

BÉTON ARMÉ D'INOX

Le choix de la durée



BÉTON ARMÉ D'INOX

Le choix de la durée

Cet ouvrage est issu de la collaboration entre CIMBÉTON (Centre d'information sur le ciment et ses applications) et I.D. INOX (institut de développement de l'inox).

Les contributions à l'ouvrage

Aldo BENANI	COGNE ACCIAI SRL
Christophe BOURGIN	UGITECH
Éric CHAUVEAU	UGITECH
Pierre-Jean CUNAT	EURO-INOX
Bernard DEMELIN	UGITECH
Frédérique DOAT	I.D. INOX
Isabelle FONTENEAU	I.D. INOX
Thierry GASPARINI	AFBA DOMÈNE (GROUPE EXPERTON REVOLLIER)
Patrick GUIRAUD	CIMBÉTON
Louis-Jean HOLLEBECQ	AFCAB
Éric LEFEBVRE	BARTEC
François MOULINIER	I.D. INOX
Myriam OLIVIER	LES GRANDS ATELIERS DE L'ISLE D'ABEAU
Marie-Claude ORLANDI	UGITECH

Avant-propos

● Ce document technique s'adresse aux concepteurs et gestionnaires d'ouvrages en béton armé et en béton précontraint. Il est consacré à l'utilisation des armatures inox, en substitution totale ou partielle des armatures acier, afin de s'affranchir des phénomènes de corrosion, principale pathologie des ouvrages en béton.

Pour connaître l'offre

Ce guide présente les performances et les propriétés du matériau inox, en particulier ses caractéristiques mécaniques élevées et son inertie vis-à-vis du phénomène de corrosion. Il précise les domaines d'applications potentiels des armatures inox, en travaux neufs ou en réparation d'ouvrages, et propose les adaptations possibles des règles de dimensionnement à la lumière des évolutions des règlements européens (Eurocode 2). Il regroupe l'ensemble des informations techniques nécessaires pour prescrire, concevoir et réaliser des ouvrages ou des parties d'ouvrages utilisant ce type d'armature, et les recommandations essentielles pour une mise en œuvre adéquate.

Pour choisir la meilleure solution

Il apporte les éléments d'aide à la décision, et à la sélection des nuances d'inox à privilégier, en fonction des spécificités propres à chaque ouvrage et des contraintes environnementales auxquelles il sera soumis pendant sa durée de service. Il met le surcoût initial du matériau inox en rapport avec les économies de gestion et de maintenance que son emploi génère à moyen et long terme. Il montre qu'opter pour des armatures inox c'est investir pour pérenniser les structures, réduire les dépenses d'entretien et en faciliter l'exploitation.

Pour optimiser les résultats

Il recense les spécifications relatives à l'enrobage des armatures et à la maîtrise de la fissuration afin de satisfaire au mieux les exigences de durabilité. Il met en évidence l'intérêt de l'association du béton et des armatures inox, en s'appuyant sur une analyse technico-économique incluant la notion de coût global. Il montre que les armatures inox sont une solution pertinente pour une multitude d'ouvrages et parties d'ouvrages coulés en place ou préfabriqués, soumis à des contraintes environnementales pouvant générer des risques de corrosion.

Des informations complémentaires sur les performances des armatures inox ainsi que les références bibliographiques sont disponibles à la fin du document.

Sommaire

● I - Qu'est-ce que l'inox ?	7
1.1 - Généralités	8
1.2 - Définition d'un inox	9
1.3 - Différentes familles d'inox	9
1.4 - Différentes nuances d'inox	11
1.5 - Fabrication des inox	11
1.5.1 - Élaboration	12
1.5.2 - Coulée continue	13
1.5.3 - Transformation à chaud ou « laminage à chaud »	14
1.5.4 - Décapage	14
1.5.5 - Transformation à froid ou « laminage à froid »	16
1.6 - Propriétés physiques et caractéristiques mécaniques des inox	17
1.6.1 - Propriétés physiques	17
1.6.2 - Propriétés magnétiques	18
1.6.3 - Résilience	18
1.6.4 - Caractéristiques mécaniques en traction	19
1.7 - Désignation normalisée des inox	21
1.7.1 - Désignation européenne selon la norme NF EN 10088	21
1.7.2 - Désignation des inox pour armatures du béton selon la norme XP A 35-014	23

● 2 - L'inox, une solution pour la tenue à la corrosion des bétons armés	25
2.1 - Mécanismes de corrosion des armatures acier dans le béton	26
2.1.1 - Carbonatation	27
2.1.2 - Action des chlorures	28
2.1.3 - Effets de la corrosion	28
2.2 - Couche de passivation ou couche passive des inox	29
2.3 - Résistance à la corrosion des armatures inox dans le béton	30

● 3 - Classes d'exposition des bétons	35
--	-----------

● 4 - Milieux et ouvrages concernés par les bétons armés d'inox	39
4.1 - Classes d'exposition soumises à risque	40
4.2 - Domaines d'utilisation privilégiés du béton armé d'inox	40
4.3 - Autres utilisations présentant un intérêt	43

● 5	Spécificités des armatures inox	45
5.1	Fabrication des armatures inox	46
5.1.1	Crantage à chaud	46
5.1.2	Crantage à froid	47
5.1.3	Possibilités de fabrication	47
5.2	Contrôles de fabrication et conformité normative	48
5.2.1	Contrôles de fabrication	48
5.2.2	Conformité normative	48
5.3	Caractéristiques de forme	50
5.3.1	Armatures lisses	50
5.3.2	Armatures à verrous	50
5.3.3	Armatures à empreintes	51
5.4	Caractéristiques mécaniques en traction	51
5.5	Nuances d'inox en fonction de la limite conventionnelle d'élasticité	53
5.6	Sélection de la nuance d'inox selon la classe d'exposition des bétons	54
5.7	Caractéristiques dimensionnelles et masse linéique	55
5.8	Désignation des armatures	56
<hr/>		
● 6	Spécifications et dispositions constructives	57
6.1	Adhérence des armatures inox	58
6.2	Enrobage des armatures	59
6.2.1	Philosophie de l'enrobage selon l'Eurocode 2	59
6.2.2	Enrobage minimal	59
6.2.3	Position des armatures	62
6.3	Maîtrise de la fissuration	62
6.3.1	Valeur limite d'ouverture de fissure	62
6.3.2	Section minimale d'armatures	63
6.4	Principales dispositions constructives	64
6.4.1	Espacement des armatures	64
6.4.2	Diamètre admissible des mandrins pour le pliage des barres	64
6.4.3	Ancrages des armatures	65
6.4.4	Recouvrement des armatures	65
6.4.5	Utilisation de manchons de raccordement	66
6.5	Récapitulatif de la démarche à suivre par le concepteur	68
6.6	Rattachement à la réglementation	69

● 7 - Approche économique des ouvrages en béton armé d'inox	71
7.1 - Les armatures inox en France et dans le monde	72
7.2 - Atouts des armatures inox	73
7.2.1 - Intérêt des armatures inox	73
7.2.2 - Inox et développement durable	74
7.2.3 - Pérennité architecturale	75
7.3 - Optimisation des quantités de béton et d'acier	75
7.3.1 - Optimisation du volume de béton	75
7.3.2 - Optimisation de la quantité d'acier	76
7.3.3 - Optimisation des dimensions des éléments préfabriqués en béton	76
7.4 - Éléments d'analyse économique	77
7.4.1 - Caractéristiques générales de l'ouvrage	77
7.4.2 - Règlements de calculs	77
7.4.3 - Caractéristiques des matériaux	77
7.4.4 - Géométrie de l'ouvrage	78
7.4.5 - Estimation des quantités	78
7.4.6 - Schéma de ferrailage	79
7.4.7 - Hypothèses de prix unitaire des matériaux	79
7.4.8 - Bilan estimatif	80
7.5 - Utilisation adaptée à chaque ouvrage	82
7.6 - Approche en coût global	82
7.6.1 - Coûts directs	83
7.6.2 - Coûts indirects	83
7.6.3 - Calcul du coût global	84

● 8 - Utilisation des armatures inox pour la réparation d'ouvrages	85
8.1 - Principaux types d'ouvrages concernés	86
8.2 - Diagnostics de la corrosion	87
8.3 - Reconstitution de l'enrobage	87

Conclusion	89
-------------------	-----------

Les réponses à vos questions	91
-------------------------------------	-----------

● 9 - Annexes	101
Annexe 1 Caractéristiques géométriques des armatures inox	102
Annexe 2 Principales caractéristiques des armatures inox	105
Bibliographie	107
Normes et documents de référence	109

pour les automobilistes ainsi que pour les équipes de travaux exposées aux dangers du trafic, lorsqu'il est maintenu.

La diminution de la fréquence des interventions sur les ouvrages réduit proportionnellement ce type de coûts.

7.6.3 - Calcul du coût global

Afin de mener à son terme l'étude de coût, un logiciel* disponible sur CD-Rom permet de comparer, à partir des hypothèses proposées par le concepteur, le coût total d'un ouvrage sur la durée choisie pour différents matériaux. Ce logiciel combine les trois volets : coûts directs (voir le paragraphe 7.6.1), coûts indirects (voir le paragraphe 7.6.2) et coûts financiers à partir des données suivantes :

- coût du capital ;
- taux d'inflation ;
- durée de vie attendue ;
- pertes d'exploitation pendant les opérations de maintenance ;
- prise en compte des temps morts liés à l'entretien.

Il est accompagné d'exemples d'utilisation et d'exemples de coûts.

D'autres exemples figurent également dans une étude élaborée conjointement par Ove Arup et BSSA**

Il est possible de se procurer ce logiciel auprès de I.D.Inox – Immeuble Galilée – avenue Marcellin Berthelot – 44812 Saint Herblain CEDEX.

* Logiciel conçu par Euro-Inox, ICDA (International Chromium Development Association) et SASSDA (South African Stainless Steel Development Association).

** BSSA (British Stainless Steel Development Association) : <http://www.bssa.org.uk>

Qu'est-ce que l'inox ?

1.1 - Généralités

1.2 - Définition d'un inox

1.3 - Différentes familles d'inox

1.4 - Différentes nuances d'inox

1.5 - Fabrication des inox

1.6 - Propriétés physiques et caractéristiques mécaniques des inox

1.7 - Désignation normalisée des inox

Les inox sont utilisés pour leurs multiples propriétés mécaniques et physiques, et avant tout pour leur remarquable tenue dans les milieux agressifs. L'appellation « inox » recouvre une multitude de qualités d'inox capables de résister à des sollicitations très diverses comme la tenue aux températures extrêmes, la résistance à la corrosion, l'absorption des chocs, etc. Connaître les inox dans leur ensemble et savoir quelles sont leurs propriétés permet de faire des choix éclairés et d'opter pour la nuance la mieux adaptée à une application déterminée.

En métallurgie, les aciers sont répertoriés sous différentes appellations suivant leur composition chimique ; il est courant de parler des aciers inoxydables sous l'appellation générique « inox », les aciers non alliés étant communément appelés « aciers doux » ou « aciers au carbone ». Par convention et afin d'éviter toute confusion, nous désignerons dans cet ouvrage par « inox » tous les aciers inoxydables, le terme « acier » regroupant tous les autres aciers non inoxydables.

1.1 - Généralités

Les inox sont des alliages de fer et de carbone, dont l'élément principal est le fer et de ce fait ils appartiennent à la catégorie des aciers. Les aciers de cette famille, du fait de la présence d'autres éléments d'alliages tels que le chrome, le molybdène, le nickel, le manganèse, etc., présentent la particularité d'offrir une excellente résistance à la corrosion, d'où leur qualification d'inoxydable. Ces matériaux offrent – outre leur remarquable résistance à la corrosion – une palette de caractéristiques étendue.

Les inox sont des alliages, ce qui signifie que les éléments qui les constituent (le fer, le chrome, le nickel, etc.) ont été « assemblés » sous une forme telle que leur séparation individuelle n'est plus possible à partir du matériau ainsi élaboré : il en résulte des propriétés intrinsèques généralement très différentes de celle des éléments constitutifs.

1.2 - 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 éléments 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 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'existera 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.

1.3 - Différentes familles d'inox

Les très nombreux types d'inox – les normes en dénombrent plus de cent – sont répartis en différentes familles, chacune d'elle étant caractérisée par une structure métallurgique particulière.

Un métal pur (fer, cuivre, aluminium, etc.) est constitué d'un assemblage d'atomes disposés en édifices géométriques à haute symétrie, que l'on appelle « la structure cristalline » : elle n'est identifiable que par diffraction des rayons X.

Pour commencer, il convient d'examiner le fer pur. On constate que sa structure cristalline change en fonction de la température :

- elle est cubique centrée jusqu'à 910 °C ; cette structure est appelée structure « ferritique » ;

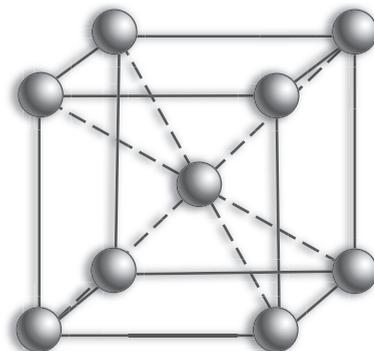


Figure n° 1 : structure ferritique

- elle est cubique à faces centrées de 910 °C à 1 400 °C ; cette structure est appelée « structure austénitique » ;
- la structure du fer redevient cubique centrée de 1 400 °C jusqu'à la fusion.

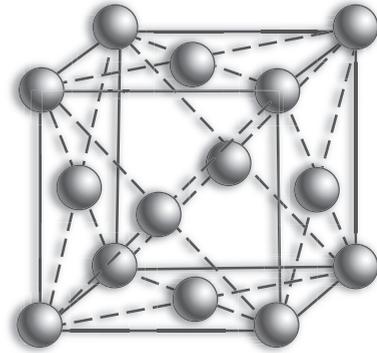
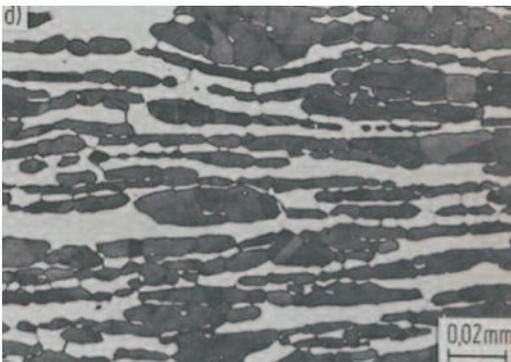


Figure n° 2 : structure austénitique

Dans le cas des inox, sur des structures de base identiques à celles du fer, certains éléments non ferreux, comme le chrome, le nickel, le molybdène, etc., se substituent aux atomes de fer dans ces différents édifices cristallins. Ces substitutions vont modifier les températures d'apparition des différentes structures décrites ci-dessus : sur les inox, en fonction de leur composition chimique, certaines structures peuvent exister à température ambiante. Ainsi :

- le chrome, le silicium, le molybdène, etc., favorisent la formation d'une structure cubique centrée appelée structure ferritique ;
- le nickel, le manganèse, l'azote, etc. favorisent la formation d'une structure cubique à faces centrées appelée structure austénitique ;
- l'accroissement de la teneur en carbone peut conduire à la formation d'une nouvelle structure appelée structure martensitique ; la « martensite » est obtenue par un réchauffage à haute température (d'un inox riche en carbone) suivi d'un refroidissement rapide appelé « trempe » ;
- enfin, certains inox de composition particulière possèdent une structure biphasée austénite plus ferrite appelée communément structure austéno-ferritique ou « duplex ».



Micrographie d'une structure austéno-ferritique : on observe deux phases l'une ferritique (foncé) l'autre austénitique (clair).

À chacune des structures cristallines décrites ci-dessus correspond une famille d'inox. Ainsi, les inox font l'objet d'une norme NF EN 10088 (-1-2-3), qui distingue quatre familles :

- les inox ferritiques (structure ferritique) ;
- les inox austénitiques (structure austénitique) ;
- les inox martensitiques (structure martensitique) ;
- les inox austéno-ferritiques ou « duplex », mélange de ferrite et d'austénite (structure ferritique plus structure austénitique).

1.4 - Différentes nuances d'inox

À l'intérieur de chaque famille – définie par sa structure cristalline – il existe plusieurs types d'inox, ou « nuances », qui se distinguent les uns des autres par de légères différences de composition chimique. D'une nuance à l'autre, les variations de composition chimique ont une influence parfois notable sur les propriétés d'usage ou de mise en œuvre ; il en résulte une multitude de nuances adaptées à des domaines d'utilisation très divers, par exemple :

- si le nickel est supérieur à 10 %, la nuance présente des facilités de déformation ;
- l'addition de molybdène (quelques pour cent), permet d'obtenir des inox plus résistants dans les milieux agressifs chargés en chlorures ;
- le niobium accroît la résistance au fluage ;
- le titane améliore la résistance à certains types de corrosion, en particulier sur les assemblages soudés ;
- une augmentation de la teneur en chrome améliore globalement la résistance à la corrosion.

1.5 - Fabrication des inox

Les inox sont élaborés, affinés puis coulés avant d'être laminés et décapés. Ils sont commercialisés sous forme de tôles (produits plats) ou de barres/fils (produits longs). Suivant le type de produit final (barres/fils ou tôles), les sidérurgistes n'utilisent pas les mêmes outils pour couler et laminier le métal. Comme les armatures inox sont obtenues exclusivement à partir de barres et de fils, nous détaillerons uniquement la fabrication des inox dans ces formats.

1.5.1 - Élaboration

Le processus d'élaboration des inox est analogue à celui de tous les aciers élaborés dans un four électrique. Les matières premières sont constituées d'une « charge » métallique, mélange de ferrailles sélectionnées, de chutes d'inox et de ferro-alliages (ferrochrome, ferronickel, etc.). Les proportions des divers constituants sont dosées de manière à approcher la composition chimique de la nuance d'inox à élaborer.

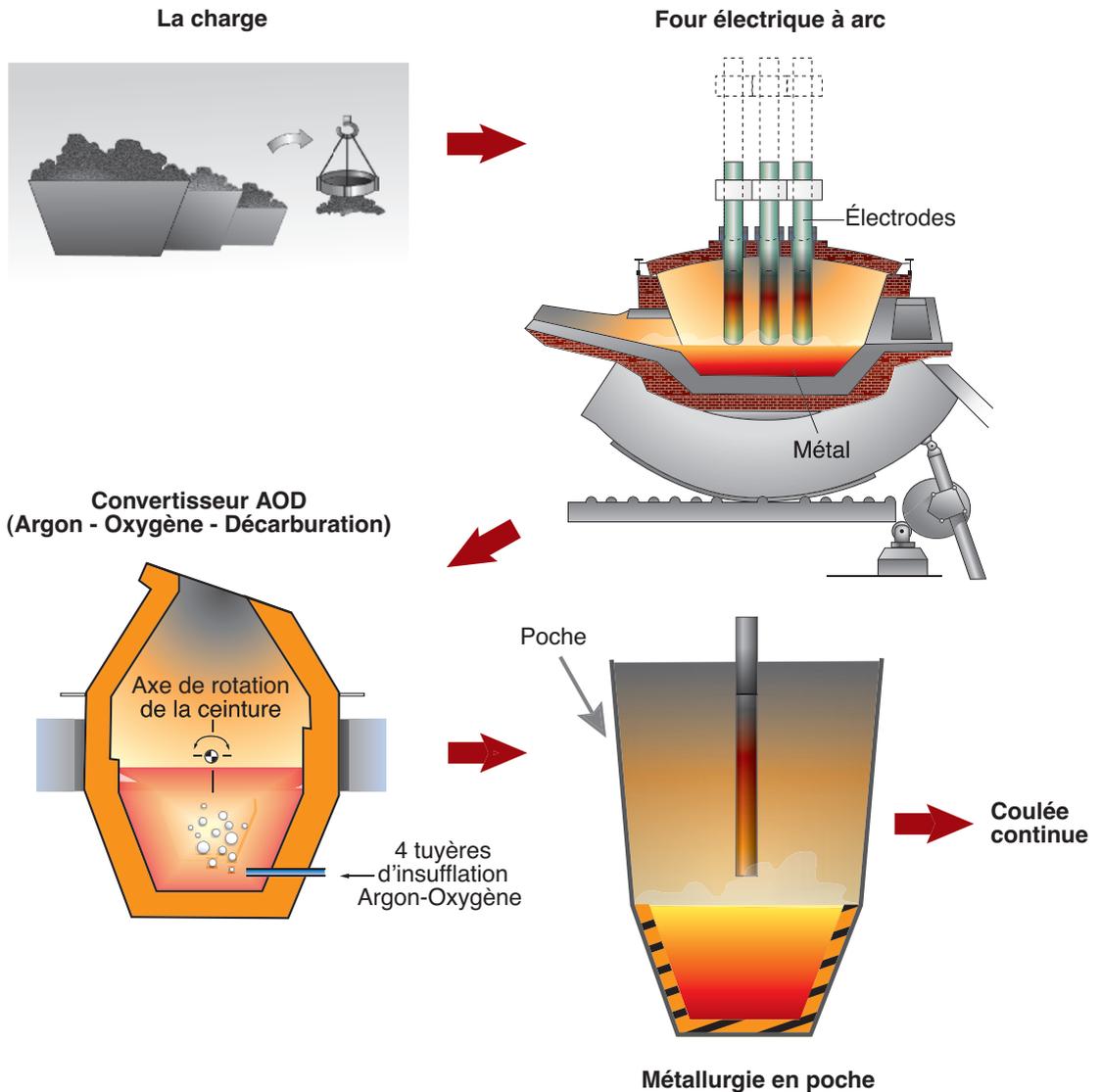


Figure n° 3 : processus d'élaboration

La charge est fondue dans un creuset équipé de trois électrodes en carbone, après amorçage d'un arc électrique: c'est le procédé du « four à arc ». En fin de fusion, la composition du métal est généralement assez voisine de l'analyse visée, à l'exception de la teneur en carbone, à ce stade trop élevée. La diminution de la teneur en carbone s'effectue par insufflation d'oxygène sous flux d'argon au cœur du bain en fusion. Cette opération se réalise dans un creuset appelé réacteur « AOD » (Argon Oxygen Decarburation). On procède également à certains ajustements d'analyse et de température ainsi qu'à l'élimination du soufre en excès (désulfuration). Au final, le métal est transféré vers la métallurgie en poche (MEP) où sont procédés les ultimes réglages de composition chimique et de température avant la coulée finale.

