

## Carbonatation du béton et corrosion des armatures

Y. Houst

### RÉSUMÉ

Au contact du gaz carbonique de l'air, le béton se carbonate, ce qui entraîne une baisse de pH de l'eau des pores du béton et supprime l'immunité dont bénéficie l'acier. La vitesse de carbonatation dépend de nombreux facteurs tels que qualité du béton, teneur en eau, humidité relative de l'air, température, etc. De nombreux facteurs influencent également la vitesse de corrosion de l'acier dans le béton: présence de chlorures, qualité du béton, teneur en eau, température, fissures, etc. On décrit les processus de carbonatation et de corrosion et discute l'influence des différents facteurs. On indique également les méthodes préventives et les méthodes de réparation à appliquer.

### RIASSUNTO

*A contatto dell'anidride carbonica dell'aria, il calcestruzzo subisce una carbonatazione e l'acqua dei pori un abbassamento di pH che sopprime l'immunità dell'acciaio. La velocità della carbonatazione dipende da numerosi fattori quali ad esempio: qualità del calcestruzzo, tenore in acqua, umidità relativa dell'aria, temperatura. Tali fattori, uniti alla presenza di cloruri e di fessure, influenzano inoltre la velocità di corrosione dell'acciaio nel calcestruzzo. Nel presente articolo sono descritti i processi di carbonatazione e di corrosione discutendo l'influenza dei differenti fattori. I metodi di prevenzione e di riparazione sono ugualmente trattati.*

### ABSTRACT

The reaction between atmospheric carbon dioxide and concrete leads to a decrease of water pH within the pores and suppress the immunity of the steel embedded in this medium. The rate of carbonation depends on a variety of factors like concrete quality, water content, relative humidity of the air, temperature, etc. Several factors also influence the rate of corrosion of the steel in the concrete: presence of chlorides, quality of concrete, water content, temperature, cracks, etc. The process of carbonation and corrosion, and the influence of the various factors will be discussed. Finally the preventive and repairing methods which can be used will be described.

### 1. INTRODUCTION

Dès le début de l'emploi du «béton moderne» au siècle passé, on a été confronté à des problèmes de durabilité: dégradation par certaines eaux naturelles, eau de mer, sels, gel. Cependant, à l'exception de cas particuliers bien connus, on a longtemps pensé que le béton était un matériau pratiquement indestructible. Ce n'est que récemment, vingt à trente ans, qu'on s'est préoccupé des problèmes de durabilité. Des examens soigneux de ponts et d'autres structures qui devaient être démolis et remplacés par de nouvelles constructions, ont montré assez clairement que, à cause de la corrosion, la durée de vie d'une structure était considérablement plus courte que celle prévue initialement. De plus, les structures en béton sont devenues de plus en plus minces et sont souvent exposées à des conditions climatiques sévères (structures en mer) et aux environnements pollués des zones industrielles. La durabilité du béton, armé ou non, dans des conditions climatiques normales et extrêmes, est donc devenue un sujet d'intérêt majeur et, par conséquent, un domaine de recherche largement exploré.

La carbonatation du béton est une réaction qui est pratiquement sans conséquence pour le béton lui-même. Par contre, quand il contient des armatures, il n'en est plus de même. L'acier, qui est protégé dans le béton non carbonaté, peut subir la corrosion lorsque le béton se carbonate. De nombreux facteurs jouent un rôle dans ce cas: qualité du béton, couverture des armatures, présence de chlorures, humidité, température, pollution, etc.

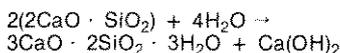
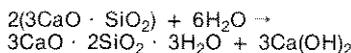
Dans cet article, nous décrivons le processus de carbonatation du béton, de corrosion de l'acier d'armature et de l'influence de la carbonatation sur la corrosion. De plus, les précautions à prendre et les méthodes de réparation seront également décrites.

### 2. LA CARBONATATION DU BÉTON

Le ciment portland contient essentiellement quatre composés qui sont:

- 2 silicates (bi et tricalciques):  
 $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  ou  $\text{C}_3\text{S}$   
 $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  ou  $\text{C}_2\text{S}$
- l'aluminate tricalcique:  
 $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  ou  $\text{C}_3\text{A}$
- l'aluminoferrite tétracalcique:  
 $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$  ou  $\text{C}_4\text{AF}$

Ces quatre composés représentent plus de 90 % du CP. Les deux silicates, qui assurent essentiellement la résistance mécanique du ciment hydraté, entrent pour environ 75 % dans la composition du CP. Les réactions d'hydratation des silicates sont les suivantes:



On peut constater que les produits d'hydratation des deux silicates sont identiques et qu'il se forme de l'hydroxyde de calcium,  $\text{Ca(OH)}_2$ , qu'on connaît également, dans le domaine de la construction, sous le nom de chaux hydratée. Ce produit n'a que peu d'importance du point de vue de la résistance mécanique, mais par contre il joue un rôle considérable dans les problèmes de durabilité. Les quantités de  $\text{Ca(OH)}_2$  libérées par l'hydratation du ciment dans un béton sont considérables. On peut calculer, d'après les équations d'hydratation, que par exemple dans un  $\text{m}^3$  de béton dosé à  $300 \text{ kg/m}^3$ , plus de  $50 \text{ kg}$  de  $\text{Ca(OH)}_2$  sont libérés si l'on admet un degré d'hydratation du ciment de 60 %.

