

## 2.6 LA CORROSION

- Une étude effectuée en Angleterre a montré qu'entre 1974 et 1978, la corrosion des aciers d'armature a été la cause directe de **l'effondrement d'au moins 8 structures de béton**. Ces structures étaient âgées de 12 à 40 ans (une structure avait seulement 2 ans !).
- Les dommages dus à la corrosion se manifestent par des **expansions** qui conduisent à la formation de fissures qui provoquent éventuellement le décollement du couvert de béton (l'enrobage) (Fig 2.98 et 2.99).



Fig. 2.98 - Délamination dues à la corrosion dans une poutre en béton armé. Les problèmes de corrosion sont, en partie, causés par un joint mal entretenu.  
[tiré de Novokshchenov, V. 1991 Prestressed concrete bridges in adverse environment, Concrete International, Vol. 13, No, 5 May. P. 43-48].

- En plus de la disparition du couvert de béton, des dommages structuraux de la structure peuvent survenir en raison de la **perte d'adhérence** des barres et de la **diminution de leur diamètre** effectif (perte de capacité en traction).
- Le béton est un milieu très alcalin (pH=13) et constitue un environnement **relativement agréable** pour les aciers d'armature.
- Sous ce **niveau de pH**, les aciers d'armature ne se **corrodent pas** car ils sont recouverts d'un **film passif** formé d'une solution solide de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  -  $\text{Fe}_2\text{O}_3$   $\gamma$  dont l'épaisseur est de  $10^{-3}$  à  $10^{-1}$   $\mu\text{m}$ .

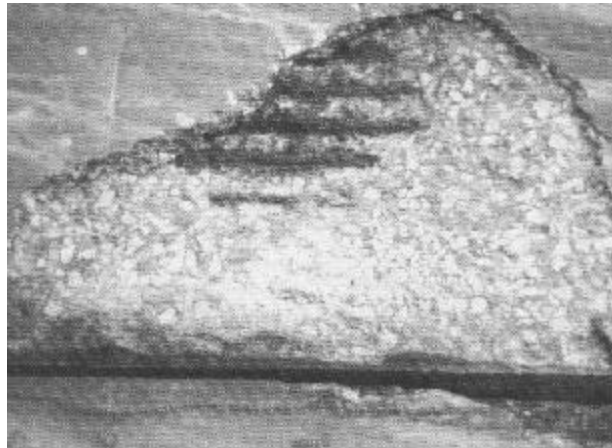


Fig. 2.99 - Délamination à la base d'une poutre caisson en béton armé.  
[tiré de Novokshchenov, V. 1991 Prestressed concrete bridges in adverse environment, Concrete International, Vol. 13, No, 5 May. P. 43-48].

- La corrosion des aciers d'armature peut débuter si le film **passif est détruit** ou si le pH de la solution interstitielle devient trop faible ( $< 12$ ).

## 2.6.1 Mécanismes de base

### 2.6.1.1 Pile galvanique, potentiel de corrosion et courant de corrosion<sup>1</sup>

- Lorsqu'un métal est plongé dans un **électrolyte**, des **ions vont passer dans la solution** tandis que le métal se chargera en électrons négatifs (Fig 2.100).
  - Le passage des ions en solution est **limité dans le temps** car, pour quitter le métal, ces ions doivent **vaincre la répulsion** des ions qui se trouvent déjà en solution et **l'attraction des ions des électrons** en excès qui chargent négativement le métal.
  - Le potentiel,  $\Delta V$ , du métal par rapport à la solution tend donc vers une **valeur stationnaire** appelée **potentiel d'électrode (le potentiel normal)**.

<sup>1</sup> Palissy, B. 1980 *Des matériaux*, Édition de l'École polytechnique de Montréal, 474 p.

- Le **potentiel de corrosion d'une électrode** est le potentiel que prend un métal par rapport à un électrolyte donné. Il **dépend des conditions expérimentales (type, concentration, température de l'électrolyte)**.

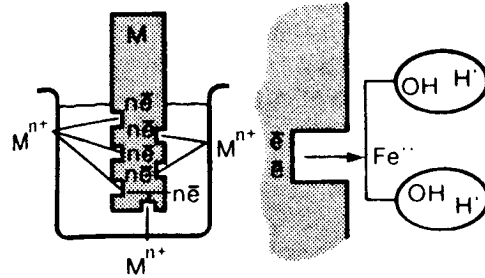


Fig. 2.100 - Dissolution anodique du fer.

[tiré de : Palissy, B. 1980 *Des matériaux*, Édition de l'École polytechnique de Montréal, 474 p.].

- Dans le cas d'un **couplage de deux matériaux en contact avec un même électrolyte**, il est important de connaître les potentiels que prennent les métaux, par rapport à une solution donnée, de façon à savoir quel est celui qui constitue la **cathode** et quel est celui qui est l'**anode** (Fig 2.101).
  - Dans un électrolyte, deux métaux de nature différente développent des potentiels de demi-pôle différents. Sachant quel est celui qui présente la **plus grande tendance à se dissoudre**, on peut prévoir lequel sera l'**anode** et lequel sera la cathode.
  - On trouve plusieurs **classifications** qui correspondent à des **solutions données** (Tableaux 2.6 et 2.7).

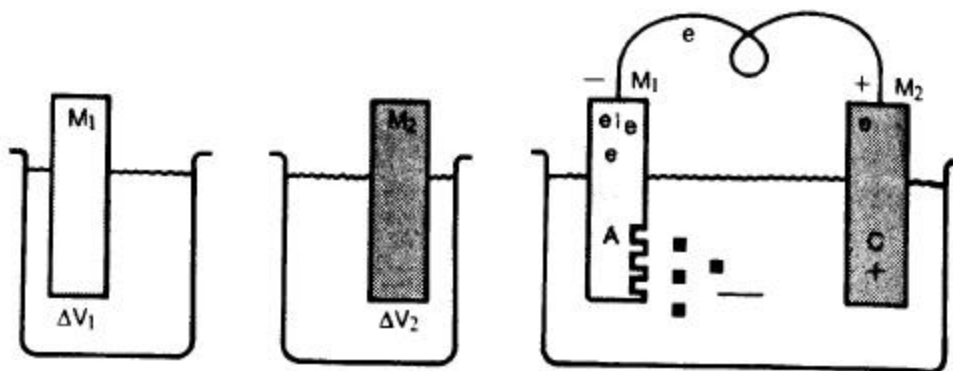


Fig. 2.101 - Pile galvanique produite par deux métaux reliés électriquement, en contact avec un électrolyte.

[tiré de : Palissy, B. 1980 *Des matériaux*, Édition de l'École polytechnique de Montréal, 474 p.].

Tab 2.6 - Potentiels d'oxydo-réduction standards et dans l'eau de mer de différents métaux purs.

[tiré de : Palissy, B. 1980 *Des matériaux*, Édition de l'École polytechnique de Montréal, 474 p.].

Métaux	Potentiels standards d'oxydo-réduction à 25° C (1)	Potentiels expérimentaux dans l'eau de mer (2) (pH = 8,2)
<b>Nobles</b>	<b>Volt</b>	<b>Volt</b>
Au = Au <sup>3+</sup> + 3e	1,42	—
Pt = Pt <sup>2+</sup> + 2e	1,19	0,55
O <sub>2</sub> + 4H <sup>+</sup> + 4e = 2H <sub>2</sub> O	1,23	—
Pd = Pd <sup>2+</sup> + 2e	0,83	0,56
Ag = Ag <sup>+</sup> + e	0,80	0,25 (?)
Fe <sup>3+</sup> + e = Fe <sup>2+</sup>	0,77	—
O <sub>2</sub> + 2H <sub>2</sub> O + 4e = 4OH <sup>-</sup>	0,40	—
Cu = Cu <sup>2+</sup> + 2e	0,34	0,11
Sn <sup>4+</sup> + 2e = Sn <sup>2+</sup>	0,15	—
2H <sup>+</sup> + 2e = H <sub>2</sub>	0,00 Référence	—
Pb = Pb <sup>2+</sup> + 2e	-0,13	—
Sn = Sn <sup>2+</sup> + 2e	-0,14	-0,42
Ni = Ni <sup>2+</sup> + 2e	-0,25	+0,10
Co = Co <sup>2+</sup> + 2e	-0,28	—
Cd = Cd <sup>2+</sup> + 2e	-0,40	-0,51
Fe = Fe <sup>2+</sup> + 2e	-0,44	-0,50
Cr = Cr <sup>3+</sup> + e	-0,71	—
Zn = Zn <sup>2+</sup> + 2e	-0,76	-0,79
Al = Al <sup>3+</sup> + 3e	-1,67	-1,21
Mg = Mg <sup>2+</sup> + 2e	-2,38	—
Na = Na <sup>+</sup> + e	-2,71	—
K = K <sup>+</sup> + e	-2,92	—
<b>Actifs</b>		

Tab 2.7 - Série galvanique (par ordre de noblesse) de métaux et alliages en eau de mer en circulation.  
 [tiré de : Palissy, B. 1980 *Des matériaux*, Édition de l'École polytechnique de Montréal, 474 p.].

