

APPLICATION DES ARMATURES INOX DANS LE GÉNIE CIVIL DE L'EAU

Damien BRISSEAU

Communauté Urbaine de Nantes

Patrick GUIRAUD

CIMbéton

François MOULINIER

Institut de Développement de l'Inox (IDInox)

L'eau douce est une ressource vitale de notre planète ; elle est à la fois acteur, facteur et indicateur du développement durable.

Acteur : sa disponibilité et son abondance sont source et condition de richesse et de développement ; sans eau pas d'espoir de développement.

Facteur : nous allons devoir gérer et répartir les quantités disponibles pour nos propres besoins et ceux des générations futures.

Indicateur : la qualité de l'eau douce disponible et la proportion de population ayant accès à l'eau potable et à l'assainissement constituent un outil de mesure essentiel du développement durable.

Dans cette perspective une nouvelle loi sur l'eau vient d'être votée en France et va entrer en application. Elle consacre un effort substantiel des pouvoirs publics pour la mise à niveau et aux normes des installations : en portant de 12 à 14 milliards d'euros sur 6 ans le plafond de dépenses des agences de l'eau et en prenant en compte les coûts de maintenance et de renouvellement des réseaux pour un montant annuel de 2 milliards d'euros. Cette nouvelle loi va donc accroître significativement le niveau des investissements. Le génie civil est particulièrement intéressé par ces dispositions puisqu'il représente environ la moitié du montant d'investissement d'une station.

Mais dans le même temps, ces installations, parce qu'elles traitent cet élément essentiel du développement durable qu'est l'eau se doivent d'être exemplaires en tant qu'ouvrages par rapport aux critères du développement durable et doivent satisfaire à des exigences particulières. De même qu'un cordonnier « se devrait » d'être bien chaussé, une station de traitement ou d'épuration qui travaille pour le développement durable doit être conçue et construite en conformité avec les exigences essentielles de celui-ci.

Les techniques constructives et procédés ont fait d'énormes progrès dans ce sens au cours des dernières années ; il convient maintenant que les travaux de génie civil eux aussi évoluent et s'adaptent à ces nouvelles contraintes en mettant en œuvre des procédés innovants qui permettront d'augmenter la fiabilité et la durée de vie des équipements, de diminuer les coûts de maintenance, tout en maîtrisant mieux le coût global de l'ouvrage.

Sachant que l'une des causes principales de dégradation des ouvrages de génie civil est la corrosion, l'utilisation d'armatures inox dans le béton apparaît comme une solution d'avenir. De surcroît les armatures inox présentent d'autres caractéristiques : résistance mécanique élevée, neutralité environnementale, recyclabilité, coût global faible, ce qui les rend très attractives pour ce type d'application.

1. PERSPECTIVES DES INDUSTRIES DE L'EAU

La réglementation européenne impose des niveaux de pureté et de qualité des eaux traitées – eau distribuée ou eau usées rejetées dans l'environnement- qui exigent une mise aux normes, voire une refonte complète d'un grand nombre d'installations, donc la nécessité de nouveaux investissements et donc un surcoût qui devrait se répercuter sur le prix de l'eau.

Dans le même temps le consommateur, au quotidien, n'est pas toujours conscient de ces améliorations et accepte mal les augmentations de sa facture eau et assainissement.

Simultanément, les collectivités en charge de la distribution d'eau et de l'assainissement, que ceux-ci soient délégués ou non, doivent également prendre en compte les contraintes environnementales imposées aux installations de traitement : celles-ci se trouvent généralement dans ou à proximité des agglomérations, elles doivent en particulier s'intégrer dans le paysage urbain, ne pas dégager d'odeurs, occuper le moins d'espace possible.

Les coûts d'investissements et d'exploitation doivent être parfaitement maîtrisés et dans le même temps les installations doivent être dimensionnées en fonction de besoins futurs souvent en augmentation en raison de la tendance à la concentration urbaine et, dans le cas des lieux de villégiature elles doivent être adaptées aux besoins des périodes de pointe.