L'hydroxyde de calcium, qui est une base, confère à l'eau qui se trouve dans les pores du béton un pH élevé, compris entre 12,5 et 13,5. La chaux libre ( $\text{CaO}$ )

et les alcalis du ciment ( $\text{Na}_2\text{O}$  et  $\text{K}_2\text{O}$ ) contribuent également à rendre l'eau des pores basique. L'atmosphère contient actuellement environ  $0,33 \text{ ml}$  de gaz carbonique ( $\text{CO}_2$ ) par litre d'air, et l'augmentation est d'environ  $0,0015 \text{ ml/litre}$  par année. C'est la conséquence de la combustion des carburants fossiles (mazout, essence, charbon). Au contact du gaz carbonique de l'air ou dissous dans l'eau (de pluie, souterraine, etc.), l'hydroxyde de calcium réagit en formant du carbonate de calcium (calcaire). Cette dernière substance, très peu soluble dans l'eau, entraîne une baisse du pH de l'eau des pores jusqu'à une valeur d'environ 8. La réaction de  $\text{Ca(OH)}_2$  du béton avec le  $\text{CO}_2$  est appelée carbonatation du béton. On peut la schématiser par l'équation suivante:  $\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 = \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ .

La carbonatation du béton est un phénomène lent. La vitesse dépend de nombreux facteurs tels que: compacité, dosage en ciment, type de ciment, teneur en eau du béton, degré d'hydratation du ciment, concentration en gaz carbonique de l'air, humidité relative de l'air, température. Plus la teneur en gaz carbonique de l'air est élevée, plus la vitesse de carbonatation est élevée.

L'influence de la compacité, qui dépend notamment du rapport eau/ciment, est montrée à la figure 1. La vitesse de carbonatation diminue lorsque la quantité d'eau diminue. En effet, une diminution d'eau de gâchage réduit la porosité du béton, ce qui freine la pénétration du gaz carbonique. La vitesse de carbonatation diminue également lorsque le dosage en ciment augmente. Non seulement la quantité de chaux à carbonater devient plus grande, mais la compacité du béton a également tendance à augmenter. Cela est naturellement valable pour des dosages courants.

L'humidité relative de l'air ambiant joue un rôle important car elle influence la teneur en eau du béton. Dans un béton où les pores sont remplis d'eau,

la carbonatation est lente car le béton devient peu perméable au gaz carbonique. A basse humidité, la vitesse de carbonatation diminue également. La réaction chimique est vraisemblablement favorisée par la présence d'une certaine quantité d'eau. La vitesse de carbonatation relative d'un béton en équilibre avec l'atmosphère ambiante est montrée à la figure 2.

influences importantes peuvent être prises en considération. Cependant, il est encore nécessaire de déterminer expérimentalement avec précision les valeurs des paramètres entrant dans le modèle et ce travail est en cours au LMC.

A titre d'exemple, le résultat d'un calcul de la profondeur de carbonatation pour deux types de béton est donné à la figure 3.  $C_1$  représente un béton courant

Cette relation a déjà été proposée par Venuat et Alexandre [4]. On utilise souvent la relation:

$$d = A\sqrt{t} \quad (2)$$

On peut évaluer la constante A pour un béton d'un certain âge en mesurant la profondeur de carbonatation et en

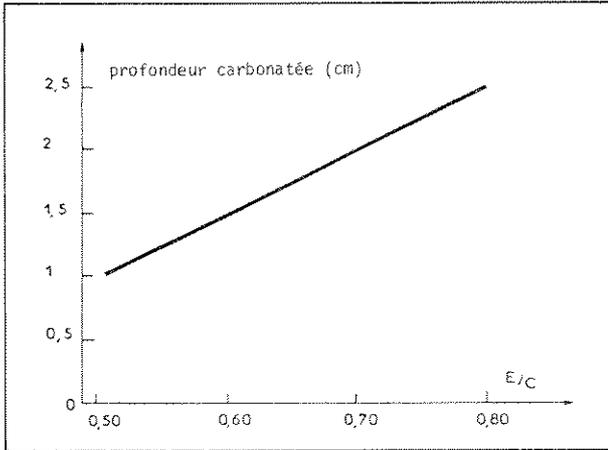


Fig. 1. Influence du rapport E/C sur la profondeur carbonatée au bout de trois ans [1].

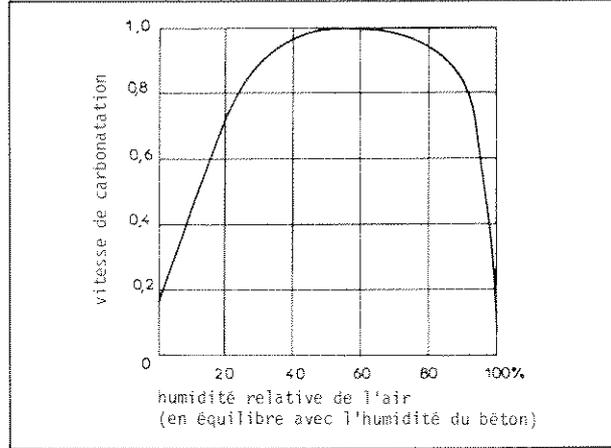


Fig. 2. Vitesse de carbonatation en fonction de l'humidité relative (d'après Verbeck).

