

# CHAPITRE II

## ASPECTS PHYSICO-CHIMIQUES ET INFLUENCE DES CHLORURES SUR LA DURABILITE DES BETONS

### II.1 INTRODUCTION

L'exposition du béton aux chlorures, sous l'action de ces agents agressifs, résultent une dégradation de la matrice solide due à un ensemble de mécanismes physiques et chimiques correspondant à l'instabilité des phases hydrates et/ou modification de la matrice cimentaire engendrant une conséquence commune l'abaissement du pH de la solution interstitielle. De plus, les ions agressifs tels les chlorures, s'ils atteignent et à une concentration suffisante les armatures de béton armé, peuvent initier leur corrosion. La description phénoménologique occulte la complexité des mécanismes de dissolution et de précipitation et des transferts réellement mis en jeu.

En vue de faire un état des lieux sur le phénomène, il apparaît par conséquent utile de rappeler succinctement les mécanismes réactionnels entre les hydrates du béton et les chlorures. On aborde ensuite quelques généralités sur la corrosion des aciers liée à la pénétration des ions  $\text{Cl}^-$ ; ces rappels sont l'occasion de présenter l'importance de mesurer avec précision la teneur critique des  $\text{Cl}^-$  pour évaluer le risque réel de corrosion des armatures. Une revue du contexte normatif de l'effet des chlorures sur la structure en béton armé est également rappelée.

Bien que notre étude n'ait porté que sur des points liés à la pénétration des chlorures, il nous paraît utile de décrire brièvement les conséquences de cette présence d'ions sur la corrosion des armatures du béton armé.

### II.2 EFFETS DE L'EAU DE MER SUR LA DURABILITE DES BETONS

#### II.2.1 L'eau de mer, du point de vue chimique

La composition d'une eau de mer est très différente de la solution interstitielle d'un béton, à cause de ces différences de composition, des échanges ioniques vont se mettre en place.

Suivant les régions du monde, l'eau de mer peut avoir des compositions chimiques différentes. Elle se caractérise généralement par une grande concentration de sels dissous. La salinité peut varier de  $10\text{g.l}^{-1}$  dans la mer Baltique, à  $40\text{g.l}^{-1}$  dans la mer Rouge, voire pratiquement  $400\text{g.l}^{-1}$  dans les mers Caspienne et Morte. Plus proche de nous, la mer Méditerranée a une salinité qui avoisine  $40\text{g.l}^{-1}$  et l'océan Atlantique  $35\text{g.l}^{-1}$ .

Les sels dissous qui composent l'eau de mer sont généralement :

- le chlorure de sodium (NaCl), qui est prépondérant,
- le chlorure de magnésium (MgCl<sub>2</sub>),
- le sulfate de magnésium (MgSO<sub>4</sub>),
- le sulfate de calcium (CaSO<sub>4</sub>),
- le chlorure de calcium (CaCl<sub>2</sub>),
- le carbonate de potassium (KHCO<sub>3</sub>).

La concentration totale des espèces présentes dans l'eau de mer correspond à un pH qui varie entre 7,5 et 8,4 (Mehta, 1986).

Les plus grandes concentrations ioniques sont les Na<sup>+</sup> et les Cl<sup>-</sup>, correspondant respectivement à 11.000 mg/litre (485,40 mmol/l) et 20.000 mg/litre (565,70 mmol/l). En réalité, le chlorure de sodium représente 75 à 85%, de la salinité d'une eau de mer. Par sa prépondérance dans un tel environnement naturel, cette solution est très souvent étudiée en prenant égale à zéro les concentrations de toutes les autres espèces en solution.

## **II.2.2 Mécanisme de dégradation en environnement marin**

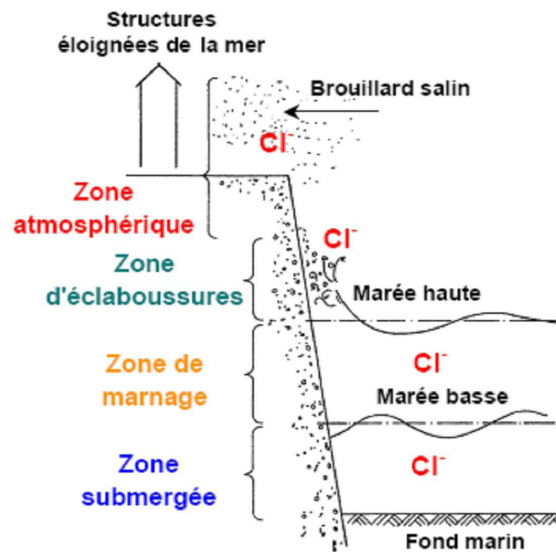
Les environnements maritimes sont parmi les milieux naturels les plus agressifs vis-à-vis des matériaux à matrice cimentaire. En terme de composition chimique, la présence d'ions étrangers à la solution interstitielle, tels que les ions chlorures peut conduire à la formation de précipités, la dissolution ou la modification de la structure de certaines phases, au sein de la matrice cimentaire. A l'échelle de structure la dégradation du béton armé, est couramment due à des risques de corrosion prématurée des armatures, liés à la pénétration d'ions Cl<sup>-</sup> ou d'un abaissement du pH de la solution interstitielle.

Suite à ce facteur de risque important, la pathologie principale qui apparait se traduit par une diminution progressive de la section des armatures, la dégradation de l'interface acier-béton, de plus la formation de rouille expansive exerçant une pression sur le béton entourant l'armature est souvent suffisante pour provoquer l'éclatement du béton d'enrobage.

L'intensité des dégradations qui sont normalement observées sont liées à l'agressivité du milieu (zone de marnage, d'éclaboussures, d'embruns) et peuvent être de nature physique ou chimique (figure II-1). Dans la partie immergée, le matériau béton est constamment saturé. L'agression chimique due à l'eau de mer y est prépondérante. Cette zone se caractérise par une évolution importante de la microstructure de la pâte de ciment. En particulier, il se forme de nouveaux composés expansifs qui peuvent éventuellement causer des gonflements et de la fissuration à l'intérieur de la structure en béton.

L'alternance des marées provoque, dans la zone de marnage des dégradations de nature physique et chimique : l'abrasion des surfaces dues à l'action mécanique des vagues, la marée, les fissurations engendrées par le gonflement et le retrait causés par les cycles de

mouillage/séchage ; les conditions atmosphériques (le gel, le vent, le soleil) et la corrosion électrochimique des aciers s'ajoutent aux problèmes d'ordre chimique.



**Figure II-1** : Conditions d'exposition en environnement marin (CEB, 1989).

En partie totalement émergée, le matériau est soumis aux embruns et par conséquent à une alternance de cycles de séchage/humidification, initiant la corrosion des armatures en béton armé qui induisent une fissuration du matériau.

La figure II-2 illustre bien les dégradations des structures en béton armé, soumise aux embruns, pour lesquelles tous les voiles (figure II-2 a) et ou poteaux (figure II-2 b) en béton armé sont fissurés et, à certains endroits, les armatures sont visibles et fortement corrodées.



**(a)** quai en zone de marnage (France).



(b) Colonnes d'un pont ravagées par corrosion (France).

**Figure II-2** : Endommagement de structure causée par corrosion.

Dans le cadre de ce mémoire, nous nous intéressons plus particulièrement aux phénomènes de transport par diffusion qui n'entraînent que des dégradations de type chimique.

