

L'UTILISATION D'ARMATURES PASSIVES EN ACIER INOXYDABLE DANS LES OUVRAGES D'ART

USE OF PASSIVE REINFORCEMENT STAINLESS STEEL IN CIVIL ENGINEERING

Philippe JANDIN^{*1}, Yannick TARDIVEL^{*2}, Thierry CHAUSSADENT^{3}, Laurent GAILLET^{**4},
Pierre CORFDIR^{***}**

¹ Philippe.jandin@cerema.fr

² yannick.tardivel@cerema.fr

^{*} CEREMA, DTechITM – 110, rue de Paris – 77171 Sourdun – France

³ Thierry.chaussadent@ifsttar.fr

⁴ laurent.gaillet@ifsttar.fr

^{**} IFSTTAR – 14-20, boulevard Newton – Cité Descartes – 77447 Marne la Vallée – France

^{***} Pierre.corfdir@developpement-durable.gouv.fr

DIR Est – Technopole 2000 – 1 boulevard Solidarité – 57076 Metz - France

1. PROBLÉMATIQUE

Les ouvrages d'art en béton représentent un patrimoine important. Le béton est en effet le matériau de construction de référence du 20^e siècle. Les ouvrages en béton représentent en nombre environ 75% des ponts du réseau routier national et des collectivités locales (départements notamment). Si certains ponts en béton précontraint se sont révélés sensibles du fait de leur conception (poutres de type VIPP, non prise en compte de gradient thermique, fluage mal maîtrisé, défauts d'injection...), la majorité des désordres résulte de la corrosion des aciers passifs, mal enrobés ou enrobés de béton trop poreux.

L'expérience montre que les référentiels successifs de prescription du béton ne suffisent pas toujours à assurer la bonne durabilité des structures, notamment du fait de la difficulté à maîtriser sur chantier leur bonne mise en œuvre (qualité des bétons, enrobage des aciers passifs). Si des techniques de protection du béton armé existent, celles-ci ne sont que rarement mises en œuvre lors de la construction, mais plus généralement utilisées en traitement curatif des pathologies du béton armé. Par ailleurs, elles ne bénéficient pas de retours d'expérience suffisants (dépollution des bétons) ou nécessitent des opérations de maintenance peu usuelles (protection cathodique). Dans des ambiances particulièrement agressives (bord de mer, routes fortement

salées) ou dans des conditions où les interventions ultérieures sont particulièrement difficiles et coûteuses (passages supérieurs de voies ferrées, d'autoroutes ou routes à forts enjeux, de voies fluviales à grand gabarit), le maître d'ouvrage pourra juger opportun d'assurer la pérennité de son ouvrage dès la construction en évitant tout risque de corrosion des aciers par l'emploi d'aciers passifs en acier inoxydable.

Outre les problèmes pouvant être causés par une mauvaise conception et/ou construction, la plupart des problèmes de durabilité des structures en béton armé résulte de la dépassement des aciers qui est principalement due à la carbonatation du béton ou à la contamination par les chlorures. Ainsi, la corrosion des armatures est la principale cause de détérioration prématurée des structures en béton. Elle peut provoquer la fissuration et l'écaillage du béton d'enrobage et à terme, conduire à des problèmes structurels voire à la ruine des structures gravement détériorées.

Lorsque la zone de béton carbonaté ou pollué par les chlorures atteint les armatures, la corrosion amorcée sur l'acier, outre la réduction de section qui peut être préjudiciable à la structure, conduit à la formation d'oxydes et d'hydroxydes de fer dont le volume massique jusqu'à huit fois supérieur à celui de l'acier conduit à la fissuration du béton, voire à son éclatement. Dans ces conditions, la corrosion du béton armé est accélérée par un accès plus rapide des espèces agressives vers les armatures. Pour les zones particulières avec épaufures, il y a également une corrosion atmosphérique directe sur les armatures qui conduit à des dégradations sur les ouvrages, ceci étant d'autant plus vrai en milieu marin.