1.5.2 - Coulée continue

Au cours de cette opération, le métal est solidifié, refroidi et mis en forme en demi-produit, appelé « bloom ». Le principe consiste à alimenter en métal liquide une lingotière sans fond, en cuivre, refroidie abondamment, au travers de laquelle le métal est extrait progressivement à des vitesses de l'ordre de 1 m/min. La section de la lingotière peut être carrée (exemple: 200 x 200 mm) ou ronde (de diamètre 100 à 150 mm).

En sortie de lingotière, seule la peau du produit est solidifiée alors que le cœur est encore liquide. La poursuite du refroidissement est assurée par des rampes de gicleurs positionnées sous la lingotière. Ce n'est qu'à environ 10 m sous la lingotière que le produit est complètement solidifié: il est alors débité par oxycoupage en blooms de plusieurs mètres de long.

Coulée du métal liquide.



1.5.3 - Transformation à chaud ou « laminage à chaud »

Les blooms ou demi-produits sont transformés par laminage à chaud. Il s'agit d'une succession d'opérations de réduction de section (appelées « passes de laminage ») par écrasement entre des cylindres de laminage.



Laminage à chaud du fil machine.

Afin de limiter les efforts nécessaires et d'obtenir des réductions de section cumulées très importantes, les blooms sont rendus plus malléables par réchauffage à une température variant de 1 100 °C à 1 300 °C selon les nuances d'inox.

Ils passent ensuite dans un « train de laminage continu », comprenant :

- un four de réchauffage ;
- des cages de dégrossissage ;
- des cages intermédiaires (à deux ou trois cylindres de laminage) ;
- un « bloc à fil » pour les petites dimensions ;
- des installations de refroidissement pour les barres et de mise en couronne pour les fils.

En une seule succession de passes, les demi-produits sont transformés directement en barres ou en fils jusqu'à des diamètres de 5,5 mm.

Dans le cas des armatures pour bétons crantées à chaud, ce sont les cylindres de la dernière passe de laminage qui impriment les verrous sur la barre pour lui donner sa géométrie finale.

1.5.4 - Décapage

L'inox présente une surface dont la structure physico-chimique diffère du reste du matériau. Cette surface est composée d'une très fine pellicule d'oxydes et d'hydroxydes de chrome de quelques Angströms d'épaisseur (échelle atomique) – appelée couche de passivation – qui se forme spontanément au contact de l'air. Elle fait partie intégrante du matériau et assure à l'inox sa résistance à la corrosion car elle est auto-restituante, ce qui signifie que toute « blessure » de l'inox, engendrée par

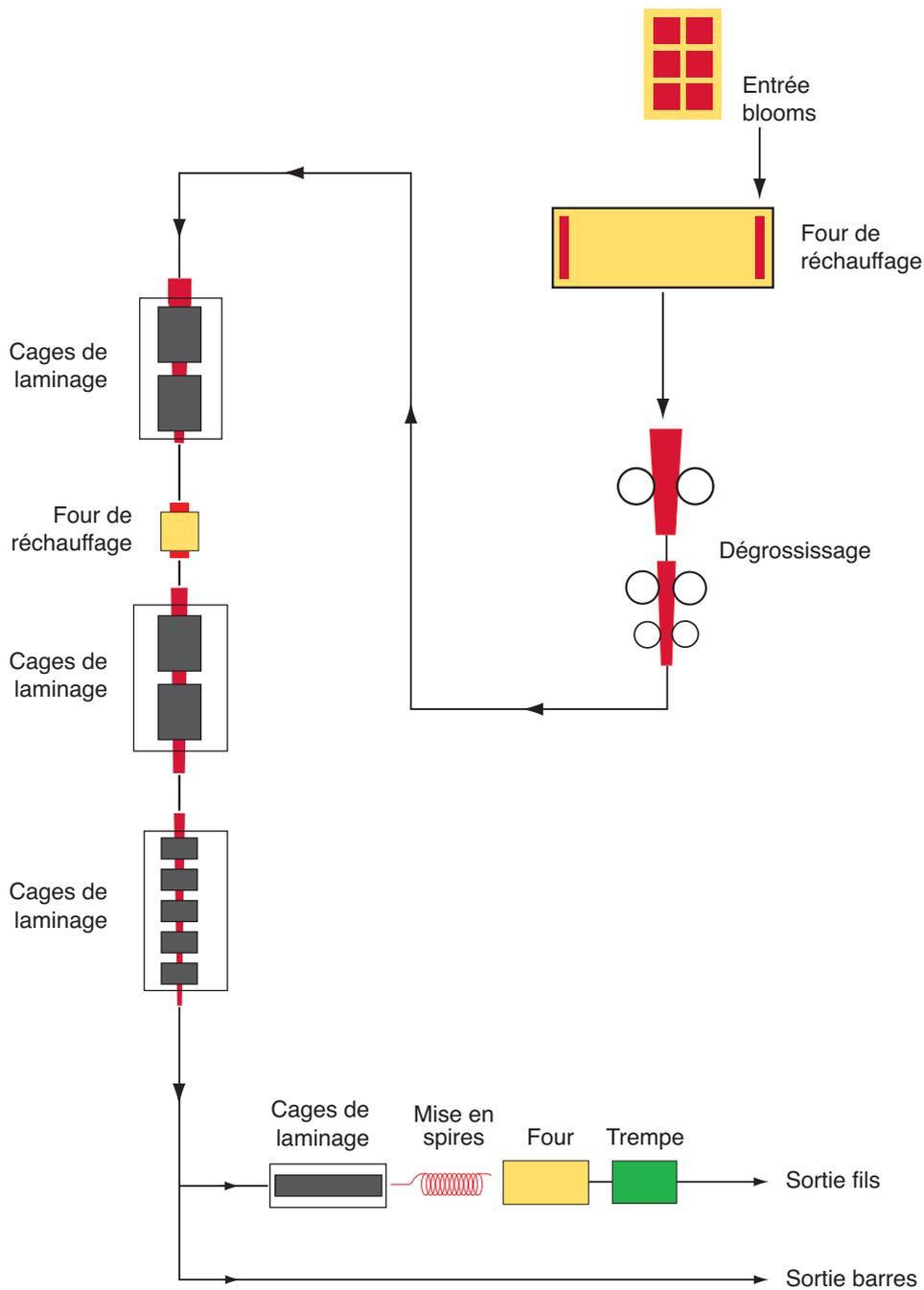


Figure n° 4: schéma d'un laminoir à chaud

un phénomène mécanique (perçage, sciage, rayure, etc.), sera suivie par la reformation quasi instantanée et naturelle – par simple contact avec un milieu oxydant tel que l'air ambiant – d'une nouvelle couche passive protectrice dans la zone affectée.

Au cours du laminage à chaud, la surface de l'inox réagit avec le milieu extérieur pour former différentes couches, plus ou moins épaisses, d'oxydes formés à chaud. Les inox sont donc décapés, afin d'éliminer ces couches d'oxydes (température supérieure à 800 °C). Ils retrouvent alors leur couleur métallique.

Le décapage vise à éliminer, par action mécanique ou chimique, les oxydes superficiels qui se sont formés à chaud lors du laminage, s'opposant ainsi à la formation spontanée de la couche de passivation, véritable bouclier de l'inox contre les agressions extérieures. Le décapage mécanique se pratique par meulage, brosseuse ou le plus souvent par grenailage. Le décapage chimique se pratique en plongeant le métal dans des solutions d'acides forts dont la nature et la composition sont adaptées, en particulier, à la nuance d'inox et au volume de métal à traiter.

Après décapage, la couche passive de l'inox peut se reconstituer au contact de l'air ambiant. Cette couche est si fine qu'elle est invisible à l'œil, ce qui explique que l'on n'observe après sa formation aucun changement de couleur.

1.5.5 - Transformation à froid ou « laminage à froid »

Le cycle de transformation à froid des produits longs inox (barres/fils) est plus ou moins complexe selon les produits finaux à obtenir. On distingue :

- les opérations d'enlèvement de matière en surface des barres (écrouissage, tournage, rectification) ou des fils (rasage) ;
- les opérations de réduction de section à travers une filière : tréfilage du fil ou étirage de barres ;
- le laminage à froid entre cylindres lisses ou crantés (cas des armatures pour béton armé).

La déformation à froid entraîne un écrouissage du métal qui augmente sa résistance à la rupture et sa limite d'élasticité : ce phénomène confère aux armatures en inox crantées à froid leur résistance mécanique élevée.

Des traitements thermiques intermédiaires ou finaux sont parfois nécessaires pour adoucir le métal (recristallisation). Leur but est également de supprimer toute zone

déchromée susceptible d'entraîner un risque de corrosion intergranulaire. Ils sont généralement suivis d'une opération de décapage ou d'un enlèvement de matière en surface par usinage afin de retrouver un état de surface parfait.

L'ensemble de ces opérations a pour but :

- de livrer un état de surface propre ;
- d'obtenir des caractéristiques dimensionnelles (diamètre, rectitude) avec des tolérances serrées ;
- de donner au produit les caractéristiques mécaniques voulues (par traitement thermique ou par écrouissage à froid).

1.6 - Propriétés physiques et caractéristiques mécaniques des inox

Les nuances d'inox présentent une grande variété de propriétés physiques et de caractéristiques mécaniques qui dépendent des éléments d'alliage présents. Beaucoup de ces propriétés diffèrent de façon significative de celles des aciers. Voici un aperçu non exhaustif de ces propriétés et des spécificités de certaines nuances d'inox.

1.6.1 - Propriétés physiques

Tableau n° 1 : propriétés physiques

Structure	Acier	Inox ferritique	Inox austénitique	Inox austéno-ferritique
Coefficient de dilatation linéique entre 20 °C et 100 °C ($10^{-6}K^{-1}$)	10	10	16	13
Conductivité thermique à 20 °C ($W.m^{-1}K^{-1}$)	40	25	15	15
Résistivité ($\% .mm^2 m^{-1}$)	18 – 20	60	73 – 75	80
Module d'élasticité à 20 °C (GPa)	206	206	193 – 196	200

K = unité des degrés Kelvin

Quelques repères.

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

1.6.2 - Propriétés magnétiques

Les propriétés magnétiques des différentes familles inox sont liées à leur structure métallurgique.

	<i>Inox ferritique</i>	<i>Inox austénitique</i>	<i>Inox austéno-ferritique</i>
Magnétique	oui	non	oui

Les inox ferritiques sont ferromagnétiques.

Les inox austénitiques sont amagnétiques, mais peuvent présenter un léger magnétisme s'ils sont écrouis. Ces inox sont particulièrement recommandés dans des applications telles les salles IRM en milieu hospitalier, les pistes d'atterrissage, les tours de contrôles aériens, les péages routiers, etc.

Les inox austéno-ferritiques sont magnétiques, du fait qu'ils contiennent une proportion importante de ferrite dans leur structure.

1.6.3 - Résilience

C'est la propriété d'un matériau à résister à la rupture fragile. Le moyen classique utilisé pour la caractériser est l'essai Charpy, qui consiste à mesurer l'énergie nécessaire pour rompre une éprouvette entaillée.

Les inox austénitiques se distinguent des inox ferritiques et des aciers par leur niveau de résilience élevé à toute température. Ils ne présentent pas de transition

ductile-fragile entre 0 et $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ et peuvent être utilisés jusqu'à des températures très basses ($-200\text{ }^{\circ}\text{C}$). Les inox austéno-ferritiques ont un comportement intermédiaire du fait de leur structure mixte.

1.6.4 - Caractéristiques mécaniques en traction

Du fait de leur structure, les aciers austénitiques et austéno-ferritiques présentent des allongements à la rupture en traction et des rapports $R_m/R_{p0,2}$ élevés, à la fois à l'état adouci 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 constructions d'ouvrages en zones sismiques.

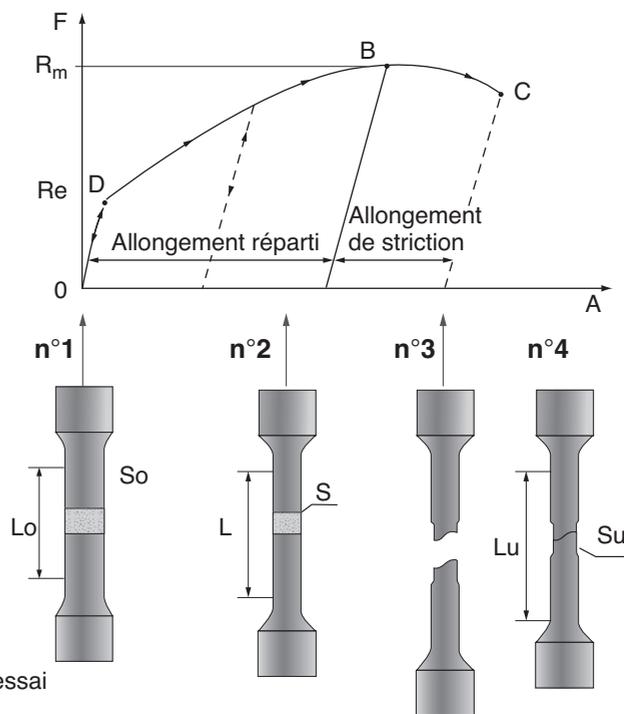
À hautes températures, jusqu'à $500\text{ }^{\circ}\text{C}$, les inox austénitiques conservent de bonnes caractéristiques mécaniques en traction.

L'essai de traction sur acier

L'essai de traction sert à déterminer :

- la résistance maximale à la traction (R_m) ;
- l'allongement à la rupture (A) ;
- l'allongement total sous force maximale (A_{gt}) ;
- la limite d'élasticité apparente (R_e).

Ces valeurs sont utilisées, en particulier, pour la dénomination des armatures pour béton.



- L_0 : Longueur initiale
- S_0 : Section initiale de l'éprouvette
- S : Section de l'éprouvette en cours d'essai
- S_u : Section finale à rupture – striction
- L_u : Longueur ultime

Figure n° 5: Principe de l'essai de traction

Pour déterminer ces grandeurs, on exerce sur une éprouvette 1 des efforts croissants de traction jusqu'à rupture. La zone (L_0) est repérée sur l'éprouvette au préalable et sert de référence après allongement de cette dernière (cf. figure 5, éprouvette n° 1).

L'effort (F) et l'allongement (A %) sont mesurés directement lors de l'essai de traction.

- La limite apparente d'élasticité $R_e = F_e/S_0$ (portion OD de la courbe) est égale à la charge maximale (repère D), exprimée en MPa, en deçà de laquelle l'éprouvette reprend sa longueur initiale quand l'effort de traction cesse (domaine élastique).
- La résistance à la rupture $R_m = F_{max}/S_0$ (portion DB de la courbe) est égale à la charge maximale (repère B), exprimée en MPa, que peut supporter le métal sans se rompre (domaine plastique) (cf. figure 5, éprouvette n° 2).
- L'allongement $A = (L-L_0)/L_0 \times 100$ est égal à l'augmentation de la longueur de l'éprouvette avant striction (allongement réparti maximum), exprimé en pourcentage (cf. figure 5, éprouvette n° 2).
- * L'allongement après rupture $A = (L_u-L_0)/L_0 \times 100$ (exprimé en pourcentage) est égal à l'augmentation de la longueur de l'éprouvette. L'allongement maximum correspond à la longueur de l'éprouvette après rupture (L_u), exprimée en pourcentage (cf. figure 5, éprouvette n° 4).
- * L'allongement total sous force maximale ou A_{gt} correspond à l'augmentation de la longueur de l'éprouvette, exprimée en pourcentage, lorsqu'on atteint R_m (point B de la courbe).

Remarque: Dans la zone BC, on observe, outre l'allongement, une déformation locale de l'éprouvette (diminution de section ou « striction ») qui conduit à la rupture au point C (cf. figure 5, éprouvette n° 3).

Cas des inox austénitiques

Les inox austénitiques ne présentent pas de limite apparente d'élasticité (appelée également limite d'écoulement) très nette. De ce fait, par convention, la norme définit une charge unitaire à la limite conventionnelle d'élasticité, appelée $R_{p0,2}$. Elle correspond à l'effort unitaire tel, qu'après suppression de l'effort, le métal garde un allongement permanent donné de 0,2 % (voir la figure 6).

Dans les normes européennes (NF EN 10088-2 et NF EN 10088-3) les limites d'élasticité de toutes les familles d'inox sont définies par la charge à la limite conventionnelle d'élasticité $R_{p0,2}$. Cette appellation remplace la définition R_e , habituellement utilisée pour les aciers.

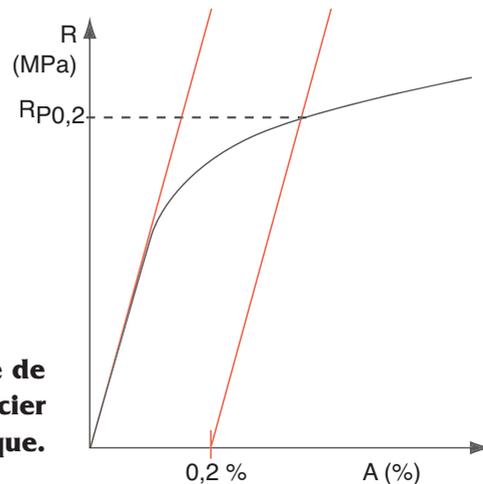


Figure n° 6: courbe de traction sur un acier inoxydable austénitique.

1.7 – Désignation normalisée des inox

1.7.1 - Désignation européenne selon la norme NF EN 10088

La norme propose deux types de désignations.

La désignation symbolique

Elle donne la composition chimique des principaux éléments d'alliage de la nuance considérée.

Exemple : X2CrNiMoN 22-5-2

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 %.

Le premier nombre 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 (voir tableau 2) rangés par ordre décroissant de teneurs.

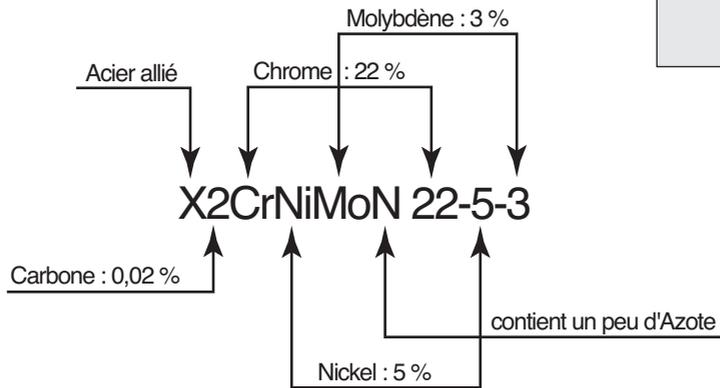
Les nombres en fin de désignation (séparés par des traits d'union) correspondent aux teneurs moyennes des éléments d'alliage. Ces nombres sont rangés dans l'ordre des symboles des éléments qui précèdent.

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.