Métaux nobles — cathodiques	
Platine	
Carbone (graphite)	
Acier inoxydable 316 (passif)	(18 Cr, 12 Ni, 3 Mo)
Monel	(66 Ni, 29 Cu, 3 Al, 1 Fe, 0,4 Mn)
Hastelloy C	(50 Ni, 17 Mo, 17 Cr, 2,5 Co, 7 Fe, 1 Si, 1 Mn, 0,3 V, 0,08 C)
Acier inoxydable 304 (passif)	(18 Cr, 8 Ni)
Titane	
Argent	
Bronze au nickel-aluminium	(80 Cu, 5 Ni, 9 Al, 4,5 Fe)
Inconel	(78 Ni, 13,5 Cr, 6 Fe)
Nickel	
Cupronickel	(70 Cu, 30 Ni)
Cupronickel	(90 Cu, 10 Ni)
Laiton amirauté	(70 Cu, 26 Zn, 1 Sn)
Bronze (M)	(86 Cu, 5 Sn, 5 Zn, 4 Pb)
Laiton rouge	(85 Cu, 15 Zn)
Cuivre	
Laiton jaune	(85 Cu, 35 Zn)
Bronze de manganèse	(50 Cu, 30 Zn, 2 Fe, 3 Mn, 1 Sn)
Étain	
Plomb	
Acier inoxydable 316 (actif)	
Acier inoxydable 304 (actif)	
Fonte	
Acier doux	
Aluminium 2117	(95 Al, 2,5 Cu, 0,3 Mg)
Cadmium	
Aluminium 1100	(99 Al, 1 Fe + Si, 0,2 Cu, 0,05 Mn)
Aluminium 6061	(96 Al, 0,2 Cu, 0,6 Si, 1 Mg, 0,1 Mn)
Aluminium 5456	(94 Al, 0,1 Cu, 0,4 Fe + Si, 5 Mg, 1 Mn)
Acier galvanisé	
Zinc	
Magnésium et alliages de magnésium	
Métaux non nobles — anodiques	

- Comment varie le **potentiel des deux électrodes lorsqu'elles sont reliées électriquement** ?
  - Lorsque le **circuit est ouvert**, le potentiel des deux électrodes est  $E_{A0}$  et  $E_{C0}$ .
  - Dès qu'un **courant circule**, le potentiel de la **cathode devient plus négatif** (elle reçoit des  $e^-$  de l'anode) et le potentiel de **l'anode devient plus positif**. On appelle **courbes de polarisation**, les courbes qui donnent  $E_C$  ou  $E_A$  en fonction de  $i$  (Fig 2.102).

- Pour une certaine valeur  $i_{COR}$ , le potentiel de l'anode et celui de la cathode tendent vers la même valeur  $E_{COR}$ . **Théoriquement,  $i_{COR}$  est la valeur maximale de l'intensité de courant que peut débiter la pile.**
- Il peut être **intéressant de connaître  $i_{COR}$**  car il permet de calculer la perte de poids  $\Delta M$  subie par le métal en fonction du temps (loi de Faraday).

$$\frac{dm}{dt} = M \frac{i_{COR}}{\eta F}$$

Avec,

- M: Masse atomique du métal
- dm/dt: Perte de poids du métal par unité de temps
- F: Constante de Faraday 96 500 Coulombs
- $\eta$ : Charge ionique (2 pour  $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$ )

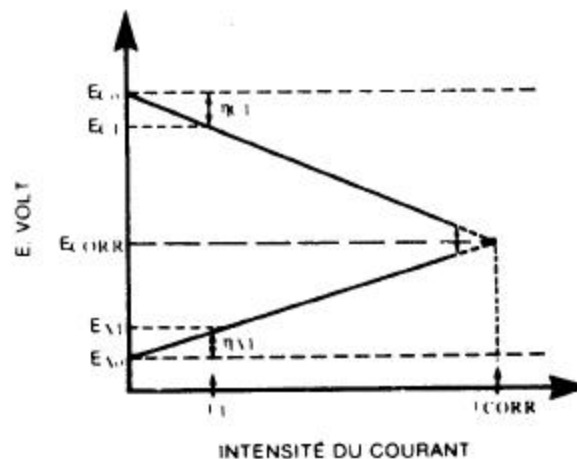


Fig. 2.102 - Évolution du potentiel de l'anode et de la cathode en fonction du courant de corrosion.

[tiré de : Palissy, B. 1980 *Des matériaux*, Édition de l'École polytechnique de Montréal, 474 p.].

### 2.6.1.2 Corrosion par différence de concentration en oxygène

- En nature il existe de nombreux exemples de cas de corrosion par différence de concentration en oxygène : joints soudés, rivets, tas de sable, dépôts.
- La figure 2.103 présente quelques cas classiques.
  - Les zones cathodiques se forment aux endroits où l'oxygène est plus disponible.
  - Les zones anodiques (corrosion) sont situées près des frontières séparant les zones riches et faibles en oxygène.

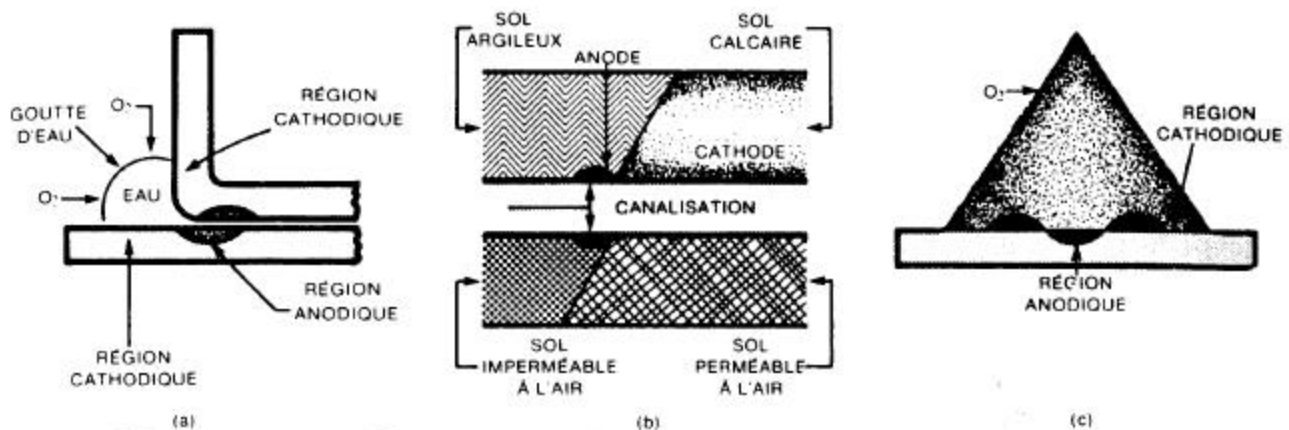


Fig. 2.103 - Quelques exemples de corrosion engendrés par différences de concentration en oxygène.  
[tiré de : Palissy, B. 1980 *Des matériaux*, Édition de l'École polytechnique de Montréal, 474 p.].

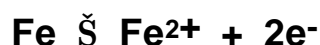
## 2.6.2 Le cas particulier du béton armé

- La corrosion des aciers d'armature dans le béton est issue d'un processus **électrochimique**.
- Pour que l'acier dans le béton se **corrode** (formation de rouille) il faut retrouver au **même moment**<sup>2</sup>:
  - Un **électrolyte** avec une forte conductibilité (ionique)

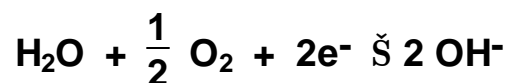
<sup>2</sup> Carpio Perez, J. J. 1991 *Étude de la dépassivation et de la repassivation des armatures métalliques dans les bétons*, Document OA9, Laboratoire central des ponts et chaussées, Paris, France, 168 p.

- De **l'oxygène** à la zone cathodique
- Une **dissolution non inhibée** (dépassivation de l'acier par l'attaque des chlorures ou par la carbonatation).
- Il ne se produit **pas de corrosion lorsque l'atmosphère est très sèche** (humidité relative > 40%: absence d'électrolyte).
- Il n'y a **pas de formation de rouille lorsque le béton est totalement immergé** dans l'eau désaérée (manque d'oxygène).
- **L'humidité** relative la plus favorable pour que la corrosion se produise est de **70% à 80%**. Pour des valeurs plus élevées, la diffusion de l'oxygène est considérablement diminuée.
- Le potentiel électrochimique qui est à la base de la formation d'une cellule de corrosion peut être généré de deux façons:
  - Une différence dans la **nature des métaux** (conduits en aluminium - aciers d'armature) ou lorsque les propriétés de surface d'un même métal varient considérablement d'un endroit à l'autre.
  - Une différence de **concentration** de certains ions au voisinage de l'acier (alcalis, chlorures, oxygène).
- Dans une cellule de corrosion, un des deux métaux (ou une région du même métal) devient **anodique** et l'autre **cathodique**.
- Les **réactions chimiques de base** dans les régions anodiques et cathodiques sont les suivantes (en milieu alcalin):

◦ **Anode:**



◦ **Cathode:**



- L'anode et la cathode sont reliés par le **métal conducteur** qui permet le passage des électrons.
- Le milieu **électrolyte environnant (le béton)** assure le transport des ions par diffusion (Fig 2.104).
- La rouille apparaît lorsque les **ions ferreux ( $Fe^{2+}$ ) réagissent** avec les **ions  $OH^-$**  pour former de l'hydroxyde ferreux ( $Fe(OH)_2$ ).



- En **présence d'oxygène**, les réactions d'oxydation se **poursuivent** pour former des nouveaux produits dont certains sont très expansifs. **La rouille est formée d'un mélange de ces produits** ( $Fe(OH)_3$ ,  $Fe_2O_3 \cdot H_2O$ ,  $Fe_3O_4$ ).

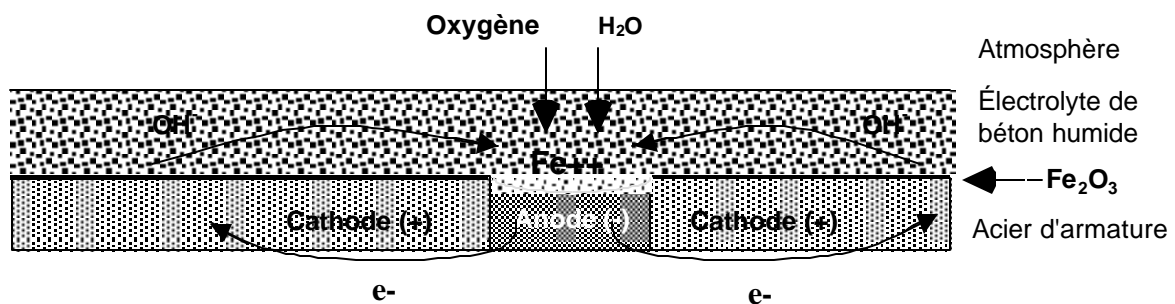


Fig. 2.104 - Représentation schématique du mécanisme de la corrosion des aciers d'armature dans le béton.