### **II.2.3 Conséquences des ions $\text{Cl}^-$ sur les matériaux cimentaires – évolution de la microstructure -**

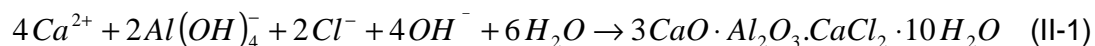
Dans les matériaux cimentaires, les ions chlorures peuvent se combiner avec les composés hydratés du ciment. En fait, les chlorures peuvent se présenter sous différents états dans la structure interne du béton, soit liés physiquement <sup>[1]</sup> ou chimiquement à la pâte de ciment hydratée ou sous forme de chlorures libres dans la solution interstitielle des pores.

Les ions  $\text{Cl}^-$  qui diffusent dans le milieu poreux du béton modifient l'équilibre thermodynamique du système solution interstitielle/phase solide. Ils rendent la solution interstitielle acide, c'est à dire que la concentration en ion  $\text{OH}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  diminuent, favorisant ainsi la décalcification des hydrates et la lixiviation (Ramachandran et col,1990) de ces produits, pour rééquilibrer la solution interstitielle des pores.

---

[1] Selon Ramachandran et col (1990), la quantité de chlorures qui pénètre dans les espaces interfeuillets (C-S-H) est d'environ 40%. Les ions se retrouvant dans ces endroits ne sont pas nécessairement liés fortement à la surface des hydrates, mais ils sont piégés d'une certaine façon.

De point de vue chimique, la diffusion de tels ions provoque la dissolution du monosulfoaluminate (issu C<sub>3</sub>A et C<sub>4</sub>Af) et la formation de chloroaluminate de calcium (aussi désigné par sel de Friedel), selon la formule suivante :



Et pour tenir compte de l'influence des éventuels composés anhydres, il faudrait ajouter aux chloroaluminates issus de la dissolution de l'AFm, les chloroaluminates issus de l'hydratation du C<sub>3</sub>A résiduel en présence d'ions chlore.

Parallèlement, puisque la solution agressive ne comporte pas d'ions calcium, le départ de ces ions de la solution interstitielle vers l'extérieur provoque la dissolution de la portlandite, puis la décalcification progressive des C-S-H. De même, ces réactions chimiques, peuvent entraîner la formation de composés expansifs comme le trisulfoaluminate de calcium (Ca<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>6</sub>·3CaSO<sub>4</sub>·31H<sub>2</sub>O) ou l'ettringite<sup>[1]</sup> qui peut éventuellement causer des gonflements et de la fissuration à l'intérieur de la structure de béton (Regourd, 1980).

Il ressort aussi, puisque les concentrations en sulfate et en aluminium sont nulles dans la solution agressive, il a été observé une dissolution partielle de l'ettringite et du chloroaluminate, à long terme.

A noter que l'évolution de la porosité augmente à cause des dissolutions progressives de la portlandite<sup>[2]</sup>, puis des autres phases comme les C-S-H; avec un abaissement du niveau d'alcalinité de la solution interstitielle, et une diminution de la résistance mécanique.

Par surcroit, si les chlorures sont présents en quantité suffisantes dans la structure poreuse, la dissolution des composés riches en calcium et la formation d'ettringite secondaire expansive sont toutes deux des causes importantes de dégradation des bétons au contact d'un milieu marin. Cependant, le problème de corrosion est la principale cause de dégradation des bétons exposés dans les environnements salins. C'est un phénomène très complexe qui fait intervenir un certain nombre de paramètres que nous traiterons dans le prochain paragraphe.

---

[1] sous forme de sel mixte de composés de calcium et d'aluminium.

[2] C'est le phénomène d'hydrolyse qui peut conduire à un lessivage ou «lixiviation» de la chaux des composés de la pâte de ciment durci provoquant une augmentation de la porosité et un affaiblissement du liant.

## **II.3 MECANISME DE LA CORROSION INDUITE PAR LA PENETRATION DES CHLORURES**

### **II.3.1 La pénétration des ions chlorures**

Les chlorures présents dans le béton peuvent provenir de deux sources différentes. Soit ils sont présents au moment du gâchage : utilisation d'eau contenant des chlorures ou agrégats contaminés ou parfois de certains adjuvants <sup>[1]</sup>. Soit ils proviennent le plus souvent de l'environnement extérieur : atmosphère marine ou sels de déverglaçage, qui diffusent dans le béton.

Comme il a été déjà évoqué précédemment (§ II.2.3), les chlorures existent sous deux formes dans le béton : les chlorures libres qui sont dissous dans la solution interstitielle et les chlorures piégés ou liés qui sont combinés à des hydrates du ciment ou adsorbés sur les parois des pores. Cependant les chlorures qui ne sont pas fixés aux hydrates c'est-à-dire les chlorures libres peuvent migrer à travers la structure poreuse du béton, sous l'effet des variations d'humidité consécutives aux alternances de cycle de séchage/mouillage ou sous l'effet de gradients de concentration entre la structure interne du matériau et l'eau de mer, par exemple.

En conséquence, ce sont les ions libres qui sont les plus nocifs en ce qui concerne la corrosion des armatures.

Ainsi la cinétique de pénétration ou plutôt de migration de ces ions est relié à la porosité du béton. Elle décroît avec le rapport E/C et en fonction de la concentration en sels de la solution interstitielle.

### **II.3.2 Dépassivation des aciers dans le béton**

Lorsque les aciers sont noyés dans le béton frais, la solution alcaline des pores du béton produit une oxydation rapide en surface de l'acier pour former une couche d'oxyde, appelé film passif (Rosenberg et col., 1989), (Bentur et col., 1999).

Le processus de corrosion des armatures par la présence des ions agressifs, particulièrement les ions chlore s'amorce lorsqu'ils traversent le béton d'enrobage et atteignent le premier lit d'armature en concentration suffisante pour dépassiver l'acier. Le seuil critique de dépassivation est généralement relié à la concentration critique de chlorures habituellement exprimée en pourcentage de masse du liant ou en pourcentage de la masse totale de béton (ACI 222R).

---

[1] Actuellement les normes exigent une teneur en chlorure limitée pour les composants d'un béton armé et précontraint, et interdisent formellement les adjuvants a base de chlorures.

Dans les deux cas, la masse de chlorures considérés dans les calculs correspond à la masse totale de chlorures (i.e. chlorures liés et libres) trouvée dans le matériau. Selon les données publiées, certains auteurs préfèrent exprimer la concentration limite comme un ratio entre la concentration en chlorure libre (trouvé dans la solution) et les ions hydroxyde ( $\text{OH}^-$ ); selon Hausmann (1967) le rapport  $[\text{Cl}^-]/[\text{OH}^-]$  est proche de 0.6, cette méthode semble plus précise, considérant que la réaction de corrosion est sensible au pH de la solution des pores autour des armatures (Bentur et col., 1999). Selon Raharinaivo (1986), cette limite serait atteinte lorsque  $[\text{Cl}^-]=[\text{OH}^-]$ , mais dépendrait fortement de la porosité et la distribution de la taille des pores. Toutefois, les plus gros pores jouent naturellement un rôle très négatifs, ce qui n'est pas le cas des ciments à constituants secondaires à caractère pouzzolanique notamment la fumée de silice, puisque  $[\text{OH}^-]$  diminue et augmente la solubilité du sel de friedel.

D'autres auteurs suggèrent que la concentration critique est influencée par la qualité, et au changement de nature des produits d'oxydation à la surface de l'acier. Par exemple, dans une revue du sujet, Alonso et col. (2000) trouvent que la valeur de concentration critique de chlorures par masse de liant pour un acier standard (acier noir) varie entre 0.25% et 6.0%.