Un des procédés envisageables pour s'affranchir de la corrosion des armatures réside dans le choix initial de l'armature. On peut citer les armatures revêtues de polymères type époxy (pas ou rarement utilisées en France), les aciers galvanisés et les aciers inoxydables. En ce qui concerne les aciers revêtus ou métallisés, les limites d'utilisation résident dans la bonne adhérence entre les armatures et le béton, l'éventuelle création de défauts préjudiciables lors de la mise en œuvre dans des conditions de chantier et les interactions physico-chimiques avec le béton et/ou l'environnement (par exemple réaction zinc-ciment). Il est important de noter que la prise en compte de l'utilisation d'aciers auto-protégés dans la conception de l'enrobage fait notamment l'objet de la clause 4.4.1.2 de l'Eurocode 2 [1], complétée par la note correspondante de l'annexe nationale.

Les aciers inoxydables apparaissent intéressants car eux seuls offrent une garantie de résultat. En effet, il s'est développé une industrie capable de fournir des aciers passifs inoxydables offrant une bonne gamme de nuances moyennant des surcoûts de production raisonnables.

Cet article présente un aperçu des différents aspects de l'utilisation d'armatures d'acier inoxydable dans les ouvrages d'art, tels que traités dans un guide méthodologique en cours de rédaction associant la Direction Interdépartementale des Routes Est, le LNEC (Laboratório nacional de engenharia civil – Lisbonne, Portugal), le CEREMA (Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement et l'aménagement) et l'IFSTTAR (Institut

français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux).

2. LES ARMATURES D'ACIER INOXYDABLE

En permettant la formation d'un film de passivation de surface, l'addition de chrome, de nickel ainsi que d'autres éléments à la composition chimique de l'acier permet d'augmenter la résistance à la corrosion. Plusieurs microstructures métallurgiques et compositions chimiques déterminent les propriétés physiques et mécaniques des aciers inoxydables, et donc différents champs d'utilisation. En s'appuyant sur la normalisation, l'utilisateur peut réaliser un choix adapté à ses besoins parmi les gammes d'armatures en acier inoxydable mises à disposition par les producteurs.

2.1. Compositions et structures métallurgiques

Les aciers inoxydables se distinguent des aciers carbone par leur teneur en chrome supérieure à 10.5% et une teneur en carbone inférieure à 1.2% [2].

Quatre grandes familles d'aciers inoxydables peuvent être distinguées : austénitique, ferritique, austéno-ferritique (ou duplex) et martensitique. Parmi celles-ci, seules deux nuances peuvent faire l'objet d'une utilisation dans le domaine des armatures de béton armé :

- les aciers austénitiques, de structure cristallographique cubique faces centrées (CFC) et dont les éléments d'addition principaux sont le chrome et le nickel ;
- les aciers austéno-ferritiques, de microstructure biphasée composée de ferrite et d'austénite, dont les éléments d'addition sont également le chrome et le nickel.

2.2. Propriétés physiques et mécaniques

Les propriétés physiques des aciers inoxydables peuvent présenter des différences significatives par rapport à celles des aciers au carbone, notamment en ce qui concerne le coefficient de dilatation linéaire (tableau 1).

Le béton armé fonctionne par l'adhérence entre l'acier et le béton et allie ainsi la résistance en compression du béton à la résistance en traction de l'acier. L'association de béton et d'acier carbone présente l'avantage d'avoir des coefficients de dilatation proches et donc de maintenir une adhérence lors de variations de la température. Toutefois, la différence significative de coefficients de dilatation qu'implique l'utilisation de certains aciers inoxydables, pose la question des effets potentiels sur la structure dans le cadre de cycles de température.

Plusieurs essais ont été réalisés dans le but d'évaluer d'une part l'adhérence d'une barre d'acier en inox dans du béton et d'autre part les contraintes qui se développent dans le béton, sous effets thermiques. L'objectif visé était de pouvoir réaliser une étude comparative acier carbone / acier

Famille	Module d'Young (MPa)	Masse volumique (kN/m³)	Coefficient de dilatation linéaire entre 20°C et 200°C (10 ⁻⁶ .K ⁻¹)
Ferritique	220 000	77	10,5
Austénitique	200 000	79	16,5
Austénito-ferritique	200 000	78	13,0
Acier carbone	200 000	79	10,0

Tableau 1 : Comparaison des propriétés physiques des aciers inoxydables et aciers carbone.

inox dans le béton armé avec et sans les effets de la température. Pour cela, les comportements d'un acier au carbone, d'un acier inoxydable austénitique et d'un acier inoxydable duplex ont été examinés [3].

