Les Travaux maritimes : risques de corrosion et d'attaques

Avril 2019

Dans des conditions normales, les armatures enrobées d'un béton compact et non fissuré sont protégées naturellement des risques de corrosion par un phénomène de passivation qui résulte de la création, à la surface de l'acier, d'une pellicule protectrice Fe2O3CaO (dite de passivation).

Mécanismes de corrosion des armatures acier dans le béton

Cette pellicule est formée par l'action de la chaux libérée par les silicates de calcium sur l'oxyde de fer. La présence de chaux maintient la basicité du milieu entourant les armatures (l'hydratation du ciment produit une solution interstitielle basique de pH élevé de l'ordre de 12 à 13). Les armatures sont protégées tant qu'elles se trouvent dans un milieu présentant un pH supérieur à 9.

Deux principaux phénomènes peuvent dans certaines conditions détruire cette protection et initier la corrosion des armatures en acier :

- La carbonatation du béton d'enrobage par l'adsorption du gaz carbonique contenu dans l'atmosphère ;
- La pénétration des ions chlorures, jusqu'au niveau des armatures.

La plus ou moins grande rapidité d'action de ces divers agents est fonction de l'humidité ambiante, de laporosité du béton et de la présence de fissures qui favorisent la diffusion des gaz ou des liquides agressifs

Carbonatation

Le gaz carbonique contenu dans l'air a tendance à se combiner avec les composés hydratés, en commençant par les bases alcalines dissoutes dans la solution aqueuse interstitielle, en particulier le Ca(OH)2, selon une réaction produisant de carbonate de calcium CaCO3 :

$$Ca(OH)2 + CO2 + H2O \rightarrow CaCO3 + 2H2O$$

La progression de ce phénomène de carbonatation se fait de l'extérieur de l'ouvrage, en contact avec l'air ambiant, vers l'intérieur.

Dans un premier temps, la vitesse de propagation est ralentie par la formation des carbonates qui colmatent partiellement la porosité. Elle diminue donc avec la profondeur atteinte.

Dans un second temps, la carbonatation a pour conséquence une neutralisation (chute du pH de la solution interstitielle) du milieu de protection des armatures, qui peuvent alors s'oxyder. La cinétique du processus dépend de la teneur en dioxyde de carbone et de la facilité avec laquelle le gaz carbonique pénètre dans les pores du béton.

Cette progression est fonction de paramètres liés aux caractéristiques du béton (nature et dosage duciment, dosage en eau, porosité et perméabilité) et au milieu environnant. Plus le béton est compact, le dosage en ciment élevé, le rapport eau/ciment faible et la résistance du béton élevée, plus la progression du front de carbonatation est lente. Tout ce qui conduit à diminuer la porosité du béton retarde donc l'échéance de dépassivation des armatures.

L'humidité relative de l'air joue, en particulier, un rôle important : la vitesse de carbonatation est maximale pour une humidité relative de l'ordre de 60 %, pratiquement nulle en atmosphère sèche ou pour des bétons complètement saturés en eau. L'alternance d'humidité et de séchage favorise le phénomène de carbonatation.

La cinétique et la profondeur de carbonatation d'un béton sont donc fonction de sa composition, de sa structure poreuse et de l'humidité relative dans laquelle est situé l'ouvrage.

Elle dépend aussi de la concentration en dioxyde de carbone et de la température de l'atmosphère environnant. Pour un béton courant, l'épaisseur de la couche carbonatée augmente proportionnellement à la racine carrée du temps.

De nombreuses études ont démontré que la migration du dioxyde de carbone à travers la texture poreuse du béton est significativement réduite lorsque la compacité du béton d'enrobage est augmentée. La porosité totale du béton et la distribution de la taille des pores sont les paramètres déterminants pour la diffusivité du dioxyde de carbone.

L'augmentation de la compacité est obtenue en particulier en réduisant le rapportE/C. Ce rapport conditionne la perméabilité du béton donc l'interconnexion du réseau poreux et par conséquent, la vitesse ainsi que la possibilité de diffusion des gaz et des ions dans le béton.

