

Solutions béton

Les aciers inox	P. 2
La fabrication des armatures inox	P. 3
Les caractéristiques géométriques et mécaniques	P. 4
La résistance à la corrosion des armatures inox dans le béton	P. 5
L'innovation des constructions durables	P. 7
L'optimisation de l'enrobage	P. 8



Les armatures inox : la solution pour des ouvrages durables

Une gestion durable du patrimoine est une nécessité éthique et écologique. C'est également une nécessité économique, qui impose d'obtenir un coût d'usage de l'ouvrage sur sa durée d'utilisation, le plus réduit possible. Maintenir une construction en béton armé en bon état est d'autant plus délicat que la durée de service de l'ouvrage est importante ou que cet ouvrage est exposé à des risques accrus de corrosion des armatures. Dans les parties de l'ouvrage les plus exposées, les armatures inox sont la solution la plus efficace pour garantir la durabilité des bétons. C'est parce qu'elles se façonnent comme les aciers au carbone, qu'elles peuvent être couplées aux armatures traditionnelles et qu'elles bénéficient de propriétés géométriques et mécaniques au moins équivalentes, que les armatures inox sont utilisées en réparation comme en travaux neufs, en substitution partielle ou totale des aciers au carbone, dans les produits préfabriqués comme pour la réalisation de structures coulées en place.

Texte : Patrick Guiraud

Les aciers inox

DÉFINITION D'UN INOX

L'inox est un alliage résultant de la fusion, à très haute température (plus de 1 500 °C), de différents constituants, principalement le fer, le carbone et le chrome.

Pour que l'acier soit appelé « inoxydable », ces constituants doivent obéir à la composition suivante :

- chrome : plus de 10,5 % en poids ;
- carbone : moins de 1,2 % en poids ;
- fer : le complément.

D'autres éléments d'alliage comme le nickel, le molybdène, le titane, le silicium, etc., peuvent être ajoutés ; ils se substituent alors à une partie du fer en vue d'améliorer certaines des propriétés physiques, chimiques ou mécaniques de l'inox. Ainsi, il n'existe pas un inox, mais une multitude d'inox avec des analyses chimiques différentes. Les teneurs en chrome ou en nickel peuvent être très élevées, l'élément restant (balance) sera toujours le fer.

À chacune des structures cristallines correspond une famille d'inox.

DÉSIGNATION EUROPÉENNE DES ACIERS INOXYDABLES SELON LES NORMES NF EN 10088-1 ET NF EN 10088-3

Les spécifications concernant la composition chimique et les propriétés physiques des aciers inoxydables sont listées dans la norme européenne 10088-1 : « liste des aciers inoxydables ».

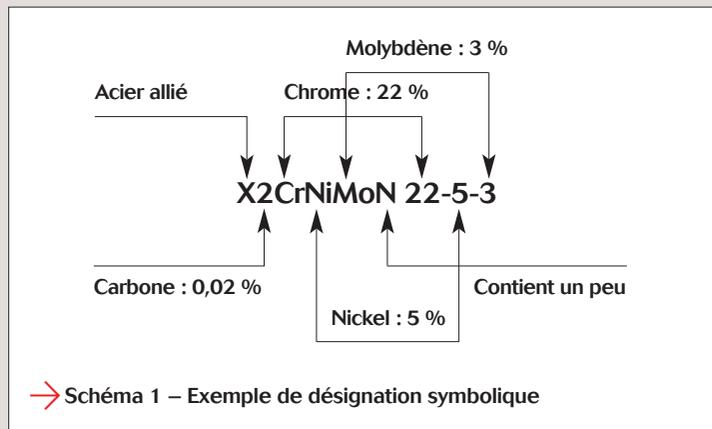
Cette norme propose deux types de désignations.

La désignation symbolique

La désignation symbolique donne la composition chimique des principaux éléments d'alliage de la nuance considérée.

Exemple : X2CrNiMoN 22-5-3

- La première lettre X signifie qu'il s'agit d'un acier allié dont la teneur d'au moins un des éléments d'alliage est égale ou supérieure à 5 % ;



- la première valeur indique la teneur moyenne en carbone, exprimée en centième de pour-cent (pourcentage x 100) ;

- les groupes de lettres (Cr, Ni, Mo, etc.) représentent les symboles chimiques des éléments d'alliages rangés par ordre décroissant de teneurs ;

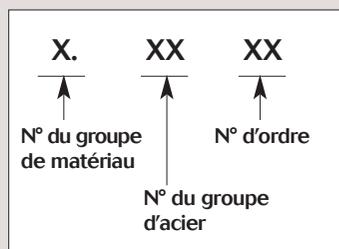
- la série de nombres en fin de désignation (séparés par des traits d'union) correspond aux teneurs moyennes des éléments d'alliage. Ces nombres sont rangés dans l'ordre des symboles des éléments qui précèdent.

Parfois, un élément rajouté volontairement en faible quantité – sans être considéré comme un résiduel – sera indiqué en fin du groupe de lettres (Ti, N, Nb, etc.). Sa teneur, trop faible, n'est pas indiquée (voir schéma 1).