Le type d'essai retenu a été l'essai d'adhérence par traction ou pull-out test [4], défini dans l'annexe D de la norme NF EN 10080. Un lot d'éprouvettes a été soumis à un cycle de température d'une amplitude de 60°C, afin de comparer les résultats obtenus avec les éprouvettes de référence maintenues à température ambiante.

Une première série d'essais avec des aciers austénitiques n'a pas permis de mettre en évidence une influence significative du coefficient de dilatation sur les résultats du pull-out test : avec ou sans cycle de chauffage, l'ensemble des éprouvettes s'est comporté de manière similaire [5]. Certaines éprouvettes ayant subi un traitement en étuve ont même présenté de meilleurs résultats que l'éprouvette de référence. Dans tous les cas déjà réalisés, la ruine de l'éprouvette s'est produite par glissement de l'armature dans le béton. Les éprouvettes avec armature en acier inoxydable ont présenté une résistance inférieure d'environ 2% mais une moindre dispersion que les résultats obtenus avec les aciers carbone. Des tests complémentaires sur des aciers inoxydables duplex devront permettre de confirmer ces premiers résultats.

Concernant les propriétés mécaniques, les aciers inoxydables austénitiques et austéno-ferritiques présentent des propriétés mécaniques élevées alors que les ferritiques ont une limite à rupture plus faible et un domaine de plasticité moins étendu.

2.3. Normalisation

Le contexte normatif des armatures d'aciers inoxydables comprend les normes :

- XP A35-014-2003 « Aciers pour béton armé – Barres et couronnes lisses, à verrous ou à empreintes en acier inoxydable » ;
- EN 10088-1-2014 « Aciers inoxydables – Partie 1 : liste des aciers inoxydables » ;
- EN 10088-3-2014 « Aciers inoxydables – Partie 3 : conditions techniques de livraison pour les demi-produits, barres, fils machines, fils tréfilés, profils et produits transformés à froid en acier résistant à la corrosion pour usage général » ;
- EN 10088-5-2009 « Aciers inoxydables – Partie 5 : conditions techniques de livraison pour les barres, fils

tréfilés, profils et produits transformés à froid en acier résistant à la corrosion pour usage de construction ».

En France, les aciers inoxydables se conforment à la norme XP A 35-014 dans laquelle les armatures en acier inoxydable sont classées suivant la limite d'élasticité du produit à 0,2 % (Rp0.2 en MPa). Quatre classes sont rencontrées : InE235, InE500, InE650 et InE800. Ceci permet aux concepteurs et prescripteurs de choisir la nuance correspondant à la limite d'élasticité désirée tout en se garantissant des autres valeurs mécaniques, dont la ductilité, prescrites dans la norme XP A 35-014.

En termes de disponibilité, les armatures de structure duplex ou austénitique sont disponibles pour tous les diamètres usuels entre 5 et 40 mm, pour des limites élastiques de 500 et 650 MPa [6].

3. LES ARMATURES D'ACIER INOXYDABLE DANS LE BÉTON

Les avantages de l'utilisation de l'armature d'acier inoxydable dans le béton sont une maintenance réduite, une durabilité élevée et des coûts de cycle de vie compétitifs. Les armatures en acier inoxydable permettent une durée de vie probable de plus de 100 ans, sans entretien important, même lorsqu'elles sont utilisées dans des environnements très agressifs [7][8][9]. Un exemple de la durabilité des aciers inoxydables est fourni par un ouvrage portuaire en béton armé à Progreso (Mexique, 1941) qui montre de bonnes performances, sans réparation et entretien importants, après plus de 70 ans dans un environnement marin subtropical [10].

