



Armatures galvanisées dans les ouvrages en béton

Présentation aux ingénieurs et concepteurs



Contenu

Introduction	1
Le coût de la corrosion	2
Le procédé de galvanisation à chaud	2
Corrosion des armatures en acier non revêtues	3
Carbonatation	3
Attaque par les chlorures	4
Augmenter la durée de vie du béton armé	4
Pourquoi l'acier pour béton armé galvanisé est-il si efficace?	5
Formation du film passif	5
Résistance à la carbonatation	5
Résistance à l'attaque par les chlorures	6
Protection barrière	6
Perturbation minimale de la masse de béton	6
Protection sacrificielle	6
Force d'adhérence	7
Profil de corrosion de l'acier pour béton armé non revêtu par rapport à l'acier pour béton armé galvanisé	7
Avantages de conception	8
Spécification d'un revêtement de galvanisation pour les armatures en acier	8
Le coût de l'acier pour béton armé galvanisé	9
Cintrage, soudage, réparation, manutention, transport et stockage	9
Installation et recouvrement	10
Mélange d'acier pour béton armé galvanisé à chaud et non revêtu	10
Les raisons d'utiliser de l'acier pour béton armé galvanisé à chaud	11
Références	12
Remerciements	12

Introduction

La galvanisation à chaud est utilisée comme solution optimale pour prolonger la durée de vie de l'acier pour béton armé depuis plus de 100 ans. À l'origine, l'acier pour béton armé galvanisé n'était principalement utilisé que dans la construction de réservoirs d'eau en béton, le fil galvanisé permettant de précontraindre les parois du réservoir.

À partir des années 1950, l'utilisation d'acier pour béton armé galvanisé est devenue plus courante dans de nombreux pays et, dans les années 1960 et au début des années 1970, un tonnage considérable d'armatures du béton était galvanisé, notamment pour la construction de ponts et d'autoroutes aux États-Unis. En Australie, l'Opéra de Sydney avec ses tuiles en chevrons est le démonstrateur le plus célèbre d'armatures galvanisées à chaud. Installées depuis 1963, les tuiles sont toujours intactes, propres et ne manifestent aucun signe de corrosion.

Au cours des 25 à 30 dernières années, l'utilisation d'armatures galvanisées a connu dans le monde entier une augmentation constante et ce, dans une grande variété de constructions en béton et de conditions d'exposition. Par exemple, depuis 1995, tout l'acier pour béton armé des projets de ponts de la New York Thruway Authority est galvanisé. De nombreux ponts aux États-Unis sont soumis à des tests périodiques sur l'état des armatures galvanisées mises en œuvre lors de leur construction initiale, et ils font preuve de leur excellent état aujourd'hui.

En Europe, l'armature galvanisée a été principalement utilisée jusqu'à présent dans des environnements particulièrement agressifs,

tels que les applications côtières, les systèmes d'égouts, les tunnels routiers, etc. et pour construire des produits sur mesure destinés à des projets spécifiques.

Au-delà de ces applications, l'utilisation d'armatures galvanisées permet de résoudre des problèmes techniques, de réaliser des éléments légers et minces et d'optimiser la conception architecturale. Si l'armature galvanisée n'est pas encore largement utilisée, c'est que ses avantages sont encore peu connus. Or, l'armature en acier galvanisé peut non seulement représenter une solution très efficace pour les clients, mais aussi un avantage pour les constructeurs et les acteurs de la préfabrication du béton sur les plans économique, technique et environnemental.

Aujourd'hui, l'acier pour béton armé galvanisé à chaud est reconnu pour être une solution rentable, en comparaison à l'acier pour béton armé non revêtu. Notamment dans les environnements côtiers et industriels où il élimine les effets de la carbonatation et retarde considérablement l'apparition de la corrosion induite par les chlorures. Les armatures en acier galvanisé conviennent également parfaitement aux façades, aux joints de panneaux préfabriqués et aux éléments de surface pour lesquels il est essentiel d'éviter les taches de rouille et l'écaillage.

L'intérêt croissant porté à la conception avec de l'acier pour béton armé galvanisé à chaud découle largement du succès que rencontrent les structures construites avec des armatures galvanisées.



Le pont Mario M. Cuomo, récemment achevé, est le plus grand projet de pont de l'histoire de l'État de New York. Le nouveau pont a remplacé l'ancien pont Tappan Zee sur le fleuve Hudson, au nord de la ville de New York.



Le tablier du pont Mario M. Cuomo est composé de près de 6000 panneaux préfabriqués de 3,66 m de long et de 6,7 à 13,7 m de large pour les travées d'approche, et de 963 panneaux pour la travée principale. Les panneaux sont assemblés en coulant du béton autour des armatures en acier galvanisé qui dépassent. (Image reproduite avec l'aimable autorisation de la New York State Thruway Authority)



Le Pont de Saint-Nazaire, construit dans les années 1970, est toujours le plus long pont de France. La plupart de ses armatures n'ont pas été protégées contre la corrosion, ce qui a conduit à un vaste programme d'entretien et de réparations. Environ 63 tonnes d'armatures galvanisées ont été utilisées dans des endroits très spécifiques : les brides des extrémités des poutres en T et les dalles de liaison coulées in situ positionnées à hauteur des brides (photo ci-dessus). Les emplacements où les armatures galvanisées ont été utilisées n'ont pas nécessité de rénovation.

Le coût de la corrosion

Une étude publiée en 2016 a montré que le coût mondial de la corrosion en 2013 s'élevait à 2,5 trillions de dollars (2,16 trillions d'euros), ce qui correspond à environ 3,4 % du produit intérieur brut (PIB) mondial. L'étude, qui a examiné l'impact de la corrosion et de sa gestion sur l'économie réelle, a révélé que l'application de "meilleures pratiques" pour prévenir les dommages causés par la corrosion pourrait permettre de réaliser des économies annuelles de 15 à 35 % (324 à 755 milliards d'euros).



Le pont Mario M. Cuomo est un pont à haubans de 5 km de long, à 8 voies et à deux travées, conçu pour une durée de vie minimale de 100 ans et utilisant des armatures galvanisées.



Avant de choisir les armatures galvanisées pour le pont Mario M. Cuomo, la New York Thruway Authority a élaboré un plan de protection contre la corrosion afin d'identifier l'exposition, les mécanismes de dégradation, les stratégies de conception et de construction, ainsi que les coûts du cycle de vie.

