

La corrosion des armatures reste une des causes principales de la dégradation des ouvrages. Le Lerm* explique les différents mécanismes qui conduisent à cette pathologie.

Pathologie

La corrosion des armatures

1 > Qu'est ce que la corrosion dans le béton armé ou précontraint ?

En raison de sa basicité (pH de l'ordre de 13), le béton sain est un milieu naturellement protecteur pour les armatures autour desquelles se forme un film passif (solution solide $Fe_3O_4 - Fe_2O_3$) qui réduit la vitesse de corrosion à une valeur négligeable. Dans certaines conditions, comme la carbonatation du béton d'enrobage ou une teneur critique en chlorures, cet équilibre peut être rompu en entraînant une dépassivation de l'acier et l'amorçage d'un phénomène de corrosion. Dans les deux cas, la destruction du film passif et la dégradation du métal mettent en jeu un mécanisme de piles électrochimiques avec des zones anodiques, des zones cathodiques et un milieu électrolytique constitué par la solution interstitielle du béton.

Au niveau de l'anode, le métal est dissous avec production d'électrons qui sont consommés au niveau de la cathode, par réduction de l'oxygène, cette réaction entraînant la libération d'ions hydroxyle OH^- . Ces derniers réagissent ensuite avec les ions ferreux produits au niveau de l'anode pour former, en présence d'oxygène, des oxydes et hydroxydes de fer gonflants. Dans tous les cas, la corrosion ne peut se développer qu'en présence d'oxygène, ce qui explique, entre autres, que les cinétiques de corrosion dans les structures immergées en béton sont très faibles.

2 > Quelles en sont les causes ?

Dans les bétons, la corrosion des armatures peut être initiée par deux facteurs distincts :

- La carbonatation du béton d'enrobage au contact du CO_2 atmosphérique,
- La pénétration de chlorures depuis le milieu environnant (milieu marin, utilisation de sels de déverglaçage, milieux industriels particuliers).

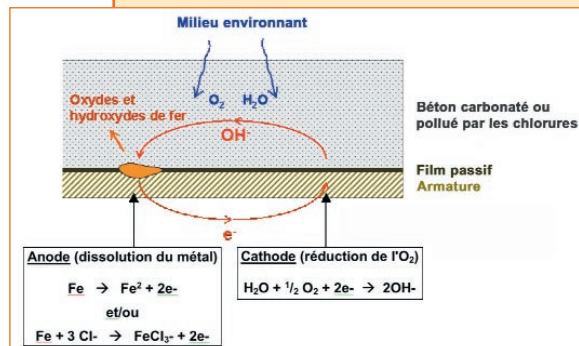
Dans le cas de la carbonatation, les armatures sont dépassivées par la diminution du pH aux environs de 9, occasionnée par la réaction entre les hydrates de la pâte de ciment et le CO_2 atmosphérique. La dépassivation intervient ainsi lorsque le front de carbonatation atteint les armatures.

Dans le cas des chlorures, la dépassivation est initiée lorsqu'une teneur critique en chlorures arrive au niveau des armatures. Il est admis que ce seuil critique correspond à un rapport de concentration Cl^-/OH^- comprise entre 0,6 et 1, soit de manière plus pratique en fonction de l'alcalinité du béton, une teneur en chlorures de 0,4 %, exprimée par rapport à la masse de ciment. C'est cette valeur qui est retenue par la norme NF EN 206-1, dans le cas des bétons armés. Ce seuil est abaissé à 0,1 % dans le cas des bétons précontraints.

3 > Quelles en sont les conséquences ?

La formation des oxydes et hydroxydes de fer, plus communément appelés rouille, s'effectue au dépens du métal d'origine, avec une augmentation importante de volume. Elle entraîne donc une réduction de la section efficace des armatures pouvant occasionner une diminution de la capacité portante des ouvrages ou parties d'ouvrages. Préalablement, les principaux désordres visibles correspondent à des fissures se développant le long des armatures, souvent associées à des désaffleurements, à des coulures de rouille à la surface du béton, à des épaufrures (expulsion du béton d'enrobage).

Lorsque la corrosion est initiée par la carbonatation du béton d'enrobage, les produits formés s'accumulent autour de l'armature, alors que lorsqu'elle est initiée par les chlorures, ils peuvent migrer dans le système poreux du béton et apparaître en surface des parements (corrosion par piqûre).



Principe de la réaction chimique aboutissant à la formation de rouille.



▲ En se corrodant, les aciers augmentent de volume (en bas), comparé à une armature saine (en haut).



◀ Corrosion par carbonatation sur un départ de poteau.



