

# OUVRAGES

---

■

## CORROSION DES ARMATURES

### ◆ Introduction

Dans le béton, la protection des armatures est liée à deux processus :

- **chimique**, par l'alcalinité produite lors de l'hydratation du ciment,
- **physique**, par l'enrobage, agissant comme une barrière vis à vis de l'environnement.

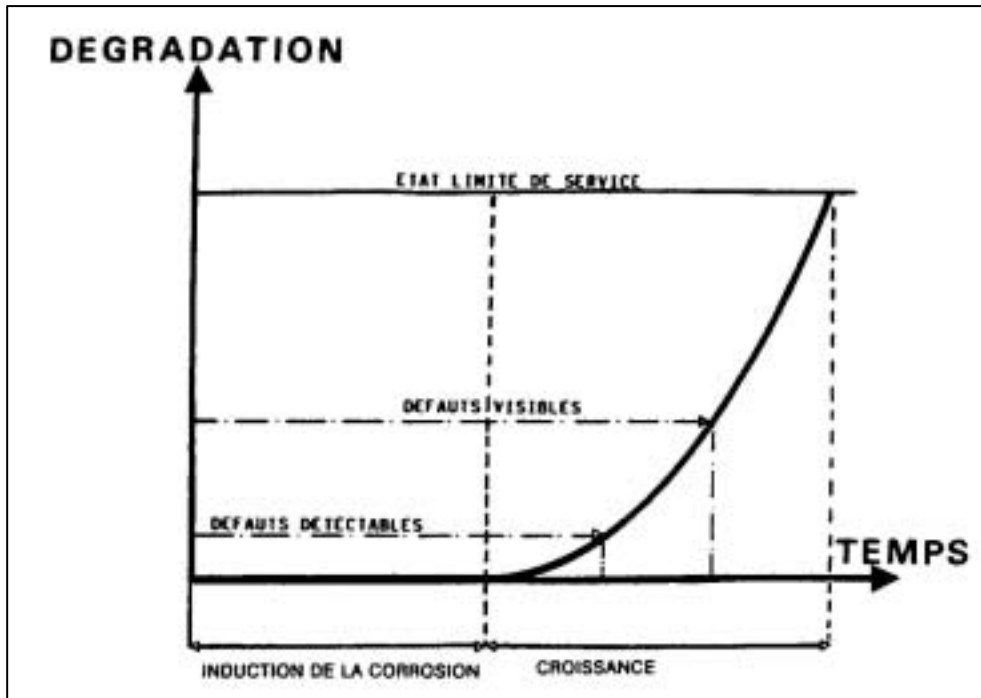
Il est admis que le mécanisme de la corrosion des armatures procède en deux étapes successives :

- la phase dite « *d'amorçage* » qui correspond à la pénétration des agents agressifs (principalement le gaz carbonique de l'air et les chlorures) au travers de la couche d'enrobage, jusqu'au démarrage de la corrosion de l'armature (destruction du « *film passif* »). Elle peut avoir de nombreuses implications (modélisation de la pénétration des agents agressifs, développement de méthodes de détection et de contrôle, etc.).
- la phase dite « *de croissance* » qui correspond à la formation des oxydes de fer expansifs, et à l'endommagement du complexe armature-béton. Elle est particulièrement liée à la vitesse de corrosion (voir figure ci-après).

Le béton est un matériau en perpétuelle évolution et il réagit avec le milieu extérieur. La corrosion des armatures peut alors se produire si les conditions de protection ne sont plus respectées.

En fait les principaux paramètres qui conditionnent le comportement d'un ouvrage vis à vis de la corrosion sont, dans l'ordre de leur importance :

- 1- **l'enrobage**,
- 2- **la qualité du béton**,
- 3- **l'environnement**, qui joue un rôle accélérateur des processus.



Evolution de la dégradation globale du béton armé due à la corrosion des armatures.

### ◆ Phase d'amorçage de la corrosion

La période d'amorçage ou d'incubation dépend en grande partie des processus assurant le transport des éléments agressifs jusqu'à l'armature, mais aussi des réactions chimiques se produisant au sein du béton et des réactions électrochimiques à l'interphase. La qualité de l'enrobage (perméabilité, épaisseur...) joue un rôle fondamental sur la pénétration des agents agressifs.