La désignation numérique

Cette désignation est conçue pour être utilisée de façon simple : quatre chiffres, précédés d'un numéro de famille. **Exemple : 14462**

La structure de la désignation numérique se décompose de la façon suivante :



- le numéro du groupe de matériau : le chiffre 1 est réservé aux aciers (ce chiffre est suivi d'un point) ;

- le numéro du groupe d'acier (quatre numéros possibles) :

– 40 : inox avec Ni < 2,5 % sans Mo, sans Nb, sans Ti,

– 41 : inox avec Ni < 2,5 % avec Mo, sans Nb, sans Ti,

– 43 : inox avec Ni ≥ 2,5 % sans Mo, sans Nb, sans Ti,

– 44 : inox avec Ni ≥ 2,5 % avec Mo, sans Nb, sans Ti,

– 45 : inox avec additions particulières ;

- un numéro d'ordre : ce numéro est attribué par le Comité Européen de Normalisation (CEN) (voir schéma 2).

LES ACIERS INOX POUR ARMATURES

Les armatures inox sont constituées de deux principales familles d'acier Inox.

Les aciers austénitiques

Ce sont les plus courants, en raison de leur résistance à la corrosion élevée et de leur ductilité comparable à celle du

cuivre. Les teneurs en éléments d'addition sont d'environ 18 % pour le chrome et 8 % pour le nickel. La teneur en carbone est très basse et leur tenue à la corrosion peut être améliorée par l'addition d'éléments d'alliage comme le molybdène. De par leur excellente ductilité, ces aciers permettent des utilisations adaptées aux basses températures (jusqu'à - 200 °C). Ils possèdent des propriétés amagnétiques.

Les deux nuances de référence sont les suivantes :

- 1.4301 (désignation numérique)/ X5CrNi18-10 (désignation symbolique).

La norme américaine, utilisée dans le monde entier et établie par l'*American Iron and Steel Institute (AISI)* est largement utilisée dans le langage commun et fait référence à la nuance AISI 304 ;

- 1.4401 (désignation numérique)/ X5CrNiMo17-12-2 (désignation symbolique) ;

Cette nuance fait référence à la nuance AISI 316 de la norme américaine.

Les aciers duplex (ou austénoferritiques)

Ils ont des propriétés de résistance à la corrosion remarquables et présentent, pendant l'essai de traction, un palier élastoplastique. Ils offrent également des résistances mécaniques supérieures aux aciers austénitiques. Les teneurs en chrome élevées et en éléments d'alliage nickel et molybdènes plus faibles que pour les aciers austénitiques de même niveau de résistance à la corrosion les rendent attractifs grâce à leur excellent compromis résistance à la corrosion/valeur économique/stabilité des prix.

Les trois nuances de référence sont :

- 1.4062 / X2CrNiN 22-2* ;
- 1.4362 / X2CrNiN23-4 ;
- 1.4462 / X2CrNiMoN22-5-3. ■

* Autres possibilités :

1.4162 (X2CrMnNiN21-5-1),

1.4482 (X2CrMnNiMoN21-5-3)

La fabrication des armatures inox

Suivant le diamètre et le niveau de caractéristiques mécaniques requis, les crantages sur les armatures inox peuvent être obtenus par laminage à chaud ou transformation à froid.

CRANTAGE À CHAUD

C'est lors de la dernière opération de laminage (dernière cage de laminage) que s'effectue ce crantage, entre deux, trois, voire quatre galets crantés. Généralement, avec cette technologie, le crantage obtenu est appelé « verrou ». La forme de ces verrous est réalisée par gravure en creux des galets, c'est-à-dire par refoulement du métal et remplissage des crans. Cette opération terminée, le métal est décapé par voie mécanique (grenailage) ou chimique (décapage).



→ Exemple de produit cranté à chaud et décapé.

CRANTAGE À FROID

C'est à partir de fil machine préalablement décapé qu'est réalisé ce crantage, entre trois ou quatre galets de diamètres plus petits que les précédents. L'armature peut être livrée à l'état de couronnes de fils trancanées ou de barres. Le diamètre maximum réalisable par crantage à froid est limité : il varie entre 12 et 20 mm selon les producteurs. En sortie de ligne de crantage, les armatures inox ont une surface exempte d'oxyde, ce qui les différencie facilement – sur chantier – des armatures aciers au carbone. L'une des propriétés de ce mode d'élaboration par écrouissage réside dans la possibilité d'obtenir des caractéristiques mécaniques plus élevées que celles des normes de référence en termes de limite élastique (Rp0.2).



→ Tête de crantage à froid à trois galets.



→ Exemple de produit cranté à froid.



→ Cage de laminage avec trois galets de crantage pour la réalisation de verrous.

GAMME D'ARMATURE INOX

Les armatures inox peuvent être livrées sous différentes formes, analogues à celles de l'acier au carbone :

- couronnes crantées ou lisses ;
- barres crantées ou lisses, livrées en longueur maximale de 12 m ;
- treillis soudés ;
- cadres façonnés.