- Pendant le processus, un **courant de corrosion** se développe entre la cathode et l'anode. Le **taux de corrosion** (quantité de fer dissous) est proportionnel au courant de corrosion.
- La corrosion des aciers d'armature peut provoquer des dommages au béton parce la rouille est formée de **produits fortement gonflants**. 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 (Fig 2.105).

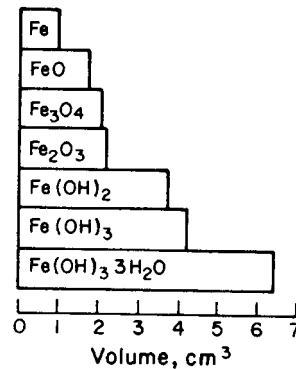


Fig. 2.105 - Volume relatif des produits d'oxydation du fer.

[tiré de Metha, P.K. Concrete Structures, Properties and Materials, Prentice Hall, New Jersey, 1986, 449 p].

- Selon Tuutti<sup>3</sup>, **l'évolution** de la corrosion des aciers d'armature s'effectue généralement en **deux étapes** (Fig 2.106).
  - Au **début**, l'acier est **stabilisé** par la couche de passivation qui empêche la formation de rouille.
  - Durant la phase **d'amorçage** se produit la **dépassivation** progressive de l'acier. Cette dépassivation peut être engendré par de nombreux facteurs dont:
    - Carbonatation (baisse du pH).
    - Pénétration des ions chlorure
  - Durant la **deuxième phase** se produit la **propagation de la rouille** produite par des réactions d'oxydation à la surface du métal. La formation des produits d'oxydation provoque un **gonflement** qui fini par provoquer la **fissuration de l'enrobage** (point D).

<sup>3</sup> Tuutti, K. 1982 Corrosion of steel in concrete, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Ed., Stockolm dans: La durabilité des bétons, Presses de l'École des Ponts et Chaussées, Paris, 453 p.

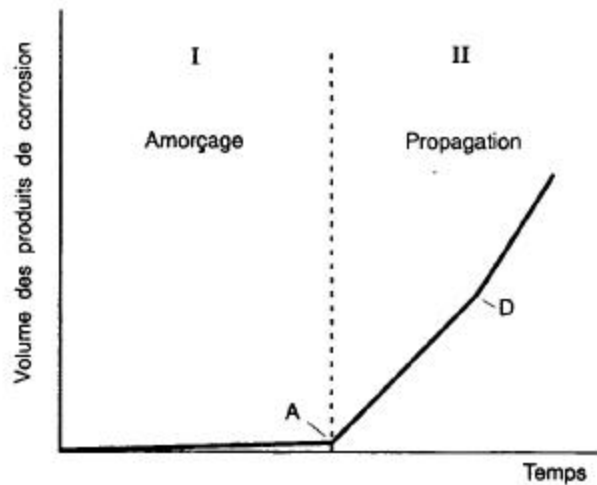


Fig 2.106 - Schéma de la cinétique du comportement des armatures et du béton d'enrobage.

[Tiré de Baron, J. et Ollivier, J.-P. 1992 *La durabilité des bétons*, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 453 p.].

---

**En pratique, on doit donc faire en sorte que la période d'amorçage soit la plus longue possible.**

---

- On peut **allonger cette étape** en prévoyant des épaisseurs de **recouvrement** suffisantes et en choisissant une formule de mélange permettant de **diminuer la perméabilité** du béton (eau, gaz).

### 2.6.3 La dépassement des armatures

- La dépassement de l'acier dans le béton se produit le plus souvent par l'action de **deux agents** qui peuvent se présenter simultanément:
  - Le dioxyde de carbone,  $\text{CO}_2$  (**carbonatation**)
  - La présence de **chlorures** au niveau des armatures

### 2.6.3.1 Le rôle des chlorures

- La **vitesse de corrosion** des barres d'armature est **plus grande** en présence de **chlorures**.
- Les chlorures ont **deux effets** dans les mécanismes de corrosion.
  - Ils diminuent la **résistivité** de l'électrolyte (le couvert de béton), ce qui facilite le transport des ions d'un site à l'autre.
  - Ils permettent **l'amorçage plus rapide** de la corrosion en dépassivant la couche superficielle. (dissolution de la couche passive ou migration des chlorures à travers le film d'oxyde ?).
- Aux endroits où la **couche a été détruite, l'acier se dissout** (zone anodique), alors que le **reste de la surface encore passivée correspond à la zone cathodique**
  - Le rapport **cathode/anode élevé** favorise la **progression localisée** et en profondeur de la corrosion (corrosion caverneuse).
- Les réactions de corrosion au niveau de la cellule caverneuse sont encore mal comprises <sup>4</sup>.
  - Les ions chlorures s'associent avec l'ion hydrogène de l'eau pour former de **l'acide chlorydrique**.
  - Ces réactions engendrent une **importante baisse du pH**. (pH = 3 à 5). La dissolution du fer est alors accélérée. Les ions chlorures sont constamment recyclés



---

<sup>4</sup> Carpio Perez, J. J. 1991 *Étude de la dépassivation et de la repassivation des armatures métalliques dans les bétons*, Document OA9, Laboratoire central des ponts et chaussées, Paris, France, 168 p.

**Plus la concentration en chlorure au niveau des armatures est grande, plus vite la corrosion est élevée.**

- En pratique, il est important de limiter la quantité de chlorures dans le béton (pénétration par diffusion ou via les adjuvants, les granulats, l'eau de gâchage).
- Des essais en laboratoires suggèrent que la **propagation** de la corrosion s'amorce pour une concentration en ions chlore de l'ordre de **0,5% en poids de ciment** (Fig 2.107)

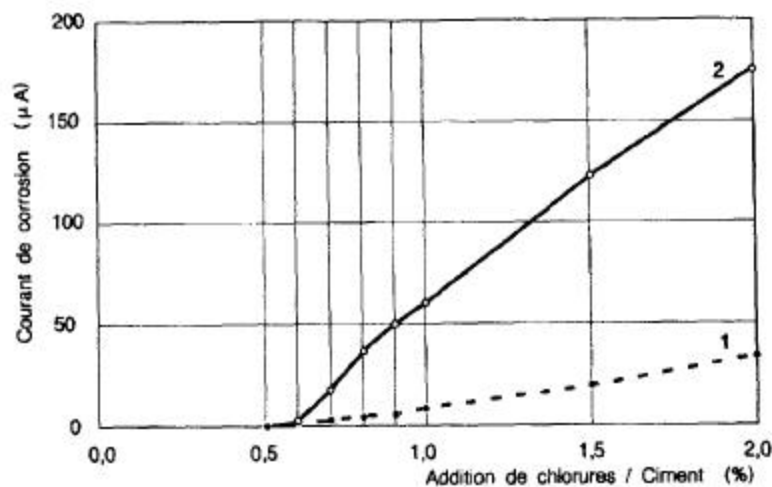


Fig 2.107 - Influence du pourcentage de chlorures introduits dans le béton sur le courant de corrosion (E/C = 0,60 - après 100 jours (courbe 1) - après 1 an (courbe 2)).

[tiré de Baron, J. et Ollivier, J.-P. *La durabilité des bétons*, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 1992, 453 p.].

- Plusieurs critères ont été proposés afin d'évaluer la **concentration critique** à partir de laquelle les ions chlorure (**solubles dans l'eau**) sont susceptibles de provoquer la **dépassivation des armatures**.
  - **ACI546.IR-80** : 0,032 % par rapport à la masse de béton soit environ **0,2% par rapport à la masse de ciment** (en supposant 350 kg de ciment par m<sup>3</sup> de béton).
  - **Canada Building Digest - CBD 225** : 0,033% par rapport à la masse de béton.

---

° **Broomfield, J P. (1994)** : Le seuil critique correspond plus exactement au moment où le rapport  $[Cl^-]/[OH^-]$  **devient supérieure à une valeur comprise entre 0,6 et 1,0**. Ce seuil est atteint lorsque la concentration en chlorures solubles est approximativement **0,2 à 0,4% par rapport à la masse de ciment**.

---

- **On ne peut pas établir une seule concentration maximale en chlorure** puisque cette concentration critique dépend du pH. Une très faible modification du pH produit une très grande variation de la concentration en  $OH^-$  (et par conséquent de la concentration critique en chlorures).

---

**Dans le béton carbonaté (pH faible - environ 9) même une faible concentration en chlorures peut initier la corrosion.**

---

- Les chlorures peuvent être **piégés chimiquement** (par les aluminates) ou physiquement (par adsorption sur les parois des pores). Les chlorures **piégés interviennent peu lors du processus de corrosion**.
- Certains **granulats peuvent contenir des chlorures**. Ces chlorures ne peuvent pas être lixiviés dans la solution interstitielle. Ils ne jouent donc aucun rôle dans le processus de corrosion.
- Dans les bétons très **faiblement saturés**, la **corrosion ne se produit pas** nécessairement même si la concentration en **chlorures est très élevée** (il n'y a pas assez d'eau pour amorcer la corrosion).
- Dans les bétons totalement saturés la **corrosion ne se produit pas** nécessairement (même si la concentration en  $Cl^-$  est élevée) puisqu'il peut y avoir un **manque d'oxygène** pour entretenir le processus de corrosion.