▲ Corrosion par piqûres liées aux chlorures.

▼ Corrosion importante en sous-face d'une poutre de pont.



Petite histoire du béton armé

Dans la seconde moitié du XIX^e siècle, de nombreuses études exploratoires d'association du béton et du métal sont menées. A partir de 1845, Joseph Louis Lambot (1814-1887), garde champêtre, réalise des caisses à oranges, des abreuvoirs et des réservoirs en fil de fer recouvert de ciment. Trois ans plus tard, il construit en 1848 une barque baptisée "bateau-ciment". Ce principe fut breveté en 1855. De son côté, François Coignet (1814-1888), entrepreneur de son état, a eu l'intuition du ciment armé, mais il ne le réalisa pas autrement qu'en noyant des poutrelles métalliques dans son béton. Pourtant, l'honneur et la gloire de l'invention du ciment armé revient à Joseph Monier (1823-1906). Entre 1867 et 1891, ce jardinier dépose quelque 19 brevets concernant un système constructif utilisant le fer et le ciment, applicable à l'horticulture, puis aux tuyaux, aux clôtures, aux poutres, aux ponts. Cherchant à allier le fer au ciment pour le protéger du feu, l'entrepreneur François Hennebique (1842-1921) dépose à son tour, en 1892, le brevet de poutre à étrier, autrement dit le principe de poutre en béton armé tel que nous le connaissons aujourd'hui. Avec la circulaire du 20 octobre 1906, arrive le premier règlement de calcul du béton armé. Ce texte constitue la reconnaissance officielle du béton armé. Vingt-deux plus tard, Eugène Freyssinet fait breveter le "procédé de fabrication de pièces en béton armé". Autrement, c'est l'invention du béton précontraint. L'utilisation du couple béton-acier, qui n'a cessé de croître au cours du XX^e siècle, a

vu apparaître une nouvelle pathologie : la corrosion des armatures. Cette pathologie physico-chimique peut avoir des conséquences graves sur la stabilité des structures. Elle constitue aujourd'hui la principale cause de désordres dans les ouvrages en béton armé ou précontraint.

4 > Comment s'en prémunir ?

A l'étape de la construction, la durabilité des bétons armés ou précontraints est liée à la qualité du béton et à son épaisseur d'enrobage. Dans cette optique, la nouvelle réglementation européenne fixe, en fonction des classes d'expositions (risques de corrosion par carbonatation, chlorures marins, chlorures autres que marins), des spécifications précises sur les paramètres de formulation des bétons et sur les épaisseurs minimales d'enrobage à mettre en œuvre (norme NF EN 1992-1-1 [Eurocode 2]). Ces épaisseurs d'enrobage minimales, définies pour des bétons bruts avec des armatures en acier traditionnel, peuvent être diminuées, par exemple, lors de l'utilisation d'armatures en acier inoxydable, ou encore au moment de la mise en œuvre d'une protection supplémentaire (revêtement par exemple). Les valeurs d'enrobage minimales sont plus importantes dans le cas des bétons précontraints, où les phénomènes de corrosion peuvent avoir des conséquences structurelles plus rapides et plus graves que, dans le cas des bétons armés, où les désordres sont plus progressifs et plus prévisibles.

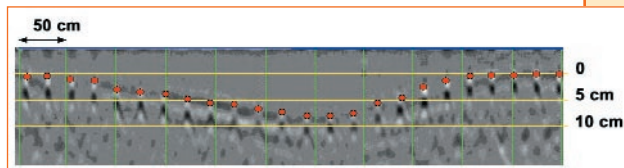
5 > Que faire quand ça arrive ?

Le préalable à toute réparation du béton par la corrosion est de réaliser un diagnostic permettant de préciser l'origine et l'étendu de la corrosion : faire abstraction de ce diagnostic peut conduire à opérer des réparations inadaptées et non durables.

Les principales phases du diagnostic ont pour but de :