L'inconvénient le plus évident de l'acier inoxydable est son coût initial. Toutefois, au fil des ans ce surcoût est compensé par ses avantages. Son utilisation dans les structures en béton a un effet économique positif sur les coûts du cycle de vie [7][11][12], si l'on tient compte de la vie en service avec les avantages associés comme le moindre entretien et l'absence de réparation.

Le coût de cette méthode de protection contre la corrosion dépend de plusieurs facteurs tels que la quantité d'acier inoxydable nécessaire, le choix de la nuance et les propriétés voulues des armatures. L'acier inoxydable doit être utilisé de façon sélective pour le remplacement de l'acier au carbone dans les zones critiques de la structure vis-à-vis de la durabilité, compte tenu de l'agressivité du milieu exté-

rieur et des contraintes liées aux conditions d'intervention pour l'entretien ultérieur.

La haute résistance à la corrosion des aciers inoxydables peut également permettre quelques gains dans la conception des ouvrages par rapport à l'acier au carbone, concernant l'enrobage de béton ou la largeur admissible des fissures.

3.1. Le choix des nuances

Le choix d'une nuance d'acier inoxydable pour une application donnée dépend principalement de l'agressivité de l'environnement, de la résistance à la corrosion de la nuance qui est la principale préoccupation et de la durée de vie envisagée. Les autres facteurs déterminants comprennent les exigences mécaniques et physiques, ainsi que le coût.

Les nuances d'aciers inoxydables du tableau 2 sont adaptées pour l'utilisation dans le domaine du génie-civil. D'autres nuances peuvent être utilisées, mais leur prescription doit être validée par un spécialiste. On évitera en particulier les aciers à usage très spécifique dont l'emploi peut s'avérer contre-productif hors du domaine d'application préconisé.

Parmi ces nuances, les aciers austéno-ferritiques dits « Duplex » sont actuellement les plus économiques et en pratique, on propose de retenir des aciers inoxydables 1.4462 ou 1.4362. Le choix de ces aciers permet également de bénéficier d'un coefficient de dilatation thermique proche de celui du béton.

La ductilité importante des aciers austénitiques privilégie leur emploi en zone sismique, où leur coût élevé peut trouver sa justification.

Le PREN (Pitting Resistance Equivalent Number) est un indice de résistance à la corrosion par piqûres. Ce type de corrosion localisée est la défaillance la plus commune, pouvant conduire à une perforation complète du matériau (les piqûres peuvent notamment être initiées par les ions chlorure). Plus le PREN est élevée, plus la nuance est résistante (tableau 2).

3.2. Utilisation conjointe de l'acier inoxydable et de l'acier carbone

Pour limiter les surcoûts dans un ouvrage neuf, les armatures en acier inoxydable peuvent être utilisées en combi-

naison avec des armatures en acier au carbone dans des zones à risque vis-à-vis de la corrosion ou quand des dégradations prématurées peuvent apparaître avec un coût d'entretien élevé. Cette utilisation combinée des aciers inoxydables et des aciers au carbone n'est généralement pas associée à des risques de corrosion galvanique, qui selon la littérature se sont révélés être négligeables dans la plupart des situations réelles, car l'acier inoxydable est une cathode moins efficace que l'acier au carbone passif [8][9][13][14][15].

Dans le cadre de réparations, l'apport d'armatures en acier inoxydable sur une structure en acier carbone peut également être envisagée. Il convient toutefois au préalable de s'assurer que le béton de la structure est sain sous peine de voir se développer un phénomène de corrosion, notamment dans les zones de liaison des aciers inoxydables avec les aciers carbone.

3.3. Dimensionnement des structures

La haute résistance à la corrosion des aciers inoxydables permet d'assouplir les exigences de durabilité ce qui peut avoir des avantages économiques supplémentaires. L'enrobage de béton peut être limité à 30 mm quelques soient les conditions d'exposition [12][16]. Cela permet des optimisations supplémentaires concernant la durabilité du béton et le coût. Selon l'EN 1992-1-1, dans le cas où l'acier inoxydable est utilisé, la couverture minimale peut être réduite par une quantité $\Delta c_{dur,st}$ qui peut être précisée dans les annexes nationales de chaque pays.