Tableau n° 2 : symbole des éléments d'alliages

Cr	: chrome
Ni	: nickel.
Mo	: molybdène
Nb	: niobium
Ti	: titane
Cu	: cuivre
Zr	: zirconium
N	: azote
Al	: aluminium
V	: vanadium
W	: tungstène
S	: soufre
Si	: silicium

Exemple de désignation symbolique

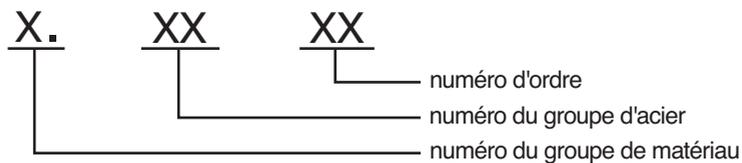


La désignation numérique

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

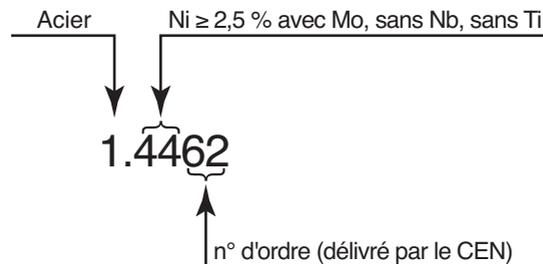
Exemple : 1.4462

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).

Exemple de désignation numérique



1.7.2 - Désignation des inox pour armatures du béton selon la norme XP A 35-014

Dans la norme XP A 35-014 « Aciers pour béton armé – Barres et couronnes lisses, à verrous ou à empreintes en acier inoxydable » les armatures pour béton armé sont répertoriées suivant une appellation de type InEx, dans laquelle x représente un nombre correspondant à la limite d'élasticité spécifiée du produit.

Pour les armatures inox, les désignations rencontrées sont InE235, InE500, InE650, InE800.

Cette désignation pour béton armé peut être complétée entre parenthèses par la désignation symbolique ou numérique de la nuance d'inox.

Exemple : InE500 (1.4301) ou InE500 (X5CrNi18-10).

L'inox, une solution pour la tenue à la corrosion des bétons armés

- 2.1 - Mécanismes de corrosion des armatures acier dans le béton**
- 2.2 - Couche de passivation ou couche passive des inox**
- 2.3 - Résistance à la corrosion des armatures inox dans le béton**

La résistance à la corrosion de tout matériau utilisé pour la réalisation d'un bâtiment ou d'une structure du génie civil est une propriété nécessaire mais qui peut cependant être perturbée, dans certaines conditions, par des agressions environnementales. Il peut donc survenir des phénomènes de corrosion dans les bétons armés.

L'inox, parce qu'il présente une bonne résistance à la corrosion, permet de s'affranchir de ces phénomènes.

2.1 - Mécanismes de corrosion des armatures acier dans le béton

Dans des conditions normales, les armatures 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 $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{CaO}$ (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 de l'ordre de 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 ;
- 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.

2.1.1 - Carbonatation

La carbonatation du béton par le gaz carbonique de l'air (CO_2) est un phénomène naturel qui n'est pas nocif pour le béton. Au cours de la prise et du durcissement, les ciments se combinent avec l'eau pour former des produits hydratés de caractère basique. Certains de ces produits [KOH , NaOH et $\text{Ca}(\text{OH})_2$] restent dissous dans la solution aqueuse interstitielle du béton (dont le pH est compris entre 12 et 13). Le gaz carbonique contenu dans l'air a tendance à se combiner avec les produits hydratés, en commençant par les bases alcalines dissoutes dans la solution aqueuse interstitielle, en particulier le $\text{Ca}(\text{OH})_2$, selon une réaction produisant de carbonate de calcium CaCO_3 :

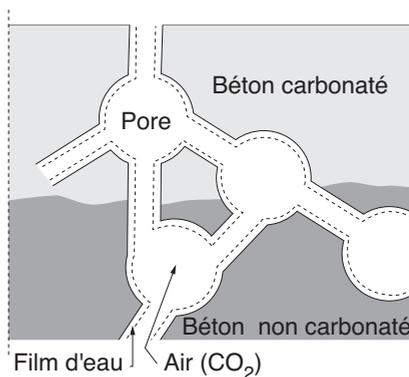


Le milieu basique (pH 12 à 13) se trouve progressivement modifié par la neutralisation de l'alcalinité du ciment pour atteindre un pH de l'ordre de 9, n'assurant plus la protection des armatures et entraînant une dépassement de l'acier (destruction de la couche de passivation), ce qui développe la réaction d'oxydation à la surface des armatures.

La progression de la carbonatation se fait de l'extérieur de l'ouvrage, en contact avec l'air ambiant, vers l'intérieur. Dans un premier temps, la vitesse de propagation est ralentie par la formation des carbonates qui colmatent partiellement la porosité. Elle diminue donc avec la profondeur atteinte. Dans un second temps, la carbonatation a pour conséquence une neutralisation (chute du pH de la solution interstitielle) du milieu de protection des armatures, qui peuvent alors s'oxyder. La cinétique du processus dépend de la teneur en dioxyde de carbone et de la facilité avec laquelle le gaz carbonique pénètre dans les pores du béton.

Cette progression est fonction de paramètres liés aux caractéristiques du béton (nature et dosage du ciment, dosage en eau, porosité et perméabilité) et au milieu environnant. Plus le béton est compact, le dosage en ciment élevé, le rapport eau/ciment faible et la résistance du béton élevée, plus la progression du front de carbonatation est lente. Tout ce qui conduit à diminuer la porosité du béton retarde l'échéance de dépassement des armatures.

L'humidité relative de l'air joue, en particulier, un rôle important : la vitesse de carbonatation est maximale pour une humidité relative de l'ordre de 60 %, pratiquement nulle en atmosphère sèche ou pour des bétons complètement saturés en eau. La profondeur de carbonatation d'un béton est donc fonction de sa composition, de sa structure poreuse et de la classe d'exposition dans laquelle est situé l'ouvrage.



2.1.2 - Action des chlorures

L'action des chlorures est spécifique à certains environnements dans lesquels peut se trouver le béton comme les ouvrages soumis aux sels de déverglaçage ou situés en site maritime (zone de marnage, surfaces soumises aux embruns). Les ions chlorures peuvent pénétrer par diffusion ou migrer par capillarité à l'intérieur du béton, franchir la zone d'enrobage, atteindre les armatures, « dépassiver » l'armature acier et provoquer des corrosions (par mécanisme de dissolution du métal suivant une réaction d'oxydoréduction : métal \rightarrow ions métalliques $M^{n+} + n$ électrons), d'abord ponctuelles (corrosion par piqûres) puis généralisées à toute la surface de l'acier (corrosion généralisée par piqûres). La vitesse de pénétration des chlorures dépend en particulier de la porosité du béton. Elle décroît lorsque le rapport eau/ciment diminue.

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 à 0,5 % par rapport au poids du ciment. Il est atteint plus rapidement si le béton est carbonaté.

2.1.3 - 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) préconisés 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.

2.2 - Couche de passivation ou couche passive des inox

La fabrication d'un métal ou d'un alliage s'accompagne toujours de la formation spontanée d'un oxyde en 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 quasiment tout échange entre le métal et l'extérieur : en cas d'incident sur le matériau (éraflure, découpe, choc, perçage, déformation, etc.), elle se reforme spontanément. Cette autostructuration est aussi appelée « repassivation ». Les inox sont neutres vis-à-vis de l'environnement.

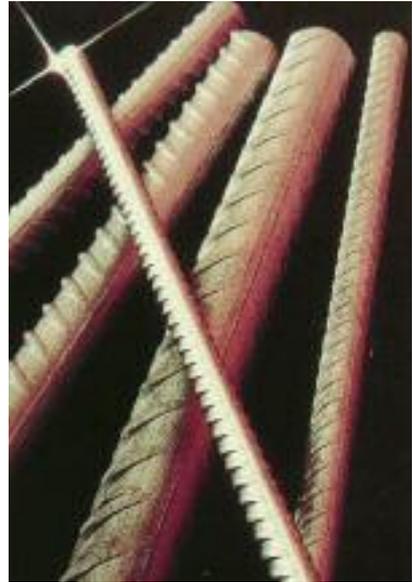
L'inertie

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 (comme le 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.

Pendant dans certaines conditions, certains éléments tels les chlorures déstabilisent localement la couche passive, suivant :

- leur concentration ;
- la température du milieu ;
- la nuance de l'inox.

C'est pourquoi, connaître les conditions environnementales dans lesquelles l'inox est utilisé permet de choisir la bonne nuance : il existe des inox pratiquement 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.



2.3 - Résistance à la corrosion des armatures inox dans le béton

Lorsqu'il y a corrosion sur les armatures aciers, 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.

Ce phénomène a été démontré par de nombreux chercheurs de différents pays. Les références bibliographiques de cet ouvrage listent les différentes recherches de la littérature internationale et les expériences françaises illustrant la résistance à la corrosion de l'inox dans le béton. 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.

Exemple de test

Nous proposons un exemple de résultats obtenus par le centre de recherches d'UGITECH à partir d'un test électrochimique. Dans cette étude, le critère d'évaluation du comportement en résistance à la corrosion est le potentiel de piqûres.

Un potentiel électrochimique représente l'énergie qu'il faut appliquer à un matériau pour qu'il se corrode par piqûres. Plus le potentiel de piqûres est élevé, plus la résistance à la corrosion est importante.

Milieu d'essai

Dans l'essai suivant, le milieu choisi est un milieu « sévère » :

- carbonatation du béton ;
- pH égal à 10 ;
- teneur élevée en chlorures (35 g/l) ce qui correspond au niveau moyen présent dans l'eau de mer.

Paramètres de l'essai

- Matériaux testés :

acier – 1.4597 – 1.4301 (AISI 304) – 1.4404 (AISI 316) – 1.4462

- Milieux utilisés :

solution aqueuse NaHCO_3 0,025M + Na_2CO_3 0,025M + NaCl 35 g/l à pH = 10

- Test réalisé :

test électrochimique de détermination du potentiel de piqûres sur courbe de polarisation.

Résultats : potentiels de piqûres (en mV/ECS*) dans un milieu carbonaté à pH = 10

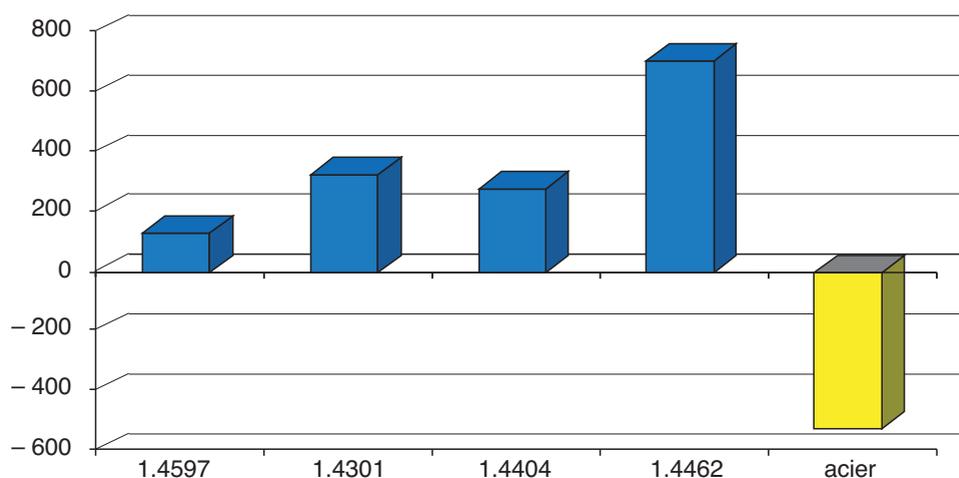


Figure n° 7 : comparaison du comportement des inox et de l'acier durant un test électrochimique en milieu carbonaté chloruré.

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



Armatures inox.

Conclusion

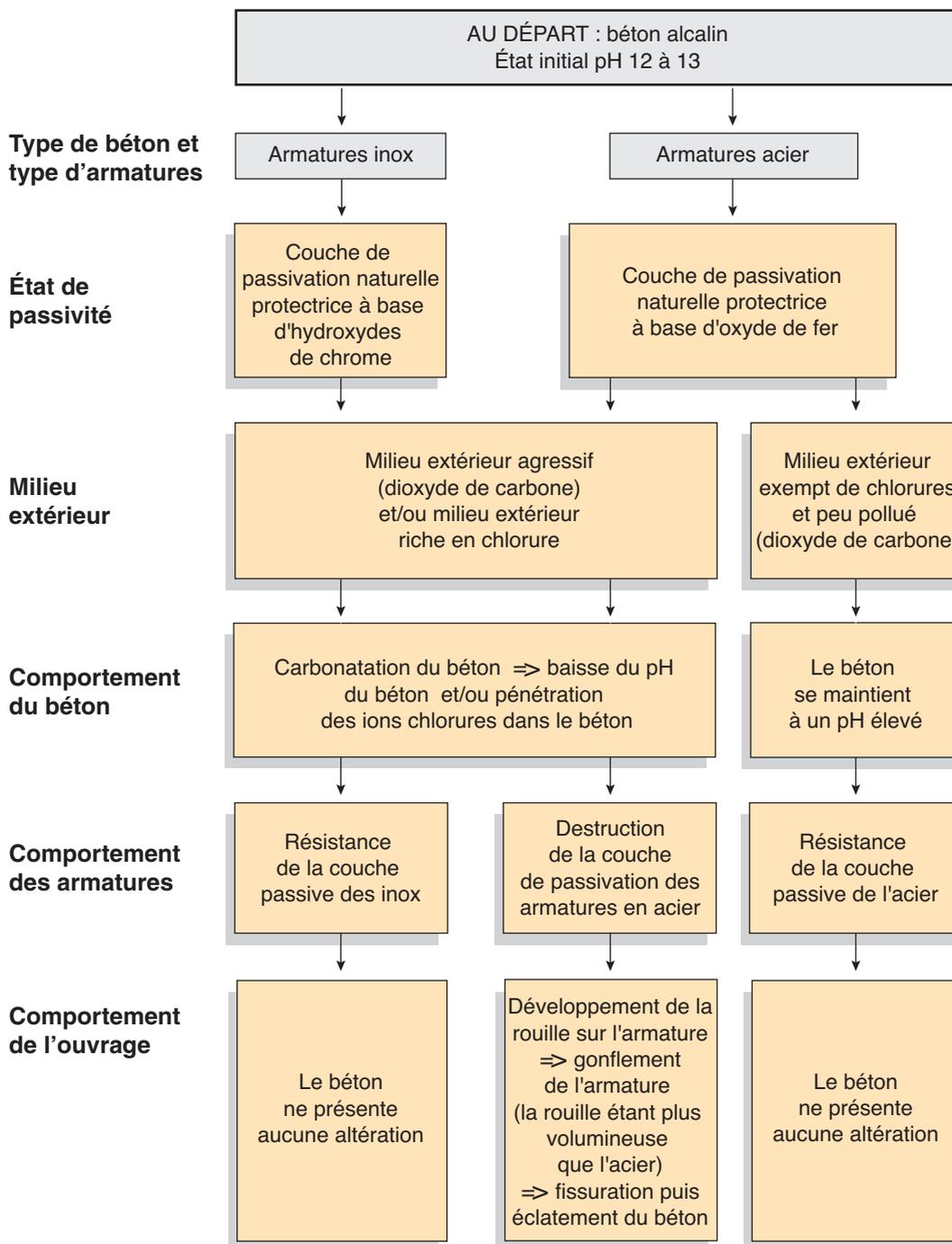
Plus le potentiel de piqûres est élevé, meilleure est la résistance à la corrosion par piqûres donc le comportement du matériau.

Sans détailler les mécanismes, il 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.

Cependant, les différentes nuances d'inox n'ont pas toutes le même comportement. Le choix de la meilleure nuance pour une construction donnée est à faire avec l'aide de spécialistes et des producteurs d'inox en fonction de différents critères : performances, prix, classe d'exposition, etc.

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

Schéma synthétique des mécanismes de corrosion sur les armatures pour béton





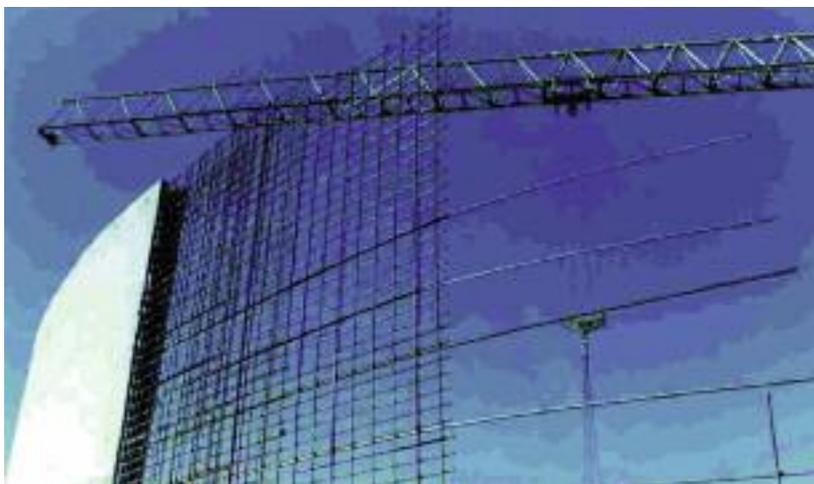
Chapitre

3

Classes d'exposition des bétons

3 • Classes d'exposition des bétons

Les bétons ont été longtemps spécifiés simplement par leurs performances mécaniques associées éventuellement à un dosage minimum en ciment. Pour concevoir un béton performant garantissant une bonne durabilité, il suffisait jusqu'alors d'un dosage correct en ciment et d'une bonne compacité. Depuis dix ans, l'expérience acquise sur les chantiers, les enseignements des projets nationaux, la mise en application de nouvelles normes françaises et européennes relatives aux bétons et à leurs constituants, ainsi que la mise à jour des textes réglementaires concernant les constructions en béton, ont conduit à prescrire désormais des caractéristiques plus complètes et plus précises.



Structure avec armatures inox.

La durabilité, liée à l'environnement immédiat ou futur des ouvrages et parties d'ouvrage, est aujourd'hui le paramètre important à considérer. La résistance des bétons aux influences externes (intempéries, agressivité des sols, atmosphère chimiquement agressive, etc.) doit être optimisée.

La norme relative aux bétons NF EN 206-1 intègre cette logique de progrès afin d'optimiser les performances et la durabilité des bétons : elle impose au prescripteur de définir l'environnement dans lequel se trouve l'ouvrage et les risques d'agressions et d'attaques auxquels il va être exposé pendant sa durée de vie.

Les conditions d'environnement, suivant la norme NF EN 206-1, sont regroupées en six classes d'exposition, décomposées en sous-classes. À chacune des classes correspondent des spécifications sur la composition des bétons ainsi que des dispositions constructives.

Tableau n° 3 : classes d'exposition des bétons selon la norme NF EN 206-1

Classe d'exposition	Description de l'environnement	Béton concerné
XO	Aucun risque de corrosion ou d'attaque	Béton non armé ou béton armé en environnement très sec
XC	Corrosion induite par carbonatation	Béton contenant des armatures ou des pièces métalliques noyées exposé à l'air et à l'humidité
	XC1 Sec ou humide en permanence	
	XC2 Humide, rarement sec	
	XC3 Humidité modérée	
XD	Corrosion induite par les chlorures ayant une origine autre que marine	Béton contenant des armatures ou des pièces métalliques noyées soumis au contact d'une eau ayant une origine autre que marine contenant des chlorures, y compris des sels de déverglaçage
	XD1 Humidité modérée	
	XD2 Humide, rarement sec	
	XD3 Alternance d'humidité et de séchage	
XS	Corrosion induite par les chlorures présents dans l'eau de mer	Béton contenant des armatures ou des pièces métalliques noyées soumis au contact des chlorures présents dans l'eau de mer ou à l'action de l'air véhiculant du sel marin.
	XS1 Exposé à l'air véhiculant du sel marin, mais pas en contact direct avec l'eau de mer	
	XS2 Immergé en permanence	
	XS3 Zone de marnage, zone soumise à des projections ou à des embruns	
XF	Attaque gel/dégel avec ou sans agent de déverglaçage	Béton soumis à une attaque significative due à des cycles gel/dégel alors qu'il est mouillé
	XF1 Saturation modérée en eau sans agent de déverglaçage	
	XF2 Saturation modérée en eau avec agent de déverglaçage	
	XF3 Forte saturation en eau sans agent de déverglaçage	
	XF4 Forte saturation en eau avec agent de déverglaçage	
XA	Attaques chimiques	Béton exposé aux attaques chimiques se produisant dans les sols naturels, les eaux de surface et/ou les eaux souterraines
	XA1 Environnement à faible agressivité chimique	
	XA2 Environnement d'agressivité chimique modérée	
	XA3 Environnement à forte agressivité chimique	

Nota

Les actions dues à l'environnement sont des actions physiques et chimiques auxquelles le béton est exposé, qui entraînent des effets sur le béton et les armatures et qui ne sont pas considérées comme des charges pour la conception de la structure.

Milieus et ouvrages concernés par les bétons armés d'inox

- 4.1 - Classes d'exposition soumises à risque**
- 4.2 - Domaines d'utilisation privilégiés du béton armé d'inox**
- 4.3 - Autres utilisations présentant un intérêt**

4.1 - Classes d'exposition soumises à risque

Parmi les classes d'exposition présentées au chapitre III, cinq classes correspondent à des actions environnementales qui risquent de provoquer potentiellement dans l'ouvrage ou des parties de l'ouvrage des phénomènes de corrosion.