LES CONTRÔLES DE FABRICATION ET LA CONFORMITÉ NORMATIVE

Contrôles de fabrication

Différents types de contrôles sont effectués sur les armatures inox conformément à la norme NF A 35-014. Sur chacun des lots de fabrication, il est procédé à :

- un essai de traction pour déterminer la limite élastique conventionnelle (Rp0.2), la charge à la rupture (Rm) et l'allongement total sous force maximale (Agf) ;
- un contrôle dimensionnel du profil ;
- un contrôle de l'analyse chimique suivant la norme NF EN 10088-3.

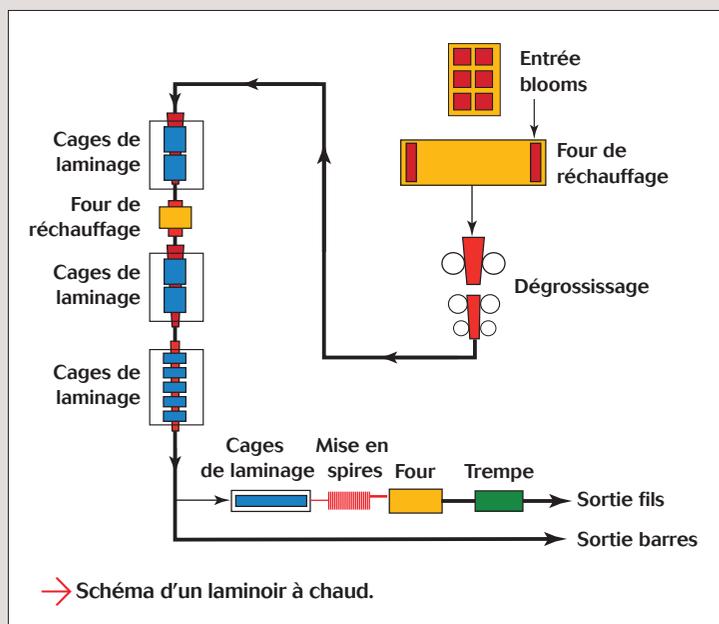
La conformité normative

Les armatures inox pour béton armé sont régies par la norme française

NF A 35-014. À partir des éléments techniques de la norme, l'utilisateur est en mesure de choisir la nuance d'inox en fonction du niveau de sollicitations en service et des classes d'exposition auxquels seront soumis les ouvrages.

Les lots d'armatures fournis doivent être conformes à la norme NF A 35-014. Cette conformité est garantie par :

- la certification NF – Aciers pour béton armé attribuée par l'AFCAB pour les armatures inox qui en bénéficient ; dans ce cas, les produits sont contrôlés par le producteur dans les conditions définies par la certification ;
- des contrôles de réception pour les armatures inox qui ne bénéficient pas de la marque NF – Aciers pour béton armé ; ces contrôles de réception sont généralement effectués en usine avant expédition conformément aux dispositions de l'article 10 de la norme et un certificat de réception, ou un procès-verbal de réception, est établi selon la norme NF EN 10204. ■



Normes européennes

- Analyse chimique : EN 10088-3.
- Aciers inoxydables pour renforcement béton : norme européenne harmonisée en cours d'élaboration pr EN 10370.
- BS 67-44 : British Standard.

Norme française

- NFA 35-014 Aciers pour béton armé : barres et couronnes lisses, à verrous ou à empreintes en acier inoxydable.

Les caractéristiques géométriques et mécaniques

LES ARMATURES À VERROUS

Les armatures à verrous montrent au moins deux champs de verrous présentant un espace uniforme. Les nervures peuvent exister ou non ; quand elles existent, leur hauteur (a') ne doit pas dépasser 0,15 d (d : diamètre nominal de l'armature).

Nota : l'angle d'inclinaison des verrous sur l'axe longitudinal du produit doit être compris entre 35° et 75°. Dans tout plan diamétral, l'angle d'inclinaison des flancs des verrous avec la génératrice du noyau contenue dans ce plan doit être supérieure ou égale à 45°.

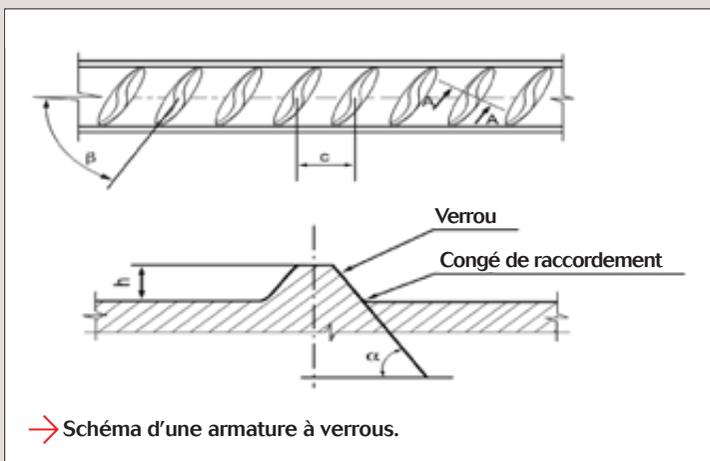
La hauteur des verrous doit être comprise entre 0,05 d et la valeur maximale ; l'espacement des verrous doit être compris entre 0,5 d et 1,0 d (d : diamètre nominal du produit).