Pour faire face à la montée progressive de l'ensemble de ces contraintes, les professionnels de la filière ont développé et mis au point, en particulier en France, de nouveaux procédés et de nouvelles technologies, comme en témoignent par exemple les chantiers d'Achères ou des Grésillons.

Les ouvrages de génie civil, bassins, réservoirs, infrastructures et les bâtiments, qui représentent couramment la moitié du coût de l'investissement sont généralement construits selon les techniques traditionnelles. Ils sont le plus souvent soumis aux risques de corrosion et aux chocs, et peuvent être confrontés à des environnements sévères : maritime, sismique, gel/dégel.

1.1. Exposition et conditions d'exploitation des ouvrages

La première cause de dégradation des ouvrages en béton armé est la corrosion des armatures. Pour mieux prendre en compte ce risque, la norme NF EN 206-1 a défini des classes d'exposition auxquelles sont soumis les ouvrages :

- XC, corrosion induite par la carbonatation liée à l'exposition à l'air et à l'humidité
- XS, exposition aux chlorures présents dans l'eau de mer pour les ouvrages situés en site maritime
- XF attaque gel/ dégel dans certains cas
- XD, exposition aux chlorures autres que maritimes (par exemple, chlorures ferriques ou chlorures d'aluminium)
- XA, attaques chimiques liées par exemple à une forte concentration en hydrogène sulfureux, à l'emploi des sulfates ou à l'utilisation de produits acides.

Il en résulte d'une part une attaque chimique des bétons et aussi une attaque des armatures qui peuvent être atteintes par la corrosion ; le volume de la rouille étant 6 fois supérieur à celui de l'acier, les armatures corrodées, par effet de gonflement, font éclater le béton. Il convient donc de trouver des solutions pour protéger ces ouvrages contre la corrosion, telles que l'augmentation des enrobages ou l'utilisation de bétons plus compacts ; l'utilisation d'armatures inox qui ne corrodent pas, en est une.

Les installations de génie civil doivent aussi être conçues pour protéger les équipements contre les chocs : selon les témoignages d'exploitants, il peut arriver à travers les gros émissaires des objets très massifs et de toutes natures, et même une machine à laver ou un châssis de voiture. Des armatures à plus haute limite élastique et avec une capacité de déformation plus élevée - ce qui est le cas des inox- peuvent être une solution.

Enfin, de nombreuses installations sont construites en zones sismiques et doivent pouvoir être protégées contre ces risques.

1.2. Les nouvelles exigences

Les contraintes et exigences qui pèsent sur ces installations publiques deviennent de plus en plus nombreuses pressantes, parfois contradictoires ou du moins difficiles à concilier

- durabilité : les investissements doivent être conçus pour une durée d'utilisation du projet beaucoup plus longue ; c'est devenu une exigence majeure et fondamentale
- qualité : l'eau, surtout celle destinée à la consommation humaine doit subir une influence aussi minime que possible de la part des matériaux et produits de construction avec lesquels elle est en contact ; il va de soi que si les installations ont été dégradées par la corrosion, sa composition et sa qualité peuvent être affectées.
- adaptabilité aux nouveaux procédés ; par exemple, les unités de traitement des odeurs ou les opérations de dénitrification se font dans des bâtiments couverts, donc en atmosphère confinée agressive, d'où la nécessité de choisir des matériaux adaptés.
- allègement des coûts d'exploitation, notamment en limitant les arrêts consécutifs à des pannes, ce qui impose de choisir du matériel plus fiable
- diminution des coûts de maintenance ; ceux-ci doivent dorénavant être pris en compte dans les choix des investissements ; la principale cause de dégradation des ouvrages de génie civil étant la corrosion, la diminution des coûts de maintenance passe prioritairement par la mise en place et le choix de solutions pour la prévenir
- exigences architecturales : en raison de leur proximité des zones urbaines, les stations doivent s'intégrer dans le paysage et satisfaire des critères esthétiques ; leur construction est souvent confiée à un architecte qui choisit les matériaux en conséquence.
- contraintes environnementales enfin : l'eau est un élément essentiel de notre environnement ; respecter l'eau c'est aussi respecter l'environnement et vice versa. Un soin tout particulier sera apporté aux choix des matériaux pour tenir compte de cette contrainte

