

LES ARMATURES INOX POUR BÉTON ARMÉ, UNE CONTRIBUTION ESSENTIELLE AU DÉVELOPPEMENT DURABLE

STAINLESS STEEL CONCRETE REINFORCEMENT BARS, AN ESSENTIAL CONTRIBUTION TO SUSTAINABLE DEVELOPMENT

Patrick GUIRAUD

CIMbéton

François MOULINIER

Institut de Développement de l'Inox (IDInox)

1. INTRODUCTION

Les constructions, d'une manière générale doivent remplir 4 critères de base : aptitude au service, performances techniques, esthétique et coût. Les choix du constructeur résultent d'un équilibre entre ces critères, mais le contexte évolue constamment : la technique progresse, les matériaux évoluent, les composantes du prix se modifient en permanence, les utilisateurs expriment de nouvelles exigences, et les contraintes environnementales deviennent de plus en plus sévères. C'est pourquoi un choix qui semblait judicieux à un moment donné peut sembler complètement dépassé quelques années plus tard. Il est donc important, avant de prendre des décisions, de percevoir les tendances lourdes du futur. Le développement durable est l'une de ces tendances fortes.

Le « Développement Durable » est un concept que 164 nations se sont engagées à mettre en œuvre au sommet de la terre à Rio de Janeiro en 1992. Il impose de prendre en compte 3 axes prioritaires pour le futur : social, environnemental et économique. Ceci a donné lieu à de nouvelles réglementations (par exemple le protocole de Kyoto) et a engendré de nouvelles approches pour les constructeurs.

1. INTRODUCTION

In any construction, there are in general four basic criteria to fulfil: serviceability, technique, aesthetic and cost are always to be taken in account. The relative weight of each criterion depends on several factors, for instance: the building owner's priorities, the architect's influence, the evolution of the technique and of the materials and the changes of the global environment and of the regulations. The arrival of the concept of sustainable development has deeply modified the relative importance of those criteria: more and more the three priorities – social, environmental, economic- must be clearly taken in account; thus, inducing a different conception of construction. This evolution effectively takes place due on one hand to the constraints of the new regulations and on the other hand to the new solutions which appear on the market. If, formerly, a designer could say a posteriori that his project was in accordance with the recommendations of sustainable development, in the future, before starting he will have to be in accordance with strict regulations, meaning he will from now on have to continually look for new solutions.

The use of stainless steel for concrete reinforcement is a new solution which offers the opportunity of erecting constructions which are more in accordance with the recommendations and regulations of sustainable development

2. L'APPLICATION DU CONCEPT DE DÉVELOPPEMENT DURABLE AUX CONSTRUCTIONS EN BÉTON

Afin de tendre vers le concept de développement durable, une construction devrait satisfaire un certain nombre d'exigences :

- Sociales
 - garantir une meilleure sécurité pour les usagers ;
 - être plus esthétique.
- Environnementales
 - consommer moins d'énergie à la construction ;
 - utiliser une moindre quantité de matériaux de construction ;
 - durer plus longtemps, sachant que toute construction ou re-construction est in fine préjudiciable à l'environnement.
- Économiques
 - nécessiter moins de maintenance, donc avoir des coûts d'entretien plus bas ;
 - et bien sûr avoir un coût moindre.

Ces critères peuvent paraître a priori incompatibles entre eux ; cependant les progrès constants de la technique permettent l'apparition sur le marché de solutions constructives innovantes, et de concilier toutes ces contraintes entre elles.

Parmi ces solutions il y a la possibilité d'utiliser - partiellement ou en totalité - des armatures en acier inoxydable dans les environnements agressifs où la corrosion risque de provoquer d'importantes dégradations aux ouvrages et également lorsque l'on cherche à allonger la durée de service des ouvrages : car les armatures en inox résistent à la corrosion.

3. LES ACIERS INOXYDABLES

Aciers inoxydables est une expression générique qui désigne une large famille d'alliages résistant à la corrosion ; les « aciers inoxydables » ou « inox » contiennent un minimum de 10,5% de chrome (selon la norme européenne EN-10080 et peuvent contenir d'autres éléments d'alliages tels que du nickel, du molybdène, du titane...

3.1. Les inox résistent à la corrosion

L'une des propriétés les plus importantes des inox est leur résistance à la corrosion due à la formation spontanée d'une couche superficielle, appelée couche passive, insoluble et d'épaisseur très mince (1,0 à 2,0 nm) qui protège le substrat métallique contre les attaques uniformes ou localisées.

2. WHAT DOES "SUSTAINABLE DEVELOPMENT" MEAN FOR CONCRETE CONSTRUCTIONS?

In order to be in more accordance with the concept of sustainable development, any construction should satisfy several requirements:

- social
 - *To be more aesthetic*
 - *To guarantee a better security*
- environmental
 - *To consume less energy during the erection*
 - *To use lower amounts of materials*
- economical
 - *To have less maintenance, hence lower costs of maintenance*
 - *And of course to be less expensive*

These criteria seem at first rather incompatible together; however technique is in permanent progress, innovative solutions appear on the market, hence it is becoming more and more possible to reconcile these constraints .

One of the solutions consists in using stainless steel reinforcement bars - partially or totally- in the aggressive environments, when corrosion may generate defacements on the works, and also when a longer durability is requested, because stainless steel rebars are corrosion resistant.

3. STAINLESS STEEL

Stainless steel is a generic term of a large family of corrosion resistant alloys (C.R.A.) containing at least 10.5% chromium, (European standard EN 10088) and which may contain other alloying elements.

3.1. Stainless steels are corrosion resistant

One of the most important properties of stainless steels is their resistance to corrosion due to their ability to protect themselves through the formation of an adherent insoluble and very thin (1.0 to 2.0 nm) film of reaction products that shield the metal substrate from uniform and localised attack, called passive layer. This layer reduces the corrosion rate to negligible levels.