Le procédé de galvanisation à chaud

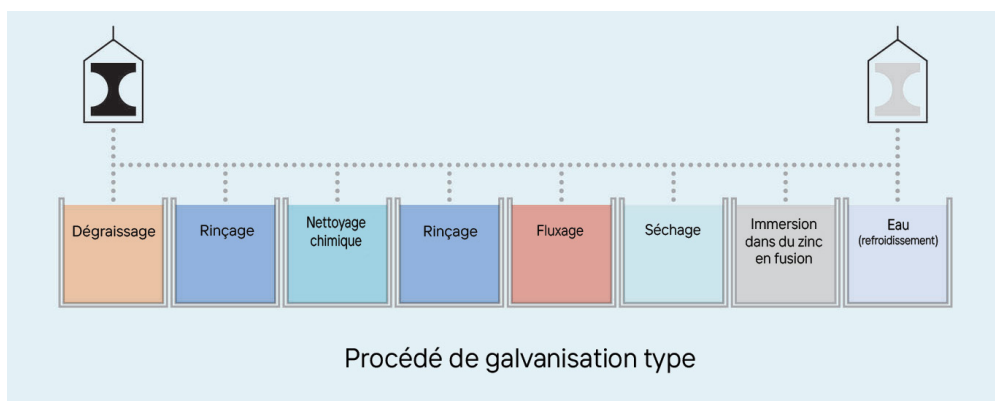
Le procédé de galvanisation à chaud commence par un nettoyage superficiel des pièces d'acier à galvaniser en les immergeant dans une série de cuves de prétraitement. Une fois nettoyé, l'acier est plongé dans un bain de zinc en fusion. Celui-ci réagit avec l'acier pour former le revêtement de galvanisation (une réaction métallurgique). Les barres d'acier peuvent être galvanisées par lots (par exemple, par l'utilisation de gabions spéciaux). En outre, les treillis utilisés pour fabriquer des armatures renforcées sont généralement suspendus à un gabion et plongés dans le bain de zinc en fusion.



Plus de 27 000 tonnes d'armatures en acier galvanisé assurent la durabilité à long terme des tours de la travée principale, des piles des travées d'approche, des culées et des panneaux du tablier routier du pont Mario M. Cuomo.

En appliquant les meilleures pratiques pour prévenir la corrosion, les économies annuelles mondiales pourraient atteindre 324 à 755 milliards d'euros.

La corrosion entraîne des coûts importants pour la société.



La galvanisation consiste à immerger de l'acier nettoyé dans un bain de zinc en fusion afin d'appliquer un revêtement métallurgique qui présente des niveaux élevés de durabilité.

Corrosion de l'acier pour béton armé non revêtu

L'environnement hautement alcalin du béton permet à l'acier pour béton armé conventionnel non revêtu de développer un film d'oxyde de fer stable et passif en surface, ce qui protège l'acier de la corrosion. Cependant, le béton est un matériau non homogène, principalement composé de produits d'hydratation du ciment (pâte de ciment), de sable et de granulats.

La porosité inhérente au béton durci fournit une voie de diffusion aux éléments gazeux et aqueux qui, avec le temps, peuvent briser la passivité de l'acier et initier la corrosion.

La corrosion des armatures dans le béton est amorcée lorsque la couche d'oxyde protectrice à leur surface est dépassivée. La dépassivation peut se produire par l'un ou l'autre de ces deux mécanismes :

1. Carbonatation du béton
2. Corrosion induite par les chlorures

Une fois la corrosion de l'acier pour béton armé amorcée, des produits de corrosion commencent à se former à sa surface. Ceux-ci sont sensiblement plus volumineux que l'acier (la rouille, qui est un produit de l'oxydation du fer dans l'acier pour béton armé, se caractérise par un volume 7 fois supérieur au volume de fer consommé).

Cette augmentation de volume due à la corrosion de l'acier applique des contraintes de traction importantes au béton et finit par provoquer la formation et la propagation de fissures. Celles-ci constituent à leur tour un passage favorisant la pénétration rapide d'agents agressifs dans l'acier des armatures, ce qui accélère le processus de corrosion de l'acier, provoquant ainsi des dommages tels que la délamination ou l'écaillage de l'enrobage du béton.

Le processus de corrosion de l'acier pour béton armé non revêtu est représenté graphiquement dans le modèle de Tuutti adapté ci-dessous, où :

A. Le stade d'initiation - l'acier des armatures reste passivé (jusqu'au point x).

B. La phase de propagation - la destruction de la couche passive sur l'acier des armatures se produit et l'acier se corrode rapidement. À la fin de cette période, des fissures et des écaillages du béton apparaissent.

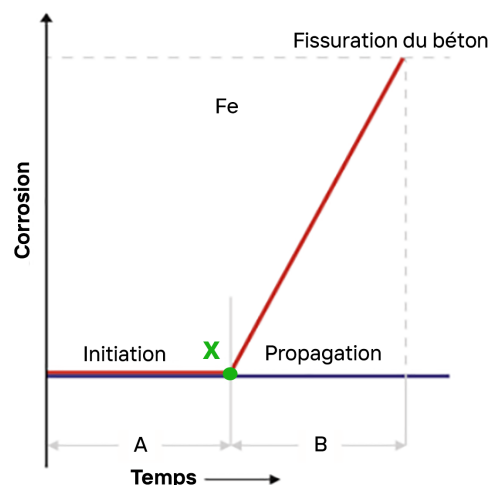
Le processus de corrosion est le plus souvent initié soit par neutralisation de la zone entourant l'acier des armatures, par exemple la carbonatation, soit par activation de la surface par des anions fortement corrosifs, par exemple les chlorures. Le temps nécessaire à l'initiation de la corrosion est déterminé d'une part par la concentration et la vitesse d'écoulement des substances pénétrant dans l'enrobage de béton et de l'autre par le seuil de concentration requis pour que la corrosion commence.

Lorsque l'acier pour béton armé n'est pas protégé, le volume de rouille peut devenir jusqu'à 7 fois supérieur au volume de fer consommé par la corrosion, ce qui entraîne la formation et la propagation de fissures dans le béton.



Fissuration et écaillage du béton en raison de la corrosion de l'acier pour béton armé.

Modèle schématique de la corrosion de l'acier pour béton armé dans le béton, d'après Tuutti 1982



Carbonatation

La carbonatation est un processus naturel. Il se produit lorsque la forte alcalinité du béton de couverture est neutralisée par une réaction avec le dioxyde de carbone atmosphérique.

Au fil du temps, le front de carbonatation migre dans la masse de béton, réduisant finalement le pH à des niveaux presque neutres (pH 7). À mesure que le pH du béton diminue, l'acier des armatures à l'intérieur du béton devient plus sensible à la corrosion.

Les caractéristiques typiques de la carbonatation du béton sont :

- La carbonatation se produit plus lentement à des profondeurs de béton plus importantes
- La profondeur de la carbonatation dépend

de la perméabilité du béton et des fissures, des vides et des pores.

- Lorsque le pH du béton descend en dessous de 11,5, l'acier des armatures commence à se corroder.
- L'effet et la vitesse de la neutralisation sont plus forts lorsque le dioxyde de soufre (SO₂) et le dioxyde d'azote (NO₂) réagissent avec l'eau pour former des solutions très acides. Ces produits chimiques sont en plus forte concentration dans l'environnement dans des environnements industriels.