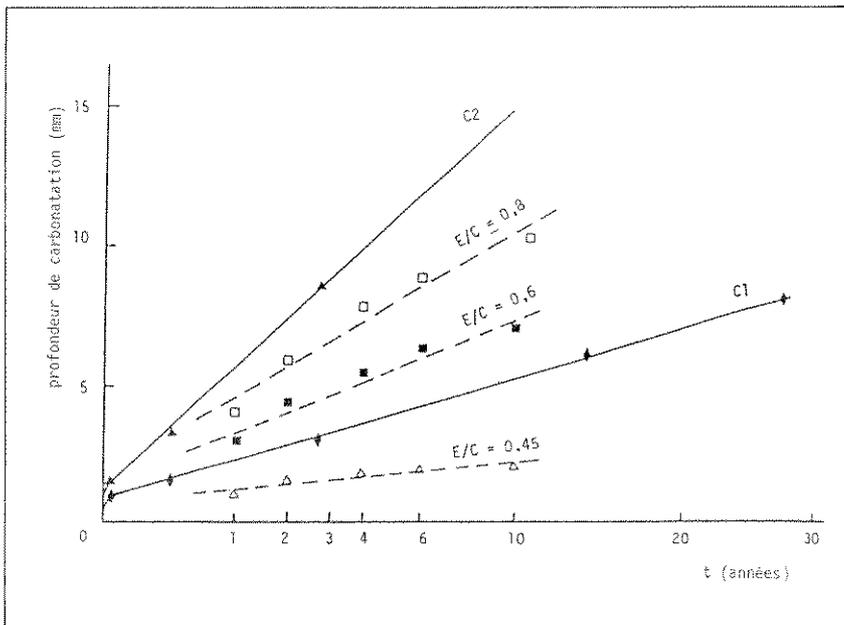
Le calcul de la profondeur de carbonatation du béton dans une atmosphère réelle est un problème très complexe comme peuvent le suggérer les nombreux facteurs cités précédemment. La masse des résultats expérimentaux publiés ne peut pas être utilisée et interprétée complètement car, jusqu'à maintenant, il n'y a pas de concept théorique satisfaisant des différents mécanismes de la carbonatation. Les méthodes de simulation numérique permettent actuellement de traiter de manière quantitative les processus agissant les uns sur les autres. Au Laboratoire des matériaux de construction (LMC) de l'EPFL, un modèle a récemment été développé [2]. En principe, toutes les

et  $C_2$  est typique pour un béton de mauvaise qualité. Des résultats expérimentaux observés sur différents bétons par Schiessi [3] ont également été introduits dans cette figure à titre comparatif.

En examinant la figure 3, on peut voir que, après une carbonatation initiale rapide, la croissance de la profondeur de carbonatation suit approximativement une loi en  $(t)^{1/2}$ . Ce résultat est en accord avec les observations déjà effectuées. Pour une estimation de la couche carbonatée (d), après un intervalle de temps t, on peut utiliser l'équation simple suivante:

$$d = a + b\sqrt{t} \quad (1)$$

Fig. 3. Profondeur carbonatée en fonction du temps pour deux types de béton:  $C_1$  et  $C_2$  [2]. On a également reporté, à titre comparatif, des résultats de Schiessi [3].

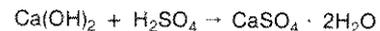


connaissant le temps pendant lequel il a été exposé. L'avantage de cette deuxième relation est qu'il suffit d'une seule valeur de d et de t pour évaluer le temps nécessaire pour que la couche carbonatée atteigne une armature, alors qu'il faut au moins deux valeurs avec la relation [1].

La profondeur de carbonatation peut être mesurée sur place d'une façon simple au moyen d'un indicateur de pH approprié. Pour cela, il faut, au moyen d'un burin par exemple, enlever des éclats de béton sur une certaine profondeur, éliminer la poussière et pulvériser une solution de phénolphtaléine. Le béton non carbonaté se colorera en rouge, tandis que le béton carbonaté ne changera pas de couleur.

Sur un ouvrage dont on veut connaître la profondeur de carbonatation, il faut effectuer de nombreuses mesures pour déterminer la profondeur moyenne et surtout les profondeurs extrêmes. En effet, ces dernières valeurs sont très importantes car c'est souvent dans les zones défavorables que la carbonatation est la plus profonde, et souvent il suffit que les armatures soient corrodées dans une zone limitée pour que l'ouvrage présente des dangers.

A part le gaz carbonique, l'atmosphère peut contenir d'autres gaz donnant des acides en solution. Le principal de ces gaz est le dioxyde de soufre ( $SO_2$ ) qui, par oxydation et en présence d'eau, donne de l'acide sulfurique ( $H_2SO_4$ ). L'acide sulfurique réagit avec l'hydroxyde de calcium du béton et il se forme fréquemment du gypse:



Cette réaction entraîne également une baisse du pH de l'eau dans les pores du béton encore plus importante que dans le cas du gaz carbonique. D'autre part, la formation de gypse peut entraîner des inconvénients importants dont la description n'entre pas dans le cadre de cette chronique.

|                         | CO <sub>2</sub>                        | SO <sub>2</sub>  |
|-------------------------|--|--|
| atmosphère propre       | 600 mg/m <sup>3</sup><br>(0,033 % vol) | ~ 0  |
| atmosphère industrielle | 1000 à 2000 mg/m <sup>3</sup>          | 0,1 à 0,2 mg/m <sup>3</sup><br>et à des endroits isolés<br>< 5 mg/m <sup>3</sup> |

Tableau 1. Concentration en CO<sub>2</sub> et SO<sub>2</sub> dans l'atmosphère [6].

Les concentrations en CO<sub>2</sub> et SO<sub>2</sub> de différentes atmosphères sont indiquées dans le tableau 1.

### 3. LA CORROSION ÉLECTROLYTIQUE

Lorsqu'on immerge un métal dans une solution d'électrolyte (solution contenant des cations et des anions), des ions du métal passent en solution, ce qui confère au métal une charge négative. Deux métaux différents immergés dans la même solution auront un potentiel différent et lorsqu'on relie les deux métaux par un conducteur, des électrons vont se déplacer du métal qui a le potentiel le plus négatif (l'anode) vers le métal le moins négatif (la cathode). On aura ainsi réalisé une pile électrolytique.

