aciers à haute limite d'élasticité, ont tendance à être plus altérés par l' H_2 que les aciers à faible limite d'élasticité.

2.7.2.6 Corrosion par érosion

Elle est due à l'action conjointe d'une réaction électrochimique et d'un enlèvement mécanique de matière. Elle a souvent lieu sur des métaux exposés à l'écoulement rapide de fluide (figure 2.19).



Figure 2.19 : Corrosion par érosion [AFGC 03].

2.7.2.7 Corrosion galvanique

Appelée aussi corrosion bimétallique, elle est due à la formation d'une pile électrochimique entre deux métaux et la dégradation du métal le moins résistant s'intensifie (figure 2.20).



Figure 2.20 : Corrosion galvanique [AFGC 03].

2.7.2.8 Corrosion sélective

C'est l'oxydation d'un composant de l'alliage, conduisant à la formation d'une structure métallique poreuse (figure 2.21).



Figure 2.21 : Corrosion sélective [AFGC 03].

2.8 Moyens de protection contre la corrosion

La corrosion étant le résultat de l'action entre deux partenaires, le métal ou l'alliage d'une part, et la solution (réactif), d'autre part. Il sera impossible de lutter contre ce phénomène, en agissant sur l'un ou l'autre des deux partenaires. En ce qui concerne la solution, il est, la plus part du temps, impossible de modifier sa nature. Seule l'addition de faibles quantités d'un corps appelé inhibiteur de corrosion pourra être faite. Généralement, il est plus facile d'agir sur la nature du métal, par exemple, en utilisant un métal noble ou un alliage inerte chimiquement ou passif dans le milieu considéré.

Donc la protection contre la corrosion a pour but de garantir une certaine durée de vie à un matériau pour un cout minimal. Les méthodes essentielles de protection de prévention contre la corrosion sont les suivantes :

- Prévention par une forme adaptée des pièces.
- Prévention par un choix judicieux des matériaux.
- Protection par revêtements.

- Protection par inhibiteurs de corrosion.
- Protection électrochimique.

2.8.1 Prévention par une forme adaptée des pièces :

En donnant une forme adaptée aux objets, on peut diminuer les risques de corrosion car la forme d'un objet peut influencer sa durée de vie de façon déterminante. Les exemples suivants illustrent ces propos.

a. Zones humides :

En industrie chimique, il faut assurer une vidange complète des récipients pendant la phase de non exploitation. La diminution du risque de corrosion à l'intérieur d'un réacteur chimique, pendant les temps morts, est schématisée par une vidange incomplète (figure 2.22), favorisant la corrosion et une vidange complète (figure 2.23), diminuant le risque de corrosion.

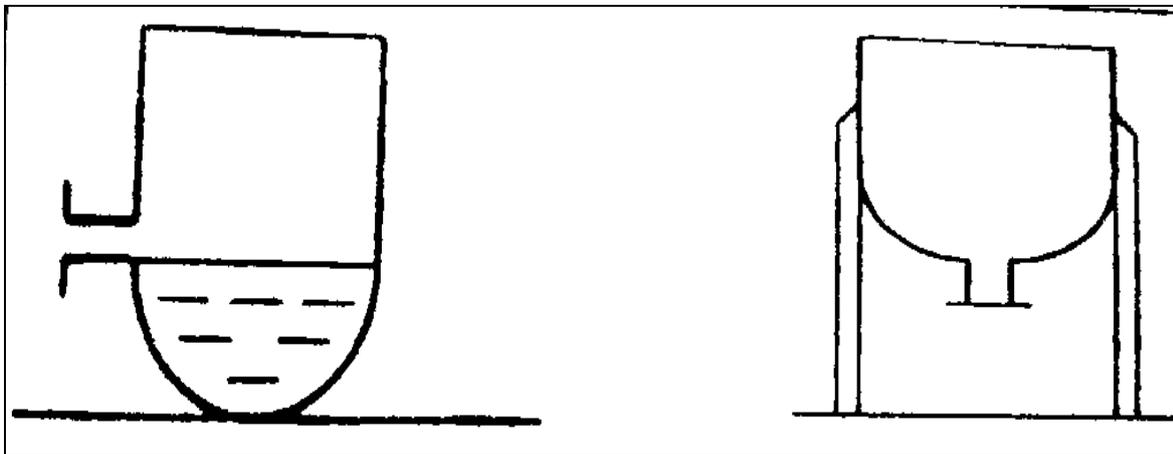


Figure 2.22 : Schéma d'une vidange incomplète [AFGC 03].

Figure 2.23 : Une vidange complète [AFGC 03].

b. Contraintes :

La distribution des contraintes dans une pièce influence sa sensibilité à la corrosion sous contrainte. Une forme arrondie au voisinage de la tête d'un boulon évite la concentration des contraintes (figure 2.24).

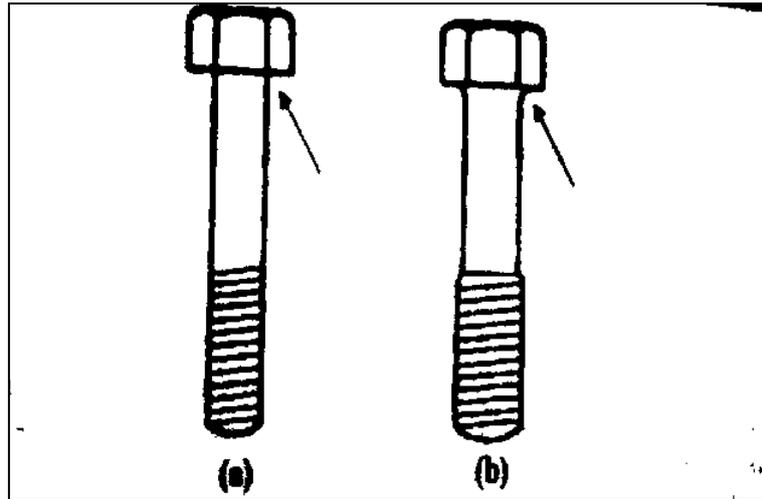


Figure 2.24 : Diminution du risque de corrosion sous contrainte d'un boulon (contrainte locale élevé (a) et Contrainte locale peu élevée (b)) [AFGC 03].

L'usinage introduit souvent des contraintes résiduelles dans les pièces, un traitement thermique adéquat permet alors de les réduire, indépendamment de la forme.

c. Ecoulement des fluides :

Une conception judicieuse de l'écoulement des fluides réduit le risque de corrosion par érosion et de corrosion par cavitation. Il faut éviter les changements brusques de direction. Le rayon du coude d'une conduite doit être supérieur à 3 fois son diamètre (figure 2.25).

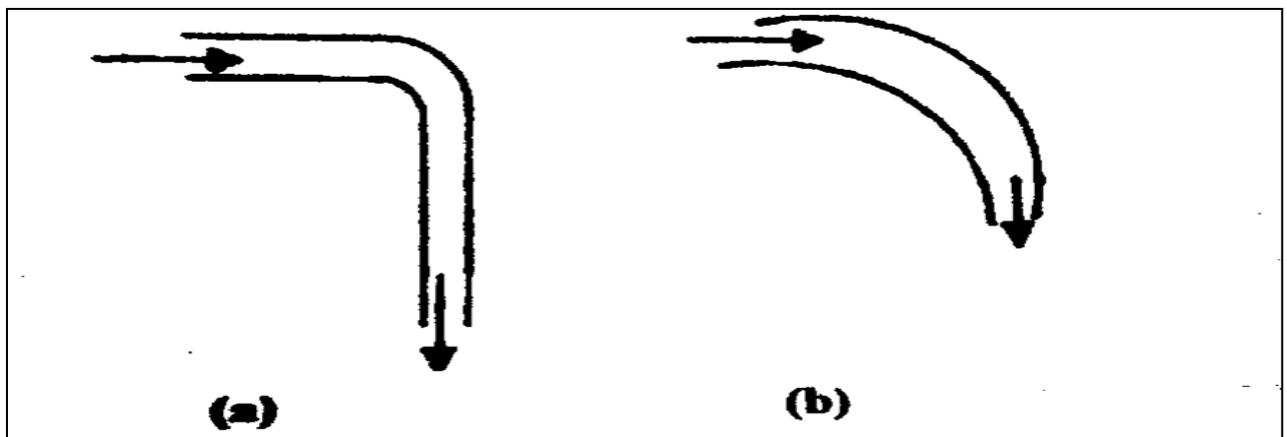


Figure 2.25 : Diminution du risque de corrosion-érosion d'un coude (risque plus élevé pour (a) que pour (b)) [AFGC 03].

d. Endroits inaccessibles :

Les fentes et autres endroits inaccessibles permettent la formation de pile d'aération et amènent la corrosion caverneuse. Une fente due à un joint mal dimensionné par exemple, (figure 2.26).

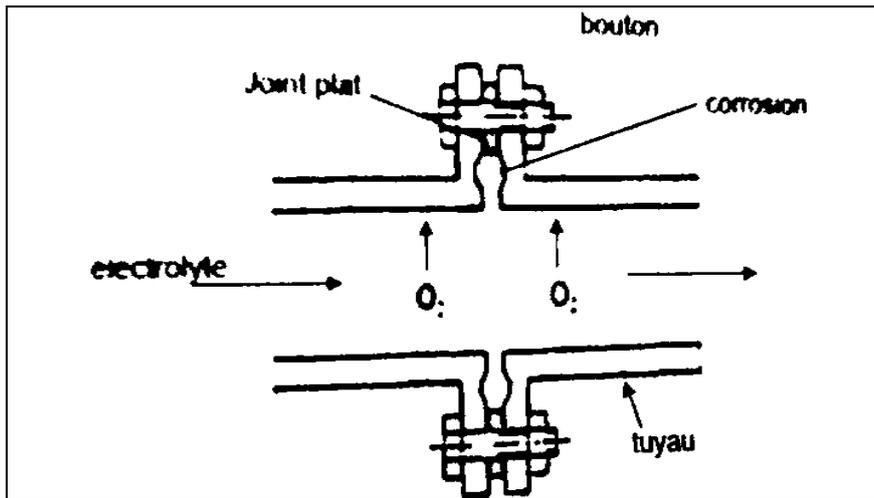


Figure 2.26 : Corrosion cavernuse d'un joint due à la formation d'une pile d'aération. L'emploi de pièces soudées, est de ce point de vue, souvent préférable à celui d'assemblages rivetés ou vissés [AFGC 03].

e. Contact entre matériaux différents :

Un contact électrique et électrolytique entre différents métaux permet la formation de piles galvaniques, causant une corrosion accélérée du métal moins noble. Par un choix adapté des matériaux, en séparant différents métaux par un isolant, on évite ce type de corrosion (figure 2.27).

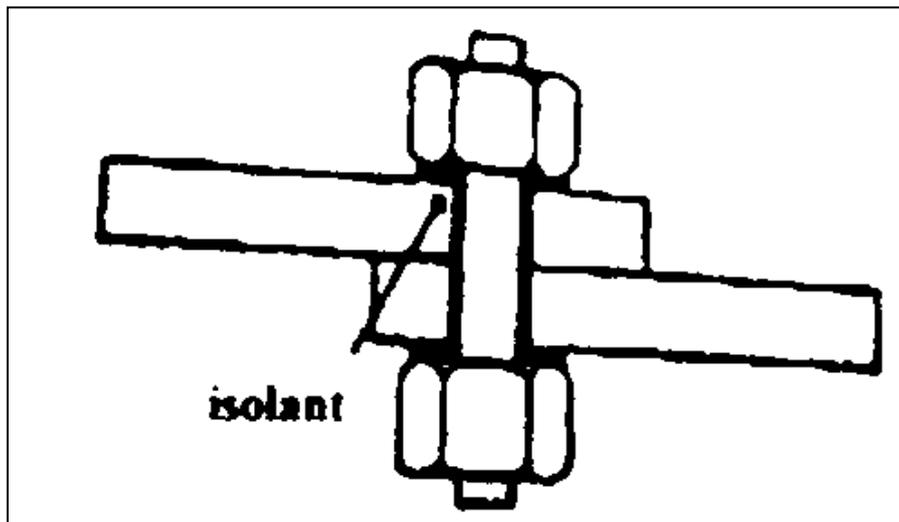


Figure 2.27 : Contact entre matériaux différents [AFGC 03].

Dans les installations de taille importante, il n'est pas toujours possible d'isoler électriquement différents métaux. L'emploi de pièces sacrificielles, peu coûteuses et facilement remplaçables, permet de résoudre le problème dans certains cas. Par exemple, le cas de la figure (2.28), elle représentant une pièce sacrificielle en acier, placée entre une conduite en laiton et un échangeur de chaleur en acier.

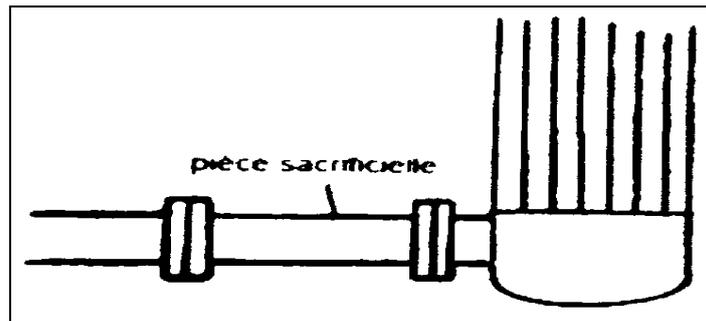


Figure 2.28 : Une pièce sacrificielle en acier, placée entre une conduite en laiton et un échangeur de chaleur en acier [AFGC 03].

2.8.2 Prévention par le choix du matériau

Le choix du matériau doit principalement tenir en compte de l'influence défavorable et des conditions de fonctionnement. Il n'existe pas de métaux ou alliage qui ont une résistance absolue à la corrosion, mais on connaît uniquement des matériaux résistants à la corrosion dans certains milieux agressifs.

Le comportement à la corrosion n'est qu'un critère parmi d'autres dans le choix des matériaux, bien qu'il s'avère souvent, déterminant.

La résistance à la corrosion est une propriété du système métal-milieu et non du métal seul. Le tableau ci-dessous indique la résistance intrinsèque à la corrosion de quelques métaux purs dans les différents milieux.

Tableau 2.2 : Indique la résistance intrinsèque à la corrosion de quelques métaux purs dans les différents milieux. [BEN]

Milieu	Fe	Cr	Ni	Cu	Al	Zn	Ti	Ta
Air humide	-	+	+	+	+	m	+	+
Eau froide naturelle aérée	M	+	+	+	-	+	+	+
Eau de mer	-	+	+	m	M	-	+	+
Acide non oxydant	-	M	M	+	-	-	+	+
Acide oxydant	-	+	M	-	-	-	+	+
Acide + Cl ⁻	-	+	M	-	-	-	m	+
Base + O ₂	+	+	+	+	-	-	+	m
Oxydation à haute température	M	+	+	-	-	-	m	-

+ : Bonne résistance, m : Résistance moyenne, - : Mauvaise résistance

2.8.3 Résistance des alliages à la corrosion

Le comportement à la corrosion des alliages s'apparente souvent à celui du métal principal qu'ils contiennent

- Aciers au carbone et aciers inoxydables
- Alliage de nickel
- Alliages de cuivre
- Alliages d'aluminium
- Alliage de titane

2.8.4 Protection par revêtements

Surface du métal de base, de façon à ce que le revêtement soit adhérent. La mise à nu ou décapage des métaux ferreux est particulièrement importante.

Décapage des métaux ferreux :

En général toutes les surfaces des pièces sont recouvertes soit de :

- Corps gras destinés à éviter la corrosion pendant leur stockage.
- Rouille.
- Oxydes de fer qui se sont formés à haute température pendant les opérations de traitement thermique ou de traitements mécaniques.

Le décapage peut être effectué par voie mécanique, brossage, sablage, grenailage ou par voie chimique. L'élimination des corps gras est faite par des solvants chlorés et des détergents alcalins. La rouille est, le plus souvent, éliminée par les acides, en ce qui concerne les oxydes formés à haute température (calamine), leur composition dépend de la température à laquelle la pièce a été portée.

2.8.4.1 Protection par revêtements non métalliques

Il s'agit principalement des peintures et matières plastiques. Elles doivent posséder un certain nombre de qualités telles que l'imperméabilité à l'eau et aux gaz, la grande adhérence, la stabilité chimique, l'élasticité élevées et la bonne résistance à l'usure.

a. Peinture:

Pour les peintures, plus l'adhérence est bonne, plus ces conditions sont remplies.

L'importance économique des peintures dépasse de loin celle des autres méthodes de protection contre la corrosion. La plupart des métaux sont protégés par des peintures.

Il est nécessaire d'appliquer deux ou plusieurs couches. Certaines peintures contiennent des pigments qui agissent comme primaires anti-corrosion. Les principaux constituants d'une peinture sont :

- **Le liant** : C'est le composant le plus important d'une peinture, il assure la cohésion du film et son adhérence au substrat (PVA, PVC, époxydes, etc.).
- **Le solvant** : permet d'appliquer la peinture à l'état liquide (l'huile de lin, solvants organiques) une fois la peinture appliquée, l'eau s'évapore et le liant qui possède normalement une masse moléculaire élevée, forme un film compact par coagulation.
- **Les pigments** : sont des composés que l'on ajoute aux peintures pour donner la couleur, les plus connus sont Pb_3O_4 , $ZnCrO_4$. Ils sont toxiques.
- **Les additifs et les charges** : sont destinées à modifier certaines propriétés des peintures comme la viscosité, la résistance à l'oxydation ou la tension de surface. Les charges, substances bonnes marchées, telles que l'oxyde de titane ou le carbonate de calcium augmentent la masse et le volume des peintures. Elles peuvent également améliorer certaines propriétés de films comme la résistance à l'abrasion.

b. Matières plastiques :

L'utilisation des revêtements plastiques pour les métaux, s'accommode bien pour la protection contre la corrosion. Ils présentent beaucoup d'avantages par rapport aux peintures, tels que l'épaisseur de la couche (100 à 500 μ m), en même temps, il joue le rôle d'isolateur.

L'inconvénient des plastiques, réside dans la faible résistance à la température et leur instabilité dans plusieurs solvants organiques. Les revêtements plastiques utilisés sont :

- Les thermoplastes (polyéthylène, polypropylène, PVC...)
- Les caoutchoucs (naturels ou synthétiques).
- Les thermodurcissables (polyuréthanes, époxydes, polyesters).

En général le revêtement par les matières plastiques se fait de la façon suivante : la pièce à revêtir est préchauffée puis saupoudrée avec les grains de matière plastique ou plongée dans un lit fluidisé de la poudre.

2.8.4.2 Protection par revêtements métalliques

Les revêtements métalliques sont couramment employés pour protéger l'acier contre la corrosion atmosphérique. Les revêtements métalliques, outre leur effet anti-corrosion, remplissent souvent une fonction décorative. On les utilise aussi comme protection contre l'usure. Il existe deux types de revêtements métalliques ceux plus nobles que le substrat cathodique et ceux moins nobles que le substrat anodique.

2.8.5 Protection par inhibiteurs de corrosion

Un inhibiteur de corrosion est un composé chimique qui, ajouté en petite quantité au réactif corrosif, permet de diminuer la vitesse de corrosion ou d'annuler son agressivité vis-à-vis du métal. Il ne modifie donc pratiquement pas la nature, ni la concentration du milieu. Les inhibiteurs de corrosion agissant en créant une barrière entre le métal et le réactif. Ils viennent se fixer à la surface du métal sous une forme qui dépend de leur nature.

a. Classement selon leur domaine d'utilisation.

b. Classement selon la réaction partielle :

- **Inhibiteurs anodiques.**
- **Inhibiteurs cathodiques.**
- **Inhibiteurs mixtes.**

2.8.6 Protection électrochimique

La corrosion électrochimique d'un métal est résultat du passage d'un courant anodique dans les piles locales. Pour supprimer le phénomène de corrosion, il faut porter le métal à un potentiel pour lequel l'intensité de la réaction élémentaire anodique est nulle ou très faible.

Deux types de protection électrochimiques peuvent être envisagés :

- Protection cathodique.
- Protection anodique.

2.9 L'influence de la corrosion sur les aciers dans le béton armé

Dans le cas des constructions en béton armé, la durabilité de l'ouvrage dépend essentiellement de la tenue des armatures à la corrosion. Afin de bien comprendre le phénomène de corrosion des aciers dans le béton, on définira le matériau béton et la corrosion, et on décrira les mécanismes de corrosion des aciers dans le béton.

2.9.1 Le béton armé

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

2.9.1.1 Le béton

Le béton est mélange de ciment, eau, granulats et souvent adjuvants, réalisé en des proportions bien déterminées en fonction des caractéristiques que l'on veut obtenir. C'est une pâte considérée homogène résultante des réactions entre le ciment et l'eau.

Il y a une grande variété de ciments, mais le plus couramment utilisé est le ciment Portland CEM 1. Il est composé de clinker, de gypse (3 à 5%) et éventuellement d'ajouts (< 5%). Le clinker est obtenu en cuisant, vers 1540°C, des mélanges appropriés de calcaire (80%) et d'argile (20%), il est principalement constitué de :

- Silicate tricalcique 3CaOSiO_2 ou C_3S
- Silicate bicalcique 2CaOSiO_2 ou C_2S
- Aluminate tricalcique $3\text{CaO Al}_2\text{O}_3$ ou C_3A
- Aluminoferrite tétracalcique $4\text{CaO Al}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$ ou C_4AF

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

Les granulats sont issus de roches carbonatées (CaCO_3 , MgCO_3 , $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) ou siliceuse SiO_2 . Aggloméré par le ciment pour former une pierre artificielle. Selon le concept traditionnel, les granulats constituant le squelette du béton, et ils s'opposent à la propagation des microfissures provoqués par le retrait. Ils améliorent ainsi la résistance mécanique du béton.

Après l'addition de l'eau au ciment, des réactions chimiques vont s'opérer.

En effet, sous l'action de l'eau les principaux composés du ciment se dissolvent sous forme d'ions qui interagissent entre eux et forment des composés hydratés.

Les produits d'hydratation majeurs sont les silicates de calcium hydratés C-S-H (50 à 70%) et de la portlandite ou hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (25 à 27%).

Les C-S-H définissent la phase hydraté la plus importante, ce sont des composés non cristallins. Ils ont les caractéristiques d'un gel et possèdent une composition variable, leur formule générale est la suivante :



L'enchevêtrement du gel C-S-H donne sa solidité au ciment et c'est d'elle que vont dépendre les propriétés mécaniques du matériau.

La portlandite, quant à elle, joue un rôle essentiel dans la durabilité des structures en béton armé et elle représente la réserve de basicité du matériau cimentaire, qui permet, en maintenant un pH élevé (> 12), de protéger par passivation les aciers de la corrosion.

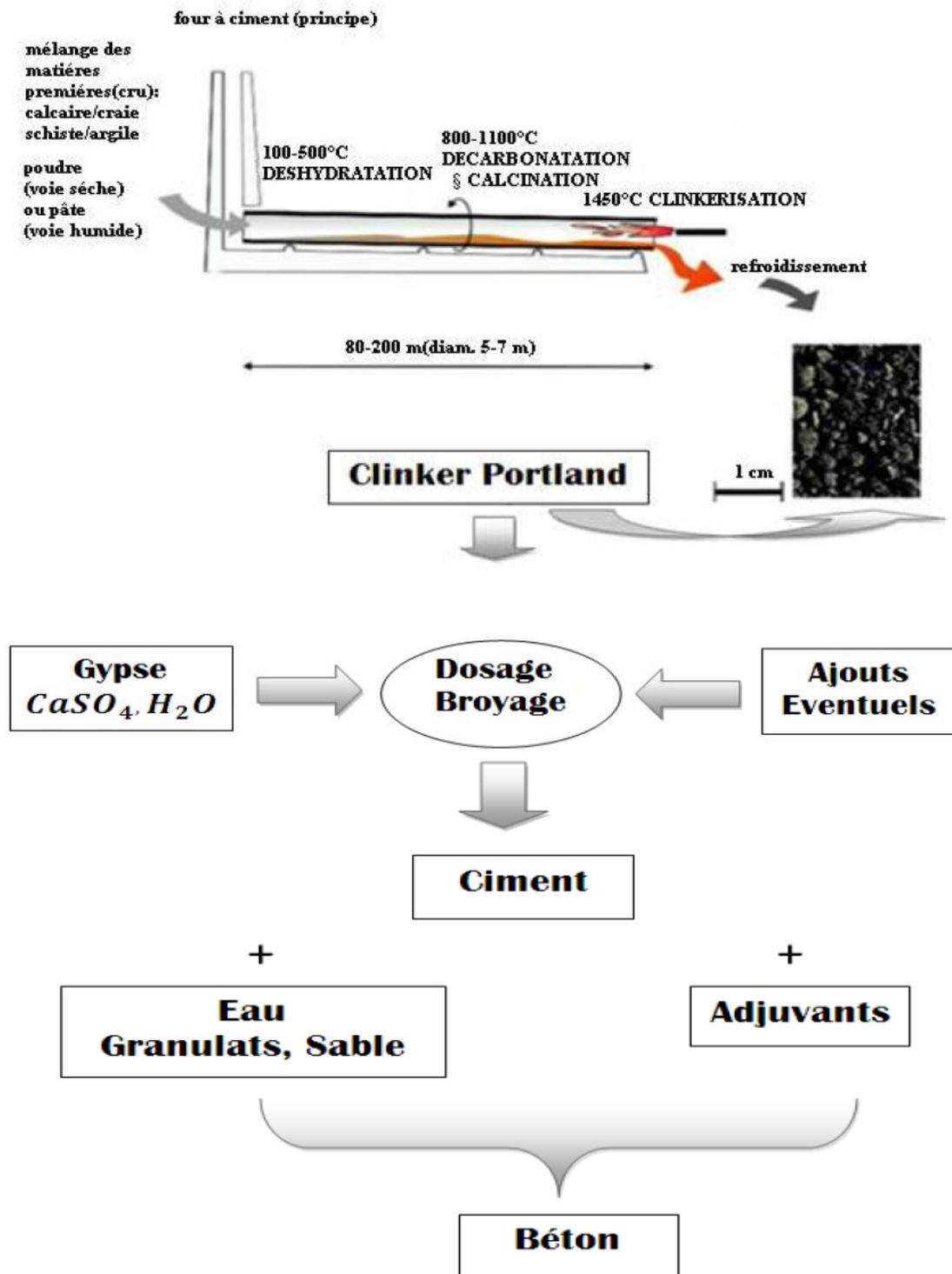


Figure 2.29 : Procédé de fabrication du ciment et du béton [BEN].