En clair, les solutions constructives de génie civil doivent simultanément répondre à des contraintes croissantes tout en prenant en compte une diminution du coût global.

Le choix des armatures inox, en utilisation totale ou partielle, est une solution pour répondre à toutes ces exigences : elles résistent à la corrosion, elles présentent des caractéristiques mécaniques élevées, elles améliorent la tenue des ouvrages dans les zones sismiques et surtout elles permettent de réduire significativement les coûts de maintenance, donc de diminuer le coût global de l'ouvrage tout en augmentant sa durée de service.

2. LES INOX

Les inox ou aciers inoxydables constituent une vaste famille d'alliages résistant à la corrosion. Ils contiennent au minimum 10,5% de chrome (selon la norme européenne EN 10088) et la plupart du temps d'autres éléments d'alliages, nickel, molybdène, titane.

2.1. Les inox résistent à la corrosion

L'une des propriétés les plus importantes des inox est leur résistance à la corrosion. La résistance de ces alliages métalliques aux attaques chimiques des produits corrosifs, provient de leur faculté à s'auto-protéger par la formation spontanée à leur surface d'un film complexe d'oxydes et d'hydroxydes de chrome, appelé « couche passive », qui protège le substrat métallique de la corrosion généralisée et des attaques localisées. Cette couche extrêmement mince, d'une épaisseur de l'ordre de 1,0 à 2,0 nm, rend négligeables les vitesses de corrosion. L'élément le plus important dans les inox est le chrome, mais d'autres éléments tels que le molybdène, le nickel etc...ont aussi une influence sur sa résistance à la corrosion.

2.2. Les différentes familles d'inox

Un métal apparaît comme un assemblage d'atomes à l'intérieur d'une structure organisée.

Les atomes du fer pur sont assemblés selon 2 structures distinctes en fonction de la température :

- jusqu'à 910°C la structure cristalline est cubique centrée comme indiqué sur la Figure 1, encore appelée ferritique ;

- entre 910°C et 1400°C, la structure est de type cubique faces centrées (Figure 2) encore appelée austénitique
- au-delà de 1400°C, la structure redevient cubique centrée.

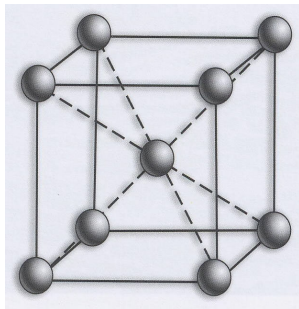


Figure 1. structure cubique centrée

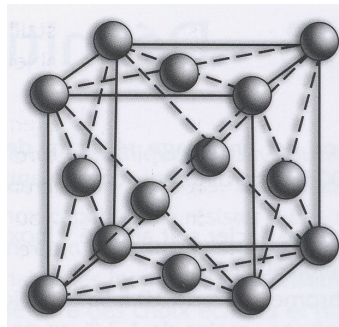


Figure 2. structure cubique à faces centrées

L'ajout d'éléments d'alliages modifie la structure de base du métal de la manière suivante:

- Les éléments tels que le chrome ou le molybdène favorisent une structure ferritique
- Les éléments tels que le nickel, le manganèse ou l'azote favorisent une structure austénitique
- Le carbone favorise un autre type de structure, la martensite

Par conséquent, selon leur composition, les inox pourront être classés en 4 grandes familles :

- Les inox ferritiques
- Les inox austénitiques
- Les inox martensitiques
- Les inox austéno-ferritiques, encore appelés duplex

Chaque famille possède ses caractéristiques propres. Pour la confection d'armatures pour béton armé, les familles d'aciers inox les plus utilisées sont les austénitiques et les austéno-ferritiques (duplex).