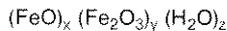
Une différence de potentiel peut également apparaître si un seul métal est utilisé et lorsque les deux électrodes sont placées dans des électrolytes différents ou de concentration différente. C'est ce qui se passe dans le cas des aciers d'armature; l'électrolyte se trouve dans la structure poreuse du béton et sa composition peut varier le long de l'armature, ce qui entraîne l'apparition de piles entre des points à différents potentiels.

Les réactions qui peuvent se produire dans les conditions normales sont les suivantes:

- 1) dissolution du fer à l'anode:  
 $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^{-}$
- 2) décomposition de l'eau à la cathode:  
 $H_2O + \frac{1}{2}O_2 + 2e^{-} \rightarrow 2OH^{-}$
- 3) migration des ions OH<sup>-</sup> à l'anode:  
 $Fe^{2+} + 2OH^{-} \rightarrow Fe(OH)_2$

Une représentation schématique de ces réactions est donnée à la figure 4.

En présence d'un excès d'oxygène, Fe(OH)<sub>2</sub> se transforme en Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et FeO. Selon les conditions, la composition des produits d'oxydation est variable et peut être représentée par la formule:



où x, y, z dépendent de l'environnement.

A l'exception de certaines conditions qui sont toujours remplies (fig. 9), il y a trois facteurs qui rendent possible la corrosion:

- a) la conductibilité électrolytique du béton;
  - b) la possibilité de dissolution anodique du fer;
  - c) la présence d'oxygène.
- a) L'eau est essentielle. Elle réagit avec l'oxygène à la cathode et permet d'établir le circuit entre l'anode et la cathode. La présence de sels dissous diminue la résistance de la pile de corrosion, ce qui augmente le courant et augmente la vitesse de corrosion.

b) Lorsque la corrosion a lieu, les réactions qui se produisent dépendent de la nature de l'électrolyte et du potentiel de surface qui apparaît naturellement ou qui est imposé. L'effet de ces facteurs est montré sur le diagramme de Pourbaix (fig. 5). On peut distinguer trois zones:

- une zone de corrosion lorsque toutes les conditions sont réunies;
- une zone sans corrosion, les ions métalliques ne peuvent s'échapper de la surface du métal;
- une zone de passivation; dans cette zone, le comportement de l'acier est un cas particulier de la corrosion très importante pour l'acier dans le béton; à la place de rouille, il se forme une pellicule protectrice d'oxyde et l'acier est dans un état passivé: il ne se corrode pas.

c) L'oxygène est nécessaire à la cathode où il se combine avec l'eau et les électrons pour former des ions hydroxyles (OH<sup>-</sup>). Sans oxygène il n'y aura pas de corrosion. La présence d'oxygène à l'anode modifie la composition des produits de corrosion.

Une pile de corrosion est réalisée seulement quand une différence de potentiel peut apparaître entre deux points reliés. La distance entre la cathode et l'anode peut varier de façon considérable, ce qui permet de distinguer deux types de pile: les micropiles et les macropiles. Les micropiles sont très locales et en relation avec la structure cristalline du métal. Les différences de potentiel sont dues à des différences de composition entre les cristaux. Ce type de pile est peu important dans la corrosion des armatures du béton. La corrosion se manifeste de façon typique sur un acier exposé à une atmosphère très humide et se traduit par l'apparition de rouille uniforme à la surface du métal.

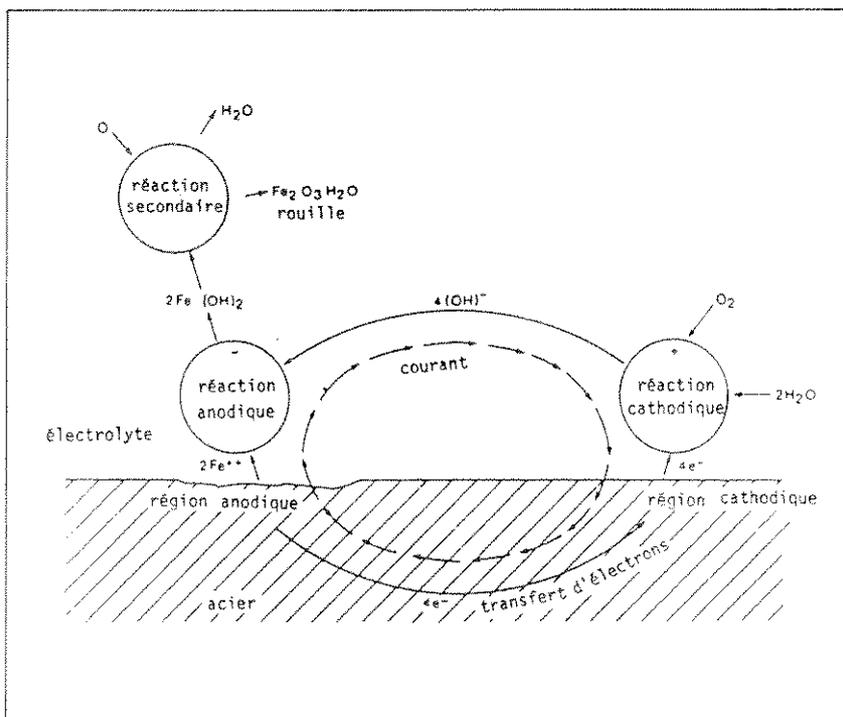
Dans les macropiles, l'anode et la cathode peuvent être éloignées de plusieurs centimètres. Ces piles se forment quand certaines parties du métal sont dans un environnement différent. Les différences de potentiels peuvent être considérables. La corrosion se traduit par l'apparition de taches de rouille: c'est ce que l'on constate normalement dans la corrosion des aciers d'armature dans le béton.