L'élément d'alliage le plus important dans les inox est le chrome, mais les autres alliages contribuent aussi selon les cas à améliorer la résistance à la corrosion.

The most crucial element in stainless steel is chromium, but other elements such as molybdenum, nickel, etc... contribute to their corrosion resistance.

3.2. Les différentes familles d'inox

Selon leur analyse chimique (tab.1), les inox peuvent être classés en 4 familles : martensitiques, ferritiques, austénitiques et austéno-ferritiques ou duplex.

3.2. Different families and grades of stainless steel

According to their composition (tab.1), stainless steels can be classified into 4 different families: martensitic, ferritic, austenitic and austenitic-ferritic, so called duplex.

	Martensitique	Ferritique	Austénitique	Duplex
Carbone (%)	0.15 – 1.2	< 0.08	< 0.08	< 0.03
Chrome (%)	11.5 – 18	10.5 – 30	16 – 28	21 – 26
Nickel (%)	< 6	-	3.5 – 3.2	3.5 – 8
Molybdène (%)	< 1.8	< 4.5	< 7	< 4.5

Tableau 1 : composition chimique des différentes familles d'inox

Chaque famille a ses caractéristiques propres ; pour les armatures de béton les familles les plus couramment utilisées sont les austénitiques et les austéno-ferritiques (duplex).

Each family has its own specific properties; for stainless steel concrete reinforcement, the most utilised families are austenitic and austenitic-ferritic (duplex).

3.3. Les propriétés des inox en comparaison avec celles des aciers au carbone

En comparaison des aciers au carbone les inox se caractérisent par :

- une limite élastique très élevée pouvant aller jusqu'à 800 MPa,
- une très faible conductivité thermique,
- un allongement à la rupture très élevé de l'ordre de 50% pour les austénitiques.

3.3. Properties of stainless steels

In comparison with carbon steels, stainless steels have specific properties:

- a very high yield strength up to 800 MPa
- a very poor thermal conductivity
- an elongation at rupture often over 50%

4. LA CORROSION DANS LE BÉTON ARMÉ

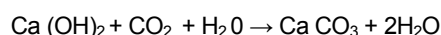
Dans le béton, les armatures peuvent se corroder sous certaines conditions. La corrosion est principalement due à la carbonatation et/ou à la pénétration des chlorures dans la zone d'enrobage.

4. CORROSION IN REINFORCED CONCRETE

Inside the concrete, corrosion of the reinforcement bars may occur in certain conditions: corrosion is mainly due to carbonation and/or chlorides penetration through the concrete cover.

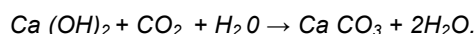
4.1. La carbonatation du béton

Sommairement, la carbonatation du béton (résultant de l'adsorption de CO₂ par les éléments alcalins, en particulier le Ca(OH)₂) conduit à la formation de CaCO₃ selon la réaction :



4.1. Carbonation of the concrete

In brief, the combination of carbonation of the concrete (by adsorption of CO₂ with the alkaline species, in particular Ca(OH)₂ dissolved in the aqueous interstitial solution) leads to the formation of CaCO₃ following the reaction:



En conséquence, la concentration en ions $(OH)^-$ diminue, et le pH qui était à l'origine autour de 12 à 13 diminue également pour atteindre une valeur en dessous de 9 à 10, à partir de laquelle les armatures en acier au carbone perdent leur passivité et ne sont plus protégées contre la corrosion. La vitesse de carbonatation dépend de plusieurs paramètres, tels que l'humidité du milieu, la porosité du béton et son niveau de fissuration.

4.2. L'action des chlorures

Dans certains environnements spécifiques (par exemple à proximité d'un littoral maritime ou au voisinage d'une route régulièrement déverglacée), les constructions peuvent être exposées à l'action des chlorures, due aux projections d'eau salée. Les chlorures pénètrent dans la zone d'enrobage du béton et atteignent l'armature en acier carbone, ce qui conduit à une corrosion localisée

4.3. Les effets de la corrosion sur le béton armé

Lorsqu'elles perdent leur passivité, les armatures en acier au carbone se corrodent. Le volume de la rouille étant 6 fois supérieur à celui de l'acier, elles exercent une poussée sur le béton qui peut éclater et en certains endroits engendrer des dégâts.

La corrosion du béton a également d'autres conséquences :

- elle raccourcit la durée de service des ouvrages
- elle accroît les coûts de maintenance.

Pour ces raisons, il convient d'éviter la corrosion.

5. LES ARMATURES INOX, UNE SOLUTION POUR ÉVITER LA CORROSION

Il existe de nombreuses solutions pour éviter la corrosion :

- augmentation de l'épaisseur d'enrobage,
- utilisation de bétons plus compacts pour retarder la pénétration de la corrosion,
- protection galvanique ; cette opération doit être renouvelée tous les 12 à 15 ans environ,
- protection cathodique ; cette opération relativement coûteuse est très efficace mais nécessite une surveillance permanente des installations ; la durée de vie de la protection cathodique est de 30 à 50 ans,
- extraction des chlorures contenus dans les bétons ; cette opération coûteuse doit être renouvelée tous les 30 à 40 ans environ.

Consequently, as the concentration of $(OH)^-$ decreases, the pH which is originally around 12 to 13, also decreases and reaches the value of about 10 or 9, which leaves the carbon steel unprotected against corrosion. The rate of carbonation depends on several parameters, e.g. humidity of the medium, porosity of the concrete, number of cracks.

4.2. Action of the chlorides

In some specific environments (e.g. close to the seashore or in the vicinity of a road which is regularly de-iced) buildings can be exposed to the action of the chlorides, due to the presence of salted water sprays. The chloride ions penetrate through the concrete cover and reach the carbon steel reinforcement bars which leads to local corrosion.