La diminution du rapport E/C permet donc d'accroître la résistance du béton à la carbonatation. Unecure prolongée permet d'augmenter la résistance du béton à la pénétration du dioxyde de carbone en améliorant les propriétés de surface du béton.

Action des chlorures

L'action des chlorures est spécifique à certains environnements dans lesquels peut se trouver lebéton comme les ouvrages soumis aux sels de déverglaçage ou situés en site maritime (zone de marnage, surfaces soumises aux embruns…).

Les ions chlorures peuvent pénétrer par diffusion (sous l'effet d'un gradient de concentration) ou migrer par capillarité (absorption capillaire) à l'intérieur du béton, franchir la zone d'enrobage, atteindre lesarmatures, « dépassiver » l'armature acier et provoquer des corrosions (par mécanisme de dissolution du métal suivant une réaction d'oxydoréduction : métal → ions métal Mn++ n électrons), d'abord ponctuelles (corrosion par piqûres) puis généralisées à toute la surface de l'acier (corrosion généralisée). La vitesse de pénétration des chlorures dépend en particulier de la porosité du béton. Elle décroît lorsque le rapport eau/ciment diminue.

La dépassivation des armatures s'amorce dès que la teneur en chlorures au niveau des armatures atteint un certain seuil de dépassivation après avoir traversé la zone d'enrobage. Ce seuil est fonction du pH de la solution interstitielle et de la teneur en oxygène au niveau des armatures ; il est de l'ordre de 0,4 à 0,5 % par rapport au poids du ciment. Il est atteint plus rapidement si le béton est carbonaté.

La pénétration des ions chlorures est maximale dans les zones de marnage qui sont soumises à des cycles d'humidification et de séchage.

Effets de la corrosion

Le développement de la corrosion des armatures peut provoquer par gonflement une poussée au vide sur le béton d'enrobage (les oxydes de fer étant plus volumineux que l'acier, ils génèrent des contraintes internes dans le béton qui peuvent être supérieures à sa résistance en traction) et donc une altération de l'aspect extérieur de l'ouvrage (éclatement localisé, formation de fissures, formation d'épaufrures, apparition en surface de traces de rouille et éventuellement mise à nu de l'armature) et une réduction de la section efficace de l'armature et de son adhérence au béton.

En règle générale, dans des milieux peu agressifs les enrobages et les caractéristiques des bétons (compacité, homogénéité, résistance) préconisés sont suffisants pour garantir la protection naturelle des armatures durant la durée d'utilisation escomptée de l'ouvrage. Toutefois, des défauts d'enrobage, des bétons mal vibrés et de ce fait trop poreux, ou des milieux très agressifs risquent de conduire à la dégradation prématurée des armatures en acier.

Les enrobages et les caractéristiques des bétons préconisés dans les normes NF EN 206/CN et NF EN 1992-1-1 sont suffisants pour garantir la protection naturelle des aciers durant la durée d'utilisation de l'ouvrage, sous réserve d'une mise en œuvre soignée.

Actions de l'eau de mer sur le béton

Un béton exposé en site maritime peut être l'objet de plusieurs types d'agressions :

- Agressions mécaniques dues à l'action des vagues, de la houle et des marées, abrasion due aux chocs des corps flottants et érosion due aux effets des vagues ;
- Agressions chimiques dues à l'action en particulier des chlorures présents dans l'eau de mer et des sulfates, mais aussi des nombreux sels dissous dans l'eau de mer et dans certains cas à la pollution des eaux ;
- Agressions climatiques dues aux variations de température ;
- Agressions biologiques de micro-organismes.

Les structures situées en site maritime sont exposées à plusieurs types de configurations.