LE COEFFICIENT DE FORME

Les normes imposent à la géométrie de surface des armatures des caractéristiques permettant d'assurer l'adhérence acier/béton. Les exigences portent sur des valeurs minimales, soit de hauteur des verrous ou de profondeur des empreintes, soit de « surface relative » des verrous (fR) ou des empreintes (fp). Le coefficient de forme des verrous doit satisfaire les prescriptions données au tableau ci-dessous, en fonction du diamètre nominal du produit. ■

Coefficient de forme (fR) minimum

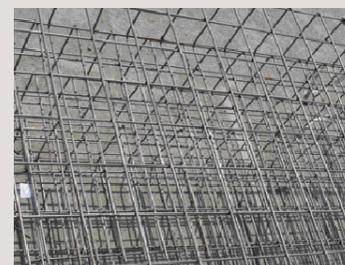
Diamètre nominal de l'armature (d) mm	fR min
5 et 6	0,039
7 et 8	0,045
9 et 10	0,052
12 à 50	0,056



→ Aciers inox façonnés.

Hauteur et espacement des verrous

Diamètre nominal du produit (d) mm	Hauteur des verrous (h) mm		Espacement entre verrous (c) mm	
	Min	Max	Min	Max
5	0,32	0,75	3,8	5,4
6	0,39	0,90	4,1	6,1
7	0,45	1,05	4,6	6,6
8	0,52	1,20	5,0	7,0
9	0,58	1,35	5,3	7,3
10	0,65	1,50	5,5	7,5
12	0,78	1,80	6,1	8,3
14	0,91	1,90	7,1	9,7
16	1,04	2,00	8,2	11,0
20	1,30	2,25	10,2	13,8
25	1,63	2,50	12,7	17,2
32	2,08	3,20	16,3	22,1
40	2,60	4,00	20,4	27,6
50	3,25	5,00	25,1	34,5



→ Cadres façonnés.



→ Réparation d'ouvrage d'art.

Masse linéique des armatures inox

Diamètres mm	Section nominale mm ²	Masse volumique 7,8 kg/dm ³ (duplex)	Masse volumique 7,9 kg/dm ³ (austénitiques)	Masse volumique 8,0 kg/dm ³ (austénitiques)
		4062-4362-4462	304	316
4	12,6	0,097	0,098	0,099
5	19,6	0,151	0,153	0,155
6	28,3	0,218	0,221	0,224
8	50,3	0,387	0,392	0,397
10	78,5	0,605	0,613	0,621
12	113	0,871	0,882	0,893
14	154	1,185	1,200	1,215
16	201	1,548	1,568	1,588
20	314	2,419	2,450	2,481
25	491	3,78	3,828	3,877
32	804	6,193	6,272	6,352
40	1257	9,676	9,800	9,924

La résistance à la corrosion des armatures inox dans le béton

LA CORROSION DES ARMATURES DANS LE BÉTON

Dans des conditions normales, les armatures en acier enrobées d'un béton compact et non fissuré sont protégées naturellement des risques de corrosion par un phénomène de passivation qui résulte de la création, à la surface de l'acier, d'une pellicule protectrice Fe_2O_3CaO (dite de passivation). Cette pellicule est formée par l'action de la chaux libérée par les silicates de calcium sur l'oxyde de fer. La présence de chaux maintient la basicité du milieu entourant les armatures (l'hydratation du ciment produit une solution interstitielle basique de pH élevé : 12 à 13). Les armatures sont protégées tant qu'elles se trouvent dans un milieu présentant un pH compris entre 9 et 13,5. Deux principaux phénomènes peuvent dans certaines conditions détruire cette protection et initier la corrosion des armatures en acier :

- la carbonatation du béton d'enrobage par l'adsorption du gaz carbonique contenu dans l'atmosphère.

Le milieu basique se trouve progressivement modifié par la neutralisation de l'alcalinité du ciment pour atteindre un pH de l'ordre de 9, n'assurant plus la protection des armatures et entraînant une dépassivation de l'acier (destruction de la couche de passivation), ce qui développe la réaction d'oxydation à la surface des armatures ;

- la pénétration des ions chlorures, jusqu'au niveau des armatures.

La plus ou moins grande rapidité d'action de ces divers agents est fonction de l'humidité ambiante, de la porosité du béton et de la présence de fissures qui favorisent la diffusion des gaz ou des liquides agressifs. La corrosion des armatures

s'amorce dès que la teneur en chlorures au niveau des armatures atteint un certain seuil de dépassivation. Ce seuil est fonction du pH de la solution interstitielle et de la teneur en oxygène au niveau des armatures ; il est de l'ordre de 0,4 % par rapport au poids du ciment. Il est atteint plus rapidement si le béton est carbonaté.

