

Chapitre V : La Corrosion des aciers d'armature

La durée de vie des structures en béton armé est conditionnée par la réponse aux agressions physiques et chimiques de l'environnement, ainsi que par la capacité des matériaux constitutifs à se protéger contre ces attaques. La corrosion des armatures est une des causes majeures de dégradation des structures en béton armé.

On peut définir la corrosion comme la transformation de métaux en composés divers sous l'action de phénomènes naturels. La dégradation causée par ce phénomène est facile à déceler. Les symptômes en sont une surface piquée, oxydée, laissant apparaître en générales des plaques et écailles d'oxydes facilement détachables, d'aspect rouge brun.



Fig 1 : Phénomène de dégradation du béton, corrosion des armatures

Mécanisme de corrosion

En effet, fortement basique ($\text{pH} \sim 12,5$), le béton protège naturellement les armatures par la création d'une couche d'oxyde passivant (film passif). Cette couche mince d'une épaisseur de 10^{-3} à 10^{-1} μm , constituée de $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, se génère peu après de l'hydratation du ciment, adhère fortement à la surface de l'acier et élimine tout contact que pourrait avoir l'acier avec l'oxygène et l'eau. Ce phénomène d'autoprotection de l'acier est appelé passivation de l'acier. La passivation disparaît cependant lorsque le béton entourant l'acier subit une réduction du pH.

Pour déclencher le processus de corrosion, il faut des changements (réactions) capables de modifier l'environnement de l'armature et de décomposer la couche superficielle de passivation. Les deux processus les plus rencontrés, et devant engendrer la corrosion des armatures sont :

- la carbonatation
- la pénétration des ions chlorures

Pour qu'il y ait corrosion de l'acier, trois facteurs sont nécessaires simultanément :

- présence d'un électrolyte
- dépassivation de l'acier
- présence d'oxygène

Si ces 3 conditions sont réunies, il y a corrosion électrochimique de l'acier ce qui est le cas le plus fréquent.

Comme toute réaction, une réaction électrochimique qui met en jeu des réactions entre des ions et des électrons, n'est possible sur le plan thermodynamique que lorsque le passage d'un état initial à un état final entraîne une diminution de l'enthalpie libre du système. Le phénomène de corrosion débute avec la création d'une pile électrochimique (figure 2). La solution interstitielle [KOH, NaOH et Ca(OH)₂] de la pâte de ciment durci relie une zone anodique à une zone cathodique.

La première étape de corrosion est la destruction de la couche passive par les ions chlore (Cl⁻) qui peuvent pénétrer par diffusion ou migrer par capillarité à l'intérieur du béton, franchir la zone d'enrobage, atteindre les armatures. Ces chlorures proviennent des sels de déverglaçage ou dans les embruns (en site maritime) et même parfois dans certains adjuvants. Ainsi la couche dépassivée devient le siège d'une **Anode**. Les ions ferreux Fe⁺⁺, chargés positivement, passent en solution à l'anode tandis que les électrons libres e⁻, chargés négativement, se déplacent à travers l'acier jusqu'à la **Cathode**, où ils sont absorbés par les constituants de l'électrolyte et se combinent avec de l'eau et de l'oxygène pour former des ions hydroxyle (OH)⁻. Ceux-ci se déplacent à travers l'électrolyte où ils se combinent avec les ions ferreux pour former de l'hydroxyle ferrique qui, par la suite, est transformé en rouille.