- **U.K. Building Research Establishment<sup>5</sup>** : (concentrations en poids de ciment)

< 0,4%	Faible risque de corrosion
de 0,4% à 1,0%	Risque modéré
> 1,0%	Risque élevé de corrosion

- La norme ACNOR A23.1 (section 15) impose des limites sur la teneur en ions **chlorures solubles avant la première exposition**. Elles sont exprimées en fonction de la teneur massique en **pourcentage de la masse du ciment**:

- Béton précontraint : **0,06 %**
- Béton armé exposé à un environnement humide ou à des chlorures ou au deux: **0,15%**
- Béton armé exposé ni à un environnement humide ni à des chlorures : **1,0%**

- Dans le calcul de la teneur en ions chlorures solubles, on doit tenir compte de **l'apport de chacun des constituants** du béton (adjuvants, granulats, ciment, ajouts minéraux, etc).

- On peut mesurer la teneur en ions chlorures solubles dans le béton en utilisant l'essai ACNOR A23.2-4B. (dosage au nitrate d'argent).

- Les chlorures en solution qui pénètrent dans le béton peuvent réagir chimiquement avec le C<sub>3</sub>A du ciment. Cette réaction produit des monochloroaluminates hydratés (C<sub>3</sub>A. CaCl<sub>2</sub>.10H<sub>2</sub>O) qui est un **hydrate relativement stable** dans le béton (Fig 2.108 et 2.109).

---

<sup>5</sup> Mailvaganam, N. P. 1992 *Repair and protection of concrete structures*, CRC Press, Boca Raton, Florida, USA, 473 p.



Fig 2.108 - Formation de chloroaluminates en fine structure lamellaire  
[Source: <http://www.lcpc.fr/LCPC/images/materiaux.beton/>].

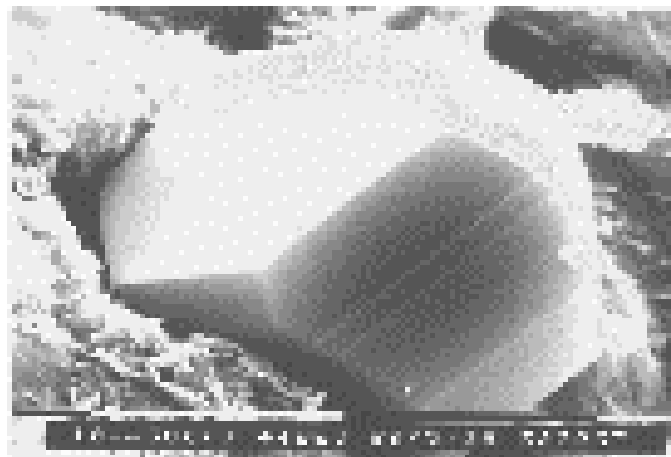


Fig 2.109 - Cristal massif de chloroaluminates  
[Source: <http://www.lcpc.fr/LCPC/images/materiaux.beton/>].

- 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 C<sub>3</sub>A** offrent en général une **meilleure protection** contre la corrosion des aciers d'armature.
- Dans une note de la section 15.4, la norme ACNOR A23.1 signale qu'il est préférable que le ciment ait une teneur en C<sub>3</sub>A **minimale** de 4% lorsque le béton armé est en contact avec des chlorures (ce n'est qu'une recommandation).

### 2.6.3.2 Le rôle de la carbonatation

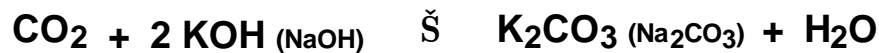
- La **stabilité du film passif** est étroitement liée à la valeur du **pH** au voisinage de l'acier.
  - **Le film passif disparaît lorsque le pH devient inférieur à environ 12.**
- Tous les mécanismes qui peuvent provoquer une **diminution du pH** dans le béton peuvent donc contribuer à **amorcer ou accélérer la corrosion** des aciers d'armature.
- Dans la grande majorité des cas, c'est la **carbonatation** qui est principalement responsable de la baisse du pH dans le béton.
- La carbonatation est engendrée par une **réaction entre le CO<sub>2</sub>** de l'air et **certains constituants** du béton. Un des produits de la carbonatation est le **CaCO<sub>3</sub>** (calcite).
  - Le dioxyde de carbone gazeux (CO<sub>2</sub>) présent dans l'air peut être dissous et réagir avec la solution interstitielle basique du béton.
  - L'attaque commence à la surface et le CO<sub>2</sub> pénètre par diffusion dans la phase liquide.
- La réaction du CO<sub>2</sub> fait intervenir la **chaîne de réactions** suivantes:



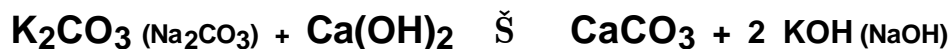
- Cette réaction se produit en **milieu aqueux** (les composés doivent être en solution dans l'eau).
- Un des effets de cette réaction est de provoquer **une baisse du pH jusqu'à des valeurs voisines de 9.**

## Š Dépassivation de l'acier d'armature

- ° En présence de **bases alcalines** (NaOH, KOH) la solubilité de la chaux est **relativement faible** et la réaction est ralentie.
- ° Cependant les **bases alcalines peuvent se carbonater** elles aussi:



- ° La carbonatation des bases alcalines **augmente la solubilité** de la chaux qui peut alors se carbonater en plus grande quantité.



- La carbonatation du béton est un **phénomène progressif** qui, avec le temps, atteint des couches de plus en plus profondes.
- On peut mesurer la profondeur de carbonatation par un essai de coloration à la **phénolphtaléine** (Fig 2.110).

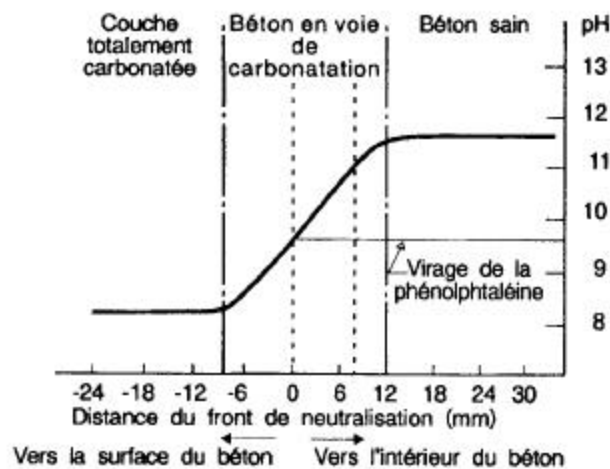


Fig 2.110 - Gradient de pH en fonction de la profondeur carbonatée.

[tiré de Baron, J. et Ollivier, J.-P. 1992 *La durabilité des bétons*, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 453 p.].

- La **vitesse de carbonatation** est fonction de nombreux paramètres dont les plus importants sont la **perméabilité** et le taux **d'humidité relative** du milieu ambiant.
- La vitesse de carbonatation est **maximale** pour une humidité comprise entre **40% et 80%** (60% semble être la valeur la plus critique) <sup>6</sup>.
  - \* Dans les environnements secs, la quantité d'eau est insuffisante pour dissoudre de CO<sub>2</sub>.
  - \* Dans les environnements très humides, le béton est saturé, ce qui ralentit considérablement la diffusion du CO<sub>2</sub>.
- On peut ralentir la progression de la carbonatation en:
  - \* Augmentant le **dosage en ciment**
  - \* Diminuant le rapport **E/C** (Fig.2.111)
  - \* Augmentant le **temps de cure**
  - \* Augmentant la **résistance à la compression**

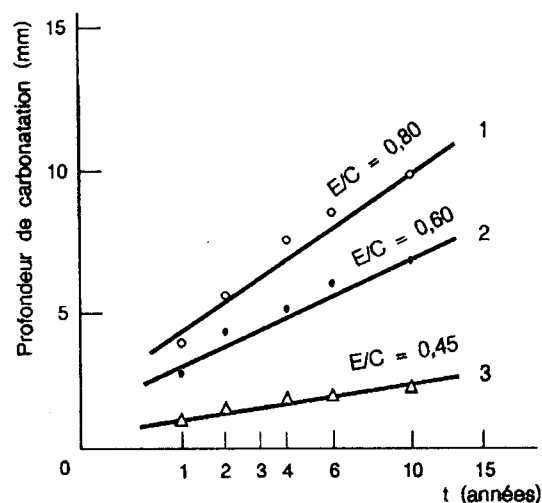


Fig 2.111 - Évolution de la profondeur de carbonatation en fonction du temps et du rapport E/C (20 °C - 50% HR).

<sup>6</sup> Carpio Perez, J. J. 1991 *Étude de la dépassivation et de la repassivation des armatures métalliques dans les bétons*, Document OA9, Laboratoire central des ponts et chaussées, Paris, France, 168 p.

[Tiré de Baron, J. et Ollivier, J.-P. 1992 *La durabilité des bétons*, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 453 p.]

- **Attention les fortes teneurs** en cendres volantes (> 30%) et en laitiers (>50%) peuvent accélérer significativement la vitesse de carbonatation du béton. Dans ce cas, une cure humide prolongée est de rigueur.

- Il faut rappeler que plus le **pH** interne du béton est **faible**, plus les chlorures ont un **effet néfaste** sur la corrosion (importance du rapport  $Cl^-/OH^-$ ).

---

**Par conséquent, dans les bétons carbonatés, même une très faible teneur en chlorures peut provoquer la dépassivation des aciers d'armature.**

---

- La **dépassivation** des armatures peut se produire plus facilement **si le béton est fissuré** car le processus de carbonatation se déroulant tout au long des fissures peut pénétrer plus profondément sous la surface.
  - **Il est important d'éviter la macro-fissuration** du béton ainsi que la présence de vides importants qui peuvent permettre que l'acier soit atteint plus facilement par des zones carbonatées (Fig 2.112).

