
Le rôle des armatures en acier inoxydable dans le comportement à long terme des ouvrages

Eric Chauveau* — Bernard Demelin**

* Centre de recherches Ugitech,
Avenue Paul Girod, 73403 Ugine Cedex
Eric.Chaudeau@ugitech.com

** Direction commerciale Ugitech,
Avenue Paul Girod, 73403 Ugine Cedex

RÉSUMÉ. Le béton armé connaît, au cours du temps, une dégradation de sa structure dans certaines conditions d'emploi. Il existe des solutions éprouvées pour éviter ou pour amoindrir l'effet de ces pathologies : la protection cathodique, l'augmentation de l'enrobage, les inhibiteurs de corrosion, le zingage de l'acier, etc... Aujourd'hui, l'armature en acier inoxydable constitue aussi pour certaines applications, une solution à prendre en considération, dans le cadre d'une durabilité pérenne des ouvrages, en cas en particulier de difficultés de maintenance. L'acier inoxydable présente en effet une résistance à la corrosion adaptée à de nombreux milieux d'utilisation du béton armé.

ABSTRACT. The reinforced concrete knows, in the course of time, a degradation of its structure under certain condition of uses. There are solutions to avoid or reduce the effect of these pathologies: cathodic protection, the increase in coating, the corrosion inhibitors, the zinking of steel, etc... but today, the stainless steel reinforcement also constitutes for certain applications, a solution to be taken into account, within the framework of a perennial durability of the works, in case in particular of difficulties of maintenance. The stainless steel indeed has a corrosion resistance adapted to many mediums of use of the reinforced concrete.

MOTS-CLÉS : armatures, inox, corrosion, piqûres, durabilité, couplage galvanique, acier, béton, carbonatation, maintenance, chlorures.

KEYWORDS: rebars, stainless steel, corrosion, pitting, durability, galvanic coupling, steel, concrete, carbonatation, chlorides.

1. Introduction

Le béton armé connaît, au cours du temps, une dégradation de sa structure dans certaines conditions d'emploi : on estime qu'environ 70% des pathologies du béton sont liées à la corrosion des armatures en acier ordinaire. Il existe des solutions éprouvées pour éviter ou pour amoindrir l'effet de ces pathologies : la protection cathodique, l'augmentation de l'enrobage, les inhibiteurs de corrosion, le zingage de l'acier, etc... Mais aujourd'hui, l'armature en acier inoxydable constitue aussi pour certaines applications, une solution à prendre en considération, dans le cadre d'une durabilité pérenne des ouvrages, en cas en particulier de difficultés de maintenance.

L'acier inoxydable présente une résistance à la corrosion adaptée à de nombreux milieux d'utilisation du béton armé, mais il possède aussi des propriétés qui en font pour certaines applications le complément indispensable au béton : on citera les propriétés de résistivité thermique, d'amagnétisme, de très hautes résistances mécaniques et de résistance aux chocs.

2. La définition d'un acier inoxydable

Un acier inoxydable est un acier qui contient au minimum 10,5% de chrome (définition de la norme européenne EN 10088). Ce chrome participe à la formation d'une couche superficielle dite couche « passive » ; elle est composée d'un film très mince de quelques nanomètres, invisible à l'œil nu ; ce film est constitué d'oxydes et d'hydroxydes de chrome. Cette couche fait partie intégrante du métal et elle assure une sorte de protection anti - corrosion durable.

Il existe une différence fondamentale du point de vue de la corrosion entre l'inox et l'acier ordinaire dans le béton :

- Pour des pH inférieurs à 9, l'acier traditionnel se corrode sur toute sa surface, avec la création d'un volume très important de produits de corrosion, d'où les pathologies classiques du béton.
- Ce type de situation ne peut se rencontrer pour des inox que pour des pH inférieurs à 3,5 ; autant dire, jamais dans le béton, pour lequel le pH varie au cours du temps entre 12 et 8. C'est donc la corrosion par piqûres (formation de cavités sur les armatures de quelques microns³) due à l'attaque des ions chlorures migrant dans le béton, qui pourrait se rencontrer sur les inox. Tout le savoir - faire de la préconisation va consister à choisir la nuance d'inox la plus économique permettant d'éviter ce type de corrosion localisée.