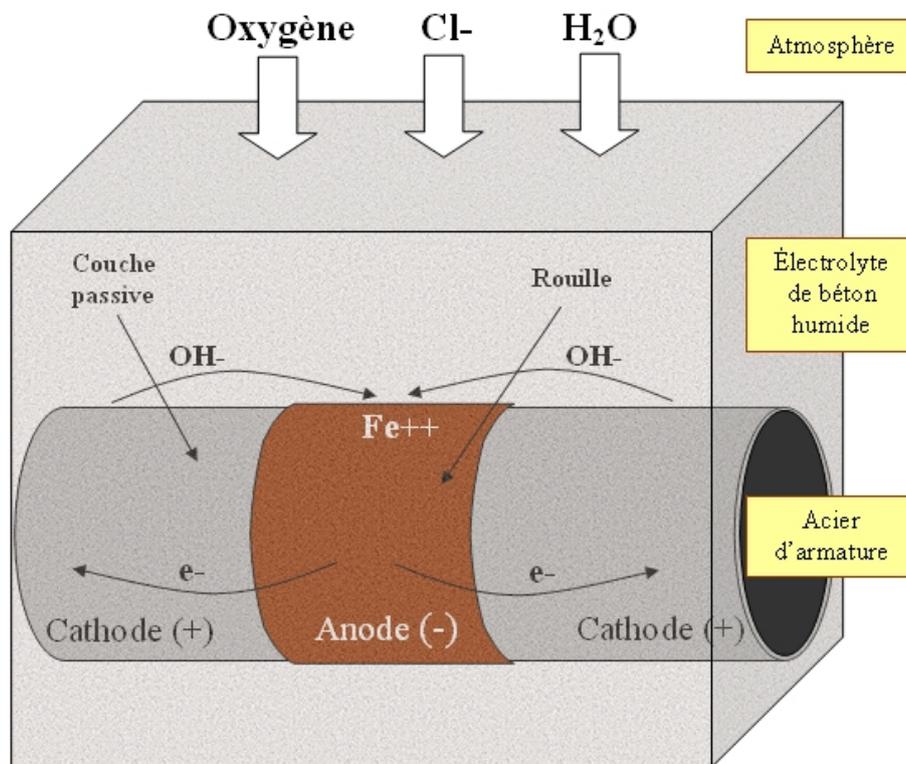


Fig 2 : Mécanismes de corrosion électrochimique des aciers d'armature en présence de chlorures

Les réactions se déroulent de la façon suivante :

- *réactions anodiques* :



- *réaction cathodique*:



Au cours de ces réactions, l'oxygène est consommé, alors que l'eau est recyclée, ce qui est nécessaire pour assurer la poursuite du processus. La corrosion ne peut donc avoir lieu dans un béton sec.

Conséquences de la corrosion

La formation des oxydes et hydroxydes de fer, plus communément appelés rouille, s'effectue au dépens du métal d'origine, avec une augmentation importante de volume. Les produits de corrosion des armatures foisonnent fortement en provoquant une poussée au vide sur le béton d'enrobage qui est alors délaminé le long des armatures (cas du béton carbonaté), ou pire encore, une corrosion dissolvante ou par piqûres qui élimine les armatures quasiment sans manifestation visible sur le parement (cas du béton chloruré).

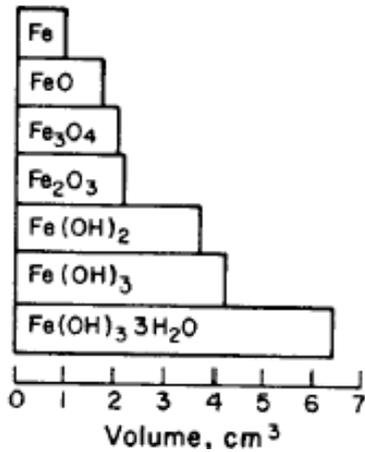


Corrosion des armatures par carbonatation



Corrosion par piqûres liées aux chlorures

La rouille qui se forme à la suite de la corrosion des aciers d'armature peut provoquer des dommages au béton parce que c'est un produit fortement gonflant. Dépendant de l'état d'oxydation, le fer métallique peut former des oxydes dont le volume peut être jusqu'à 6 fois supérieur au volume initial.