Classe XA : attaques chimiques.

Classe XC : corrosion induite par carbonatation.

Classe XD : corrosion induite par les chlorures ayant une origine autre que marine.

Classe XS : corrosion induite par les chlorures présents dans l'eau de mer.

Classe XF : attaque gel/dégel avec ou sans agent de déverglaçage.

Pour tous les bétons correspondant à ces classes, des mesures de protection évitant la corrosion des armatures doivent être envisagées. L'utilisation d'armatures inox en est une, et peut même s'avérer être la solution la mieux adaptée.

4.2 - Domaines d'utilisation privilégiés du béton armé d'inox

Le tableau n° 4 donne une liste informative des ouvrages ou des parties d'ouvrages qui, compte tenu du site dans lequel ils sont construits ou de leurs spécificités, peuvent être soumis à des classes d'exposition XA, XC, XD, XF et XS et donc être réalisés en béton armé d'inox.

Les armatures inox sont adaptées pour être utilisées avec tous les types de béton, qu'ils soient :

- préfabriqués (en particulier pour des applications architecturales, telles que des parements, ou structurelles, telles que des poutres de pont) ;
- coulés en place ;
- ainsi que pour tous les ouvrages endommagés par des phénomènes de corrosion.

Tableau n° 4 : ouvrages et parties d'ouvrages réalisables en béton armé d'inox

Familles d'ouvrages	Ouvrages types	Parties d'ouvrages
Ouvrages d'art	Ponts routiers, autoroutiers ou ferroviaires en béton armé ou en béton précontraint	Fondations Piles Culées Superstructures Tabliers
	Passerelles piétons	Fondations Piles
	Barrages en béton	Parties de l'ouvrage
	Tranchées couvertes Murs de soutènement	Radiers Murs latéraux
Travaux de la filière eau assainissement	Stations de traitement des eaux	Bassins de traitement Bassins d'aération Bassins de décantation Canalisations
	Ouvrages de stockage d'eaux pluviales	Réservoirs de stockage
	Ouvrages de traitement des rejets agricoles	Fosses de réception Réacteurs biologiques Silos de décantation
	Réseaux d'évacuation des eaux usées pluviales	Tuyaux d'assainissement Séparateurs de boues
	Réseaux d'évacuation des eaux usées ou résiduaires	Tuyaux d'assainissement
	Piscines	Parois
	Ouvrages de stockage d'eaux industrielles	Bassins de stockage
	Réseaux d'adduction et de distribution d'eau	Tuyaux
Travaux routiers	Ouvrages de sécurité Ouvrages d'assainissement pluvial Écrans acoustiques	Glissières de sécurité Caniveaux Parties inférieures des écrans
Fondations spéciales	Pieux	Zones des pieux situées dans la nappe phréatique
	Barrettes	Zones des barrettes situées dans la nappe phréatique
	Parois moulées	Zones des parois moulées situées dans la nappe phréatique
Travaux souterrains	Tunnels routiers et autoroutiers Tunnels ferroviaires Réseaux de transports collectifs urbains souterrains Galeries d'adduction, d'évacuation et de stockage d'eau	Revêtements en voussoirs préfabriqués en béton Revêtements en béton armé coulé en place
Travaux en site maritime ou fluvial	Revêtements de canaux	Toutes les parties des ouvrages
	Murs de quais et appontements	
	Bassins	
	Jetées, digues	
	Écluses	
Bâtiments	Bâtiments industriels Bâtiments d'élevage	Toutes les parties des ouvrages

4 • Milieux et ouvrages concernés par les bétons armés d'inox

Quelle que soit la classe d'exposition, l'emploi d'armatures inox se justifie en particulier pour des ouvrages :

- soumis à des risques de corrosion ;
- soumis à l'action de sels de déverglaçage ;
- situés dans des zones de marnage ;
- soumis à des ambiances marines (structures en site maritime) ;
- pour lesquels, on souhaite une durée de vie supérieure à celle des armatures acier ;
- inaccessibles et pour lesquels les opérations de maintenance sont impossibles ;
- dont la fermeture temporaire, pour des opérations de maintenance, est impossible car le trafic doit être maintenu : tunnel, pont en site fortement urbanisé, etc.

Les armatures inox peuvent être utilisées en substitution totale ou partielle des armatures acier pour :

- la totalité de l'ouvrage ;
- les parties d'ouvrages particulièrement sollicitées et exposées à des risques importants de corrosion.



4.3 - Autres utilisations présentant un intérêt

Les armatures inox offrent des propriétés autres que la seule résistance à la corrosion et constituent une solution intéressante dans des situations particulières telles que les séismes, la tenue à la fatigue ou encore l'amagnétisme.

Résistance aux séismes des bétons armés d'inox

Les forces sismiques étant par nature cycliques et dynamiques, la structure des bâtiments doit être calculée pour résister à ces forces d'amplitude très importante. Dans ces conditions, l'inox utilisé en armatures pour béton armé présente un certain nombre de caractéristiques qui le rendent particulièrement bien adapté.

- L'inox est un matériau ductile avec une déformation apparente importante (domaine plastique étendu) avant éventuellement de se rompre.
- L'inox a une très grande capacité d'absorption d'énergie. En cas de tremblement de terre la structure reçoit une grande quantité d'énergie et sa stabilité dépend donc de la capacité des armatures à l'absorber. Il est prouvé que, dans ces conditions, le matériau inox constitue un atout significatif.
- L'inox peut supporter un nombre élevé de cycles, donc en général il n'a pas subi de rupture lorsque le séisme s'arrête.

Les données disponibles portent essentiellement sur des armatures en nuance X5CrNiMo18-10/1.4301. Les résultats d'essais montrent que l'inox permet une dissipation d'énergie deux fois supérieure à celle des aciers et peu dépendante du nombre de cycles. Ceci est dû à l'association :

- de caractéristiques mécaniques élevées ($R_{p0,2} \approx 570 \text{ N/mm}^2$, $R_m \approx 800 \text{ N/mm}^2$);
- d'une grande réserve de ductilité disponible (déformation à la rupture $\varepsilon \approx 0,3$);
- d'une valeur de résilience très élevée.

Spécificités des armatures inox

- 5.1 - Fabrication des armatures inox**
- 5.2 - Contrôles de fabrication et conformité normative**
- 5.3 - Caractéristiques de forme**
- 5.4 - Caractéristiques mécaniques en traction**
- 5.5 - Nuances d'inox en fonction de la limite conventionnelle d'élasticité**
- 5.6 - Sélection de la nuance d'inox selon la classe d'exposition des bétons**
- 5.7 - Caractéristiques dimensionnelles et masse linéique**
- 5.8 - Désignation des armatures**

De la fabrication au contrôle des caractéristiques, en passant par la désignation et les normes de référence, ce chapitre présente les informations indispensables aux utilisateurs pour apprécier les armatures inox et évaluer leur potentiel en termes d'applications.

5.1 - Fabrication des armatures inox

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

5.1.1 - Crantage à chaud

C'est lors de la dernière opération de laminage (dernière cage de laminage) que s'effectue le crantage, entre deux, trois, voire quatre galets crantés. Généralement, par cette technologie, le crantage obtenu est appelé « verrou ». La forme de ces



Cage de laminage à chaud avec 3 galets de crantage pour la réalisation de verrous.

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 (grenaillage) ou chimique (décapage) comme indiqué au paragraphe 1.5.4.

5.1.2 - 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. Les crans sont généralement appelés « empreintes » 3 : leur forme, en relief sur les galets, est gravée par empreinte dans le métal. L'armature peut être livrée à l'état de couronnes de fils ou de barres. Le diamètre maximum réalisable par crantage à froid est limité : il varie entre 12 et 18 mm selon les producteurs. En sortie de ligne de crantage, les armatures en inox ont une surface exempte d'oxyde, ce qui les différencie facilement – sur chantier – des armatures aciers.

5.1.3 - Possibilités de fabrication

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

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



Cadre façonné

5.2 - Contrôles de fabrication et conformité normative

5.2.1 - Contrôles de fabrication

Différents types de contrôles sont effectués sur les armatures inox conformément à la norme applicable (XP A 35-014) à ces produits.

Sur chacun des lots de fabrication, il est procédé à :

- un essai de traction pour déterminer la limite élastique conventionnelle ($R_{p0,2}$), la charge à la rupture (R_m) et l'allongement total sous force maximale (A_{gt}) ;
- un contrôle dimensionnel du profil ;
- un essai de pliage ;
- un contrôle de l'analyse chimique suivant la norme NF EN 10088-3.

5.2.2 - Conformité normative

Les armatures inox pour béton armé sont régies par la norme française XP 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 du type d'exposition auxquels seront soumis les ouvrages.

Les lots d'armatures fournis doivent être conformes à la norme XP 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 ;
- par 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.



Armatures inox prêtes à être livrées.

La première option est généralement choisie pour les armatures inox les plus largement diffusées, pour lesquelles la confiance est basée, en plus des contrôles sur les produits, sur une supervision statistique de la production, sur la pertinence du système qualité pour attester la conformité des armatures inox et sur l'examen par une tierce partie de ces trois points. Pour vérifier si une armature inox bénéficie de la marque NF – Aciers pour béton armé, il convient de vérifier la présence du logo NF sur les étiquettes des armatures inox et de vérifier la présence de l'armature inox sur la liste des produits certifiés NF – Aciers pour béton armé. Cette liste est actualisée, au jour le jour, sur le site Internet de l'AFCAB : www.afcab.org

La deuxième option, qui représente une quantité d'essais à réaliser plus importante, est adaptée aux armatures inox dont les quantités fabriquées sont réduites.

5.3 - Caractéristiques de forme

Il existe trois types d'armatures inox :

- lisses ;
- à verrous ;
- à empreintes.

5.3.1 - Armatures lisses

Les armatures sont de section circulaire sans aucune gravure.

5.3.2 - Armatures à verrous

La figure n° 8 représente les armatures à verrous telles que définies dans la norme XP A 35-014 ; on se reportera à l'annexe 2 pour les informations complémentaires sur les armatures à verrous.

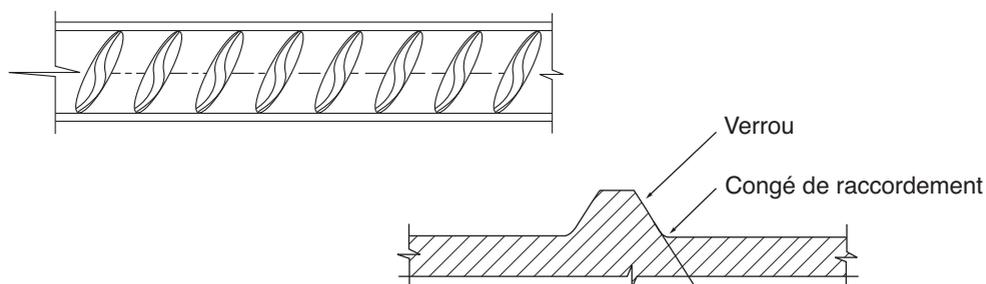


Figure n° 8 : schémas des armatures à verrous

5.3.3 - Armatures à empreintes

La figure n° 9 représente les armatures à empreintes telles que définies dans la norme XP A 35-014 ; on se reportera à l'annexe 2 pour les informations complémentaires sur les armatures à empreintes.

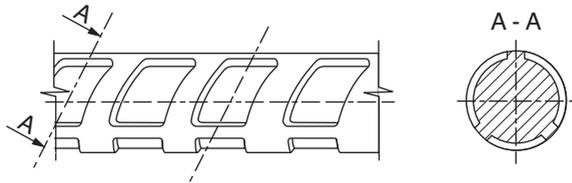


Figure n° 9 : schéma des armatures à empreintes

5.4 - Caractéristiques mécaniques en traction

Diagramme contrainte/allongement et caractéristiques mécaniques en traction

La figure n° 10 représente la courbe de traction conventionnelle : contrainte apparente/allongement.

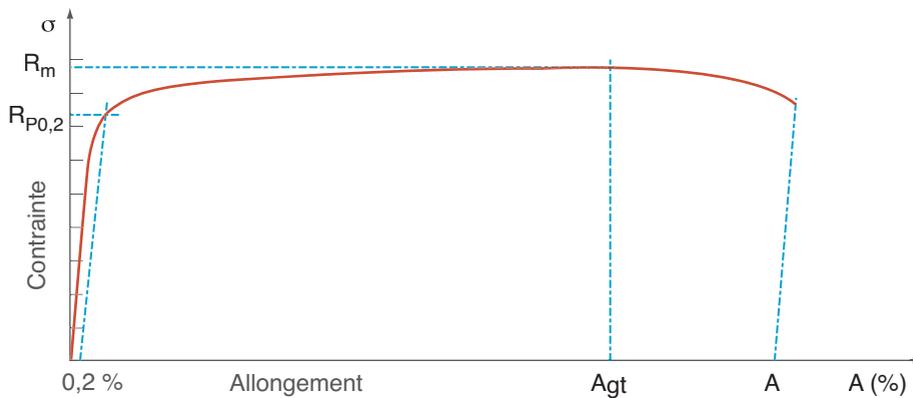


Figure n° 10 : diagramme contrainte/allongement d'une armature inox

5 • Spécificités des armatures inox



Armatures inox.

Le comportement mécanique des armatures inox est défini par cinq paramètres :

- la limite conventionnelle d'élasticité à 0,2 % ($R_{p0,2}$) ;
- la résistance en traction ou charge à la rupture (R_m) ;
- l'allongement total sous force maximale (A_{gt}) ;
- la ductilité ;
- l'aptitude au pliage.

Le tableau n° 5 résume les caractéristiques principales des armatures inox.

Tableau n° 5: principales caractéristiques mécaniques des armatures inox

Armature inox	Limite conventionnelle d'élasticité à 0,2 % $R_{p0,2}$ (MPa)	Rapport $R_m/R_{p0,2}$	Allongement total sous force maximale A_{gt} (%)
InE235	235	1,15	8
InE500	500	1,10	5
InE650	650	1,10	5
InE800	800	1,10	5

5.5 - Nuances d'inox en fonction de la limite conventionnelle d'élasticité

Les tableaux n° 6 et 7 récapitulent, pour chaque nuance d'inox (avec rappel de la famille d'appartenance), les différentes armatures réalisables en fonction du moyen d'obtention (crantage à froid ou à chaud) et de la limite conventionnelle d'élasticité choisis.

Tableau n° 6: corrélation entre limite d'élasticité des armatures et nuances d'inox – cas des produits obtenus par crantage à froid (petits diamètres)

Famille d'inox	Nuances d'inox		Limite conventionnelle d'élasticité à 0,2 % en MPa			
	symbolique	numérique	235	500	650	800
Ferritique	X3CrNb17	1.4511	InE235	*	*	*
Austénitique	X5CrNi18-10	1.4301	*	InE500	InE650	*
Austénitique	X5CrNiMo17-12-2	1.4401	*	InE500	InE650	*
Austénitique	X3CrNiMo17-13-3	1.4436	*	InE500	InE650	*
Austénitique	X6CrNiMoTi17-12-2	1.4571	*	InE500	InE650	*
Austénitique	X1CrNiMoCu25-20-5	1.4539	*	InE500	InE650	*
Austénitique	X8CrMnCuNB17-8-3	1.4597	*	InE500	InE650	*
Austéno-ferritique	X2CrNiMoN22-5-3	1.4462	*	InE500	InE650	InE800

* Produit non disponible pour des raisons technologiques ou métallurgiques.

Tableau n° 7: corrélation entre limite d'élasticité des armatures et nuances d'inox – cas des produits obtenus par crantage à chaud (gros diamètres)

Famille d'inox	Nuances d'inox		Limite conventionnelle d'élasticité à 0,2 % en MPa			
	symbolique	numérique	235	500	650	800
Ferritique	X3CrNb17	1.4511	InE235	*	*	*
Austénitique	X2CrNi18-10	1.4311	InE235	InE500	*	*
Austénitique	X2CrNiMoN17-13-3	1.4429	InE235	InE500	*	*
Austénitique	X3CrNiMo17-13-3	1.4436	InE235	InE500	*	*
Austénitique	X6CrNiMoTi17-12-2	1.4571	InE235	InE500	*	*
Austénitique	X1CrNiMoCu25-20-5	1.4539	InE235	InE500	*	*
Austénitique	X8CrMnCuNB17-8-3	1.4597	InE235	InE500	*	*
Austéno-ferritique	X2CrNiMoN22-5-3	1.4462	*	InE500	InE650	*

* Produit non disponible pour des raisons technologiques ou métallurgiques.

5.6 - Sélection de la nuance d'inox selon la classe d'exposition des bétons

Le tableau n° 8 propose une sélection optimale de la nuance d'inox en fonction des différentes classes d'exposition. Comme il existe un grand nombre de nuances d'inox, il est possible de sélectionner les armatures inox les mieux adaptées à

Tableau n° 8: nuances d'inox conseillées pour les armatures en fonction des classes d'exposition du béton

Classe d'exposition		Nuance d'inox conseillée			Autre nuance possible
		1.4511	1.4301/ 1.4311 ou 1.4597	1.4462	1.4539
XO: aucun risque de corrosion ni d'attaque					
XC: corrosion induite par la carbonatation					
	XC1	x			
	XC2		x		
	XC3		x		
	XC4		x		
XD: corrosion induite par les chlorures					
	XD1		x		
	XD2		x		
	XD3		x		
XS: corrosion induite par les chlorures en mer					
	XS1		x		
	XS2			x	x
	XS3			x	x
XF: attaque gel/dégel					
	XF1		x		
	XF2		x		
	XF3		x		
	XF4			x	x
XA: attaques chimiques					
	XA1		x		
	XA2		x		
	XA3			x	x

Remarque: nuances conseillées si les armatures sont laissées à l'air libre: 1.4401 / 1.4429 / 1.4436 / 1.4571

chaque utilisation. En fonction de la classe d'exposition des bétons de l'ouvrage ou des parties d'ouvrages telles que définie dans le chapitre 3, il convient de choisir la nuance d'inox garantissant la meilleure durabilité des structures.

5.7 - Caractéristiques dimensionnelles et masse linéique

Le tableau n° 9 indique la masse linéique pour chaque diamètre disponible, en fonction de la famille d'inox, et les nuances d'inox disponibles sous forme d'armatures. Pour un diamètre donné, la masse linéique varie suivant les familles d'inox. Ceci s'explique par le fait que la masse volumique varie entre 7,7 et 8 kg/dm³ pour les différentes familles d'inox. Elle est de 7,7 kg/dm³ pour un ferritique, de 7,8 kg/dm³ pour un austéno-ferritique et varie de 7,9 à 8,0 kg/dm³ sur les austénitiques (en fonction de la présence ou non de molybdène).

Tableau n° 9: masses linéiques des armatures inox commercialisées

Diamètre nominal d (mm)	Section nominale e (mm ²)	Masse linéique (kg/m)							
		Inox de masse volumique 7,7 kg/dm ³ (ferritique)		Inox de masse volumique 7,8 kg/dm ³ (austéno-ferritique)		Inox de masse volumique 7,9 kg/dm ³ (austénitique)		Inox de masse volumique 8,0 kg/dm ³ (austénitique)	
		Symbolique	Numérique	Symbolique	Numérique	Symbolique	Numérique	Symbolique	Numérique
		X3CrNb17	1.4511	X2CrNiMoN22-5-3 X8CrMnCuNB17-8-3	1.4462 1.4597	X5CrNi18-10 X2CrNiN18-10	1.4301 1.4311	X5CrNiMo17-12-2 X2CrNiMoN17-13-3 X3CrNiMo17-13-3 X6CrNiMoTi17-12-2 X1CrNiMoCu25-20-5	1.4401 1.4429 1.4436 1.4571 1.4539
3	7,1	0,054		0,055		0,056		0,057	
4	12,6	0,097		0,098		0,099		0,101	
5	19,6	0,151		0,153		0,155		0,157	
6	28,3	0,218		0,221		0,223		0,226	
7	38,5	0,296		0,300		0,304		0,308	
8	50,3	0,387		0,392		0,397		0,402	
10	78,5	0,605		0,613		0,620		0,628	
12	113	0,871		0,882		0,893		0,905	
14	154	1,185		1,201		1,216		1,232	
16	201	1,548		1,568		1,588		1,608	
20	314	2,419		2,450		2,482		2,513	
25	491	3,780		3,829		3,878		3,927	
32	804	6,193		6,273		6,354		6,434	
40	1 257	9,676		9,802		9,927		10,053	
50	1 963	15,119		15,315		15,512		15,708	

5.8 - Désignation des armatures

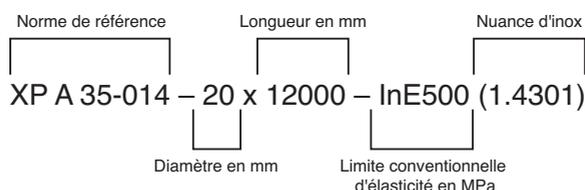
Il existe un grand nombre de nuances d'inox de compositions chimiques différentes ; les éléments d'alliage présents selon leur nature et leur proportion ont une incidence directe sur la résistance à la corrosion et les propriétés mécaniques du matériau.