4.3. Effects of corrosion of reinforced concrete

When they lose their passivity, carbon steel reinforcement bars corrode and, as the volume of the rust is about 6 times bigger than that of the steel, they exert pressure against the concrete which can burst and break in some places and generate defacement.

Corrosion of concrete also has many other consequences such as:

- *shorter service life*
- *higher costs of maintenance*

For these reasons, corrosion should be avoided.

5. STAINLESS STEEL REBAR AS A SOLUTION AGAINST CORROSION

There are many solutions to either avoid the effects of the corrosion, or prevent the occurrence of corrosion:

- *to increase the cover thickness*
- *to use compacter concretes in order to delay the corrosion*
- *galvanic protection; it must be renewed every 12 to 15 years*
- *cathodic protection; this relatively expensive operation is very efficient but requires a permanent monitoring; the service life of a cathodic protection is of about 30 to 50 years*
- *extraction of chlorides contained in the concrete; this expensive operation has to be renewed about every 30 to 40 years.*

Et pourquoi ne pas utiliser tout simplement des armatures qui ne se corrodent pas, par exemple des armatures inox ?

Avant d'étudier cette possibilité et de la comparer aux autres solutions existantes de prévention contre la corrosion plusieurs questions se posent :

- les armatures inox résistent-elles à tous les types de corrosion possibles dans le béton armé ?
- les conditions d'adhérence sont-elles identiques à celles des aciers carbone ?
- comment les mettre en œuvre ?
- sont-elles conformes aux normes et réglementations existantes ?
- sont-elles économiquement compétitives ?

5.1. La résistance à la corrosion des inox

5.1.1. La corrosion par piqûre

Compte tenu du milieu considéré, le type de corrosion qui peut survenir sur les armatures au sein du béton est la « corrosion par piqûres ». Comme les inox ont une excellente résistance à ce type de corrosion, ils conviennent parfaitement dans ce cas. L'évaluation de la performance d'une armature d'inox dans des conditions réelles peut prendre plusieurs années ; c'est la raison pour laquelle il a été procédé à des tests de corrosion accélérée en laboratoire.

Le milieu d'essai peut être considéré comme particulièrement sévère : béton carbonaté, pH 10, forte concentration en chlorures (35g/l).

Les matériaux testés sont : l'acier au carbone, et les nuances d'inox 1.4597- 1.4301 (AISI 304)- 1.4404 (AISI 316L – 1.4462 (duplex).

Les tests ont été élaborés en solution aqueuse (NaHCO_3 0,025 M + Na_2CO_3 0,025 M + NaCl 35g/l ; pH 10).

And why not simply use reinforcement bars which do not corrode, for instance made of stainless steel?

Before taking into account this possibility, and comparing it with the other existing solutions, it is important to examine its technical validity:

- *Is it really corrosion resistant in all types of exposures?*
- *Are the bonding conditions the same as for carbon steel?*
- *How to use it?*
- *Is it in accordance with the existing standards and regulations?*
- *Is it cost effective?*

5.1. Corrosion resistance of stainless steels

5.1.1. Pitting corrosion

Considering the medium, the type of corrosion which might mainly occur on the reinforcement bars inside concrete is "pitting corrosion". As stainless steels have an excellent resistance to this type of corrosion, they are very suitable for this type of application. The evaluation of the performance of a stainless steel rebar in real conditions may take many years; this is why accelerated tests have been developed in laboratories.

The medium used for testing can be considered as particularly severe: carbonated concrete, pH 10, high chlorides level (35 g/l).

The materials which have been tested are: carbon steel – 1.4597- 1.4301 (304)- 1.4404 (316)- 1.4462

Tests carried out in an aqueous solution (NaHCO_3 0,025 M + Na_2CO_3 0,025 M + NaCl 35g/l ; pH 10)

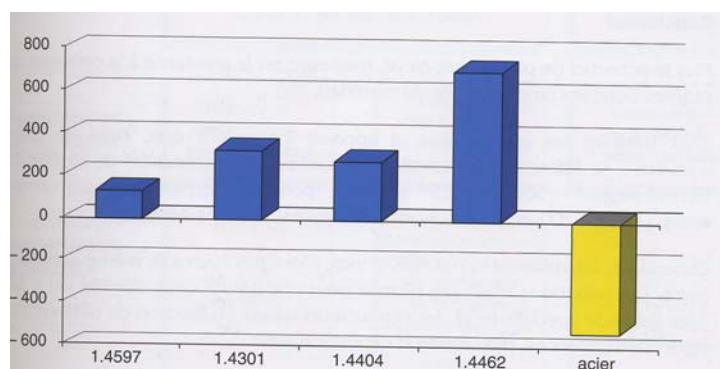


Figure 1 : Comparaison du potentiel de piqûre (mV/ECS) de différents types d'armatures inox et d'acier au carbone

La fig.1 représente le potentiel de piqûre de différentes nuances, c'est-à-dire l'énergie nécessaire au déclenchement de la corrosion par piqûre ; plus le potentiel de piqûre est élevé meilleure est la résistance à la corrosion. Il apparaît que le potentiel de piqûre des différentes nuances d'inox testées est positif et particulièrement élevé pour la nuance duplex 1.4462 ; à l'inverse, dans les mêmes conditions, le potentiel de piqûres de l'acier carbone est négatif et très bas.

Néanmoins, dans un milieu donné les performances des différentes nuances d'inox ne sont pas identiques : certaines nuances peuvent se corroder et d'autres non ; par conséquent le choix de la nuance appropriée est fonction de l'environnement. Théoriquement, il existe de nombreuses nuances possibles, mais en pratique, pour les armatures seulement deux types de nuances peuvent être utilisées pour prévenir la corrosion. Il faut donc bien déterminer le type d'ouvrage et de construction pour lesquels les armatures inox présentent un intérêt.

5.1.2. La corrosion galvanique

Bien que les inox soient des aciers, du fait qu'ils contiennent des éléments d'alliages, il est opportun de se demander s'il peut se produire de la corrosion galvanique avec l'acier carbone en cas d'utilisation partielle d'armatures inox.