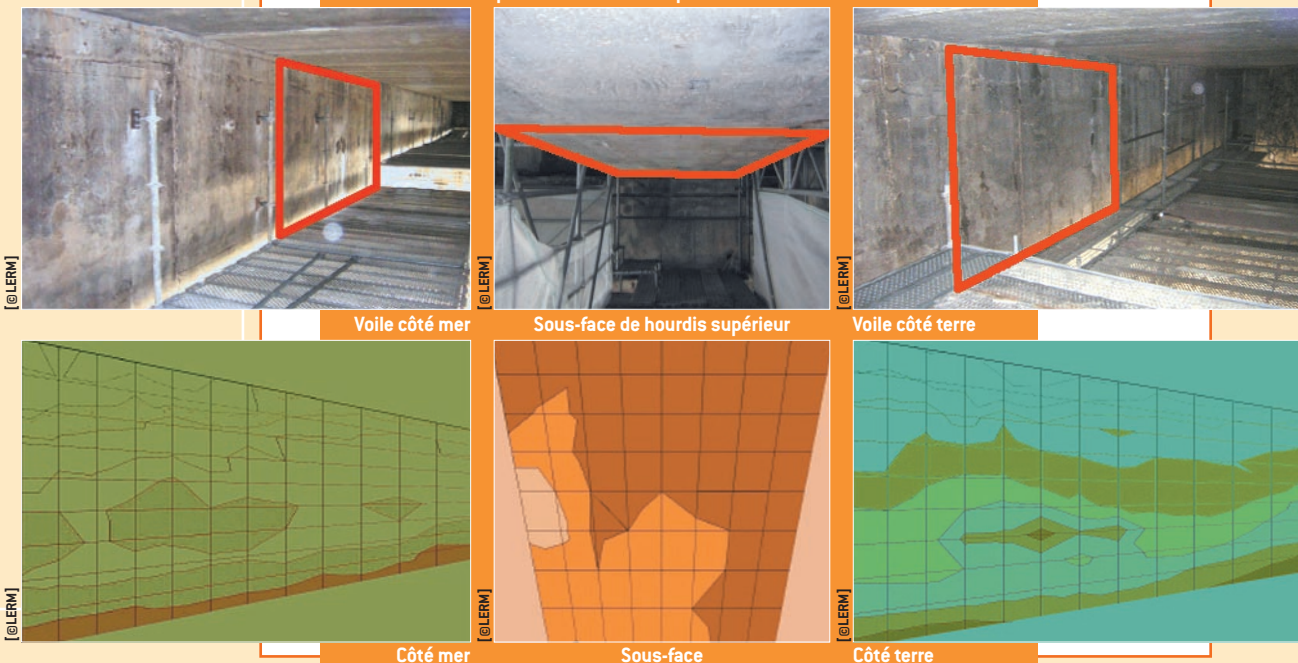
- cartographier les désordres visibles,
- définir l'origine et l'intensité de la corrosion,
- apprécier l'évolution des désordres potentiels, en particulier dans des zones peu dégradées,
- caractériser les bétons en vue de rechercher d'éventuelles pathologies physico-chimiques associées et de préconiser des traitements de réparation adaptés (qualification du mélange granulaire vis-à-vis de l'alcali-réaction notamment).

L'origine de la corrosion peut être déterminée en comparant, aux valeurs d'enrobage, les profondeurs de carbonatation (mesurée à l'aide d'une solution de phénolphtaléine) et de pénétration des chlorures (mesurées suivant le mode opératoire recommandé par l'AFPC-AFREM) dans le cas d'ouvrages exposés au milieu marin ou à l'utilisation de sels de déverglacage. Dans ce dernier cas, il convient de distinguer la mesure des chlorures liés aux constituants du ciment, qui ne participent pas au phénomène de corrosion, et de celle des chlorures libres qui sont responsables de l'amorçage de la corrosion par piqûre. Dans tous les cas de figure, ces relevés doivent être couplés à des



Mesure de l'enrobage réel des armatures (en rouge) par auscultation du radier.

Mesure de l'activité de la corrosion par potentiel d'électrodes. Les couleurs les plus "chaudes" correspondent aux zones de corrosion active.



mesures d'activité de la corrosion par potentiel d'électrodes (mesure du potentiel entre le réseau d'armatures et une électrode de référence), ainsi qu'à des mesures d'enrobage généralement pratiquées par auscultation radar et/ou pachométrie.

Ces différents essais constituent les paramètres essentiels nécessaires à l'établissement d'un diagnostic de corrosion. Ils peuvent être complétés par des essais physico-chimiques et microstructuraux qui auront pour but de caractériser les bétons en vue de réaliser des préconisations de réparations adaptées. Par ailleurs, dans le cas d'ouvrages peu dégradés, le diagnostic peut permettre au maître d'ouvrage, via l'utilisation de lois d'évolution et de modèles numériques spécifiques, de prévoir les risques d'apparition des dégradations. Et, par voie de conséquence, de prendre très en amont des mesures préventives souvent moins onéreuses que les travaux de réparation eux-mêmes.

6 > Quels sont les différents types de traitements ?