Dans le cas des armatures inox, la désignation normalisée traduit exclusivement le niveau minimal de limite d'élasticité et peut englober plusieurs nuances d'inox de résistance à la corrosion très différentes (voir le tableau n° 6). Une fois choisi le niveau de résistance mécanique, il est indispensable de déterminer la nuance la mieux adaptée à l'environnement et aux risques de corrosion. C'est pourquoi lorsque l'on choisit une armature, il faut également préciser la nuance d'inox, en plus de la limite conventionnelle d'élasticité.

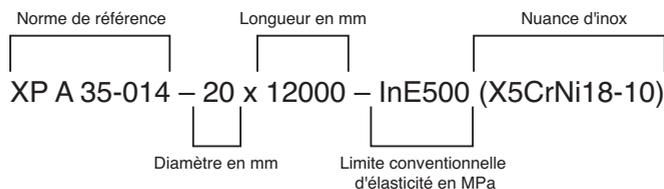
Ainsi, les armatures inox sont désignées avec les paramètres suivants :

- norme ;
 - diamètre nominal ;
 - longueur ;
 - limite conventionnelle d'élasticité ;
 - nuance [soit numérique (exemple 1), soit symbolique (exemple 2)].
- Ce qui permet de choisir et d'identifier parfaitement les produits.

Exemple 1 : désignation numérique



Exemple 2 : désignation symbolique



Spécifications et dispositions constructives

- 6.1 - Adhérence des armatures inox**
- 6.2 - Enrobage des armatures**
- 6.3 - Maîtrise de la fissuration**
- 6.4 - Principales dispositions constructives**
- 6.5 - Récapitulatif de la démarche à suivre
par le concepteur**
- 6.6 - Rattachement à la réglementation**

Les méthodes et les règles de dimensionnement et de conception des ferrailages utilisant des armatures inox sont les mêmes que celles utilisées avec les aciers. Par conséquent, c'est l'Eurocode 2 qui sert au dimensionnement du béton armé d'inox. Les caractéristiques et les propriétés spécifiques des armatures inox offrent la possibilité d'optimiser les enrobages et les dimensions de l'ouvrage.

6.1 - Adhérence des armatures inox

La résistance d'un élément en béton armé suppose que l'armature ne puisse pas glisser à l'intérieur du béton, c'est-à-dire qu'il y ait adhérence entre les deux matériaux. La liaison entre le béton et l'armature est mesurée par la contrainte d'adhérence ; sa qualité conditionne le transfert des efforts entre les deux matériaux.

L'adhérence des armatures est fonction de leur forme, de leur surface (les verrous et les empreintes améliorent l'adhérence) et de la résistance du béton. L'efficacité d'une armature vis-à-vis de l'adhérence est caractérisée par son coefficient de scellement.

L'Eurocode 2 donne les formules pour déterminer les longueurs des différents types d'ancrage :

- ancrages rectilignes ;
- ancrages courbes ;
- crochets et recouvrements.

La norme XP A 35-014 précise au paragraphe 8.4.3 les coefficients à prendre en compte pour assurer les liaisons mécaniques entre les armatures inox et le béton :

- le coefficient de scellement est pris égal à 1,5 ;
- le coefficient de fissuration est pris respectivement égal à 1,6 pour les inox de diamètre supérieur ou égal à 6 mm et 1,3 pour les inox inférieurs à 6 mm.

Nota

La rouille ne favorise pas l'adhérence, contrairement à une idée reçue. L'adhérence est due aux verrous ou empreintes gravées sur le matériau et non à l'oxyde qui le recouvre ; au contraire une corrosion importante risque d'obstruer les zones gravées et contribue à réduire l'adhérence du béton qui ne pourra plus s'ancrer dans les recoins des empreintes et des verrous.

6.2 - Enrobage des armatures

6.2.1 - Philosophie de l'enrobage selon l'Eurocode 2

Les recommandations de l'Eurocode 2 (pr EN 1992-1) en matière d'enrobage sont novatrices pour la durabilité des ouvrages. En effet, la détermination de la valeur de l'enrobage doit prendre en compte :

- la classe d'exposition dans laquelle se trouve l'ouvrage (ou la partie d'ouvrage) en référence à la norme NF EN 206-1 ;
- la durée de service attendue ;
- la classe de résistance du béton ;
- le type de système de contrôle qualité mis en œuvre pour assurer la régularité des performances du béton ;
- la nature des armatures (acier, inox) ;
- la maîtrise du positionnement des armatures.

La valeur de l'enrobage peut être optimisée :

- dans le cas des armatures inox ;
- lorsque le béton choisi présente une classe de résistance à la compression supérieure à la classe de référence (définie par la classe d'exposition).

L'Eurocode 2 prévoit également la possibilité d'augmenter la valeur d'enrobage pour allonger la durée de vie.

6.2.2 - Enrobage minimal

L'enrobage se définit par la distance entre la surface du béton et l'armature la plus proche (cadres, étriers, épingles, armatures de peau, etc.). L'enrobage minimal est l'enrobage le plus mince permettant de satisfaire les exigences de durabilité des ouvrages soumis à la classe d'exposition X0, c'est-à-dire ne présentant aucun risque de corrosion ni d'attaque.

Avec des armatures acier, lorsque l'ouvrage est susceptible d'être exposé à des risques de corrosion, une solution classique préventive consiste à augmenter la valeur de l'enrobage, en fonction des risques potentiels. La composition du béton (teneur minimale en ciment, rapport eau/ciment) et sa compacité jouent également un rôle dans la qualité de la protection contre la corrosion.

L'enrobage minimal sert notamment à garantir la bonne transmission des forces d'adhérence. Il a un effet direct sur la période de passivité des armatures acier au terme de laquelle la corrosion s'initie puis se développe. À titre d'exemple, il est couramment reconnu que l'augmentation de l'enrobage minimal d'une valeur de 10 mm permet d'envisager des durées de vie qui passent de 50 ans à 100 ans.

L'enrobage minimal, C_{\min} à respecter selon les classes d'exposition, est défini dans l'Eurocode 2, section 4 (article 4412).

Il est donné par la formule :

$$C_{\min} = \max [C_{\min, b} ; C_{\min, dur} + \Delta C_{dur, y} - \Delta C_{dur, st} - \Delta C_{dur, add} ; 10 \text{ mm}]$$

Où :

$C_{\min, b}$: enrobage minimal vis-à-vis des exigences d'adhérence (béton/armature).

$C_{\min, dur}$: enrobage minimal vis-à-vis des conditions environnementales.

$\Delta C_{dur, y}$: coefficient de sécurité additionnel.

$\Delta C_{dur, st}$: réduction de l'enrobage minimal dans le cas d'utilisation d'inox.

$\Delta C_{dur, add}$: réduction de l'enrobage minimal dans le cas de protections supplémentaires.

Incidence de l'adhérence : détermination de $C_{\min, b}$

$C_{\min, b}$ = enrobage minimal équivalent au diamètre de la barre dans le cas d'armature individuelle.

$C_{\min, b}$ = enrobage minimal correspondant au diamètre équivalent dans le cas de paquet d'armatures. $C_{\min, b}$ est majoré de 5 mm si le diamètre du plus gros granulat du béton est supérieur à 32 mm.

Incidence de l'environnement, prise en compte de la durée de vie : valeur de $C_{\min, dur}$

$C_{\min, dur}$ est déterminé par la classe d'exposition et la classe liée à la structure. Il existe six classes liées à la structure (S1 à S6). Ces classes correspondent à des catégories de durée de vie des projets ; à chaque catégorie est associée une durée de vie.

Les bâtiments et les structures courantes sont classés dans la catégorie S4 : ils sont dimensionnés pour une durée de vie de 50 ans. Les ponts et les ouvrages de génie civil sont classés dans la catégorie S5 : ils sont dimensionnés pour une durée de vie de 100 ans.

Les valeurs de $C_{\min, \text{dur}}$ (en mm) sont données dans le tableau n° 10.

Tableau n° 10 : valeur de $C_{\min, \text{dur}}$ en fonction de la classe d'exposition et de la classe liée à la struc-

$C_{\min, \text{dur}}$ (en mm)	Classe d'exposition						
Classe liée à la structure	XO	XC1	XC2 XC3	XC4	XD1 XS1	XD2 XS2	XD3 XS3
S1	10	10	10	15	20	25	30
S2	10	10	15	20	25	30	35
S3	10	10	20	25	30	35	40
S4	10	15	25	30	35	40	45
S5	15	20	30	35	40	45	50
S6	20	25	35	40	45	50	55

L'Eurocode 2 prévoit d'optimiser la valeur de $C_{\min, \text{dur}}$ en fonction, notamment, de la classe de résistance du béton et de la mise en place d'un contrôle de la qualité de fabrication du béton.

**Enrobage minimal dans le cas d'utilisation d'armatures inox :
valeur de $\varnothing_{\text{dur, st}}$**

L'utilisation d'armatures inox permet de réduire l'enrobage des armatures.

Le tableau n° 11 précise les valeurs $\Delta C_{\text{dur, st}}$ que nous préconisons de prendre en compte pour la détermination de l'enrobage des armatures inox.

Tableau n° 11 : valeur recommandée de $\varnothing_{\text{dur, st}}$ pour les armatures d'inox

$C_{\text{dur, st}}$	Classe d'exposition						
Classe liée à la structure	XO	XC1	XC2 XC3	XC4	XD1 XS1	XD2 XS2	XD3 XS3
S1	0	0	0	0	0	0	0
S2	0	0	0	0	0	0	5
S3	0	0	0	0	0	5	10
S4	0	0	0	0	5	10	15
S5	0	0	0	5	10	15	20
S6	0	0	5	10	15	20	25

L'utilisation d'armatures inox permet de réduire l'enrobage des armatures.

6.2.3 - Position des armatures

Le respect des tolérances sur l'emplacement des armatures est indispensable ; il nécessite la mise en œuvre de précautions pour garantir leur position pendant toute la phase de bétonnage et de serrage.

Il existe divers modèles de cales en béton ou en plastique pour faciliter la mise en place correcte des armatures et leur maintien, qui présentent des caractéristiques adaptées à celles du béton.

6.3 - Maîtrise de la fissuration

6.3.1 - Valeur limite d'ouverture de fissure

La fissuration d'un béton armé sous l'application de charges est normale et admise par les règlements de calcul. Il existe cependant des règles de limitation d'ouverture de fissures qu'il convient de respecter.

La fissuration d'un béton armé est l'une des origines de la pénétration des agents agressifs : elle doit être limitée afin de garantir la durabilité de la structure, son bon fonctionnement, un aspect acceptable tout en évitant le développement de la corrosion des armatures acier.

Dans les zones où l'existence de contrainte de traction est prévisible, la maîtrise de la fissuration du béton armé repose sur le respect de trois paramètres :

- le taux de travail des armatures ;
- le diamètre des armatures de renforcement ;
- l'espacement des armatures ;

et sur la mise en place dans le béton d'un ferrailage minimal.

C'est en définitive à partir du choix d'une ouverture maximale de fissure que l'on déterminera la quantité d'armatures à mettre en œuvre et la distribution du ferrailage.

L'article 7.3.1 de l'Eurocode 2 détaille les valeurs recommandées d'ouverture de fissures en fonction de la classe d'exposition dans laquelle se trouve l'ouvrage. Il convient de vérifier que la valeur calculée d'ouverture de fissures est inférieure à la valeur maximale réglementaire autorisée. La géométrie de l'ouvrage et la disposition des armatures sont déterminées de manière à limiter ces ouvertures de fissures.

La maîtrise de la fissuration du béton armé impose de limiter l'ouverture maximale des fissures afin d'éviter les risques de corrosion des armatures acier.

Dans le cas d'utilisation d'armature inox, des fissures plus larges sont acceptables compte tenu de l'inertie des armatures inox face aux diverses agressions. La valeur limite d'ouverture de fissure que nous préconisons est de 0,40 mm pour les classes XO et XC1 et de 0,35 pour les autres classes d'exposition (voir le tableau n° 12).

Tableau n° 12: valeur limite recommandée d'ouverture de fissure applicable au béton armé d'inox

Classe d'exposition	Valeur limite recommandée d'ouverture de fissure (mm)	
	Armature acier	Armature inox
XO, XC1	0,4	0,4
XC2, XC3, XC4 XD1, XD2 XS1, XS2, XS3	0,3	0,35

Cette ouverture de fissure est calculée sous l'action de la combinaison quasi-permanente des charges pour les éléments en béton armé et les éléments en béton précontraint à armatures non adhérentes.

L'utilisation d'armatures inox permet d'admettre des seuils d'ouverture des fissures supérieurs.

6.3.2 - Section minimale d'armatures

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 énoncés dans l'article 7.3.2 de l'Eurocode 2.

6.4 - Principales dispositions constructives

Toutes les dispositions constructives relatives aux armatures acier sont applicables aux armatures inox.

6.4.1 - Espacement des armatures

L'espacement des armatures inox doit permettre une mise en place et une vibration correctes du béton, et pour cela, être conforme aux recommandations de l'Eurocode 2, article 8-2.



6.4.2 - Diamètre admissible des mandrins pour le pliage des barres

Les barres pliées sont tenues de respecter un diamètre minimal de courbure afin d'éviter toute fissure dans l'armature et d'assurer l'intégrité du béton situé dans la zone courbe de l'armature. L'article 8.3 de l'Eurocode 2 précise ces diamètres minimaux.

<i>Diamètre de la barre</i>	<i>Diamètre minimal du mandrin</i>
< 16 mm	4 x diamètre de la barre
> 16 mm	7 x diamètre de la barre

6.4.3 - Ancrages des armatures

Il convient de respecter des distances d'ancrage minimum afin d'assurer une bonne transmission au béton des forces d'adhérence. On distingue plusieurs types d'ancrages.

- Les ancrages rectilignes ou scellements droit.



Figure n° 11 : ancrage rectiligne ou scellement droit.

- Les ancrages courbes.



Figure n° 12 : ancrage courbe.

L'article 8-4 de l'Eurocode 2 définit la longueur d'ancrage des armatures longitudinales à observer en fonction du type d'ancrage, du type d'acier et des propriétés d'adhérence des armatures.

L'article 8-5 précise les recommandations relatives aux ancrages des armatures d'effort tranchant et aux armatures transversales.

6.4.4 - Recouvrement des armatures

La longueur de recouvrement des armatures doit favoriser la continuité de la transmission des efforts d'une armature à l'autre.

Les dispositions à prendre en compte pour assurer les recouvrements et le calcul de la longueur de recouvrement sont indiquées dans l'article 8-7 de l'Eurocode 2.

6.4.5 - Utilisation de manchons de raccordement

Comme les armatures classiques, les armatures Inox peuvent être raboutées par un procédé mécanique. Les avantages de cette technique par rapport au recouvrement sont les suivants.

À la conception

- Les armatures raboutées mécaniquement ont un axe commun et travaillent en traction pure. À l'inverse, les recouvrements qui imposent aux armatures un désaxage au minimum égal à leur diamètre induisent des efforts de flexion dans les barres en limite des zones de recouvrement.
- Le ferrailage transversal est allégé car le béton n'a pas besoin d'être armé vis-à-vis des efforts qu'induirait des recouvrements, puisque :
 - la transmission des charges entre deux éléments d'armature se fait exclusivement par l'intermédiaire du coupleur, sans sollicitation du béton ;
 - le phénomène de flexion lié au désaxage des armatures en recouvrement n'existant plus, ses répercussions sur le béton sont également éliminées.
- Dans les zones fortement armées, le doublement des sections d'armature aux endroits des recouvrements est facilement évité par l'emploi du raboutage mécanique.
- Cette technique offre une plus grande liberté dans le choix du positionnement des arrêts de bétonnage, qui ne nécessitent pas de longueurs d'armature en attente toujours dangereuses pour les ouvriers et souvent gênantes pour les opérations de manutention.
- Elle garantit l'intégrité du ferrailage : les barres en attente pour recouvrement sont souvent pliées et dépliées, eu égard, là encore, au danger et à la gêne qu'elles occasionnent. Ce n'est jamais le cas pour des armatures raboutées mécaniquement qui ne dépassent pas nécessairement du béton.
- Elle permet la liaison d'une structure béton à une structure métallique.

Lors de la mise en œuvre

- Il n'est plus nécessaire de percer les coffrages pour laisser passer les barres en attente ni par conséquent de reboucher les trous pour les utilisations ultérieures, ce qui implique donc un gain en longévité des peaux de coffrages et en temps de main d'œuvre.
- L'allégement du ferrailage transversal simplifie les opérations de mise en place des armatures sur le chantier diminuant ainsi les risques d'erreur et permettant un gain de temps.
- La sécurité induite par la disparition des longueurs de barres en attente influe positivement sur la productivité.
- Le risque d'erreur sur les longueurs de recouvrement n'existe plus.

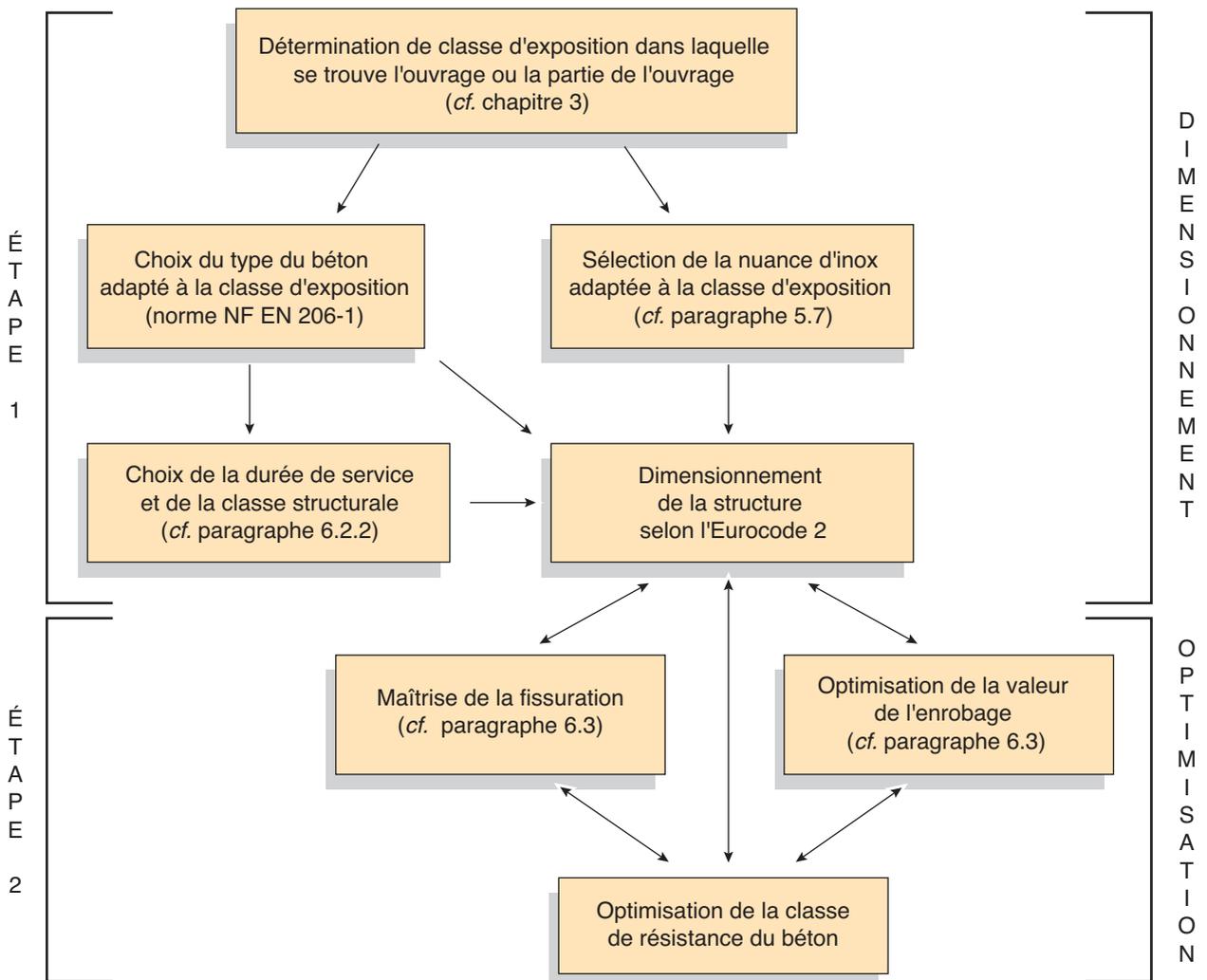
Comme les armatures, les coupleurs font l'objet d'une norme (NF A 35-020) et d'une certification (AFCAB).



Exemples de manchons de raccordement.