A noter que dans le cas des bétons carbonatés, le seuil de dépassement est atteint plus facilement <sup>[1]</sup>. En effet, une concentration en chlorures  $10^4$  fois plus petite suffit à initier la corrosion dans un matériau carbonaté, ce qui est confirmé expérimentalement par Chaussadent et Dron (1992).

Enfin, Il reste difficile de définir précisément cette concentration critique susceptible d'amorcer la corrosion des armatures. L'influence de différents facteurs comme la composition du béton, la teneur en  $\text{C}_3\text{A}$ , le rapport E/C, l'humidité relative, la température, la microstructure en contact avec l'acier et l'état de surface de l'acier sont autant de facteurs à cette variabilité.

### **II.3.3 L'amorçage et la propagation**

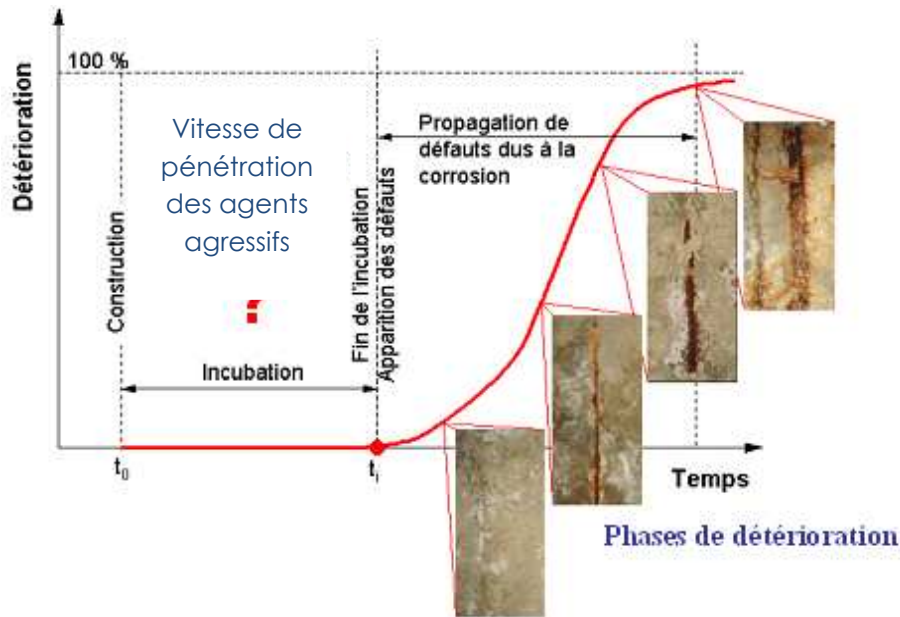
La dégradation du béton armé comporte deux phases successives (Tutti, 1990) (voir figure II-3) :

➤ une phase d'incubation (dite parfois d'amorçage) qui correspond à l'altération lente du béton, due à des modifications chimiques et parfois physiques (liés à la microstructure) de l'enrobage de béton, sans aucune constatation visible à l'échelle macroscopique, cette phase s'arrête lorsque les produits formés par les réactions internes du ciment atteignent un volume critique provoquant un gonflement néfaste du béton ou lorsque l'enrobage de béton ne protège plus les aciers contre la corrosion.

---

[1] la carbonatation met en liberté les chlorures fixés ou limite leurs fixation, ce qui est naturellement favorable à la corrosion des armatures.

➤ Une phase de développement (dite parfois de propagation) est celle où les dégradations du matériau sont visibles. Cependant, si l'enrobage est chimiquement modifié, l'acier se recouvre de produits " intermédiaires " qui ne sont pas stables en présence d'oxygène dissous dans le béton. Ils se transforment en des produits " finaux " non protecteurs, ce qui conduit à la dissolution et à l'enrouillement continu de l'acier. C'est pourquoi, les dégradations par corrosion des armatures produisent des défauts qui ne deviennent visibles qu'après un certain délai.



**Figure II-3:** Evolution du niveau de corrosion des armatures en fonction du temps  
(Bamforth, 1997).

Bamforth (1997) a expliqué le phénomène en proposant un modèle de propagation divisé en quatre stades (figure II-3). La corrosion démarre en un premier temps avec une dissolution des armatures qui se produit, sans aucune trace visible sur le parement, mais atteint un niveau conséquent au deuxième temps, marqué par l'apparition des fissures parallèlement au lit d'armatures longitudinales ou de la formation d'une fine couche de rouille sur l'acier avec des traces nettement visibles, la perte de section est effective au troisième stade, il s'agit aussi du début d'un éclatement (délamination) de l'enrobage du béton, tandis que la structure perd de son intégrité au dernier temps, par la constatation de certaines dégradations pathologiques tels les éclatements, les épaufrures et des fissures avec la perte d'adhérence acier-béton. D'autres mécanismes peuvent également être à l'origine de ce type de désordres, lorsque la corrosion est très avancée, les armatures peuvent être mises à nu et leur dissolution est nettement constatée.

La durée de la phase d'initiation est primordiale pour la conservation des armatures mais reste difficile à déterminer. Par ailleurs, le béton et les ouvrages eux-mêmes doivent être conçus pour retarder ou empêcher au maximum la dépassement des aciers.



La cinétique de corrosion <sup>[1]</sup> est influencée par de nombreux paramètres communs aux deux étapes, tels que la perméabilité du béton, l'épaisseur d'enrobage, mais aussi l'humidité relative et les effets thermiques, etc... D'autres facteurs comme les gradients de concentration qui assurent la diffusion des espèces agressives ou la capacité de fixation des ions  $\text{Cl}^-$  par les composés du ciment, sont propre à la période d'amorçage.

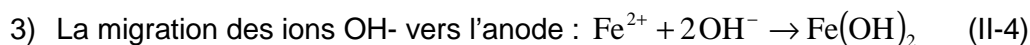
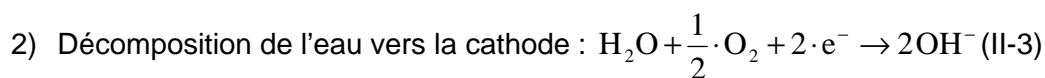
### II.3.4 Processus électrochimique de la corrosion

Il est d'abord important de souligner que la durabilité des structures est conditionnée par le béton qui protège physiquement et chimiquement l'acier de la corrosion. En effet, la forte alcalinité ( $\text{pH} = 13$ ) de la solution interstitielle contenue dans les pores du béton permet la formation d'un film passif <sup>[2]</sup> extrêmement mince et adhérent, constitué d'oxydes et d'hydroxydes de fer qui protège les aciers de la corrosion.

Au cours du temps, les chlorures qui diffusent dans la solution interstitielle du béton, peuvent traverser la barrière physique que constitue le béton d'enrobage, perturber la stabilité chimique et détruire le film passivant qui protège les armatures.

La destruction de cette protection se produit localement sur les surfaces les plus sensibles, ce qui conduit à l'apparition de piqures qui deviennent de petites anodes formant des piles de corrosion active où l'acier est dissout. Le reste de la surface qui est encore passivée correspond aux zones cathodiques. Les zones anodiques et cathodiques de ces piles sont reliées par l'électrolyte qui est constitué par l'intermédiaire de la solution interstitielle du béton. Dans un tel milieu, l'acier passivé voit alors son potentiel électrique chuter vers les valeurs négatives, et une différence de potentiel électrique se développe le long de l'armature, il y a une création d'une pile électrochimique.