Volume relatif des produits d'oxydation

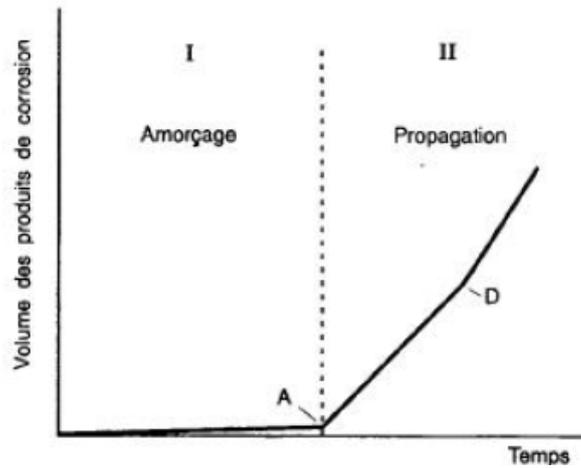


Schéma de la cinétique du comportement des armatures et du béton d'enrobage

La corrosion des armatures, au-delà des aspects esthétiques, provoque une perte de la section efficace des armatures et de leur adhérence au béton. Il s'en suit une perte de la capacité portante en service pouvant aller, si elle n'est pas traitée, jusqu'à la ruine de la structure. Les effets et conséquences de la corrosion sont divers et peuvent être représentés par la figure suivante.