Par ailleurs l'utilisation d'aciers inoxydables ne nécessite pas une protection supplémentaire contre la corrosion et la largeur admissible des fissures en surface du béton peut être de 0,3-0,4 mm si la conséquence sur le processus de corrosion est la seule considérée [12][16].

3.4. Façonnage, soudage et pose

Des précautions particulières sont nécessaires lors de la fabrication, du soudage et de la mise en œuvre des aciers inoxydables. La contamination de la surface des aciers inoxydables par les chlorures ou les taches de rouille au contact de l'acier au carbone doivent être évitées. En particulier, la présence d'oxydes de fer sur la surface de l'acier inoxydable crée une corrosion localisée.

La pollution par des oxydes thermiques (provenant d'un acier au carbone) résultant de pratiques comme le soudage

Structure métallurgique	Nuance EN 10088-1	PREN (> 20)
Austénitique	1.4401	23
Austénitique	1.4571	25
Austénitique	1.4429	27
Duplex	1.4362	23
Duplex	1.4462	30

Tableau 2 : Nuances d'acier inoxydable conseillées pour des structures de béton armé soumises aux chlorures.

ou la découpe doit également être évitée ou éliminée par un nettoyage approprié (brosses en acier inoxydable et des pâtes de décapage).

La contamination par des oxydes, la formation de défauts (crevasses, fissures,...) est une autre préoccupation majeure en ce qui concerne le transport, le stockage, la manutention et la mise en œuvre des aciers inoxydables. La passivation des aciers inoxydables doit être restaurée après un dommage mécanique et la présence de certains défauts supprimée par ponçage et/ou brossage.

Les différentes nuances d'acier inoxydable peuvent être coupées et pliées, en conformité avec la norme française NF A35-027 par les méthodes couramment utilisées pour l'acier au carbone. Il est conseillé d'utiliser des équipements de découpe et de pliage en acier inoxydable pour éviter toute contamination.

Les aciers inoxydables sont soudables, bien que la conception de la soudure, la pratique et les étapes doivent être soigneusement exécutées avec un contrôle adéquat pour minimiser les effets sur la composition, la microstructure, les propriétés mécaniques et la résistance à la corrosion. Le soudage des armatures en acier inoxydable est donc possible, mais généralement pas recommandé sur site à moins que les exigences pour une bonne qualité soient satisfaites. Des procédures de soudage incorrectes, comme par exemple un mauvais traitement de surface peuvent conduire à une réduction considérable de la résistance à la corrosion. Dans ces conditions, il est recommandé d'utiliser des coupleurs en acier inoxydable préférentiellement au soudage.

4. LES ARMATURES D'ACIER INOXYDABLE DANS UN OUVRAGE D'ART

L'exemple le plus ancien et parfaitement reconnu pour sa réussite dans l'utilisation d'armatures en acier inoxydable est l'estacade du port de Progreso au Yucatán, Mexique, construite en 1941. Les inspections effectuées sur cet ouvrage âgé ont démontré, plus de 70 ans après sa réalisation, la bonne performance des armatures en acier inoxydable de type 1.4301. Ce dernier n'a montré aucun signe de détérioration, même avec des teneurs en chlorure de 1,9% de Cl⁻ dans le béton et une porosité relativement élevée [10]. Par opposition, un quai voisin construit par la suite avec des armatures en acier carbone est fortement dégradé.

Dans les dernières décennies, les applications utilisant des armatures en acier inoxydable se sont développées dans le monde. Ces applications comprennent des infrastructures de transport exposées à des sels de déglacage ou situées dans des environnements marins, des structures conçues pour une durabilité à long terme et de la rénovation de bâtiments historiques.

En général, le respect des référentiels de construction, d'exécution et de surveillance permet de construire et de gérer dans de bonnes conditions des ouvrages d'art en béton armé construits avec des aciers au carbone.

Cependant, l'expérience montre que la conception de certaines parties d'ouvrage, la prise en compte de certaines situations d'environnement ou de contraintes d'exploitation ou d'entretien particulières, posent encore des difficultés.