Les réactions qui peuvent se produire sont les suivantes:



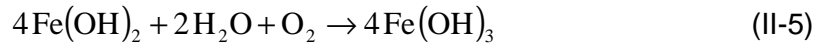
---

[1] La vitesse de corrosion due à la carbonatation est de  $0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  mais reste plus lente et généralisée qu'au cas de la pénétration des chlorures fortement rapide et localisé qui est de l'ordre de  $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ .

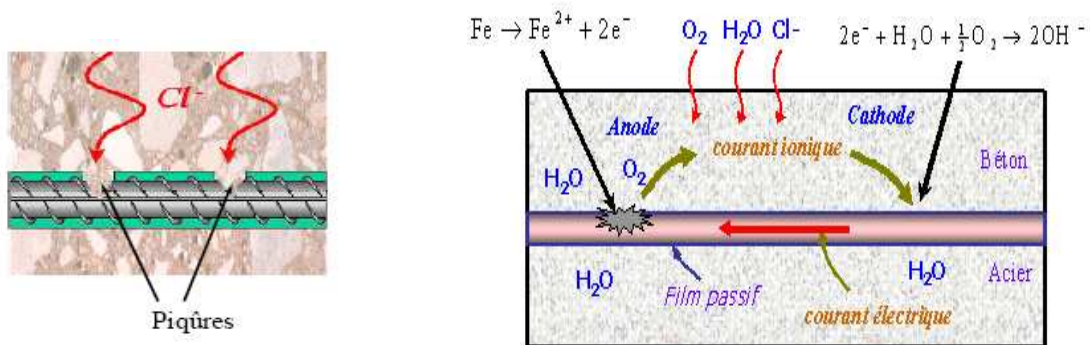
[2] la présence d'un agent agressif fait abaisser le pH.

Les ions ferreux  $Fe^{2+}$ , passent en solution à l'anode (perte de section à l'anode) alors que des électrons libres se déplacent jusqu'à la cathode (autre section de la barre d'acier). Les électrons se combinent avec de l'eau et de l'oxygène pour former des ions hydroxyle.

Les hydroxydes et les ions ferreux se déplaçant dans l'électrolyte, se combinent pour former l'hydroxyde de ferreux  $Fe(OH)_2$  qui n'est pas stable en solution aqueuse aérée: en présence d'oxygène, il se transforme en hydroxyde ferrique  $Fe(OH)_3$  suivant la réaction suivante :



L'hydroxyde ferrique est transformé par la suite en rouille qui se dépose sur l'acier. La figure II-4 présente schématiquement le mécanisme de la corrosion des aciers dans le béton.

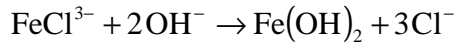
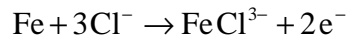


**Figure II-4** : Processus de corrosion dans le béton armé

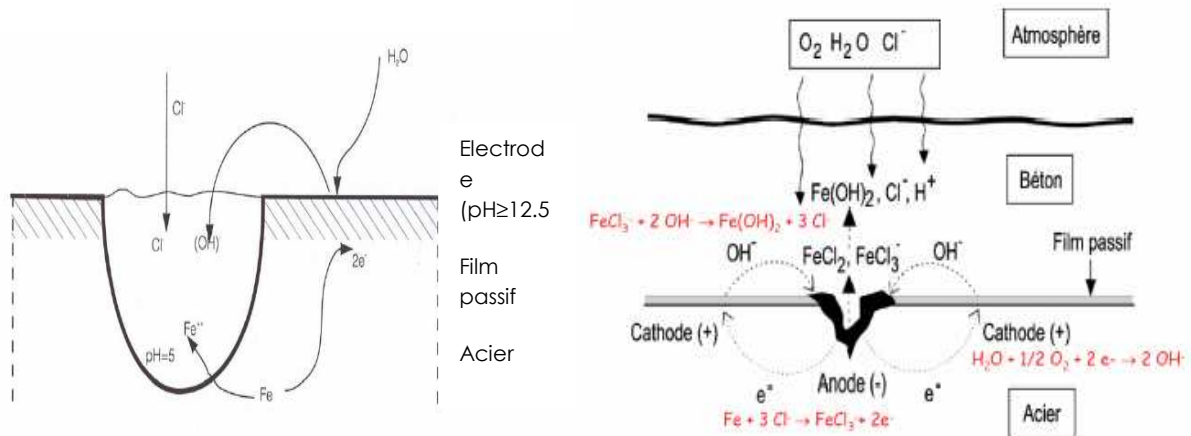
Retenons qu'il y a trois facteurs qui rendent possible la corrosion :

- La conductivité électrolytique du béton. La présence d'eau est essentielle. Elle réagit avec l'oxygène à la cathode et permet d'établir le circuit des charges électrique et des ions entre l'anode et la cathode ;
- La présence d'oxygène. L'oxygène (en phase gazeuse) est nécessaire à la cathode ou il se combine avec l'eau et les électrons pour former les ions hydroxydes  $OH^-$ . Si le béton est saturé d'eau, la corrosion des aciers n'est donc pas possible. De plus, la présence d'oxygène à l'anode modifie la composition chimique des produits de corrosion ;
- Lorsque la corrosion a lieu, les réactions qui se produisent dépendent de la nature de l'électrolyte (essentiellement de son pH) et du potentiel électrique de surface des aciers.

Pour que la corrosion soit initiée, au sein de la piqure (voir figure II-5) le trop d'ions chlorure dans le béton modifie la morphologie de la couche passive en donnant des ions  $FeCl_3^-$  ou  $FeCl_2$  qui consomment les ions  $OH^-$  pour former de l'acide chlorhydrique, selon les réactions suivantes :



Ces réactions acidifient la solution dans la pique, et abaissent fortement le pH entre 3,8 et 5. Les ions chlorure régénérés continuent d'être actifs pendant tout le processus de corrosion qui est ainsi autocatalysé. Les ions hydroxyde de la phase interstitielle du béton se combinent alors avec les ions ferreux  $\text{Fe}^{2+}$  ayant diffusé hors de la pique tandis que la réaction cathodique est la même que dans le cas de corrosion en absence de chlorure [1].



**Figure II-5** : Processus électrochimique de corrosion par les chlorures

(Baron et Ollivier, 1992).

Les produits de corrosion occupent un volume plusieurs fois supérieur au volume initial de l'acier. De plus, en présence de fissuration dans le béton, cette dernière influence la distribution des produits de corrosion en permettant aux ions chlore de migrer plus facilement dans la fissure et d'initier localement la réaction.

D'une façon plus générale, la présence des différents agents agressifs (liquides, gaz, ions) favorisent l'évolution de la corrosion. Ainsi, pour éviter le développement de la corrosion, il faut autant que possible utilisé des bétons compacts et peu perméable. Les bétons faiblement poreux sont en général plus durables puisque leur faible perméabilité retarde la pénétration des agents potentiellement agressifs. On peut dire que les constituants du béton

[1] Ce qui explique que la rouille ne contient pas de chlorures même si les chlorures ferreux sont formés lors des étapes intermédiaires de la réaction.

ont un rôle très important sur les caractéristiques de ce dernier. Les caractéristiques géométriques et hydrauliques sont alors à étudier de la manière la plus précise.

### **II.3.5 Conclusion**

La pénétration d'agents agressifs dans le béton, notamment les chlorures en environnement marin, conduit à l'amorçage et au développement du processus de corrosion.

Afin de limiter ou d'empêcher au maximum le mécanisme de corrosion ou plutôt son amorçage, qui reste l'un des facteurs essentiels à la dégradation esthétique et mécanique des ouvrages. La performance des structures en béton exposé en environnements agressifs est agencée par une certaine approche prescriptive dans un contexte normatif.