Les processus de transport dans le béton obéissent à certaines lois (Lois de diffusion). Les ions, responsables de la corrosion ne font pas exception et leur transport ne peut s'effectuer que dans la phase aqueuse.

Les mouvements de l'eau sont également très importants car ils assurent en grande partie le transport d'ions ou molécules dissous, par capillarité. Ils sont principalement dus à des variations de température, de pression ou au contact entre le béton et l'eau liquide (immersion, pluie...), la peau du béton étant le plus souvent soumise à des cycles de séchage-humidification.

Les deux principaux agents agressifs susceptibles d'amorcer la corrosion des armatures sont :

- Le gaz carbonique
- Les chlorures

La carbonatation correspond au vieillissement naturel du béton. Le gaz carbonique de l'air neutralise la chaux du béton constituant la réserve alcaline. La couche passive se dissout dès que le pH passe au dessous de 9.

La vitesse de carbonatation est fonction de la racine carrée du temps ; elle dépend de très nombreux paramètres dont :

- la nature et le dosage en ciment
- la compacité (rapport E/C, vibration, ...)
- l'exposition
- l'historique (cure, ..)

L'action spécifique des **ions chlorures** sur la corrosion de l'acier (corrosion par piqûres) a depuis très longtemps attiré l'attention des spécialistes. Le problème est en fait assez complexe, mais on peut le concevoir globalement comme une rupture du film passif.

Dans le cas du béton armé, les chlorures peuvent avoir deux origines :

- **Externe** : par pénétration du milieu ambiant (eau de mer, embruns, sels de déverglaçage...).

- **Interne** : présence d'adjuvants chlorurés incorporés lors du gâchage.

Il a souvent été écrit qu'il était nécessaire d'atteindre une teneur limite en chlorures pour la dépassivation de l'acier.

Celle-ci a été évaluée expérimentalement en fonction des caractéristiques du béton ou de son environnement, soit sur béton ou mortier, soit à l'aide de solutions synthétiques. Toutefois, de nombreuses divergences existent entre les résultats (de 0,1 à plus de 1 % exprimé par rapport au ciment).

Les paramètres suivants ont été étudiés :

- rapport E/C,
- nature du liant (teneur en aluminat tri calcique),
- nature des additifs (fumées de silice, cendres, etc...). Il a été montré que des teneurs en chlorures plus faibles que dans un béton ordinaire étaient nécessaires pour dépassiver l'acier (0,2 %), mais que la vitesse de corrosion était plus faible
- les conditions environnementales (température, humidité, ...),
- etc...

On est en droit de se poser la question de la pertinence d'une telle limite, si fluctuante. Même en considérant le seul rapport Cl/OH, représentatif de la solution interstitielle, les résultats divergent. Hausman estime cette limite à 0,6. D'autres auteurs trouvent des rapports beaucoup plus éloignés (de 1 à 11 !). Les conditions expérimentales variables sont vraisemblablement à l'origine de cette dispersion. Toutefois, certains auteurs ont souligné l'importance de l'état de surface de l'acier sur cette teneur limite en chlorures.

### ● CORROSION PAR PIQURES

Il est souvent considéré que le mécanisme débute par une corrosion par piqûres. L'influence des chlorures sur ce type de corrosion a été établie depuis longtemps, mais on ignore le rôle précis qu'ils jouent : s'ils causent la rupture du film passif, ou s'ils empêchent la repassivation après la phase d'amorçage. C'est un stade très difficile à étudier, compte tenu de son stade très transitoire et des difficultés expérimentales (reproductibilité).

Par ailleurs, des relations directes entre le pH et une teneur limite en chlorures ne sont pas formellement établies, même si on peut estimer que les ions  $\text{OH}^-$  adsorbés à la surface du métal, sont en compétition avec les ions  $\text{Cl}^-$ .