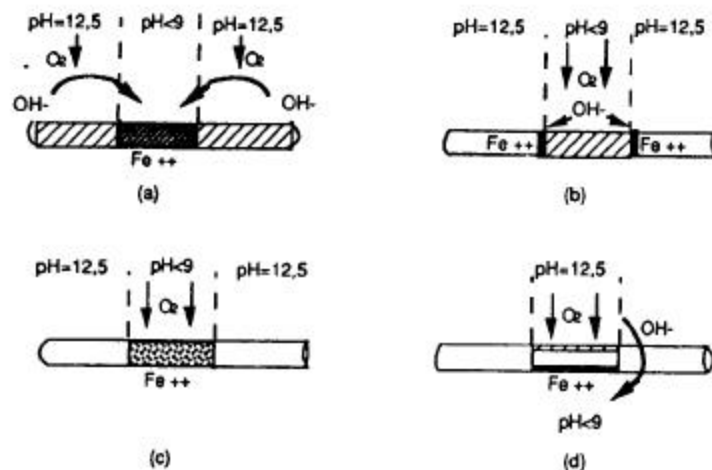


Fig 2.112 - Dépassivation des aciers d'armature suite à la carbonatation du béton  
a), b), c) : Dépassivation provoquée par une fissure

d) : dépassivation provoquée par une vide de ségrégation.

[Tiré de Carpio Perez, J. J. 1991 *Étude de la dépassivation et de la repassivation des armatures métalliques dans les bétons*, Document OA9, Laboratoire central des ponts et chaussées, Paris, France, 168 p].

#### 2.6.4 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'augmentation de la compacité provoquée par les ajouts minéraux (utilisés en quantité suffisante) semble annuler largement les effets néfastes de la diminution du pH interne et de la moins grande quantité de C<sub>3</sub>A qui découlent de l'utilisation de ces ajouts minéraux.**

---

#### 2.6.5 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, mais alors, la diffusion de **l'oxygène** vers les barres se fait de plus en **plus difficilement**.

- ° Les vitesses de corrosion les plus **élevées** sont généralement observées lorsque le taux **d'humidité est voisin de 95%**

---

**La corrosion des aciers d'armature ne constitue généralement pas un problème majeur dans le cas des structures ou des parties de structures constamment immergées puisque l'oxygène ne parvient que très difficilement à atteindre les armatures.**

---

## 2.6.6 Détermination de l'état de corrosion

### n Potentiel de corrosion

- On peut évaluer l'état de corrosion des aciers d'armature d'une structure de béton en faisant un **relevé géographique du potentiel de corrosion**.
- La technique consiste à **mesurer localement** la différence de potentiel entre la surface de l'enrobage et la barre sous-jacente (half-cell potential). Cette mesure peut être effectuée selon la norme ASTM C876-80 (Fig 2.113)

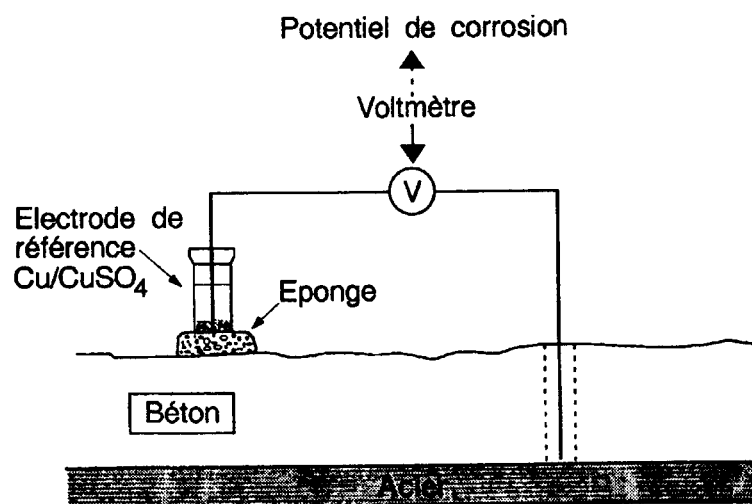


Fig 2.113- Dispositif de mesure du potentiel de corrosion d'une armature.

[Tiré de Baron, J. et Ollivier, J.-P. 1992 *La durabilité des bétons*, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 453 p.].

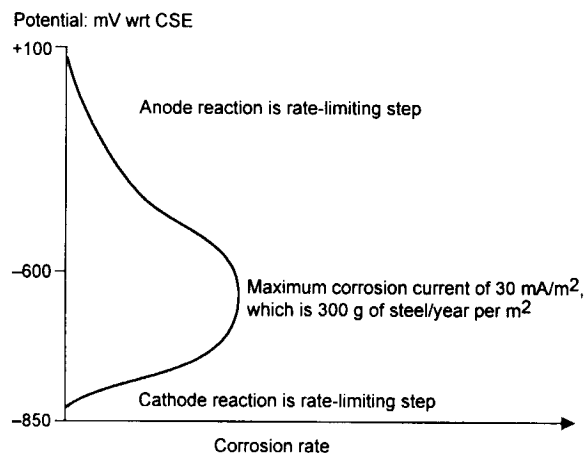
- Le potentiel est mesuré par rapport à une **électrode de référence**. Très souvent on utilise une électrode de type **Cuivre/Sulfate de Cuivre** (Cu/CuSO<sub>4</sub>). Ce type d'électrode est économique mais elle n'est pas très stable (la solution doit être remplacée en moins d'une heure).
- **D'autres types d'électrodes peuvent aussi être utilisées** (Tab 2.8). Des électrodes argent/chlorure d'argent sont souvent utilisées. **On doit alors corriger les potentiels** pour obtenir le potentiel équivalent cuivre/sulfate de cuivre.

Tab 2.8- Électrodes de référence couramment utilisées pour le béton armé.  
[Tiré de Chess, P. and Gronvold, F. 1996 *Corrosion investigation - A guide to half cell mapping*, Thomas Telford, London, 31 p.].

Electrode	Chemical description	Potential in relation to a hydrogen electrode
Pure zinc (99.95%)	Zn (in salt water)	-780 mV
Manganese dioxide	MnO <sub>2</sub> in alkaline solution	-400 mV
Copper/copper sulphate	Cu/CuSO <sub>4</sub> (saturated solution)	-320 mV
Silver/silver chloride	Ag/AgCl in 1 M KCl	-288 mV
Silver/silver chloride	Ag/AgCl in saturated KCl	-222 mV

- Le **potentiel** de l'acier varie en fonction de **l'état de corrosion ou du type d'environnement**<sup>7</sup>
  - Acier passivé (non corrodé): **+100 mV à -200 mV**
  - Lorsque la passivité est détruite localement: **-200 mV à -500 mV**  
On peut mesurer de fortes variations entre les sites anodiques et cathodiques
  - Corrosion généralisée: **-400 mV à -600 mV**  
On mesure moins de variations d'un site à l'autre
- Le taux de corrosion maximal se développe généralement à un potentiel de -600 mV CSE (Fig 2.114).

<sup>7</sup> Baron, J. et Ollivier, J.-P. 1992 *La durabilité des bétons*, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, pp. 212-213.



TFig 2.114- Relation entre le taux de corrosion et le potentiel de demi cellule (20°C).  
 [Tiré de Chess, P. and Gronvold, F. 1996 Corrosion investigation - A guide to half cell mapping, Thomas Telford, London, 31 p.].

- Un **potentiel supérieur** à -600 mV CSE indique que le taux de corrosion est contrôlé par la **réaction anodique**.
- Un **potentiel inférieur** à -600 mV CSE indique que le taux de corrosion est contrôlé par la **réaction cathodique**. Le manque d'oxygène à la cathode diminue l'activité de corrosion.
- Le relevé géographique du potentiel permet de tracer les courbes équipotentielles qui peuvent être utilisées pour repérer les endroits où il y a présence de corrosion (les mesures de potentiel ne **sont pas** nécessairement représentatives du **taux** de corrosion) (Fig 2.115).

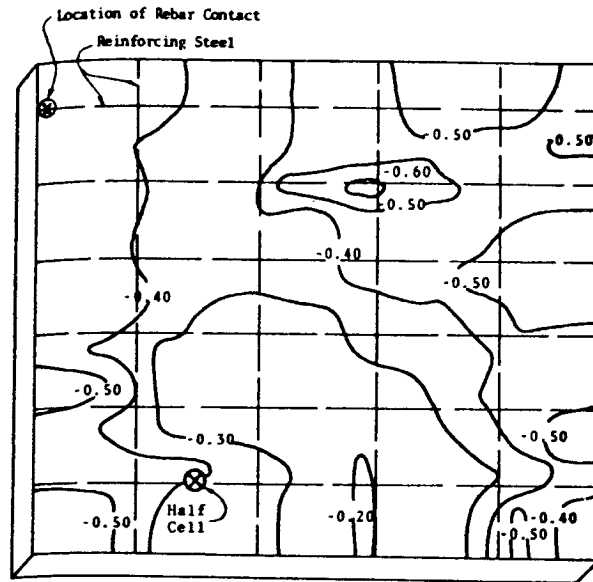


Fig 2.115- Courbes équipotentielles typiques.  
 [ASTM C876-91 Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel Concrete, ASTM Standard, Section 4, Vol 04.02, Cement and Aggregates].