2.9.1.2 L'acier

Le béton a une bonne résistance à la compression mais une mauvaise résistance à la traction. Pour pallier à cette insuffisance, on dispose dans les parties tendues des armatures en acier qui a une bonne résistance à la traction. L'adhérence entre le béton et l'acier est nécessaire, et elle est fonction de la surface des armatures de la forme d'ancrage et de la résistance du béton.

Dans les constructions en béton armé, on utilise de l'acier ordinaire dont la durée de vie est assez longue pour satisfaire une durée de service déterminée.

2.9.2 Généralités sur la corrosion des aciers dans le béton

La corrosion des aciers dans le béton est une réaction électrochimique, qui nécessite la présence simultanée de quatre milieux :

- Une zone **anodique** (oxydation du fer),
- Une zone **cathodique** (réduction d'espèce chimiques en solution : eau ou oxygène dissous),
- Un **milieu conducteur d'électrons** (l'acier),
- Un **milieu électrolytique** (le liquide interstitiel du béton).

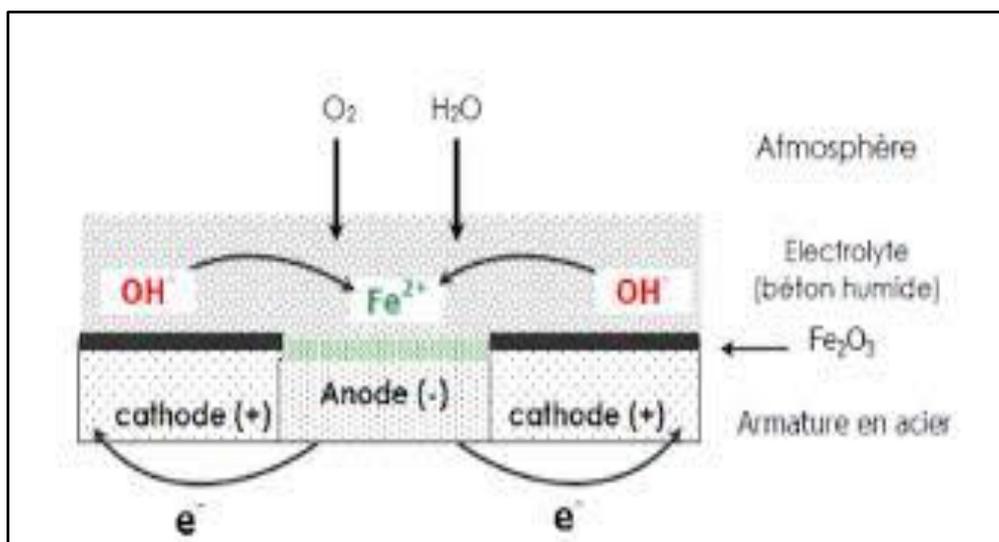


Figure 2.30 : Représentation schématique de processus de base de la corrosion des aciers dans le béton [BAG 02]

Le béton, du fait de sa forte alcalinité (pH>12), apporte aux armatures une excellente protection face à la corrosion. Dans ces conditions, il y a formation de film protecteur très mince autour de ces aciers qui les protégera dans les conditions normales. En présence d'eau et d'oxygène, ce film passif peut être détruit par des agents agressifs comme les chlorures et les sulfates.

La corrosion des armatures dans le béton a principalement lieu à la suite de la carbonatation du béton d'enrobage et de la pénétration du chlorure [MING 05]. La couche passive formée sur l'acier est déstabilisée par l'abaissement du pH produit la réaction chimique entre dioxyde de carbone et les hydrate de la pâte de ciment. Les ions chlorures pénètrent dans la structure poreuse du béton et peuvent atteindre les armatures.

La corrosion ne se forme qu'en présence d'oxygène et d'humidité relative comprise entre 60% et 80%. Lorsque l'atmosphère est très sèche (humidité relative < 40%), ou lorsque le béton est totalement immergé dans l'eau désaérée (manque d'oxygène), la corrosion ne se produit en principe pas [PIET 96, SHAM 03].

Le développement de la corrosion de l'acier dépend aussi d'autres facteurs comme le rapport E/C, le type de ciment, la qualité de l'interface acier-béton, l'épaisseur d'enrobage, la température, le pH, le potentiel de l'acier, les hétérogénéités de la surface de l'acier, etc. [PIET 96, SHAM 03, MET 86].

Le mécanisme de dissolution de l'acier dans le béton en présence d'ions chlore est représenté par la figure (2.31).

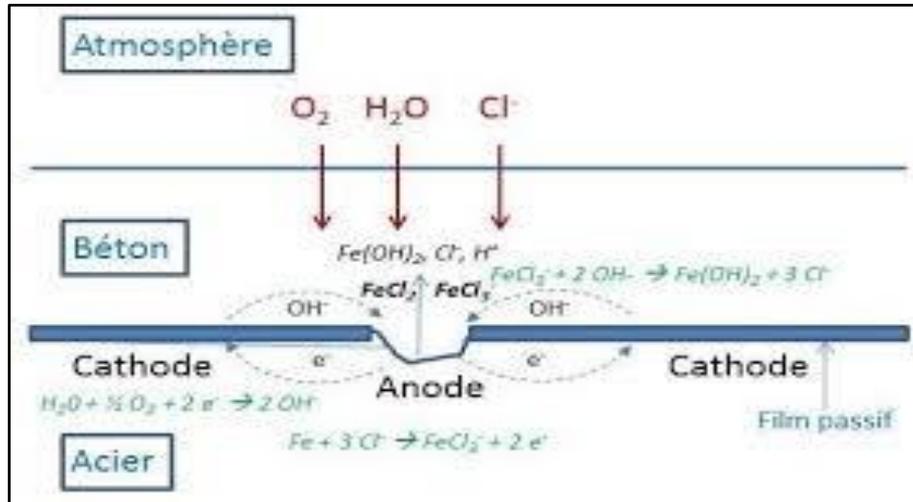


Figure 2.31 : Mécanisme de dissolution de l'acier dans le béton en présence d'ions chlore [MING 05]

2.9.3 La passivation des armatures dans le béton

Certains métaux et alliage ont la propriété de se passiver. En contact avec un milieu agressif, il subissent une première attaque corrosive qui forme des produits de corrosion suffisamment insolubles, adhérents et compacts (oxydes) pour isoler le métal comme par revêtement : c'est la couche de passivation.

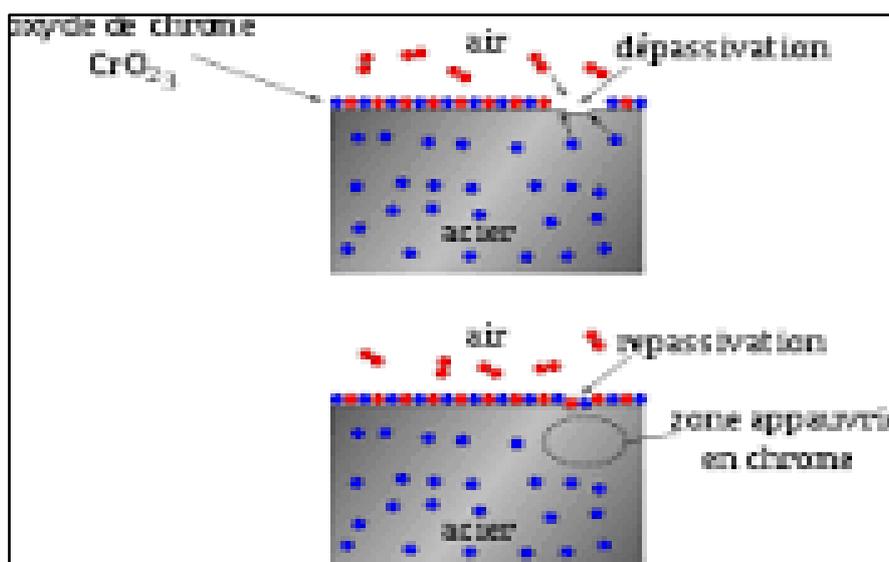


Figure 2.32 : Passivation [SHAM 03]

Le pH de la solution interstitielle dans les pores du béton sain est compris entre 12,5 et 13,4. Avec cette valeur élevée de pH, l'acier se recouvre d'oxyde protecteur, qui forme la couche passive protégeant les aciers de la corrosion.

Lorsque les aciers sont dans une solution alcaline, ils recouverts d'un film d'oxyde. Dans le béton sain, cette couche passive est de 50-200µm d'épaisseur, elle est homogène et continue ; sa composition dépend du pH, du potentiel de l'acier et de l'existence de l'oxygène.

L'interface acier-béton peut être dans un état passif, semi passif ou active (corrosion) [SHAM 03]. Pour l'état passif, le film d'oxyde se fait lentement et est composé de Fe_3O_4 - γ - Fe_3O_4 . Pour l'état semi passif, le film d'oxyde est constitué de deux couches, la première est directement sur la surface d'acier et composée de Fe_3O_4 - γ - Fe_3O_4 , la deuxième est formé d'un mélange de α - $FeOOH$ et de Fe_3O_4 - γ - Fe_3O_4 . Cette couche est inhomogène et poreuse due à sa formation rapide, en conséquence, moins efficace contre la corrosion.

2.9.4 Les étapes de corrosion

Le processus de corrosion des armatures du béton s'effectue généralement en deux phases (figure 2.33)

- **1ère phase :** Au départ, l'acier est protégé par le film passif qui empêche la formation de rouille. Ensuite, durant la phase d'incubation, les agents agressifs pénètrent dans le béton et attaquent les armatures qui se dépassives progressivement. La période d'incubation correspond au temps requis pour que les aciers soient dépassivés sans qu'aucun dommage intérieur ni extérieur ne soit visible.
- **2ème phase :** C'est une période de propagation, ou les réactions d'oxydation à la surface du métal produisent des oxydes et hydroxydes. La formation de ces produits d'oxydation va causer un gonflement et apparaître des fissurations sur l'enrobage de béton et à long terme causé la destruction de la construction.

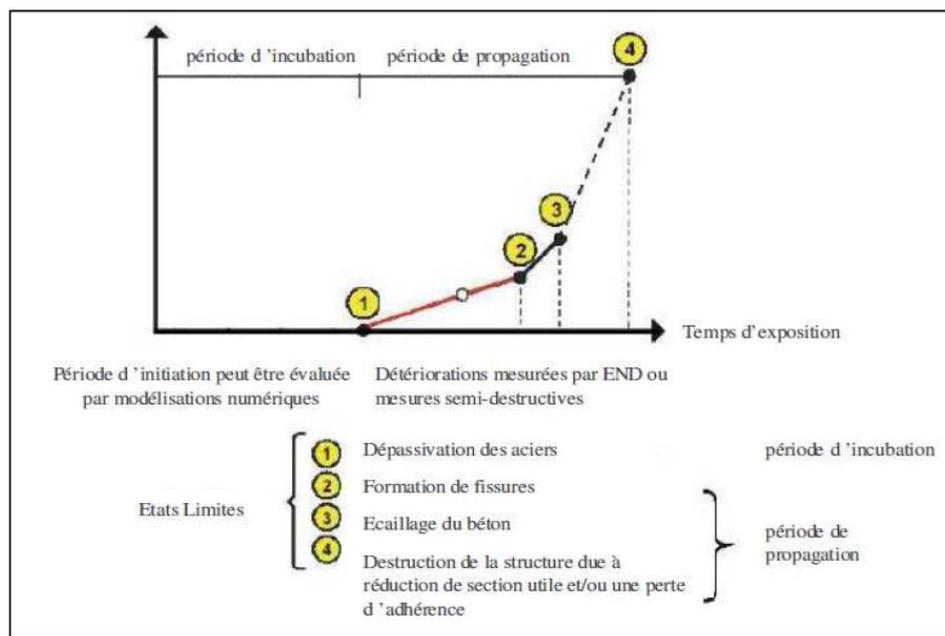


Figure 2.33 : Etapes de l'évolution de la corrosion des armatures dans le béton [SHAM 03]

2.9.5 La dép passivation des aciers dans le béton

La dép passivation des aciers est la destruction du film passif qui les entoure.

Dans les bétons, la corrosion des armatures est essentiellement initiée par deux facteurs distincts :

- La carbonatation du béton d'enrobage au contact du CO₂ atmosphérique,
- La pénétration de chlorures depuis le milieu environnant (milieu marin, utilisation de sels de déverglaçage, milieu industriels particuliers.... etc...).

Si l'un de ces 2 phénomènes se produit, le pH du béton chute et l'acier n'est plus protégé. Une fois que l'acier d'armature est dép passivé et est en contact simultanément avec de l'oxygène et de l'eau (humidité), la dissolution du métal a lieu corrosion sous la forme de formation de rouille, puis perte de section.

2.9.6 Amorçage de la corrosion par carbonatation

2.9.6.1 Généralités

La carbonatation est un phénomène de vieillissement du béton, est l'un des facteurs principaux de détérioration des structures en béton armé exposées à l'atmosphère, et plus encore pour les structures exposées à de fortes concentrations de dioxyde de carbone comme les tunnels routiers, les ouvrages urbains, les parkings souterrains, etc.

Il correspond à la réaction des produits hydratés du ciment avec le CO₂ atmosphérique dissous dans la solution interstitielle. Ce qui engendre une diminution du pH (jusqu'à 9 environ).

La dép passivation de la couche protectrice des armatures se produit lorsque le pH est inférieur 9,5. La carbonatation provoque une destruction du film passif et la diminution de la porosité du béton (les produits des réactions de carbonatation ont des volumes supérieurs à ceux des réactifs).

2.9.6.2 Les réactions physico-chimiques

Le CO₂ atmosphérique ayant pénétré dans le béton se dissout dans la solution interstitielle des pores de la matrice cimentaire et réagit avec certains composés du béton pour former des carbonates de calcium. La carbonatation est une réaction de neutralisation des bases (les hydroxydes) par un acide (le gaz carbonique). En réalité, tous les composants du ciment, anhydres ou hydratés, peuvent réagir et se carbonater, à l'exception du gypse. Les mécanismes prépondérants sont ceux de la carbonatation de la portlandite Ca(OH)₂ et des silicates de calcium hydratés C-S-H. la dissolution du CO₂ dans la solution interstitielle s'écrit selon la réaction :



Dans l'eau, l'acide carbonique (H₂CO₃) se comporte comme un diacide faible dont la dissociation a lieu en deux phases désignées par la réaction :



Les ions OH^- dans les équations d'équilibre (2.7) et (2.8) proviennent de l'autoprotolyse de l'eau qui s'écrit :



La dissolution du CO_2 entraîne une baisse de la concentration en OH^- dans la solution interstitielle, ce qui réduit le pH. Pour rétablir la basicité du milieu, la portlandite se dissout suivant la réaction :



Ainsi les ions calcium Ca^{2+} libérés au cours de la réaction (3.10) réagissent avec les ions carbonates CO_3^{2-} provenant de la réaction (2.8) pour former du carbonate de calcium :



Les différentes étapes du mécanisme de carbonatation de la portlandite (Figure 2.34) peuvent être représentées par l'équation simplifiée :



Quant au C-S-H, ils se carbonatent et donnent naissance à des carbonates de calcium, à un matériau siliceux hydraté (qualifié de gel de silice) et éventuellement de l'eau libre.

La carbonatation de la portlandite provoque un abaissement du pH dans le béton. Les C-S-H présentent la phase hydratée la plus importante dans la pâte de ciment et confèrent au béton l'essentiel de sa résistance mécanique, mais ils ont un pouvoir tampon sur le pH de la solution interstitielle plus faible que la portlandite.

Par conséquent, leur prise en compte dans le mécanisme de carbonatation, n'est pas indispensable.

La carbonatation est un phénomène progressif qui, avec le temps, atteint des couches de plus importantes.

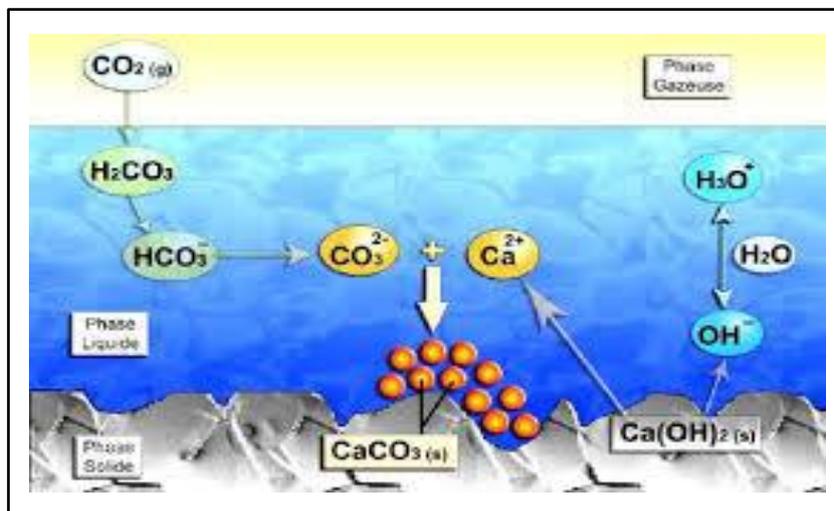


Figure 2.34 : Mécanisme de carbonatation de la Portlandite [THIER 05]

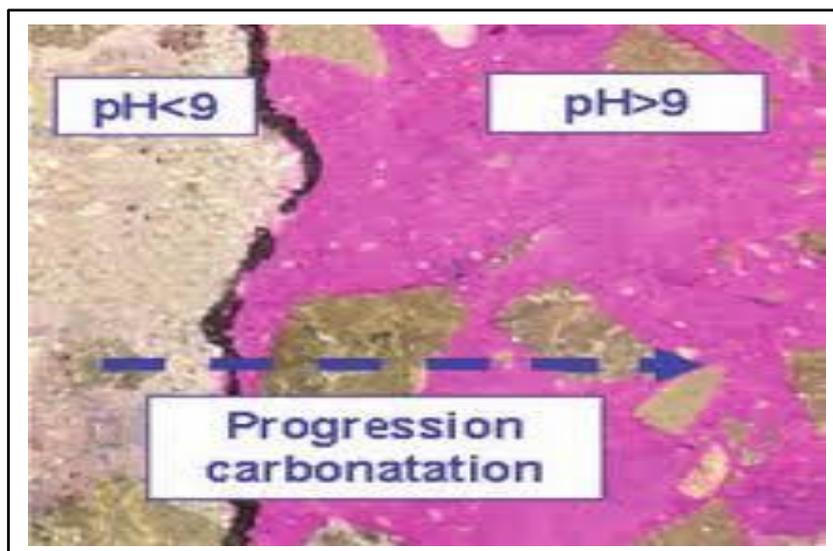


Figure 2.35 : La progression de la carbonatation [THIER 05].

2.9.6.3 Les facteurs influençant la vitesse de carbonatation

La vitesse de carbonatation dépend essentiellement des paramètres relatifs à l'environnement et au matériau béton lui-même. Les plus importants sont :

- Le rapport E/C :

Ce rapport est connu principalement pour contrôler la résistance mécanique, la durabilité, et l'imperméabilité du béton, et donc en conséquence le taux de corrosion d'armatures. La profondeur de carbonatation augmentent avec l'augmentation du rapport E/C [POP 83, ACL 89]. Le coefficient de diffusion de l'oxygène pourrait également augmenter avec une augmentation du rapport E/C [ACL 92].

Le rapport E/C influence considérablement sur la porosité des matériaux à base de ciment [BAR 92]. Tout excès d'eau conduit à un excès de porosité favorisant la pénétration des agents agressifs

En particulier le CO₂.

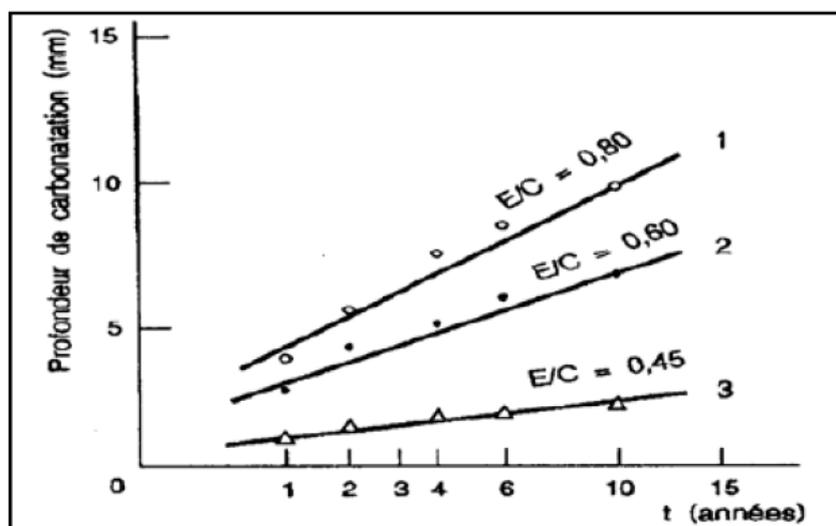


Figure 2.36 : Evolution de la profondeur de carbonatation en fonction du temps et du rapport E/C (20° C-50% HR). [BAR 92]

- **Le dosage en ciment :**

Le dosage en ciment est responsable de la quantité de matière susceptible de se carbonater. Plus le dosage en ciment est élevé, plus il y a de matière pour la carbonatation. Et puisque la carbonatation provoque une diminution de la porosité, il y aura un freinage de la vitesse de pénétration du gaz carbonique [HOUS 92], c'est-à-dire l'augmentation du dosage du béton à un effet ralentisseur sur la propagation de la carbonatation.

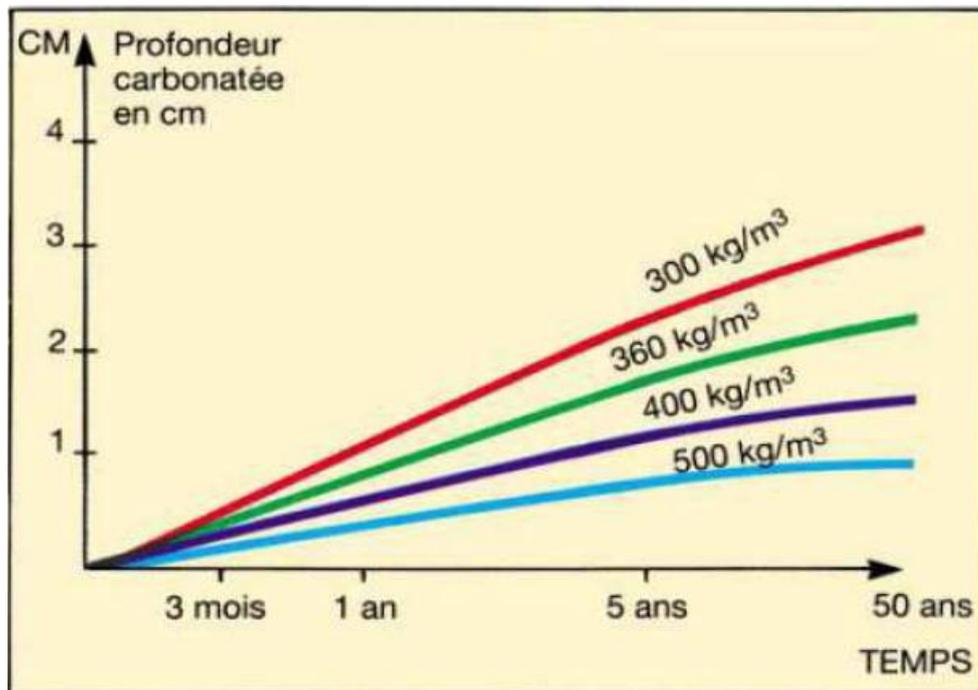


Figure 2.37 : Evolution de la carbonatation dans le béton en fonction du dosage en ciment [OLLI 08].

- **Le type de ciment :**

Les ciments avec des constituants secondaires (laitiers, cendres volantes, pouzzolane) ont naturellement une teneur en composés susceptibles de se carbonater inférieure à celle du ciment Portland. Ainsi, la profondeur de carbonatation des ciments avec ajouts est supérieure à celle du ciment Portland [VEN 68, HO 87].

- **La concentration en dioxyde de carbone :**

L'augmentation de la concentration en CO_2 induit un accroissement de la vitesse de carbonatation dans des endroits où la teneur en CO_2 est élevée (tunnels, garages, cheminées,...) [NS 86].

Cependant, les variations de la teneur en CO_2 de l'air ont une influence sur les bétons de résistance modérée (≤ 30 MPa environ). Au-delà, la teneur en CO_2 n'a plus d'influence sur la carbonatation. [OLLI 08]

- **L'humidité relative :**

La teneur en eau du béton ou l'humidité relative de l'air en équilibre avec le béton, est un facteur qui présente une grande influence sur la cinétique de carbonatation. La vitesse de carbonatation

est maximale pour une humidité relative comprise entre 60 et 80 %. Au-delà de 80 %, la cinétique diminue rapidement pour atteindre des valeurs extrêmement faibles lorsque les pores sont saturés d'eau (humidité relative > 90%), sachant que la diffusion du CO₂ dans l'eau est dix mille fois plus faible que dans l'air [HOUS 92] donc dans un environnement très sec, la cinétique de carbonatation est très faible, car la quantité d'eau présente dans les pores du béton est insuffisante pour dissoudre le dioxyde de carbone.

La Figure 3.45 montre l'évolution de la corrosion d'un acier en fonction de l'humidité relative pour une atmosphère polluée par 0,01% de SO₂. On constate ici que la corrosion devient importante dès que l'humidité relative atteint 60%.

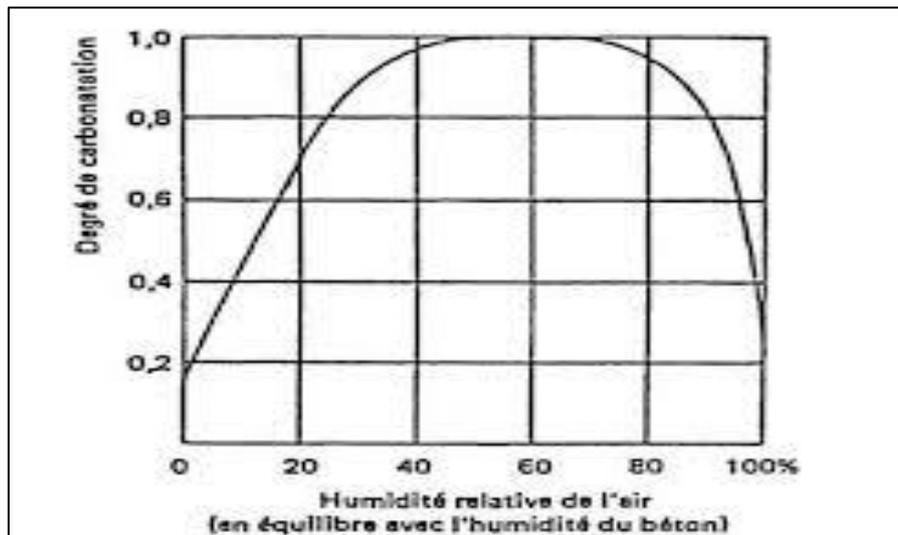


Figure 2.38 : Incidence de l'humidité relative de l'air sur la vitesse de carbonatation [OLLI 08].