L'emploi de l'acier inoxydable peut difficilement être généralisé à tous les ouvrages du fait de son coût. Il convient d'analyser chaque situation de projet en analysant les risques spécifiques encourus par chaque partie d'ouvrages compte tenu de l'environnement local imposé par le climat (bord de mer), créé par l'exploitation des voies portées et franchies (salage), et par la conception (zones d'about confinées), tout en anticipant les sujétions anormalement lourdes d'entretien de l'ouvrage (ouvrages au-dessus de voies ferrées ou d'autoroutes à fort trafic). L'utilisation simultanée dans un même ouvrage d'aciers carbone et inoxydables permet de réduire sensiblement le coût de l'ouvrage en utilisant les armatures inoxydables dans les zones les plus sensibles.

Différentes situations de projet peuvent être abordées. L'objectif poursuivi est d'améliorer la durabilité d'ouvrages ou parties d'ouvrages qui vieillissent aujourd'hui de manière prématurée. C'est le cas :

- des zones d'about d'ouvrages pour lesquelles les dispositions constructives actuellement adoptées ne s'avèrent pas toujours aptes à garantir la durabilité attendue ; elles ne permettent pas d'offrir une aération suffisante des zones d'about, qui se trouvent ainsi dans une situation d'humidité peu saine. Ceci concerne tous les ouvrages courants ;
- des parties d'ouvrage soumises à des environnements particulièrement agressifs. C'est le cas des expositions aux chlorures, en zone de montagne du fait du salage des routes ou en bord de mer. En complément à la mise en œuvre d'un béton et d'un enrobage adaptés, il paraît intéressant de prévoir l'emploi d'acier inoxydable pour certaines parties comme les longrines support des dispositifs de retenue ou les pieds de pile en zone de montagne ;
- des situations de projet qui rendent l'entretien et la réparation des ouvrages anormalement complexes et coûteuses. Il s'agit par exemple d'ouvrages situés au-dessus d'axes stratégiques de communication (accès aéroport, ligne LGV, autoroutes et routes à forts trafics, échangeurs autoroutiers...). Dans ce cas, la mise en œuvre d'aciers de structure en acier inoxydables semble pertinente. Cela concerne aussi les ouvrages hydrauliques conçus avec de très faibles hauteurs libres sur cours d'eau, voire les murs de soutènement.

5. IMPACTS ENVIRONNEMENTAL ET ÉCONOMIQUE

L'emploi d'un matériau dans un nouveau champs d'application nécessite une évaluation préalable, permettant de définir outre ses performances, un domaine économique viable voire optimum d'utilisation. De même pour les aspects environnementaux, pour lesquels il est désormais indispensable de s'assurer que l'innovation proposée est

compatible avec les nouvelles exigences de préservation des ressources et de sobriété énergétique.

Les aciers inoxydables, en raison de leur composition chimique les classant en aciers alliés, requièrent pour leur élaboration plusieurs éléments en quantités importantes, le chrome en premier lieu. Ce besoin de ressources spécifiques se traduit par une augmentation du coût de revient de la production d'armatures en acier inoxydable, de même qu'un accroissement des valeurs des différentes catégories d'impact environnementaux.

Il convient dès lors de s'assurer que cette inflation à l'échelle du matériau ne constitue pas une charge pour le Maître d'Ouvrage et la société, mais bien un investissement qui, à moyen et long termes, procurera des bénéfices significatifs pour l'ensemble des parties prenantes.

À cette fin, le guide méthodologique se propose d'étudier une évaluation de l'armature d'acier inoxydable à différentes échelles : matériaux, parties d'ouvrages spécifiques puis ouvrage dans la totalité de son cycle de vie.

5.1. Évaluation environnementale

Plusieurs données sont à ce jour disponibles pour dresser le bilan environnemental de la production d'armatures en acier carbone B500B. Ces données sont issues de la base de données généraliste Ecoinvent [17], de la base de données Worldsteel [18] représentant les producteurs d'acier à l'échelle mondiale, ainsi que de la base de données française DIOGEN [19]. Les valeurs reprises par la base française DIOGEN sont celles de l'acier B500B. Elles reflètent le mode de production des armatures utilisées en France, les distances moyennes d'approvisionnement ainsi que le mix énergétique des différents pays producteurs approvisionnant le marché français [20].