D'après les mesures effectuées sur le terrain, la qualité du béton est essentielle pour réduire les effets de la carbonatation. Les tests ont révélé que :

- Dans un béton structural de bonne qualité, la carbonatation peut être observée jusqu'à 5-10 mm après 20 ans d'exposition à l'atmosphère (par exemple, éléments structuraux de bâtiments dans un environnement urbain).
- Dans un béton de mauvaise qualité, la carbonatation complète de panneaux muraux de 200 mm d'épaisseur (des deux côtés) se produit en 5 à 8 ans (par exemple, dans les logements publics à faible coût).

Attaque par les chlorures

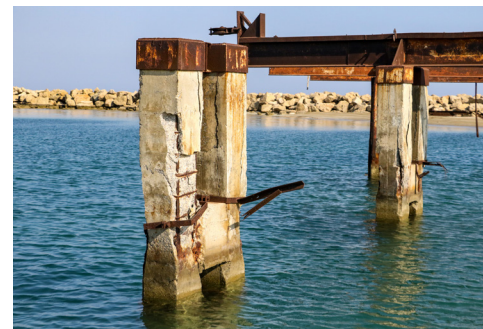
La principale cause de corrosion des armatures en acier et de dommages consécutifs aux structures en béton armé dans le monde entier est due aux chlorures. Les ions chlorure peuvent migrer à travers le béton et s'accumuler jusqu'à provoquer la dépassivation du film protecteur à la surface de l'acier pour béton armé, initiant ainsi la corrosion. Ils activent la surface de l'acier pour former une anode, la surface passivée restante jouant le rôle de cathode.

Les ions chlorure attaquent alors l'oxyde de fer, formant des complexes qui s'éloignent de l'acier et deviennent de la rouille. La réaction des atomes de fer nouvellement exposés entraînent la constitution d'autres oxydes de fer, poursuivant ainsi le processus de corrosion.

Les chlorures pénètrent dans le béton via :

- des agrégats, sables marins et adjuvants contaminés,
- de l'eau saumâtre ou salée utilisée pour le mélange et/ou le traitement,
- une exposition aux environnements marins et côtiers,
- l'utilisation de sels de déglaceage.

Avec le temps, les chlorures migrent dans le béton par diffusion : la concentration de chlorures à la surface des armatures en acier augmente. Un taux de chlorures de 0,2 à 0,4 % de la quantité de ciment (ou 0,6 kg/m³ de béton) constitue le seuil où l'acier pour béton armé non revêtu risque de commencer à se corroder.



Dégradation de l'armature et du béton dans un environnement à forte teneur en chlorure (côtier)

La principale cause de corrosion des aciers d'armature est due aux chlorures.

Augmenter la durée de vie du béton armé

La nécessité d'intégrer la durabilité dans la conception, la construction et l'entretien afin d'éviter la détérioration prématurée des structures en béton est bien connue.

La planification de la durabilité réside dans la sélection et l'utilisation des matériaux et dans le processus de conception et de méthodes de construction. L'objectif est de garantir au client, dès la phase de projet, la durée de vie de la structure et de s'affranchir d'interventions de maintenance prématurées et imprévues.

Une analyse technique peut être utilisée pour déterminer la nature et le taux de détérioration des matériaux dans certaines conditions macro et micro environnementales. Elle permet de planifier en conséquence la conception, la construction et l'entretien d'une structure en béton pendant sa durée de vie.

Il existe généralement trois façons d'empêcher la corrosion de l'acier dans le béton :

1. Modifier le béton

- Additions cimentaires supplémentaires (par exemple, cendres volantes, laitier et fumée de silice)
- Imprégnation (par exemple, de polymères)
- Inhibiteurs (par exemple, les nitrates)
- Couches barrières (par exemple, membranes et peintures)

2. Modifier les armatures du béton

- Acier pour béton armé revêtu (par exemple, acier galvanisé)
- Métaux résistant à la corrosion (par exemple, acier inoxydable)
- Matériaux non métalliques (par exemple, fibres de polymère renforcées de fibres et fibres de polymère renforcées de verre)
- Protection cathodique (par exemple, courant imposé et anodes sacrificielles)

3. Augmenter l'enrobage de béton

Cela permet d'allonger la durée de résistance au front de carbonatation avant d'atteindre les armatures, et le temps où la concentration de chlorures à la surface de l'acier pour béton armé arrive à son niveau critique.

Cependant, il y a un paradoxe à considérer dans cette approche. En effet, plus la couche de béton est épaisse, plus la valeur de pointe de la pression expansive due à la corrosion de l'acier pour béton armé est importante et plus la taille des fissures augmente en proportion.

Ces trois méthodes peuvent être utilisées individuellement, ou conjointement, chacune ayant ses propres avantages et inconvénients. L'approche utilisée doit être développée en fonction de la situation individuelle, de l'environnement et de la durée de vie requise du bien.



Les pontons flottants de la marina de Sandringham, dans l'État de Victoria (Australie), ont été renforcés par des armatures galvanisées.

La galvanisation offre une protection à long terme contre la corrosion et permet de réduire l'enrobage, ce qui permet d'économiser des ressources et de réduire les coûts.

Pourquoi les armatures en acier galvanisé sont-elles si efficaces ?

Formation du film passif

Comme l'acier pour béton armé non revêtu, l'acier pour béton armé galvanisé forme une couche passivante protectrice dans le béton. Le zinc dans les solutions fortement alcalines (pH 12,5 - 13,2) est passivé par la formation d'une couche de cristaux adhérents d'hydroxyzincate de calcium - $\text{Ca}(\text{Zn}(\text{OH})_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Cette réaction commence immédiatement au contact de la solution de ciment humide, formant un film superficiel qui stabilise le zinc et l'isole du milieu environnant. Les produits finaux de la passivation sont des cristaux de CaHZn sur la surface de l'acier galvanisé.