Une condition pour que survienne de la corrosion galvanique entre deux métaux dans un électrolyte est qu'il existe une différence de potentiel entre ces deux éléments métalliques. Le tableau 2 indique les potentiels galvaniques respectifs de l'acier au carbone et de l'acier inox par rapport à une électrode de référence.

	Potentiel du matériau / électrode de référence
Acier carbone dans béton humide avec chlorures Acier carbone dans béton humide carbonaté	-0.3 à +0.1 0 à +0.2
Inox dans béton humide	-0.2 à +0.1

Tableau 2 : Potentiels de l'acier carbone et de l'inox dans du béton humide

Dans du béton humide, les potentiels galvaniques de l'acier au carbone et de l'inox sont très proches ; par conséquent il ne peut pas se former de couple galvanique significatif entre des armatures inox et des armatures en acier au carbone.

5.2. Les conditions d'utilisation des inox

Les inox appartiennent à la famille des aciers ; ils sont soudables et les conditions d'adhérences sont identiques à celles des aciers au carbone.

Les armatures inox sont normalisées dans plusieurs pays européens et une norme européenne, dont le lancement a eu lieu en 2004, est en cours d'élaboration.

What has been measured on (Fig.1) is the pitting potential of the different grades, this is to say the energy which is to be applied in order to obtain pitting corrosion; the better the pitting potential, the better the corrosion resistance. It appears that the pitting potential of the different grades of stainless steels is positive and particularly high for grades 4462; on the contrary, in the same conditions, the pitting potential of carbon steel is negative and very low.

Nevertheless in a given medium the performances of the different grades are not the same: some grades may corrode and others don't; hence, the choice of the appropriate grade has to be adapted to the environment. Theoretically, there are many possible grades, but practically, for concrete reinforcement, only two types of grades can be used; it is important to select beforehand the projects and buildings for which reinforcement with stainless steel bars is of interest.

5.1.2. Galvanic corrosion

Though stainless steel is steel, because it contains alloying elements, it is relevant to wonder if galvanic corrosion may occur with carbon steel in case of a partial use of stainless steel rebar.

A condition for the occurrence of galvanic corrosion between two different metals inside an electrolyte is that there exist a difference of potential between the two metallic elements. (Tab.2) indicates the galvanic potentials of carbon steel and stainless steel in different media

Inside wet concrete, the galvanic potentials of carbon steel and stainless steel are very similar; hence there cannot be any significant galvanic couple between the two types of steel.

5.2. Conditions of use

Stainless steels belong to the family of steels; they are weldable and the bonding conditions are the same as those of carbon steels.

Stainless steel rebars are standardised in several European countries and a European standard, launched in 2004, is in progress.

Les armatures inox sont mentionnées dans l'Eurocode 2 ; certaines annexes nationales autorisent la diminution de l'épaisseur d'enrobage en cas d'utilisation d'armatures inox.

5.3. Approche économique

Il existe un fort préjugé selon lequel le prix des armatures inox est si élevé que ce n'est pas la peine de calculer le prix des structures renforcées avec des armatures de ce type. Cette approche n'est correcte que si l'on compare le prix brut d'achat de l'inox et de l'acier au carbone. Cependant, du point de vue du développement durable, toute approche économique doit intégrer d'autres paramètres et plus particulièrement celui de la durabilité, le « coût du cycle de vie » comprenant le coût d'utilisation et le coût de possession, ainsi que les économies réalisables au moment de la construction. C'est la raison pour laquelle de nombreux ouvrages comportant des armatures inox ont déjà été réalisés dans plusieurs pays (USA, Canada, Suisse, Allemagne, Royaume-Uni). Il faut souligner que les armatures inox peuvent ne représenter qu'une partie du ferrailage total, placées de préférence à proximité de la surface, là où la corrosion a le plus de chances de survenir.

Dans chaque cas, la preuve a été faite que le coût global de la solution comportant de l'inox est plus faible que si la structure avait été réalisée uniquement en acier au carbone. Afin d'éviter de raisonner sur un exemple qui pourrait être considéré comme un cas particulier, le calcul économique a été réalisé sur un ouvrage courant, ce qui permet d'avoir une conclusion plus pertinente.

Stainless steel rebar is mentioned in the Eurocode 2; in some national annexes it is allowed to reduce the cover thickness when stainless steel rebars are used.

5.3. Economic approach example

There is a strong perception in the market that stainless steel reinforcement is so expensive that it is not even worth calculating the price of stainless steel reinforced structures. In fact, this approach is correct only if the difference of the bulk price between carbon steel and stainless steel rebars is considered. However, from the point of view of the sustainable development, any economic approach has to take into account other parameters such as the durability, the "life cycle cost" including the costs of usage and ownership, and e.g. the possible savings on the construction site. This is the reason why many works containing stainless steel reinforcements have already been built in many countries (e.g. USA, Canada, Switzerland, Germany, UK). It must be stressed that stainless steel reinforcement can just be a part of the total armouring preferably close to the surface, where corrosion is more likely to occur.

In each case, it has been proven that the global cost of the solution including stainless steel is lower than it would have been if the works had been built only with carbon steel rebars. But each case can be considered as a particular case; this is why the cost has been made out of a very standard work, so the result was more representative.



Figure 2 : Exemple de réalisation

L'ouvrage (fig.2) est un pont autoroutier :

- longueur 60 m
- largeur 9 m
- 3 piles fondées sur fondations superficielles
- culées fondées sur fondations superficielles
- chaque pile est constituée de 4 fûts

L'ouvrage est situé en zone montagneuse ; il est donc nécessaire de décrire les données environnementales et les classes d'exposition correspondantes :

- XF4 exposition gel/dégel avec utilisation de sels de déverglaçage pour le tablier et les appuis
- XC4 pour les appuis et le tablier en raison de la carbonatation (engendrée par la combinaison de l'air et de l'humidité)
- XD3 pour les piles et le tablier dû à l'utilisation de sels de déverglaçage
- XA1 pour les appuis dû au contact avec les sols et les eaux de surface.