LES EFFETS DE LA CORROSION

Le développement de la corrosion des armatures peut provoquer par gonflement une poussée au vide sur le béton d'enrobage (les oxydes de fer étant plus volumineux que l'acier, ils génèrent des contraintes internes dans le béton qui peuvent être supérieures à sa résistance en traction) et donc une altération de l'aspect extérieur de l'ouvrage (éclatement localisé, formation de fissures, formation d'épaufrures, apparition en surface de traces de rouille et éventuellement mise à nu de l'armature) et une réduction de la section efficace de l'armature et de son adhérence au béton.

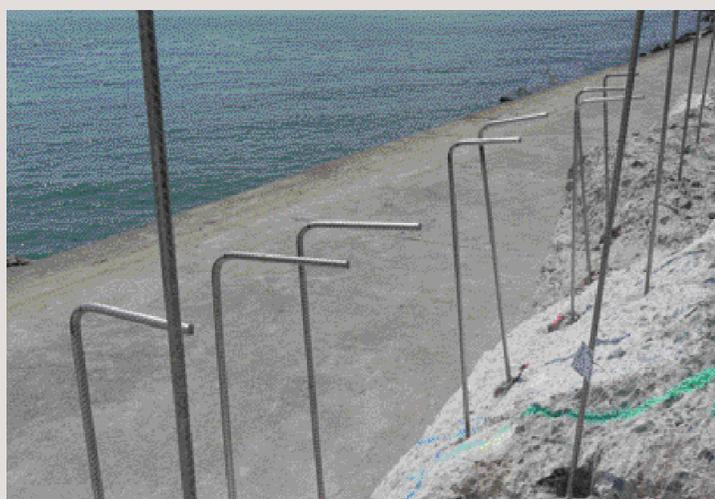
En règle générale, dans des milieux peu agressifs, les enrobages et les caractéristiques des bétons (compacité, homogénéité, résistance) précisés sont suffisants pour garantir la protection naturelle des aciers durant la durée de vie escomptée de l'ouvrage. Toutefois, des défauts d'enrobage, des bétons mal vibrés et de ce fait trop poreux, ou des milieux très agressifs risquent de conduire à la dégradation prématurée de l'armature acier.

LA COUCHE DE PASSIVATION DES INOX

La fabrication d'un métal ou d'un alliage s'accompagne toujours de la formation spontanée d'un oxyde en



→ Réparation d'un ouvrage maritime en acier inox.



→ Liaisons d'ancrage des cadres.

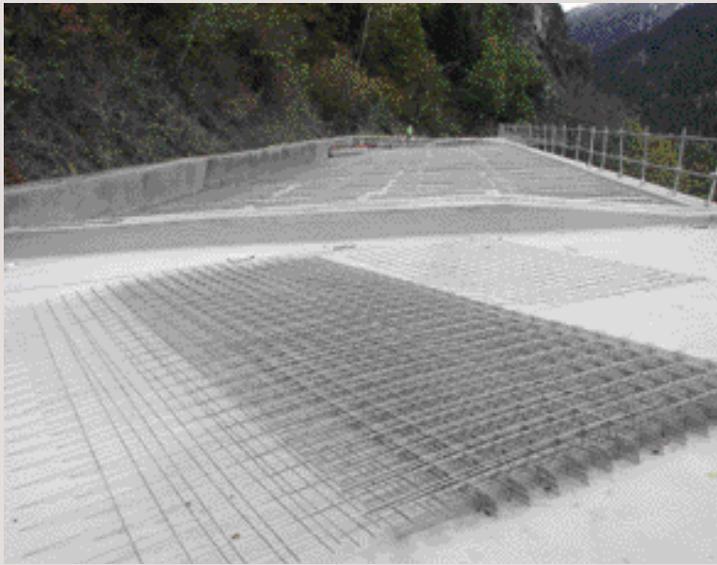
surface du produit, au contact de l'eau ou de l'air humide. Ainsi le fer et l'acier forment de la rouille, l'aluminium de l'alumine, le cuivre du vert-de-gris.

Les inox produisent en surface un oxyde très fin, composé d'oxydes et d'hydroxydes de chrome de quelques angströms d'épaisseur. Cet oxyde, couramment appelé couche passive, protège l'inox des agressions extérieures et lui confère cette propriété appelée l'inoxidabilité, garante de la résistance à la corrosion de ces alliages. La couche passive fait

intrinsèquement partie du matériau, contrairement au zinc déposé par galvanisation sur les aciers, ce qui explique que l'inox présente des avantages essentiels.

- **La stabilité** : une fois formée, cette couche est parfaitement stable puisque son épaisseur reste constante ;

- **l'imperméabilité** : la couche passive bloque tout échange entre le métal et l'extérieur : en cas d'incident sur le matériau (éraflure, découpe, choc, perçage, déformation...), elle se reforme spontanément.



→ Treillis soudés pour la réalisation d'un pare-avalanche.

Cette autorestructuration est aussi appelée « repassivation » ;

■ **l'inertie** : au fil du temps, l'aspect de l'inox ne change pas puisque la couche passive est invisible à l'œil nu (à la différence du cuivre, par exemple, sur lequel il se forme une couche verte d'oxydes), la couche passive de l'inox ne se consomme pas (à l'inverse du dépôt de zinc pour les aciers galvanisés qui finit par se dissoudre et ne constitue donc qu'une protection temporaire, puisque sacrificielle). Cette couche passive protège efficacement les inox des agressions du milieu extérieur, et donc de la corrosion.