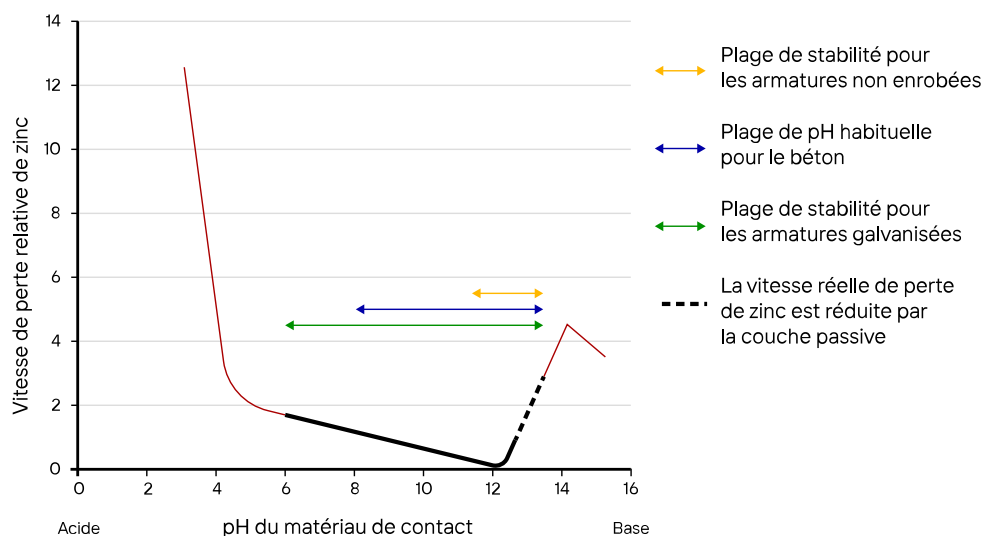


Cristaux de CaHZn après 24 h dans une solution de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ de pH 12,6

Lors de la formation de la couche passive, environ 10 μm de la couche extérieure de zinc pur du revêtement de galvanisation sont consommés. Il s'agit d'une faible proportion de l'épaisseur totale du revêtement. La réaction avec le zinc cesse lorsque le béton durcit. Après 28 jours, lorsque le béton a développé son adhérence et sa résistance à la compression, et grâce à la formation de la couche d'hydroxyzincate de calcium, l'acier pour béton armé galvanisé développe généralement une adhérence plus élevée et un glissement induit par la charge plus faible que l'acier noir pour béton armé équivalent.

Les propriétés de cette couche de passivation sont essentielles à l'efficacité de l'acier pour béton armé galvanisé, notamment sa stabilité chimique à pH neutre et à des concentrations élevées de chlorure.

L'acier pour béton armé galvanisé peut développer une capacité d'adhérence supérieure à celle de l'acier pour béton armé non revêtu.



Gamme de stabilité du pH des armatures dans le béton

Résistance à la carbonatation

Un revêtement de galvanisation à chaud a une vitesse de corrosion très faible sur une large gamme de pH (pH 6 - 12,5). Pour cette raison, l'acier pour béton armé galvanisé reste stable lorsque le niveau de pH du béton diminue en raison de la carbonatation au cours de sa durée de vie. À l'inverse, l'acier non revêtu n'est stable que dans une petite plage (pH 11,5 - 13,2) et commence à se corroder dès que le pH du béton descend en dessous de 11,5. Dans un béton dont le pH se situe entre 12,5 et 13,2, les armatures en acier galvanisé sont protégées par la formation d'une couche passive d'hydroxyzincate de calcium, ce qui empêche le zinc de subir des taux de perte élevés dans un environnement hautement alcalin.

Avec le temps, le front de carbonatation migre à travers la masse de béton, réduisant finalement le pH à des niveaux presque neutres (pH 7). Comme l'illustre la figure ci-contre, l'acier pour béton armé galvanisé n'est donc absolument pas affecté par la carbonatation du béton.

Résistance à l'attaque des chlorures

Les armatures galvanisées ont une meilleure résistance aux attaques des chlorures que les armatures non revêtues.

Une recherche récente sur ce sujet (Jaśniok, Sozańska, Kołodziej et Chmiela, 2020) a constaté que : "Les résultats obtenus à partir des tests de corrosion (LPR, EIS) et structurels (SEM, EDS) sur les spécimens de béton armé avec de l'acier B500SP ont démontré un impact très favorable du revêtement de zinc sur les barres d'armature en fournissant une protection efficace contre la corrosion dans un environnement de chlorures".

Le seuil de chlorures admis par l'industrie pour les armatures en acier non revêtu est de 0,06 % en poids du béton, sur la base d'une probabilité de 20 % de déclenchement de la corrosion. L'acier pour béton armé galvanisé peut tolérer des concentrations de chlorures bien supérieures à celles qui provoquent la corrosion des armatures non revêtues, en

raison de la stabilité du film d'hydroxyzincate de calcium. Bien qu'il n'y ait pas d'accord universel, une revue de la littérature sur le sujet montre que le seuil de chlorures de l'acier pour béton armé galvanisé est 2 à 6 fois supérieur à celui de l'acier pour béton armé non revêtu. En général et de façon prudente, le seuil critique de chlorures pour les armatures en acier galvanisé est considéré comme étant 2 à 2,5 fois plus élevé que celui pour les armatures en acier non revêtu.

En outre, la vitesse de diffusion des chlorures à travers le béton n'est pas constante, elle ralentit au fil du temps. En pratique, le seuil critique de chlorures plus élevé de l'acier pour béton armé galvanisé signifie que le délai d'initiation de la corrosion est beaucoup plus long que celui de l'acier pour béton armé non revêtu - au moins deux fois et, dans certains rapports, jusqu'à dix fois plus long.

L'attaque par les chlorures étant la principale responsable de dommages aux structures en béton armé dans les infrastructures, au niveau mondial, elle doit être soigneusement prise en compte dans tout plan de durabilité.

La galvanisation à chaud est une méthode simple et rentable pour améliorer la résistance aux chlorures, et donc la durabilité des structures en béton ; ses performances par rapport à l'acier d'armature non revêtu peuvent être modélisées à l'aide de modèles classiques de diffusion des chlorures.

Il est important de noter que la modélisation déterministe de la diffusion des chlorures ne modélise que le temps d'initiation de la corrosion, qui est indépendant de l'épaisseur du revêtement de galvanisation. Si l'on considère la phase de propagation de la corrosion, pendant laquelle le revêtement de galvanisation se corrode à une vitesse plus lente que l'acier, la durabilité est encore accrue par l'épaisseur du revêtement de galvanisation.

Protection barrière

Le procédé de galvanisation à chaud permet de couvrir complètement toutes les surfaces : c'est un avantage non négligeable du revêtement de zinc sur les armatures en acier galvanisé. Cette protection barrière due à la liaison métallurgique, agit comme une autre défense entre l'acier et l'atmosphère. Associée à l'excellente résistance à l'abrasion et à la robustesse du revêtement, elle protège idéalement l'acier pour béton armé pendant le transport vers le chantier et la phase de construction d'un projet.

Perturbation minimale de la masse de béton

En cas d'initiation de la corrosion du revêtement de galvanisation, le processus de corrosion entre dans la phase de propagation. Les produits de corrosion du zinc qui en résultent sont fins et pulvérulents, et leur volume n'est que de 1,3 fois celui du zinc d'origine (alors que l'acier d'armature non revêtu se dilate jusqu'à 7 fois son volume d'origine en raison de la corrosion).