Le prochain paragraphe, met en exergue cette spécification en relation avec la durabilité des bétons, ou l'obligation d'un niveau de performance est défini par un ou plusieurs indicateurs tenant compte des spécificités d'un mécanisme de dégradation.

## **II.4 LE CONTEXTE NORMATIF**

La composition du béton a évolué. Les performances accrues des ciments et l'utilisation des superplastifiants ont permis de découpler, au moins dans un certain domaine, les effets du dosage en eau, et les objectifs de résistance mécanique ne constituent plus une difficulté technique, si ce n'est en ce qui concerne l'optimisation des compositions pour une résistance visée. Cependant, les versions successives des normes sur les spécifications et la production du béton ont peu évolué avec le temps.

Afin d'assurer une durabilité minimum, la nouvelle norme NF EN 206-1 établit des prescriptions réglementaires de formulation des bétons en fonction de l'agressivité des conditions environnementales définies sous forme de classes d'exposition.

### **II.4.1 La durabilité des bétons dans la norme EN 206-1**

Jusqu'à l'année 2000, l'évolution du béton a été encadrée par l'intermédiaire de garanties sur la résistance mécanique (Norme NF P 18-305, 1996) – autrement dit en faisant en sorte que la résistance caractéristique à 28 jours ne soit pas affectée – et en limitant dans tous les cas certaines la proportion d'additions prise en compte dans le liant. La durabilité des bétons correspondait à une approche prescriptive qui définit un niveau de risque homogène, tenant compte de certaines classes d'environnement (Tableau II-1).

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

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

La durabilité du matériau béton dans son environnement est présentée comme une préoccupation majeure de la norme et une des raisons de son évolution. Les environnements sont redéfinis et pour chacun de ces environnements ou « expositions », l'obligation de moyens et l'obligation de résultats sont présentés comme alternatives à l'ancienne norme.

La norme NF EN 206-1, intitulée « Béton, Partie 1 : Spécification, performances, production et conformité », est entrée en vigueur en janvier 2005, en remplacement de la norme NF P 18-305 « Bétons prêts à l'emploi préparés en usine » datant de 1996. Cette évolution majeure de la norme française sur le béton en tant que matériau est à l'origine du travail de recherche effectué dans le cadre de la thèse. Ce changement inscrit d'abord la norme française dans le contexte normatif européen, et élargit son domaine d'application, puisque la norme ne s'applique plus seulement au béton prêt à l'emploi, mais aussi au béton fabriqué sur chantier et à la production d'éléments en béton préfabriqués. Pour la première fois, il est fait référence de façon explicite à une approche de la durabilité dans la norme, et ce dès son titre et son introduction : lors de l'élaboration de la norme européenne.

Lors de la parution de la norme, toutes les données et méthodes nécessaires à l'application de cette approche ne sont cependant pas disponibles. Le texte normatif se contente donc d'autoriser cette approche comme une alternative, mais il ne donne donc pas de méthodologie faisant référence à des modes opératoires définis. On présente dans ce paragraphe une brève partie de l'état de l'art des outils normatifs (bases de données) disponibles à l'étude de la durabilité des bétons.

## II.4.2 L'approche traditionnelle ou prescriptive

L'approche prescriptive ou obligation de moyens constitue l'approche traditionnelle de la durabilité des bétons, dans la mesure où la définition des constituants et de leurs proportions respectives est longtemps restée beaucoup plus aisée que celle des performances du matériau résultant. En particulier, dans cette approche, le degré de confiance sur les propriétés du ciment prime sur celui des autres composants du béton et sert de base à cet ensemble de spécifications. Les exigences relatives à cette approche sont détaillées dans la norme EN 206-1, « Valeurs limites pour la composition du béton » <sup>[1]</sup>. Elles portent principalement sur :

- les propriétés des constituants
- le rapport maximal eau/ciment
- le dosage minimal en ciment

Les normes de références NA.F.1 et NA.F.2 s'appliquant à certaines familles d'éléments en béton. Les valeurs limites données prennent en compte des exigences sur la base d'une durée de vie présumée d'au moins 50 ans pour la structure, sous réserve que l'enrobage des armatures, la mise en place et la cure du béton soient conformes et adaptés.

Les valeurs limites du rapport maximal eau/ciment et du dosage minimal en ciment sont adaptées de la normalisation européenne à titre informative, et s'entendent pour une utilisation des ciments (selon la norme NF EN 197-1) dont la composition du béton peut comprendre l'utilisation d'additions. Ainsi, La norme NF EN 206-1 donne donc des valeurs limites de rapport maximal eau efficace/liant équivalent (noté  $E_{eff}/L_{iant\ eq}$ ) et de dosage minimal en liant équivalent ( $L_{iant\ eq}$ ). Le liant équivalent comporte des limitations sur la proportion maximale d'additions prise en compte dans le calcul par le concept d'un coefficient  $k$  tenant compte de l'addition ajouté et l'environnement considéré.

Cette approche était déjà introduite dans la norme précédente NF P 18-305, et a été reprise de la norme NF EN 206-1 avec de légères modifications.

### II.4.2.1 Classe d'exposition et durée d'utilisation

Les textes normatifs pour la durabilité des bétons s'appuient sur la notion de classes d'exposition. Il s'agit de définir le type d'actions et de pathologies qui peuvent s'exercer sur le matériau en fonction de l'environnement dans lequel l'ouvrage, ou une partie d'ouvrage, va être exposée. Cependant, chaque ensemble de classes est défini en fonction de l'origine du risque :

---

[1] Notamment les normes NA.F.1 et NA.F.2 de la norme NF EN 206-1 : Valeurs limites applicables en France à la composition et aux propriétés des bétons (données sous forme de tableau).

X0 : absence de risque de corrosion ou d'attaque

XC : risque de corrosion par carbonatation

XD : risque de corrosion par les chlorures autres que ceux de l'eau de mer

XS : risque de corrosion par les chlorures de l'eau de mer

XF : attaque par le gel-dégel

XA : attaques d'origines chimiques

Pour chaque ensemble, les classes sont définies par des indices, selon des niveaux de risque croissants. Selon ces définitions des classes, un environnement donné peut correspondre à plusieurs classes d'exposition, par exemple XC (carbonatation) et XD (chlorures issus de sels de déverglaçage). A l'inverse, une même classe d'exposition peut correspondre à plusieurs actions environnementales et mécanismes de dégradation, par exemple la classe XF2 : Attaque gel/dégel, saturation modérée en eau avec agents de déverglaçage.

Les classes d'expositions ainsi définies correspondent aux valeurs limites et spécifications sur les constituants (par exemple sur le type de ciment) pour une classe d'exposition donnée.

Aussi, Ces classes permettent d'imposer des performances de durabilité minimum du béton en spécifiant des exigences sur la formulation.

La norme NF EN 206-1 (Afnor, 2004), en conformité avec l'Eurocode 2 (Afnor, 2005), définit 18 classes d'exposition regroupées par risque de corrosion (XC, XD, XS) et d'attaques (XF, XA) (pour plus de renseignements voir référence Normes NF EN 206-1). Elles dépendent des actions et conditions environnementales dans lesquelles le béton évolue.

Chaque partie d'ouvrage peut être soumise simultanément à plusieurs types d'actions. Il convient de préciser la combinaison de classes d'exposition. Le béton doit alors satisfaire les limites applicables qui sont les plus exigeantes sur ses propriétés.