### 4. LA CORROSION DES ARMATURES DU BÉTON ARMÉ

La solution dans les pores du béton est une solution alcaline qui a un pH compris entre 12 et 13. L'acier a un potentiel naturel dans ce milieu qui peut être représenté par le point A de la figure 5. L'acier dans ce milieu est donc passivé (en l'absence de chlorures).

La carbonatation du béton entraîne une baisse du pH à une valeur d'environ 9. L'armature dans ce milieu tend à prendre un potentiel naturel représenté par le point B de la figure 5 et se trouve alors dans une zone de corrosion. Si tout le béton autour des armatures est carbonaté et si l'eau et l'oxygène sont à disposition, une corrosion par apparition de micropiles pourra se produire. Si, par contre, seulement certaines zones sont carbonatées (fissures, nids de gravier, armature en surface, etc.), des macropiles pourront apparaître entre l'armature de ces zones et celle

Fig. 4. Représentation schématique de la réaction de corrosion.



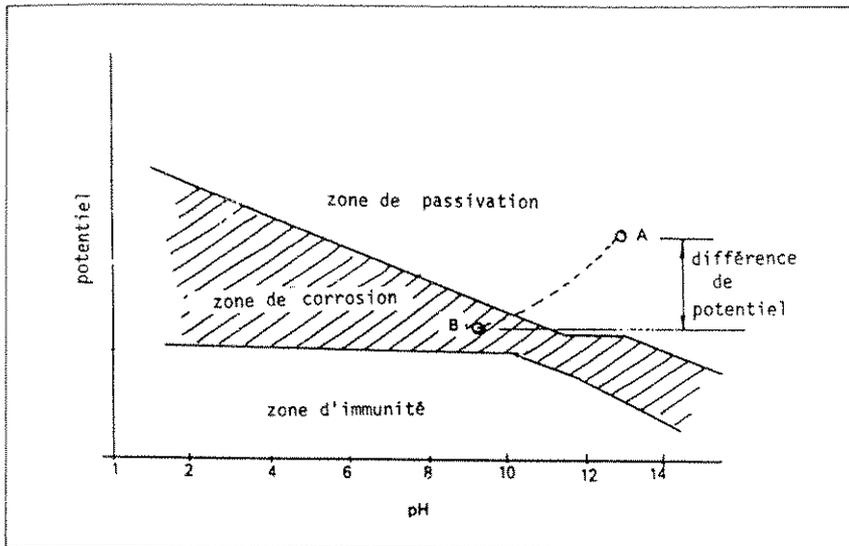


Fig. 5. Influence du pH et du potentiel sur la corrosion de l'acier.

$C_3A \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$  peu soluble. On admet en général que le béton armé doit avoir une teneur en chlorures ( $Cl^-$ ) inférieure à 0,4%, calculée par rapport à la teneur en ciment (0,4 kg de chlorure pour 100 kg de ciment). Cette limite est de 0,2% pour le béton précontraint.

La vitesse de corrosion dépend essentiellement des trois facteurs suivants:

- la résistance électrique du béton; plus elle est élevée, plus la vitesse de corrosion sera lente;
- la présence d'oxygène à la cathode; si la disponibilité de l'oxygène est limitée, c'est-à-dire inférieure à la quantité requise pour la réaction avec le flux d'électrons, ce sera un facteur contrôlant la vitesse;
- la vitesse à laquelle ont lieu les réactions anodiques; elle peut être modifiée par certains inhibiteurs; toutefois, ce n'est pas un facteur consi-

des zones non carbonatées. La différence de potentiel sera celle qui apparaît entre les points A (cathode) et B (anode) de la figure 5. C'est le phénomène le plus courant dans le béton armé [5]. La vitesse de corrosion en fonction du pH est indiquée à la figure 6.

La présence de chlorures dans l'eau des pores du béton joue un rôle très défavorable. Ces chlorures, même dans le béton non carbonaté, détruisent le film d'oxyde qui protège le métal et le maintient dans un état de passivation. La destruction du film d'oxyde se produit localement sur les surfaces les plus sensibles, ce qui conduit à l'apparition de piqûres qui deviennent de petites anodes formant des piles de corrosion très actives avec un pH très bas d'environ 4 à 5. Les chlorures proviennent le plus souvent des sels de déverglaçage, d'adjuvants (les chlorures sont interdits dans les adjuvants dans de nombreux pays), de granulats contaminés ou de la combustion de matières plastiques (PVC) lors des incendies.

Le ciment peut fixer une certaine quantité de chlorures qui dépend de la teneur en  $C_3A$  du ciment. Les chlorures réagissent avec  $C_3A$  pour former un chloroaluminate de calcium