Les produits de corrosion du zinc sont également plus solubles dans l'eau interstitielle alcaline et se diffusent à partir de l'acier pour béton armé vers la matrice du béton, contrairement aux produits de corrosion du fer qui, eux, ne s'éloignent de l'acier pour béton

armé qu'après la fissuration du béton. Cela évite l'accumulation de pressions internes, responsables des phénomènes de fissuration et d'écaillage du béton.

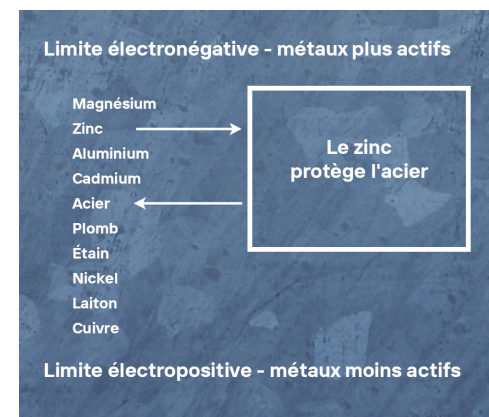
De plus, l'ajout de produits de corrosion microscopiques à la matrice du béton diminue sa perméabilité en remplissant les pores et les vides, ralentissant ainsi la migration d'éléments agressifs de la surface du béton vers les armatures. Le résultat de ce processus est une augmentation significative de la durée de la phase de propagation de la corrosion et, de ce fait, une initiation de la fissuration du béton retardée.

Protection sacrificielle

La série galvanique des métaux établit une liste de métaux et d'alliages en fonction de leurs potentiels relatifs dans chaque environnement. L'image de droite montre une série de métaux classés par ordre d'activité électrochimique dans l'eau de mer (l'électrolyte). Les métaux sont disposés de haut en bas en fonction de leur capacité sacrificielle ; les métaux situés en haut de l'échelle fournissent une protection cathodique ou sacrificielle aux métaux situés en bas.

Le zinc est anodique pour l'acier. Par conséquent, le revêtement de galvanisation assure une protection cathodique à l'acier exposé. Lorsque le zinc et l'acier sont en contact en présence d'un électrolyte, le zinc se consume lentement tandis que l'acier est protégé. L'action sacrificielle du zinc offre une protection à l'acier en cas de dommages causés par une manipulation brutale ou par le montage sur chantier.

Le zinc protège l'acier

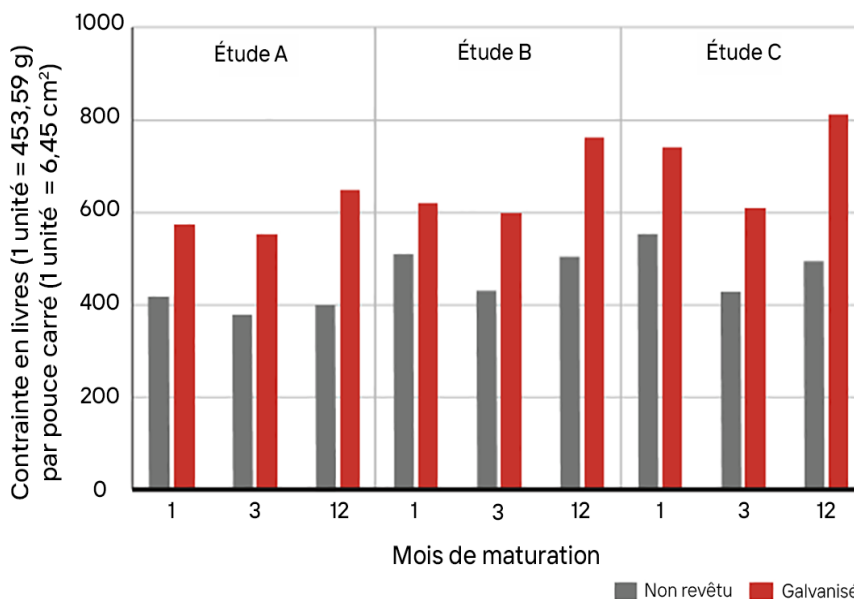


La position du zinc dans la série galvanique

Force d'adhérence

De nombreuses études confirment que l'acier pour béton armé galvanisé présente des caractéristiques de résistance d'adhérence supérieures à celles de l'acier pour béton armé non revêtu.

La force d'adhérence est étroitement liée à la formation du film passif d'hydroxyzincate de calcium. Bien que des essais accélérés signalent que la force d'adhérence de l'acier pour béton armé galvanisé est inférieure à celle de l'acier pour béton armé non revêtu, cet effet se limite aux 2 premières semaines seulement et est lié à la réaction initiale du zinc aux conditions hautement alcalines. Après 28 jours, lorsque le béton a développé sa force d'adhérence et de compression normale, l'acier pour béton armé galvanisé manifestera une capacité d'adhérence supérieure à celle de l'acier pour béton armé non revêtu. Ceci est dû à la précipitation du film d'hydroxyzincate de calcium à l'interface acier d'armature/béton.



Comparaison de la force d'adhérence de barres non revêtues et galvanisées (Source : Université de Californie)

Profils de corrosion de l'acier pour béton armé non revêtu et de l'acier pour béton armé galvanisé

Le schéma simplifié ci-dessous illustre les performances de l'acier pour béton armé galvanisé par rapport à l'acier pour béton armé non revêtu.

La tolérance aux chlorures plus élevée de l'acier pour béton armé galvanisé et son immunité aux effets de la carbonatation retardent le début de l'initiation de la corrosion (déplacement du point x au point y) dans le processus de corrosion. La protection barrière apportée par le zinc, associée à la perturbation minimale due aux produits de corrosion du zinc, prolongent la phase de propagation du processus.

Chaque étape de la corrosion est décrite ci-dessous :

A. Stade d'initiation - période pendant laquelle le béton est progressivement exposé aux produits corrosifs (chlorures / carbonatation) et les armatures en acier non revêtu restent passivées (jusqu'au point x). Le temps d'initiation de la corrosion peut être quantifié par des modèles déterministes de diffusion des chlorures et de carbonatation (uniquement requis pour l'acier pour béton armé non revêtu), basés sur la deuxième loi de Fick.

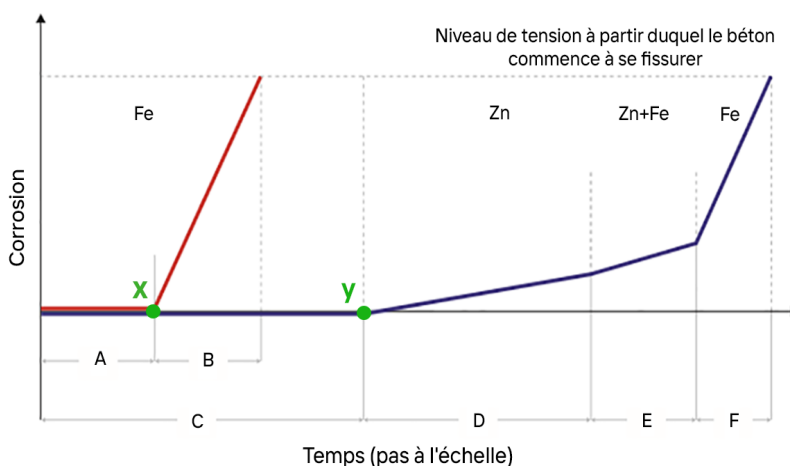
B. Stade de propagation - Destruction de la couche de passivation sur les armatures en acier non revêtu et corrosion des armatures jusqu'à la limite acceptable de détérioration du béton. A l'issue de cette période, des fissures et des écaillages du béton apparaissent.