● **CONCEPT DE CELLULES OCCLUSES**

L'ensemble de ces données ne forme pas un ensemble cohérent quant à la compréhension des mécanismes. Nous pensons devoir pour cela introduire le concept de cellule occluse ou milieu confiné.

Le béton n'est pas un matériau homogène, que ce soit à l'échelle macro ou microscopique. Ces hétérogénéités résultent de la présence de la calamine, de pores, des hydrates du ciment, des granulats, de micro fissures. Le processus de prise introduit également des hétérogénéités physiques et chimiques. A l'échelle macroscopique, elles sont dues à des gradients de température, des accès non uniformes de l'eau et des sels, des non uniformités de mise en oeuvre. Les processus de corrosion s'amorcent et se poursuivent dans ce milieu hétérogène.

Les fondements de base du mécanisme sont les suivants :

- **Formation d'interstices**, ou cellules occluses
- **Echange de matière réduit** entre l'intérieur de la cellule et l'extérieur,
- **Modification de la chimie locale.**

La surface de l'acier est ainsi en contact avec une phase liquide plus ou moins continue et de nombreuses phases solides formant une multitude de zones confinées.

Dans celles-ci, la corrosion de l'acier, si minime soit elle, conduit inévitablement à un appauvrissement en oxygène. Un rapide calcul montre (on peut considérer qu'un courant de corrosion de  $0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  correspond à  $1 \mu\text{m}$  par an) que cet appauvrissement peut prendre quelques heures seulement, ce qui est court dans la vie de l'ouvrage. Ceci ne suffit pas pour autant à expliquer l'accélération de la corrosion. Ce sont les modifications du milieu dans la caverne qui sont la véritable cause de l'accélération des phénomènes.

● **FORMATION DE ROUILLE VERTE**

Le passage des ions ferreux en solution, s'accompagne, selon le pH et la teneur en chlorures, de la formation d'une solution composée d'ions  $\text{Fe}^{2+}$ , d'hydroxydes et d'anions ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{OH}^-$ ). Si le rapport  $\text{Cl}^-/\text{OH}^-$ , devient supérieur à l'unité, il se forme alors un complexe identifié comme étant la rouille verte (GR11), stable en l'absence d'oxygène. Le contact avec l'oxygène amène l'oxydation de ce composé en magnétite noire ou en oxy-hydroxyde avec libération d'ions  $\text{H}^+$ . Le milieu s'acidifie alors et devient de plus en plus agressif. Dans le cas des chlorures, c'est de l'acide chlorhydrique qui se forme, alors que dans le cas de la carbonatation, les équilibres calco-carboniques jouent un rôle tampon.

En fait, ni le pH ni la teneur en chlorures ne sont connus avec précision. En effet, les chlorures peuvent exister sous trois formes au sein du béton :

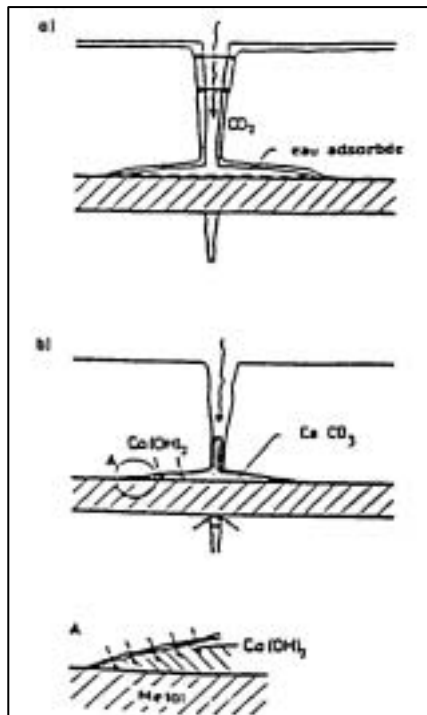
- **Chlorures libres** : dissous dans la solution interstitielle, ils interviennent directement dans le processus de corrosion,
- **Chlorures adsorbés** physiquement dans les pores,
- **Chlorures chimiquement liés** (principalement sous forme de chloroaluminates) résultant de réactions chimiques entre le milieu environnant et les phases cristallines du ciment hydraté.