- La norme ASTM fixe une **probabilité de corrosion** en fonction des niveaux de potentiel mesurés dans des zones particulières. **(Ces règles doivent être appliquées avec discernement ! - consulter l'annexe de la norme)** (Tab 2.9)

Tab 2.9- Probabilité de corrosion en fonction du potentiel de demi cellule (Norme ASTM C876-91)

Probabilité de corrosion, P (%)	Potentiel de corrosion, électrode standard, Cu/CuSo <sub>4</sub> , (Volts)
< 10	$E_c > -0,20$
50 (incertaine)	$-0,35 < E_c < -0,20$
> 90	$E_c < -0,35$

- Il est souvent nécessaire de **coupler** ces mesures avec des **essais supplémentaires** pour pouvoir tirer des conclusions claires sur l'état de la corrosion:

- Teneur en ions chlore
- Profondeur de carbonatation
- Relevé des zones de délamination
- Analyse des conditions d'exposition (humidité du béton)

#### n **Localisation des délaminations**

- Cette technique consiste à **localiser les zones de fissuration** au niveau de l'interface entre les barres d'armature et le couvert de béton.
- Un opérateur **expérimenté** peut parvenir à localiser ce type de défauts à **l'aide d'un marteau ou d'une chaîne** qu'on tire sur les surfaces horizontales.
- En général cette technique **sous-estime** l'ampleur des dégradations <sup>8</sup>. Il n'est pas rare de constater des **écarts de plus de 40%**. Il faut donc tenir compte de cette possibilité lors de l'évaluation des coûts des travaux de réparation.

#### n **Profondeur de carbonatation**

- On peut évaluer la profondeur du **front de carbonatation** en appliquant une solution de **phénolphtaléine** à la surface d'un échantillon ou d'une carotte de béton.
- La solution de phénolphthaléine reste incolore dans les zones carbonatées et vire au rose dans les zones non carbonatées.

#### n **Dosages en chlorures**

- On peut mesurer la **teneur en chlorures solubles à l'eau** partir de petits échantillons carottés, à partir de poudres recueillies lors d'un forage ou à partir de la solution interstitielle extraite par pressage de la pâte de ciment.

---

<sup>8</sup> Broomfield, J. P. 1994 *Assessing corrosion damage on reinforced concrete structures*, Corrosion and Corrosion Protection of Steel in Concrete, Sheffield Academic Press, p. 1-25.

- Méthodes **ASTM C 1218, AASHTO T 260, FHWA RD-77-85**
- Ces méthodes permettent de fournir une estimation de la quantité de **chlorures libres** (non piégées) dans le béton.
- On peut mesurer la quantité de **chlorures totaux** (digestion à l'acide) en utilisant différentes techniques (électrodes spécifiques, titration, etc.).
- **Attention, de nombreux paramètres peuvent modifier le seuil critique de concentration en chlorures requis pour amorcer la corrosion.**

#### n Mesures de résistivité

- Une **appareil spécial**, comportant **4 sondes**, peut être utilisé pour mesurer la résistivité du béton. Cette mesure peut être interprétée pour évaluer le niveau d'activité de corrosion du béton armé.
- La **résistivité électrique permet d'obtenir une évaluation du degré d'humidité, de la dimension et de la tortuosité des pores du béton**. La résistivité est très sensible à la qualité du béton (dosage en ciment, E/C, mûrissement, ajouts minéraux).
- Les pointes des 4 sondes sont insérées par forage ou par enfoncement dans le béton durci.
- **L'interprétation** des mesures de résistivité est **empirique** <sup>9</sup>:

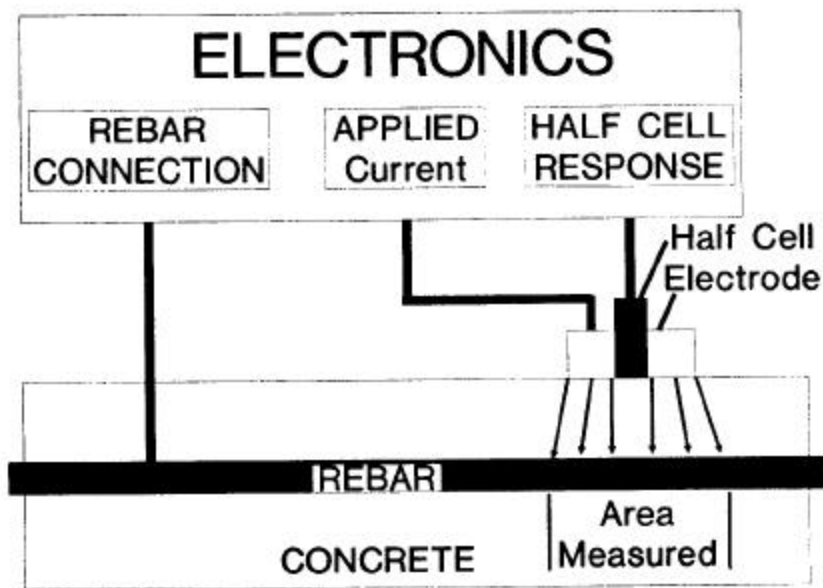
R > 20 kΩcm	Taux de corrosion faible
10 < R < 20 kΩcm	Taux de corrosion faible à modéré
5 < R < 10 kΩcm	Taux de corrosion élevé
R < 5 kΩcm	Taux de corrosion très élevé

- Pour être valables, les mesures de résistivité doivent être interprétées en parallèle avec d'autres type de mesures.

#### n Taux de corrosion

<sup>9</sup> Broomfield, J. P. 1994 *Assessing corrosion damage on reinforced concrete structures*, Corrosion and Corrosion Protection of Steel in Concrete, Sheffield Academic Press, p. 1-25.

- **Le taux de corrosion est probablement la meilleure technique pour évaluer l'activité de corrosion dans le béton armé.**
- Selon la loi de Faraday, on peut montrer que dans le cas de l'acier, un courant de corrosion de **1  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$**  d'acier, correspond à une attaque de **11,6  $\mu\text{m}$  par année.**
- Pour mesurer le courant de corrosion, on utilise un appareil comportant 3 canaux (Fig 2.116).



Tab 2.116 - Schéma d'un appareil de polarisation linéaire.

[tiré de : Broomfield, J. P. 1994 *Assessing corrosion damage on reinforced concrete structures*, Corrosion and Corrosion Protection of Steel in Concrete, Sheffield Academic Press, p. 1-25].

- L'appareil comporte une **connexion sur une barre d'armature**, une **demi-cellule** et une **électrode auxiliaire** qui permet d'appliquer un courant de perturbation.

◦ On obtient le courant de corrosion par l'équation suivante:

$$I_{\text{cor}} = \frac{B}{R_p}$$

Avec,

$I_{\text{cor}}$ : Courant de corrosion

B: Une constante (52 mV)

$R_p$ : Résistance de polarisation

$$R_p = \frac{\delta E}{\delta I}$$

où,  $\delta E$  = Variation du potentiel  
 $\delta I$  = Variation du courant

- ° On ne **connaît pas** précisément la **zone d'influence de l'appareil** (de nouveaux types d'appareils, plus précis, sont maintenant disponibles).
- ° On peut **interpréter les mesures** à l'aide de la table suivante <sup>10</sup>

$I_{cor} < 0,2 \mu A/cm^2$	Pas de corrosion
$0,2 < I_{cor} < 1,0 \mu A/cm^2$	Possibilité de corrosion en 10 ou 15 ans
$1,0 < I_{cor} < 10 \mu A/cm^2$	Possibilité de corrosion en 2 à 10 ans
$I_{cor} > 10 \mu A/cm^2$	Corrosion prévue en 2 ans ou moins

- ° Les mesures sont sensibles par la température et l'H.R.
- ° **Cette technique est surtout utile dans les environnements où la corrosion est causée par des chlorures.** L'interprétation des résultats est plus complexe lorsque la corrosion résulte de la carbonatation.

## n Autres méthodes

- Il existe d'autres méthodes de détection ou de quantification basées sur la **thermographie infrarouge ou la détection au radar.**
  - ° L'image **infrarouge** permet de localiser les zones de **délaminations** dans le plan de la surface et l'image **radar** permet d'obtenir des informations en fonction de la profondeur sous la surface (localisation des zones **d'interface**).
  - ° Le **couplage** de ces deux techniques à une évaluation visuelle permet généralement d'identifier les zones problématiques avec une assez **bonne précision**.

<sup>10</sup> Broomfield, J. P. 1994 *Assessing corrosion damage on reinforced concrete structures*, Corrosion and Corrosion Protection of Steel in Concrete, Sheffield Academic Press, p. 1-25.

- Des compagnies spécialisées possèdent des **unités mobiles** qui peuvent synchroniser une image vidéo de la chaussée avec un enregistrement thermographique et un relevé au radar.

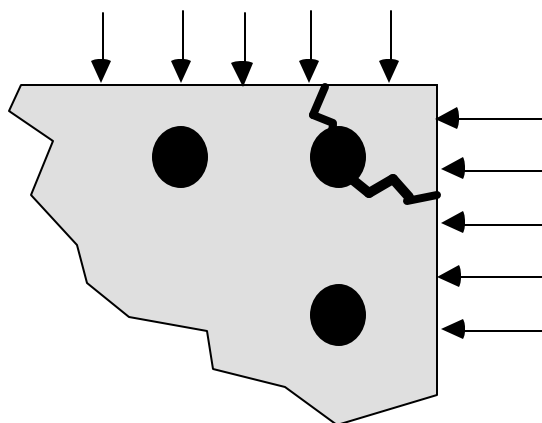
## 2.6.7 Les mesures de prévention

### 2.6.7.1 Formulation

- Il faut **minimiser la perméabilité** en augmentant la compacité de la pâte
  - Utiliser en rapport **E/C** approprié
  - Utiliser des **ajouts minéraux** (attention à la cure !)

### 2.6.7.2 Mise en oeuvre

- Prévoir une **cure soignée**.
- **Éviter les accumulations d'eau** par un système de drainage approprié et bien entretenu ou en prévoyant une géométrie qui favorise l'écoulement de l'eau.
- Respecter les **épaisseurs de recouvrement** prescrites.
- Utiliser une **bonne méthode de mise en place** pour bien densifier le béton au voisinage des armatures.
- Attention à la disposition des barres au voisinage des angles pour éviter que la **pénétration des agents agressifs** s'effectue selon les **deux directions** (Fig 2.117).