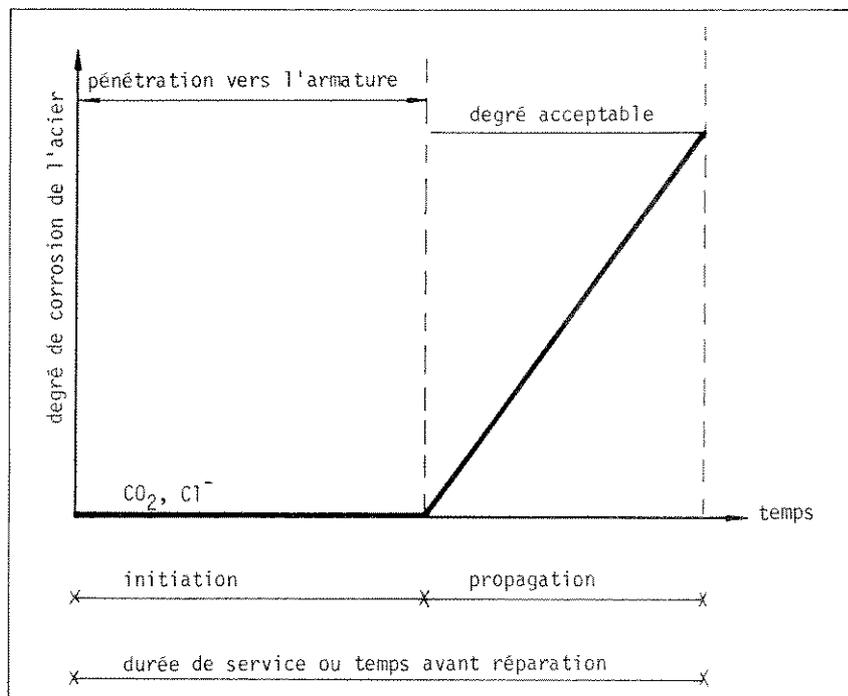
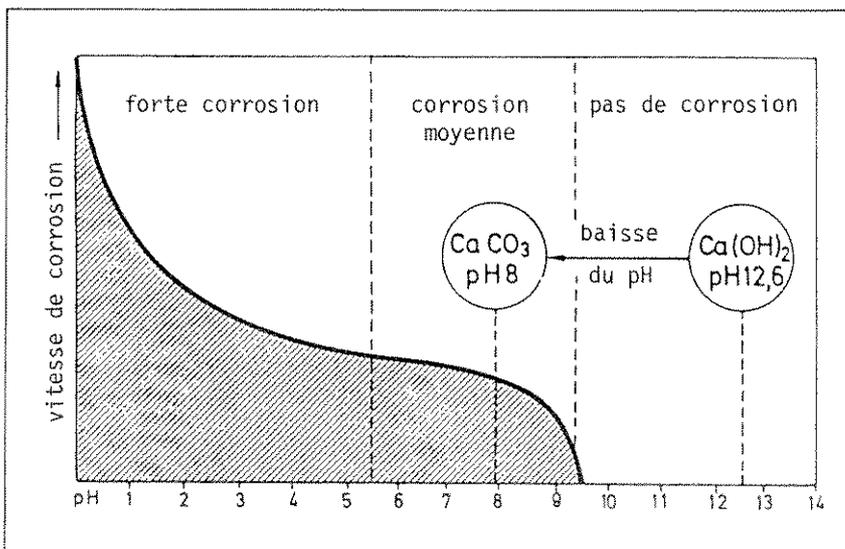


Fig. 7. Représentation schématique de la corrosion de l'acier dans le béton [7].

Fig. 6. Vitesse de corrosion de l'acier en fonction du pH.



déré généralement comme critique pour la corrosion des armatures dans le béton.

La présence d'eau est très importante car elle influence la résistance électrique. La température a un effet significatif puisque la vitesse des réactions chimiques augmente avec la température tandis que la résistance électrique diminue. La corrosion est essentiellement un problème pour les bétons humides, mais non saturés d'eau, car la vitesse de diffusion de l'oxygène devient comparativement nulle dans l'eau [5].

Dans les bétons secs, il n'y a que peu de risques de corrosion parce qu'il n'y a que très peu d'eau et que la résistance électrique devient très élevée.

Du point de vue de la corrosion des armatures, la vie de service d'une structure peut être subdivisée en une période d'initiation et une période de propagation (fig. 7) [7].

La durée de la période d'initiation est déterminée par la vitesse à laquelle la couverture en béton est carbonatée et les facteurs influençant la vitesse de corrosion déterminent la durée de cette période. La section des aciers est réduite et la vie de service de la structure est déterminée par la limite acceptable de réduction du diamètre des armatures. A la fin de cette période, on peut également souvent entreprendre une réparation de la structure.

Le processus de corrosion a commencé lors de la période de propagation et les facteurs influençant la vitesse de corrosion déterminent la durée de cette période. La section des aciers est réduite et la vie de service de la structure est déterminée par la limite acceptable de réduction du diamètre des armatures. A la fin de cette période, on peut également souvent entreprendre une réparation de la structure.

La vitesse de corrosion d'une armature est approximativement de 50 µm/année dans un béton carbonaté exposé aux intempéries et de 200 µm/année dans le même béton, mais en présence de chlorures [7].

L'oxydation du fer entraîne une forte augmentation de volume (jusqu'à 2,5 fois) et la formation de rouille exerce une forte pression sur le béton entourant l'armature. Cette pression est souvent suffisante pour provoquer l'éclatement du béton superficiel et cela d'autant plus facilement que la couverture des armatures est faible (fig. 8).



Fig. 8. Dégradation d'un pilier en béton par corrosion des armatures.

## 5. PROTECTION CONTRE LA CORROSION

### 5.1 Couverture des armatures

Les essais de laboratoire et l'examen de bétons détériorés montrent qu'un facteur essentiel pour la durabilité est l'épaisseur du recouvrement des armatures. La norme SIA 162 prévoit, à l'article 3.28, que la couverture doit être de 1,5 cm au moins pour les constructions à l'abri des intempéries et de 2,5 cm si elles ne sont pas à l'abri. Le recouvrement est à augmenter jusqu'à un maximum de 5 cm dans les milieux agressifs. Rappelons que pour un même béton le temps pour la carbonatation atteignant une armature située à 4 cm de la sur-

face sera quatre fois plus long que pour une armature située à 2 cm (équation 2). On constate que sur ce plan les normes ne sont trop souvent pas respectées et que de nombreux ouvrages se dégradent déjà quelques années après leur construction.