- **La température :**

L'effet de la température sur la vitesse de carbonatation est très discutable. D'une part, une élévation de la température accélère les réactions chimiques (thermo activation selon la loi d'Arrhenius). D'autre part, une augmentation de la température diminue la solubilité du CO₂ et diminue sa concentration dans la phase gazeuse [THIER 05]. Néanmoins, il est généralement admis qu'une élévation de la température engendre une accélération de la carbonatation [CIM 06] ;

- **La résistance à la compression :**

La résistance à la compression est en relation quasi linéaire avec la profondeur de carbonatation [TSUK 80]. Quand la résistance à la compression du béton augmente, la carbonatation diminue du fait de la diminution de la porosité [TSUK 80].

2.9.6.4 Conséquence de la carbonatation sur le béton

Pour le béton seul, la carbonatation a un effet bénéfique car elle diminue la porosité, ce qui améliore ces performances mécaniques et limite la pénétration des agents agressifs. Mais négativement, la baisse du PH de la solution interstitielle provoque la dépassivation du film protecteur des armatures et favorise la corrosion des aciers. Les principales conséquences de la carbonatation sur le béton armé sont :

- **Diminution de la porosité :**

La distribution de la taille des pores d'une pâte de ciment durcie est modifiée par la carbonatation [THIER 05]. Elle montre une notable réduction du volume des pores après carbonatation et ainsi une diminution de la porosité [POW 62]. On observe une chute de la porosité de 31,6% à 25,6% après 32 mois de carbonatation naturelle d'un CEM I de E/C=0,3 [PIH 68].

- **Augmentation de la résistance mécanique du béton :**

La carbonatation induit localement une accumulation d'humidité dans les pores : en effet, la carbonatation de la portlandite et des C-S-H libère une partie de l'eau de structure des hydrates. Cette eau libérée peut participer à la composition de la solution interstitielle et contribuer au transport d'agents agressifs. On note que la carbonatation de la portlandite est l'origine principale de cet élagage d'eau libre [THIER 05].

- **Evolution des propriétés de transfert :**

L'évolution de la microstructure, qui accompagne la carbonatation, influence sur la propriété de transfert des matériaux cimentaires : coefficients effectifs de diffusion aux ions et aux gaz et perméabilité aux gaz et à l'eau liquide.

Le coefficient effectif de diffusion aux gaz (oxygène ou hydrogène) est diminué après la carbonatation de matériaux à base de ciment CEM I [DAI 71]. Cependant, le coefficient de diffusion effectif des ions (chlorures par exemple) est augmenté à l'issue de la carbonatation de matériaux à base de ciment [NGA 97], ce phénomène pouvant être attribué aux grandes modifications de la structure des CSH après la carbonatation.

Quant à l'impact de la carbonatation sur la perméabilité, les essais menés par Thiery [THIER 05] montrent que la carbonatation provoque un accroissement de la perméabilité intrinsèque aux gaz et à l'eau liquide d'un béton assez poreux (E/C >0,45), et une réduction pour un béton de porosité modérée. Son effet sur la perméabilité intrinsèque des bétons les moins poreux est négligeable.

- **Retrait de carbonatation :**

La carbonatation de la portlandite entraîne une augmentation de volume des solides de 3% à 19% selon le produit de réaction obtenu (Valérite, Calcite ou Aragonite), ce qui nous amène à penser qu'il s'agit d'un gonflement et non d'un retrait. Pourtant toutes les expériences mettent en évidence un (retrait).

Ce phénomène peut être attribué à la perte d'eau provoquée par la réaction [HOUS 92], du fait de l'observation que la quantité d'eau libérée lors de cette réaction s'accompagne d'un retrait qui est du même ordre de grandeur qu'un retrait infligé par le départ de la même quantité d'eau sans carbonatation. Plusieurs autres hypothèses ont été avancées dans le but d'expliquer le retrait de carbonatation qui est un phénomène assez complexe [POW 62, HUN 62, SWEN 67]. Ces hypothèses ont permis de mieux comprendre ce phénomène mais pas d'aboutir à une conclusion déterminée et générale.

- **Chute du pH de la solution interstitielle et corrosion des armatures :**

L'alcalinité du béton (pH>13) assure la passivation des aciers d'armatures. Or, la carbonatation du béton entraîne une baisse du pH favorisant leurs corrosions. Lors du phénomène de

corrosion. Dans la zone anodique il y aura une diminution progressive de la surface d'armature et dans la zone cathodique la formation d'une rouille expansive qui exercera une pression sur le béton qui entoure les armatures et provoqué l'éclatement du béton d'enrobage.

2.9.7 Amorçage de la corrosion par pénétration des ions chlorures

2.9.7.1 Généralités

Les ions chlorures présents dans le béton peuvent avoir été introduits par l'eau de gâchage ou par des agrégats contaminés, ou bien provenir du milieu environnant (atmosphère marine, sels de déverglaçage, produits chimiques). Les chlorures peuvent exister dans le béton sous les deux formes suivantes :

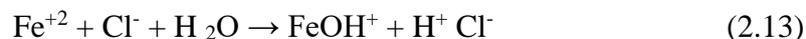
- Les chlorures libres qui sont dissous dans la solution interstitielle ;
- Les chlorures piégés ou liés qui résultent de la réaction chimique avec les hydratés du ciment, ou combinés avec des agrégats, ou adsorbés physiquement sur les parois des pores de béton.

Les chlorures pénètrent dans le béton et arrivent au contact de l'acier et quand leurs teneur atteint un seuil critique, ils attaquent l'acier, initialement passivé, en des points localisés. Dans ces points l'armature est dépassivé et correspondent aux zones anodiques où l'acier se dissout. Le reste de la surface qui est encore passivé correspond aux zones cathodiques. La surface des zones cathodiques étant bien plus importantes que celles des zones anodiques, la dissolution d'acier croît en profondeur plutôt qu'en surface, formant ainsi des piqures ou des cavernes [NUR 84, NEV 95]. Le mécanisme de ce type de corrosion est complexe car la composition de la solution à l'intérieur de la piqure est modifiée par rapport à celle de la solution interstitielle qui l'entoure [PAG 96].

2.9.7.2 Les réactions physico-chimiques

Les ions chlorures qui pénètrent dans le béton se combinent chimiquement avec l'aluminate tricalcique C_3A (composant du ciment) et forment des monochloroaluminates hydratés ($C_3A.CaCl_2.10H_2O$), relativement stable dans le béton.

Dans les piqures, les ions chlorures s'associent avec l'ion hydrogène de l'eau pour former l'acide chlorhydrique qui sont constamment recyclés :



Ces réactions engendrent une importante baisse du pH, entre 3,8 et 5 [BYF 90, VAN 70], la dissolution du fer est alors accélérée et les piqures croissent en profondeur.

-Les ions ferreux diffusés hors de la piqure se combinent avec les ions hydroxyde de la phase interstitielle du béton tandis que la réaction cathodique est la même que dans le cas de corrosion en absence de chlorure.

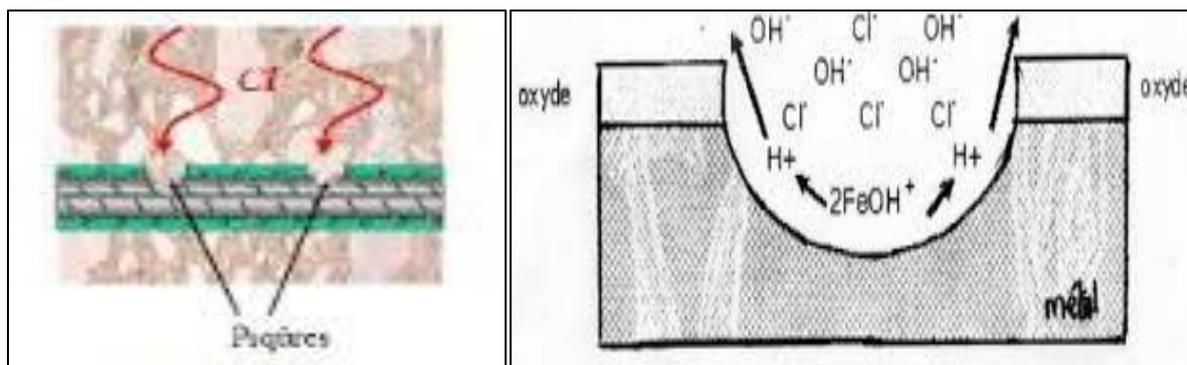


Figure 2.39: Modèle de PAGE et al. D'attaque de l'acier par les ions chlorures [PAG 96]

2.9.7.3 Teneur critique en ions chlorures

Dans le cas où la solution interstitielle contient une faible concentration en ions chlorure, il n'y aura pas de dépassivation des armatures, il existe donc une teneur critique en ions chlorures nécessaire pour l'amorçage de la corrosion.

Dans la littérature, il existe plusieurs expressions C_{cr} , la teneur critique peut s'exprimer par le rapport Cl^-/OH^- (c'est le rapport des ions activant Cl^- sur les ont passivant OH^-), ou bien par la teneur en chlorures (libres+liés) par rapport au poids du ciment (de 350 Kg/m^3 par définition). Selon d'autres études, on considéré que seuls les chlorures libres participent à la dépassivation des armatures et le seuil critique est exprimé en termes de la teneur en chlorures libre par rapport au poids du ciment. Enfin, il existe s'autres travaux qui expriment la teneur seuil par $[Cl^-]=1,8 \text{ mol/l}$ [SHAM 03].

Tableau 2.3 : Teneurs critiques en ions chlorures et rapports Cl^-/OH^- relevés dans la littérature.

Concentration en chlorures	Référence
0,2% de Cl^- solubles à l'acide en masse de ciment	Clear et al., 1973[CLE 73]
0,4 à 0,8% de Cl^- totaux en masse de ciment	Locke et al., 1980[LOC 30]
0,4 de Cl^- totaux en masse de ciment	Building R.E, 1982 [GAS 82]
0,15 de Cl^- solubles à l'eau en masse de ciment	Holden et al. 1983 [HOL 83] Popovics et al., 1983 [POP 83]
0,2% de Cl^- en masse de ciment (béton armé) 0,08% de Cl^- en masse de ciment (béton précontraint)	ACL 222R-89-,1989 [ACL 89]
0,06 à 1% de Cl^- totaux en masse de ciment	ACL 318-89-,1992 [ACL 92]
0,1% de Cl^- totaux en masse de béton sec	Stoltzner et al., 1997 [STO 97]
0,60 à 3,04% de Cl^- totaux en masse de ciment selon les conditions expérimentales	Gouder et Halaka, 1970 [GOU 70]
0,45% à 1,15 de Cl^- libres en masse de ciment selon le type de béton	Kayyali et Haque, 1995 [KAY 95]
0,097 à 0,19% de Cl^- totaux en masse de ciment	Hope et Ip, 1987 [HOP 87]
0,14 à 0,22% de Cl^- libres en masse de ciment 0,35 à 1% de Cl^- totaux en masse de ciment selon la Quantité en $C_3 A$	Hussain et al., 1995 [HUS 95]
Rapport Cl^-/OH^-	Référence
0,6	Hausman, 1967 [HAU 67]
0,35	Gouda, 1970 [GOU 70]
0,29-0,30	Diamond, 1986 [DIA 86]
0,25-0,8	Goni et Andrade, 1990 [GON 90]
3,00	Lambert et al., 1991 [LAM 91]

Ces seuils ne sont pas fixes car ils dépendent du pH, de l'humidité du béton, de sa teneur en oxygène, etc.

2.9.7.4 Facteurs influant sur la pénétration des chlorures

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

- Le rapport E/C :

Comme pour le phénomène de carbonatation, la migration des ions chlorures à travers la structure poreuse d'un béton est fortement liée aux propriétés de transfert des bétons (diffusivité et perméabilité). Ces propriétés de transfert sont elles-mêmes liées à la microstructure des bétons. POWERS et al. [POW 54] ont mis en évidence l'importante diminution de la perméabilité d'une pâte de ciment lorsque le rapport E/C diminue au-dessous d'un rapport critique E/C = 0,70.

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

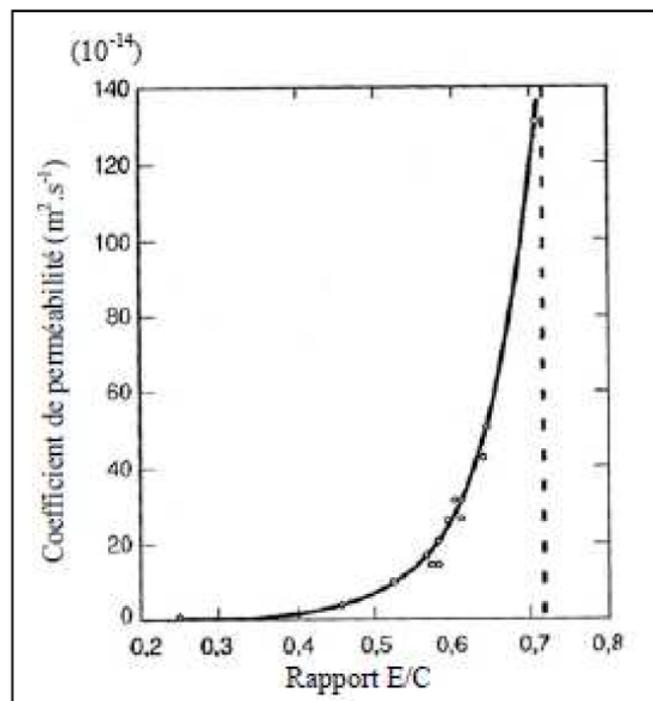


Figure 2.40 : Relation entre le coefficient de perméabilité à l'eau des pâtes de ciment totalement hydratées et le rapport E/C [POW 54]

- Les additions minérales et les ajouts :

Les additions minérales et les adjuvants donnent au béton un niveau de résistance à la compression fixé. La résistance à la compression peut constituer un critère vis-à-vis de la durabilité.

Les fillers calcaire ne modifient pas la perméabilité et la diffusivité du béton, cependant, d'autres additions minérales, comme les laitiers, les cendres volantes ou encore la fumée de

silice, modifient la nature et la texture de ces hydrates. Ils réduisent la portlandite dans les hydrates. Cette réduction de la portlandite s'accompagne, en général, d'un affinement des pores et des capillaires, et donc une réduction de la perméabilité.

Cette action peut prendre quelques jours pour les fumées de silice, et quelques semaines pour les laitiers, et quelque mois pour les cendres volantes.

- La nature du ciment :

La nature du ciment joue un rôle important dans la fixation des ions chlorures. En effet, les chlorures sont soit adsorbés sur les C-S-H, soit fixés par les aluminates (C_3A) qui dépendent tous deux de la composition du ciment. FRANCY [FRA 98] a montré l'influence de la teneur en aluminates de ciment sur la quantité de chlorures fixés.

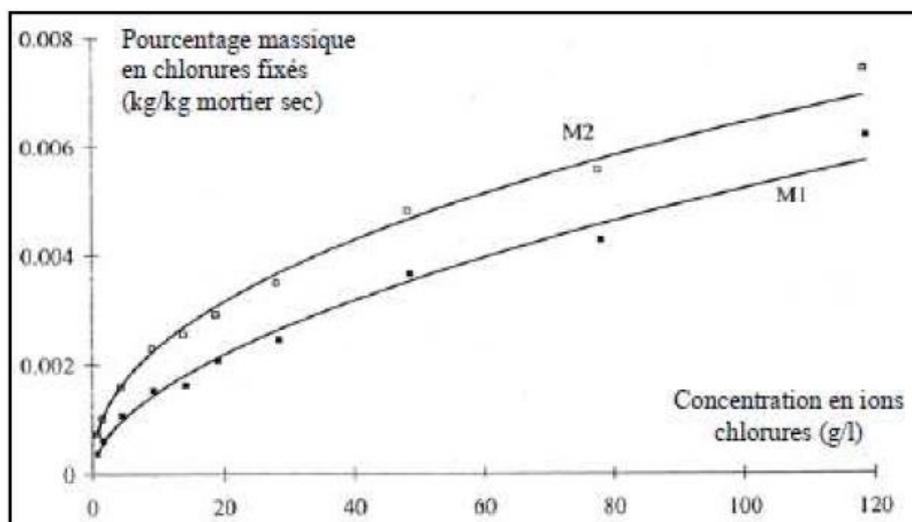


Figure 2.41 : Isotherme de fixation du chlore sur deux mortiers [FRA 98]

FRANCY a fait une comparaison des isothermes de fixation du chlore de deux mortiers de référence M1 et M2 (sable Leucate et $E/C = 0,5$), chaque mortier utilisant un ciment différent (tableau 2.4).

Tableau 2.4 : Analyse chimique des ciments de l'étude menée par FRANCY [FRA 98]

Mortier	Type de ciment	Composition de Bogue (%)				
		C_3S	C_2S	C_3A	C_3AF	$CaSO_4 \cdot H_2O$
M1	CEM I	67,2	16,4	4,5	6,5	4,5
M2	CEM II	58,8	14,7	11,3	6,6	4,5

On constate que le mortier M2, dont la teneur en aluminates du ciment est supérieure à celle du ciment M1, possède une capacité de fixation environ 30% supérieure à celle du mortier M1, pour une même teneur en pate de ciment.

Une augmentation de la teneur en (C_3A) du ciment conduit donc à une diminution de la teneur en chlorures libres, c'est-à-dire à une augmentation de la teneur en chlorures fixés (pour une teneur en chlorures totaux constante).

- **La teneur en eau :**

Il est naturel de penser que la capacité de fixation du matériau vis-à-vis des ions chlorures est directement liée à la surface spécifique en contact avec la solution interstitielle : elle diminuerait avec l'humidité interne [GRE 61].

Cependant, malgré une diminution de la teneur en eau les parois des pores restent couvertes d'une couche adsorbée d'eau, il en résulte une augmentation de la solution au voisinage de ces pores [GRE 61]. Donc pour de faible teneur en eau, on aura des chlorures piégés dans une mince pellicule d'eau qui pourront être considérés comme fixés, et une diminution de la mobilité des ions chlorures.

- **Le flux de liquide :**

Les mouvements d'eau peuvent réduire la fixation des ions chlorures. Des essais d'imbibition capillaires par solution saline menés par FRANCY [FRA 98] montrent que les ions chlorures sont transportés par l'eau et qu'une durée d'imbibition insuffisante ne permet pas d'atteindre l'équilibre de fixation du chlorure. Ce fait est expliqué par :

- Les chlorures transportés par l'eau dans les gros pores n'ont pas tous de suite accès aux hydrates avec lesquelles ils interagissent ;
- La vitesse imposée aux ions peut réduire le nombre de chocs avec les parois des pores et donc le nombre de rétentions efficaces ;
- La forte énergie cinétique de mobilité des ions chlorures dans les pores peut favoriser la désorption par rapport à la fixation ;
- Un état initial sec du matériau peut rendre les hydrates inaptes à une fixation immédiate.

Ainsi, un flux convectif rapide gêne (ou retarde) la fixation des chlorures sur la matrice.

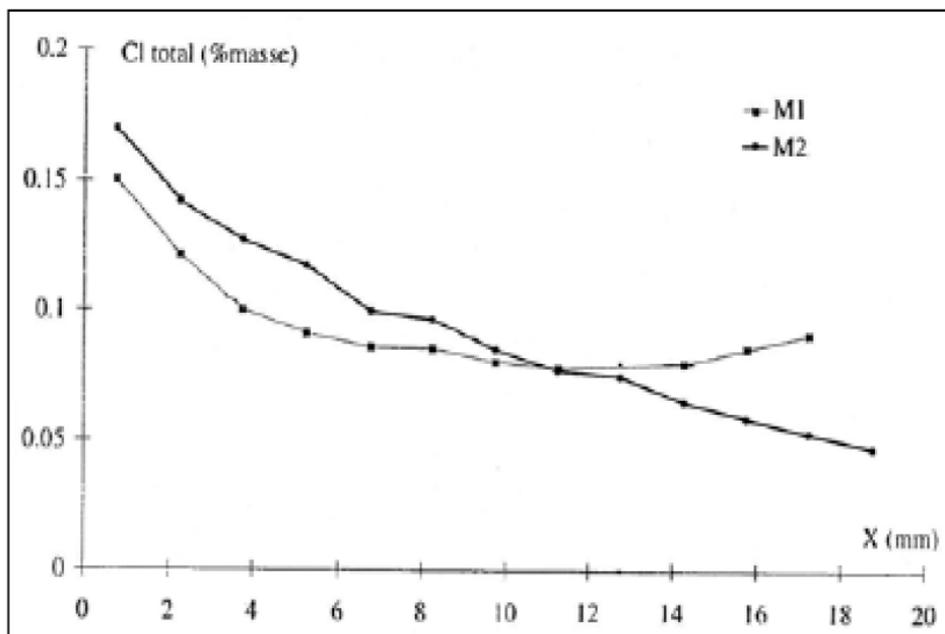


Figure 2.42 : Profil en chlorure total après imbibition de 48 heures sur matériaux secs par des solutions saines à 20g/l en NaCl [FRA 98]

- La teneur en chlorure :

Les chlorures présents dans le béton peuvent soit être introduits lors du gâchage, soit provenir du milieu environnant. Lorsque la teneur en chlorures atteint ou dépasse une valeur critique ou valeur seuil [GLA 97, HET 93, RTD 01], on dit qu'il y a dépassivation de la couche protectrice de l'acier, l'enrobage ne peut plus protéger les armatures et la corrosion s'amorce si les quantités d'eau et d'oxygène sont suffisantes.

2.9.8 Formation des produits de corrosion expansifs

En général, les produits de corrosion dominants sont l'hydroxyde ferreux ($\text{Fe}(\text{OH})_2$) et l'hydroxyde ferrique ($\text{Fe}(\text{OH})_3$). Ces deux produits sont les plus majoritaires parmi les produits de corrosion (d'où l'appellation de produits expansifs). On présente dans cette partie les expressions des pertes d'aciers en masse et en surface suite aux réactions de corrosion.

2.9.8.1 Masse d'acier consommée

La masse d'acier consommée lors de la formation des produits de corrosion peut être exprimée par la loi de Faraday [CHEN 08] ;

$$\frac{dma}{dt} = \frac{icorr M_a}{nF}$$

Où :

m_a : est la masse d'acier consommée (g),

t : est le temps à partir de l'initiation de la corrosion (an),

i_{corr} : est la densité du courant de corrosion ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$),

M_a : est la masse molaire de l'acier ($M_a=55,85 \text{ g/mol}$),

n : est la valence de l'acier $n=2$ lors de la formation de $\text{Fe}(\text{OH})_2$ et $n=3$ lors de la formation de $\text{Fe}(\text{OH})_3$, dont est déduite une valeur $n=2,5$ de façon empirique ,

F : est la constante de Faraday ($F=96500 \text{ C/mol}$).

2.9.8.2 Surface d'acier consommée

La corrosion des aciers dans le béton peut être se faire sous deux formes :

Une corrosion généralisée, qui provoque une réduction uniforme de la surface d'acier et une corrosion par piqure, qui provoque une réduction localisée et fréquemment plus agressive.

La plupart des cas de corrosion par pénétration des chlorures, induit une réduction de la section de la barre par la formation de piqure. Ce phénomène a lieu lorsque les ions chlorures détruisent la couche protectrice de l'acier en des endroits localisés tout au long de la barre d'armature. Lorsque la corrosion est initiée en ces endroits, un environnement très agressif se forme à l'intérieur de ces piqures. L'intérieur de la piqure agit comme étant la région anodique donnant des électrons à la zone d'acier encore passive (cathode). Ce transfert d'électron crée un cycle auto-entretenu qui peut mener à des taux de pénétration dramatique (jusqu'à 1 mm/an) amenant à une réduction rapide des sections des barres d'armature [BERT 04].

2.9.9 Densité du courant de corrosion

La corrosion dans le béton résulte d'un processus électrochimique dans lequel la réaction de dissolution (réaction anodique) est équilibrée par une ou plusieurs réactions dites cathodiques mettant en jeu des quantités de matière (ions surtout) et des électrons. A chacune de ces réactions élémentaires correspond une vitesse de corrosion qui est égale à la quantité de matière formée par unité de temps. A chacune des réactions cathodique et anodique correspond un potentiel électrique qui dépend de sa vitesse [DHIR 94].

CHAPITRE 3

DIAGNOSTIC

3.1 Objectifs du diagnostic :

Les objectifs d'un diagnostic de corrosion sont [AFGC 03] :

- l'identification de l'origine (carbonatation, chlorures externes ou internes, autres),
- l'évaluation de l'étendue dans l'espace,
- la prédiction de l'évolution probable, dans le temps ou dans l'espace,
- l'estimation des conséquences sur la sécurité de l'ouvrage ou des personnes,
- la définition des suites à donner et entre autres le principe des solutions de réparation.

Des considérations d'ordre esthétique sont par ailleurs à prendre en compte dans de nombreux cas : bâtiments, monuments historiques, du fait de la nature des matériaux de base, de leur texture, de leur couleur et de la nature du ciment. Ceci est à prendre en compte dans l'établissement du programme d'investigations.

3.1.1 Cas particulier de la corrosion des armatures

La corrosion des armatures a souvent pour conséquences des symptômes visibles sur le parement, tels que des éclats, épaufures, taches de rouille. Dans certaines circonstances, toutefois, une délamination dans le lit des armatures peut se produire, sans signes apparents de corrosion.

La forme, l'étendue des désordres, leur intensité dépendent à la fois de la position des armatures (enrobage, et espacement), de la qualité du béton d'enrobage (compacité et homogénéité), et de l'environnement (nature de l'agent agressif : chlorures).

Ainsi, lorsqu'une corrosion se manifeste, il est raisonnable de s'attendre à ce que le processus de dégradation s'étende au-delà de la dégradation visible.

La plupart des méthodes d'investigation sont donc orientées vers la détermination de caractéristiques liées à ces paramètres.

3.1.2 Procédure à suivre

La procédure à suivre pour un diagnostic, s'intègre dans une démarche globale qui peut mener jusqu'à des travaux de réparation.