Tab 2.117 - Mauvais positionnement d'une barre d'armature dans une marche d'escalier.

### 2.6.7.3 Barres recouvertes d'époxy

- Les enduits d'époxy offrent une protection supplémentaire contre la corrosion seulement **si la couche d'époxy est suffisamment épaisse** et si elle est exempte de défauts de surface <sup>11,4</sup>.
- **Il faut utiliser des supports et des attaches non métalliques !.**
- Le degré de protection dépend du type d'enduit (époxy liquide, époxy en poudre). Les époxy en poudres (appliqués en usine) donne généralement de meilleurs résultats.<sup>3</sup>
- En général, on signale que la protection **supplémentaire est marginale** pour des épaisseurs de **moins de 200 µm**.<sup>3,4,5</sup>.
- Le degré de protection supplémentaire est **marginal** si le recouvrement **d'époxy est endommagé** avant, pendant ou après la mise en place du béton.<sup>12,13,3</sup>
- Dans le cas d'une réparation, il est très important de faire une **bonne préparation de la surface** avant l'application de l'époxy liquide sur les barres.
- **Attention à la manutention des barres.**
  - Défauts de surface dus aux chocs, abrasion, flexion des tiges, pliage, attaches, ....
  - On doit inspecter les barres et réparer les défauts de surface.

11 Salparante L, 1988 *Epoxy-coated concrete reinforcements*, Technical Research Centre of Finland, Research Report No 525, Espoo, March 1988, 74 p.

12 Sagües, A.A., Powers, R.G. et Kessler, R. 1994 *Corrosion Progresses and Field Performance of Epoxy-Coated Reinforcing Steel in Marine Substructures* NACE, Corrosion 94, Paper No 299, 15 p.

13 Swamy, R.N., Koyama, T.A. et Mikami, N. 1988 *Durability of Steel Reinforcement in Marine Environment* Concrete in Marine Environment, ACI SP-109, p. 146-161.

---

**Un béton bien formulé pour minimiser la perméabilité (E/C faible, fumée de silice, cendres volantes) est souvent un moyen bien plus simple et plus économique d'obtenir une bonne protection contre la corrosion des armatures.<sup>4</sup>**

---

#### 2.6.7.4 Barres galvanisées à chaud

- La **galvanisation à chaud** permet de déposer une couche de **zinc** à la surface des barres. Au contact de la solution interstitielle, il se forme un composé insoluble **d'hydroxyzincate de calcium qui protège** bien contre la carbonatation et l'action des ions chlore.
- Le revêtement de zinc doit être **suffisamment épais** afin d'éviter la présence d'une couche intermédiaire d'alliage Zn-Fe qui est moins protectrice.

---

**Dans une même structure ou partie de structure, il faut éviter d'utiliser en même temps des barres galvanisées et non galvanisée (ou: boulons, ancrages, etc).**

---

#### 2.6.7.5 Barres en acier galvanisé

- Ces barres offrent une **très bonne protection contre la corrosion**<sup>14</sup>.
  - **Leur coût est cependant très élevé.**
  - Elle sont de plus en plus utilisées par le MTQ

#### 2.6.7.6 Inhibiteurs de corrosion

- Les inhibiteurs de corrosion sont des composés chimiques qui **prolongent la passivité** de l'acier dans le béton en présence d'agents agressifs. Les différents produits peuvent agir au niveau de la réaction anodique ou cathodique.
- **Les inhibiteurs de corrosion permettent en fait d'allonger la période d'amorçage.**

---

<sup>14</sup> Daniel Vézina 1997 Laboratoire Central du MTQ, Communication personnelle.

- Les différents produits:
  - Nitrite et benzoate de sodium (ajoutés au mélange, ils peuvent réduire la résistance à la compression du béton).
  - **Nitrite de calcium** (plus efficace, peut accélérer la prise). Ce type de produit est de plus en plus utilisés par MTQ.
  - Certains produits **peuvent migrer** dans le béton vers les barres d'armature. Ils peuvent être ajoutés dans le matériau de réparation ou appliqués sur le recouvrement de béton qui protège la barre d'armature. Ces produits migrent à travers le béton et forment une mince couche protectrice autour de la barre.
  - Il existe de nombreux produits de ce genre (quelques nouveaux à chaque année, composition et mécanismes d'action souvent inconnus !). **Leur efficacité est généralement démontrée en laboratoire. En chantier, elle reste à prouver.**
- Les inhibiteurs de corrosion peuvent être de type **cathodique** ou **anodique** selon l'endroit où ils agissent.
  - Le **nitrite de calcium** est un inhibiteur de corrosion qui agit au niveau des sites **anodiques**.
- Les nitrites permettent aux ions ferreux de retrouver un état de passivation aux endroits où le **film passif a été détruit par la carbonatation ou par les ions chlorures**.
- Les nitrites permettent de **reformer un film passif**, même si la concentration en ions chlore est supérieur au seuil critique d'initiation de la corrosion.
  - Le nitrite de calcium offre une protection efficace dans les cas suivants.<sup>15</sup>

---

<sup>15</sup> Norme CSA S413-94 Parking structures - Structures Design, Appendice C, Canadian Standard Association, Rexdale, Toronto, Canada.

- Acier d'armature ordinaire
- Acier recouvert d'époxy
- Acier galvanisé
- Aluminium
- Bétons avec ou sans fumée de silice
- Bétons avec cendres volantes ou laitiers

◦ Le nitrite de calcium n'a pas **d'effet sur le dosage de l'agent entraîneur d'air** ou sur les caractéristiques du réseau de bulles d'air entraîné.

◦ Le nitrite de calcium a une fonction secondaire **d'accélérateur de prise**. Un **retardateur** de prise peut être ajouté dans le cas de bétonnage par **temps chaud**.

• **Pour obtenir une protection adéquate il est très important de maintenir un rapport  $Cl^-/NO_2^- < 1,5 - 1,0$ . Plus la quantité de chlorure est importante au voisinage des barres d'acier plus le dosage en nitrite devra être élevé (Fig 2.118).**

◦ Pour connaître le dosage en nitrite de calcium requis pour protéger le béton contre la corrosion, il faut donc pouvoir **estimer la quantité de chlorures** qui parviendra au niveau des barres d'armatures.

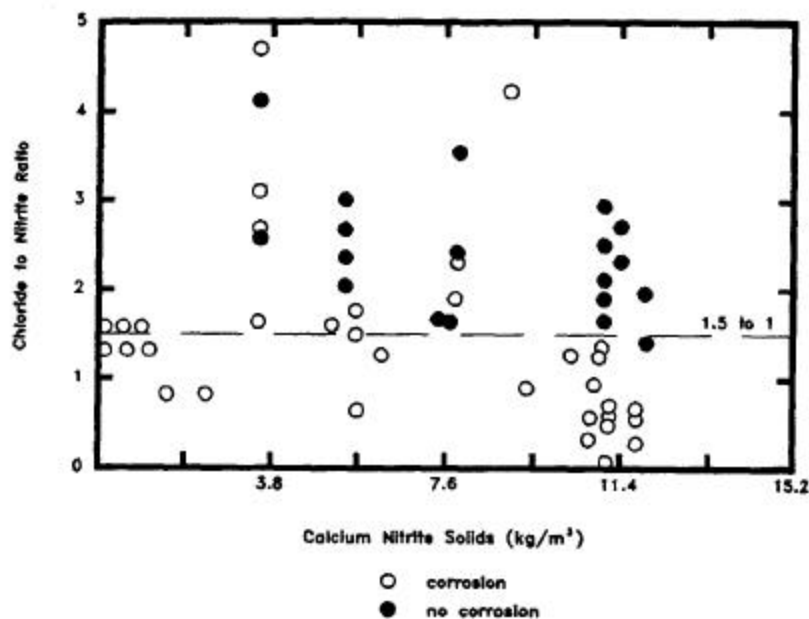


Fig 2.118 - Influence du rapport chlorure/nitrite de calcium sur le degré de protection contre la corrosion.

[tiré de : Norme CSA S413-94 Parking structures - Structures Design, Appendice C, Canadian Standard Association, Rexdale, Toronto, Canada].

- La **norme S413** (appendice C) propose des **abaques et des tables** qui aident à déterminer le dosage en nitrite de calcium nécessaire pour protéger le béton des **dalles de stationnement**.
  - On peut d'abord estimer la quantité de chlorures qui parviendront au niveau des armatures à l'aide des Figures 2.119 ou 2.120 (on assume une durée de vie de 40 ans).
  - Le Tableau 2.10 permet ensuite de déterminer le dosage en nitrite de calcium ( $\text{kg/m}^3$  de béton). **Le dosage ne devrait jamais être inférieur à  $3,8 \text{ kg/m}^3$ .**

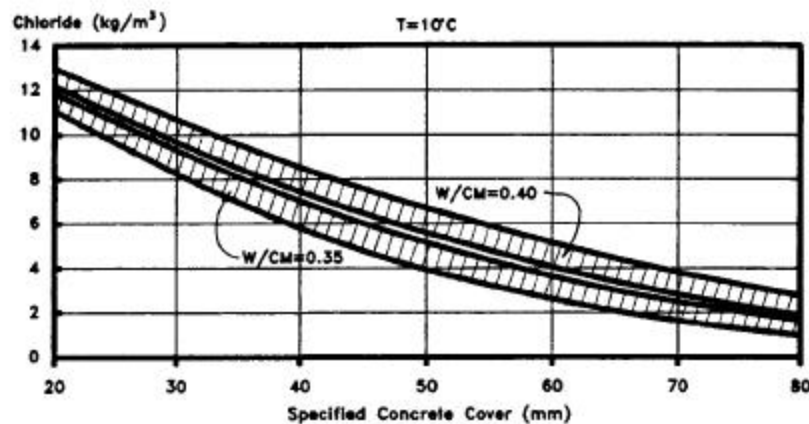


Fig 2.119 - Profils approximatifs de concentration en ions chlorures (au niveau des barres d'armature) des planchers des stationnements ( $T=10^\circ\text{C}$ ).