La réparation du béton armé dégradé par la corrosion nécessite dans tous les cas de réaliser une purge préalable des zones de désordres visibles, étendue aux zones adjacentes, et assortie d'un traitement des armatures : élimination des produits de corrosion et passivation, ou remplacement dans le cas de diminutions de section trop importantes.

Dans les cas les plus simples pour lesquels les désordres restent ponctuels et où aucun risque d'apparition de nouveaux points de corrosion n'est à craindre à moyen terme, les zones purgées peuvent être alors ragrées à l'aide d'un produit de réparation adapté à la classe d'exposition de l'ouvrage. Ce produit est souvent un mortier ou un béton projeté, en fonction du volume des zones de reprise.

En revanche, dans les cas où les désordres sont plus généralisés, et donc plus préoccupants, et où un risque avéré d'apparition de nouveaux points de corrosion est à craindre à court terme, une série de traitements à vocation préventive et/ou curative est à la disposition du prescripteur. Ces traitements peuvent se classer en deux grandes familles :

- les traitements de surface,
- les traitements électrochimiques.

Les traitements de surface ont pour but de protéger la surface du béton de la pénétration des agents nécessaires à l'amorçage et au développement du phénomène de corrosion. Ils comprennent les hydrofuges, les revêtements de surface (peintures, lasures, etc.), les enduits pour le bâtiment, dont l'efficacité est liée à la qualité de l'adhérence avec le support, ainsi qu'à la nature et à l'épaisseur de la couche appliquée. Dans cette même famille, les inhibiteurs de corrosion, qui sont pour la plupart des produits d'imprégnation de surface, correspondent à des composés chimiques qui ralentissent ou arrêtent le processus de corrosion lorsqu'ils sont au contact du métal. Leur efficacité est liée à la capacité qu'ils ont de migrer jusqu'aux armatures, et par conséquent à l'enrobage de ces dernières et aux caractéristiques du béton.

Les traitements électrochimiques correspondent à deux familles distinctes :

- Les procédés de réalcalinisation et/ou de déchloruration (traitements temporaires),
- la protection cathodique (traitement permanent).

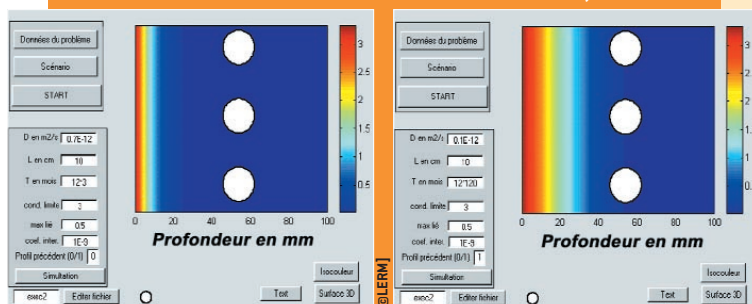
Les premiers ont pour but, d'une part, d'augmenter le pH de la solution interstitielle du béton carbonaté autour des armatures, permettant ainsi de les replacer dans un milieu passivant et, d'autre part, d'extraire les ions chlorures présents dans le cas des environnements concernés. Le principe de ces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

Les traitements par protection cathodique fonctionnent sur le même principe de polarisation à l'aide d'une anode placée à la surface du parement ou noyée dans le béton d'enrobage. Cette technique consiste à abaisser le potentiel électrochimique des armatures jusqu'à une valeur seuil (potentiel de protection) pour laquelle la vitesse de corrosion de l'acier devient négligeable.

Enfin, dans le cas des dégradations les plus sévères, un recalcul de la structure doit être effectué afin d'appliquer d'éventuels renforcements structureux.

Christophe Cardé Directeur technique du LERM

Simulation numérique de pénétration des chlorures avec le modèle du LERM, validé dans le cadre du suivi durabilité du Pont Vasco de Gama, à Lisbonne.



Pénétration des chlorures à 3 ans.

Pénétration des chlorures à 120 ans.



La réparation d'un ouvrage très corrodé peut nécessiter un recalcul de sa structure et éventuellement un renforcement général.



Bibliographie

Édité en 2003, "Réhabilitation du béton armé dégradé par la corrosion", document scientifique et technique de l'AFGC, décrit l'ensemble des techniques de réparation des bétons. L'ouvrage détaille les domaines d'action, de mise en œuvre, les limites et de précautions d'emploi, d'efficacité et de contrôle.

*En tant que laboratoire conseil indépendant spécialisé dans la caractérisation des matériaux de construction et de leurs pathologies, le LERM (Laboratoire d'études et de recherches sur les matériaux) est chaque jour confronté à l'étude des problématiques liées aux bétons.