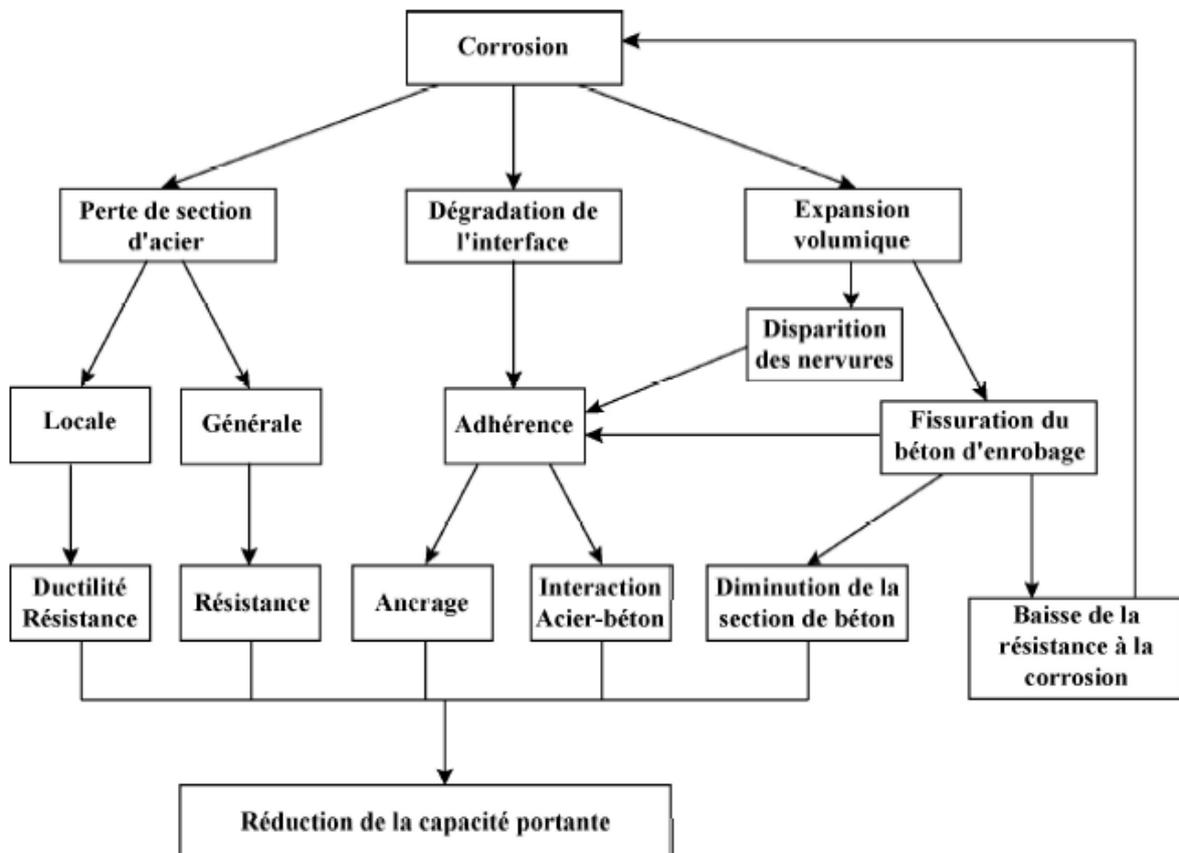


Fig 3: Effets de la corrosion sur le comportement mécanique des structures corrodées

Les méthodes d'évaluation

De nouvelles techniques d'investigation de la corrosion sur des ouvrages existants se développent continuellement. Ces méthodes utilisent souvent des technologies avancées. Pour connaître par exemple l'état des barres d'aciers et déterminer leurs positions et leurs diamètres, un moyen simple de détection à partir d'un essai non destructif en utilisant un **pachomètre** ou **profomètre** (figure 4). L'appareil génère un champ magnétique qui interagit avec les propriétés magnétiques de l'objet à détecter. Cet appareil permet aussi de déterminer l'état de corrosion des barres d'aciers. Cependant, la présence de plusieurs nappes d'armatures fausse des fois les mesures, et la limite de détection ne dépasse pas les profondeurs supérieures à 10 cm.



Fig 4 : Pachomètre, appareil de détection des armatures d'acier dans le béton

La détection de la corrosion par les mesures de potentiel :

Cette technique est adaptée à la localisation des zones corrodées lorsque les manifestations (fissure, et épaufrures,..) ne sont pas encore visibles. Le principe consiste à mesurer le potentiel à l'aide d'un voltmètre à grande résistance d'entrée. Il s'agit de mesurer la différence de potentiel entre l'armature et une électrode de référence (figure 5). La norme ASTM C 876, indique que la probabilité de corrosion est évaluée d'après la valeur du potentiel. Cependant, en pratique les critères de cette norme ne permettent pas de qualifier l'état des armatures car le potentiel mesuré en surface est fonction de nombreux paramètres

- la qualité du béton : sa résistance, porosité, la qualité de mise en œuvre, etc.,
- les conditions extérieures : humidité, la carbonatation, la teneur en chlorures, etc.,
- l'état de l'armature

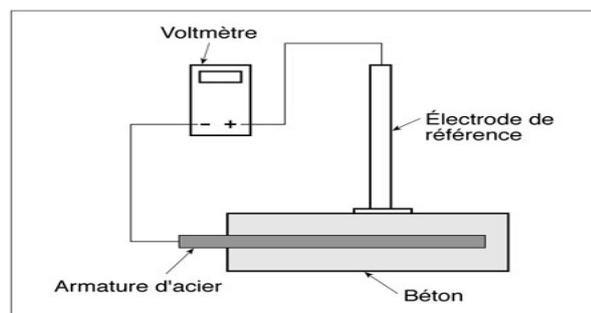


Fig 5 : Mesure du potentiel d'électrode d'une armature

Etat de corrosion :

- Acier passivé (non corrodé): +100 mV à -200 mV
- Lorsque la passivité est détruite localement : -200 mV à -500 mV
- Corrosion généralisée : -400 mV à -600 mV
- Le taux de corrosion maximal se développe généralement à un potentiel de -600 mV (figure 6)