2.3. Les différentes nuances d'inox.

Au sein de chaque famille d'inox, il existe de nombreuses nuances présentant de légères différences de teneurs en éléments d'alliages, lesquelles peuvent être à l'origine de très grandes diversités de propriétés et d'emploi.

En pratique, on dénombre plus de 100 nuances d'inox parmi lesquelles il est possible de choisir, pour une application donnée la nuance la mieux appropriée. Les choix possibles pour des armatures inox pour bétons sont nombreux. Pour les armatures les nuances les plus couramment utilisées sont les austénitiques 1.4301 et en cas de risques de corrosion sévère 1.4401 ou les duplex 1.4362 , 1.4462.

2.4. Les propriétés comparées des inox et des aciers au carbone

Outre leur résistance à la corrosion, les aciers inoxydables présentent également des propriétés physiques différentes et des caractéristiques mécaniques supérieures à celles des aciers au carbone grâce à la présence d'éléments d'alliages.

2.4.1. Propriétés physiques

	Aciers carbone	Inox austénitiques	Inox austéno-ferritiques
Coefficient de dilatation thermique entre 20 et 100°C ($10^{-6}K^{-1}$)	10	16	13
Conductivité thermique à 20°C ($W.m^{-1}K^{-1}$)	40	15	15
Module d'élasticité à 20°C (GPa)	206	196	200
magnétisme	oui	non	oui

2.4.2. Propriétés mécaniques

Les caractéristiques mécaniques des aciers inoxydables sont généralement très supérieures à celles des aciers au carbone; par exemple la limite élastique des inox se situe entre 500 MPa et 650 MPa, avec un allongement supérieur à 50% dans le cas des inox austénitiques.

3. UTILISATION DES ARMATURES INOX DANS LE GÉNIE CIVIL DES INDUSTRIES DE L'EAU

Les armatures inox peuvent être utilisées en substitution partielle ou totale des armatures en acier au carbone. Pour le type d'application concerné, elles présentent de nombreux avantages.

3.1. Résistance à la corrosion

Dans le béton armé, deux types de corrosion peuvent survenir

- Corrosion consécutive à la carbonatation : lorsque le pH diminue les armatures inox demeurent passives dans des milieux acides pour des pH pouvant descendre jusqu'à 3 et même en dessous suivant les nuances
- Corrosion par les chlorures : très petits, les chlorures pénètrent à travers le béton et peuvent attaquer les armatures ; les tests montrent que au sein du béton armé, même en cas de concentration élevée de chlorures (35g/l) les armatures inox ne se corrodent pas

La solution inox pour prévenir la corrosion des armatures doit être prise en considération et systématiquement comparée aux autres solutions : augmentation des enrobages, protection cathodique, protection galvanique, inhibiteurs de corrosion.

En utilisation partielle, combinée avec les armatures en acier au carbone, il existe un risque de corrosion galvanique ; il est démontré par des essais de laboratoire que lorsque la proportion d'armatures inox n'excède pas 20% du total, les risques de corrosion sur les aciers au carbone sont négligeables.