La découverte des désordres sur une structure entraîne généralement :

- la mise en œuvre de mesures de sauvegarde si nécessaire (purges, filet de protection...),
- la réalisation d'une visite préliminaire et de certaines autres opérations dans le but d'établir un pré-diagnostic,
- la mise au point d'un programme d'investigation,
- le lancement des opérations liées au diagnostic...

L'ingénieur chargé des opérations de diagnostic doit avoir des compétences sur la physico-chimie des matériaux, l'instrumentation, les méthodes de réparation et de traitement. Dans les cas délicats, il devra s'associer avec un ingénieur spécialiste des structures (pour les problèmes d'ordre mécanique), ou un ingénieur chimiste de laboratoire (pour les problèmes liés aux gonflements du béton, etc.).

3.2 Inspection détaillée :

3.2.1 Préparation de l'inspection

Il s'agit tout d'abord de vérifier et compléter les informations recueillies lors de la visite préliminaire, de rechercher des documents de synthèse déjà établis, tels que les précédents rapports d'expertise, etc.

Les moyens d'accès seront recensés et définis au préalable, et toutes les dispositions prises (sécurité, accès, nettoyage, etc.) [AFGC 03].

3.2.2 Inspection

L'inspection proprement dite comprend le relevé, éventuellement sur plans, de tous les désordres visibles, et de tous renseignements utiles quant à l'aspect du parement :

- la présence d'anciens revêtements, ou de produits d'imprégnation,
- l'apparence de la surface du béton, stalactites, efflorescences, traces de rouille,
- la présence de fissures, (ouverture, réseau),
- la détérioration de la peau du béton,
- les armatures apparentes et les épaufrures,
- la déformation de la structure,
- la détection de zones sonnantes creuses,
- les traces d'humidité.

Ce relevé sera effectué en se référant à un guide des défauts [AFGC 03].

3.3 Suivi des structures in situ

3.3.1 Intérêt technico-économique du suivi des ouvrages

Ces dernières années, des progrès ont été réalisés dans la compréhension et la modélisation des mécanismes de détérioration des structures en béton soumises à des environnements agressifs vis-à-vis des armatures et dans la modélisation des phénomènes de transport des agents agressifs à travers le béton. De nos jours, les modèles prédictifs permettent d'estimer la durée de vie résiduelle avec un niveau de fiabilité de plus en plus important et contribuent au développement et à l'optimisation de nouvelles stratégies de maintenance, de réparation et

d'investigations des ouvrages en béton armé. On distingue ainsi deux approches différentes pour la maintenance et la réparation des ouvrages : une approche réactive et une approche proactive. Ces deux approches sont représentées sur la figure 3.1 [AFGC 03].

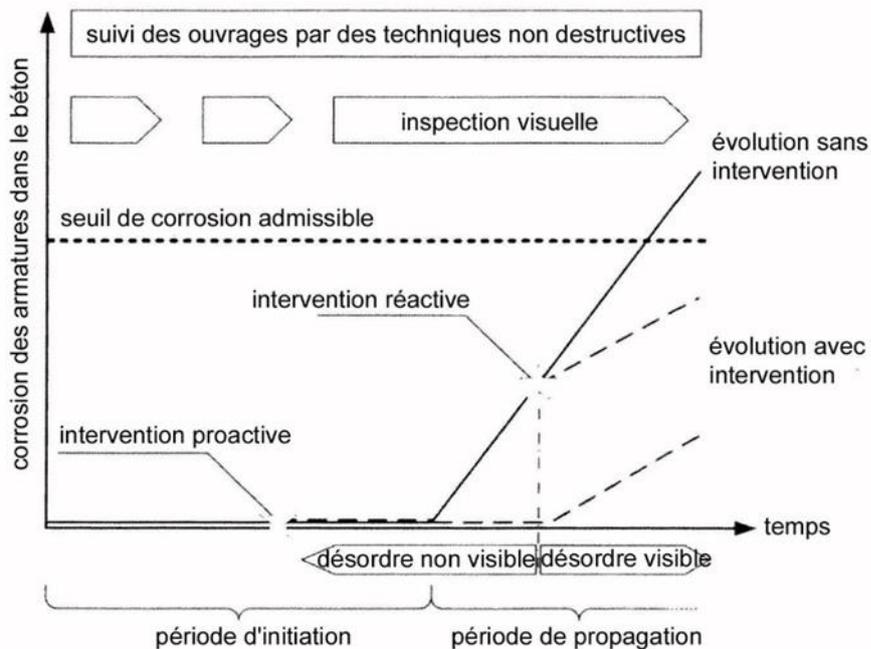


Figure 3.1 : La place des investigations et du suivi des structures dans les méthodes réactives et proactives de contrôle des structures en béton armé [AFGC 03].

Le suivi en continu de l'état de corrosion des armatures d'un ouvrage en béton permet de fournir des informations complètes sur l'évolution du comportement réel de la structure dans le temps. Avant l'apparition d'un désordre pendant la période d'initiation de la corrosion, l'approche proactive permet de prolonger la durée de vie de la structure et d'anticiper les opérations de maintenance et de réparation traditionnellement mises en œuvre lorsque des dommages sont visibles à la surface du béton, c'est-à-dire lorsque la corrosion est déjà à un stade avancé. Les deux approches décrites sont succinctement présentés ci-après :

3.3.1.1 L'approche réactive

Cette approche repose sur le fait que les inspections des ouvrages en béton sont basées sur des observations visuelles. Des investigations complémentaires, plus précises, sont ensuite menées pour déterminer la nature des réparations qui doivent être planifiées. Seulement, dans la plupart des cas, lorsque les désordres deviennent apparents et visibles, les dégradations des structures en béton armé sont en réalité à un stade avancé et entraînent des réparations coûteuses et complexes pour leur réhabilitation.

Les manifestations de ces désordres structuraux peuvent être d'ordre esthétique. Un autre inconvénient dans l'utilisation de cette approche réside dans l'image négative que donne le matériau béton au grand public. Les opérations de réhabilitation peuvent engendrer d'autres désagréments pour les utilisateurs finaux : perturbation du trafic, perte d'exploitation...

3.3.1.2 L'approche proactive

Le recours aux techniques non destructives pour le suivi en continu de l'état des structures en béton armé permet d'alimenter les modèles prédictifs probabilistes par des données recueillies in situ et d'estimer l'évolution de l'état des structures au cours du temps. L'approche proactive permet ainsi aux gestionnaires d'ouvrage d'anticiper les opérations de maintenance et de réparation et de retarder ou d'éliminer les futures opérations de maintenance curative, plus complexes et plus coûteuses. Les interventions « pré-fissuration » ou « pré-dommage apparent » permettent d'augmenter la durée de vie de l'ouvrage et de conserver l'image du béton comme un matériau de construction durable.

D'un point de vue économique, alors que l'approche réactive permet de repousser au maximum les premières opérations de réhabilitation, celles-ci n'en demeurent pas moins coûteuses.

L'approche proactive permet aux gestionnaires d'ouvrage d'anticiper les opérations de maintenance et de réparation en minimisant, à long terme, les coûts engendrés. La figure 4.2 illustre les coûts des deux approches.

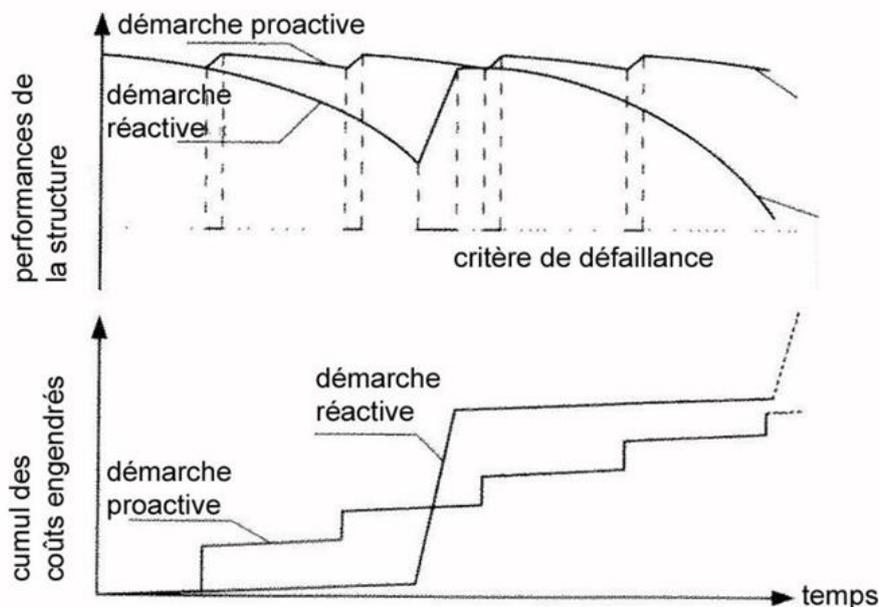


Figure 3.2 : Comparaison des coûts respectivement engendrés par les stratégies réactives et proactives de maintenance des structures en béton [AFGC 03].

Une approche économique à long terme permet de considérer le coût total d'une structure en béton comme étant la somme des coûts engendrés par les différentes phases de la construction (équation 3.1) : dimensionnement (C_{dim}), construction (C_{cons}), coûts engendrés pendant la durée de service de l'ouvrage (C_{dur}), démolition (C_{dem}).

$$C_T = C_{\text{dim}} + C_{\text{cons}} + C_{\text{dur}} + C_{\text{dem}} \quad (3.1)$$

Les coûts engendrés pendant la durée de service de l'ouvrage (équation 3.2) représentent la somme des coûts de maintenance (C_{main}), de suivi et d'investigations (C_{inv}), de réparation (C_{rep}) et ceux consécutifs à la défaillance de l'ouvrage (C_{def}).

$$C_{dur} = C_{main} + C_{inv} + C_{rep} + C_{def} \quad (3.2)$$

Les coûts relatifs aux stratégies réactives et proactives de maintenance des structures en béton armé représentés sur la figure 3.2 diffèrent par le coût des opérations qui ont lieu lors de la durée de service de l'ouvrage (équation 3.2).

Un raisonnement à long terme permet de minimiser les coûts d'entretien C_{main} , les coûts de réparation C_{rep} et de défaillance C_{def} , et donc le coût total d'un ouvrage en béton armé.

Cette analyse technico-économique des différentes stratégies possibles pour le suivi, la maintenance et la réhabilitation de structures en béton armé existantes permet de statuer sur l'intérêt du recours aux techniques non destructives pour l'optimisation de la durée de vie des structures neuves et existantes.

3.3.2 Les différentes méthodes de suivi des structures in situ

De nos jours, le coût des réparations de structure représente la majeure partie des dépenses courantes sur les infrastructures. Le contrôle qualité, la planification des opérations de maintenance et de restauration des structures en béton armé nécessitent le recours à des techniques d'inspections et de suivi des ouvrages non destructives pour détecter encore plus en amont les éventuels problèmes [AFGC 03].

La corrosion des armatures peut conduire à une altération de la capacité portante de la structure. Les principales conséquences résident dans la perte de fonction de la structure en termes d'esthétisme ou de sécurité pour les usagers. Les approches traditionnelles utilisées pour le diagnostic des ouvrages en béton consistent à réaliser des analyses physico-chimiques sur des prélèvements effectués par carottage (évaluation de la profondeur de carbonatation ou profil de teneur en chlorures). Il existe également de nos jours plusieurs techniques non destructives ou partiellement destructives pour évaluer l'état de corrosion des armatures des structures en béton armé, telles que :

- les inspections visuelles ;
- les mesures de potentiel en circuit ouvert ;
- les mesures de potentiel de surface ;
- les mesures de résistivité ;
- les mesures de résistances de polarisation linéaire ;
- les mesures des coefficients de Tafel ;
- la méthode d'impulsions galvanostatiques en régime transitoire ;
- les mesures par spectroscopie d'impédance électrochimique ;
- les analyses d'harmonique ;
- les mesures de bruit de fond électrochimique ;
- les mesures de l'épaisseur d'enrobage ;
- les mesures de vitesse de propagation d'ultrasons ;
- les mesures de radiographie gamma ou rayons x ;
- les mesures par thermographie infrarouge passive ;
- l'utilisation de capteurs de corrosion intégrés.

Quelques techniques électrochimiques sont détaillées ci-après.

3.3.2.1 Les mesures de potentiel d'électrode

Plusieurs techniques électrochimiques permettent le suivi de la corrosion des armatures dans le béton dont les mesures du potentiel de circuit ouvert. Cette technique non destructive consiste à mesurer le potentiel de corrosion de l'acier par rapport à une électrode de référence. Les résultats peuvent se présenter sous la forme d'une cartographie de potentiels, mesurés selon la norme ASTM C876. Il s'agit de la technique électrochimique la plus généralement employée pour diagnostiquer le risque de corrosion des structures en béton armé. La cartographie de potentiel permet de visualiser les zones équipotentielles et de mettre en évidence les gradients. Ces gradients de potentiel peuvent fournir des informations sur la probabilité d'une corrosion active mais ne peuvent pas refléter la vitesse de corrosion.

3.3.2.2 Les mesures de résistivité

La résistivité électrique du béton est considérée comme étant un bon indicateur pour l'évaluation du risque de corrosion. Un béton dont la résistivité électrique est élevée présentera un faible risque de corrosion comparé à un béton dont la résistivité électrique est faible et dans lequel le courant peut aisément circuler entre les surfaces anodiques et cathodiques. L'essai consiste à appliquer un courant connu I entre deux électrodes et à mesurer la chute de potentiel U entre les deux autres électrodes (méthode des quatre points, figure 3.3). La résistance R est calculée selon l'équation (3.3) et la résistivité ρ selon l'équation (4.4).

$$R = \frac{U}{I} \quad (3.3)$$

$$\rho = 2\pi a R \quad (3.4)$$

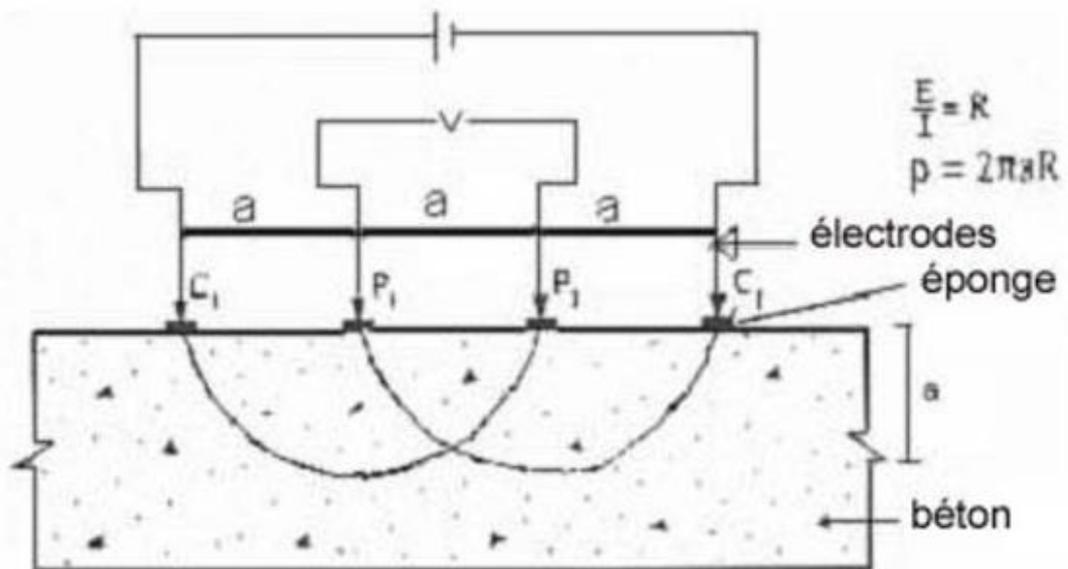


Figure 3.3 : Schéma d'un système de mesure de la résistivité du béton basé composé de 4 électrodes [AFGC 03].

Les mesures de résistivité peuvent également être effectuées en utilisant le réseau d'armatures comme électrodes de travail et une contre-électrode placée à la surface du béton.

3.3.2.3 Capteurs basés sur des mesures électriques

Les capteurs de corrosion basés sur le principe de la mesure du potentiel électrochimique de l'armature se composent d'une électrode de référence incorporée dans le béton d'enrobage. La valeur mesurée fournit des informations sur l'état de corrosion de l'armature située au voisinage du capteur. Il existe plusieurs électrodes de référence utilisées traditionnellement pour la mesure du potentiel de l'armature (tableau 3.1).

Tableau 3.1 : Niveau de risque de corrosion en fonction du potentiel d'armature mesuré par rapport à différentes électrodes de référence et selon la norme ASTM C 876 [AFGC 03].

Cuivre/sulfate de cuivre Cu/CuSO ₄	Argent/Chlorure d'argent Ag/AgCl	Électrode normale à hydrogène	saturé en KCl Électrode au calomel	Probabilité de corrosion des armatures
> - 200 mV	> - 100 mV	+ 120 mV	> - 80 mV	Faible (< 10 % de risque de corrosion)
- 200 à - 350 mV	- 100 à - 250 mV	+120 à - 30 mV	- 80 à - 230 mV	Niveau de risque de corrosion intermédiaire
< - 350 mV	< - 250 mV	- 30 mV	< - 230 mV	Élevée (> 90 % de risque de corrosion)
< - 500 mV	< - 400 mV	< - 180 mV	< - 380 mV	Corrosion sévère

Le choix de l'électrode de référence doit prendre en compte la facilité de mise en place dans le béton frais pour les structures nouvelles et la capacité à résister aux environnements agressifs.

L'électrode de type Ag/AgCl est très souvent utilisée comme électrode de référence interne. Le dioxyde de manganèse (MnO₂) a également été étudié pour son utilisation en tant qu'électrode de référence interne. Les résultats montrent que cette électrode est stable et fiable lorsqu'elle est incorporée dans le béton.

Les mesures de potentiel sont à interpréter avec précaution car plusieurs facteurs peuvent influencer leurs variations : l'humidité, le pH et la concentration en chlorures au voisinage de l'armature.

Dès le début des années 1990, des capteurs basés sur la mesure du courant de corrosion entre une électrode de référence, la cathode, et une électrode de travail, l'anode, sont développés.

Le principe de fonctionnement repose sur l'évolution du courant établi entre deux électrodes (une anode en acier traditionnel et une cathode en acier inoxydable ou en titane activé) en fonction de l'état de corrosion de l'anode. Dans un béton non carbonaté et non pollué par les chlorures, les électrodes sont protégées de la corrosion par un environnement riche en alcalins et une couche de passivation. Le courant de corrosion entre l'anode et la cathode est très faible (de l'ordre de quelques μA). Lorsque la corrosion s'initie, la couche de passivation disparaît : l'anode n'est plus protégée et peut alors s'oxyder, alors que la cathode subit une réduction. Un courant électrique peut être mesuré par un ampèremètre (de résistance infiniment faible) relié

aux deux électrodes. Plusieurs anodes peuvent être incorporées dans le béton à différentes profondeurs (figure 3.4). Ce système permet d'évaluer en continu la propagation du front de corrosion au sein du béton d'enrobage.

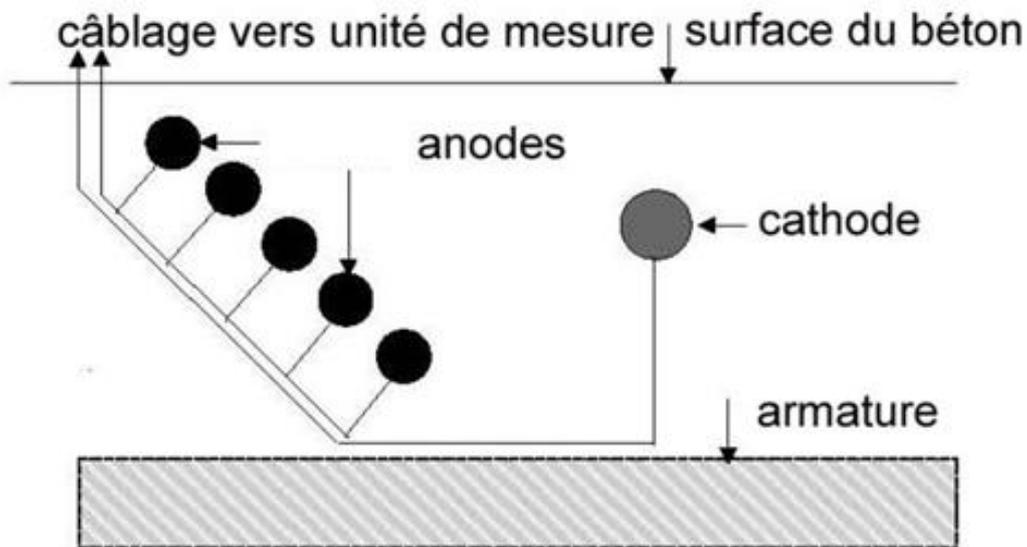


Figure 3.4 : Schéma d'un capteur de corrosion basé sur des mesures de courant de corrosion à différentes profondeurs [AFGC 03].

Ces capteurs peuvent être intégrés dans le béton d'enrobage au moment de la construction de l'ouvrage ou incorporés dans des structures existantes par carottages.

Les capteurs de corrosion basés sur les mesures de résistance de polarisation permettent d'évaluer la vitesse de corrosion des armatures. Il existe également des systèmes de suivi de la corrosion composés de capteurs multiples (figure 3.5).

Ces systèmes complets permettent de mesurer non seulement les paramètres électrochimiques liés à la vitesse de corrosion des armatures, mais également d'autres paramètres environnementaux importants :

- la température est un facteur qui joue un rôle prépondérant sur la vitesse de corrosion ainsi que les processus chimiques et électrochimiques ;
- la concentration en ions chlorure peut être mesurée à l'aide d'une électrode spécifique de type Ag/AgCl et d'une électrode de référence. La valeur de potentiel mesurée peut être convertit en une concentration en ions chlorure à l'aide d'une courbe de calibration. Ce type d'électrode présente toutefois les désavantages d'avoir une durée de vie limitée et de fournir des mesures fortement influencées par la température et le pH ;
- la résistivité électrique permet de fournir des informations sur l'humidité du béton ;
- la disponibilité de l'oxygène au voisinage de l'armature, indispensable pour que la réaction cathodique se produise ;

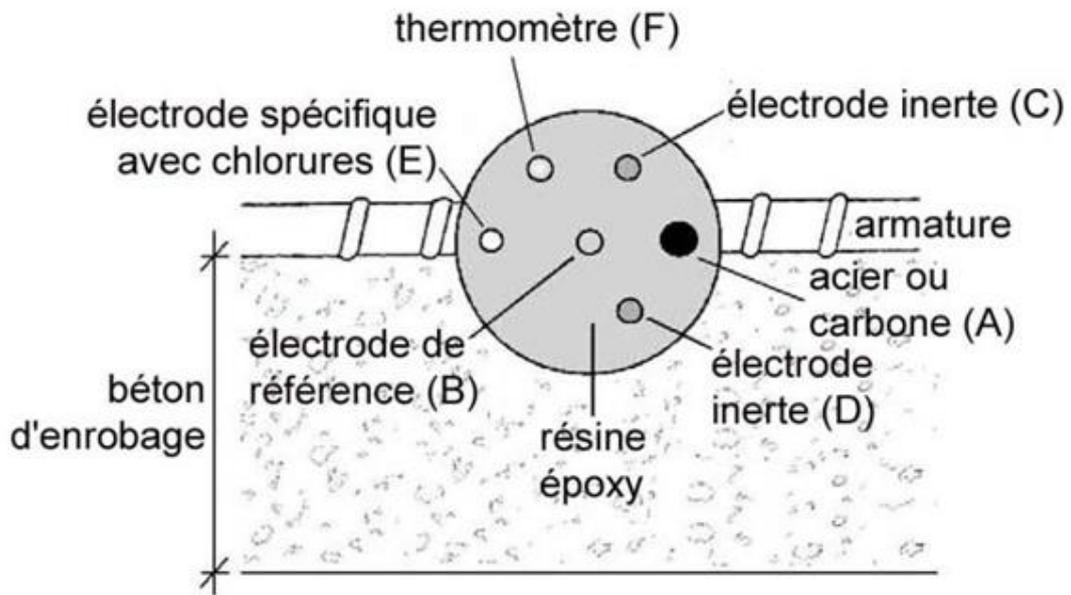


Figure 3.5 : Schéma du capteur multiple de corrosion développé par Duffo [AFGC 03].

Le système de capteurs multiples (figure 3.6) peut être incorporé dans un mortier poreux ($\frac{E}{C} = 0,6$) afin d'assurer un équilibre rapide entre le détecteur et le reste de la structure.

Le système complet peut ensuite être intégré dans des structures existantes ou dans des structures nouvelles (figure 3.7).

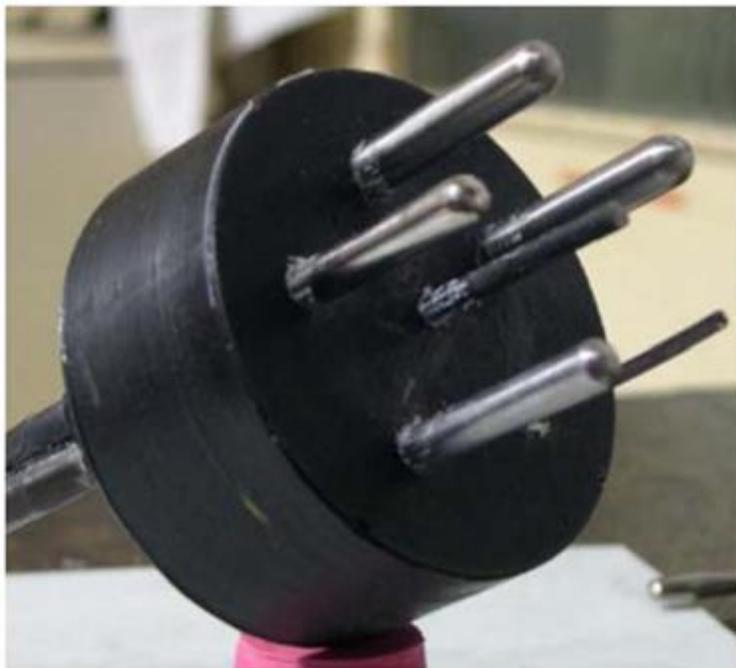


Figure 3.6 : Capteur multiple de corrosion avant d'être incorporé dans un mortier [AFGC 03].



Figure 3.7 : Capteur multiple de corrosion intégré dans une nouvelle structure [AFGC 03].

Ce type de capteurs de corrosion a été introduit dans un mur en béton destiné à l'élimination de déchets radioactifs de niveau intermédiaire (figure 3.7) et dans le déversoir d'un barrage situé au Sud de l'Argentine (structure existante). Les résultats obtenus permettent le suivi du risque de corrosion des armatures et de l'état des structures.