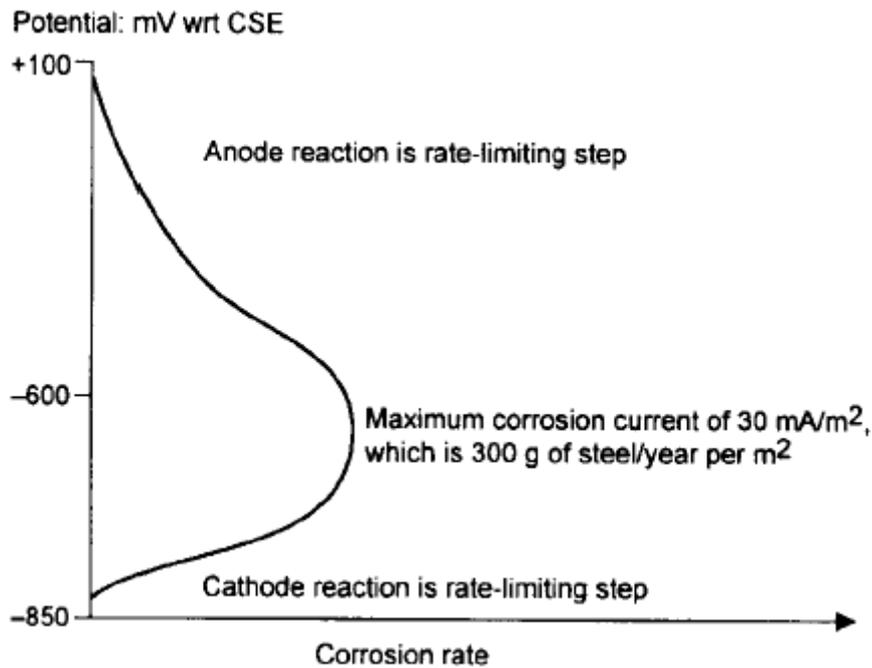


Fig 6: Relation entre le taux de corrosion et le potentiel relevé (à 20°C)

- Un potentiel supérieur à -600 mV indique que le taux de corrosion est contrôlé par la réaction anodique.
- Un potentiel inférieur à -600 mV indique que le taux de corrosion est contrôlé par la réaction cathodique. Le manque d'oxygène à la cathode diminue l'activité de corrosion.

Les méthodes de protection

➤ **Assurer un bon enrobage :**

Pour s'en prémunir du phénomène de corrosion et de garantir une durabilité accrue, un facteur essentiel à garantir, est l'enrobage des armatures par une couche en béton de protection suffisante. La norme européenne NF EN 1992-1-1 [Eurocode 2] préconise une protection des armatures contre la corrosion, qui dépend de l'agressivité du milieu dans lequel se trouve l'enrobage.

Enrobages minimaux requis en fonction du milieu. Le béton est de qualité courante				
Sec	Humide sans gel	Humide avec gel	Marin sans gel	Marin avec gel
15 mm	20 mm	25 mm	40 mm	40 mm

D'autres moyens simples peuvent protéger les armatures de la corrosion : une composition du béton adéquate et une mise en œuvre respectée.

➤ **Influence de la composition du béton :**

Toute modification de la formulation d'un béton produisant une augmentation de sa compacité ou une réduction de sa perméabilité a généralement un effet favorable sur la résistance à la corrosion.

Les principaux paramètres de composition qui influencent la corrosion des aciers d'armature sont :

- **Le rapport E/C:** La diminution du rapport E/C améliore considérablement la protection contre la corrosion.
- **Les ajouts minéraux:** Les cendres volantes et la fumée de silice ont généralement une influence bénéfique puisqu'elles produisent une très nette diminution de la perméabilité, du coefficient de diffusion et de la conductivité du béton.
- **L'apport d'un ciment riche en C₃A :** Les chlorures en solution qui pénètrent dans le béton peuvent réagir chimiquement avec le C₃A du ciment. Cette réaction produit des monochloroaluminates hydratés (C₃A. CaCl₂.10H₂O) qui est un hydrate relativement stable dans le béton. La formation des chloroaluminates permet de fixer des chlorures dans le béton, ce qui réduit la teneur en chlorures soluble et, par le fait même, les risques de corrosion. Ce phénomène explique pourquoi les ciments riches en C₃A offrent en général une meilleure protection contre la corrosion des aciers d'armature.