Les nuances les plus fréquemment utilisées en armatures sont les suivantes :

Austénitiques	18% Cr – 10% Ni	Type AISI 304 ; 1.4301 et 1.4311
Austénitiques au Mo	18% Cr – 10% Ni – 2% Mo	Type AISI 316 ; 1.4401 et 1.4429
Duplex	23% Cr – 4% Ni	1.4362 (innovation)
Duplex avec Mo	22% Cr – 5% Ni – 2% Mo	1.4462

3. La résistance à la corrosion des inox dans un béton imprégné ou non de chlorures

De très nombreux tests accélérés de résistance à la corrosion ont été réalisés dans notre laboratoire dans des milieux chimiques synthétiques, alcalins, carbonatés et chlorurés.

Les milieux synthétiques ont été définis pour tenir compte de l'évolution de la solution interstitielle au voisinage de l'armature et du béton dans le temps : trois milieux ont été choisis et ils sont décrits ci-dessous :

- Solution n° 1, c'est un milieu carbonaté avec une addition de chlorures ; **pH = 10** (2,1g /L NaHCO_3 + 7,15g/L Na_2CO_3 + **16.4g/L** de NaCl).

- Solution n° 2, c'est un milieu carbonaté avec une très forte addition de chlorures ; **pH = 9** (2,1g/L NaHCO_3 + 7,15g/L Na_2CO_3 + **35g/L** de NaCl).

Les solutions 1 et 2 correspondent à un béton ayant évolué dans le temps avec des quantités de chlorures de sodium différentes. En effet, les armatures d'inox seront surtout utilisées dans un environnement agressif tel que les ouvrages côtiers. Une concentration de Chlorures de sodium de 35g/L équivaut à une teneur d'ions chlorures en milieu marin.

- Solution n° 3, **pH = 8** (46g/L CaCl_2 + 2g/L CaCO_3 saturé), béton dégradé en milieu très sévère.

La corrosion est appréciée par un test électrochimique accéléré ; c'est le test du potentiel de piqûres qui a été choisi ; il consiste à déterminer par balayage de potentiel à l'aide d'un potentiostat le potentiel de formation des piqûres ; plus le potentiel est élevé, meilleure sera la résistance à la corrosion par piqûres. Ceci traduit le fait qu'il faut donner à la surface une certaine énergie (le potentiel) pour créer une corrosion localisée par piqûres.

La figure n° 1 représente les résultats obtenus dans un milieu carbonaté, chloruré avec un pH de 8. Les valeurs du potentiel de piqûres mesurées sont indiquées sur le graphe en milliVolts/ElectrodeCalomelSaturé. Nous nous sommes placés dans des conditions où le béton avait subi beaucoup de modifications chimiques : carbonatation, pénétration de chlorures,... Nous avons estimé que ces modifications chimiques en bord de mer nécessitent une exposition assez longue de l'ordre d'une cinquantaine d'années. Nous avons additionné 21g/L de chlorures, en faisant l'hypothèse que le béton est très fissuré (par choc avec un bateau par exemple) et laisse presque pénétrer l'eau de mer.