Cependant, dans certaines conditions, certains éléments tels les chlorures déstabilisent localement la couche passive, suivant leur concentration, la température du milieu et la nuance de l'inox.

Les conditions environnementales dans lesquelles l'inox est utilisé permettent de choisir la nuance la plus pertinente : il existe des inox adaptés à toutes les conditions. En effet, les éléments d'alliages permettent d'orienter le choix de la nuance en fonction du type d'agression potentielle.

LA RÉSISTANCE À LA CORROSION DANS LE BÉTON

Lorsqu'il y a corrosion sur les armatures en acier au carbone, celle-ci est principalement de type corrosion par piqûres.

De par la remarquable stabilité de leur couche passive, les armatures inox présentent une excellente résistance à ce type de dégradation : elles sont donc particulièrement adaptées pour des milieux très chargés en chlorures. Cette résistance a été démontrée par de nombreux chercheurs de différents pays. Il s'agit en général de résultats provenant de tests électrochimiques de corrosion accélérée. L'une des difficultés consiste en effet à évaluer « rapidement » les performances d'un matériau ; on ne peut résoudre ce problème par une exposition réelle, dont les résultats ne seraient obtenus qu'au bout de plusieurs dizaines d'années. Des tests électrochimiques de corrosion accélérée ont donc été mis au point. Ils permettent de se placer dans des conditions artificielles en favorisant l'apparition rapide de la corrosion. Sans détailler les mécanismes, il



→ Réparations des piles de ponts endommagées par la corrosion (sel de déverglaçage).

apparaît clairement que, dans ce milieu « sévère », la différence de comportement entre l'acier (potentiel de piqûres fortement négatif - 500 mV/ECS*) et l'inox (potentiel de piqûres positif compris entre + 150 à + 700 mV/ECS suivant les nuances) est considérable.

LE PHÉNOMÈNE DE CORROSION GALVANIQUE

L'acier inox et l'acier au carbone peuvent être en contact électrique, ce qui pourrait conduire à des risques de corrosion galvanique, bien que le béton ne soit pas fortement conducteur.

Aussi longtemps que les deux matériaux sont dans un état passif (de non-corrosion), les potentiels pris par les deux matériaux sont peu différents dans les milieux alcalins ; la différence de potentiel de la « pile » ainsi formée est très faible, et il n'y a pas assez d'énergie pour créer un courant de corrosion. Les deux matériaux peuvent être ainsi couplés dans le cas d'un ouvrage neuf : l'inox dans des zones à risque d'infil-

tration de chlorures dans le béton et l'acier au carbone dans des zones plus protégées des agressions extérieures. Dans le cas où l'acier au carbone se corrode et où l'inox reste passif, il y a alors une vitesse de corrosion due au couplage galvanique entre les deux matériaux ; pour déterminer ce courant galvanique, des expériences ont été réalisées avec des éprouvettes de béton (rapport eau/ciment = 0,5), contenant par exemple cinq barres en acier au carbone et deux barres plus courtes en inox de nuance 316. Après un mois de « prise » du béton, les éprouvettes sont placées dans un test cyclique : deux jours dans une solution de NaCl 165 g/l (3M) + Ca(OH)₂ et cinq jours de séchage à l'air.

La principale tendance est la suivante : le courant de corrosion mesuré est quinze fois plus faible quand on considère l'ouvrage mixte réparé (acier carbone qui se corrode – inox), par rapport à l'ouvrage de référence entièrement composé d'acier au carbone. Le risque de corrosion galvanique, accélératrice de la corrosion de l'acier au carbone en présence d'inox, est donc particulièrement faible. ■

* ECS : électrode au calomel saturée (électrode de référence pour le test électrochimique).

L'innovation des constructions durables

Les armatures inox sont des matériaux innovants qui répondent pleinement à l'évolution des constructions en termes d'esthétique, de durabilité et de gestion responsable du patrimoine.

LES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES « DIFFÉRENCIANTES »

Les diverses nuances d'inox présentent une grande variété de propriétés physiques qui dépendent des éléments d'alliage présents. Beaucoup de ces propriétés diffèrent de façon significative de celles des aciers au carbone. Le tableau ci-dessous synthétise les propriétés et les spécificités des principales nuances d'inox.