➤ **Influence de l'humidité :**

La vitesse de corrosion dépend fortement du taux d'humidité du béton car celui-ci influence directement la conductivité et la diffusion de l'oxygène.

Pour des taux d'humidité inférieurs à 80%, l'oxygène atteint facilement les régions anodiques mais la faible conductivité du béton limite la vitesse de corrosion.

Plus le taux d'humidité augmente, plus la conductivité du béton augmente, mais alors, la diffusion de l'oxygène vers les barres se fait de plus en plus difficilement.

➤ **Influence des fissures :**

Les fissures jouent un rôle très important dans la cinétique de corrosion puisqu'elles facilitent la pénétration d'agents agressifs. La fissuration transversale (fissures de flexion, de retrait ou de variation thermique) est le principal moteur pour l'initiation de la corrosion des armatures en formant un chemin privilégié favorisant le transport des ions chlore. La rouille formée exerce alors une pression sur le béton qui peut engendrer une fissuration longitudinale. Cette fissuration longitudinale donne aux agents agressifs un accès important aux armatures, favorisant ainsi la propagation de la corrosion.

Protection par les traitements électrochimiques :

Un traitement électrochimique du béton armé vise à ralentir ou arrêter la corrosion des armatures, en agissant sur l'interface entre acier et béton. Ces traitements se constituent de :

- Protection cathodique,
- La ré-alkalinisation,
- La déchloruration.

Ces traitement se font soit par :

- Par courant imposé (anode et alimentation électrique)
- Courant galvanique (anode sacrificielle)

➤ La protection cathodique :

La protection cathodique des armatures métalliques dans un béton est un traitement appliqué de façon permanente qui permet de ralentir, voire d'arrêter leur corrosion. Elle consiste à abaisser le potentiel électrochimique de l'armature jusqu'à une valeur seuil appelée potentiel de protection qui est telle que la vitesse de corrosion de l'acier devient négligeable. Le principe de la protection cathodique consiste à polariser l'armature dans le béton, à l'aide d'une anode placée de façon permanente sur le parement ou parfois dans l'enrobage. Le courant de polarisation, qui circule de l'anode vers l'armature, se situe entre 2 et 50 mA par mètre-carré de surface d'armature.

La réaction [1] (*mentionnée dans le paragraphe mécanisme de corrosion*) est définie comme étant une réaction d'oxydation, on remarque dans cette réaction que lors de ce processus on perd des électrons. Ceci conduit à la corrosion de la barre d'armature car à chaque paire d'électrons perdue, on perd un atome de fer.

Ce dernier se retrouve sous une forme ionique, Fe^{2+} , cet ion réagira avec le milieu environnant pour former la rouille.

La réaction [4] est définie comme une réaction de réduction, lors de ce processus, on assiste à une opération de gain d'électrons.

En réalité ces deux réactions se déroulent simultanément, pour former la réaction [2], cette dernière montre bien un échange d'électrons entre le fer et l'eau contenue dans les pores du béton.



Lorsque la réaction se déroule dans le sens **1**, c'est la corrosion de l'armature qui est favorisée. Si par contre, on favorise la réaction dans le sens **2**, on favorise le maintien du fer à l'état métallique et donc sa protection contre la corrosion. On définit alors la protection cathodique, comme étant une technique qui permet de mettre l'acier d'armature en situation continu de réception d'électrons (sens 2 de la réaction [2]). La figure suivante illustre un schéma de protection cathodique à courant imposé en utilisant un traitement électrochimique.