[tiré de : Norme CSA S413-94 Parking structures - Structures Design, Appendice C, Canadian Standard Association, Rexdale, Toronto, Canada].

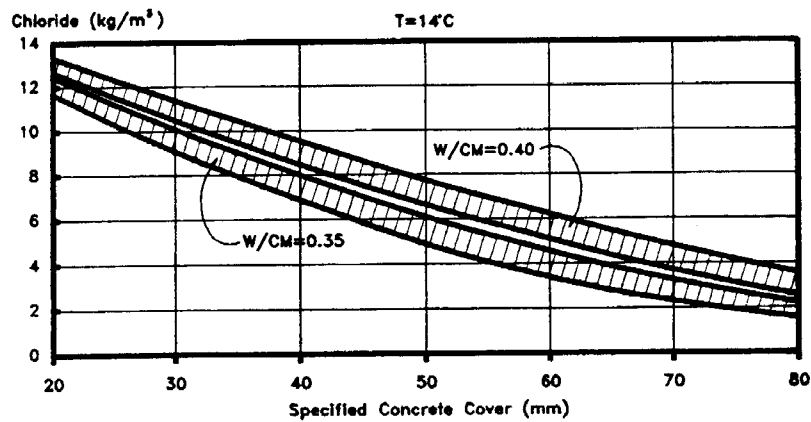


Fig 2.120 - Profils approximatifs de concentration en ions chlorures (au niveau des barres d'armature) des planchers des stationnements (T=14°C).  
[tiré de : Norme CSA S413-94 Parking structures - Structures Design, Appendice C, Canadian Standard Association, Rexdale, Toronto, Canada.]

Tab 2.10 - Dosage minimum en nitrite de calcium en fonction de la concentration en chlorures au niveau des barres d'armature.  
[tiré de : Norme CSA S413-94 Parking structures - Structures Design, Appendice C, Canadian Standard Association, Rexdale, Toronto, Canada.]

**Table C1**  
**Minimum Calcium Nitrite Dosage Rates**  
(See Clause C10.2.)

Estimated chloride ion concentration at reinforcement level, kg/m <sup>3</sup>	Minimum dosage of solid calcium nitrite, kg/m <sup>3</sup>
3.5	3.8
5.0	4.8
6.5	6.2
8.0	7.7
9.5	9.1

**Notes:**

- (1) Linear interpolation may be used, or the solid calcium nitrite may be determined by the expression  $0.95 \times Cl + 0.075$ , where Cl is the chloride ion concentration. This expression should not be used beyond the range of values indicated in the table.
- (2) The dosage shall not be less than 3.8 kg/m<sup>3</sup>.
- (3) To convert kg/m<sup>3</sup> solid calcium nitrite to the required dosage of calcium nitrite solution, divide by the specific gravity of the solution (generally between 1.25 and 1.35) and divide by the fraction of calcium nitrite in the manufacturer's solution (eg. for a 30% solution of calcium nitrite, to provide 7.6 kg/m<sup>3</sup> of solid calcium nitrite requires  $7.6/1.27/0.30 = 20$  g/m<sup>3</sup>). See Clause C10.2.6.

### 2.6.7.7 Protection cathodique

- La corrosion des armatures résulte du passage d'un courant dans des piles locales où le métal joue le rôle d'anode.

- La protection cathodique consiste à **porter l'acier à un potentiel pour lequel la réaction anodique devient pratiquement négligeable.**
  - Cette technique est surtout utilisée pour **contrôler la corrosion** plus que pour la prévenir.
- Ce type de protection consiste à faire passer un **courant imposé** par une source extérieure **entre les armatures** (cathode) et des **anodes constituées par des matériaux inertes.**
  - La source de courant est ajustée pour maintenir l'acier dans des conditions de protection (en général, de l'ordre de 10 mA/m<sup>2</sup> d'armature).
- **Les aciers d'armatures deviennent donc des cathodes.** Des **anodes externes** sont généralement appliquées à la surface du béton.
- Un **courant continu** est appliqué aux anodes à l'aide d'un redresseur relié à une alimentation électrique (Fig 2.121).
- Le **circuit électrique** est complété en reliant les **barres d'armatures à la borne négative** du redresseur. La protection des aciers d'armature peut être obtenue avec des potentiels relativement faibles (1 V).

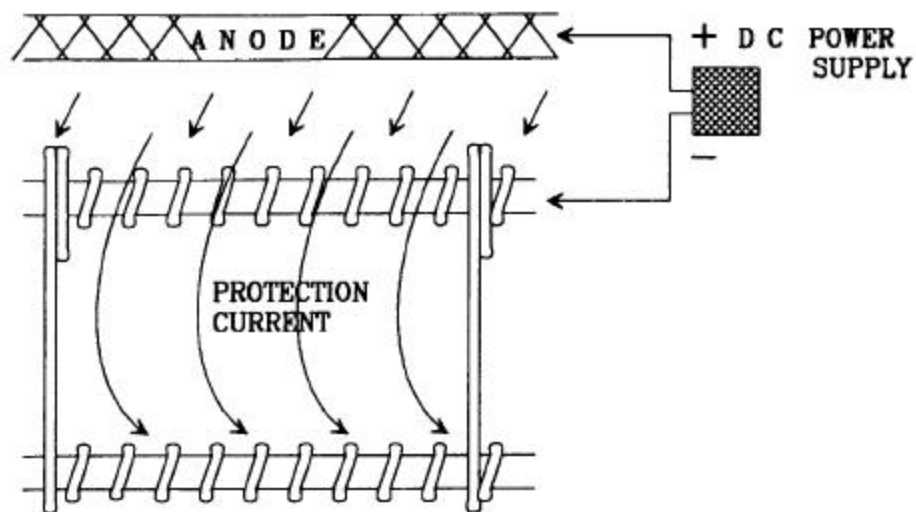


Fig 2.121 - Représentation schématique d'un système de protection cathodique.

[tiré de: Mailvaganam, N. P. 1992 *Repair and protection of concrete structures*, CRC Press, Boca Raton, Florida, USA, 473 p].

- Le système est généralement constitué d'une **surface conductrice** (enrobé bitumineux de quelques centimètres d'épaisseur ou moins) qui contient des anodes (Fe-Si, polymère, grillage en titane-oxyde de titane, etc).
  - **Les anodes** (et certaines connexions électriques en contact avec l'électrolyte) doivent être constituées de **matériaux nobles, très résistants à la corrosion**.
    - Treillis métalliques d'alliages spéciaux à base de titane, platine, etc
    - Polymères composites conducteurs
  - Des **anodes primaires** sont généralement reliées par un **revêtement conducteur** (peintures, mortiers, asphalte conducteurs) qui permet de distribuer le courant entre les anodes primaires et sur toute la surface de béton à protéger.
- Pour produire une protection cathodique efficace, il est important de fournir une densité de courant uniforme sur l'ensemble des aciers d'armature.
  - Si le **courant est trop faible**, la protection est insuffisante.
  - Si le **courant est trop fort**, on peut endommager le béton au voisinage des barres d'armature.
    - Production de bulles d'hydrogène:
      - \* Fragilisation de l'acier
      - \* Augmentation de la concentration en alcalis près des barres -> perte d'adhérence acier-béton.
- **Il existe deux principaux type de système de protection cathodique**
  - **Anodes sacrificielles**
    - Les barres d'armature sont reliées à des anodes sacrificielles constituées d'un **métal plus noble**.

- Aucun courant n'est imposé au système.

◦ **Courant imposé**

- Un courant imposé est appliqué entre des anodes externes et les barres d'armature.

- C'est le système le plus utilisé présentement.

• Les **anodes** externes peuvent être de **différents types**:

◦ **Revêtements asphaltiques** conducteurs appliqués à la surface du béton.

◦ **Anodes de platine enrobées** d'un mortier conducteur à base de résine. Les fils de platine sont placés à l'intérieur d'une mince ouverture pratiquée à l'aide d'une scie à béton.

◦ **Revêtements conducteurs** (peintures). Des anodes primaires (fils de platine-niobium ou platine-titane) sont placées en surface du béton et recouvertes par le revêtement conducteur.

◦ **Treillis** métalliques (à base de titane) enduits de béton projeté.

• Pour assurer une protection efficace, il est très important **d'éviter les courts-circuits** (contact direct en l'armature et les anodes). Tout le courant passe alors par cet endroit et la protection des autres barres est inexistante.

• Il doit y avoir **continuité électrique complète** entre toutes les barres d'armature. Les barres isolées électriquement n'ont aucune protection et peuvent se corroder très rapidement (rapport cathode/anode très élevé).

• Les barres **recouvertes d'époxy** doivent être **reliée électriquement** (par un fil) aux autres barres.

• Il est bon de **répartir la protection cathodique en plusieurs zones** indépendantes possédant leur propre redresseur. On peut alors mieux contrôler le système en fonction de la **densité de ferrailage**, de **l'humidité**, etc.

- On doit effectuer une **inspection régulière** du système (à chaque mois) pour vérifier l'état du système et pour ajuster, au besoin, les paramètres électriques de la protection cathodique (voltage, densité de courant, etc.)
  - **Les coûts de ce type de protection sont assez élevés.** Elle n'est généralement utilisée que dans le cas d'ouvrages **sérieusement dégradés**. Elle est présentement utilisée pour contrôler les dégradations par corrosion de plusieurs ponts, stationnements étagés et structures off-shore.
- 
- **Pour être efficace, la protection cathodique nécessite des programmes réguliers d'inspection et d'entretien.**
-