3.3.2.4 Capteurs à fibres optiques

Ces dernières années, de nouveaux capteurs ont fait leur apparition dans le domaine du suivi de l'état des structures : les capteurs à fibres optiques. Ces capteurs présentent les avantages d'être plus petits, plus légers, plus robustes et plus résistants vis-à-vis de la corrosion que leurs homologues électriques. Ils peuvent être utilisés pour mesurer des paramètres de différentes natures :

- physiques : déformations, inclinaison, pression, forces, accélération, vibrations ;
- température ;
- chimiques : humidité, pH, oxygène, concentration en chlorures.

Parmi les capteurs à fibres optiques, les capteurs basés sur la méthode du réseau de Bragg sont utilisés pour mesurer les déformations, l'humidité et l'initiation de la corrosion dans les bétons armés. D'autres capteurs à fibres optiques basés sur les propriétés optiques ou spectroscopiques telles que l'absorbance, la réflectance, la fluorescence et l'indice de réfraction permettent de suivre l'évolution du pH et de la quantité de chlorures dans le béton.

Tous ces capteurs à fibres optiques font l'objet de nombreuses recherches ces dernières années. Les résultats fournis dans la littérature sont très prometteurs, même si des recherches complémentaires sont nécessaires, notamment dans le cas des capteurs à fibres optiques dédiés

à la mesure de la pénétration des chlorures qui présentent les inconvénients d'être non réversibles et d'avoir une durée de vie limitée à pH élevé.

3.3.3 Exemples d'application des systèmes permanents de suivi

Le recours à des systèmes permanents de suivi de l'état des structures est reconnu comme étant un outil pertinent pour la prévention des désordres dus aux phénomènes de corrosion des armatures non seulement pour permettre aux gestionnaires d'ouvrage d'optimiser la planification des opérations de maintenance et de réparation mais également pour alimenter les modèles prédictifs par des données in situ permettant d'estimer le développement de la corrosion et la durée de vie des structures en béton armé. De nos jours, les capteurs de corrosion peuvent être incorporés directement lors de la construction de nouvelle structure (figure 3.7) ou intégrés dans des structures existantes.

En Europe, de nombreux ouvrages sont équipés de systèmes de corrosion permanents. Au Portugal par exemple, le retour d'expérience vis-à-vis des capteurs de corrosion a fait l'objet d'un rapport technique dans le cadre du projet européen DURATINET.

3.3.3.1 Sur des structures nouvelles

En 2000, la piste d'atterrissage de l'aéroport de Funchal sur l'île de Madère a été agrandie en construisant un pont sur la mer de 1020 mètres de long supportée par 180 piliers de 70 m de hauteur (figure 3.8).



Figure 3.8 : L'aéroport de Funchal sur l'île de Madère [AFGC 03].

Le pont a été dimensionné pour supporter les charges induites lors du décollage et de l'atterrissage d'un avion de type Boeing 747 et fait l'objet d'une surveillance particulière. Il a été équipé d'un système de suivi permanent de la corrosion permettant de récolter des informations sur la progression du front de dépassement dans le béton d'enrobage dans 23 zones-clés (figure 3.9).

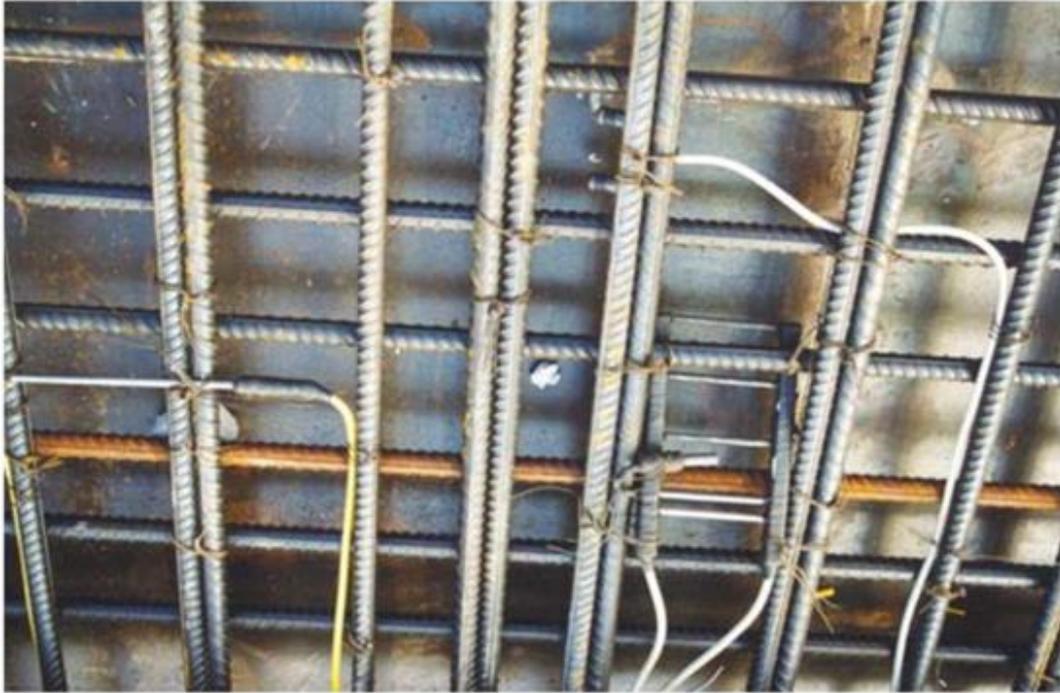


Figure 3.9 : Capteur de corrosion intégré lors de l'extension de la piste d'atterrissage de l'aéroport de Funchal [AFGC 03].

Le capteur installé permet d'acquérir des informations sur l'évolution du courant galvanique, de la résistivité du matériau, la température et le potentiel de corrosion.

De nos jours, l'analyse des résultats ne montre aucun signe de corrosion des armatures dans les zones testées.

3.3.3.2 Sur des structures existantes

Le pont Edgar Cardoso situé à Figueira Da Foz au Portugal a été inauguré en 1982 (figure 3.10). Suite à des investigations détaillées, une opération de réhabilitation générale a été menée entre 2003 et 2005. Les travaux de réparation ont concerné notamment différentes zones soumises à la corrosion des armatures due à la pénétration des chlorures et à la carbonatation du béton d'enrobage dont l'épaisseur était parfois trop faible.



Figure 3.10 : Le pont Edgar Cardoso situé à Figueira Da Foz [AFGC 03].

Vis-à-vis des problèmes de corrosion, les opérations de réhabilitation ont consisté à :

- retirer le béton au voisinage des armatures incriminées ;
- remplacer ou renforcer les armatures corrodées ;
- remplacer le béton d'enrobage ;
- appliquer un inhibiteur de corrosion migrateur et un revêtement de surface.

Pendant cette opération de réhabilitation, des capteurs permanents de corrosion ont été installés dans 33 zones judicieusement identifiées en fonction des conditions d'expositions et de la représentativité des informations collectées par le système (figure 3.11).

Le capteur installé permet d'acquérir des informations sur l'évolution du courant galvanique, de la résistivité du matériau, la température et le potentiel de corrosion.

De nos jours, l'analyse des résultats ne montre aucun signe de redémarrage de la corrosion des armatures dans les zones surveillées.



Figure 3.11 : Instrumentation d'une zone réhabilitée après corrosion [AFGC 03].

3.3.4 Conclusion sur le suivi des structures in situ

Les deux exemples traités dans ce chapitre illustrent parfaitement les conditions d'utilisation des capteurs permanents pour le suivi de la corrosion sur des éléments préfabriqués en béton ou des structures, en construction ou existantes. Leur application est encore trop récente (à peine quelques dizaines d'années pour les plus anciens systèmes installés) et les informations récoltées mettent en évidence qu'il n'y a pas de démarrage de la corrosion dans les zones surveillées [AFGC 03].

Toutefois, l'intérêt technico-économique n'en est pas moins de premier ordre pour :

- aider les gestionnaires d'ouvrage à optimiser la planification des opérations de maintenance et à agir avant toute conséquence d'ordre esthétique ou structurel ;
- acquérir des données collectées in situ pour alimenter les modèles prédictifs permettant d'évaluer les vitesses de corrosion et d'estimer la durée de vie résiduelle d'une structure en béton armé.

Plus généralement, le recours à des solutions proactives de maintenance des structures par utilisation de capteurs (capteurs de corrosion, capteur d'humidité, de pH, de température) présente un intérêt majeur pour les gestionnaires d'ouvrages.

Les opérations de mise en place de capteurs dans le béton peuvent être facilitées en amont, lors de la phase de fabrication du béton en usine (facilité de mise en œuvre, plus grande maîtrise du positionnement des capteurs d'humidité ou de température).

3.4 Analyses et essais de laboratoire

3.4.1 Méthodes de prélèvements

Des prélèvements sont effectués, si nécessaire, dans des zones représentatives des états de dégradation, par carottage ou forage.

Le forage est utilisé, par exemple, pour estimer la pénétration des chlorures. Dans ce cas, il concerne des profondeurs successives, de l'ordre du centimètre [AFGC 03].



Figure 3.12 : Prélèvements par carottage [AFGC 03].

3.4.2 Caractérisation chimique

Les caractéristiques chimiques du béton d'enrobage sont déterminées sur les prélèvements [AFGC 03] :

- analyse chimique globale : elle comprend l'analyse de la fraction soluble, du résidu insoluble. Elle a pour objet de déterminer les caractéristiques du béton, dont le dosage en ciment, l'absence d'anomalie,
- dosage des chlorures totaux et des chlorures libres (solubles dans l'eau).. Les teneurs en chlorures s'expriment par rapport au béton ou par rapport au dosage en ciment. Ce dernier peut

être connu, ou évalué en laboratoire à partir de la mesure de la silice soluble du ciment préalablement identifié (dans le dossier chantier ou par examen microscopique). L'interprétation des résultats doit tenir compte non seulement des valeurs absolues mesurées, mais aussi de l'allure des profils de concentration,

- dosage des sulfates,
- autres déterminations particulières (par exemple, les sulfures).

3.4.3 Caractérisation minéralogique

Les caractéristiques minéralogiques du béton sont déterminées par [AFGC 03] :

- microscopie optique (lumière transmise ou réfléchie) pour la détermination de la nature du ciment, microscopie électronique MEB avec microanalyse élémentaire,
- diffraction des rayons X pour la recherche et la caractérisation des phases cristallines.

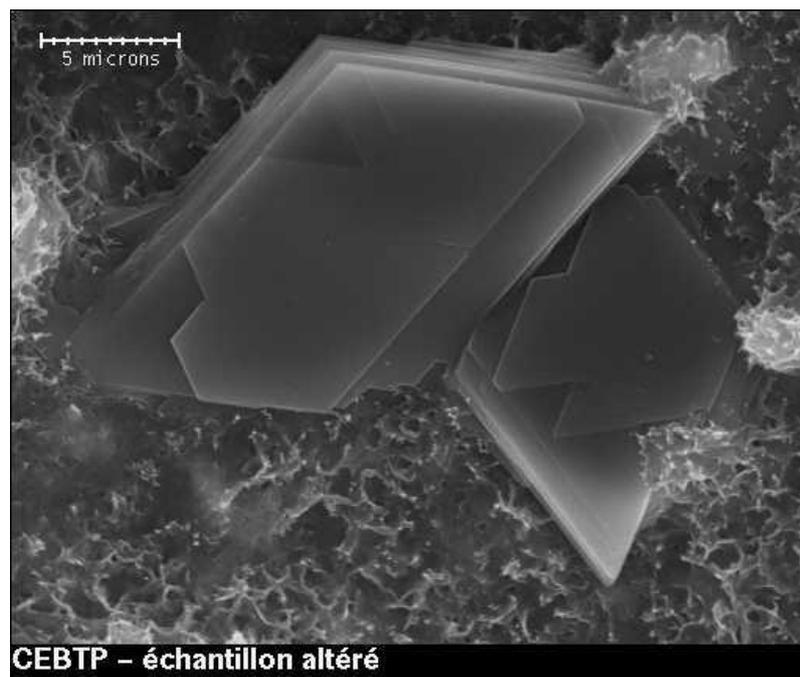


Figure 3.13 : Cristal de chloroaluminate [AFGC 03].

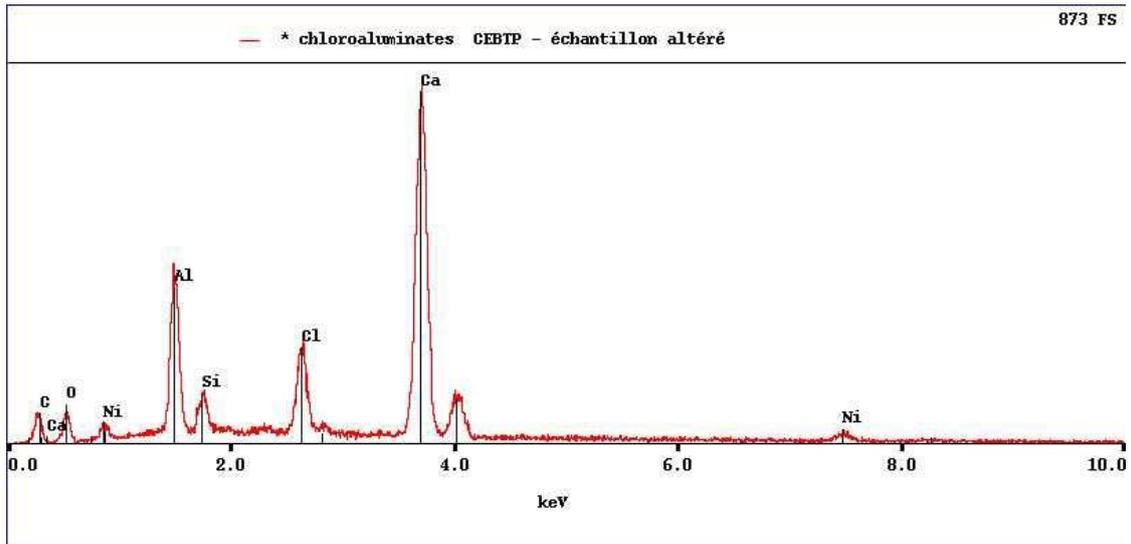


Figure 3.14 : Spectre EDS associé [AFGC 03].

3.4.4 Caractérisation physique

Les caractéristiques physiques du béton d'enrobage sont surtout liées à leur résistance à la pénétration (transfert) des fluides [AFGC 03] :

- porosité à l'eau (éventuellement au mercure),
- perméabilité,
- diffusivité des corps tels que les chlorures,
- absorption capillaire,
- résistances mécaniques et éventuellement d'autres caractéristiques.

Note : Le béton peut également être affecté par d'autres pathologies telles que l'alcali- réaction, les réactions sulfatiques, ou le gel. En cas de doute, des investigations supplémentaires sont nécessaires pour identifier l'origine de la pathologie.

3.5 Rapport de diagnostic

Le rapport de diagnostic présente l'ensemble des résultats et leur interprétation, mais doit être compréhensible par un non initié [AFGC 03].

Il comprend :

- l'identification de la structure, le nom du demandeur,
- l'identification du laboratoire (ou de l'ingénieur) chargé de l'étude, la date,
- une brève description de la structure,
- le rappel des objectifs de l'étude,
- la liste des documents consultés,
- les résultats de l'inspection détaillée,
- les résultats des essais in situ et de laboratoire,
- une discussion sur l'origine des désordres, leur étendue, leur évolution probable, et leur incidence sur la sécurité,
- des conclusions claires sur les désordres constatés et des propositions éventuelles de complément d'étude,
- une liste des priorités des réparations et travaux à effectuer,
- des recommandations relatives aux méthodes de réparation les plus adaptées.

CHAPITRE 4

REPARATION DES OUVRAGES EN BETON ARME

Le domaine de la réparation et de la réhabilitation des ouvrages en béton armé est en pleine évolution. En effet, la plupart des ouvrages en béton armé, en particulier les structures marines.

La corrosion des armatures occupe le premier rang des dégradations causant ainsi des désordres dans le béton jusqu'à la ruine partielle de l'ouvrage. Le coût engendré par ces réparations représente de grands enjeux économiques pour les maitres d'ouvrages qui doivent trouver des solutions et des méthodes adéquates de réparation. Devant l'augmentation de l'ampleur des travaux de réparation et de maintenance des ouvrages en béton armé dégradés.

4.1 Les méthodes électrochimiques

Le principe de ces méthodes consiste à appliquer un courant électrique entre une anode placée sur la surface du béton et l'acier à protéger (cathode).

Trois techniques existent : la protection cathodique (qui contrôle le courant électrochimique de corrosion), la réalcalinisation et la déchloruration (qui modifient l'environnement autour de l'armature) [PED 96, BER 02].

4.1.1 La protection cathodique

Comme expliqué précédemment, la corrosion est un processus électrochimique qui implique la création d'une pile électrochimique au niveau de l'armature. Cette pile est constituée d'une anode, une cathode et un milieu électrolytique. Le principe de la protection cathodique est de relier une anode externe au métal à protéger et de faire passer un courant électrique continu de manière que tous les secteurs de la surface en métal deviennent cathodiques et donc ne se corrodent pas. L'anode externe peut être une anode galvanique sacrificielle, où le courant est un résultat de la différence de potentiel entre les deux métaux, ou une anode inerte, avec un système de courant imposé utilisant une alimentation de courant continu. L'anode est placée de façon permanente sur le parement ou parfois dans l'enrobage [PED 96, BER 02].

D'un point de vue potentiel électrochimique, elle consiste à abaisser le potentiel de l'armature jusqu'à une valeur seuil appelée potentiel de protection afin que la vitesse de corrosion de l'acier devienne négligeable [PAR 08]. Le principe de la protection galvanique est de créer une pile électrique entre deux métaux de noblesse différente, le premier est le métal à protéger et le deuxième est l'anode réactive ou sacrificielle. Si ces deux métaux sont raccordés l'un à l'autre par un circuit électrique, le métal le moins noble (l'anode) sera sacrifié au bénéfice de la cathode. Dans la technique de protection cathodique par courant imposé, des anodes inertes (de dissolution nulle ou basse) sont reliées à la surface de l'armature (cathode) par une source extérieure d'alimentation.



Figure 4.1 : une protection cathodique [CONS].

4.1.2 Extraction électrochimique des ions chlorures

Cette technique est temporaire (6 à 8 semaines d'application), elle consiste à faire passer un courant électrique continu entre une anode placée sur la surface du béton enrobée d'une pâte saturée d'un liquide convenablement choisi (électrolyte) et l'acier (cathode). Ce courant provoque le déplacement des ions chlorures chargés négativement vers l'anode extérieur.

Lorsque les ions chlorures arrivent à la surface du béton, ils passent dans l'électrolyte et peuvent donc être extraits définitivement du béton [MAR 99, ORE 04].



Figure 4.2 : une extraction électrochimique des ions chlorures (réalcalinisation) [CEFRACOR].

4.2 Les méthodes non électrochimiques

4.2.1 Application de revêtements

4.2.1.1 Revêtements pour le génie civil

La mise en peinture des ouvrages de génie civil en béton armé, en général, pour principaux objectifs [AFGC 03] :

- d'améliorer l'esthétique de l'ouvrage, par la mise en couleur ou la création de motifs décoratifs, en vue de lui donner un aspect particulier, ou d'homogénéiser, lorsque nécessaire, la teinte de ses parements,
- d'augmenter le confort et la sécurité des usagers, tout en facilitant le nettoyage (exemple : revêtement des tunnels),
- de participer à la sécurité de l'ouvrage (exemple : balisage des pylônes),
- de contribuer à la protection du béton : la mise en place d'un système de peinture en couche mince, dans la mesure où il apporte une amélioration de l'imperméabilité du support peut permettre de ralentir la pénétration de l'humidité extérieure et d'améliorer ainsi la durabilité du béton.

Ainsi les ouvrages concernés sont essentiellement les tunnels, les murs de soutènement, les écrans antibruit et dans certains cas les ponts.

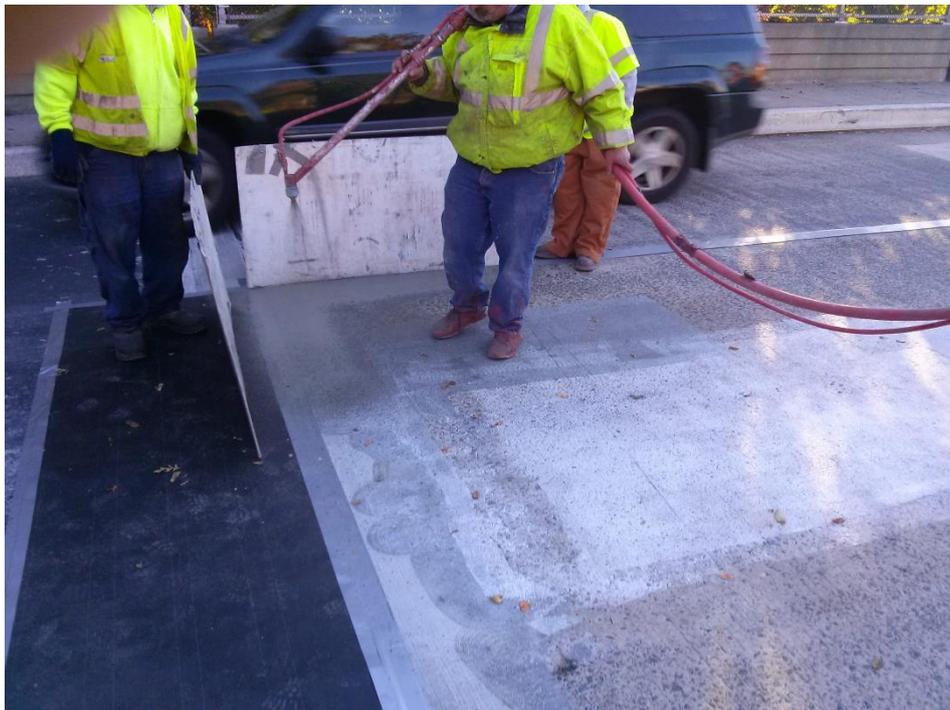


Figure 4.3 : Application de la finition [CONS]

Il existe une procédure de qualification concernant les systèmes de peinture pour béton de génie civil. Elle porte sur des critères d'adhérence, d'aspect et plus généralement sur des considérations d'ordre esthétique, et non pas sur des critères visant à apprécier la capacité effective des systèmes testés à remplir une fonction de protection. L'ensemble de cette procédure est décrit dans le guide " Mise en peinture des bétons de génie civil " (LCPC, Juin 1999) qui apporte aussi toutes les informations utiles sur la mise en œuvre des systèmes de peinture et le contrôle de la qualité de leur application.

Lorsque c'est principalement une fonction de protection qui est recherchée (protection contre la pénétration des chlorures, protection contre la pénétration du gaz carbonique laquelle entraîne une carbonatation progressive de la peau du béton, etc.) d'autres types de revêtements peuvent être envisagés. Ils seront désignés ci-après par revêtements minces. Il convient de préciser toutefois qu'il n'existe actuellement aucun référentiel technique permettant de qualifier ces produits et d'orienter le choix d'un produit en fonction du problème. La mise au point d'un tel référentiel est en cours, ainsi que la rédaction d'un guide sur la protection des bétons armés par application de produits à la surface du béton.

4.2.1.2 Les peintures

La " mise en peinture " désigne la protection par système de peintures ou lasure dans des épaisseurs sèches comprises entre 20 et 600 μm .

Les systèmes de peinture s'appliquent dans des quantités humides totales allant de 300 à 1500 g/m^2 , selon la densité et l'extrait sec, les lasures dans des quantités restant inférieures à 300 g/m^2 , mais pouvant varier selon l'absorption du support [AFGC 03].

Un système de peinture est constitué d'une succession de couches, qui ont chacune un rôle spécifique, en vue d'obtenir un revêtement final présentant les caractéristiques escomptées.

Une peinture est constituée :

- **d'un liant (aussi appelé résine ou polymère)** : la nature chimique du liant permet de désigner la peinture ; il s'agit, par exemple, de peinture époxydique, polyuréthane, vinylique, acrylique ou hydraulique modifiée par des résines,
- **de matières de charge** : elles confèrent à la peinture des caractéristiques physiques particulières (rhéologie, aspect, ...),
- **de pigments** : ils apportent la couleur, l'opacité, ...
- **d'additifs** : il peut s'agir d'agents mouillants, thixotropes, fongicides, ...
- **d'un véhicule** : eau (peinture dite en phase aqueuse), ou solvant (peinture en phase solvant). Il existe aussi des peintures avec très peu, voire sans véhicule. Le plus souvent un système type de peinture comporte 3 couches :
 - la couche primaire qui assure l'adhérence du système sur le support,
 - la couche intermédiaire qui assure la compatibilité entre la couche primaire et la couche de finition et donne au système une épaisseur suffisante,
 - la couche de finition qui apporte la fonction esthétique et assure la résistance du système aux agressions extérieures.

La performance d'un système de peinture dépend de l'épaisseur de chaque couche et du respect de ces épaisseurs.

Il est à signaler que l'évolution de la réglementation en matière de protection de

l'environnement favorise actuellement le développement des peintures en phase aqueuse. Les peintures peuvent être mono ou bi-composants ; dans ce dernier cas, la peinture est obtenue à partir d'un mélange base - durcisseur ou ciment et latex.

a- Les lasures

Les lasures sont utilisées pour conserver ou mettre en valeur la texture superficielle d'un parement en béton. Elles sont incolores ou colorées et contrairement à une peinture, elles ne sont pas opacifiantes [AFGC 03].

Une lasure est composée :

- de liant (généralement de type acrylique ou polyuréthane),
- d'un véhicule (eau, solvant),
- de pigments ou colorants,
- éventuellement de matières de charge.

Une lasure est généralement appliquée en deux couches, la première étant diluée.

b- Les revêtements minces

Les revêtements minces peuvent être :

- des revêtements plastiques épais contenant généralement des charges grossières et à base de résines acryliques ou polyuréthanes,
- des revêtements d'imperméabilité à base de résine acrylique,
- des revêtements divers à base de polyuréthane ou LMH.

Selon leur nature, ces produits sont appliqués à l'aide de spatules ou de machines spéciales.