Elles peuvent être :

- Continuellement immergées (béton situé sous le niveau de la mer, même à marée basse), les bétons situés dans cette zone sont rarement l'objet de dégradations importantes ;
- Alternativement émergées ou immergées en fonction du niveau de la mer (zones de marnage déterminées par les niveaux de marée haute et basse). Les bétons situés dans les zones de marnage sont soumis 2 fois par jour à des imprégnations d'eau de mer alternant avec un essorage et donc à des cycles humidification-dessication et ce sont donc les plus agressés ;
- Soumises aux éclaboussures provoquées par les vagues. Ces zones de hauteur variable sont situées au dessus du niveau de l'eau à marée haute ;
- Continuellement émergées, donc sans contact direct avec le milieu marin, mais soumises aux embruns et brouillards marins contenant des chlorures. Les bétons situés dans cette zone peuvent subir de légères agressions ; pour les bétons de structure, la norme NF EN 206/CN étend cette zone jusqu'à 1 km de la côte ;
- Soumises à l'air véhiculant du sel marin uniquement.

La salinité des mers ou des océans peut être très variable de quelques grammes par litre à plus de 200 g/l. La salinité des grands océans est de l'ordre de 35 g/l.

Composition moyenne d'un litre d'eau de mer :

NaCl 27,20 g
MgCl23,80 g
MgSO41,65 g
CaSO41,25 g
Na2SO40,85 g
soit au total 35 g.

Le principal sel dissous dans l'eau de mer est le chlorure de sodium, puis viennent le chlorure de magnésium et les sulfates.

Indépendamment de leurs caractéristiques propres, la résistance des bétons est donc variable en fonction du type d'exposition au milieu marin et du degré d'immersion.

Les divers chlorures dissous dans l'eau de mer, en particulier les chlorures de magnésium ($MgCl_2$) et les chlorures de calcium ($CaCl_2$) génèrent des réactions chimiques agressives pour les bétons qui se traduisent par une dissolution de la chaux et une précipitation d'ettringite (cristallisation de sels expansifs, décalcification, précipitation de composés insolubles, attaques ioniques, dissolution de la portlandite, etc.).

L'action du chlorure de sodium sur la matrice cimentaire est double :

- Consommation des ions calcium de la portlandite et des CSH, par formation de chlorure de calcium soluble ;
- Formation de monochloroaluminate de calcium par réaction des chlorures de calcium avec l'aluminate tricalciques et les aluminates hydratés.

Les solutions de sulfate de magnésium sont plus agressives vis-à-vis du béton que les solutions de sulfate de sodium. La portlandite présente dans les hydrates est attaquée par le sulfate de magnésium pour former dans le béton du gypse secondaire Ca SO4, 2H2O et de la brucite Mg (OH)2. Ce gypse secondaire se dissout en partie en augmentant la porosité du béton. Les ions Mg2+réagissent aussi avec les CSH.

La réaction avec l'aluminate de calcium hydraté provenant du C3A forme de l'ettringite C3A, 3Ca SO4, 32 H2O. Cette ettringite cristallise avec une augmentation de volume importante d'où l'apparition de fissures qui accélèrent le mécanisme de destruction.

Le chlorure de magnésium $MgCl_2$ est le chlorure le plus agressif. Il réagit avec la portlandite pour donner du chlorure de calcium $CaCl_2$en partie soluble qui augmente la porosité du béton. L'autre partie réagit avec l'aluminate de chaux hydraté pour former des chloroaluminates 3CaO, Al2O3, Ca Cl2, 10 H2O (sel de Friedel). Ce sel, également expansif, entraîne la fissuration du béton.

Les ions CO_2,en présence de silice active, transforment l'ettringite en thaumasite Ca CO3, Ca SO4, Ca SiO4, 15H2O , ce qui entraîne des risques d'expansion et fissuration. Dans certains cas particuliers, la teneur en CO_2peut être élevée et l'eau de mer devient alors très agressive. Ceci se produit dans les eaux d'estuaires ou de baies fermées où l'accumulation de matières organiques entraîne une concentration plus forte en CO_2.

Découvrez l'ensemble de la revue

Cet article est extrait de Les ouvrages en béton en site maritime

Auteur

Patrick Guiraud

Retrouvez toutes nos publications sur les ciments et bétons sur infociments.fr

Consultez les derniers projets publiés
Accédez à toutes nos archives
Abonnez-vous et gérez vos préférences
Soumettez votre projet

Article imprimé le 26/11/2026 © infociments.fr