6.5 - Récapitulatif de la démarche à suivre par le concepteur

- ÉTAPE 1 – dimensionnement
- ÉTAPE 2 – optimisation



Représentation schématique de la démarche à suivre par le concepteur

6.6 - Rattachement à la réglementation

EUROCODE 2 (EC 2)

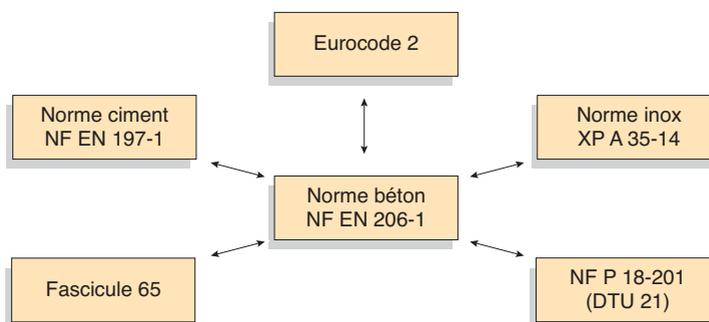
Les ouvrages béton armé d'inox sont dimensionnés en appliquant l'Eurocode 2, « *calcul des structures en béton* ». Les principes et règles applicables aux armatures sont précisés dans l'article 3.2 acier de béton armé.

Fascicule 65-A

Les spécifications relatives à la fourniture, au façonnage, à la mise en œuvre des armatures et à l'assurance qualité sont indiquées au chapitre VI « *Armatures de béton armé* » du fascicule 65-A.

Norme NF P 18-201 (DTU 21)

La norme NF P 18-201 [Travaux de bâtiment. Exécution des travaux en béton. Cahier des clauses techniques. (réf. DTU 21)] précise dans l'article 3.3 « *Aciers et armatures pour béton armé* », les prescriptions générales relatives aux armatures et dans l'article 5.2 « *Armatures* », les spécifications relatives au façonnage, à la mise en place et à la fixation et à l'assemblage des armatures. L'article 3.3 autorise l'utilisation d'aciers inoxydables répondant aux spécifications de la norme XP A 35-014.



Synoptique réglementation

Approche économique des ouvrages en béton armé d'inox

- 7.1 - Les armatures inox en France et dans le monde**
- 7.2 - Atouts des armatures inox**
- 7.3 - Optimisation des quantités de béton et d'acier**
- 7.4 - Éléments d'analyse économique**
- 7.5 - Utilisation adaptée à chaque ouvrage**
- 7.6 - Approche en coût global**

7.1 - Les armatures inox en France et dans le monde

L'utilisation des armatures inox ne s'est pas développée en France au cours des dernières décennies, en dehors de quelques applications très spécifiques telles que les bâtiments abritant les IRM en milieu hospitalier. On serait tenté d'attribuer ce phénomène à une perception de coût élevé en comparaison des armatures acier. Si tel était le cas, elles ne se seraient pas développées de façon significative en Suisse, en Allemagne, en Amérique du Nord, en Angleterre ou encore dans les pays scandinaves.

Les explications de ce phénomène français sont essentiellement de nature réglementaire et technique : il n'existait, jusqu'à présent, ni de norme française relative aux armatures inox, ce qui constituait un blocage absolu pour toute prescription, ni de guide d'utilisation proposant en même temps les domaines d'application privilégiés. Ce retard étant dorénavant comblé avec la parution de la norme XP A 35-014, en novembre 2003, et du présent ouvrage, la question du coût de l'armature inox comparée à une armature acier reste posée.

L'estimation du coût d'un ouvrage ne s'arrête pas à la seule dépense d'investissement. Dans les travaux publics et le bâtiment, comme dans l'industrie, toute étude économique intègre dorénavant, la notion de « retour » sur les dépenses engagées. Sont à intégrer dans ce « retour » les économies à envisager : sur les frais de maintenance et d'inspection, sur les possibles interruptions de l'exploitation pour entretien et, bien entendu, sur l'augmentation de la durée de vie de l'ouvrage (durée d'amortissement). Utilisées à bon escient, les armatures inox améliorent sensiblement ce « retour » : il s'ensuit une diminution du coût du cycle de vie ou coût de possession de l'ouvrage.

Le chapitre 4 de ce guide indique les domaines d'utilisation privilégiés du béton armé d'inox en fonction des classes d'exposition auxquelles sont soumises les structures. Pour la majorité des projets, une substitution complète des armatures acier par des armatures inox ne se justifie pas. Il suffit d'une faible proportion d'armatures inox pour accroître significativement la durabilité générale de l'ouvrage. Ne seront finalement entièrement armés d'inox que les seuls ouvrages pour lesquels il est souhaité une pérennité maximale et/ou sur lesquels tous travaux de maintenance ou de réparation sont impossibles, ou s'il est difficilement envisageable d'interrompre le trafic pour réparations.

Si le recours à l'inox augmente le coût de l'ouvrage (voir le paragraphe 7.4), c'est toujours dans des proportions minimales en regard du seul rapport de prix matière acier/inox. En effet :

- on substitue très rarement la totalité des armatures aciers par des armatures inox mais une partie seulement ;
- le différentiel ne porte que sur le seul coût matière puisque tous les autres coûts (transport, façonnage et mise en place) restent identiques ;
- l'emploi d'inox diminue les quantités de béton, les poids des armatures et les coûts de transports.

C'est ce qui explique qu'en définitive les écarts sont minimes.



Photo Centro-Inox

Armature pour la construction du pont de Bassano (Italie).

Ce différentiel de coût est souvent largement compensé par les avantages que l'on en retire à long terme (incidence sur le coût global) et même à court terme. Les armatures inox constituent une avancée technologique très intéressante en terme de gestion préventive.

7.2 - Atouts des armatures inox

7.2.1 - Intérêt des armatures inox

L'intérêt des armatures inox réside dans leur exceptionnelle résistance à la corrosion, associée à des caractéristiques mécaniques élevées. Il en résulte que le recours partiel, voire total, à l'inox dans les zones exposées présente de multiples avantages.

- **Une maintenance réduite.** Les opérations de maintenance et d'entretien des ouvrages – liées pour l'essentiel aux réparations consécutives aux dégradations provoquées par la corrosion – sont minimales sur les ouvrages construits avec des armatures inox.

- **Une réduction des frais d'exploitation.** Les opérations de maintenance imposent souvent une fermeture temporaire partielle et souvent totale de l'ouvrage, occasionnant une gêne pour les usagers et engendrant souvent des pertes d'exploitation. Des coûts de maintenance réduits et une durée de service accrue garantissent la rentabilité de l'exploitation.

- **Une pérennisation des ouvrages** qui ne se dégradent plus au cours du temps.
- **La sécurité.** Les armatures inox sécurisent durablement les ouvrages et, conjointement, réduisent la fréquence des inspections.
- **Une optimisation des quantités de béton et d'armatures.** Ce point clé est développé dans le paragraphe 7.3. Retenons que les armatures inox génèrent de sensibles économies de matériaux et, par conséquent, de transports. De surcroît, elles autorisent la réalisation de structures plus élancées et plus légères.
- **Une meilleure résistance aux séismes.** Grâce à leur excellente ductilité, ils absorbent des efforts importants (voir le paragraphe 4.4.3).

D'autres avantages sont apportés par des propriétés spécifiques de l'inox.

- **Son amagnétisme.** Il est indispensable pour la construction de bâtiments enveloppant les IRM dans les hôpitaux ; d'autres applications sont envisageables lorsqu'existent des risques d'interférences ou de perturbations sur des matériels électroniques (péages autoroutiers, pistes d'aéroports, bâtiments pour l'industrie électronique, etc.).
- **Sa faible conductivité thermique.** Ceci en fait un matériau privilégié dans le cadre du traitement des « ponts thermiques ».
- **Sa contribution à l'esthétique des ouvrages.**

7.2.2 - Inox et développement durable

Cet ouvrage n'a pas pour vocation de positionner l'inox par rapport aux critères du développement durable ; néanmoins ce sujet constitue et constituera de plus en plus le fil conducteur des maîtres d'ouvrage et des maîtres d'œuvre pour leurs projets futurs. L'utilisation d'armatures inox peut contribuer à remplir les objectifs dans ce domaine.

- **Respect de l'environnement.** L'inox est un matériau **inerte** (il résiste à la corrosion) **et neutre** (il ne relargue pas de substances dans le milieu environnant). La réduction du volume de matériau à mettre en œuvre réduit considérablement le coût énergétique du transport. La recyclabilité totale de l'inox assure des conditions idéales de déconstructions en fin de vie des ouvrages.

- **Maîtrise des coûts.** Une diminution substantielle des coûts de maintenance, et donc un gain d'exploitation, compense le surcoût modéré à l'investissement.

Des ouvrages plus sûrs, plus résistants aux séismes et plus esthétiques correspondent à une aspiration croissante des populations. L'optimisation de la structure vise aussi, pour certains ouvrages, à combiner l'utilisation des armatures acier et des armatures inox en assurant la pérennité de l'ouvrage avec une solution avantageuse en terme de coût global.

7.2.3 - Pérennité architecturale

L'utilisation d'armatures inox garantit la pérennité architecturale des ouvrages. Aucun symptôme lié à l'apparition de la corrosion des armatures ne peut venir altérer, en particulier, les parements des ouvrages. Les bétons conservent ainsi durant toute la durée de vie de l'ouvrage un aspect homogène, sans altération.

7.3 - Optimisation des quantités de béton et d'acier

7.3.1 - Optimisation du volume de béton

L'utilisation d'armatures inox prévient tout risque de corrosion des armatures. L'enrobage minimal de béton nécessaire à la protection des armatures classiques peut donc être optimisé et réduit pour tous les ouvrages ou parties d'ouvrages soumis à des contraintes environnementales présentant des risques de corrosion des armatures. Les seuils d'ouvertures des fissures peuvent être augmentés pour certaines classes d'exposition.

Il en résulte une optimisation des sections et donc du volume global de béton de l'ouvrage. Le gain sur le volume de béton a un impact non négligeable sur le poids de la structure, d'où un gain sur les appuis et les fondations de l'ouvrage.

7.3.2 - Optimisation de la quantité d'acier

Les sections d'armatures déterminées par leur rôle structural, lors du dimensionnement de l'ouvrage, sont en général quasiment proportionnelles à la valeur de la limite élastique de l'acier utilisé. L'utilisation d'armatures présentant une limite élastique supérieure, telles que les armatures inox, entraîne soit la réduction des diamètres des armatures utilisées, soit l'augmentation de leur espacement et donc la réduction de leur nombre.

Avec des armatures inox, le préjudice causé par les fissures est moindre: il convient d'en tenir compte lors du dimensionnement, sans omettre d'optimiser les sections des armatures.

Cette réduction des quantités de ferrailage et en particulier les pourcentages minimaux d'armatures contribue à la simplification du ferrailage des ouvrages et donc améliore les contraintes de mise en œuvre du béton et réduit le poids total d'armatures à mettre en œuvre. Il en résulte aussi une économie du temps de main d'œuvre nécessaire à la mise en place des armatures et au bétonnage.

7.3.3 - Optimisation des dimensions des éléments préfabriqués en béton

Avec les armatures inox, il est possible de réduire l'enrobage; ainsi les dimensions des éléments préfabriqués en béton sont optimisées, par exemple les éléments de faible épaisseur tels que les plaques de parements architectoniques.

Les processus industriels de préfabrication, garantissant une maîtrise précise des tolérances sur le positionnement des armatures, conduisent à réduire les épaisseurs d'enrobage et à tirer ainsi le meilleur parti des armatures inox. Elles offrent des éléments de plus faible poids et facilitent toutes les opérations de maintenance, de transport, de mise en œuvre et d'assemblage.

7.4 - Éléments d'analyse économique

7.4.1 - Caractéristiques générales de l'ouvrage

L'ouvrage étudié est un pont courant routier en béton précontraint possédant une travée de portée 25 m et de largeur 10,80 m (correspondant à une largeur courante d'ouvrage routier permettant le passage de deux voies de circulation de 3,50 m).

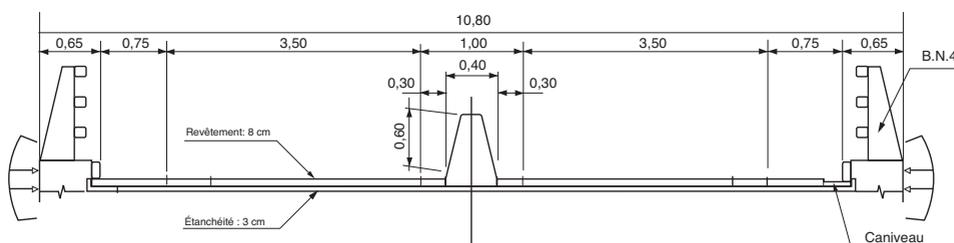


Figure n° 13: dispositions transversales de l'ouvrage

7.4.2 - Règlements de calculs

Les charges routières sont prises en compte selon le Fascicule 61 titre II. Les sections en béton armé sont déterminées selon les règles BAEL 91 (révisées 99). Les vérifications du tablier en béton précontraint sont réalisées selon le BAEL 91 en classe II.

7.4.3 - Caractéristiques des matériaux

Béton

Le béton composant l'ouvrage est un B40: résistance caractéristique à la compression $F_c 28 = 40$ MPa.

Armatures

Les armatures en acier sont des FeE500 avec une limite élastique de 500 MPa.
Les armatures en inox sont des InE500 (1.4301) avec une limite élastique de 500 MPa

Armatures de précontrainte

Les armatures de précontrainte sont des câbles de type 19 T 15 (de classe 1860 MPa).

7.4.4 - Géométrie de l'ouvrage

L'ouvrage est un pont dalle en béton précontraint avec des encorbellements latéraux.

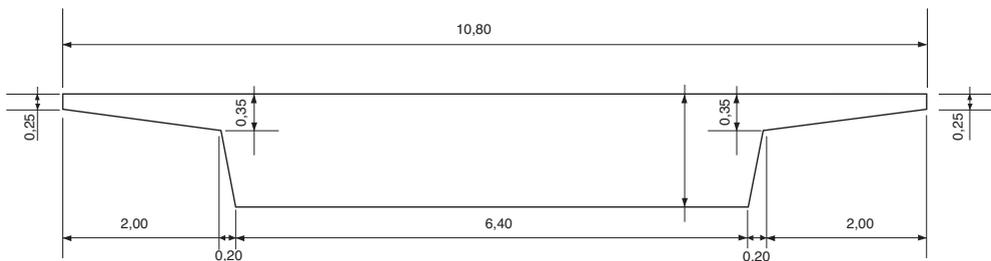


Figure n° 14: section type du tablier de l'ouvrage

7.4.5 - Estimation des quantités

- Volume béton: 200 m³
- Surface coffrée: 310 m²
- Acier de précontrainte: 13 câbles 19 T 15
 - Poids des câbles: 6 740 kg
 - Ratio: 34 kg/m³
- Armatures
 - Poids total: 14 800 kg
 - Ratio: 75 kg/m³

7.4.6 - Schéma de ferrailage

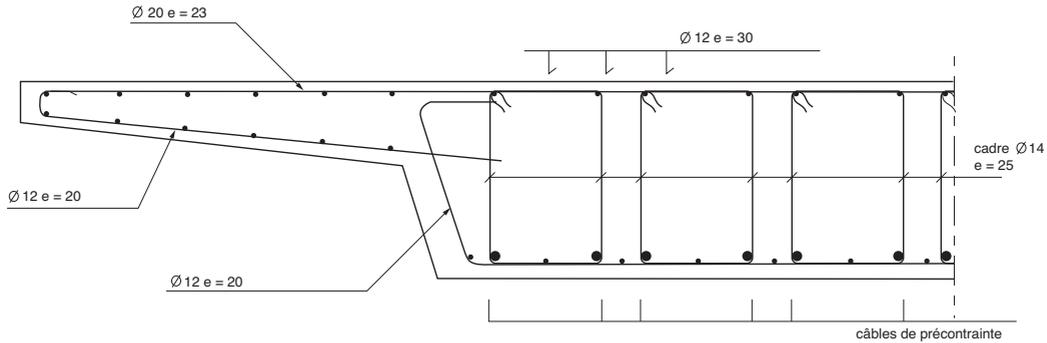


Figure n° 15: schéma de ferrailage

ϕ : diamètre des armatures
 e : espacement entre les armatures

Aciers longitudinaux

– Fibre supérieure	$\phi = 12 \text{ mm}$	e = 0,30 m
– Fibre inférieure	$\phi = 16 \text{ mm}$ (mi-travée)	e = 0,30 m
	$\phi = 14 \text{ mm}$ (extrémités)	e = 0,30 m

Aciers transversaux

– Fibre supérieure	$\phi = 20 \text{ mm}$	e = 0,23 m
– Fibre inférieure	$\phi = 12 \text{ mm}$	e = 0,20 m

Aciers pour l'effort tranchant

– 14 brins	$\phi = 14 \text{ mm}$	e = 0,25 m
------------	------------------------	------------

7.4.7 - Hypothèses de prix unitaire des matériaux

Ces prix sont donnés à titre indicatif et sont représentatifs d'un chantier classique.

Béton: 150 E HT/m³

Coffrage: 50 E HT/m²

Câbles de précontrainte: 3 E HT/kg

Ancrage de précontrainte: 750 E HT l'unité

Armature acier: 1,2 E HT/kg (prix fournitures: 0,4 E HT/kg + prix transport, façonnage et mise en œuvre: 0,8 E HT/kg)

Armature inox: 3,3 E HT/kg (prix fournitures: 2,5 E HT/kg + prix transport, façonnage et mise en œuvre: 0,8 E HT/kg) (prix donné dans le cadre d'une conjoncture très défavorable)

7.4.8 - Bilan estimatif

Ce bilan établit une comparaison entre différentes hypothèses de construction.

Cas numéro 1 : armatures tout acier

Tableau n° 13 : tablier avec des armatures en acier					
Matériau	Quantité	Unités	Prix unitaire euro	Montant total	%
Béton	200	m ³	150	30 000	29
Coffrage	310	m ²	50	15 500	15
Câble de précontrainte	6 740	kg	3,0	20 220	20
Ancrage de précontrainte	26	U	750	19 500	19
Acier	14 800	kg	1,2	17 760	17
				Total	102 980

Cas numéro 2 : armatures tout inox

Tableau n° 14 : tablier avec des armatures en inox					
Matériau	Quantité	Unités	Prix unitaire euro	Montant total	%
Béton	200	m ³	150	30 000	22
Coffrage	310	m ²	50	15 500	12
Câble de précontrainte	6 740	kg	3,0	20 220	15
Ancrage de précontrainte	26	U	750	19 500	15
Inox (1.4301)	14 800	kg	3,3	48 840	36
				Total	134 060

Cas numéro 3 : armature acier (90 %) et armatures inox (10 %)

Tableau n° 15 : tablier avec substitution partielle par des armatures inox (substitution 10 % d'inox)					
Matériau	Quantité	Unités	Prix unitaire euro	Montant total	%
Béton	200	m ³	150	30 000	28
Coffrage	310	m ²	50	15 500	15
Câble de précontrainte	6 740	kg	3	20 220	19
Ancrage de précontrainte	26	U	750	19 500	18
Inox	1 500	kg	3,3	4 950	5
Acier	13 300	kg	1,2	15 960	15
				Total	106 130

Cas numéro 4 : armatures acier (75 %) et armatures inox (25 %)

Tableau n° 16: tablier avec substitution partielle par des armatures inox (substitution 25 % d'inox)

Matériau	Quantité	Unités	Prix unitaire euro	Montant total	%
Béton	200	m ³	150	30 000	27
Coffrage	310	m ²	50	15 500	14
Câble de précontrainte	6 740	kg	3	20 220	18
Ancrage de précontrainte	26	U	750	19 500	18
Inox	3 700	kg	3,3	12 210	11
Acier	11 100	kg	1,2	13 320	12
				Total	110 750

Cas numéro 5 : armatures acier (50 %) et armatures inox (50 %)

Tableau n° 17: tablier avec substitution partielle par des armatures inox (substitution 50 % d'inox)

Matériau	Quantité	Unités	Prix unitaire euro	Montant total	%
Béton	200	m ³	150	30 000	25
Coffrage	310	m ²	50	15 500	13
Câble de précontrainte	6 740	kg	3	20 220	17
Ancrage de précontrainte	26	U	750	19 500	17
Inox	7 400	kg	3,3	24 420	20
Acier	7 400	kg	1,2	8 880	8
				Total	118 520

Bilan

Tableau n° 18: comparaison des solutions

	Tablier armatures acier	Tablier armatures inox	Tablier avec 10 % d'inox	Tablier avec 25 % d'inox	Tablier avec 50 % d'inox
Coût total	102 980	134 060	106 130	110 750	118 520
Écart %		30	3	7,5	15

Nota

Cette étude ne tient pas compte du gain possible sur la valeur de l'enrobage des aciers lors de l'utilisation des armatures inox, ni du gain possible sur le dimensionnement des armatures, lié aux performances mécaniques supérieures de l'inox.