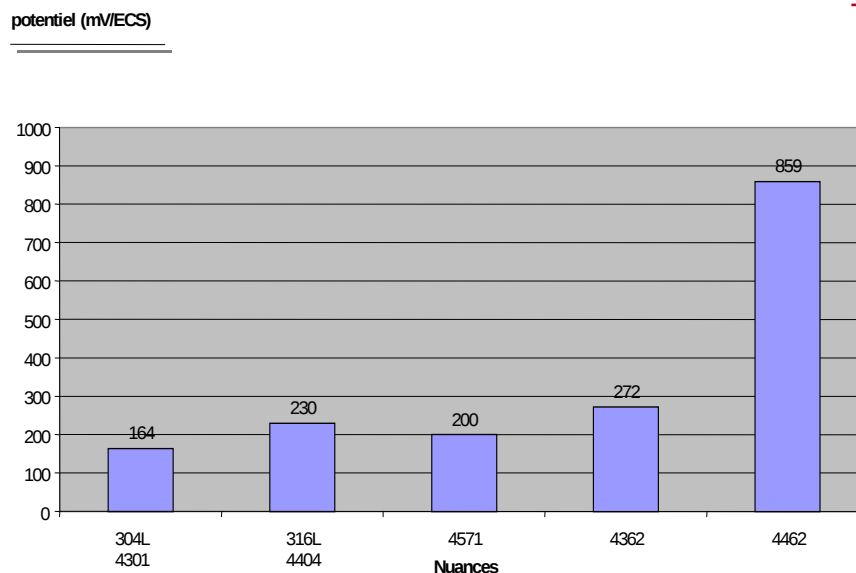


Figure 1. *Potentiel de piqûres pour différentes nuances dans le milieu synthétique carbonaté à pH de 8 avec addition de chlorures à 21 g/L.*

La figure n° 1 montre que le potentiel de piqûres du duplex 4462 est très élevé (859 mV/ECS) ; sa résistance à la corrosion dans ces conditions est donc très bonne ; l'inox 4462 est ainsi adapté aux bétons soumis à de fortes concentrations de chlorures dans des atmosphères chaudes (mers du Golfe Persique par exemple ; pour la classe XS de l'Eurocode 2).

Par ailleurs, l'inox duplex 4362 présente un potentiel de piqûres voisin de celui des austénitiques 4301/4404 et 4571 ; c'est un nouveau produit qui possède la particularité d'avoir une bonne tenue à la corrosion par rapport à celle des austénitiques tout en ayant un prix plus attractif que les inox de la famille 316 / 1.4404 (pour la classe XD de l'Eurocode 2 par exemple).

Il faut noter que les valeurs de potentiel de piqûres pour les inox sont nettement supérieures à celle mesurée dans les mêmes conditions pour l'acier traditionnel (valeur négative de – 350 mV/ECS).

Ces résultats sont cohérents avec notre connaissance de la résistance à la corrosion par piqûres de ces nuances dans des milieux chlorurés à pH neutre ou moyennement acide.

4. Les caractéristiques des armatures en acier inoxydable et les dispositions constructives

Les aciers inoxydables présentent une limite élastique et un allongement bien supérieurs à ceux des aciers ordinaires. Il sera ainsi aisé de réduire le nombre d'armatures lors d'une construction ou d'utiliser les inox dans le cas d'une recherche d'une tenue aux chocs du béton. Certains inox sont amagnétiques et sont donc intéressants dans tous les cas où cette propriété est intéressante (aéroport, hôpitaux,...). Ils présentent une tenue au feu remarquable et répondent aux exigences demandées aux constructions en zones sismiques. Leur faible conductivité thermique en fait par ailleurs un matériau pour résoudre les problèmes de pont thermique.

En terme d'adhérence, il n'existe pas de différences entre les deux types d'armatures.

Par ailleurs, l'Eurocode 2 considère que les épaisseurs d'enrobage peuvent être diminuées dans le cas d'utilisation d'armatures d'inox ; en terme de durée de vie, 6 classes ont été prévues et l'utilisation d'armatures en inox, pour une même épaisseur d'enrobage, permet de passer à la classe de structure supérieure.

5. Le couplage galvanique entre acier traditionnel et acier inoxydable dans le béton

Ces deux matériaux peuvent être en contact sans risque de corrosion par couplage galvanique, et ceci est particulièrement intéressant dans le cas de la réparation des ouvrages d'art. De nombreuses expériences faites dans notre laboratoire, montrent en effet qu'il n'y a pas d'accélération de la corrosion de l'acier ordinaire par contact avec l'inox si ces deux conditions sont respectées :

- Le rapport des surfaces en contact et exposées [inox / acier] doit rester inférieur à environ 0,15.
- Le recouvrement doit être de 49 fois le diamètre, ce qui permet d'avoir un nombre de points de contact supérieur à 15.