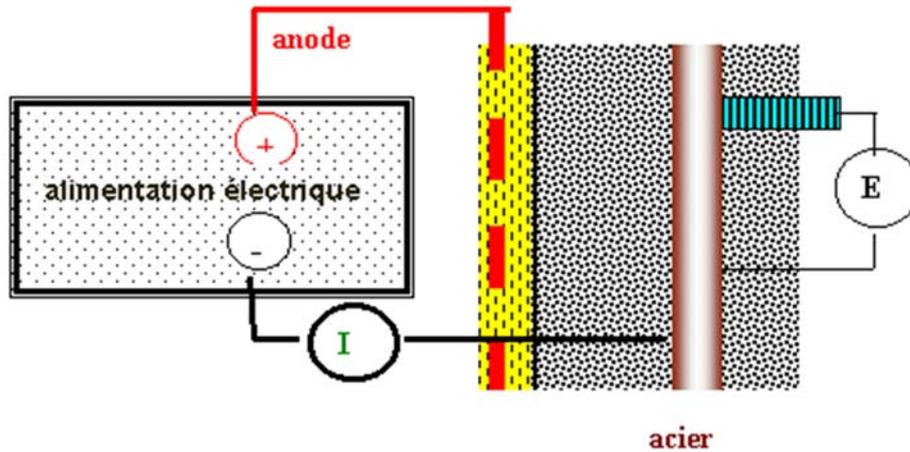


Fig 7 : Schéma d'une protection cathodique par courant imposé

▪ **La Ré-alkalinisation :**

Cette technique consiste à augmenter le pH de la solution interstitielle du béton (dans le cas d'une carbonatation) autour des armatures, ce qui permet ainsi de les replacer dans un milieu passivant, (figure 8).

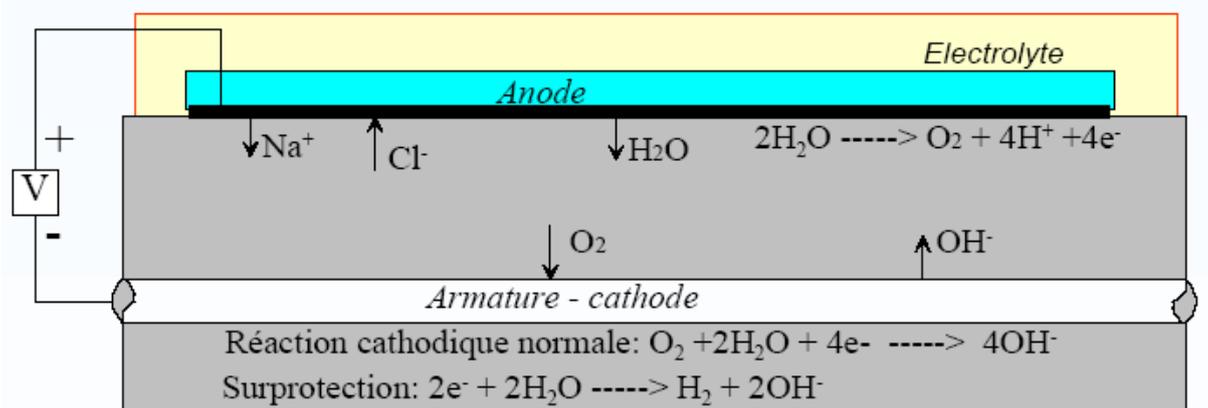


Fig 8: Méthode de ré-alkalinisation d'une couche de béton autour d'une armature

Les mécanismes de ce traitement sont :

- Electrochimique au niveau des aciers (formation OH⁻)
- Electromigration et diffusion des ions alcalins de l'électrolyte dans l'enrobage béton



Application de la pâte sur le treillis



Traitement en cours

▪ **Le traitement de déchloration :**

Cette technique consiste à extraire les ions chlorures présents dans le cas des environnements concernés. Le principe de ces traitements consiste à polariser les armatures les plus proches de la surface à l'aide d'une anode placée sur le parement et enrobée d'une pâte saturée d'un liquide convenablement choisi qui constitue l'électrolyte. Ainsi, le courant de polarisation circule de l'anode vers l'armature qui joue alors le rôle de cathode. Ce dernier peut être induit par un générateur électrique placé entre l'anode et l'armature (technique du courant imposé), ou en choisissant pour l'anode un métal moins noble que l'acier (technique du courant galvanique ou sacrificielle).