La même norme admet une couverture de 1 cm pour les pièces préfabriquées et pour lesquelles on peut assurer un béton de haute qualité. Cette couverture est en réalité insuffisante et conduit fréquemment à des dégâts à court terme. La couche superficielle contient toujours un excès de sable, car les gros granulats n'ont pas de place entre le coffrage et l'armature. Cette couche est donc plus poreuse et se carbonate plus rapidement que le béton normal.

### 5.2 Revêtements anticorrosion

Les revêtements anticorrosion peuvent être classés en différentes catégories [8]:

- imprégnation en profondeur (résines en solution ou en émulsion aqueuse);
- revêtements pelliculaires non armés (résines époxydes, polyuréthanes);
- revêtements armés (1 à 3 mm d'épaisseur, résines époxydes et polyuréthanes);
- mortiers de résines (3 à 20 mm d'épaisseur, résines époxydes et polyuréthanes chargées).

Pour protéger le béton de la carbonatation et de la pénétration des chlorures, on utilise un revêtement constitué d'une couche d'accrochage en résine époxyde sans solvant et de deux couches de résines époxydes souples.

### 5.3 Protection cathodique

La protection cathodique des armatures consiste à leur imposer un potentiel électrique suffisamment négatif pour que le fer ne puisse pas se dissoudre. C'est une méthode qui n'est que peu employée et qui est appliquée à des ouvrages particuliers (ponts, plates-formes pétrolières) [9].

## 6. MÉTHODES DE RÉPARATION

Actuellement, on utilise essentiellement deux grandes classes de produits de ragréage: les mortiers ou bétons de ciment pouvant contenir des adjuvants et des résines synthétiques et les mortiers ou micro-bétons de résines époxydes [10, 11]. Pour les réparations, il faut distinguer les traitements de surface et des fissures.

Pour les réparations de surface, il faut envisager les opérations suivantes:

- 1) élimination de parties friables, carbonatées et contenant des chlorures par repiquage, sablage, attaque à l'eau à haute pression;
- 2) dérouillage des armatures apparentes par sablage, meulage, brossage, en prenant garde de ne pas ébranler l'acier dans les parties encore encastées (risque de fissuration);
- 3) immédiatement à la mise à nu, les

aciers doivent être protégés avec un produit compatible avec ceux appliqués ultérieurement; le minium est, par exemple, incompatible avec les mortiers époxydes;

- 4) application du produit de ragréage qui doit avoir les propriétés suivantes:

- adhérer fortement sur les aciers protégés et le support,
- un module d'élasticité inférieur à celui du support,
- une résistance équivalente à celle du support,
- étanchéité élevée et bonne résistance à la diffusion du CO<sub>2</sub>,
- une bonne durabilité,
- un aspect esthétique compatible avec celui des zones non réparées.

Pour la réparation des fissures, la meilleure solution consiste à ouvrir au disque les lèvres de la fissure, dégager au burin, apposer au fond un joint plat et mettre un mastic adéquat. Il faut donc créer un joint pouvant absorber les contraintes d'origine thermique ou dues aux efforts repris par l'ouvrage. Toutefois, si la fissure est inerte, on peut recréer une continuité.

Le produit d'injection devra avoir les propriétés suivantes [10]:

- adhérer sur une surface humide;
- polymériser sans retrait en présence d'humidité;
- un module d'élasticité inférieur à celui du béton;
- une bonne viscosité pour pénétrer dans les fissures fines;
- une bonne mouillabilité.

Les structures peuvent également être renforcées par la pose de nouvelles armatures placées dans des tranchées effectuées dans l'ouvrage ou par l'application superficielle d'armatures plates qui reprendront les efforts.

## 7. CONCLUSIONS

Les conséquences de la carbonatation du béton et de la présence de chlorures sont fréquemment la cause de dégradations importantes de structures en béton et en béton armé.

La carbonatation est un phénomène inévitable, mais qui peut être fortement atténué par des mesures préventives relativement simples: recouvrement en béton suffisant des armatures, protection des structures particulièrement vulnérables.

Les facteurs qui influencent la carbonatation et la corrosion de l'acier sont relativement nombreux et complexes. L'influence mutuelle de ces différents facteurs ne peut pas être explicitée de manière simple. Une représentation schématique des conditions et relations de la corrosion des aciers d'armature est donnée à la figure 9 [12].

Dès que les armatures ont atteint un degré de corrosion inacceptable pour la sécurité, il faut soit détruire la structure soit la réparer. Des méthodes de réparation sûres et durables peuvent être exécutées. Toutefois, le prix de tels travaux peut être très élevé et parfois disproportionné par rapport au prix de l'élément de structure dégradé. Un exemple assez fréquent est celui des parapets de balcon et des pare-soleil en béton des bâtiments.