La classe XS <sup>[1]</sup> est relative à la corrosion des armatures du béton par les chlorures de l'eau de mer. Les structures marines et tous les ouvrages situés à moins de 5 kilomètres des côtes sont concernés par ce type d'actions environnementales. Le tableau II-2 décline les trois sous ensembles de la classe XS en indiquant la description de l'environnement et des exemples informatifs.

---

[1] On prend par exemple le cas de la classe XS qui permet de traiter uniquement les bétons en milieu salin. Pour la simple raison que cette classe d'environnement est abordée dans notre mémoire.

**Tableau II-2** : Classes d'exposition XS1, XS2 et XS3 (Afnor, 2004)

Classes d'exposition	Description de l'environnement	Exemples informatifs
XS1	Exposé à l'air véhiculant du sel marin, mais pas en contact direct avec l'eau de mer	Structures à proximité d'une cote (entre 500 m et 1 km de la mer)
XS2	Immergé en permanence	Eléments de structures marines
XS3	Zone de marnage Zone soumise à des projections ou à des embruns	Eléments de structures marines Parties d'ouvrages situées entre 0 et 500 m de la mer

Les Eurocodes accentuent la prise en compte de la durabilité en considérant la notion de durée d'utilisation du projet. Ces durées sont définies dans l'Eurocode 2 (Afnor, 2003). Elle correspond à la période au cours de laquelle la structure doit rester utilisable en étant entretenue, mais sans qu'il soit question de réparations majeures.

#### **II.4.2.2 Etat limite et indice cible**

Les Eurocodes sont fondés sur la notion d'Etats Limites. Leur utilisation permet de définir l'état d'acceptation de la structure vis à vis d'un critère de performance. Deux états limites sont à distinguer :

- l'Etat Limite de Service (ELS) qui s'applique lorsque sont considérés aussi bien le fonctionnement de la structure, ou des éléments structuraux, en utilisation normale, le confort des personnes et l'aspect de la construction,
- l'Etat Limite Ultime (ELU) qui concerne la sécurité des personnes et/ou la sécurité de la structure.

Concernant la durabilité, la durée de vie des structures en béton est agencée suivant deux périodes qui pilotent le processus de dégradation comme illustrée comme suit :

- une période d'incubation pendant laquelle les agents agressifs transitent dans le matériau mais les processus physico-chimiques de la corrosion ne sont pas amorcés. Elle correspond donc au temps nécessaire pour que les aciers soient dépassivés par la pénétration des chlorures.
- Après la dépassivation, la corrosion devient possible. Sa progression, qui dépend des conditions d'exposition de l'ouvrage, peut conduire à la ruine. Cette phase correspond à une période de propagation.



Différents états limites possibles pour lesquels la structure doit être dimensionnée peuvent ainsi être définis (Duracrete, 2000) :

- \* ELS 1 : dépassivation des armatures,
- \* ELS 2 : apparition des premières fissures dues aux produits de corrosion,
- \* ELS 3 : éclatement du béton en parement (si la chute n'induit pas de mise en danger),
- \* ELU : effondrement de la structure par perte de section des aciers.

L'objectif de dimensionnement probabiliste est donc de s'assurer que pour un matériau et un enrobage donnés, la probabilité de d'amorçage de la corrosion, caractérisée par une concentration critique, est inférieure à 6,7 %, c'est-à-dire que l'indice de fiabilité est supérieur à 1,5.

### II.4.2.3 Influence de la formulation du matériau et son enrobage sur la durabilité

#### i) Formulation

Le document de référence pour le choix de formulation d'un béton est la norme NF EN 206-1 (Afnor, 2004). Les valeurs limites pour la composition et les propriétés pour chaque classe d'exposition sont précisées sur les critères suivants : rapport  $E_{eff}/L_{eq}$  maximal, classe de résistance minimale du béton, teneur minimale en liant équivalent, teneur minimale en air (le cas échéant).

Les exigences associées à la classe d'exposition XS2 par exemple sont synthétisées dans le tableau II-3 :

**Tableau II-3** : Spécifications relatives aux bétons immergés dans l'eau de mer (Afnor, 2004)

Classe d'exposition	$E_{eff}/L_{eq}$ maximum	Classes de résistance minimale	Teneur minimale en liant équivalent	Nature du ciment
XS2	0,55	C 30/37	330Kg/m <sup>3</sup>	Ciment de caractéristique complémentaire PM

D'autres exigences portent sur les additions en fonction de leur type. Pour les fumées de silice qui sont traitées dans cette étude, la quantité d'additions A et de ciment C doivent respecter le rapport suivant :  $A/A+C \leq 0,1$ .

Les ciments courants font l'objet de la norme NF EN 197-1 (Afnor, 2001) ou sont définis les constituants du ciment et les différents types. L'emploi de ciment présentant des caractéristiques adaptées aux environnements agressifs fait l'objet de normes spécifiques.

Pour les ouvrages en site maritime, les ciments pour travaux à la mer PM présentent la mention PM « Prise Mer ». Les spécificités portent sur la composition du clinker, et la limitation des constituants secondaires et d'additifs.

Les ciments PM qui rentrent dans ce cadre présentent des teneurs en  $C_3A$  inférieures ou égales à 10 % pour limiter l'agression des sulfates sur le béton au cours de la prise et ultérieurement. En outre, ils doivent respecter les conditions récapitulées dans le tableau II-4.

**Tableau II-4** : Spécifications relatives aux ciments CEM I PM et CEM II/A PM (Afnor, 2001)

Ciments	$C_3A$	$Al_2O_3$	MgO	$SO_3$	$S^{--}$
CEM I	$\leq 10 \%$ (et $C_3A+0,27 C_3S$ $\leq 23,5 \%$ )	$\leq 8 \%$	$\leq 3 \%$	$\leq 3 \%$ $\leq 2,5 \%$ si                      si $C_3A \leq 8\%$ $C_3A > 8 \%$	$\leq 0,2 \%$
CEM II/A	$\leq 10 \%$	-	$\leq 4 \%$	$\leq 3 \%$	$\leq 0,5 \%$

## ii) Enrobage

L'enrobage des armatures représente la distance entre la surface du béton et l'acier le plus proche. Il est essentiel pour assurer la durabilité du matériau en protégeant l'acier de la corrosion le temps de la pénétration des chlorures. L'Eurocode 2 (Afnor, 2005) définit les règles de calcul de l'enrobage.

La détermination de l'enrobage minimum comporte plusieurs étapes qui prenant en compte : la classe d'exposition, la classe structurale et ses modulations possibles, le type d'armatures, et d'éventuelles contraintes particulières.

### II.4.2.4 Limites de l'approche prescriptive

L'inscription de l'approche prescriptive traditionnelle dans la nouvelle démarche a priori performantielle à l'origine de la définition des classes d'exposition crée des ambiguïtés voire des incohérences (NF EN 206 – 1).

La définition des classes d'exposition peut poser problème au maître d'ouvrage, malgré (ou en raison des) précisions apportées par la norme française NA-4.1, qui donne par exemple la carte des zones de gel en France. Ainsi dans la norme française les classes XF sont définies en fonction de la présence ou non d'agents de déverglaçage, et selon les cas de gel : faible, modéré ou sévère – et non plus en fonction du degré de saturation en eau du béton (dans la norme européenne). En outre, des ensembles de valeurs limites identiques sont définis, même si les origines et les niveaux du risque sont différents, par exemple : XC3 =

XC4 = XD1 = XF1 – ce qui remet en cause l'approche performantielle des classes d'exposition. La définition même des classes peut elle même être ambiguë (Roziere, 2007).