4.2.1.3 Procédure d'application - acteurs de la mise en œuvre et matériel

a- Procédure

Différentes conditions doivent être nécessairement réunies pour obtenir un bon accrochage des produits et une durabilité suffisante des revêtements :

- qualité de préparation des supports,
- choix de la nature du revêtement et de ses composants,
- application réalisée dans de bonnes conditions,
- épaisseur sèche globale déposée et régularité,
- âge du support béton (2 mois minimum).

b- Matériels

Les matériels utilisés pour la préparation du support doivent être identiques à ceux utilisés lors de l'épreuve de convenance. Selon l'état et le type du support, et en fonction du but final recherché, les modes de préparation du support sont multiples :

- brossage, dépoussiérage,
- ponçage,
- lessivage,

- projection d'abrasifs : la récupération et le traitement de l'abrasif avant mise en décharge doivent être prévus,
- projection d'eau sous pression : le respect de la valeur de pression retenue pour les essais de convenance est fondamental.

Les matériels utilisés pour l'application des produits sont conformes à ceux de l'épreuve de convenance et aux éléments indiqués dans les fiches techniques produits. Ces fiches techniques précisent le cas échéant pour chaque moyen d'application possible, un taux de dilution et une quantité de produit déposable. Pour les applications au pistolet, une attention particulière est portée aux buses de projection.

4.2.1.4 Processus d'exécution et contrôles

a- Essai préalable

Dans le cas particulier d'un béton avec des défauts de surface apparents et pour lequel l'application d'un système de peinture risque de ne pas être suffisante pour masquer l'ensemble des défauts, un essai préalable doit être réalisé avant la rédaction de l'appel d'offres. Cet essai préalable permet de vérifier, avant le lancement du dossier de consultation, que le choix technique envisagé répond bien aux résultats attendus.

b- Mise en œuvre

La mise en œuvre d'un revêtement s'effectue selon un processus d'exécution auquel sont attachées différentes étapes de contrôle. Il s'agit des étapes suivantes :

1) les opérations préalables au chantier

Avant le démarrage des travaux doit être organisée une réunion regroupant l'ensemble des acteurs concernés, à savoir : le maître d'œuvre, le chef de chantier, le contrôle externe de l'entreprise et l'agent de l'organisme chargé des contrôles extérieurs.

Cette réunion a pour principaux objectifs :

- d'examiner en commun la consistance des travaux, leur mode d'exécution et les contrôles prévus,
- d'examiner les solutions aux difficultés particulières (zones à ragréer, zones difficiles d'accès, etc.),
- d'organiser l'épreuve de convenance,
- de définir le programme des travaux liés en particulier au déplacement de l'échafaudage et aux conditions d'application et de séchage des couches ainsi que le programme des contrôles.

2) l'épreuve de convenance

L'épreuve de convenance, à ne pas confondre avec l'essai préalable, et que dans les conditions du chantier, sur une surface représentative de l'ouvrage les modalités retenues répondent bien aux objectifs. Réalisée avec les moyens, le personnel et les produits du chantier, elle porte à la fois sur la préparation du support et sur l'application. Elle permet de vérifier que les moyens de l'entreprise sont bien adaptés pour réaliser le travail prévu et de juger de l'aspect du revêtement appliqué sur le béton de l'ouvrage.

3) le contrôle de la préparation du support

Il porte sur :

- la liste des produits utilisés (les abrasifs par exemple),
- la conformité du matériel,
- la réception des surfaces,
- l'adéquation du revêtement à la fonction exigée,
- la cohésion superficielle du support (supérieure ou égale à 0,5 MPa),
- la conformité de l'abrasif.

4) le contrôle des produits

Les principaux points à vérifier concernent :

- L'identité des produits utilisés sur le chantier, il s'agit de vérifier par échantillonnage la conformité des produits. Ces tests sont basés sur les Caractéristiques d'Identification Rapide du produit.
- l'étiquetage des récipients qui doit comporter le nom du produit, le numéro de lot de fabrication, la dénomination base ou durcisseur, le poids, la date limite d'utilisation, l'étiquetage de sécurité, etc.,
- les conditions de stockage (température et hygrométrie convenables),
- le suivi des quantités livrées.

5) les contrôles justes avant l'application

Il y a lieu, avant de procéder à l'application, de vérifier :

- l'humidité du béton,
- la température et l'hygrométrie de l'air (adéquation de tous ces critères par rapport aux produits à appliquer),
- la température du support (elle doit être de 3°C supérieure au point de rosée).

En ce qui concerne les produits, le contrôle avant application porte sur :

- l'identification et l'étiquetage des produits,
- les proportions et mélanges des constituants,
- la nature et la quantité de diluant utilisé,
- l'homogénéisation,
- le respect du temps de malaxage, de mûrissement et de la durée pratique d'utilisation du mélange.

Il faut également vérifier :

- la conformité des techniques et matériels utilisés aux solutions retenues,
- pour les nouvelles couches, le respect des phases de séchage minimal et délais de recouvrements entre couches.

6) les contrôles lors de l'application

Ces contrôles consistent essentiellement à mesurer les consommations de produit pour chaque couche du système. Ces mesures peuvent être réalisées :

- Par pesée de la quantité de produit en pot avant et après son application sur une surface connue et délimitée de l'ouvrage,

- par comptage des récipients qui contiennent le produit et qui sont préalablement marqués et utilisés pour une surface définie de l'ouvrage,
- par mesure de l'épaisseur humide.

4.2.1.5 Domaines d'application et limites d'emploi

Dans le cas d'une recherche de l'amélioration sur le plan esthétique, l'aspect du support béton avant revêtement est essentiel pour la qualité du résultat final : un revêtement de 20 à 600 µm ne peut pas masquer toutes les imperfections de surface.

Un revêtement par peinture permet de masquer des différences de couleur, voire de texture, dans la mesure où les défauts restent limités.

Si les défauts sont plus importants (bullage, nids de cailloux ou éclats), il faut préalablement utiliser des produits de réparation de surface qui permettent de faire disparaître ces irrégularités, la peinture étant ensuite destinée à ré-uniformiser la teinte de l'ensemble du parement.

4.2.1.6 Essais de réception

Les contrôles de réception portent sur :

- **l'épaisseur du film sec** : elle peut être évaluée à partir de l'épaisseur humide mesurée lors des applications et de la valeur de l'extrait sec de la peinture ; elle peut être également mesurée à l'aide d'un microscope ou par examen à la loupe micrométrique sur un carottage en surface,
- **l'aspect** : il s'agit de détecter des défauts tels que coulures importantes, surépaisseurs, faiencage, cloquages,
- **l'adhérence** : le contrôle de l'adhérence sur chantier est réalisé par un essai d'arrachement conforme; cet essai est délicat, et doit être répété en un nombre suffisant de points représentatifs,
- **la couleur** : le contrôle de la couleur s'effectue selon les normes ; les caractéristiques colorimétriques mesurées à la réception servent à vérifier ultérieurement que leur variation éventuelle dans le temps reste conforme aux exigences du marché.

4.2.1.7 Durée et efficacité du procédé

La mise en peinture réalisée selon les règles de l'art, permet d'obtenir, pour la plupart des ouvrages (ponts, tunnels), des durabilités de revêtement de l'ordre de 15 ans. Cette durabilité est variable selon les épaisseurs sèches du revêtement, la nature des peintures (mono ou bi-composante) et leur aptitude ou non à être lessivées (cas des tunnels).

Il convient de distinguer divers types de garantie :

- celle relative aux fonctions principales attendues en termes de protection du béton,
- celle relative au décollement ou au cloquage du revêtement,
- celle relative à la couleur,
- celle relative à la fissuration, si cette caractéristique est spécifiée. L'attention est attirée sur le fait que dans la pratique, cette dernière exigence complémentaire ne peut généralement être satisfaite que par des systèmes dont l'épaisseur est supérieure à 600 µm.

Le tableau ci-dessous précise les durées de garantie contractuelles à mentionner dans le marché, pour les différentes fonctions visées, selon la gamme d'épaisseur du revêtement :

Tableau 4.1: Les durées de garantie contractuelles à mentionner dans le marché, pour les différentes fonctions visées [AFGC 03].

Epaisseur du film sec	Fonction(s) principale(s)	Décollement, cloquage	Fissuration	Uniformité et constance de la couleur
50 µm à 300 µm	2 ans	2 ans	-	2 ans
300 µm à 3 mm	10 ans	10 ans	10 ans	2 ans

4.2.2 Inhibiteurs de corrosion

La norme ISO 8044 (1999) définit un inhibiteur de corrosion comme étant une « substance chimique ajoutée au système de corrosion à une concentration choisie pour son efficacité, et qui entraîne une diminution de la vitesse de corrosion sans modifier de manière significative la concentration d'aucun agent corrosif contenu dans le milieu agressif ». Cette définition exclut donc les autres méthodes de protection des armatures telles que la protection par application d'un revêtement, d'un produit régulant ou diminuant la porosité du béton ou d'un matériau qui modifierait la concentration de chlorures ou d'oxygène dans le matériau.

Dans de nombreux domaines, les inhibiteurs de corrosion sont un moyen efficace de lutter contre la corrosion des métaux et alliages. Leur application pour le béton armé ne fait pourtant pas l'objet d'un contexte normatif et réglementaire bien défini [AFGC 03].

Ses fonctions essentielles sont les suivantes :

- de pénétrer une couche de béton très hétérogène par nature (variations de compacité notamment),
- d'abaisser la vitesse de corrosion du métal, sans en affecter ses propriétés (ni celles du milieu environnant),
- d'être stable dans le milieu considéré et compatible avec celui-ci, à la température d'utilisation,
- d'être efficace à la concentration recommandée,
- de ne pas être toxique.

Par ailleurs, la teneur en inhibiteur doit être réglée, en tenant compte de divers paramètres tels que les facteurs géométriques ou la forme des matériaux, leur état de surface, etc.

La corrosion étant un processus électrochimique, l'action de l'inhibiteur se fait au niveau de l'une des réactions élémentaires du mécanisme de cette corrosion, et plus particulièrement au voisinage immédiat de la surface : transport des espèces réactives, formation d'intermédiaire, adsorption, etc.

Le mécanisme d'action d'un inhibiteur peut être divers. L'inhibiteur recouvre (adsorption) la surface du métal, et réduit les surfaces de réactions élémentaires. Il peut former également des composés avec le métal et le liquide environnant et modifier les réactions d'interface. Dans les deux cas, la vitesse de corrosion peut être ralentie, voire annulée.

Les inhibiteurs de corrosion peuvent être classés selon leur nature chimique (minérale ou organique) et selon leur mode d'action. Ils peuvent être :

- minéraux ;
- organiques ;

a- Les inhibiteurs minéraux anodiques

Ces inhibiteurs peuvent réagir avec les produits de corrosion pour former un complexe insoluble qui précipite à la surface du métal. Un apport d'énergie supplémentaire est nécessaire pour que la réaction anodique (oxydation du métal) se produise. Le potentiel de corrosion est augmenté vers des valeurs plus élevées.

Il existe deux catégories d'inhibiteurs passivants :

- Les ions oxydants qui peuvent passiver l'acier en l'absence d'oxygène ;
- Les ions non oxydants qui peuvent passiver l'acier par libération d'ions hydroxydes OH et donc augmentation du pH de la solution interstitielle au voisinage de l'acier ;

b- Les inhibiteurs minéraux cathodiques

Les inhibiteurs minéraux cathodiques réduisent la vitesse de corrosion en agissant également sur le potentiel de corrosion de l'acier, mais jouent notamment un rôle sur les réactions qui font intervenir l'oxygène. Leur mode d'action se fait par précipitation, à la surface de la cathode, d'un sel ou d'un composé à base d'ions hydroxydes OH issus de la réaction cathodique. Il est admis que les inhibiteurs minéraux cathodiques, bien que ne présentant pas de risque de corrosion par piqûre en cas de sous-dosage, sont moins efficaces que les inhibiteurs. Qu'ils soient anodiques ou cathodiques, le principal inconvénient des inhibiteurs inorganiques de corrosion se trouve dans leur toxicité vis-à-vis de l'environnement.

c- Les inhibiteurs organiques

Souvent issus des produits dérivés de l'industrie pétrolière, les inhibiteurs organiques sont des composés qui contiennent un noyau actif, tel que le potassium K, le soufre S, l'azote N et l'oxygène O capables d'échanger des électrons avec le métal.

Ces inhibiteurs sont dits mixtes car ils peuvent agir à la fois sur les surfaces anodiques et sur les zones cathodiques. Leur mode d'action résulte de l'adsorption de leurs molécules sur la

surface du métal et de la formation d'un film protecteur insoluble et adhérent dont l'épaisseur peut atteindre quelques dizaines de nanomètres. Ce type d'inhibiteurs peut se trouver sous différentes formes :

- les composés azotés tels que les amines, les pyridines et les sels dérivés de bases comme l'ammoniaque ;
- les composés soufrés.

Le principal inconvénient des inhibiteurs organiques réside dans leur mode d'action : leur capacité à s'adsorber pourrait les faire réagir avec n'importe quelle surface. Les granulats, par exemple, pourraient piéger les molécules de l'inhibiteur avant qu'elles n'atteignent la surface de l'acier.

4.2.2.1 Pénétrabilité

Des études sur des corps d'épreuve fabriqués en laboratoire ont montré que le nitrite de calcium, appliqué à la surface du béton non carbonaté mais pollué par des chlorures, pénètre au-delà d'une profondeur de 10 mm (environ huit fois plus profondément qu'il ne le ferait in situ ou en laboratoire dans un béton carbonaté). D'autres auteurs ont trouvé des profondeurs de pénétration jusqu'à 50 mm.

4.2.2.2 Influence sur les propriétés du béton

L'influence des inhibiteurs de corrosion sur les propriétés du béton fait l'objet de nombreuses études dont les résultats sont souvent contradictoires.

En général, les inhibiteurs introduits au moment du malaxage peuvent entraîner un retard de début de prise.

Il a été reporté dans la littérature que l'utilisation de nitrite de calcium dans le béton frais pouvait augmenter la formation de cristaux de portlandite et surtout d'ettringite. Contrairement à l'ettringite formée au moment du gâchage, ou début de l'hydratation, l'ettringite différée possède des propriétés expansives.

Peu de résultats de la littérature rapportent des effets néfastes vis-à-vis des propriétés du matériau lorsque les produits sont appliqués à la surface d'un béton âgé.

4.2.2.3 Mesure de l'efficacité

La mesure de l'efficacité des inhibiteurs de corrosion passe par l'utilisation de techniques électrochimiques dont on sait qu'elles sont délicates à interpréter lorsqu'il s'agit de mesures sur site car beaucoup de paramètres peuvent influencer les résultats (température, saturation du béton...).

4.2.2.4 Toxicité

Le choix de l'utilisation d'un inhibiteur de corrosion doit prendre en compte les contraintes d'hygiène et de sécurité ainsi que l'impact de l'utilisation du produit envisagé sur l'environnement.

Le nitrite de calcium dissout dans l'eau forme par exemple des ions nitrites NO_2^- considérés comme très toxiques. C'est la raison pour laquelle l'utilisation du nitrite de calcium en tant qu'inhibiteur de corrosion sur des structures enterrées ou sur des réservoirs en béton armé est interdite en Allemagne.

Les inhibiteurs à base de composés aminés sont considérés comme des produits irritants. Ils ne doivent pas contaminer l'eau, ni la terre.

4.2.2.5 Quelques produits sur le marché

Le tableau 4.2 présente une liste non exhaustive de produits disponibles sur le marché et vendus en tant qu'inhibiteur de corrosion :

Tableau 4.2 : Exemples de produits disponibles sur le marché [AFGC 03]

Nom commercial	Société	Composition (donnée sur la fiche technique)
MFP	MFP SA	Monofluorophosphate de sodium
Ferrogard 903+	SIKA	Amino-alcool et sels d' amino-alcool
Lanko Steel 961	PAREX LANKO	Base phosphatée
Protectosil CIT	BASF	Silanes + amino-alcool

Ces produits sont principalement à base de molécules organiques de type amino-alcool, ou à base de molécules minérales à base de phosphate.

4.2.3 La réparation par mortiers

La réparation par mortier est l'une des méthodes les plus utilisées pour des structures affectées par la corrosion. C'est une méthode de reconstitution de l'enrobage dégradé et pollué par les chlorures. Elle est utilisée pour restaurer la passivation des armatures touchées par la corrosion.

D'un point de vue électrochimique, une réparation par mortier est conçue pour supprimer la réaction anodique qui existait avant la réparation et l'empêcher de se reproduire [QIA 06].

Elle peut être utilisée pour réparer les désordres dus à la corrosion à divers stades de leur évolution (depuis l'amorçage de la corrosion jusqu'à la corrosion des armatures) [STR 08].

Cette technique passe par trois phases de réparation qui sont la préparation du support, la protection des armatures et la mise en œuvre du mortier de réparation.

Avant de procéder à un ragréage, il est nécessaire de préparer les surfaces à traiter afin de créer un support sain, propre, rugueux, pour qu'il y ait une bonne adhérence au niveau de la surface de reprise.

Les techniques les plus courantes sont l'hydro démolition et le décapage au marteau pneumatique. Lors de cette phase le béton dégradé ou pollué est retiré sur toute la surface, les armatures sont débarrassées de toute trace de corrosion manuellement (décapage et brossage) ou mécaniquement (sablage hydro sablage, etc.) et, en dernier lieu, les surfaces du béton sont nettoyées par soufflage ou aspiration afin d'éliminer toutes traces de poussières polluées.

La protection des armatures consiste à appliquer sur toute la surface de celles qui sont entièrement dégagées (périphérie complète), un produit assurant une protection vis-à-vis de la corrosion tel que les oxydes de zinc ou les époxydes zinc. Les armatures très corrodées doivent être remplacées. Ce remplacement se fait par scellement ou soudure afin de restituer la section initiale en tenant compte des longueurs d'ancrage, de recouvrement et des armatures de couture. Dans le cas de soudures, celles-ci devront être effectuées selon les normes en vigueur après que la soudabilité de l'acier ait été vérifiée.

L'enrobage des armatures est reconstitué de façon à retrouver la géométrie de la structure.

Une couche complémentaire de protection peut être appliquée sur le mortier pour avoir une forte imperméabilisation. Pour améliorer l'adhérence entre l'ancien béton et le nouveau béton, une couche d'accrochage peut être mise en œuvre.

Une attention particulière devra être apportée aux points suivants :

- L'apport de matériaux en surépaisseur peut modifier la section des éléments de la structure. Il est donc nécessaire de prendre en compte les charges qui en résultent ;
- l'enlèvement du béton dégradé ou pollué risque d'affaiblir ou de déséquilibrer la structure. L'entreprise doit mettre en œuvre un phasage précis. Le recours à un étaielement peut s'avérer nécessaire ;
- des remplacements d'armatures seront à envisager, selon des critères décision (diamètre résiduel, longueur), décrits plus loin. L'objectif sera de rétablir la section d'origine.

4.2.3.1 Elimination des zones dégradées

Avant de réparer les zones dégradées (armatures apparentes, éclatements de béton, traces de rouille, etc.), les revêtements en place doivent être retirés, sur toute la surface, par un moyen mécanique ou chimique. Les produits de démolition doivent être mis en décharge ou recyclés, en conformité avec les textes réglementaires en vigueur sur la protection de l'environnement [AFGC 03].

Pour traiter les armatures corrodées, il convient de les dégager par burinage, repiquage ou bouchardage, jet d'eau ou sablage. Le dégarnissage doit être effectué jusqu'à ce qu'un acier sain apparaisse et la longueur de cet acier doit être dégagée sur toute sa périphérie, (un

dégagement d'un minimum de 2 cm derrière l'armature, est conseillé). Lorsque les armatures qui ne sont pas parallèles au parement sont corrodées à leurs extrémités, le béton avoisinant doit être enlevé et ces extrémités doivent être amputées de 2 cm, pour rétablir un enrobage suffisant.

La phase d'élimination de la zone sous corrosion, constitue l'une des tâches les plus délicates à réaliser. La bonne tenue dans le temps des réfections de parement, dépend directement de la qualité d'exécution de ces travaux. Il est donc impératif d'éliminer l'intégralité de cette altération, qu'elle soit foisonnante ou de surface, et ceci sur toute la périphérie de l'acier, par décapage et brossage soigné ou par des moyens mécaniques (sablage, hydrosablage, etc.). Cette opération doit être plus particulièrement soignée en milieu marin, car la rouille y est chargée de chlorures acides. Les surfaces de bétons sont ensuite nettoyées, afin de faire disparaître toute poussière ou toute souillure, subsistant après l'élimination des bétons dégradés. Ce nettoyage peut être réalisé par voie humide ou sèche (brossage et soufflage), mais dans le cas du lavage à l'eau, celle-ci doit être éliminée par soufflage ou par aspiration.

4.2.3.2 Remplacement des armatures fortement corrodées

A cette étape des travaux, un contrôle du diamètre résiduel des armatures les plus fortement attaquées sera effectué (à l'aide d'un pied à coulisse par exemple) [AFGC 03]. Les armatures supplémentaires de même nature seront mises en place, par scellement ou soudure, afin de restituer la section initiale, avec une tolérance de 5%, en tenant compte des longueurs d'ancrage et de recouvrement, et des armatures de couture. Dans le cas de soudures, celles-ci devront être effectuées, selon les normes en vigueur, après que la soudabilité de l'acier ait été vérifiée.

4.2.3.3 Protection des armatures

La protection des armatures consiste à appliquer sur toute la surface de celles qui sont dégagées (périphérie complète), un produit assurant une protection vis-à-vis de la corrosion. Ce traitement n'est réellement nécessaire que si, pour des raisons techniques ou esthétiques, l'enrobage final ne peut pas avoir la valeur prévue dans les règlements (BAEL 91, par exemple), pour un environnement donné. Il est également fonction de la nature du produit de reconstitution du parement. On devra également s'assurer de la compatibilité avec les traitements ultérieurs (électriques notamment). Cette application doit suivre immédiatement le décapage, car l'oxydation des armatures risque de s'amorcer et de compromettre la bonne tenue de la réparation.



Figure 4.4 : une application d'une protection d'armatures (mortier anticorrosion) [AFGC 03].

4.2.3.4 Etape de la réparation des bétons

La réparation des bétons consiste à rétablir l'enrobage des armatures par la mise en œuvre de mortier. Ce dernier doit respecter les critères :

- de tenue verticale sans coffrage,
- de montée en résistance rapide et de résistance mécanique supérieure au béton support,
- d'adhérence supérieure ou égale à la cohésion du support,
- d'imperméabilité à l'eau et aux agents agressifs,
- de coefficient de dilatation thermique et de module d'élasticité dynamique équivalent au béton support,
- de bonne protection des aciers.



Figure 4.5 : reconstitution de l'enrobage [CONS].

4.2.3.5 Précautions particulières à prendre

D'une façon générale, une structure réparée se trouve de nouveau exposée aux conditions d'environnement, qui ont déjà créé la corrosion. Il faut donc s'assurer que les surfaces traitées ne vont pas engendrer de nouveaux désordres, notamment sur les zones adjacentes [AFGC 03].

Il est malheureusement souvent constaté que des réparations locales sont responsables de nouvelles pathologies :

- la zone réparée éclate, et les armatures se corrodent de nouveau ;
- les zones adjacentes se fissurent, et ce sont les armatures non réparées qui se corrodent.
Ainsi à proximité d'une réparation locale, la corrosion se caractérise par l'apparition possible de zones anodiques (dissolution) à bas potentiel et de zones cathodiques (acier protégé). Le couplage entre ces surfaces se traduit par le passage d'un courant de corrosion sortant de la surface anodique. La préparation de surface et la reconstitution du parement ont pour effet de modifier les conditions électrochimiques des armatures. D'une façon générale, les zones réparées sont protégées d'une future corrosion. Toutefois :
- leur potentiel croît (l'armature se trouve progressivement de nouveau dans un état de passivité),

- de nouvelles anodes se créent autour de cette zone.

Des courants de corrosion vont se créer. La densité de courant, qui correspond à la vitesse de corrosion, sera d'autant plus importante que :

- la différence de potentiel est importante,
- les surfaces anodiques sont plus petites,
- la résistance électrique est plus faible (dépendant fortement de l'humidité et de la présence de sels),
- les polarisations à la fois des zones anodiques et cathodiques sont plus faibles. Ces polarisations dépendent essentiellement des conditions électrochimiques régnant à l'interface acier/béton. Dans la zone anodique, plus le milieu sera pollué par les chlorures ou rendu voisin de la neutralité par la carbonatation, plus faible sera cette polarisation et plus grand sera le courant de corrosion. L'étendue des surfaces touchées par ces courants de corrosion dépend principalement de l'état d'humidité du béton pollué. En général la surface de cette zone ne dépasse pas quelques centimètres carrés. Au-delà, c'est la corrosion " naturelle " qui est le mécanisme principal de la dégradation.

En fait, plusieurs cas sont à considérer :

a- la réparation est effectuée correctement

Les zones adjacentes sont passivées (absence totale de carbonatation, de chlorures). Les risques d'amorçage et d'évolution de corrosion localisée sont faibles. La corrosion était due à un défaut local (enrobage, ou béton défaillants).

b- la réparation est effectuée correctement

Les surfaces adjacentes sont protégées (zone sans carbonatation ou à faible teneur en chlorures), mais ces deux agents agressifs atteindront les armatures dans un délai de quelques années.

c- la réparation est effectuée correctement

Les armatures sont exemptes de produit de corrosion, et elles sont protégées par l'alcalinité du produit de réparation (s'il est à base de ciment), ou par la résine (par l'effet isolant de celle-ci), mais les surfaces adjacentes sont en état de corrosion (c'est à dire que le béton y est carbonaté ou pollué par les chlorures).

d- la réparation n'est pas effectuée correctement

C'est à dire que l'armature n'a pas été dégagée puis enrobée de produit de réparation.

Dans les cas b, c, et d, les risques de corrosion sont importants, dans un délai difficile à

déterminer mais pouvant être inférieur à dix ans, après la réparation (voir la partie 4.2.2 : inhibiteurs).

e- la réparation est effectuée à l'aide d'un mortier de résine par principe non conducteur

Les mécanismes anode cathode ne peuvent s'appliquer. Toutefois, il apparaît à l'interface mortier de résine/armature/ancien béton un interstice, en cas de manque de continuité, dans lequel, la corrosion s'amorce par aération différentielle, puis des modifications chimiques se créent, en l'absence d'alcalinité (béton carbonaté), ou en présence de chlorures. Dans l'interstice, le milieu devient rapidement acide du fait de l'hydrolyse des produits de corrosion, et l'attaque progresse rapidement.

Ainsi, il ne faut pas négliger plusieurs points essentiels dans les phases de la réparation :

- le diagnostic (cf. chapitre 3) ;
- la préparation de surface de l'armature qui, si des traces de produits de corrosion subsistent, risque de participer à l'amorçage de corrosions ;
- à liaison produit de réparation-béton ancien, qui risque d'engendrer des interstices responsables d'amorçage de corrosions localisées.