C. Durée de vie de la couche de passivation de l'acier pour béton armé galvanisé. La phase d'initiation de la corrosion est prolongée en raison de la tolérance accrue aux attaques des chlorures et de l'absence totale de dépassivation due à la carbonatation du béton.

D. Période de protection de l'acier pour béton armé galvanisé contre la rouille, car les chlorures attaquent une petite partie de la couche de zinc pur à la surface de l'acier et les produits de corrosion se diffusent loin des armatures.

E. Période de protection supplémentaire lorsque la corrosion entraîne la dissolution des couches d'alliage Fe-Zn.

F. À ce stade, tout le revêtement de galvanisation est consommé et la vitesse de corrosion des armatures devient identique à celle de l'acier pour béton armé exposé et non revêtu au stade B. Cependant, le revêtement de galvanisation a fait son travail et le temps d'initiation de la fissuration du béton s'en est trouvé considérablement augmenté.



Modèle schématique de la corrosion de l'acier pour béton armé galvanisé dans le béton, d'après Tuutti 1982

Avantages de conception

Un revêtement de galvanisation par immersion à chaud sur les armatures en acier pour le béton augmente considérablement la durabilité des structures en béton armé. La formation d'un film passif d'hydroxyzincate de calcium sur la surface de l'acier pour béton armé galvanisé augmente de manière significative le seuil critique de chlorures de l'acier pour béton armé, retardant d'autant l'initiation de la corrosion. Ce délai supplémentaire peut être quantifié en utilisant des modèles déterministes conventionnels de diffusion des chlorures, basés sur la deuxième loi de Fick.

Le délai d'amorçage de la corrosion est d'autant plus long que l'acier pour béton armé galvanisé est immunisé contre les effets de la carbonatation. En cas de dépassivation des armatures en acier galvanisé, les produits de corrosion du zinc qui en résultent sont beaucoup moins volumineux que les produits de corrosion du fer formés sur les armatures en acier non revêtu, avec à la clé, une perturbation minimale de la masse de béton. Cela évite l'accumulation de pressions internes responsables de fissurations et d'écaillage du béton.

L'ajout des produits de corrosion microscopiques du zinc à la matrice du béton diminue sa perméabilité en remplissant les pores et les vides, ce qui ralentit l'intrusion d'agents agressifs de la surface du béton et le transfert à l'acier pour béton armé. Le résultat de ce processus est une augmentation significative de la durée de la phase de propagation de la corrosion et un retard correspondant de l'initiation de la fissuration du béton.



Poutres de soutien en béton armé avec armatures en acier galvanisé à chaud pour les balcons d'un élégant appartement à Gênes. Les armatures en acier galvanisé ont été choisies pour préserver au mieux les poutres de soutien des balcons dans le temps, en particulier pour les protéger du brouillard, de la pluie, du gel et de l'humidité. (Images reproduites avec la permission de Prefabbricati Torti di Pietro e Lino Torti snc)

Un revêtement de galvanisation à chaud permet d'augmenter considérablement la durabilité des structures en béton armé.

Spécification d'un revêtement de galvanisation pour les armatures du béton en acier

L'acier pour béton armé galvanisé est spécifié conformément à la norme EN 10348-2:2019 (Acier pour béton armé - Acier pour béton armé galvanisé - Partie 2 : Produits en acier galvanisé pour l'armature du béton). L'EN 10348-2 donne les exigences pour les produits en acier pour béton armé galvanisé qui ont été fabriqués à partir de barres qui ont satisfait aux exigences de l'EN 10080.

Les exigences relatives à la galvanisation des barres sont conformes à la norme internationale pour la galvanisation à façon - EN ISO 1461, à l'exception des exigences relatives à l'épaisseur du revêtement pour les produits en acier pour béton armé qui sont spécifiquement définies comme suit dans le tableau de droite.

La norme EN 10348-2 garantit également que la géométrie des nervures (hauteur des nervures ou profondeur des indentations) est conservée de manière satisfaisante après la galvanisation. Pour éviter les effets possibles sur les propriétés mécaniques, la norme fixe des diamètres de pliage minimums pour les barres pliées avant la galvanisation.

Exigences relatives à l'épaisseur du revêtement selon la norme EN 10348-2:2019

Diamètre de l'acier (mm)	Masse du revêtement (g/m ²)	Épaisseur du revêtement (µm)
> 6	610	85
≤ 6	505	70

Le coût de l'acier pour béton armé galvanisé



Des armatures galvanisées ont été utilisées pour les balcons en béton blanc préfabriqué de type jardinière de la ZAC Seguin, dans l'ouest de Paris. Cette solution a été choisie afin que l'aspect des éléments en béton préfabriqué blanc ne souffre pas de taches de rouille au fil du temps. L'utilisation d'armatures galvanisées a également permis de réduire l'enrobage du béton pour faciliter une conception plus mince. (Images reproduites avec la permission d'Aldric Beckmann Architectes/ Françoise NThépé Architecture & Design.Paris)



Le coût global de l'utilisation d'armatures en acier galvanisé dans la construction en béton dépend largement de son périmètre d'utilisation dans toute la structure. Par exemple, il est rarement indispensable de galvaniser le noyau structurel ou les éléments internes d'un immeuble de grande hauteur ou les composants profondément enfouis des grandes culées et fondations. Dans ces situations, il peut être nécessaire d'utiliser de l'acier pour béton armé galvanisé uniquement dans les éléments exposés en surface ou lorsque les fondations présentent un risque d'être affectées par des eaux souterraines agressives ou fluctuantes.

Dans la construction de bâtiments, on constate généralement que le coût de la galvanisation augmente d'environ 6 à 10 % le coût global du béton mis en oeuvre. Le pourcentage varie selon la taille et le type d'armatures utilisés, le prix de la galvanisation et la quantité d'acier par mètre cube de béton.

En moyenne, le coût des armatures ne représente pas plus de 25 % du coût total du béton mis en oeuvre. Si l'on considère que le coût de la structure et de la peau d'un bâtiment ne représente normalement qu'environ 25 à 30 % du coût total de la construction, le coût additionnel de la galvanisation ne représente plus que 1,5 à 3 %.