Du fait de leur excellente résistance à la corrosion, les armatures inox permettent, sur les ouvrages de génie civil des industries de l'eau :

- D'améliorer sensiblement la durée de service des équipements, qui ne subiront plus de dégradation due à la corrosion
- De garantir une meilleure qualité de l'eau exempte de produits de corrosion ; il est à noter que la quantité de substances métalliques relarguées par les inox est négligeable, ce qui les rend inertes vis-à-vis de l'eau. De ce fait l'inox n'altère pas l'eau il est largement utilisé dans les équipements de process hors génie civil.
- De contribuer à diminuer significativement les coûts de maintenance, améliorant les performances d'exploitation qui subiront moins d'arrêts.
- De réaliser des économies de béton en diminuant les enrobages

3.2. Résistance mécanique

Avec une limite élastique couramment supérieure à 500 MPa et pouvant aller jusqu'à 650 MPa, il est possible de diminuer le diamètre des armatures en inox et par conséquent le poids de ferrailage, donc d'utiliser moins de matière première.

L'allongement des inox étant couramment au dessus de 50%, les armatures inox se déforment longtemps avant rupture, ce qui constitue un avantage essentiel en cas de séisme ou en cas de choc.

Par ailleurs, une étude expérimentale de lâcher de blocs dans le but de mesurer les efforts transmis par un ouvrage sandwich pour des énergies cinétiques allant jusqu'à 90 kJ a mis en évidence l'effet très positif de l'utilisation d'armatures inox sur la déformation de l'ouvrage.

3.3. Neutralité biologique

L'une des particularités des inox, liée à la couche passive est que la quantité d'ions métalliques qu'ils relarguent dans leur environnement est négligeable. De ce fait ils n'altèrent pas les substances avec lesquelles ils sont en contact et notamment l'eau.

C'est l'une des raisons pour lesquelles ils sont très largement utilisés pour la fabrication d'équipements de traitement de l'eau potable.

3.4. Recyclabilité

Les inox sont intégralement et indéfiniment recyclables et de ce fait ne produisent pas de déchets en fin de vie des installations lorsqu'il faut les déconstruire.

3.4. Coût global

A l'achat, en prix de fourniture, les inox sont en moyenne 5 à 6 fois plus chers que les aciers au carbone. En utilisation partielle dans un ouvrage de génie civil, par rapport au prix total de l'investissement, le surcoût des armatures inox, hors prise en compte des économies réalisables sur les enrobages et/ou sur les poids de ferrailage, est de l'ordre de 3%.

Si, de surcroît, l'on prend en compte les gains sur les frais de maintenance, les gains d'exploitation, l'augmentation de la durée de service des équipements, l'utilisation d'armatures inox devrait permettre de diminuer substantiellement le coût global des ouvrages de génie civil des industries de l'eau.

4. CONCLUSION : CONTRIBUTION DES ARMATURES INOX AU DÉVELOPPEMENT DURABLE

Dans tous les domaines, et notamment celui des industries de l'eau, il est essentiel de mettre en œuvre des solutions et des procédés en adéquation avec les trois critères du développement durable : social, environnemental, économique.

Les armatures inox permettent une avancée dans ce sens :

- moins de béton utilisé, moins d'armatures, donc moins de consommation de ressources et d'énergie : critère environnemental
- durée de service des équipements allongée, frais de maintenance allégés, coût global attractif : critère économique
- installations plus compactes, plus performantes, mieux intégrées dans leur environnement : critère social

La solution inox commence à être largement utilisée dans la construction des ouvrages d'art ; eu égard aux contraintes qui vont s'exercer de plus en plus sur les installations des industries de l'eau, la prise en considération par l'ensemble des acteurs de génie civil de cette nouvelle approche apparaît incontournable dans le futur.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1 - Norme EN 10088 parties 1, 2 3

2 - Norme NF EN 206-1 norme béton

3 – CIMBéton et I.D.Inox, ouvrage de la collection CIMBéton «Béton armé d'inox, le choix de la durée» ref T81

4 – revue Hydroplus n°165 juillet-août 2006 « le béton au cœur des stations »

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

6 - 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

7 – Revue TSM Techniques Sciences et Méthodes n° 9 2006

8- Julien Lorentz Société IMS, thèse de doctorat soutenue à l'INPG Grenoble le 15 Janvier 2007