De plus, des normes visant à prévenir les problèmes de dégradation prématurée et de corrosion pour les ouvrages en béton exposés à des environnements agressifs, restreignent la concentration en chlorures dans les structures en béton armé. Cependant, ces normes basées sur les risques de corrosion sont fonction de la teneur en chlorures totaux dans le matériau, sans tenir compte de la capacité de rétention des chlorures par la pâte de ciment, fait que plusieurs travaux de recherche ont mis en évidence d'autres paramètres introduisant la notion de témoin de vie d'un ouvrage.

### **II.4.3 Indicateurs de durabilité**

Pour assurer la durabilité d'un béton de structure vis-à-vis d'agressions chimiques extérieurs, les normes actuelles EN 206-1 <sup>[1]</sup> imposent des exigences en terme de moyens de formulation, portant sur le E/C maximum et le dosage en ciment minimum à utiliser en fonction de l'environnement extérieur. Ces critères constituent un progrès par rapport à l'époque où seule la résistance mécanique était considérée. Ils sont toutefois insuffisants pour traduire la durabilité des bétons actuels. De plus, ces paramètres de formulation sont inadaptés pour quantifier le phénomène de pénétration des chlorures et pour servir de données dans l'utilisation des méthodes physico-chimiques de prédiction de la durée de vie. Ce faisant, on s'oriente de plus en plus vers l'utilisation d'indicateurs de durabilité physiques et chimiques qui expriment directement les performances du matériau en terme de durabilité (Baroghel, 2004). On présente ici les indicateurs physico-chimiques dite parfois performantiels qui conditionnent la cinétique de pénétration des chlorures.

#### **II.4.3.1 Indicateurs physico-chimiques de durabilité**

La nouvelle approche de la durabilité requiert des indicateurs de durabilité. Il s'agit de paramètres relatifs au matériau constitutif béton, qui apparaissent comme fondamentaux pour l'évaluation et la prédiction de la durabilité du matériau et de la structure interviennent par exemple dans les équations régissant les phénomènes et figurent parmi les données d'entrée des modèles de prédiction de la durée de vie. Cette première condition permet d'assurer leur pertinence théorique. Une seconde condition doit en outre être vérifiée : ces paramètres doivent être facilement quantifiables à partir d'essais de laboratoire pratiqués sur éprouvettes ou sur prélèvements, selon des modes opératoires bien définis et validés. Les méthodes d'essai doivent de plus présenter une reproductibilité, une précision, une simplicité et une rapidité adéquates (Baroghel, 2004).

---

[1] Norme européenne : bétons – Partie I : spécifications, performances, production et conformité. A.F.N.O.R., janvier 2000 et dispositions nationales.

On peut distinguer deux catégories d'indicateurs :

- d'une part, les indicateurs de durabilité généraux (porosité accessible à l'eau ; coefficient de diffusion (apparent ou effectif) des ions chlorure ; perméabilité aux gaz ; perméabilité à l'eau liquide ; teneur en portlandite  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), qui sont valables pour différents types de dégradation (corrosion des armatures, alcali-réaction...);
- d'autre part, les indicateurs de durabilité spécifiques à un processus de dégradation donné (teneur en C-S-H ; Indicateurs chimiques microscopiques ; quantité de silice ; concentration en alcalins), par exemple l'alcali-réaction ou le gel.

#### **II.4.3.2 Techniques et méthodes de durabilité**

Il n'existe pas encore de véritables recommandations consensuelles de la communauté scientifique sur le mode opératoire à utiliser ; néanmoins, il existe plusieurs techniques de quantifier ou plutôt de qualifier la durabilité d'un béton.

Encore inenvisageable il y a quelques années, l'application d'une approche performantielle semble désormais possible et nécessaire. Possible car admise dans les documents normatifs tels que la norme française NF EN 206-1 et la norme européenne dont elle dérive. En outre les travaux préalables à une normalisation sont en cours pour les essais liés à la pénétration des chlorures dans le béton. Le mode opératoire de l'essai de migration des chlorures en régime permanent et transitoire ont été harmonisés dans le cadre des projets français GranDuBé et européen Chlortest, et il fait l'objet d'une norme Nordtest (voir tableau II-5). Possible, le recours à une application d'une approche performantielle est aussi nécessaire dans certains cas. En effet, l'approche traditionnelle fondée sur les valeurs limites de teneur en liant et de rapport eau efficace/liant peut s'avérer satisfaisante pour un liant donné, mais l'approche du liant équivalent, conçue du point de vue de la résistance mécanique, est restrictive et souvent mise en défaut du point de vue de l'évaluation de la durabilité. Pour comparer les performances de bétons de liants, de volumes de pâte voire de granulats différents, il était donc nécessaire de disposer d'une méthodologie à la fois moins restrictive et plus discriminante.

Enfin, pour des ouvrages de grande envergure ou importants avec de très hautes exigences de durabilité, en particulier en matière de résistance aux chlorures, et pour lesquels des bétons avec des ciments Portland composés (ciment Portland avec cendres volantes, laitier ou fumée de silice) ou avec des ajouts sont employés, il convient d'effectuer dans le cadre des essais préliminaires des mesures plus poussées pour l'amélioration de la résistance aux chlorures avec l'âge du béton.

**Tableau II-5** : Modes opératoires d'essais de durabilité liés aux chlorures.

Exposition	Mode opératoire	Référence
Chlorures	Méthode de prélèvement d'échantillons (poudres) pour la mesure de teneur en chlorure dans le béton	AFPC-AFREM (1997)
	Extraction et dosage des chlorures libres (extraits à l'eau) et totaux dans le béton	AFPC-AFREM (1997)
	Essai accéléré de corrosion par immersion séchage sur éprouvettes de béton armé	AFPC-AFREM (1997)
	Essai de brouillard salin sur grand corps d'épreuve	AFPC-AFREM (1997)
	Essai dynamique de brouillard salin	AFPC-AFREM (1997)
	Extraction et dosage des chlorures libres et totaux dans un béton durci	GranDuBé (2006)
	Détermination des isothermes d'interaction entre les ions chlorures et le béton	GranDuBé (2006)
	Détermination des coefficients de diffusion effectif et apparent des chlorures dans le béton par essais de migration en régime permanent et transitoire	GranDuBé (2006)
	Essai d'immersion pour la détermination du coefficient de diffusion des chlorures en régime non stationnaire par mesure du profil de pénétration	NT Build 443
	Essai de migration pour la détermination du coefficient de migration des chlorures en régime non stationnaire	NT Build 492
	Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration	ASTM C 1202-05 (2005)

#### II.4.3.3 Spécifications relatives à la durabilité

Depuis plusieurs années déjà se manifeste le besoin d'inclure des spécifications scientifiquement fondées, relativement à la durabilité du béton armé, dans les documents normatifs, ainsi que dans les règlements de conception. Des textes fondés sur les indicateurs de durabilité et les classes précédemment définis (EN 206-1) ont été élaborés sur la base de données expérimentales obtenues sur une large gamme de bétons allant des Bétons ordinaires aux Bétons de (très) haute performance, et ont été vérifiés par des simulations numériques impliquant plusieurs types de modèles.

Pour chaque durée de vie (niveau d'exigence) et pour chaque type d'environnement considéré, l'ensemble des indicateurs déjà prédéfinis doivent être quantifiés et différents critères de conformité doivent être vérifiés. Le tableau II-6 illustre, dans le cas de structures en environnement modérément agressif (chlorure) les spécifications relatives à la durabilité. A noter que le niveau d'exigence et l'agressivité du milieu environnant augmentent, le nombre d'indicateurs à contrôler croit également, et les critères deviennent plus sévères.