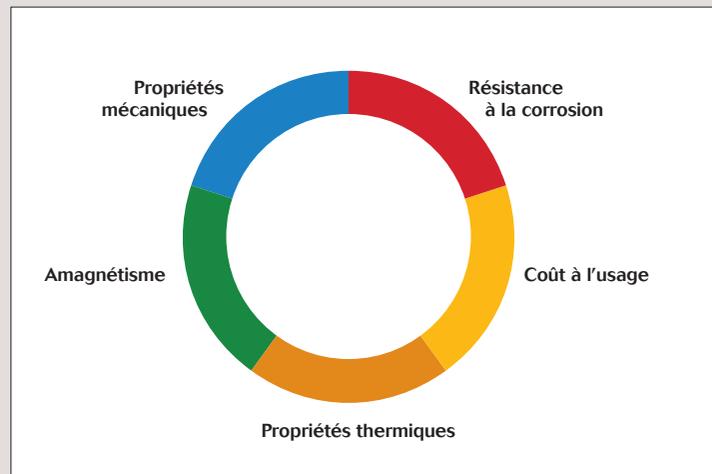
Conductivité thermique

La conductivité thermique moyenne des inox à 20 °C, mesurée en watt par mètre kelvin ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$), est de 15. Les éléments préfabriqués destinés à des bâtiments ou des structures devant être conformes aux nouvelles réglementations thermiques utilisent l'armature inox, qui offre l'avantage d'être trois à quatre fois moins conductrices que les aciers carbone. De plus, en diminuant les sections d'acier grâce aux propriétés mécaniques élevées des inox les transferts thermiques sont d'autant plus faibles. Les armatures inox sont devenues le matériau privilégié pour des applications telles que les rupteurs thermiques, les prémurs isolés et les systèmes d'ancrage pour les parois double peau.

Propriétés physiques

Type d'acier	Acier carbone	Inox austénitiques 304 316	Inox duplex 4062 4362 4462
Coefficient de dilatation linéique entre 20 °C et 100 °C ($10^{-6} K^{-1}$)	10	16	13
Conductivité thermique à 20 °C ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	40	15	15
Résistivité ($\Omega \cdot mm^2 \cdot m^{-1}$)	18-20	73-75	80
Module d'élasticité à 20 °C (GPa)	206	193-196	200
Magnétique	Oui	Non	Oui

K : unité des degrés kelvin.



Amagnétisme

Les inox austénitiques (types 304 ou 316) sont réputés comme étant « amagnétiques ». Ils peuvent présenter un léger magnétisme s'ils sont écrouis. Ces inox sont particulièrement recommandés dans des applications telles que les salles IRM en milieu hospitalier, les pistes d'atterrissage, les tours de contrôles aériens, les péages routiers...

LA RÉSISTANCE À LA CORROSION

L'armature inox est le procédé anticorrosion sur lequel le retour d'expérience est le plus ancien et le plus favorable pour la durabilité d'un ouvrage. La réalisation, en 1937, d'une digue en béton armée d'inox, dans le golfe du Yucatán au Mexique, témoigne de la grande longévité des armatures inox dans des milieux très agressifs, sans maintenance particulière. Parallèlement à

cet ouvrage, une structure similaire mais réalisé en béton armé d'acier au carbone dans les années 1970 a complètement disparu. Ainsi, les ouvrages en béton réalisés de par le monde dans des environnements agressifs sont, dans les parties particulièrement exposées, armés avec des armatures inox.



LES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES

■ **Caractéristiques mécaniques en traction** : du fait de leur structure métallurgique, les aciers austénitiques et duplex présentent des allongements à la rupture en traction et des rapports $R_m/R_{p0,2}$ élevés, à la fois à l'état recuit et écroui. Ils ont

donc une grande capacité à dissiper l'énergie en cas de déformations importantes, tout en conservant une résistance élevée. Cette caractéristique importante des inox austénitiques présente un intérêt tout particulier pour les ouvrages situés en zones sismiques.

À hautes températures, jusqu'à 500 °C, les inox austénitiques conservent de bonnes caractéristiques mécaniques en traction.

■ **Limites élastiques** : les valeurs des limites élastiques des inox duplex permettent d'optimiser le diamètre des sections et ainsi de réduire la quantité d'armatures nécessaires.

La section minimale d'armatures à mettre en place afin de maîtriser l'ouverture des fissures est définie dans l'article 7.3.2 de l'Eurocode 2. Elle est déterminée par une formule qui prend en compte, en particulier, la limite d'élasticité de l'armature. La répartition des armatures doit être régulière et l'espacement adapté à la dimension des pièces. Le diamètre maximal des barres et l'espacement maximal des barres en fonction de la contrainte de l'acier et de l'ouverture de la fissure sont aussi précisés dans l'article 7.3.2.

■ **Allongement** : le niveau élevé d'allongement maximum à la rupture ($A_{gt} \% > 8$) des inox austénitiques permet de répondre aux exigences d'utilisation dans les zones sismiques. Les nuances duplex garantissent un allongement mini $\geq 5 \%$.

Limite d'élasticité des armatures inox sur produits

Familles d'inox	Nuances (Appellations courantes)	Limite conventionnelle d'élasticité à 0,2 % en MPa			Limite conventionnelle d'élasticité à 0,2 % en MPa		
		Crantage à froid			Crantage à chaud		
		Ine 500	Ine 650	Ine 750	Ine 500	Ine 650	Ine 750
Austénitiques	304	X			X		
Austénitiques	316	X			X		
Duplex	4062	X	X		X		
Duplex	4362	X	X		X		
Duplex	4462	X	X	X	X	X	

■ **Résilience** : c'est la propriété d'un matériau à résister à la rupture fragile. L'essai Charpy permet de la caractériser, il consiste à mesurer l'énergie nécessaire pour rompre une éprouvette entaillée. Les inox austénitiques se distinguent des inox ferritiques et des aciers au carbone par leur niveau de résilience élevé à toute température. Ils ne présentent pas de transition ductile-

fragile entre 0 et - 20 °C et peuvent être utilisés jusqu'à des températures très basses (- 200 °C). Les inox duplex ont un comportement intermédiaire du fait de leur structure mixte.