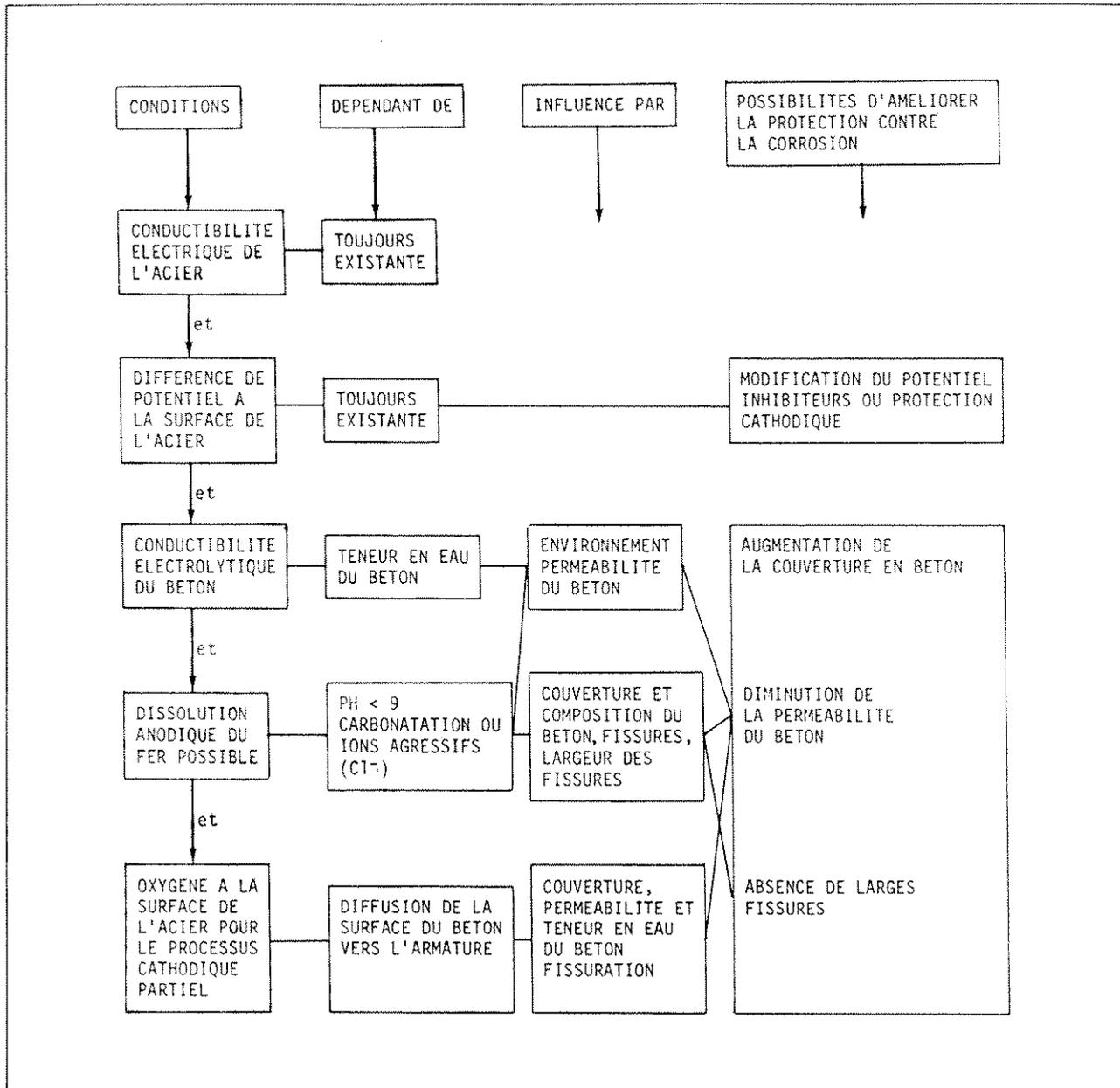


Fig. 9. Corrosion de l'acier dans le béton: conditions et relations [12].

## RÉFÉRENCES

- [1] M. VENUAT, *Relation entre la carbonatation du béton et les phénomènes de corrosion des armatures*, Annales ITBTP, N° 364 (1978), pp. 42-47.
- [2] Y. F. HOUST, P. E. ROELFSTRA, F. H. WITTMANN, *A model to predict service life of concrete structures*, in F. H. Wittmann (Ed.), *Werkstoffwissenschaften und Bausanierung*, Material Science and Restoration, Edition Lack & Chemie, Filderstadt (1983), pp. 181-186.
- [3] P. SCHIESSL, *Zur Frage der zulässigen Rissbreite und erforderlichen Betondeckung im Stahlbeton unter besonderer Berücksichtigung der Karbonatisierung des Betons*, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 255, Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin-München-Düsseldorf, 1976.
- [4] M. VENUAT et J. ALEXANDRE, *De la carbonatation du béton*, R. Mat. Constr., N° 638 (1968), pp. 421-427;
- [5] A. W. BEEBY, *Corrosion of steel in concrete*, Trans. J. Brit. Cer. Soc., 81 (1982), pp. 97-100.
- [6] D. KNÖFEL, *Carbonatisierung von Beton*, Bautenschutz und Bausanierung, Sonderheft (1983), pp. 58-63.
- [7] K. TUUTI, *Corrosion of steel in concrete*, Swedish Cement and Concrete Research Institut, Stockholm (1982), p. 18.
- [8] Ph. WOLF, *Utilisation des résines synthétiques pour la protection des bétons contre la corrosion*, Annales ITBTP, N° 364 (1978), pp. 104-109.
- [9] B. HENZE, *Corrosion et protection des plates-formes pétrolières offshore en béton armé*, *ibid.*, pp. 54-63.
- [10] A. GALLAY, *Méthodes de réparation du béton en fonction de l'origine des dégâts*, *ibid.*, pp. 110-114.
- [11] Ch. MERMINOD, *Les méfaits de la carbonatation du béton armé et ses remèdes*, Chantiers/Suisse, N° 2 (1981), pp. 10-15.
- [12] P. SCHIESSL, *Korrosion der Bewehrung im Stahlbeton*, Bausanierung und Bautenschutz, Sonderheft (1983), pp. 64-71.

### Adresse de l'auteur:

**Y. Houst**  
 Laboratoire des matériaux de construction  
 EPFL  
 Chemin de Bellerive 32  
 1007 Lausanne

Deux journées d'études ont été organisées par la SIA à Zurich, les 3 et 4 avril 1984, sur le thème « Beständigkeit von Stahlbeton ». Les communications ont été publiées dans la « Dokumentation SIA 72 ». Des journées sont prévues en 1985 en Suisse romande sur le même thème.