En raison du manque actuel de données industrielles sur l'impact de production des armatures d'aciers inoxydables, il n'est pas possible d'obtenir des valeurs spécifiques aux différentes compositions chimiques et d'établir des comparaisons avec les armatures en acier carbone.

Afin de pouvoir établir un comparatif fiable et précis entre ces différents type d'armatures, un modèle similaire à celui élaboré pour l'établissement des valeurs de référence des aciers B500B doit être réalisé pour la production des armatures d'aciers inoxydables. La modélisation à venir utilisera le logiciel Simapro [21] et la base de données Ecoinvent.

En raison des éléments d'addition inclus dans les compositions chimiques des aciers inoxydables (chrome, nickel,...), une hausse significative des valeurs d'impacts tels que l'épuisement des ressources ou le changement climatique est prévisible, liée à l'extraction, au transport et au traitement ultérieur du minerai.

Si elle est une étape obligatoire, l'évaluation à l'échelle du matériau n'est pas celle qui offre la possibilité d'une analyse pertinente. Pour un maître d'ouvrage comme pour un gestionnaire, l'échelle à considérer est celle de l'ouvrage d'art, incluant ses fonctionnalités en particulier son aptitude au service déterminée par sa durabilité. Un travail en cours doit prochainement permettre de considérer le poids réel, en termes d'impacts environnementaux, de la pré-

sence d'armatures en acier inoxydable dans des éléments de structure ou de superstructures. Cette étape permettra d'établir un bilan global, considérant également les opérations d'entretien spécialisées épargnées en absence de corrosion.

5.2. Évaluation économique

De même que pour l'évaluation environnementale, l'évaluation économique à l'échelle du matériau indique un surcoût conséquent. Le prix d'achat des armatures en acier inoxydable est supérieur à celui des armatures en acier carbone, dans un rapport de 3 à 5 environ, selon les nuances considérées.

Il convient à nouveau de réaliser un travail de modélisation à l'échelle d'un ouvrage d'art, pour déterminer précisément le surcoût initial de construction de la structure. Les paramètres principaux à considérer, outre le choix de la nuance de l'acier inoxydable, sont les zones vulnérables qui feront l'objet de la pose d'armatures pouvant résister au phénomène de corrosion. Il s'agit donc de déterminer, en fonction du site d'implantation de l'ouvrage et des enjeux associés, l'étendue des éléments ou parties d'ouvrage à protéger. Ainsi, selon que l'on souhaite protéger localement la structure d'un ouvrage (about de dalle, mur garde-grève) en raison d'une agressivité du milieu extérieur (proximité maritime, salage, ...) ou la totalité de l'intrados d'un tablier en raison d'un enjeu majeur lié à l'ouvrage (échangeur autoroutier, passage supérieur de LGV, ...), on obtiendra des surcoûts sensiblement différents. Ceux-ci seront alors à mettre en regard avec les coûts d'entretien et les externalités (perturbations de trafic par exemple) évités. Comme pour l'évaluation environnementale, les suites de l'étude engagée s'attacheront à consolider prochainement cette approche.

6. CONCLUSION

Les travaux liés à la rédaction du guide méthodologique présenté sommairement dans cet article doivent donc permettre de s'assurer que les armatures passives d'acier inoxydable sont utilisables dans les structures de génie civil et proposent une solution efficace contre les désordres liés à la corrosion, pathologie principale du béton armé à l'origine d'un vieillissement prématuré de nombreux ouvrages d'art. Ces travaux visent également à donner les éléments nécessaires au choix éclairé de la nuance d'acier ainsi qu'à sa mise en œuvre.

Dans le souci d'accompagner les concepteurs et gestionnaires de patrimoine, le guide proposera des configurations spécifiques illustrant l'utilisation des armatures en acier inoxydable conjointement avec des armatures en acier carbone, selon des cas de figure représentatifs du patrimoine d'infrastructures de transport français.

Les évaluations environnementales et économiques en cours ont été jusqu'à présent entreprises à l'échelle du matériau. Elles doivent désormais être menées à l'échelle d'un ouvrage d'art, afin de déterminer les surcoûts de construction initiaux. Ces mêmes évaluations, étendues à

l'ensemble du cycle de vie des structures, permettront d'estimer les impacts évités en termes d'entretien et des conséquences induites sur le trafic des voies associées aux ouvrages.