7.5 - Utilisation adaptée à chaque ouvrage

L'utilisation d'armatures inox se justifie uniquement pour les ouvrages pouvant être soumis à un risque significatif de corrosion. Ce risque peut concerner :

- l'ouvrage en entier ;
- les éléments structuraux importants ;
- des parties des éléments structuraux.

Il faut également évaluer les conséquences de la corrosion selon les possibilités de maintenance. Sur certains ouvrages, les opérations de maintenance sont impossibles, pour d'autres, elles peuvent générer des coûts importants et de lourdes pertes d'exploitation si elles doivent interrompre ou perturber, par exemple, le trafic routier.

Pour chaque ouvrage, le concepteur doit, en fonction des contraintes environnementales, de la durée de vie souhaitée, des scénarios d'entretien envisagés et de l'accessibilité pour des opérations de maintenance, sélectionner les parties d'ouvrages pour lesquelles l'utilisation d'armatures inox est intéressante et choisir dans la gamme des armatures inox la nuance la mieux adaptée.

Des essais ont révélé une plus grande ductilité du béton armé avec des armatures inox. Cette propriété peut être mise à profit pour des ouvrages situés en zone sismique.

7.6 - Approche en coût global

Une gestion responsable et durable d'un patrimoine d'ouvrages inclut la prise en compte en amont de la réalisation de chaque projet, d'une analyse technico-économique intégrant son coût global sur toute sa durée de service, de la définition d'une stratégie ainsi que des scénarios d'entretien des ouvrages.

De nombreuses études, réalisées en Amérique du Nord et dans divers pays européens sur des ouvrages suivis pendant plusieurs années, ont démontré que

l'utilisation d'armatures inox constitue une solution économique avantageuse dès que l'on cherche à optimiser le coût global de l'ouvrage notamment en réduisant les frais de maintenance.

Cette politique, basée sur le principe **qu'il vaut mieux prévenir** (la corrosion) par un plus grand recours à l'inox dès la conception de l'ouvrage **que guérir** en assurant une maintenance parfois coûteuse a été validée dans ces pays sur de nombreux ouvrages.

L'utilisation d'armatures inox en substitution partielle ou totale (pour des parties d'ouvrage) renchérit le coût d'investissement du fait de l'écart de prix entre ces deux types d'armatures. Mais ce surcoût est compensé à terme par une diminution significative des frais d'inspection et de suivi de l'ouvrage ainsi que des coûts de maintenance et de réparation.

L'analyse comparative en coût global démontre l'intérêt de la substitution des armatures. Elle tient compte de l'ensemble des coûts directs (de maintenance notamment) ou indirects (incidence sur l'exploitation), pendant la durée de service de l'ouvrage. Elle intègre l'allongement de la durée de vie de l'ouvrage résultant de l'utilisation des armatures inox.

7.6.1 - Coûts directs

Les coûts directs sont diminués du fait que les frais de maintenance et d'entretien sont réduits à leur strict minimum.

7.6.2 - Coûts indirects

La prise en compte des coûts indirects est fonction de la nature de l'ouvrage. Par exemple, dans le cas d'ouvrages routiers, les coûts indirects incluent en particulier :

- les coûts de gestion et de perturbation du trafic ; la fermeture d'un ouvrage pour travaux, lorsqu'elle s'impose, engendre de multiples nuisances (engorgement, pollution atmosphérique et sonore) dues à la mise en place d'un itinéraire de déviation souvent problématique ;
- les coûts sociaux induits par les travaux de réparation : retard des usagers, surconsommation en carburant et augmentation des risques potentiels d'accident,

Utilisation des armatures inox pour la réparation d'ouvrages

- 8.1 - Principaux types d'ouvrages concernés**
- 8.2 - Diagnostics de la corrosion**
- 8.3 - Reconstitution de l'enrobage**

Pour réparer les ouvrages présentant des pathologies liées à la corrosion des armatures, il existe déjà des solutions telles que la protection cathodique ou l'application d'inhibiteurs de corrosion sur les parties d'ouvrage endommagées. Les armatures inox constituent également une solution intéressante : elles assurent un traitement simple et efficace des désordres et prolongent la durée de vie des ouvrages anciens.

L'une des propriétés fondamentales des armatures inox, la résistance face aux phénomènes de corrosion, permet de les utiliser et de les mettre en œuvre en réduisant la valeur de l'enrobage du béton (voir le chapitre 6). Après réparation, l'ouvrage ne présentera ainsi plus de risque lié au phénomène de corrosion, ce qui le pérennise.

La reconstitution du parement béton rend à l'ouvrage l'intégrité de sa structure, restaure l'apparence et l'aspect esthétique du béton, arrête la propagation des dégradations, évite de nouveaux désordres et ralentit le vieillissement naturel de l'ouvrage.

8.1 - Principaux types d'ouvrages concernés

Les phénomènes de corrosion des armatures acier peuvent non seulement affecter les ouvrages ou parties d'ouvrages soumis à des environnements agressifs mais aussi les ouvrages présentant des défauts liés à leur conception ou à leur mise en œuvre (formulation des bétons mal adaptée, non respect des tolérances d'enrobage, vibrations des bétons insuffisantes, cure des bétons inadaptée, fissurations mal maîtrisées, etc.).

Ce sont en particulier :

- les ouvrages d'art (tablier, piles, équipements, etc.) ;
- les ouvrages de stockage d'eau et les silos ;
- les tours aérorefrigérantes de centrales nucléaires et les cheminées de complexes industriels ;
- les ouvrages en site maritime (quais, digues, etc.) ;
- les murs de soutènement ;

- les tunnels ;
- les tranchées ouvertes ;
- les parkings (dalles et planchers) ;
- les bâtiments industriels (poutres et poteaux) ;
- les bâtiments collectifs (balcons et terrasses).

8.2 - Diagnostics de la corrosion

Le choix de la technique de réparation de l'ouvrage dépend d'un diagnostic précis des symptômes, des causes, et des conséquences possibles de la corrosion :

- origine et étendue de la corrosion ;
- profondeur de carbonatation et de pénétration des agents agressifs ;
- épaisseur de béton dégradé ;
- état de dégradation des armatures ;
- prévision d'évolution ;
- impact sur la sécurité et la stabilité de l'ouvrage ;
- impact sur l'esthétique des parements...

Après avoir pris en compte les contraintes et exigences d'exploitation de l'ouvrage (contraintes de circulation, délais d'intervention, etc.) et sa classe d'exposition, il sera possible de sélectionner la nuance d'inox adaptée.

8.3 - Reconstitution de l'enrobage

La technique de réparation des parties d'ouvrages affectées par des phénomènes de corrosion nécessite le respect d'une méthodologie rigoureuse, une planification précise des opérations et une organisation spécifique à chaque chantier. De la qualité de la réalisation des travaux dépend la pérennité de la réparation.

La zone dégradée de béton doit être éliminée avec soin et la surface du béton parfaitement préparée et nettoyée afin d'assurer l'adhérence du futur matériau d'enrobage. Toute partie de béton non adhérente ou écaillée doit être enlevée.

Les armatures acier doivent être dégarnies sur une longueur et une profondeur suffisantes, c'est-à-dire jusqu'à apparition d'une zone d'acier sain, (dégagement du béton à la périphérie de l'acier sur une profondeur d'au moins 20 à 25 mm). Toute trace de corrosion sur les armatures doit être éliminée afin d'éviter tout risque d'amorçage de nouvelles corrosions localisées. La longueur d'acier sain mis à nu doit être suffisante dans le respect des longueurs de scellement nécessaires. Les armatures corrodées doivent être enlevées.

Les armatures atteintes par la corrosion doivent être remplacées par des armatures en inox de diamètre au plus équivalent. Leur mise en œuvre doit respecter les règles liées aux respects des longueurs d'ancrage et des recouvrements.

La protection des armatures sera réalisée par mise en place du matériau d'enrobage – béton ou mortier – sans surépaisseur, et en reconstituant un aspect de surface, une teinte et une texture aussi proches que possible du béton de l'ouvrage.

Les matériaux utilisés pour reconstituer la zone d'enrobage seront à base de liants hydrauliques. Ils seront choisis en référence au guide technique LCPC/SETRA août 1996 « *choix et application des produits de réparation des ouvrages en béton* » et devront être conformes aux normes en vigueur relatives aux produits destinés aux réparations de surface en béton durci.



*Travaux de consolidation
des piles d'un viaduc (Italie).*

Photo Centro-Inox

Conclusion

La prise en compte de la notion de durabilité lors de la conception d'ouvrages revêt une importance croissante et tend à devenir primordiale; elle repose d'abord sur un choix pertinent des matériaux, en sélectionnant notamment ceux qui évitent la corrosion dans les zones sensibles.

À cet égard, l'utilisation des armatures inox en substitution partielle ou totale des armatures acier s'impose pour les ouvrages vulnérables ou soumis à des environnements agressifs, c'est-à-dire pour lesquels les risques de corrosion sont significatifs.

Sur le plan technique, l'utilisation optimisée de l'inox nécessite en premier lieu de déterminer les structures ou parties d'ouvrages exposées à des agressions environnementales sévères, puis celles qui sont soumises par ailleurs à des contraintes spécifiques de trafic ou d'accessibilité.

Ensuite, il convient de sélectionner les nuances d'inox adaptées aux classes d'exposition auxquelles sont soumis les ouvrages: les règles d'utilisation et de dimensionnement relatives aux armatures acier sont facilement transposables aux armatures inox.

Économiquement, il ne faut pas s'arrêter à une simple comparaison de prix d'achat matière inox/acier; avec des coûts de mise en œuvre identiques, dès lors que l'inox allège les structures et optimise les dimensionnements ainsi que les quantités de matière utilisée, l'incidence d'un remplacement partiel, voire total, d'acier par de l'inox sur le coût de l'ouvrage est dans la plupart des cas, faible et rapidement amorti par des gains substantiels sur les frais d'exploitation d'entretien et de maintenance.

Une approche technico-économique reposant sur le concept de coût global, prenant en compte la durée de service de l'ouvrage, invite donc les concepteurs et gestionnaires d'ouvrages, dans un souci de gestion préventive de leur patrimoine, à considérer les armatures inox comme une solution intéressante pour garantir, en prévenant les dégradations provoquées par la corrosion, la pérennité des ouvrages.

Les armatures inox connaissent un essor continu et constant dans de nombreux pays : leur incidence sur la durabilité des structures est dorénavant prouvée et reconnue.

Ce document devrait contribuer à aider les acteurs français du Bâtiment et du Génie Civil à concevoir des ouvrages encore plus pérennes, encore plus esthétiques, et en harmonie avec le concept de développement durable.

Les armatures inox sont une réponse :

- aux nouvelles exigences des normes européennes qui mettent en valeur l'importance de la durabilité des constructions ;
- aux besoins des maîtres d'ouvrage vis-à-vis de la gestion durable du patrimoine ;
- aux nécessités des gestionnaires d'ouvrages de limiter les coûts de maintenance et de réparations et de réduire les gênes aux usagers ;
- aux demandes croissantes de nos concitoyens pour l'amélioration de leur cadre de vie et de leur sécurité.

Les réponses à vos questions

Dans ce chapitre sont répertoriés conseils pratiques, informations et réponses à vos questions sur les inox, leur comportement et les matériaux avec lesquels ils peuvent être associés ou en contact.

1. Les couples galvaniques

Qu'est ce que le phénomène de couplage galvanique ou « pile électro-chimique » ?

Existe-t-il un phénomène de couplage galvanique entre une armature inox et une armature acier ?

2. La contamination ferreuse

Qu'est-ce que la contamination ferreuse ?

Quels sont les effets de la contamination ferreuse ?

3. Le soudage des inox

Les inox sont-ils soudables ?

4. La corrosion sous contrainte

Qu'est ce que la corrosion sous contrainte ?

Existe-t-il de la corrosion sous contrainte avec l'utilisation d'armatures inox ?

5. Les phénomènes de courants vagabonds

Qu'est-ce qu'un courant vagabond ?

Comment se comporte l'inox en présence de courants vagabonds ?

6. Les armatures inox adhèrent-elles au béton ?

7. Un inox peut-il se corroder ?

8. Pourquoi n'existait-il pas d'armatures inox auparavant en France ?

9. Où trouver les armatures inox ?

10. Y a-t-il des références d'ouvrages utilisant les armatures inox ?

11. Comment réagit une armature inox placée dans un sol agressif ?

12. L'inox est-il revêtu ?

13. La passivation

Qu'est-ce que la passivation ?

Les armatures inox ont-elles besoin d'être passivées ?

14. L'inox est-il un matériau adapté pour traiter le problème des ponts thermiques ?

15. Les armatures inox sont-elles certifiées ?

1. Les couples galvaniques

Qu'est ce que le phénomène de couplage* galvanique ou « pile électro-chimique » ?

Lorsque deux métaux, ayant des potentiels de corrosion différents, sont en contact l'un avec l'autre dans un milieu corrosif, jouant le rôle d'électrolyte, il peut se produire une corrosion dite galvanique. La corrosion galvanique est aussi communément appelée « pile électrochimique » ou corrosion de contact ou corrosion bimétallique.

Existe-t-il un phénomène de couplage galvanique entre une armature inox et une armature acier ?

Cas où deux armatures sont passives : cas des ouvrages neufs

Lorsque les deux matériaux, présents dans un milieu alcalin, sont dans un état passif (c'est-à-dire de non corrosion), les potentiels électrochimiques mesurés pour les deux matériaux sont peu différents. La différence de potentiel de la « pile » ainsi formée est très faible. Il n'y a pas assez d'énergie pour créer un courant de corrosion. Ainsi, les deux matériaux peuvent être couplés sans problème : l'inox dans les zones à risque d'infiltration de chlorures dans le béton et l'acier dans des zones mieux protégées des agressions extérieures et ceci au sein du même ouvrage.

Cas où l'armature acier a perdu sa passivité et l'inox reste passif : cas de travaux de réparation

Dans le cas où l'armature acier se corrode et où l'armature inox reste passive, il peut y avoir alors une vitesse de corrosion due au couplage galvanique entre les deux matériaux ; il se formerait alors une « pile électro-chimique » ; ces phénomènes sont complexes et dépendent de nombreux paramètres (surfaces exposées...). On sait que la présence de mixité d'armatures (inox-acier) peut se rencontrer dans la cas où on ne souhaite pas mettre toute la structure en inox parce que cette structure n'est pas exposée en totalité à des conditions agressives.

Des études ont montré que si les deux types d'armatures étaient présentes simultanément dans une structure en béton et soumises à des agressions de type chlorures, la corrosion qui s'en suivrait serait toujours plus faible que celle observée sur des armatures uniquement acier soumises aux mêmes milieux. En effet, la vitesse

**Couplage = mise en contact de deux matériaux métalliques.*

de corrosion galvanique mesurée est quinze fois plus faible quand on considère un ouvrage contenant les deux types d'armatures (armature acier qui se corrode et armature inox), que la vitesse de corrosion créée dans un ouvrage entièrement composé d'armatures acier.

2. La contamination ferreuse

Qu'est-ce que la contamination ferreuse ?

Les outils que l'on utilise pour la mise en forme, le découpage, l'usinage, etc., s'ils n'ont pas été exclusivement dédiés à l'inox, sont susceptibles de provoquer de la contamination ferreuse. De même, le stockage d'armatures inox au contact de matériaux ferreux peut engendrer de la contamination : des poussières et particules ferreuses restent accrochées à la surface de l'inox, leur présence n'étant, la plupart du temps, pas détectable à l'œil nu.

Quels sont les effets de la contamination ferreuse ?

Effets au cours du stockage et de la mise en place des armatures

Les poussières ou particules ferreuses présentes sur les outils vont se déposer en grand nombre sur l'inox, lors des opérations de mise en forme ; elles vont réagir avec le milieu ambiant et finir par se corroder (apparition d'oxyde de fer, plus communément appelé rouille).

Il apparaîtra donc dans un premier temps, à la surface de l'inox, des traces de rouille qui sont en fait les oxydes de fer et non une corrosion de l'inox : en effet l'inox présente en surface une couche passive qui est son principal bouclier contre la corrosion. Toutefois, si l'inox reste longtemps à l'air libre ou dans une atmosphère oxydante, l'oxyde de fer qui s'est déposé peut provoquer une altération locale de cette couche passive. Ainsi, sensibilisée par les particules ferreuses, la couche passive peut être sujette à une corrosion appelée corrosion par piqûres.

Il s'agit donc, soit d'éviter, soit d'éliminer la contamination ferreuse. Pour l'éviter, il est nécessaire de mettre en œuvre l'inox dans des ateliers et avec des outils dédiés à l'inox ; ainsi les poussières ou particules ferreuses n'entrent pas en contact avec l'inox. Pour l'éliminer, la solution consiste à procéder à un traitement de surface avec un produit à base d'acide nitrique.

Ces opérations sont en général difficiles à mettre en œuvre dans le cas des armatures inox et ne sont nécessaires que si la contamination apparaît vraiment sérieuse ; en tout état de cause, le meilleur moyen d'éviter le risque de corrosion

dû à la contamination ferreuse (lorsqu'elle est modérée) est de mettre en place l'armature dans le béton, le plus rapidement possible après la livraison sur le chantier.

Effets dans un ouvrage

Si la contamination reste modérée en quantité, la corrosion qui pourrait se produire ultérieurement sur les armatures restera faible. Les produits de corrosion formés ne seront pas suffisamment volumineux pour fissurer le béton : ils trouveront leur place dans la structure microporeuse du béton.

3. Le soudage des inox

Les inox sont-ils soudables ?

Les inox sont parfaitement soudables, mais ils nécessitent :

- des paramètres de soudage spécifiques ;
- une protection gazeuse spécifique ;
- un décapage suivi d'une passivation s'il subsiste des oxydes dans la zone soudée.

Pour faciliter l'utilisation d'armatures inox sur les chantiers, il est préférable de pratiquer des ligaturages à la seule condition indispensable d'utiliser des fils de ligaturage en inox (produits largement commercialisés). Les armatures inox peuvent également s'acheter sous forme de treillis soudés. Ces produits sont vendus par les fabricants d'armatures et certains armaturiers qui conçoivent les treillis aux dimensions adaptées aux chantiers.

4. La corrosion sous contrainte

Qu'est ce que la corrosion sous contrainte ?

C'est une corrosion qui survient lorsqu'il y a conjonction de plusieurs paramètres ou conditions :

- contraintes internes ;
- température supérieure à la température ambiante : plus la température est élevée plus le risque est important ;

- présence de chlorures – plus il y en a, plus le risque est important ;
- diminution du pH – plus le pH diminue, plus le risque s'accroît ;
- sensibilité de certaines nuances d'inox – les inox austénitiques.

Existe-t-il de la corrosion sous contrainte avec l'utilisation d'armatures inox ? (le cas des bétons précontraints étant exclu)

Dans toutes les études de la littérature sur la corrosion des inox dans le béton, aucun faciès de corrosion sous contrainte n'a été mis en évidence. La corrosion sous contrainte est un phénomène qui a peu de risque de se rencontrer dans les armatures de béton armé d'inox. Un certain nombre de paramètres doivent coexister pour qu'elle survienne et ces différents facteurs doivent être simultanément réunis :

1. être en présence d'une nuance sensible à ce phénomène (les inox austénitiques y sont les plus sensibles) ;
2. + présence de bétons carbonatés ;
3. + quantité de chlorures importante ;
4. + forte température (supérieure à 50 °C).

Dans le cas où tous ces facteurs seraient réunis, le risque de corrosion sous contrainte peut être fortement diminué en choisissant une nuance austéno-ferritique de type 1.4462 ou une nuance ferritique.

5. Les phénomènes de courants vagabonds

Qu'est-ce qu'un courant vagabond ?

L'expression « courant vagabond » est uniquement utilisée pour des courants d'origine industrielle ; ils sont provoqués lorsque des courants continus de retour d'installations diverses (tramway, train, bac d'électrolyse, secteur force et lumière, etc.) n'empruntent pas les conducteurs prévus à cet effet, mais s'en échappent et passent par le sol et les structures qui y sont adjacentes. Aux endroits où le courant quitte ces structures, le métal est corrodé par électrolyse. Les remblais élevés, pierreux ou rocheux, les régions sèches se prêtent moins au passage des courants vagabonds que les profonds déblais, les tunnels et les régions marécageuses.

Les courants échappés du rail par exemple, suivent les structures qu'ils rencontrent (réseaux de canalisation métalliques ou béton armé...) et les abandonnent en certains points (provoquant une corrosion des structures) pour retourner au sol et gagner la sous-station.

L'intensité des courants vagabonds peut être d'une centaine d'ampères ; les courants alternatifs n'offrent pas les mêmes dangers que le courant continu.

Comment se comporte l'inox en présence de courants vagabonds ?