4.2.3.6 Les mortiers de réparation

Il existe deux catégories de mortiers de réparation : mortier de réparation structurale et non structurale. Pour les mortiers non structuraux, ils sont appliqués sur une surface de béton pour restituer l'aspect géométrique ou esthétique de la structure. Pour les mortiers structuraux, ils sont appliqués à une structure en béton pour remplacer le béton défectueux et pour restituer à la structure son intégrité et sa durabilité. Les mortiers de réparation peuvent être classés en deux familles selon leurs compositions, à savoir des mortiers à base de liant hydraulique et mortiers à base de liants hydrauliques modifiés par des polymères. Ces derniers peuvent modifier et améliorer les propriétés mécaniques, physiques et de durabilité du matériau. Ces modifications seront d'ailleurs abordées par la suite [MED 09].

D'autres types de classifications existent puisque Embersons et Morgan [EMB 90, MOR 96], attribuent trois catégories aux mortiers de réparation, à savoir des mortiers classiques, mortiers modifiés par des polymères et des mortiers à base de résines. Des exemples de ces mortiers sont présentés dans le tableau 4.3.

Tableau 4.3: Classification des mortiers par Emersons et Morgan [EMB 90, MOR 96].

Mortiers classiques	Mortiers modifié par des polymères	Mortiers à base de résine
- Mortiers a base ciment portland ordinaire -Mortiers à base de ciment alumineux	-Mortiers à base de ciment modifié par un polymère styrène butadiène -Mortier à base de ciment modifié par un polymère vinyle acétate	-Mortier d'époxy -Mortier acrylique -Mortier polyester

Les mortiers à base de résines sont des mélanges de liant polymère et de granulats calibrés dont la prise se fait par réaction de polymérisation [AFN 08]. Le liant est constitué en général de deux composants, une base en polymère réactif et un durcisseur ou catalyseur qui polymérise à température ambiante. Les liants couramment utilisés sont les résines époxydes, les polyesters insaturés, les acryliques réticulables et les polyuréthanes mono ou bicomposants [AFN 08].

Ces mortiers ont un module de déformation nettement plus faible que celui des bétons et un module de dilatation beaucoup plus élevé que celui des bétons. En plus, ils ne peuvent avoir aucune action passivante vis-à-vis de l'acier, comme les mortiers hydrauliques. Ils ne protègent donc les armatures des agents agressifs que par la barrière physique que constitue leur propre épaisseur.

Des études ont montré que les matériaux à base de résine tels que les mortiers époxy n'ont pas de performances acceptables lorsque ils sont sous des conditions climatiques sévères en raison de leur incompatibilité thermique avec le béton de support et leur adhérence est très faible pour des surfaces de béton humide [MIR 02].

Actuellement, la plupart des mortiers de réparation sont des matériaux préformulés en usine.

La part des mortiers fabriqués sur chantier n'a fait que diminuer au profit de mélanges réalisés en usine. Leurs compositions sont devenues complexes associant des ciments, des adjuvants, des additions, des fibres et des polymères.

Les additions employées sont des matériaux inorganiques finement broyés pouvant être ajoutés aux produits de réparation pour en améliorer certaines propriétés à l'état frais et faciliter leur mise en œuvre ou à l'état durci pour augmenter leur résistance et/ou leur durabilité. Il existe deux types d'additions : les additions pratiquement inertes (type I), qui peuvent remplir les vides laissés dans l'empilement granulaire formé par le ciment et les granulats grâce à leur finesse et les additions pouzzolaniques ou hydrauliques latentes (type

II). Dans ce cas, l'addition peut avoir un pouvoir de liant, soit par réaction avec l'eau de gâchage (liant hydraulique, tels que les laitiers de hauts fourneaux), soit par réaction avec les hydrates du ciment (par réaction pouzzolanique par exemple). Les principales additions sont les fillers calcaires, les cendres volantes, la fumée de silice et les laitiers de hauts fourneaux.

L'ajout d'adjuvants dans les mortiers a pour but d'améliorer les propriétés du matériau à l'état frais (ouvrabilité) ou à l'état durci. Le dosage est inférieur ou égale à 5% de la masse du ciment. Les principales familles d'adjuvants sont les plastifiants et superplastifiants, les accélérateurs et retardateurs de prise ainsi que les agents entraîneurs d'air.

Les fibres ajoutées aux mortiers de réparation sont généralement des fibres synthétiques d'origine organique. Elles sont réparties d'une manière aléatoire dans le mélange. Elles ont le rôle de diminuer les microfissures et de reprendre les efforts de traction dus au phénomène de retrait dans la matrice cimentaire afin de retarder la propagation des fissures (figure 4.6) [MAL 11].



Figure 4.6 : Pontage par les fibres des fissures dues aux retraits [MAL 11].

4.2.3.6.1 Les polymères dans les mortiers de réparation

Les polymères sont parmi les constituants les plus présents dans la composition des mortiers de réparation et surtout dans les mortiers industriels. Les polymères sont ajoutés afin d'améliorer les propriétés mécaniques et d'adhérence des mortiers de réparation et de réduire les propriétés de transfert (porosité, perméabilité, diffusivité des chlorures).

Cette amélioration dépend non seulement du type du polymère mais aussi du rapport polymère/ciment. Les polymères les plus utilisés sont les latex [OHA 98].

Le Styrène-Butadiène (SBR), le chlorure de polyvinyle (PVDC), l'acrylonitrile-butadiène (NBR), le polychloropène (CR), l'ester polyacrylique (PAE), l'acétate de polyvinyle (PVAC), le poly (styrène/acrylate de n-butyle) (SA) ou encore le poly (éthylène/acétate de vinyle) (EVA) sont les latex les plus utilisés. Les polymères latex peuvent se présenter sous deux formes, en poudre et en solution polymérique (dispersion aqueuse).

a- Polymères latex sous forme de dispersions aqueuses

Ce sont de très petites particules polymériques (0,05-5 μm) dispersées dans l'eau produite par la polymérisation en émulsion, avec l'utilisation d'un tensioactif (le rôle du tensioactif est de diminuer la tension de surface entre les deux phases liquides, en formant un film autour des gouttelettes dispersées). Ces polymères sont généralement classés en trois catégories d'après le type de charge électrique des particules polymériques qui est déterminé par le type du tensio-actif utilisé dans la production du latex : cationique (chargé positivement), anionique (chargé négativement) et non-ionique (non chargé).

b- Polymères latex sous forme de poudre

Ils sont obtenus par un séchage par atomisation des dispersions aqueuses. Lors du malaxage avec l'eau, les polymères re-dispersent ou ré-émulsionnent facilement et fournissent des dispersions aqueuses. Des produits sont ajoutés tels que l'argile, la silice ou le carbonate de calcium pour éviter l'agglutination de la poudre.

Les polymères sous forme de poudre peuvent être mélangés aux différents constituants du mortier pour obtenir des sacs pré-dosés prêt à la commercialisation.

Les mortiers modifiés par des polymères peuvent être des mono-composants ou des bicomposants.

Dans le mortier mono-composant, le polymère est sous forme de poudre mélangée au liant et dans le bi composant, le premier composant contient le polymère et l'eau nécessaire à l'hydratation du ciment et le deuxième contient le ciment, le sable et les fines inertes ainsi que les additifs éventuels (fibres, fumée de silice...). Les mélanges sont généralement pré dosés en usine, la composition de ces mélanges, y compris le dosage en eau, est définie par le fabricant.

Le type d'interactions existant entre la phase cimentaire et la phase polymérique n'est pas

Certains estiment que seules les interactions physiques existent entre les deux phases avec la formation du film polymère responsable de l'amélioration de certaines propriétés physiques et mécaniques.

D'autres pensent qu'il y a des interactions chimiques entre les polymères et les hydrates responsables de changements dans la composition, la morphologie et la qualité des hydrates notamment la portlandite.

Lors de l'hydratation, un film de polymère peut se former correspondant à la coalescence des particules de polymères au moment de la consommation en eau de la matrice cimentaire.

La représentation schématique de la formation du film est illustrée dans la figure 4.6.

Les particules se rapprochent, flocculent, puis coalescent pour former un film continu.

Cette coalescence ne peut se faire qu'à partir d'une température seuil appelée température minimale de formation de film (TMFF).

Des études entreprises par Afridi ont montré que les polymères liquides forment un film de meilleure qualité que ceux sous forme de poudre pour lesquels le film est moins uniforme.

De plus, la formation du film dépend non seulement du type de latex mais aussi de sa quantité. Ainsi, il conclut que pour les polymères liquides un P/C de 5% est suffisant pour la

formation du film mais que pour les polymères sous forme de poudre le rapport P/C doit être de 10%. Cette valeur a été confirmée par Pascal pour un latex styrène-butadiène.

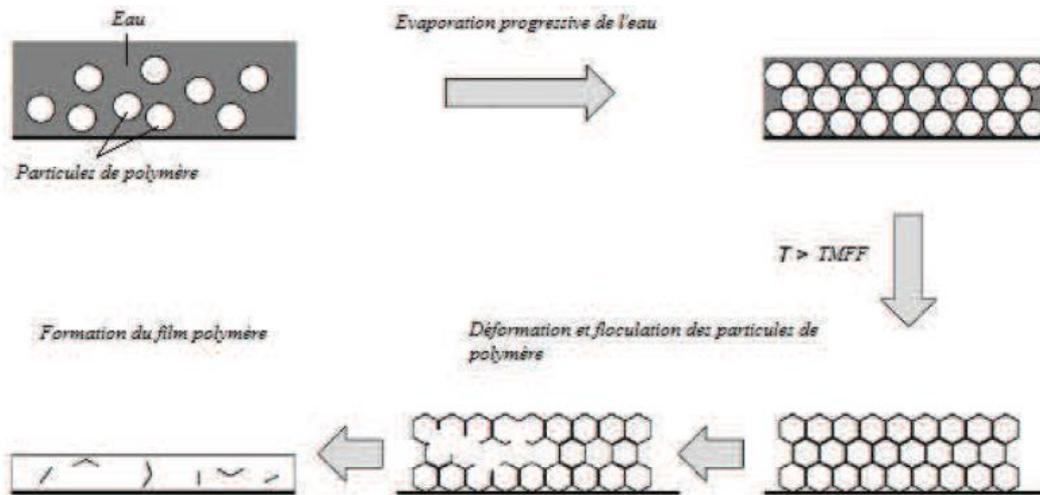


Figure 4.6 : Représentation schématique de la formation du film polymère [GRE 11]

Les polymères peuvent interagir physiquement et éventuellement chimiquement avec la matrice cimentaire en formant une comatrice polymère-ciment.

Ohama a proposé un scénario sur la formation de la comatrice qui se déroule en quatre étapes (figure 4.7).

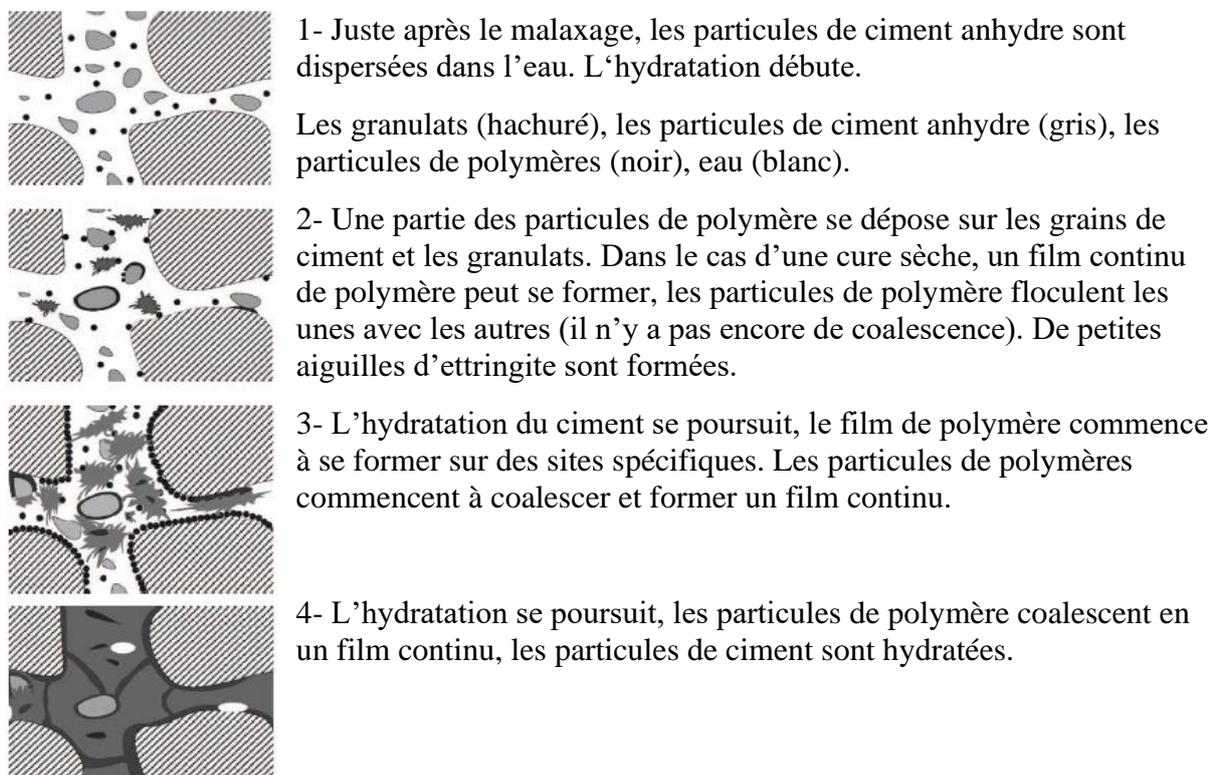


Figure 4.7 : Modèle de formation de la co-matrice polymère-ciment [VAN 05].

Les propriétés à l'état frais et à l'état durci des mortiers de réparation modifiés par des polymères sont différentes de celles des mortiers classiques, elles sont influencées par plusieurs paramètres, qui sont:

- le type du polymère,
- le rapport polymère / ciment,
- le rapport eau/ ciment,
- les conditions de cure,
- la quantité d'air entraînée.

4.2.4 Les imprégnations

D'une façon générale, les produits appliqués par imprégnation sont des consolidants ou des hydrofuges. Ils se distinguent par leur fonction principale [AFGC 03] :

- Un produit consolidant confère à une zone peu profonde altérée, une cohésion identique à celle du même matériau d'origine. Il ne s'agit donc pas d'une consolidation structurale à l'échelle d'un ouvrage.
- un hydrofuge constitue une barrière interne au matériau, vis-à-vis de la pénétration de l'eau liquide, sans trop affecter la perméabilité à la vapeur d'eau. Un hydrofuge est dit de surface, lorsqu'il est appliqué sur le béton durci.



Figure 4.8 : Action d'un produit hydrofuge [AFGC 03].

Par sa fonction principale, un produit hydrofuge n'est ni un imperméabilisant, ni un anti-graffiti. Certains produits ont des fonctions secondaires (antissalissure, etc.). Les consolidants et les hydrofuges n'ont pas d'action directe sur la protection contre la corrosion des armatures. Mais ils peuvent être utilisés comme traitement complémentaire.

Par la suite, seuls les hydrofuges de surface seront traités dans ce document. Il est à noter que certains points ne sont donnés qu'à titre indicatif.

La mise en œuvre de ces produits est spécifiée dans des documents tels que le Guide pour la protection du béton armé par application de produit à la surface du parement (LCPC).

4.2.4.1. Domaine et limites d'emploi

Une hydrofugation se justifie, si le béton subit une altération liée à un contact avec de l'eau liquide provenant de l'atmosphère (et non pas du sol ou d'une fuite d'eau). Ce traitement est appliqué à titre préventif ou curatif.

L'altération du béton n'affecte généralement que les zones soumises aux pluies battantes, au ruissellement ou au rejaillissement. Il est donc inutile d'hydrofuger des zones qui sont, par exemple, à l'intérieur d'un bâtiment.

Les dégradations liées aux sels solubles s'intensifient après hydrofugation. Pour assurer une bonne durabilité au traitement, il est important de limiter les risques de pénétration d'eau et de sels par l'arrière de la surface traitée. Les surfaces sur lesquelles l'eau stagne, ne peuvent pas non plus être traitées efficacement.

Enfin, les traitements hydrofuges s'insèrent dans une procédure globale de réparation. La compatibilité entre les diverses techniques de réparation doit être assurée et surtout les objectifs à long terme doivent être clairement définis (les possibilités de "retraitement", notamment pour les imprégnations d'inhibiteurs de corrosion ou d'application postérieure de tout autre produit destiné à migrer en phase liquide, etc.).

4.2.4.2. Produits hydrofuges

Les produits hydrofuges peuvent être classés en fonction de la nature chimique de leur constituant de base. Les produits les plus répandus sont les silicones et leurs dérivés (siliconates, silanes, siloxanes). Mais il existe aussi des hydrofuges acryliques, des résines fluorées et d'autres.

La classification des hydrofuges tient compte de la taille des molécules. Pour une application donnée, il convient de choisir le produit qui est adapté à la porosité du béton à traiter. Il est à noter que de nombreux produits hydrofuges sont en " phase solvant ", ce qui

signifie qu'avec l'évolution de la législation européenne, certains de ces produits vont disparaître au profit de ceux en “ phase aqueuse ”.

4.2.4.3 Procédure de choix et d'application

Le choix de produit, comme le choix de la procédure d'application ne pourront être réalisés qu'après un diagnostic et des essais préliminaires.

a- Diagnostic

Avant de traiter le béton par un hydrofuge, il est indispensable de définir si cette opération est utile et compatible aussi bien avec le matériau à traiter qu'avec son environnement. La première étape du traitement consiste à préciser dans le diagnostic :

- La nature et l'étendue des altérations qui affectent le matériau,
- l'absence de fissure ou de délamination du béton,
- l'origine des dégradations,
- les caractéristiques principales du béton à traiter (notamment sa porosité),
- et enfin si aucune contre-indication ne s'oppose au traitement.

b- Choix du produit et essais préliminaires

Le choix d'une famille d'hydrofuges est réalisé :

- seulement après une caractérisation préalable du support,
- mais aussi après avoir clairement défini les conditions de la mise en œuvre sur chantier (saison, traitements préliminaires envisagés, mise en peinture postérieure...).

L'efficacité et la durabilité du traitement hydrofuge sont optimisées, en sélectionnant un produit particulièrement adapté au support et à ses propriétés physiques (tailles de pores, couleur, etc.). L'optimisation est faite à partir d'essais de convenance.

Elle concerne la concentration du produit et sa consommation, en tenant compte de la procédure d'application.

c- Procédure d'application

La durabilité du traitement est conditionnée par la profondeur de pénétration.

Les principales techniques d'application sont le pinceau, le rouleau et le pulvérisateur pour les silicones et le pulvérisateur ou le pistolet " airless ".

En général, le produit doit avoir une bonne répartition dans le support, c'est pourquoi l'utilisation du pulvérisateur (ou de " l'airless ") est souvent privilégiée.

Les conditions climatiques sont particulièrement importantes pour le processus de polymérisation. C'est pourquoi, il convient de respecter les notices techniques, afin d'éviter une polymérisation trop rapide par temps trop chaud ou trop lente par temps trop froid et humide (généralement, les températures limites conseillées se situent entre 5 et 30°C). Enfin, le support doit être réparé et propre. Mais en plus, les indications de la fiche technique du produit, concernant l'humidité du support, doivent être respectées.

d- Contrôle du traitement

Le contrôle du traitement a pour objectif de vérifier :

- que les produits et les conditions de mise en œuvre, définis dans la procédure d'application, ont été respectés,
- et que le traitement a été efficace.

Par ailleurs, certains essais sont proposés pour caractériser un traitement d'hydrofugation, et se font soit sur site soit sur des prélèvements de béton (tableau ci-après).

Mais il est aussi important de vérifier que ce traitement ne modifie pas trop d'autres propriétés du béton, telles que :

- des propriétés structurelles (porosité, etc.),
- des propriétés de transfert (perméabilité à la vapeur d'eau, etc.),
- ou des propriétés esthétiques (couleur, brillance).

4.2.4.4 Exemples d'essais de convenance pour caractériser un traitement par imprégnation d'hydrofuge

Tableau 4.4 : essais sur site [AFGC 03].

Essais sur site	Profondeur de pénétration	Effet hydrofuge
Effet perlant	Oui	Oui
Essai de perméabilité	Non	Oui

Tableau 4.5 : essais sur prélèvements [AFGC 03].

Essais sur prélèvements	Profondeur de pénétration	Effet hydrofuge
Frange d'imbibition	Oui	Non
Mouillage ou microgoutte	Oui	Oui
Attaque acide	Oui	Non
Angle de contact	Oui	Oui
Test d'imbibition capillaire	Oui	Oui

4.2.4.5 Durée et efficacité du traitement

L'efficacité d'un traitement par imprégnation est, en général, de deux ans. Elle porte à la fois sur la tenue à la pénétration d'agents agressifs dans le béton et sur l'aspect du parement.

4.2.5 Projection du béton

4.2.5.1 Principes et définitions

Un béton projeté est constitué d'un mélange de granulats, de ciment et d'eau avec parfois des ajouts, projeté grâce à de l'air comprimé, sur une paroi [AFGC 03].



Figure 4.9 : Projection de béton [AFGC 03].

Il faut distinguer deux techniques de projection, suivant le moment d'introduction de l'eau dans la chaîne :

- par voie sèche avec ou sans pré-mouillage : l'eau est introduite au niveau de la lance,
- par voie mouillée : l'eau est introduite au malaxage du béton.

4.2.5.2 Rôle des adjuvants, des fibres et des fumées de silice

Un béton projeté peut aussi contenir des adjuvants, des fibres ou des fumées de silice.

a- L'utilisation des adjuvants confère au béton des propriétés spécifiques lors de la mise en œuvre :

Projection par voie humide

- obtention et maintien de la fluidité, grâce à des stabilisateurs de prise introduits à la sortie de la centrale pour une optimisation des conditions de transport,
- obtention de la consistance initiale, grâce à des activateurs introduits quelques mètres avant la lance,
- mise en œuvre efficace grâce à des accélérateurs de prise (raidisseurs) introduits en bout de lance, mais entraînant parfois une baisse des résistances mécaniques à long terme.

b- L'adjonction de fibres confère au béton projeté des propriétés complémentaires qui dépendent de la quantité et du type de fibres :

- cohésion améliorée du béton frais,
- limitation des effets du retrait,
- amélioration possible des caractéristiques mécaniques (résistance accrue au cisaillement et à la flexion).

Le comportement de post-fissuration confère au matériau une ductilité.

c- L'utilisation de fumée de silice améliore l'aptitude à la projection (béton plus collant) ainsi que la durabilité (béton plus dense).

4.2.5.3 Procédure d'application du béton projeté

La procédure d'application doit justifier les matériaux et les moyens choisis pour leur mise en œuvre.

a- Préparation du chantier : études

Les études portent sur la formulation du béton en regard des exigences du Dossier de Consultation des Entreprises (DCE), avec notamment la technique de projection et le choix des constituants ainsi que les caractéristiques attendues.

- Pour les renforcements structurels, la voie sèche ou éventuellement la voie mouillée à flux dilué est préférable, et les dosages en ciment doivent être minimaux.

- Les études prennent en compte, le plus en amont possible, les sujétions de chantier liées :

- à l'environnement (bruit – pollution),
- à l'accès (aménagement et plate-forme de travail suffisante pour que le porte-lance puisse effectuer le travail convenablement – distance entre lance et surface de 0,50 m à 1,50 m environ),
- à la signalisation (sécurité), à la circulation (vibration du support).

Les études précisent :

- la conception des travaux (phasage, type d'échafaudages, matériel de projection, mode de transport et distance maximum, etc.),
- les caractéristiques du béton projeté (durée pratique d'utilisation, épaisseur à projeter, nombre de passes, délai entre passes),
- la qualité du support de projection (degré de propreté, humidité, etc.),
- la cure du béton projeté,
- le délai nécessaire de travaux hors circulation....

b- Exécution du chantier

La commande du béton tient compte des résultats de l'étude et de la convenance en intégrant les sujétions de transport et de mise en œuvre (cadences, programmes). L'approvisionnement est en fonction du mode de projection choisi.

Dans le cas d'une fabrication de chantier, l'approvisionnement des matières premières se fait soit en vrac, soit en sac (mélange sec prêt à l'emploi). L'identification et le contrôle de qualité s'effectuent dans le cadre du contrôle interne en procédant par lots (liés le plus souvent aux phases du chantier).

Le stockage doit permettre d'avoir la quantité suffisante pour éviter une rupture de bétonnage et de conserver les matières premières sans détérioration de leur qualité (pollution...). En voie sèche, le contrôle de l'humidité des matériaux est un point important à contrôler. La qualité d'une réparation par béton projeté est fortement liée aux conditions d'exécution et notamment à la qualification du porte-lance. L'essai de convenance réalisé, conformément à les normes, permet de s'assurer que toutes les conditions (personnel, moyen, choix des matériaux) sont réunies pour une bonne exécution des travaux.

c- Choix des matériels

Les machines sont identifiées : elles doivent correspondre à l'utilisation attendue (capacité, puissance, débit (air, eau) résistance). Leurs caractéristiques sont définies en regard des objectifs fixés au cahier des charges, avec une attention particulière pour le choix des équipements et notamment sur les adaptations qui conditionnent le bon déroulement de la projection.

Toutes les bascules ou balances nécessaires au dosage pondéral doivent être étalonnées. Les doseurs en adjuvants doivent être asservis au débit de la machine à projeter et agréés par un essai de convenance.

Certains matériels doivent être prévus en réserve, pour éviter l'interruption de chantier qui serait de nature à nuire à la qualité finale de l'ouvrage.

d- Qualification du personnel

L'équipe (porte-lance, aide porte-lance et machiniste) doit être qualifiée, c'est-à-dire ayant des références certifiées pour des travaux similaires ou ayant suivi une formation sanctionnée par un certificat de qualification obtenu après contrôle des connaissances

théoriques ou pratiques. Le nombre de personnes est adapté à l'importance du chantier.

e- Procédure opératoire

L'opération de bétonnage respecte la chronologie suivante :

- préparation du support,
- scellements éventuels de connecteurs,
- mise en place éventuelle du ferrailage et des piges de contrôle d'épaisseur (non oxydables),
- projection du béton en respectant le phasage (de bas en haut sur des bandes de largeur déterminée),
- passes successives (respect du nombre et délai entre passes),
- arrêt de bétonnage en fin de lot ou de journée, suivant les règles de l'art,
- couche de finition éventuelle (toujours distincte de la couche structurelle).
- protection par cure, si nécessaire.