Mieux, ce chiffre se réduit à 0,5-1,0% si la galvanisation est limitée aux panneaux de surface. Rapporté au coût total du projet ou au prix de vente final, le montant de la galvanisation devient en effet très faible, et n'excède pas plus de 0,1-0,2%.

Une analyse réalisée en 2017 par le professeur Richard Weyers, de l'université Virginia Tech, a examiné la diffusion des chlorures dans les tabliers en béton et les effets sur la durée de vie de trois types d'acier en Virginie, aux Etats-Unis :

- l'acier pour béton armé revêtu d'époxy
- l'acier pour béton armé galvanisé à façon
- l'acier pour béton armé inoxydable 316LN.

Les chiffres du coût total actuel et du coût du cycle de vie démontrent que l'acier pour béton armé galvanisé offre la protection la plus rentable pour les tabliers de ponts renforcés ayant une durée de vie de 100 ans.

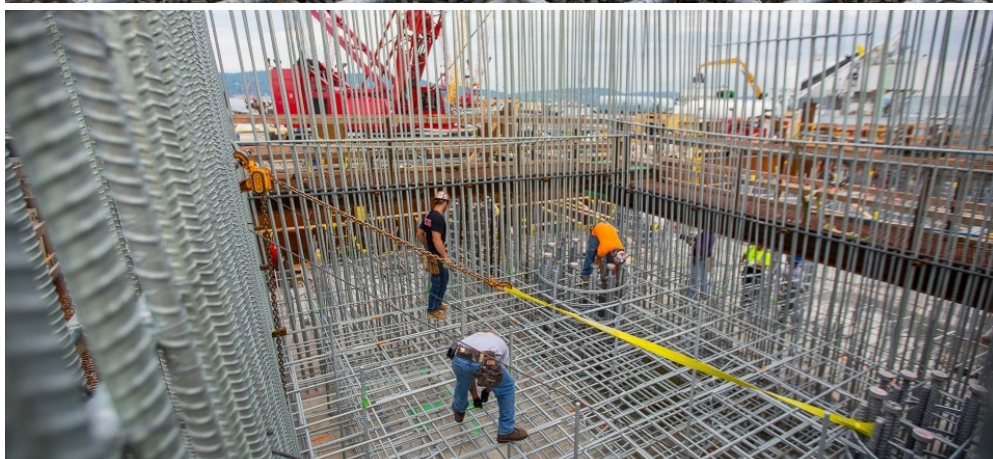
Lorsque l'on analyse les coûts et les conséquences des dommages causés par la corrosion sur un bâtiment en béton armé, le coût additionnel de la galvanisation est un investissement très faible en regard d'une protection supérieure contre la corrosion à long terme.

Cintrage, soudage, réparation, manutention, transport et stockage

Les conseils et les exigences concernant le cintrage, le soudage, la réparation et les autres aspects de la transformation sont donnés dans la norme EN 10348-2:2019.

En raison de la meilleure durabilité du revêtement de galvanisation, aucune manipulation ni aucun soin particulier n'est nécessaire lors du transport de l'acier pour béton armé galvanisé. Voici néanmoins quelques recommandations pour le transport :

- L'utilisation de chaînes, de câbles métalliques ou de câbles pour soulever est possible;
- Les paquets doivent être levés en plusieurs points ;
- L'utilisation d'une barre d'écartement est recommandée pour éviter une abrasion inutile entre les barres dans les paquets plus longs ;
- Aucun placement particulier n'est nécessaire, bien que les armatures et les treillis soudés doivent être empilés pour permettre le drainage et la circulation de l'air afin d'éviter les taches de stockage humide ;
- Comme le revêtement n'est pas sensible aux UV, il peut être stocké n'importe où sur le chantier.



Installation et recouvrement

En raison de l'excellente résistance à l'abrasion de l'acier pour béton armé galvanisé, aucune exigence particulière n'est requise lors de sa mise en oeuvre sur le chantier. Grâce à la meilleure force d'adhérence de l'acier pour béton armé galvanisé, il n'est pas utile de prévoir d'utiliser plus d'acier (certains revêtements de protection nécessitent des longueurs de recouvrement supérieures de 20 à 50 % par rapport à l'acier pour béton armé non revêtu).

Comme pour les armatures en acier non revêtu, aucune condition météorologique particulière n'est requise pour l'installation et, en raison du revêtement de surface, l'acier pour béton armé galvanisé est beaucoup plus propre à travailler. De plus, comme le revêtement est lié à l'acier par voie métallurgique, il y a peu de dommages à la mise en oeuvre.



Mélange d'armatures galvanisées à chaud et non revêtues

Dans le béton, aucune réaction corrosive ne se produit entre les aciers d'armature non revêtus et galvanisés tant que les deux métaux restent passifs. Pour s'assurer que c'est le cas, l'enrobage de béton sur l'acier pour béton armé non revêtu et les assemblages ne doit pas être inférieur à l'enrobage requis pour protéger l'acier pour béton armé non revêtu seul dans des conditions similaires.

Lorsque l'on utilise des armatures en acier galvanisé à chaud, la meilleure pratique consiste à galvaniser tout l'acier en contact avec les armatures, y compris les fils d'attache, les inserts et les chaises, ou à utiliser des attaches et des chaises non métalliques ou plastifiées. Si de l'acier pour béton armé galvanisé à chaud est placé en contact avec de l'acier pour béton armé non revêtu dans des zones sujettes à la corrosion, l'acier revêtu va se sacrifier pour protéger l'acier non revêtu, avec pour effet une réduction de la durée de vie du revêtement de zinc à proximité de la zone de contact.

Si le contact avec les armatures en acier non revêtu est inévitable et constitue un problème, du polyéthylène et du ruban diélectrique peuvent être utilisés pour assurer l'isolation électrique entre les deux métaux. Il convient d'utiliser du fil d'attache galvanisé ou des attaches en plastique lors de l'assemblage ou de l'installation d'acier pour béton armé galvanisé. Les supports de barres doivent également être en acier galvanisé, en plastique ou dans un autre matériau inerte tel que la maçonnerie. Quand des raccords mécaniques sont utilisés, ils doivent également être galvanisés.



Les 43 paires de piliers en béton du pont Mario M. Cuomo sont renforcées par des cages en acier galvanisé.

Reasons to Use Hot Dip Galvanized Reinforcing Steel

1 L'acier pour béton armé galvanisé est passivé dans le béton humide par la formation d'un film adhérent d'hydroxyzincate de calcium. La formation de ce film **augmente la force d'adhérence entre l'acier pour béton armé galvanisé et le béton.**

2 L'acier pour béton armé galvanisé est stable sur une large gamme de pH et **n'est pas du tout affecté par la carbonatation du béton.**

6 Dans les applications affectées par des expositions à la carbonatation, **l'acier galvanisé permet d'utiliser un enrobage plus fin** que l'acier pour béton armé non revêtu tout en obtenant la même durabilité. Il n'y a pas d'exigences particulières pour la conception du béton utilisant de l'acier pour béton armé galvanisé et aucun acier ou recouvrement supplémentaire n'est nécessaire.