La figure n° 2 illustre l'effet du rapport des surfaces (inox/acier) ; il représente la perte de masse par corrosion de l'acier traditionnel exprimée en mg/cm^2 . Il est couplé avec une armature inox et l'assemblage hétérogène est immergé pendant une durée de 30 jours dans une solution synthétique à pH de 9 (solution n° 2). Le rapport de surfaces exposées varie de 1 à 0,15 en faisant varier la longueur des armatures acier et inox mises en contact. Un assemblage homogène acier/acier a été aussi testé à titre de référence et notre objectif consiste à savoir si la présence de l'inox vient accélérer par couplage galvanique la corrosion de l'acier traditionnel.

Le rapport des surfaces a beaucoup d'influence sur la perte de masse de l'acier traditionnel dans le couplage, et en comparant avec les valeurs mesurées pour un assemblage homogène acier / acier (courbe en losange bleu) , il faut un rapport

inférieur à 0,15 pour éviter toute accélération de la corrosion de l'acier par la présence de l'inox. Ce résultat est tout à fait cohérent avec le fait, que la vitesse de corrosion de l'anode (acier) dans le couplage galvanique est diminuée, si la surface anodique est importante (ou si la surface cathodique (inox) est faible).

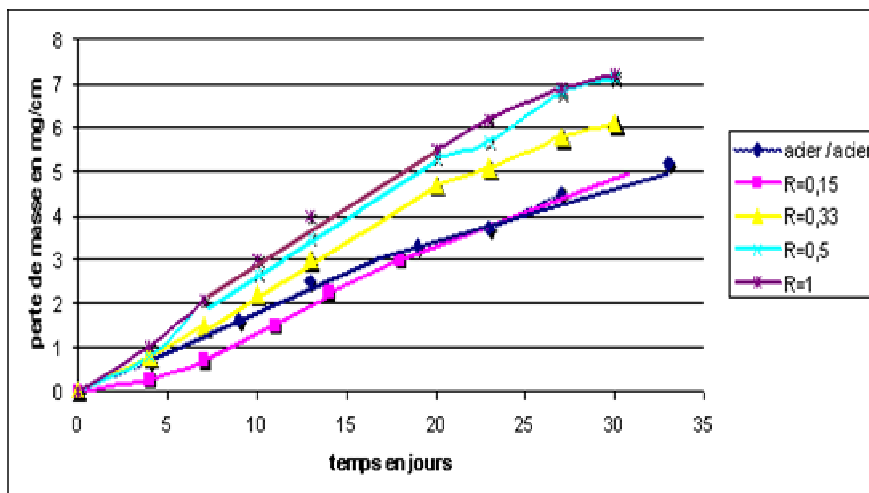


Figure 2. Perte de masse de l'acier traditionnel dans un couplage galvanique avec une armature inox dans une solution carbonatée et chlorurée à pH de 9, avec un rapport des surfaces inox/acier variable entre 1 et 0,15.

La figure n°3 représente la perte de masse de l'acier traditionnel dans une solution à pH de 8 avec un rapport des surfaces exposées égal à 0,15. C'est le nombre de points de contacts qui est le paramètre variable étudié (entre 4 et 20 points). L'assemblage inox/acier est comparé à l'assemblage acier/acier. On voit que le nombre de points de contact est un paramètre important sur la vitesse de corrosion de l'acier traditionnel dans le couplage. Pour qu'il n'y ait pas d'accélération due à la présence de l'inox, il faut que le nombre de points de contact soit de l'ordre de 20. On peut comprendre ce résultat en estimant que plus le nombre de points de contact est important, plus les lignes de courant du couplage ont des cheminements possibles, et que donc la densité de courant locale est plus faible.