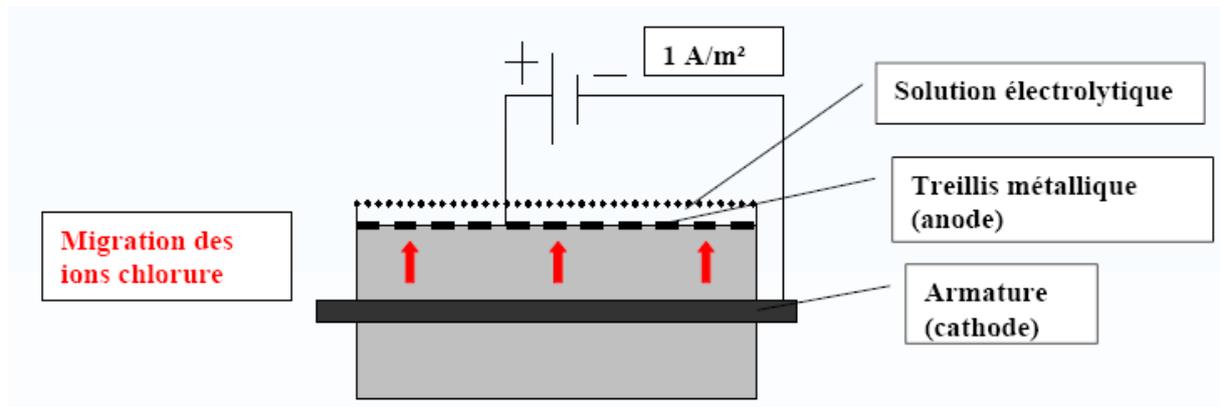
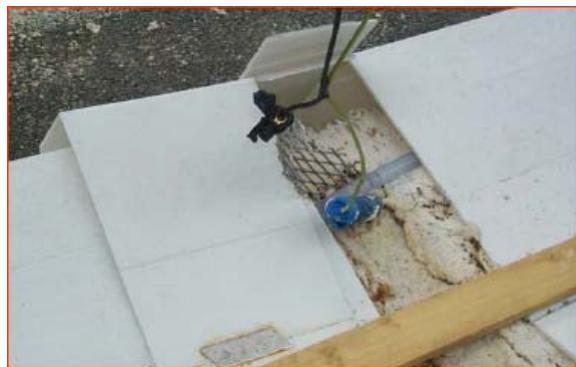


Fig 9 : Extraction des chlorures par un traitement électrochimique



Pose de l'anode (anode sacrificielle)



Humidification du système

Les Inhibiteurs de corrosion :

Par définition, un inhibiteur de corrosion est un composé chimique qui, ajouté en faible concentration au milieu corrosif, ralentit ou arrête le processus de corrosion d'un métal placé dans ce milieu. 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,
- de ne pas être toxique.

Le mécanisme d'action d'un inhibiteur peut être divers. L'inhibiteur recouvre 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 sont classés selon leur mode d'action :

- Les inhibiteurs anodiques
- Les inhibiteurs cathodiques
- Les inhibiteurs mixtes



Application d'un inhibiteur

D'autres procédés de protection et réparation de la corrosion :

- Reconstitution de l'enrobage du béton (restauration de l'apparence du béton, élimination des armatures corrodées,...).
- Imprégnations (application d'un consolidant ou un hydrofuge)
- Revêtements de surface (application de couches de peinture et d'induits)
- Réparation par béton projeté