Dès à présent, il apparaît clairement que l'utilisation de l'acier inoxydable permet de répondre à plusieurs objectifs : en diminuant la vulnérabilité des ouvrages d'art en béton armé vis-à-vis de la corrosion, les armatures passives en acier inoxydable doivent permettre de minimiser la fréquence et l'importance des opérations d'entretien spécialisé et les perturbations de trafic associées, ainsi que prolonger la durée de structures spécifiques particulièrement sollicitées tels que les ouvrages d'art situés en façade maritime.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] NF EN 1992-2, mai 2006 - Calcul des structures en béton – Partie 2 : ponts en béton – Calcul et dispositions constructives.
- [2] EN 10088-1, décembre 2014 – Aciers inoxydables – Partie 1 : liste des aciers inoxydables.
- [3] Étude de faisabilité des essais d'adhérence d'armatures de béton armé – CETE de l'Est, LR de Strasbourg, avril 2013.
- [4] NF EN 10080, septembre 2005 – Aciers pour l'armature du béton – Annexe D : essai d'adhérence pour les aciers pour béton armé à verrous et à empreintes – Essai par traction (« pull out test »).
- [5] Étude comparative sur l'adhérence des aciers inox et aciers carbone – CETE de l'Est, LR Strasbourg, 2013.
- [6] Arminox France, www.arminox.fr et Ugitech, www.ugi-grip.eu
- [7] Guidance on the use of stainless steel reinforcement, Report of a Concrete Society Steering Committee, Concrete Society Technical Report 51 (1998).
- [8] L. Bertolini, B. Elsener, P. Pedferri and R. Polder, Corrosion of steel in concrete – Prevention, Diagnosis, Repair, WILEY-VCH, Weinheim (2004).
- [9] COST 521 - Corrosion of steel in reinforced concrete structures, Final Report, edited by R. Cigna, C. Andrade, U. Nürnberger, R. Polder, R. Weydert and E. Seitz (2003).
- [10] Pier in Progreso, Mexico: Evaluation of the Stainless Steel Reinforcement, March 1999.
- [11] C. J. Abbot, Corrosion-free concrete structures with stainless steel, Concrete, May (1997) 28-32.
- [12] G. Markeset, S. Rostam, and O. Klinghoffer, Guide for the use of stainless steel reinforcement in concrete structures, Nordic Innovation Centre project – 04118: Corrosion resistant steel reinforcement in concrete structures (NonCor), Project report 405, Norwegian Building Research Institute, Oslo (2006).
- [13] L. Bertolini and P. Pedferri, Stainless steel in reinforced concrete structures, Concrete under severe conditions 2 – Environment and loading, edited by O. E. Gjörv, K. Sakai, N. Bathia, E. & F. N. Spon, vol. 1 (1998) 94-103.
- [14] L. Bertolini, M. Gastaldi, and P. Pedferri, Stainless steel in concrete, COST 521 workshop, Luxembourg, 18-19 February (2002). M. J. Correia, M. M. Salta, Stress corrosion cracking of austenitic stainless steel alloys for reinforced concrete, Advanced Materials Forum III - Materials Science Forum 514-516 (2006) 1511-1515.
- [15] Qian, S.; Qu, D.; Coates, G., Galvanic coupling between carbon steel and stainless steel reinforcements, NRCC-48715, <http://irc.nrc-cnrc.gc.ca>
- [16] Design Manual for roads and bridges, vol. 1, section 3, part 15 - BA84/02 - Use of stainless steel reinforcement in highway structures, Highways Agency, UK (2001).
- [17] Ecoinvent version 2.2 – www.ecoinvent.org
- [18] Worldsteel association, www.worldsteel.org
- [19] Données d'Impacts environnementaux des Ouvrages de GENie civil, www.diogen.fr
- [20] Environmental evaluation of reinforcing bars sold on the French market, 2012 (F.Gomes & al.).
- [21] Simapro LCA Software, version 7.