Au bout de quelques années de service, il y aura lieu de prémunir l'ouvrage contre la corrosion ; si cela se fait par une protection galvanique, il faudra :

- installer des échafaudages et des protections
- purger les barres
- probablement ajouter quelques renforts
- mettre en place les anodes
- reconstituer les bétons d'enrobage
- repeindre les parties réparées

Le coût total de la protection galvanique est estimé à 72 800 € soit 6% du coût de l'ouvrage.

Ce coût n'inclut pas les coûts indirects tels que le balisage routier et les pertes d'exploitation ; il y a également des préjudices, comme l'interruption du trafic ou d'ordre esthétique ; il peut y avoir aussi des problèmes de sécurité ; ces coûts indirects ne sont pas pris en comptes dans l'estimation des coûts.

En comparaison, si le pont est équipé d'armatures inox dans les parties potentiellement exposées, appuis et tablier, il aurait fallu utiliser :

$26 \text{ kg/m}^3 \times 2 \times 60 = 3120 \text{ kg}$ d'armatures inox pour les appuis

$463 \text{ kg/m}^3 \times 6 = 2780 \text{ kg}$ d'armatures pour les piles

The work is a bridge over a motorway in France:

- *length 60 m*
- *width 9 m*
- *3 bridge piers on superficial foundations*
- *abutment piers on superficial foundations*
- *each pier is made out of two columns*

This work being situated in a mountain area, it is necessary to describe the environmental data and exposure classes:

- *XF4 , frost / thaw exposure with concentration of de-icing chlorides for the deck and the bearings*
- *XC4, on the deck and the bearings due to carbonation (generated by the combination of the air and moisture)*
- *XD3 on the deck and bearings due to the use of de-icing salts*
- *XA 1 on the bearings due to the contact with the ground and the surface water*

After a few years, in order to protect the work against the corrosion the designer has chosen a galvanic protection, which requests to:

- *Install scaffoldings and protections*
- *clear up the reinforcement bars*
- *Probably add extra reinforcement bars*
- *place the anodes*
- *rebuild the concrete covers*
- *repaint the parts which have been repaired*

The total cost of the galvanic protection is estimated at 72 800 € including 7800 € for the building company and the security. The cost of the galvanic protection represents 6% of the cost of the work. This cost does not include indirect costs such as road marking and losses of operation; there are also various inconveniences such as traffic disruption, aesthetics; some inconveniences may also be linked to the security; these inconveniences are not taken into account.

By comparison, if the bridge had been equipped with stainless steel rebars in the exposed parts – piers and mouldings, it would have requested the use of:

$26 \text{ kg/m}^3 \times 2 \times 60 = 3120 \text{ kg}$ of armouring for the mouldings

$463 \text{ kg / trunk} \times 6 = 2780 \text{ kg}$ of armouring for the piers

Soit un poids total d'armature inox de 5 900 kg. Si le prix de l'inox mis en place dans les coffrages est de 7 €/kg et celui de l'acier carbone 2 €/kg, le coût supplémentaire de la solution inox est de 29 450 € à rapprocher du coût de la protection galvanique (72 800 €).

Sur cet exemple, le coût de la solution inox pour protéger l'ouvrage contre la corrosion ressort à 2,4 fois moins cher que la solution par protection galvanique.

6. LES DOMAINES D'UTILISATION DES ARMATURES INOX

L'utilisation d'armatures inox est recommandée sur les ouvrages soumis à des risques de corrosion, lorsqu'une plus grande durée de service est requise et lorsque les coûts de maintenance doivent être diminués.

6.1. Les classes d'exposition des bétons

La norme européenne EN 206-1 a été mise en vigueur récemment ; il est dorénavant possible de prescrire un béton en fonction de la durée de service souhaitée et des conditions d'exposition qui sont regroupées selon 6 classes :

- X0 aucun risque de corrosion ou d'attaque
- XC corrosion induite par la carbonatation (XC1 à XC4 selon le degré d'humidité)
- XD corrosion induite par les chlorures (d'origine non marine) (XD1 à XD3 selon le degré d'humidité)
- XS corrosion induite par les chlorures d'origine marine (XS1 non immergés à XS3 totalement immergés)
- XF ouvrages exposés au gel / dégel (XF1 à XF4 en fonction de l'utilisation de sels de déverglaçage et du niveau de gel)
- XA attaque chimique (XA1 milieu modérément agressif à XA3 très agressif)

A partir de cette classification, il est possible de déterminer les classes d'exposition dans lesquelles il est recommandé d'utiliser des armatures inox.

6.2. Les types de constructions où l'inox peut être utilisé

Parmi les classes mentionnées ci-dessus, cinq correspondent à des environnements dans lesquels il existe un risque potentiel de dégradation par la corrosion : XA (attaques chimiques), XC (carbonatation), XD et XS (chlorures), XF (gel/ dégel avec agents de déverglaçage).

This is to say that the total weight of armouring in stainless steel = 5900 kg If the kg of rebars ready to install in carbon steel is 2 €/kg and 7 €/kg in stainless steel, the extra cost of the stainless solution is 29 450 € which is to be compared with the cost of the cathodic protection (72 800 €).

On this example the extra cost of a stainless steel solution is 2.4 less expensive than the costs of maintenance.

6. WHEN SHOULD STAINLESS STEEL REBAR BE USED?

Stainless steel rebars should be used on the civil works and buildings exposed to corrosion and when a longer durability and a low maintenance are required.