LE COÛT GLOBAL

L'utilisation d'armatures en inox constitue une solution économique intéressante, dès que l'on cherche à optimiser le coût global d'un ouvrage. L'utilisation d'armatures en inox en substitution partielle renchérit le coût d'investissement de seulement quelques pour-cent du fait de l'écart de prix entre les deux matières. Ce surcoût est compensé par une diminution significative des frais d'inspection ainsi que par une diminution des coûts de maintenance et de réparation des ouvrages. L'analyse comparative en coût global doit tenir compte de l'ensemble

Quelques repères

- Les inox austénitiques et duplex ont des coefficients de dilatation supérieurs aux aciers carbone.
- La conductivité thermique des inox austénitiques et duplex est inférieure à celle des aciers carbone.
- La résistivité électrique des inox est nettement supérieure à celle des aciers carbone.

Type de nuances à utiliser en fonction des classes d'exposition

Classe d'exposition	Type de nuances	
	Duplex	Austénitiques
XO	Aucun risque de corrosion ou d'attaque	
XC1 à XC4	Corrosion induite par carbonatation	4 062 304
XD1 et XD2 XD3	Corrosion induite par les chlorures ayant une origine autre que marine	4 062 304 4 362 316
XS1 XS2 et XS3	Corrosion induite par les chlorures présents dans l'eau de mer	4 362 316 4 462 -
XF1 et XF2 XF3 et XF4	Attaques gel/dégel avec ou sans agent de déverglaçage	4 362 316 4 462 -
XA1 XA2 et XA3	Attaques chimiques	4 362 316 4 462 -

des coûts directs (de maintenance notamment) et aussi des coûts indirects (perturbations du trafic, pollutions atmosphériques et sonores générées par les travaux, surconsommation de carburants dans les embouteillages, risques accrus d'accident...) pendant la durée de service de l'ouvrage. Elle doit aussi intégrer l'allongement de la durée de vie

de l'ouvrage résultant de l'utilisation de l'inox. L'optimisation économique de la solution inox réside dans le choix de la nuance adaptée, dans l'optimisation des sections utilisées au regard des propriétés mécaniques des armatures inox et de son utilisation ciblée dans les parties d'ouvrage les plus exposées (premier lit d'armature, zones de marnage...). ■

L'optimisation de l'enrobage

CLASSES D'EXPOSITION

Les nouveaux textes normatifs relatifs aux ouvrages en béton prennent en compte la **durabilité** en s'appuyant sur la notion de **classe d'exposition**. Ces classes traduisent les actions dues à l'environnement auxquelles le béton et les armatures de l'ouvrage ou de chaque partie d'ouvrage vont être exposés pendant la durée d'utilisation de la structure.

ENROBAGE DES ARMATURES

Les recommandations de l'Eurocode 2 en matière d'enrobage des bétons de structures sont novatrices. La valeur de l'enrobage peut être optimisée en particulier si l'on utilise des armatures inox.

EXEMPLE D'OPTIMISATION DE LA VALEUR D'ENROBAGE EN UTILISANT DES ARMATURES INOX

Partie d'ouvrage d'une structure située en zone de marnage.

Classe d'exposition

- XS3 : zone de marnage ;
- XC4 : alternance d'humidité et de séchage.

Classe structurale

Les ouvrages situés en site maritime sont dimensionnés pour une durée d'utilisation de projet de 100 ans (classe structurale S6).

Prise en compte de la durabilité

La valeur de $C_{min,dur}$ est déterminée en fonction de la combinaison des classes d'exposition et de la classe structurale.

- XS3/S6 : $C_{min,dur} = 55$ mm.

- XC4/S6 : $C_{min,dur} = 40$ mm.

Type d'armature

L'utilisation d'armatures inox permet de réduire la valeur de l'enrobage. On peut prendre en compte *a priori* $\Delta C_{dur,st} = 25$ mm (voir tableau).

Enrobage minimal

- Armature acier au carbone : $C_{min} = 55$ mm.
- Armature inox : $C_{min} = 55 - 25 = 30$ mm.

Prise en compte des tolérances d'exécution

$\Delta C_{dev} = 10$ mm.

Enrobage nominal

- Armature au carbone : $C_{nom} = 65$ mm.
 - Armature inox : $C_{nom} = 40$ mm.
- L'utilisation d'armatures inox permet ainsi de réduire la valeur de l'enrobage de 25 mm. Il en résulte une économie de ressources naturelles (granulats en particulier) et de ciment. ■

Valeur recommandée $\Delta C_{dur,st}$ pour les armatures inox

Classe structurale	Classe d'exposition						
	XO	XC1	XC2 SC3	XC4	XD1 XS1	XD2 XS2	XD3 XS3
S4	0	0	0	0	5	10	15
S6	0	0	5	10	15	20	25