**Tableau II-6 :** Exemple de spécifications proposées pour la durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures induite par les chlorures, en fonction du type d'environnement et de la durée de vie exigée, et dans le cas où l'enrobage est égal à 50 mm. Les valeurs indiquées correspondent à des éprouvettes conservées dans l'eau pendant 3 mois au plus après le coulage (Baroghel et col., 2005).

Type d'environnement →	5		6	7
Durée de vie exigée/ Catégorie d'ouvrage/ Niveau d'exigence ↓	Exposition aux sels marins ou de déverglaçage  5.1                      5.2 [Cl <sup>-</sup> ] faible              [Cl <sup>-</sup> ] forte		Immersion dans l'eau contenant des chlorures	Zone de marnage
< 30 ans <b>Niveau 1</b>	$P_{\text{eau}} < 16$	$P_{\text{eau}} < 14$	$P_{\text{eau}} < 15$	$P_{\text{eau}} < 14$
de 30 ans à 50 ans Bâtiment <b>Niveau 2</b>	$P_{\text{eau}} < 15$	$P_{\text{eau}} < 11$	$P_{\text{eau}} < 13$	$P_{\text{eau}} < 11$
de 50 ans à 100 ans Bâtiment et Ouvrages de G.C.I <b>Niveau 3</b>	$P_{\text{eau}} < 14$	$P_{\text{eau}} < 11$ $D_{\text{app(mig)}} < 2$ $K_{\text{liq}} < 0,1$	$P_{\text{eau}} < 13$ $D_{\text{app(mig)}} < 7$	$P_{\text{eau}} < 11$ $D_{\text{app(mig)}} < 3$ $K_{\text{liq}} < 0,1$
de 100 ans à 120 ans Grands ouvrages <b>Niveau 4</b>	$P_{\text{eau}} < 12$ $D_{\text{app(mig)}} < 20$ $K_{\text{liq}} < 0,1$	$P_{\text{eau}} < 9$ $D_{\text{app(mig)}} < 1$ $K_{\text{app(gaz)}} < 30$ $K_{\text{liq}} < 0,01$	$P_{\text{eau}} < 12$ $D_{\text{app(mig)}} < 5$	$P_{\text{eau}} < 10$ $D_{\text{app(mig)}} < 2$ $K_{\text{app(gaz)}} < 100$ $K_{\text{liq}} < 0,05$
> 120 ans Ouvrages dits exceptionnels <b>Niveau 5</b>	$P_{\text{eau}} < 9$ $D_{\text{app(mig)}} < 10$ $K_{\text{app(gaz)}} < 30$ $K_{\text{liq}} < 0,01$	$P_{\text{eau}} < 9$ $D_{\text{app(mig)}} < 1$ $K_{\text{app(gaz)}} < 30$ $K_{\text{liq}} < 0,01$	$P_{\text{eau}} < 9$ $D_{\text{app(mig)}} < 1$	$P_{\text{eau}} < 9$ $D_{\text{app(mig)}} < 1$ $K_{\text{app(gaz)}} < 30$ $K_{\text{liq}} < 0,01$

$P_{\text{eau}}$  : porosité accessible à l'eau (en %).

$D_{\text{app(mig)}}$  : coefficient de diffusion apparent des chlorures mesuré par essai de migration (en  $10^{-12} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ).

$K_{\text{app(gaz)}}$  : perméabilité apparente aux gaz mesurée avec un perméamètre à charge constante à  $p_{\text{entrée}} = 0,2 \text{ Mpa}$  et après étuvage à  $T = 105^\circ\text{C}$  ( $s = 0$ ) (en  $10^{-18} \text{m}^2$ ).

$K_{\text{liq}}$  : perméabilité à l'eau liquide (à  $p_{\text{max}}$  par mesure directe du flux, après saturation) (en  $10^{-18} \text{m}^2$ ).

Dans la pratique, les spécifications proposées peuvent être adaptées ou complétées pour tenir compte des spécificités du béton étudié.

Cette approche prédictive multi-niveaux peut être appliquée, d'une part en phase de conception des ouvrages, phase capitale car c'est à ce stade que l'on peut agir au maximum sur le niveau de durabilité, et d'autre part pendant le suivi de structures existantes (dégradées ou non).

Cependant, la comparaison des résultats des mesures effectuées sur des bétons de laboratoire avec ceux des mesures effectuées sur des ouvrages montre que les exigences de résistance aux chlorures des bétons de nouveaux ouvrages doivent être fixées à un niveau assez élevé pour obtenir une durabilité suffisante (Tableau II-6).

Une autre proposition, mais qui tient compte cette fois-ci d'une valeur isolée - coefficient de migration - a été établie pour un projet de norme pour les différentes classes d'exposition (voir tableau II-7).

**Tableau II-7 :** Recommandations pour des valeurs isolées admises du coefficient de migration mesuré au moyen du test ibac à l'âge de 28 jours pour les classes d'exposition XD (corrosion provoquée par les chlorures) (Hunkeler et col., 2002).

Classe d'exposition selon SN EN 206-1 : 2000		Enrobage	
		40 à 50 mm	70 à 80 mm
	Type de sollicitation	Valeurs isolées admises du coefficient de migration, m <sup>2</sup> /s	
XD 1	Brouillard salin	≤ 20 10 <sup>-12</sup>	Pas d'exigences (≤ 40 à 60 10 <sup>-12</sup> )
XD 2	Contact permanent avec de l'eau contenant des chlorures	Pas d'indications par manque d'expérience (recommandation : comme XD 3)	
XD 3	Projections ou contact avec de l'eau contenant des chlorures (en alternance)	≤ 10 10 <sup>-12</sup>	≤ 20 à 30 10 <sup>-12</sup>

Afin d'obtenir en pratique les valeurs isolées admises du tableau (II-7), il faut tenir compte de la dispersion analytique et l'inhomogénéité du matériau. De ce fait, la valeur moyenne ciblée doit être réduite d'un tiers (Hunkeler et col., 2002).

En outre cette approche sert à l'heure actuelle de référence pour notre étude de recherche exposée en dernier chapitre.

## II-5 CONCLUSION

Ce chapitre s'est intéressé à un état des lieux sur la durabilité des bétons en environnement marin. En fait, il été montré que la présence des chlorures engendre un processus de diffusion dont le transfert des molécules ou d'ions dans la solution interstitielle et à une quantité suffisante de chlorure peuvent détruire la passivité des aciers et amorcer la deuxième étape, à savoir la propagation de la corrosion. Cette dernière induit progressivement à la formation de fissures et au décollement du béton d'enrobage.

Pour éviter le développement de la corrosion, il faut autant que possible allonger la période d'amorçage en utilisant des bétons compacts et peu perméables. Les normes devraient imposer des dispositions complémentaires à l'amont et constituer une aide à la formulation de nos bétons permettant d'inclure la problématique et exiger des paramètres pertinents dépendant étroitement du transport des ions chlorures dans la masse du béton.

En égard aux observations expérimentales tirées de la littérature scientifique, il est ressorti que les modes de transport semblent jouer un rôle crucial dans l'étude de la performance d'un béton.

Le chapitre qui suit explique le transfert de matière sous ces différentes formes, en se basant sur l'aspect théoriques des lois régissant les phénomènes de transport dans les bétons. De ce fait, plusieurs paramètres basés sur des méthodes et techniques capables de fournir avec suffisamment de précision des témoins de durée de vie indispensables permettant en plus d'une évaluation de l'état de dégradation du béton, une classification en terme de durabilité.