6.1. Concrete exposure classes

The European standard EN 206 for the concrete has been published recently; it is now possible to select a specific concrete according to the expected durability and the conditions of outside exposure which are grouped into 6 classes:

- *XO no risk of corrosion or attack*
- *XC corrosion induced by carbonation (XC1 to XC4 according to the degree of humidity)*
- *XD corrosion induced by chlorides (origin other than marine) (XD1 to XD3 depending on the degree of humidity)*
- *XS corrosion induced by seawater chlorides (XS1 not immersed to XS3 totally immersed)*
- *XF frost / thaw exposed works (XF1 to XF4 depending the use of de-icing salts and the degree of humidity)*
- *XA chemical attacks (XA1 moderately aggressive to XA 3 very aggressive)*

From this classification it is possible to determine the classes of exposure for which the use of stainless steel bars should be recommended.

6.2. Type of constructions where stainless steel may be used

Among the above mentioned classes, 5 of them correspond to environmental actions in which exists a potential risk for degradation: XA (chemical attacks), XC (carbonation), XD and XS (chlorides) XF (frost /defrosting with de-icing agents).

Les inox sont bien adaptés à tous les types d'utilisation de béton : préfabriqué, coulé en place et pour les structures anciennes endommagées par la corrosion.

En génie civil, les éléments qui peuvent être construits avec des armatures inox sont :

- structures : ponts routiers, autoroutiers ou ferroviaires, passerelles, tranchées couvertes, barrages ;
- usines de traitement et d'épuration des eaux : bassins, réservoirs de stockage, réseaux d'eau usées ;
- travaux routiers : ouvrages de sécurité, ouvrages d'assainissement pluvial, écrans acoustiques
- fondations spéciales : pieux ;
- travaux souterrains : tunnels, galeries d'adduction ou de drainage d'eau ;
- travaux sur sites maritimes : bassins, jetées, quais, écluses.

En bâtiment :

- bâtiments industriels
- bâtiments agricoles
- bâtiments proches du littoral

6.3. Les nuances d'inox

Lorsque les risques de corrosion sont élevés (XS1, XS2, XF4, XA3), il est recommandé d'utiliser soit des nuances duplex type 1.4462 ou bien des nuances austénitiques contenant du molybdène type 1.4401.

Dans tous les autres cas une nuance type 1.4301 contenant 18% de chrome et 8% de nickel suffit.

7. LA CONTRIBUTION DE L'UTILISATION DES ARMATURES INOX AU DÉVELOPPEMENT DURABLE

A ce stade il est maintenant possible d'évaluer la contribution des armatures inox au développement durable selon les critères énoncés au §1.4 en fonction des propriétés du matériau.

7.1. Plus faibles quantités de béton

Les recommandations de l'Eurocode 2 [EN 1992-1-1] sur les épaisseurs d'enrobage prennent en compte la durabilité de l'ouvrage et la nature de l'environnement.

Stainless steels are well adapted for all types of uses of concrete: prefabricated, poured in situ as well as for all structures damaged by corrosive phenomena.

In civil engineering works, the elements which can be constructed using stainless steel reinforcement are:

- *Structures - roads, motorways or railways bridges, footbridges, concrete dams, covered trenches-*
- *Water treatment plants –e.g. basins, storage reservoirs, waste water discharge networks, swimming pools, water supply and distribution networks-*
- *Road works –safety structures, rainwater works, acoustic screens-*
- *Special foundations – piles, moulded walls, bars in groundwater-*
- *Underground works – e.g. tunnels, water supply and drainage galleries,-*
- *Works on maritime sites –basins, jetties, docks, locks-*

In buildings:

- *Industrial buildings*
- *Cattle breeding buildings*
- *Buildings on the seashore*
- *Connectors for assembling together reinforcement bars*

6.3. Grades of stainless steels

When the risks of corrosion are high – XS2, XS3, XF4, XA3- it is recommended to use either duplex grades such as 1.4462 or molybdenum containing austenitic grades such as 1.4401

In all the other cases a type 1.4301 grade, containing just 18% chromium and 8% nickel is sufficient.

7. CONTRIBUTION OF THE STAINLESS STEEL REBAR TO THE SUSTAINABLE DEVELOPMENT

At this stage, it is now possible to evaluate what can be the contribution of stainless steel rebar to the sustainable development according to the above mentioned list (§1.4), linked to the properties of the material.

En cas d'utilisation d'armatures inox, il est possible de réduire l'enrobage d'une valeur " $\Delta C_{dur, st}$ " qui peut être non nulle.

Le but de l'augmentation des enrobages étant de protéger les ouvrages contre la corrosion des armatures, il n'est plus nécessaire de les augmenter si les armatures ne se corrodent pas.

7.2. Plus faibles quantités d'armatures

Les caractéristiques mécaniques de l'inox sont supérieures à celles de l'acier au carbone. La limite élastique des inox se situe couramment entre 500 et 650 MPa avec la possibilité d'atteindre 800 MPa.

Il est donc possible de diminuer le diamètre des barres utilisées

7.3. Structures plus légères

La réduction des quantités de béton et d'armatures permet d'alléger les structures.

7.4. Sécurité renforcée pour les usagers

La corrosion peut engendrer des fissures et des éclatements de certaines parties des ouvrages. L'utilisation d'armatures qui ne se corrodent pas d'éviter ce phénomène.

Par ailleurs les inox ont une meilleure tenue aux hautes températures, ce qui permet, dans les cas d'un incendie « conventionnel » de gagner environ 30 minutes par rapport à un acier au carbone.

L'allongement à la rupture des inox austénitiques est de l'ordre de 50%. Ils ont donc la capacité d'absorber une plus grande quantité d'énergie que les aciers au carbone avant de se rompre. En cas de séisme, les armatures inox peuvent donc supporter, avant de se rompre, une déformation beaucoup plus importante.

7.5. Esthétique améliorée

Il semble évident qu'un ouvrage qui n'a pas subi de dégradations est plus esthétique qu'un ouvrage endommagé. L'utilisation d'armatures inox contribue largement à l'amélioration de l'aspect des ouvrages. Cela ne bénéficie pas qu'aux usagers, puisque le gestionnaire de l'ouvrage améliore ainsi l'image de son patrimoine.