4.2.5.4 Contrôle de la mise en œuvre

a- Contrôle intérieur

Il porte sur :

- les épreuves d'étude et de convenance,
- la vérification de la conformité de la livraison à la commande pour le béton (cas du Béton Prêt à l'Emploi (BPE)), les matériaux (ciment/granulats, adjuvants/ajouts/eau ou les sacs prédosés, dans le cas du béton fabriqué sur place), les armatures, les produits de cure,
- les prélèvements conservatoires des matériaux, en vue d'analyses éventuelles,
- la vérification de l'état du support et des surfaces de reprises entre couches,
- la vérification de la mise en place du ferrailage,
- le contrôle d'exécution et de la qualité du béton projeté,
- le contrôle d'épaisseur du béton projeté,
- le contrôle de cure,
- le contrôle d'adhérence au support.

b- Contrôle extérieur

Il porte sur les points d'arrêt suivants :

- la validation de l'épreuve d'étude,
- la validation de l'épreuve de convenance,
- la vérification de l'état du support, de la mise en place du ferrailage et des piges de profondeur,
- le contrôle d'adhérence au support,
- la vérification de la qualité du béton projeté (épaisseur, texture, résistance).

4.2.5.4 Domaine et limites d'emploi

a- Béton projeté par voie sèche

- Avantages

Les avantages du béton projeté par voie sèche sont les suivants :

- grande souplesse d'utilisation : il est facile d'arrêter le travail et de redémarrer sans avoir à se livrer à des nettoyages fastidieux,
- grandes distances de transport : il est possible d'installer la machine à projeter à quelques centaines de mètres du lieu de travail. Dans des cas précis - par exemple, réparations de tunnels - des installations spécialement étudiées permettent un transport sur plus d'un kilomètre, sans reprise,
- possibilité de projeter de fortes épaisseurs en une seule couche même sans accélérateur,
- résistances élevées : l'effet de compaction exercé par les graviers projetés à grande vitesse et le faible E/C tendent à améliorer les résistances,
- obtention aisée de béton à hautes performances,
- robotisation possible pour augmenter les cadences et les conditions de travail.

- Domaines d'emploi privilégiés

Ils sont les suivants :

- réparation et renforcement de structure,
- réalisation de voiles minces avec armatures,
- projection immédiate de terrain avec activité discontinue et volume restreint,
- projection en falaise,
- rénovation d'ouvrages souterrains, etc.

- Limites d'emploi et inconvénients

Ce sont :

- une capacité de production limitée,
- un dégagement de poussière, à la machine et à la lance (pouvant être réduit en humidifiant le granulat),
- une appréciation visuelle de la teneur en eau par le porte-lance,
- une perte par rebond importante,
- dans le cas de béton fibré, un appauvrissement en fibres dans le béton placé,
- un risque de détérioration des supports fragiles, etc.

b- Béton projeté par voie mouillée

- Avantages

Les avantages du béton projeté par voie mouillée sont les suivants :

- capacité de production élevée, atteignant le double ou le triple de la voie sèche,
- diminution des poussières, améliorant les conditions de travail,
- diminution des pertes par rebond,

- meilleur contrôle de la qualité du béton,
- composition du béton en place homogène dans l'épaisseur de la couche,
- dans le cas de béton fibré, dosage en fibres du béton en place proche du dosage initial,
- robotisation, améliorant les conditions de travail.

- Domaines d'emploi privilégiés

Ils sont les suivants :

- travaux en espace confiné,
- soutènement en tunnel nécessitant des cadences importantes de projection,
- projection sur support fragile, etc.,

- Limites d'emploi et inconvénients

Ce sont :

- moins de souplesse ; formulation exigeant une mise au point rigoureuse (fluidité, stabilisation, etc) et une régularité de la consistance,
- un transfert sur de grandes distances difficile,
- des adjuvants raidisseurs ou accélérateurs obligatoires pour compenser la fluidité et la stabilisation du béton projeté,
- l'usage recommandé d'un stabilisateur pour permettre un temps d'utilisation suffisant du béton gâché pour minimiser les nettoyages lors des arrêts ponctuels de la machine à projeter,
- un compactage et une adhérence plus faible,
- la nécessité d'un dosage initial en ciment élevé (minimum 400kg/m³) pouvant entraîner des retraites importants.

4.2.5.6 Essais de réception

Les essais de réception sont définis dans les normes, les recommandations, ou les procédures contradictoires.

Leur objectif est de valider en fin d'exécution, les engagements de l'entrepreneur qui a accepté de satisfaire aux exigences du marché : caractères géométriques (forme, finition, etc.), caractères esthétiques (teintes, texture, etc.), caractéristiques mécaniques (résistance à la compression, adhérence, etc.), caractères physico-chimiques, etc.

4.2.5.7 Durée et efficacité du procédé

La projection du matériau sur un support lui confère des caractéristiques mécaniques et physico-chimiques intéressantes, surtout par voie sèche, du fait de la très grande vitesse :

- richesse élevée en ciment du mélange projeté, au voisinage de la surface réceptrice, du fait des rebonds des plus gros granulats,
- compaction dans l'épaisseur de la couche.

Les propriétés attendues sont les suivantes :

- adhérence au support,
- résistances mécaniques précoces élevées,
- module élastique voisin de celui du support,

- fissuration maîtrisée : l'ajout de fibres améliore encore cette propriété,
- protection du support vis à vis des agents agressifs et des actions du gel-dégel avec des précautions particulières : (formulation, mise en œuvre),
- possibilité de projeter des couches épaisses en une seule passe.

4.3 RECAPITULATIF

Plusieurs procédés existent pour réhabiliter le béton armé dégradé par la corrosion. Aucun d'eux n'est applicable dans tous les cas. Leurs caractéristiques sont résumées dans les tableaux ci-dessous [AFGC 03].

Il est rappelé que chaque procédé ou traitement doit comporter les étapes suivantes :

- Evaluation de la structure
- Nature et causes des éventuelles dégradations
- Choix entre les solutions possibles sur le plan technique
- Compatibilité entre les procédés et les exigences diverses. En effet, la plupart du temps, plusieurs options différentes sont possibles : la solution retenue doit être compatible avec les exigences diverses, les choix techniques et le coût supportable.

Tableau 4.6 : Traitements électrochimiques (Protection cathodique) [AFGC 03].

Domaine d'action	- Protection des aciers par abaissement de leur potentiel électrochimique.
Mise en œuvre	- Polarisation des aciers à l'aide d'une électrode placée de façon permanente sur le parement ou dans l'enrobage.
Limites et précautions d'emploi	- Continuité électrique des armatures. - Réparation éventuelle de la surface. - Béton non susceptible à l'alcali-réaction. - Incompatibilité avec les armatures revêtues. - Incompatibilité avec les revêtements imperméabilisants.
Efficacité, Contrôle et durée	- Efficace si le potentiel de l'acier est maintenu à la valeur exigée. - Remplacement des électrodes de référence.
Effets secondaires, Incidences sur l'ouvrage, Commentaires	- Déséquilibre de la solution interstitielle du béton. - Risque de fragilisation dans le cas des aciers de précontrainte. - Modification de l'apparence du parement. - Suivi électrique indispensable durant la durée de vie de l'ouvrage.

Tableau 4.7 : Traitements électrochimiques (Extraction des chlorures, Ré-alkalinisation des bétons) [AFGC 03].

Domaine d'action	carbonatés. - Extraction des chlorures pour les bétons pollués en chlorures.
Mise en œuvre	- Polarisation des armatures à l'aide d'une électrode placée sur le parement et enrobée d'une pâte saturée d'un électrolyte. - Durée : quelques semaines.
Limites et précautions d'emploi	- Continuité électrique des armatures. - Béton non susceptible à l'alcali-réaction. - Incompatibilité avec les armatures revêtues. - Incompatibilité avec les revêtements.
Efficacité, Contrôle et durée	- Vérification par indicateurs de pH (ré-alkalinisation) ou détermination de la teneur en chlorures (déchloruration). - Traitement éventuellement à renouveler, à terme.
Effets secondaires, Incidences sur l'ouvrage, Commentaires	- Déséquilibre de la solution interstitielle du béton. - Risque d'apparition d'efflorescences devant être nettoyées.

Tableau 4.8 : Application de revêtements (Peintures, lasures et autres revêtements) [AFGC 03].

Domaine d'action	- Amélioration du parement : action esthétique, limitation de l'encrassement, action protectrice du béton.
Mise en œuvre	- Application en plusieurs couches sur un support ne présentant pas d'imperfections trop importantes.
Limites et précautions d'emploi	- Protection superficielle, non curative. - L'état du support au moment de l'application a un rôle déterminant.
Efficacité, Contrôle et durée	- L'efficacité est liée à la qualité de l'adhérence entre le support et le revêtement, Risques de cloquage, craquelage, écaillage. - Contrôle de la perméabilité de surface.
Effets secondaires, Incidences sur l'ouvrage, Commentaires	- Attention à la tenue aux rayons UV dans le choix des produits. - Risque d'incompatibilité avec certains traitements du béton.

Tableau 4.9 : Produits protecteurs (Inhibiteurs de corrosion) [AFGC 03].

Domaine d'action	- Ralentissement du processus de corrosion des armatures.
Mise en œuvre	- Par pulvérisation en plusieurs passes (forme liquide) sur la surface du béton ou application directe sur la surface (forme gélifiée) ou sur l'acier.
Limites et Précautions d'emploi	- Incompatibilité avec les éléments déjà traités par hydrofuges. - Limites liées à des teneurs en chlorures trop élevées.
Efficacité, Contrôle et durée	- Efficacité dépendante de la nature du produit et de la quantité disponible au niveau des aciers (dosage de l'inhibiteur). - Contrôle par mesures de potentiels ou de courants de corrosion.
Effets secondaires, Incidences sur l'ouvrage, Commentaires	- Certains inhibiteurs minéraux interagissent avec le béton. - Risque d'apparition d'efflorescences devant être nettoyées.

Tableau 4.10 : Réparation par mortiers [AFGC 03].

Domaine d'action	- Restauration de l'apparence du parement.
Mise en œuvre	- Enlèvement du béton dégradé. Brossage, remplacement d'armatures. - Protection éventuelle. Application de produit assimilé.
Limites et précautions d'emploi	- Phasage précis des opérations (risques de déséquilibre de la structure).
Efficacité, Contrôle et durée	- Réception des armatures de renforcement. - Contrôle des renforcements, Réception des supports.
Effets secondaires, Incidences sur l'ouvrage, Commentaires	- Risques de récurrence si la partie corrodée n'est pas parfaitement enlevée, Attention aux effets cathodiques adjacents.

Tableau 4.11 : Imprégnations (Hydrofuges de surface) [AFGC 03].

Domaine d'action	- Action hydrophobe sur le parement.
Mise en œuvre	- Application sur la surface par rouleau ou pulvérisateur. La préparation du support est fondamentale.
Limites et précautions d'emploi	- Emploi lorsque l'altération est due à un contact avec de l'eau liquide provenant de l'atmosphère. - Ne pas appliquer sur des surfaces horizontales.
Efficacité, Contrôle et durée	- Contrôle de l'efficacité par l'essai perlant (qualitatif).
Effets secondaires, Incidences sur l'ouvrage, Commentaires	- Mauvaise compatibilité des hydrofuges avec les sels solubles et certains produits de traitement.

Tableau 4.12 : Projection du béton [AFGC 03].

Domaine d'action	- Réparations, renforcements structurels.
Mise en œuvre	- Projection sur la paroi à l'aide d'air comprimé selon deux techniques : voie sèche et voie mouillée.
Limites et précautions d'emploi	- Respecter les normes des épaisseurs.
Efficacité, Contrôle et durée	- Réception des armatures, Contrôle d'adhérence. - Confection des caisses de convenance avec carottage pour le contrôle des caractéristiques.
Effets secondaires, Incidences sur l'ouvrage, Commentaires	- Surcharges.

CONCLUSION GENERALE

Disons que la façon, dont un ingénieur aborde le problème de la dégradation d'un ouvrage et de son entretien, doit être semblable à celle d'un médecin abordant un cas .Elle implique la constatation du mal, le diagnostic et le remède ; elle fait en outre une très large place à la nécessité de prévenir le mal. Dans son travail, l'ingénieur doit connaître les différentes formes de dégradations dont les manifestations sont connues (les symptômes) là où les causes des différents types des dégâts (la maladie), et la façon de redresser la situation (le remède).

Corrélativement il faut que les ouvrages nouveaux ou existants (ceux qui sont sains) soient correctement conçus, construits et entretenus de façon à prévenir les dégâts.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

(Organisées dans l'ordre alphabétique)

[ACL 89] : ACL 222R-89, Building of Metals in Concrete, American Concrete Institute, Détroit (1989).

[ACL 92] : ACL 318-89, Building Code Requirements, American Concrete. American Concrete Institute, Détroit (1992).

[AFGC 03] : Association Française de Génie Civil – Centre Français de l'Anticorrosion (CEFRACOR), Réhabilitation du béton armé dégradé par la corrosion. Documents scientifiques et techniques. 2003.

[AFN 08] : Association française de normalisation. NF EN 1504. Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton, 2008.

[AND 00] : Anrade C, Castellote M, Alonso C, Gonzalez C, Non-steady-state chloride diffusion coefficients obtained from migration and natural diffusion tests, Part I: Comparison between several methods of calculation materials and structures, vol. 33, p 21-28, janv-fev. 2000.

[ANT 09] : Pierre BOULANGER, Théophil LUTZ, Gilles PINGANAUD et Guy TACHÉ, Anticorrosion et Durabilité dans le bâtiment, le génie civil et les ouvrages industriels, chapitre 22 : les inhibiteurs de corrosion dans le béton armé 2009.

[BAG 02] : Béton de fibre à ultra-hautes performances- Recommandations provisoires. Documentation scientifiques et techniques de l'association Française de Génie –Civil, AFGC, Bagneux, 152p, janv.2002.

[BAR 92] : Baron. J, Ollivier. J.P, "la durabilité des bétons Presses de l'Ecole Nationale des ponts et Chaussées, Paris, 1992, p. 453.

[BER 04] : Bertolini L., Elsener B., Pedferri P., Polder R., Corrosion of steel in concrete. Weinheim, Germany: Wiley-VCH, 392 pages, 2004.

[BEN] : BENZAADA.S "cours de corrosion" Edition : P/n° 5267.

[BRO 99] : J. BROOMFIELD Corrosion inhibitors for steel in concrete, Concr Int, 44-7. 1999.

[BYF 90] : Byforts K., "Chloride-initiated reinforcement corrosion (chloride binding) CBI report 1:90", Swedish Cement and concrete Research Institute, Stockholm, 1990.

[CEFRACOR] : <http://www.cefracor.org/> ; consulté le 25/04/2020.

[CHE 08] : Chen D., Mahadeven S., Chloride-induced reinforcement corrosion and concrete cracking simulation, Cement & Concrete Composites vol. 30, no. 3, p. 227-238, 2008.

- [CIM 06] : CIMbéton, La durabilité des bétons, Collection technique, T48, 2006.
- [CLE 73] : Clear K.C., Hay R.E. Time to corrosion of reinforcing steel in concrete slabs, vol.1, Report No. FHWA-RD-73-32, Federal Highway Administration, Washington D.C, (1973).
- [CONS] : www.concretecorrosion.net ; consulté le 30/04/2020.
- [DAI 71] : Daimon M. , Akiba T, kondo R., Through pore size distribution and kinetics of carbonation reaction of Portland cement mortars, Journal of the American Ceramic Society, vol. 54, no. 9, p. 423-428, 1971.
- [DHI 94] : Dhir R.K., Jones M.R., McCarthy M.J., PFA concrete : chloride-induced reinforcement corrosion. Magazine of Concrete Research, vol. 46, no. 169, p. 269-277, 1994.
- [EMB 90] : N. K. Embersons, G.C. Mays. Significance of property mismatch in the patch repair of structural concrete, part I: properties of repair systems. Cement and Concrete Research, vol 19, pp 147-160, 1990..
- [FRA 98] : FRANCY O., 1998, « Modélisation de la pénétration des ions chlorures dans les mortiers partiellement saturés en eau », Thèse de Doctorat l'Université Paul Sabatier, Toulouse.
- [DIA 86] : Diamond S., Chloride concentrations in concrete pore solutions resulting from calcium and sodium chloride admixtures, Cement, Concrete, and Aggregates 8 (1986), p.97.
- [GAS 82] : Building Research, The durability of steel in concrete: Part 2 Diagnosis and assessment of corrosion-cracked concrete, Digest 264, Building Research Establishment, Gaston (1982).
- [GRE 61] : GREGG S.J., The surface chemistry of solids, 2nd edition, Ed. Chapman & Hall Ltd, London ,1961.
- [GRE 11] : M. Gretz, J. Plank. An ESEM investigation of latex film formation in cement pore solution. Cement and Concrete Research, vol 41, pp 184-190, 2011.
- [GLA 97] : Glass G.K., Buenfeld N.R., The presentation of the chloride threshold level for corrosion of steel in concrete, Corrosion Science, vol. 39, no.5, p. 1001- 1013, 1997.
- [GON 90] : Goni S., Andrade C., Synthetic concrete pore solution chemistry and rebar corrosion rate in presence of chlorides, Cement and Concrete Research 20 (1990), pp.525-539.
- [GOU 70] : Gouda V.K., Halaka W.Y., Corrosion and corrosion inhibition of reinforced steel, British Corr. Journal 5 (1970), pp.204-208.
- [HAU 67] : Hausmann D.A., Steel corrosion in concrete. How does it occur, Materials Protection 6 (1967), pp. 19-23.

- [HET 93] : Pettersson K. dans Dhir., RK Jones M.R.,(Eds).Concrete 2000, vol.1, E&FN Spon, London, p. 461, 1993.
- [HO 87] : Ho. D.W.S., Lewis. R.K., of concrete and its Prediction, Cement and concrete Research, vol. 17, no.3, p. 489-504, 1987.
- [HOP 87] : Hope B.B., IP A.K.C., Chloride corrosion threshold in concrete. ACI Materials Journal July-august (1987), pp.306-314.
- [HUS 95] : Hussain S.E., Rasheeduzzafar S.E., Al- Musallam A., Al-Gahtani A.S., Factors affecting threshold chloride for reinforcement corrosion in concrete, Cem. Concr. Res 25 (1995), pp.1543-1555.
- [HOU 92] : Houst. Y.F., Diffusion de gaz, carbonatation et retrait de la pâte de ciment durcie, Thèse N01108 de l'Ecole polytechnique Fédérale de Laussane, 1992.
- [HOL 83] : Holden W.R., Page C.L., Short M.R., The influence of chlorides and sulfates on durability of reinforced concrete, Corrosion of reinforcement in concrete construction, A.P. Crane Edition, Ellis Horwood (1983), pp.143-150.
- [HUN 62] : Hunt C.M., Tomes L.A., Reaction of blended Portland cement paste with carbon-dioxide, Journal of Research of the National Bureau of Standards – A. Physics and Chemistry 66A, p. 473- 481, 1962.
- [KAY 95] : Kayyali O.A., Haque M.N., The ratio of Cl/OH- in chloride contaminated concrete. A most important criterion, Mag. Concrete Res. 47 (1995), pp.208-234.
- [LAM 91] : Lambert P., Page C.L., Vassie P.R.W., Investigation of reinforcement corrosion. Electrochemical monitoring of steel in chloride contaminated concrete, Materials and Structures 24 (1991), pp.351-358.
- [LOC 80] : Locke C.E., Siman A., Electrochemistry of reinforcing steel in salt-contaminated concrete, ASTM STP 713, (1980), pp.3-16.
- [LOO 94] : Loo.Y.H, Chin.M.S., Tam. C.T, Ong.K.C.G., A carbonation prediction model for accelerated testing of concrete, Magazine of Concrete Research, Vol. 46 no. 168, p. 191-200,1994.
- [Mal 11] : A. Mallat, A. Alliche. Mechanical investigation of two fiber-reinforced repair mortars and the repaired system. Construction and Building Materials, vol 25, pp 1587-1595, 2011.
- [MAR 99] : T.D. Marcotte, C.M. Hansson, B.B. Hope. The effect of the electrochemical chloride extraction treatment on steel-reinforced mortar. Part I: Electrochemical measurements. Cement and Concrete Research, vol 29, pp 1555-1560, 1999.

[MED 09] : M.H.F. Medeiros, P. Helene, S. Selmo. Influence of EVA and acrylate polymers on some mechanical properties of cementitious repair mortars. *Construction and Building Materials*, vol 23, pp 2527-2533, 2009.

[MIN 05] : Ming-Te Liang and Ji-Jie “Reliability analysis for the existing reinforced concrete pile corrosion of bridge substructure “*Cement and Concrete Research*, Volume 35, Issue, March 2005, p 540-550.

[MET 86] : Metha P-K., *concrete structure, Properties and Materials*, Prentice Hall, New Jersey, 1986, p 449-550.

[MIR 02] : J. Mirza, B. Durand. Laboratory and field performance of polymermodified cement-based repair mortars in cold climates. *Construction and Building Materials*, vol 16, pp 365-374, 2002.

[NEV 95] : Neville A., *Chloride attack of reinforced concrete: an overview*, *Materials and Structure* (1995), pp. 63-70.

[NGA 97] : Ngala V.T., Page C.L., Effects of carbonation on pore structure and diffusional properties of hydrated cement pastes, *Cement and Concrete Research*, vol.27, no. 7, p. 995-1007,1997.

[NUR 84] : Nurnnberger U., *Betonwerk Fertigteil-Technik* 50 (1984), p. 601.

[NIS 86] : Nischer. P., *The Quality of the concrete Texture, Betonwerk+Fertigteil-Technik*,vol.52, p.683-696, 1986.

[OHA 98] : Y.Ohama. *Polymer-based Admixtures. Cement and Concrete Composites*, vol 20, pp 189-212, 1998.

[OLL 08] : Ollivier. J.P, Vichot. A, *La durabilité des bétons*, Presses de l’Ecole Nationale des Ponts et chaussées, Paris, pages 840 ,2008.

[ORE 04] : J.C. Orellan, G. Escadeillas, G. Arliguie. Electrochemical chloride extraction: efficiency and side effects. *Cement and Concrete Research*, vol 34, pp 227-234, 2004.

[PAD 96] : P. Padeferri. Cathodic protection and cathodic prevention. *Construction and Building Materials*, vol 10, pp 391-402, 1996.

[PAG 96] : Page C.L., Short. N.R., Holden W.R., The influence of different cement on chloride induced corrosion of reinforcing steel, *Cement and Concrete Research* 16 (1996), pp. 79-86.

[PAR 08] : G.T. Parthiban, T. Parthiban, R. Ravi, V. Saraswathy, N. Palaniswamy, V. Sivan. Cathodic protection of steel in concrete using magnesium alloy anode. *Corrosion Science*, vol 50, pp 3329-3335, 2008.

[PIET 96] : Pietro Pedoferri; Cathodic protection and cathodic prevention”*Construction and Bulding Matérials*, Volume 10, July 1996, pp 391-402.

[PIH 68] : Pihlajavaara S.E. , Some results of the effect of carbonation on the porosity and pore size distribution of cement paste, *Materials and Structures*, vol. 1, no. 6, p.521-527, 1968.

[POW 54] : POWERS T.C., COPELAND L.E., HAYES J.C., MANN H.M., 1954,«Permeability of Portland cement paste», *J. Amer. Concr. Inst.* Vol. 51, n° 3, pp. 285-298.

[POW 62] : Powers T.C., A hypothesis on carbonation shrinkage, *Journal of the PortlandCement Association Research & Development Laboratoires*, vol. 4, no. 2, p.40-50, 1962.

[POP 83] : Popovics S., Simeonov Y., Boshinov G., Barovsky N., Durability of reinforced concrete in sea water, *Corrosion of reinforcement in concrete construction*, A.P. Crane Edition, Ellis Horwood (1983), pp.143-150.

[QIA 06] : S. Qian. Theoretical and experimental study of microcell and macrocell corrosion in patch repairs of concrete structures. *Cement and Concrete Composites*, vol 28, pp 685-695, 2006.

[RTD 01] : Projet Funded by the European Commission under the Transport, RTD Programme of the 4th Framework Programme- Bridge Management and Condition Monitoring, BRIME PL97- 2220, January 2001.

[SHA 03] : Shamsad Ahmed, “Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction-a review”, *Cement and Concrete Composites*, Volume 25, May July 2003, pp 459-471.

[STO 97] : Stoltzen E., Kanudsen A., Buhr B., Durability of marine structures in Denmark, *Proceedings of International Conference Repair of Concrete Structures, From theory to practice in a marine environment*, Aage Blankvoll Edition, Norvege(1997). P.59.

[STR 08] : Travaux de réparation et de renforcement de structure (STRRES). Guide 1 Reprise des bétons dégradés, 2008.

[SWE 67] : Swenson E.G., Sereda. P.J., Some ageing characteristics of lime, *Journal of Applied Chemistry*, vol. 17, no. 7,p. 198-202, 1967.

[THI 05] : Thiery. M., Modélisation de la carbonatation atmosphérique des matériaux cimentaires Prise en compte des effets cinétiques et des modifications microstructurales et hydriques, Thèse de doctorat de l’Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2005.

[TSU 80] : Tsukayama R., Abe H., Nagataki S., Long-term experiments on the neutralization of concrete mixed with fly ash and the corrosion of reinforcement, *7e congress international de la chimie des ciments*, Paris, 3,4,30-35, 1980.

[VEN 68] : Venuat. M., Alexandre. J., De la carbonatation du béton, *Revue des Matériaux de Construction*, no. 638, p. 421-427, 1968.

[VAN 78] : Van Muylder J., Vansathler L., Winand R and Pourbaix M., "Electrochemical behavior of iron in localized corrosion cells in the presence of chloride", 7th int. Cong on Metel. Corr, Rio de Janerio, vol.2, 1978, p 705.

[VAL 97] : Val D.V., Melchers R.E., Reliability of deteriorating RC slab bridges, Journal of Structural Engineering (ASCE), vol. 123, no. 12 p. 1638-1644, 1997.

[VAN 05] : D. Van Gemert, L. Czarnecki, M. Maultzsch, H. Schorn, A. Beeldens, P. Lukowski, E. Knapen. Cement concrete and concrete-polymer composites: Two merging worlds. A report from 11th ICPIIC Congress in Berlin, 2004. Cement and Concrete Composites, vol 27, pp 926-933, 2005.

[WEY 98] : Weyers R.E. Service life model for concrete structures in chloride lade environements, ACI Material journal, vol.95, no. 04, p. 445-453, 1998.