Ces trois formes sont en équilibre et leurs proportions respectives peuvent varier en fonction de nombreux facteurs : teneur globale en chlorures, humidité du béton, température, âge du béton...

On estime donc généralement que la corrosion peut s'amorcer lorsque la teneur en chlorures atteint entre **0,4 et 1 %** en poids par rapport au ciment, au droit de l'armature. Mais il n'existe pas de limite absolue, car la nature du ciment, la qualité du béton et les facteurs climatiques jouent un rôle important..

### ◆ Influence des fissures

Les fissures du béton ont un rôle à part. Ce sont en effet, des passages préférentiels pour le milieu ambiant. Dans le cas où elles pénètrent jusqu'à l'armature, le temps d'amorçage de la corrosion est très court. Il se produit tout d'abord une perte d'adhérence locale, pouvant se propager suivant le profil de l'acier. Le milieu agressif environnant pénètre alors jusqu'à l'acier, pour dépassiver localement le métal. Parallèlement, le front de progression des agents agressifs se modifie et il est alors possible que la micro fissuration joue un rôle dans ce domaine.



➤ *Obturation des fissures par des dépôts de  $\text{CaCO}_3$  en milieu atmosphérique*

Les zones anodiques se développent en fond de fissures. Néanmoins, des phénomènes physico-chimiques peuvent influencer l'évolution des processus :

- Obturation des fissures par des dépôts de  $\text{Ca CO}_3$  (atmosphère) ou de magnésie (milieu marin), limitant l'accès de l'oxygène ou des éléments agressifs par blocage. Le milieu électrolytique en fond de fissure peut se réorganiser en s'alcalinisant progressivement. L'armature, dépassivée durant la phase d'amorçage, peut ainsi se repassiver.
- Ouverture périodique des fissures sous l'influence par exemple, de charges répétées. Le liquide contenu dans la fissure est ainsi renouvelé périodiquement. La corrosion peut alors progresser très rapidement.

Il n'existe pas de relation directe entre la corrosion et l'ouverture des fissures, dans un domaine d'ouverture de 0,2 à 0,8 mm.

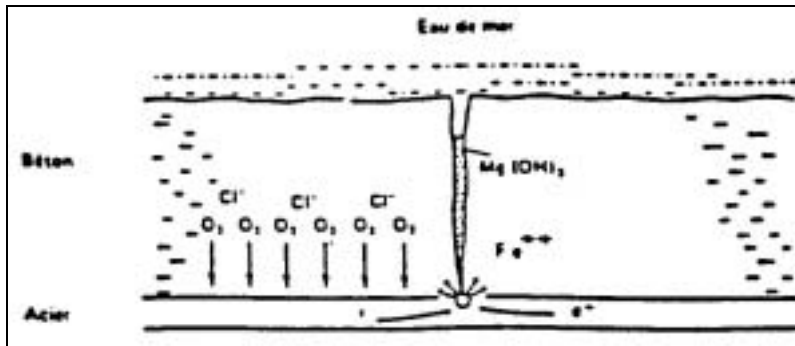


Schéma de la corrosion au fond d'une fissure, en milieu marin.

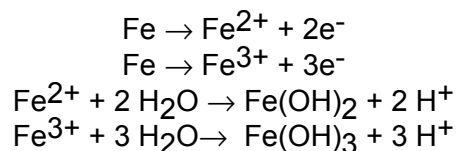
## ◆ Propagation

L'étape de croissance est essentiellement liée à la vitesse de corrosion. Elle dépend des vitesses des réactions électrochimiques, de la facilité de transport des produits de réaction et aussi de la facilité de passage du courant électrique créé par la formation de piles locales.

On examinera successivement les réactions anodiques, cathodiques, puis les phénomènes de transport de matière.

### ● REACTIONS ANODIQUES

L'attaque du fer se traduit par le passage à l'état ionisé ou à l'état d'oxydes:  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Fe(OH)}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ...



En fait, le mécanisme est probablement plus complexe, les produits finaux des réactions formant la rouille (mélange de goethite, lepidocrocite et magnétite).