7.6. Moins de maintenance

Le coût moyen annuel d'entretien des ouvrages de génie civil est de l'ordre de 1% du coût de remplacement de l'ouvrage ; une part importante de ces frais est affectée aux réparations de dégâts consécutifs à la corrosion des armatures.

7.1. Lower amounts of concrete

The recommendations of Eurocode 2 [EN 1992-1-1] regarding covers take in account the durability, and the nature of the outside environment.

In case of stainless steel reinforcement, the value of the additional cover can be reduced to a value " $\Delta C_{dur, st}$ " which can be # 0.

7.2. Lower amounts of metal for reinforcement

As the mechanical properties of stainless steel are higher than those of carbon steels it is possible to use smaller diameters for the bars. The yield strength of the stainless steel rebars is currently between 500 MPa and 650 MPa with the possibility to reach 800 MPa. In the same time it is possible to use a concrete with higher mechanical characteristics.

7.3. Lighter structures

Using less concrete and less armouring allows thee design of works with lighter structures.

7.4. Improved security for users

Due to corrosion, cracks appear and some parts of the works may fall off. With stainless steel rebars, even used partially, this should not happen anymore and makes the works safer.

Stainless steels have better mechanical characteristics than carbon steels at high temperatures; this means that in case of a "conventional fire", it is possible to gain about 30 minutes.

The elongation at rupture of stainless steels is around 50%, a value higher than that of carbon steels. Therefore they are able to absorb a greater amount of energy before breaking. In the case of an earthquake, stainless steel rebars can sustain a greater deformation before breaking.

7.5. Improved aesthetics

It is obvious that a civil work with no defacement looks much better and and more aesthetic. The use of stainless steel rebar also contributes to this important aspect. And this is a benefit not only for the user who lives in a friendlier environment but also for the image of the owner of the building.

7.6. Less maintenance

The average annual costs of maintenance of bridges represent in general about 1% of the cost of replacement of the work; a large part of these costs of maintenance is assigned to repair the damage of the corrosion of the reinforcement bars.

Avec des armatures qui ne se corrodent pas, les coûts de maintenance sont beaucoup plus bas et dans le même temps les coûts indirects affectés au balisage de sécurité et liés aux pertes d'exploitation peuvent être évités.

Il est donc possible de réduire de façon significative et sur une longue durée les coûts de maintenance.

7.7. Durée de service allongée

En cas d'utilisation d'armatures inox, l'Eurocode 2 prévoit la possibilité d'optimiser la classe structurale.

Si la durée de service avec des armatures en acier carbone est de 50 ans, elle passe, par exemple dans certains cas, à 100 ans si les armatures sont en inox, avec des enrobages identiques. Ceci constitue une contribution essentielle au développement durable, puisque cela réduit les prévisions de reconstructions d'ouvrages consommatrices d'énergie et de matériaux.

A titre d'illustration, un exemple nous est donné par l'ouvrage le plus ancien réalisé entièrement avec des armatures inox (en 1.4301 alors qu'aujourd'hui pour ce type d'utilisation on utiliserait du duplex 1.4462 plus résistant) entre 1937 et 1941 dans le Yucatan, Golfe du Mexique. Il s'agit d'une digue partiellement immergée dans la mer.

L'ouvrage a été inspecté en 2000 ; les résultats sont les suivantes :

- pas de produits de corrosion sur les 100 arches visitées
- béton : E/C = 0,55 à 0,6 ; profondeur de carbonatation entre 0 et 1,5 mm
- armatures inox : les mesures de potentiel mettent en évidence de la corrosion, uniquement sur la 9^e arche (due très vraisemblablement à un endommagement par un bateau avec mise à nu de l'armature).

7.8. Moindre consommation d'énergie pendant la durée de service.

Comme la construction des ouvrages qui comportent des armatures inox requiert moins de matériaux, il se consomme moins d'énergie pour le transport et pendant les travaux.

Les opérations de maintenance sont également consommatrices d'énergie, directement et indirectement.

Les opérations de reconstruction aussi ; une durée de service plus longue représente donc des gains d'énergie importants sur le long terme.

If the bars do not corrode the costs of maintenance are much lower, and at the same time the indirect costs such as road marking and losses of operation can be avoided.

Therefore, the possibility to reduce drastically and for a very long time the costs of maintenance is a clear advantage of stainless steel rebar.

7.7. Improved durability

When stainless steel reinforcement bars are used, Eurocode 2 [EN 1992-1-1] allows shifting to a higher class of structure. For instance, if the service life of a work made with carbon steel is 50 years, it is possible to shift to a 100 years service life if the rebar is made of stainless steel with the same cover thickness.

This represents a major contribution to the sustainable development. Actually, if the service life of a work is shorter, it will have to be rebuilt earlier, and rebuilding generates more consumption of materials and energy.

An example is given by the oldest work built with stainless steel rebar –with 1.4301 as today it would be recommended for this type of application a duplex grade 1.4462– between 1937 and 1941 in Yucatan, Mexico. ; it is a pier partly immersed in the sea.

In 2000 the work has been carefully inspected; the results are:

- *No corrosion products observed on any of the 100 arches inspected;*
- *Concrete: w/c between 0.55 and 0.6; depth of carbonation between 0 and 1.5mm*
- *Stainless steel rebars: the measures of potential show a corrosion only on the n°9 beam, very probably due to a shock by a ship which has lead to the removal of the concrete cover*

7.8. Less energy consumed during the life of the work

Because the construction of the work made with stainless steel rebars requires a lower amount of materials, less energy has been consumed in order to produce these materials. At the same time, less energy has been consumed for the transportation of these materials.

Maintenance operations also consume energy, directly, and indirectly if the work has to be closed for repairs.