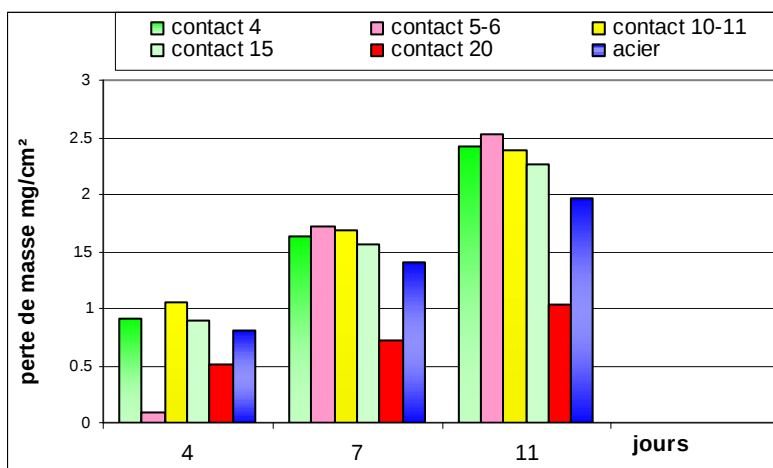


Figure 3. Perte de masse de l'acier traditionnel dans un couplage galvanique avec une armature inox dans une solution carbonatée et chlorurée à pH de 8, avec le nombre de points de contacts variable de 4 à 20.

5. Le coût de possession

De nombreuses études ont été réalisées sur des ouvrages suivis pendant plusieurs années ; elles ont démontré que l'utilisation d'armatures en inox constitue une solution économique intéressante, dès que l'on cherche à optimiser le coût global, notamment en réduisant les frais de maintenance.

L'utilisation d'armatures en inox en substitution totale ou partielle renchérit le coût d'investissement de quelques % du fait de l'écart de prix entre les 2 matières; mais ce surcoût est compensé à terme par une diminution significative des frais d'inspection et de suivi ainsi que par une diminution des coûts de maintenance et de réparation.

L'analyse comparative en coût global doit tenir compte de l'ensemble des coûts directs (de maintenance notamment) et aussi des coûts indirects (liés à l'incidence sur l'exploitation de l'ouvrage; dans le cas des ouvrages routiers: perturbation du trafic, pollutions atmosphériques et sonores, surconsommation de carburants dans les embouteillages, risques accrus d'accident,...) pendant la durée de service de l'ouvrage. Elle doit ainsi intégrer l'allongement de la durée de vie de l'ouvrage résultant de l'utilisation de l'inox.

6. Conclusion

Nous avons montré que choisir d'armer les ouvrages par de l'inox présente de multiples avantages par rapport au béton armé avec des aciers traditionnels :

- La pérennité de l'esthétisme de l'ouvrage à long terme, ce qui s'inscrit parfaitement dans les critères actuels du développement durable ;
- Des coûts de maintenance et d'exploitation réduits, ce qui est primordial dans le cas d'ouvrages routiers « très stratégiques » ;
- Une optimisation du volume de béton, des quantités de ferrailage et des poids des structures donc par conséquent des gains sur les coûts liés au poids ;
- Des garanties de tenue au feu, de tenue aux chocs, et de résistance au séisme bien supérieures à celles des armatures traditionnelles.

7. Bibliographie

Arlt N., Burkert A., Isecke B., "Edelstahl Rostfrei in Kontakt mit anderen Werkstoffen", publication de Edelstahl Rostfrei, 2005.

Quian S., Qu D., Coates G., "Galvanic coupling between carbon steel and stainless steel reinforcement", *Actes de COM 2005, Matériaux, Dégradation : Innovation, inspection, control and rehabilitation*, Calgary, Alberta, Aug. 21-24, 2005, p. 99-117.

Knudsen A., Jensen FM., Klinghoffer O., Skovsgaard T., "Cost-effective Enhancement of Durability of Concrete Structures by Intelligent Use of Stainless Steel Reinforcement", *Conference on Corrosion and Rehabilitation Concrete Structure, Florida*, Dec. 8-11 1998.

Bertolini L., Gastaldi M., Pastore T., Pedferri M.P., Pedferri P., "Behaviour of stainless steel in simulated concrete pore solution", *British Corrosion Journal*, 1996, Vol.31, n°3, p. 218-222.