7 En cas de dépassivation de l'acier pour béton armé galvanisé, le zinc se corrode plus lentement que le fer et le revêtement de zinc constitue une barrière contre la corrosion du fer. Contrairement au fer, les produits de corrosion du zinc migreront du revêtement de galvanisation et, en réduisant la porosité du béton, ralentiront la vitesse de pénétration des chlorures. Le volume relativement plus faible des produits de corrosion du zinc par rapport à ceux du fer diminue la pression expansive générée par le processus de corrosion, **réduisant ainsi la taille des fissures qui peuvent se former.**

9 L'acier pour béton armé galvanisé **n'induit pas les coûts d'essai et d'entretien permanents** associés aux systèmes de protection cathodique.

10 Contrairement aux revêtements époxy, un revêtement de galvanisation sur l'acier pour béton armé fournit une **protection barrière, une meilleure force d'adhérence, une couche de passivation supérieure et agit comme une anode sacrificielle si l'acier pour béton armé sous le revêtement est exposé. Il présente une excellente résistance à l'abrasion, n'est pas affecté par la lumière UV et n'a pas d'exigences particulières en matière de stockage, de transport, de manutention et d'assemblage.**

12 La galvanisation est une option durable. Une déclaration environnementale de produit (EPD) est disponible pour l'acier galvanisé, et à la fin de la vie de la structure, tout revêtement de zinc restant peut être recyclé avec l'acier. Le faible impact environnemental du procédé de galvanisation est compensé par de considérables économies de CO₂ associées à la durabilité accrue de la structure en béton armé avec armatures galvanisées.

3 De manière prudente, l'acier pour béton armé galvanisé a un seuil de résistance aux chlorures 2 à 2,5 fois plus élevé que l'acier pour béton armé non revêtu - ce qui fait plus que doubler le temps de dépassivation de l'acier pour béton armé et d'initiation de la corrosion. En général, l'acier pour béton armé galvanisé **augmente de 4 à 5 fois la durée de vie de la structure par rapport** à l'acier pour béton armé non revêtu.

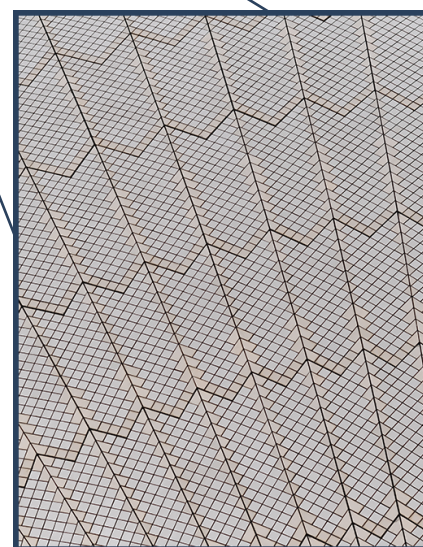
4 Le temps d'initiation de la corrosion de l'acier pour béton armé galvanisé peut être modélisé à l'aide des modèles de diffusion du chlorure conventionnels de l'industrie basés sur la deuxième loi de Fick.

5 Le comportement passif de l'acier pour béton armé galvanisé dans le béton le rend apte à être utilisé dans des environnements agressifs et convient parfaitement aux façades extérieures, aux joints de panneaux préfabriqués et aux éléments de surface, en fait **à toute application où la carbonatation ou la pénétration de chlorure est préoccupante.**



8 L'acier pour béton armé galvanisé est un moyen efficace d'assurer la durabilité d'une structure en béton avec un **coût d'investissement beaucoup plus faible comparé à l'utilisation d'une armature en acier inoxydable.**

11 Le procédé de galvanisation **n'a pas d'effet significatif sur les propriétés mécaniques de l'acier pour béton armé**, et toutes les qualités disponibles peuvent être galvanisées avec succès.



Les tuiles en chevron de l'Opéra de Sydney ont été construites avec des armatures en acier galvanisé à chaud.

Références

American Galvanizers Association, Hot-Dip Galvanized Reinforcing Steel: A Specifiers Guide, AGA, Centennial, CO, USA, 2012.

Concrete Institute of Australia, The Use of Galvanized Reinforcement in Concrete, Current Practice Note 17, 2008, Concrete Institute of Australia, Sydney.

Concrete Institute of Australia (2014), "Concrete Durability Series: Z7/O5 Durability Modelling", Sydney.

Concrete Institute of Australia (2018), "Concrete Durability Series: Z7/O2 Durability Exposure Classifications", Sydney.

ILZRO, Galvanized Reinforcement for Concrete – II, 1981, International Lead Zinc Research Organization, NC, USA

Mariusz Jaśniok, Maria Sozańska, Jacek Kołodziej et Bartosz Chmiela, "Évaluation sur deux ans des dommages causés par la corrosion à l'acier pour béton armé galvanisé à chaud B500SP dans un béton contaminé par des chlorures", 2020.

NACE International, "International Measures of Prevention, Application and Economics of Corrosion Technology (IMPACT)", CORROSION CONFERENCE 2016, Vancouver, Canada

Tuutti, K. (1982) "Corrosion of steel in concrete". Institut suédois de recherche sur le ciment et le béton, Stockholm.

Yeomans S R (Editor), Galvanized Reinforcing Steel in Concrete, Elsevier UK, December 2004, ISBN 008044511.

Yeomans, S R (2004), "Chapter 1 – Galvanized Steel in Concrete: An Overview", in Yeomans, S R (ed.) Galvanized Steel Reinforcement in Concrete, Elsevier Science, pp. 1–7.

Zhao Y, Jin W, Analyse des dommages et modèle de fissuration des structures en béton armé avec corrosion de l'acier pour béton armé dans la fissuration du béton induite par la corrosion de l'acier, 2016.

Remerciements

Crédits iconographiques

Couverture, pages 1, 2, 9, 10 :	New York Thruway Authority
Pages 3, 4, 5, 7 :	Association des galvanisateurs d'Australie
Page 3, 4 :	Shutterstock.com
Page 11 :	stock.adobe.com

Nous remercions la Galvanizers Association of Australia pour son aide précieuse dans la préparation de ce document.

Informations complémentaires sur les armatures galvanisées pour le béton :

European General Galvanizers Association

14-16 Reddicroft	Boulevard du Souverain 68
B73 6AZ	1170 Brussels
Royaume-Uni	Belgique

www.egga.com
Email: mail@egga.com



Galvazinc

4, rue Michael Winburn
92400 Courbevoie
La France

www.galvazinc.com
Email: info@galvazinc.com