As mentioned above, the rebuilding operations require big amounts of energy; if the service life is longer, it represents important economies of energy for the future.

7.9. Bon pour l'environnement

Les inox présentent la propriété importante de ne pas relarguer d'ions métalliques dans l'environnement. Ceci signifie qu'en comparaison avec d'autres solutions telles que la peinture, les inhibiteurs de corrosion ou la protection galvanique, la solution inox est bien meilleure vis-à-vis de l'environnement.

7.10. Économiquement compétitif

Le recours aux armatures inox se limite aux ouvrages exposés à la corrosion et/ou pour lesquels une durée de service supérieure est requise. De nombreux exemples montrent que le coût global de la solution inox est très compétitif. Toutefois la comparaison doit se faire pour chaque projet, chaque cas pouvant être considéré comme un cas particulier.

8. CONCLUSION

Il est maintenant devenu absolument nécessaire de mettre en œuvre des solutions constructives en cohérence avec le développement durable : nous n'avons plus le choix.

Dans un certain sens, à ce jour, on peut dire que la corrosion contribue à la croissance de nos économies parce qu'elle engendre des dépenses et des travaux ; mais est-ce une croissance saine ? Elle n'est pas conforme aux principes du développement durable.

Dorénavant, toute construction devra intégrer les notions de durabilité : durée de service accrue, maintenance réduite. Il apparaît évident qu'une construction qui dure 100 ans avec moins de maintenance contribue mieux au développement durable qu'une construction qui, pour un usage similaire doit être reconstruite tous les 30 ans. De ce point de vue, la solution à base d'armatures inox apparaît économiquement très compétitive et mérite d'être prise en considération.

Dans le même temps, aujourd'hui les constructeurs doivent intégrer des paramètres importants tels que la quantité de matériaux utilisés ou les émissions de gaz à effets de serre. Les armatures inox offrent l'occasion de consommer moins de matériaux pour un même usage, ce qui contribue fortement à la protection de l'environnement.

Mais la contribution des armatures inox au développement durable n'est pas seulement favorable pour l'environnement et économiquement compétitive, elle est aussi d'ordre social. Les ouvrages moins dégradés par la corrosion offrent un environnement plus agréable à l'homme. Ces solutions améliorent aussi significativement la sécurité des êtres humains en cas d'incendie ou de tremblement de terre.

7.9. Environmentally friendly

One of the important characteristics of stainless steel is that it doesn't release metallic ions in the environment. This means that compared with other solutions such as painting, use of corrosion inhibitors or galvanic protection, the stainless steel rebar solution is environmentally friendlier.

7.10. Economically competitive

The use of stainless steel rebars is limited to the works which are exposed to corrosion and/or for which a longer service life is requested. Many examples show that the global cost of the stainless steel solution is very competitive. However, each construction might be considered as a particular case

8. CONCLUSION

It is an absolute necessity to work out innovative solutions in accordance with the principles of the sustainable development: we have no choice.

In a way, actually, it is possible to say that corrosion contributes to the growth of our economies, because it generates works and expenses. But is this a healthy growth? It is not in accordance with the principles of the sustainable development

Now, any construction should take into account the concept of durability: longer service life, less maintenance. It seems obvious that a construction which lasts 100 years with lower maintenance brings a better contribution to sustainable development than a construction which, for the same usage, has to be rebuilt every 30 years. As we have seen, from this point of view, the use of stainless steel rebar has to be taken in account as a solution.

At the same time, to day, builders must also consider some important parameters such as the amount of materials which are used and emissions of greenhouse effect gases. Stainless steels give the opportunity to consume less materials for a similar usage, which strongly contributes to the protection of the environment.

But the contribution of the stainless steel rebar solution to the sustainable development is not only environmentally safe and competitive, it is also social because the works, being not defaced by corrosion contribute to a friendlier environment for all and also strongly contribute to a better safety in case of fire or earthquake.

9. RÉFÉRENCES

United nations, minutes of the General Assembly Rio de Janeiro, 3-14 June 1992

batiweb website www.batiweb.com 15/10/2004

EN 10080: 2005

CIM Béton and I.D.Inox, Collection Technique CIM Béton T.81, 2004, *Béton armé d'inox, le choix de la durée* »

EN 1992-1-1 (Eurocode 2), 2005, *European standards*

Knudsen / Jensen / Klinghoffer / Slovsgaard "cost effective enhancement of durability of concrete structures by intelligent use of stainless steel reinforcement"; conference on corrosion and rehabilitation of reinforced concrete structures, Florida 12 1998

"corrosion in reinforced concrete structures" ed. Hans Boni; p145 & 146

Castro-Borges P.C. & coll., Material performances; oct 2002; pages 50 to 55

Toulemonde F., Coin A. LCPC Guide technique – structures en béton conçues avec l'Eurocode 2- Notes techniques relatives à l'enrobage pour l'application en France - 2005

9. REFERENCES

United nations, minutes of the General Assembly Rio de Janeiro, 3-14 June 1992

batiweb website www.batiweb.com 15/10/2004

EN 10080: 2005

CIM Béton and I.D.Inox, Collection Technique CIM Béton T.81, 2004, *Béton armé d'inox. Armé d'Inox, le choix de la durée* »

EN 1992-1-1 (Eurocode 2), 2005, 1998, *European standards*

Knudsen / Jensen / Klinghoffer / Slovsgaard "cost effective enhancement of durability of concrete structures by intelligent use of stainless steel reinforcement"; conference on corrosion and rehabilitation of reinforced concrete structures, Florida 12 1998

"corrosion in reinforced concrete structures" ed. Hans Boni; p145 & 146

Castro-Borges P.C. & coll., Material performances; oct 2002; pages 50 to 55

Toulemonde F., Coin A. LCPC Guide technique – structures en béton conçues avec l'Eurocode 2- Notes techniques relatives à l'enrobage pour l'application en France