Aucune étude de l'effet des courants vagabonds sur la résistance à la corrosion des inox dans le béton n'est disponible, à ce jour. Cependant, il est possible à partir d'un diagramme intensité / potentiel de prévoir l'influence d'un courant vagabond se propageant dans un béton par ses armatures (acier ou inox).

Cas 1 : Acier

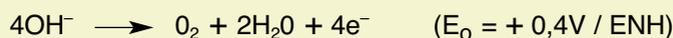
L'acier se corrode, et la présence du courant vagabond ne fait qu'accélérer cette corrosion,

Cas 2: Inox résistant « modérément » à la corrosion (type inox ferritique)

Le courant vagabond accélère la corrosion et l'inox n'a pas d'avantage par rapport à un acier.

Cas 3: Inox fortement résistant à la corrosion (type inox austéno-ferritique)

Il ne se produit pas de corrosion sous l'effet du courant, mais un dégagement gazeux d'oxygène en surface de l'inox suivant la réaction d'oxydation :



Donc sous l'effet de l'électrolyse, on appauvrit en OH^- c'est-à-dire qu'on fait baisser le pH. Dans le cas 3, le courant vagabond ne provoque pas de corrosion dans un premier temps. Comme la carbonatation, il entraîne une baisse du pH, qui pourrait conduire dans un deuxième temps à une augmentation de l'agressivité du milieu.

Pour des armatures pouvant être soumises à des courants vagabonds, il est conseillé d'employer des nuances d'inox « hautement résistantes » (1.4539/1.4462), qui sauront résister dans le temps au changement de composition du milieu sous l'effet de l'électrolyse.

6. Les armatures inox adhérent-elles au béton ?

L'adhérence du béton sur une armature inox est équivalente à celle d'une armature acier. L'adhérence est due aux verrous ou empreintes gravées sur le matériau et non à l'oxyde qui le recouvre. Une oxydation très importante et non adhérente risque de provoquer une obstruction des zones gravées qui limite par la suite l'adhérence du béton – ce dernier ne pouvant plus s'ancrer dans les recoins des empreintes et des verrous.

7. Un inox peut-il se corroder ?

Les inox ne se corrodent pas si :

– la nuance d'inox a été correctement sélectionnée selon la classe d'exposition dans laquelle se trouve l'ouvrage ; une nuance d'inox est choisie en fonction du milieu dans lequel le matériau évoluera et de la durée de vie préalablement définie ;

– la mise en œuvre est effectuée dans les règles de l'art ; l'inox nécessite certaines pratiques différentes de celles utilisées pour les aciers (le stockage est plus rigoureux, le ligaturage est réalisé avec du fil inox, etc.).

8. Pourquoi n'existait-il pas d'armatures inox auparavant en France ?

La norme XP A 35-014 concernant les armatures inox pour béton armé a été publiée en France, en 2003. Les pays disposant d'une norme nationale utilisent depuis plusieurs années les armatures inox pour de nombreux ouvrages ou parties d'ouvrages placés dans des conditions extrêmes (par exemple : piles de ponts en bord de mer) ou sujettes à des conditions particulières (par exemple : courants vagabonds). Afin de répondre aux préoccupations des maîtres d'ouvrage et des maîtres d'œuvre face aux risques de corrosion, il est maintenant possible d'utiliser des armatures inox en France en conformité avec la réglementation.

Il est à noter que la nouvelle norme européenne l'Eurocode 2, « calcul des structures en béton » introduit l'utilisation de l'inox en armatures dans le paragraphe 4.4.1.2.

9. Où trouver les armatures inox ?

Les armatures inox sont commercialisées par le même réseau de distribution que les armatures aciers (fabricants d'armatures inox et armaturiers) et sont aussi disponibles auprès des aciéristes inox ou de leurs distributeurs.

10. Y a-t-il des références d'ouvrages utilisant les armatures inox ?

De nombreux chantiers ont été réalisés ces dernières décennies en Europe (Angleterre, Suède, République Tchèque...) ainsi qu'aux États-Unis, au Canada, et au Mexique, dans des sites justifiant le recours aux armatures inox. Les qualités de l'inox sont désormais reconnues et validées dans ces pays.

11. Comment réagit une armature inox placée dans un sol agressif ?

L'armature inox se trouve enveloppée par du béton et n'entre pas en contact avec les éléments présents dans le sol. Le risque de corrosion d'une armature inox par les sols est donc quasi nul. Cependant, il peut arriver que l'armature inox ne soit pas enveloppée dans le béton (par choix, par conception imposée). Dans ce cas, suivant la nuance d'inox et la nature des sols, il peut exister un risque de corrosion d'où l'importance du choix de la nuance d'inox.

Si l'on est obligé d'avoir une partie de l'armature en contact avec le sol, il est préférable d'utiliser une nuance résistant aux agents agressifs – par exemples : 1.4429 - 1.4571 - 1.4401 - 1.4436 – en fonction du degré d'agressivité du sol.

Remarque : la corrosion dans les bétons et la corrosion dans les sols sont deux types de corrosion faisant appel à des mécanismes bien différents.

12. L'inox est-il revêtu ?

Contrairement à l'acier galvanisé, peint ou recouvert d'époxy, l'inox est un matériau à part entière. Les inox contiennent du chrome en pourcentage élevé (supérieur à 10,5 %). Ce chrome, au contact de l'air, s'oxyde et la surface de l'inox se couvre spontanément d'une couche d'oxydes et d'hydroxydes de chrome, appelée « couche de passivation ». Très fine et invisible à l'œil, elle confère à l'inox une

partie de ses propriétés, en particulier sa résistance à la corrosion. La couche de passivation se reforme spontanément quelles que soient les agressions mécaniques subies par l'inox (perçage, rayure), de la même manière que la peau humaine, qui est aussi une protection, se répare spontanément en cas de blessure.

13. La passivation

Qu'est-ce que la passivation ?

Les décapages (mécanique ou chimique) réalisés lors de la fabrication des inox ou après les opérations de soudage, éliminent non seulement les oxydes, mais détruisent également l'oxyde et l'hydroxyde de chrome (couche de passivation) présents naturellement en surface de l'inox. Cette couche passive se reconstitue spontanément, toute seule, au contact de l'air : c'est la passivation. Dans le but d'accélérer sa reconstitution, l'industrie sidérurgique recommande de pratiquer une opération de passivation pour les inox les moins chargés en chrome (les inox martensitiques). La passivation industrielle est une opération chimique qui se pratique à partir de solutions d'acide nitrique (bain, pulvérisation, pâte, etc.). Pour reprendre la comparaison avec la peau humaine, la passivation joue le même rôle que les pommades cicatrisantes.

Les armatures inox ont-elles besoin d'être passivées ?

Non, les armatures inox non pas besoin d'être passivées. Les nuances d'inox utilisées sont suffisamment riches en chrome pour que la couche de passivation se reconstitue spontanément sans difficulté.

14. L'inox est-il un matériau adapté pour traiter le problème des ponts thermiques ?

Oui. De par sa faible conductivité thermique, l'inox est un matériau recommandé pour cette application.

15. Les armatures inox sont-elles certifiées?

La conformité des armatures inox, comme celles des aciers pour béton armé, est garantie :

– soit par la certification NF « Aciers pour béton armé » attribuée par l'AFCAB ; dans ce cas, les produits sont contrôlés par le producteur dans les conditions définies par la certification ;

– soit par des contrôles de réception. Ils sont généralement effectués en usine avant expédition, conformément aux dispositions de l'article 10 de la norme de référence (XP A 35-014 pour les armatures inox) ; dans ce cas, il est établi un certificat de réception ou un procès verbal de réception selon la norme NF EN 10-204.



Chapitre

9

Annexes

Annexe 1

**Caractéristiques géométriques
des armatures inox**

Annexe 2

**Principales caractéristiques
des armatures inox**

Bibliographie

Normes et documents de référence

Annexe 1

Caractéristiques géométriques des armatures inox

Les armatures à verrous

Les armatures 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 du produit).

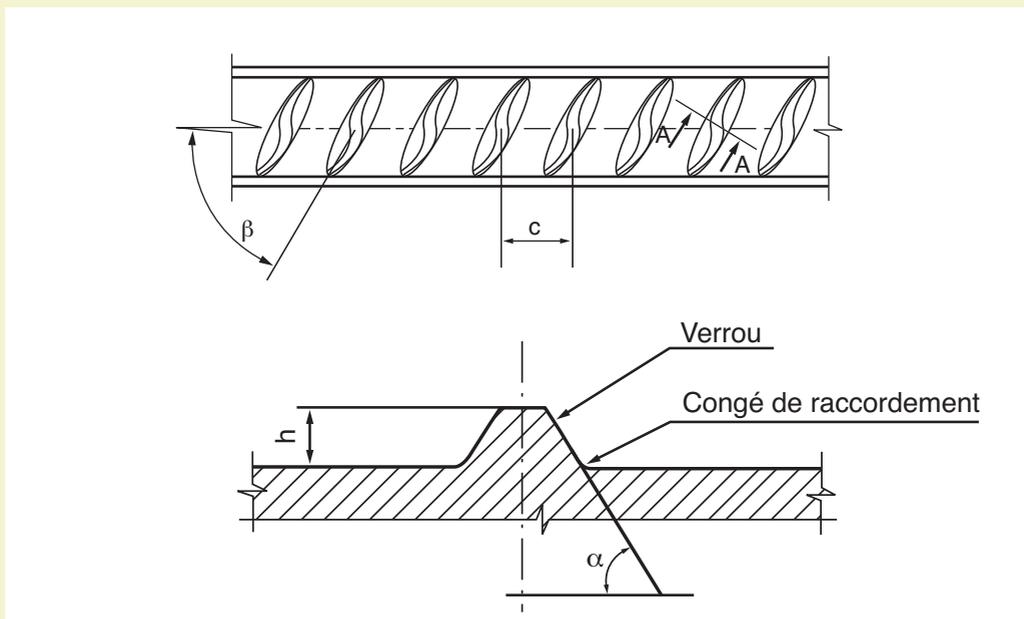


Schéma des armatures à verrous

L'angle (β) d'inclinaison des verrous sur l'axe longitudinal du produit doit être compris entre 35° et 75° .

Dans tout plan diamétral, l'angle (α) d'inclinaison des flancs des verrous avec la génératrice du noyau contenue dans ce plan doit être supérieur ou égal à 45° .

Hauteur et espacement des verrous (dimensions en mm)				
Diamètre nominal du produit, d	hauteur des verrous h		Espacement entre les verrous c	
	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

Le Coefficient de forme (f_R)

Le coefficient de forme (f_R) doit satisfaire les prescriptions données au tableau ci-dessous, en fonction du diamètre nominal du produit.

Coefficient de forme (f_R) minimum

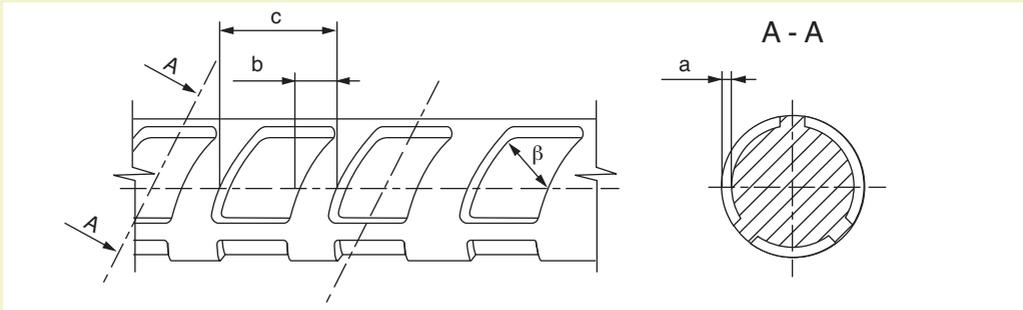
Coefficient de forme (f_R) minimum	
Diamètre nominal du produit, d (mm)	f_R min
5 et 6	0,039
7 et 8	0,045
9 et 10	0,052
12 à 50	0,056

De plus, 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).

La description complète de ces verrous est donnée par la norme XP A 35-014.

Les armatures à empreintes

Les armatures montrent au moins trois séries d'empreintes présentant un espace uniforme.



Armatures à empreintes

L'angle (b) d'inclinaison des empreintes sur l'axe longitudinal du produit doit être d'au moins 45°

La profondeur (a) des empreintes, la largeur (b) du relief entre deux empreintes successives d'une même série et l'espacement (c) des empreintes doivent respecter les valeurs indiquées au tableau ci-dessous.

Profondeur et espacement des empreintes (dimensions en mm)			
Diamètre nominal du produit, d (mm)	a min	b min	c max
5	0,20	1	7
6	0,30	1	11
7	0,30	1	11
8	0,30	1	11
9	0,35	2	11
10	0,35	2	11
12	0,35	2	11
14	0,45	3	11
16	0,45	3	15
20	0,60	4	15
25	0,75	4	15
32	1,00	5	20
40	1,20	5	20

La description complète de ces empreintes est donnée par la norme XP A 35-014.

Annexe 2

Principales caractéristiques des armatures inox

Masses linéiques des armatures inox commercialisées

Diamètre nominal d (mm)	Section nominale e (mm ²)	Masse linéique (kg/m)							
		Inox de masse volumique 7,7 kg/dm ³ (ferritique)		Inox de masse volumique 7,8 kg/dm ³ (austéno-ferritique)		Inox de masse volumique 7,9 kg/dm ³ (austénitique)		Inox de masse volumique 8,0 kg/dm ³ (austénitique)	
		Symbolique	Numérique	Symbolique	Numérique	Symbolique	Numérique	Symbolique	Numérique
		X3CrNb17	1.4511	X2CrNiMoN22-5-3 X8CrMnCuNB17-8-3	1.4462 1.4597	X5CrNi18-10 X2CrNi18-10	1.4301 1.4311	X5CrNiMo17-12-2 X2CrNiMoN17-13-3 X3CrNiMo17-13-3 X6CrNiMoTi17-12-2 X1CrNiMoCu25-20-5	1.4401 1.4429 1.4436 1.4571 1.4539
3	7,1	0,054		0,055		0,056		0,057	
4	12,6	0,097		0,098		0,099		0,101	
5	19,6	0,151		0,153		0,155		0,157	
6	28,3	0,218		0,221		0,223		0,226	
7	38,5	0,296		0,300		0,304		0,308	
8	50,3	0,387		0,392		0,397		0,402	
10	78,5	0,605		0,613		0,620		0,628	
12	113	0,871		0,882		0,893		0,905	
14	154	1,185		1,201		1,216		1,232	
16	201	1,548		1,568		1,588		1,608	
20	314	2,419		2,450		2,482		2,513	
25	491	3,780		3,829		3,878		3,927	
32	804	6,193		6,273		6,354		6,434	
40	1257	9,676		9,802		9,927		10,053	
50	1963	15,119		15,315		15,512		15,708	

Corrélation entre limite d'élasticité des armatures et nuances d'inox – cas des produits obtenus par crantage à froid (petits diamètres)

Famille d'inox	Nuances d'inox		Limite conventionnelle d'élasticité à 0,2 % en MPA			
	symbolique	numérique				
			235	500	650	800
Ferritique	X3CrNb17	1.4511	InE235	*	*	*
Austénitique	X5CrNi18-10	1.4301	*	InE500	InE650	*
Austénitique	X5CrNiMo17-12-2	1.4401	*	InE500	InE650	*
Austénitique	X3CrNiMo17-13-3	1.4436	*	InE500	InE650	*
Austénitique	X6CrNiMoTi17-12-2	1.4571	*	InE500	InE650	*
Austénitique	X1CrNiMoCu25-20-5	1.4539	*	InE500	InE650	*
Austénitique	X8CrMnCuNB17-8-3	1.4597	*	InE500	InE650	*
Austéno-ferritique	X2CrNiMoN22-5-3	1.4462	*	InE500	InE650	InE800

* Produit non disponible pour des raisons technologiques ou métallurgiques.

**Corrélation entre limite d'élasticité des armatures et nuances d'inox
- cas des produits obtenus par crantage à chaud (gros diamètres)**

Famille d'inox	Nuances d'inox		Limite conventionnelle d'élasticité à 0,2 % en MPa			
	symbolique	numérique	235	500	650	800
Ferritique	X3CrNb17	1.4511	InE235	*	*	*
Austénitique	X2CrNiN18-10	1.4311	InE235	InE500	*	*
Austénitique	X2CrNiMoN17-13-3	1.4429	InE235	InE500	*	*
Austénitique	X3CrNiMo17-13-3	1.4436	InE235	InE500	*	*
Austénitique	X6CrNiMoTi17-12-2	1.4571	InE235	InE500	*	*
Austénitique	X1CrNiMoCu25-20-5	1.4539	InE235	InE500	*	*
Austénitique	X8CrMnCuNB17-8-3	1.4597	InE235	InE500	*	*
Austéno-ferritique	X2CrNiMoN22-5-3	1.4462	*	InE500	InE650	*

* Produit non disponible pour des raisons technologiques ou métallurgiques.

**Nuances d'inox conseillées pour les armatures
en fonction des classes d'exposition du béton**

Classe d'exposition	Nuance d'inox conseillée			Autre nuance possible
	1.4511	1.4301/ 1.4311 ou 1.4597	1.4462	1.4539
XO: aucun risque de corrosion ni d'attaque				
XC: corrosion induite par la carbonatation				
	XC1	x		
	XC2		x	
	XC3		x	
	XC4		x	
XD: corrosion induite par les chlorures				
	XD1		x	
	XD2		x	
	XD3		x	
XS: corrosion induite par les chlorures en mer				
	XS1		x	
	XS2			x
	XS3		x	x
XF: attaque gel/dégel				
	XF1		x	
	XF2		x	
	XF3		x	
	XF4			x
XA: attaques chimiques				
	XA1		x	
	XA2		x	
	XA3			x

Remarque: nuances conseillées si les armatures sont laissées à l'air libre: 1.4401 / 1.4429 / 1.4436 / 1.4571

Bibliographie

1. Ouvrages

PASTORE, PEDEFERRI, BERTOLINI, BOLZONI, *Cigada Electrochemical study on the use of duplex stainless steel in concrete*. Duplex SS, Beaune, 1991.

TREADAWAY, COX, BROWN, *Durability of corrosion resisting steel in concrete*. Proc. Instn Civ. Engrs, Part 1 N° 86 305-331, April 1989.

HURLEY AND SCULY, *Chloride Threshold levels in clad 316L and solid 316LN*. Stainless rebar, Corrosion, paper 2224, Denver, 2002.

MC DONALD, SHERMAN, PFEIFER, VIRMANY, *Stainless Steel Reinforcing as corrosion protection*. Concrete International, 65-70, 1995.

KUIRY, AMAT, GANGULY, *Corrosion Behaviour of low nickel stainless steel vis-à-vis conventional and corrosion resistant structural steels for rebars applications*. Trans. Indian Institute met., 53 (1-2) 63 - 69, 2000.

CALLAGHAN, *The performance of a 12 % Cr steel in concrete in severe marine environments*. Corrosion science, vol 35, Nr 5-8, pp 1535 1541, 1993.

BARRALIS (J.) et MAEDER (G.), *Précis de métallurgie, élaboration, structures-propriétés et normalisation*. Éd. Afnor-Nathan, septembre 1985.

LACOMBE (P.), BARROUX (B.) et BERRANGER (G.), avec le concours d'Ugine, *Les aciers inoxydables*. Éditeurs scientifiques, les éditions de la physique, 1990.

Guide technique des aciers inoxydables. Éd. Ugine.

Design manual for roads and bridges. The Highway Agency-Scottish Executive Development Departement, BA 84102.

Guidance of the use of stainless steel reinforcement. Report of Concrete Society Steering Committee, Technical Report n° 51, 1998.

Stainless steel in concrete, state of the art report. European Federation of corrosion.

YUNOVICH (Mark), THOMPSON (Neil G.) et BALVANYOS (Tunde), Lester Lave, *Stainless Steel Reinforcement For Concrete, The Use of Stainless Steel Reinforcement in Bridges*. Ove Arup & Partners Research and Development Highway Bridges, British Stainless Steel Association, avril 2003.

PING GU, ELLIOTT (S.), BEAUDOIN (J.J.) et ARSENAULT (B.), *Corrosion Resistance of Stainless Steel in Chloride Contaminated Concrete*. American Concrete Institute, Denver Colorado, USA, march 14-19, 1996.

FRANCHI (A.), CRESPI (P.) et BENNANI (A), *Stainless Steel Reinforcing Bars for Structural Seismic Applications*. XI Congresso Nazionale « L'ingegneria in Italia », Genova 25-29 gennaio 2004.

PEDEFERRI (Pietro), *Il Comportamento Alla Corrosione Degli Acciai Inossidabili Negli Ambienti Tipici Del Mondo Delle Costruzioni*. Département di Chimica, Materiali e Ingegneria Chimica « Giulio Natta » Politecnico di Milano.

2. Contributions et articles

FLINT et COX. « The resistance of stainless steel partly embedded in concrete to corrosion by sea water ». *Magazine of concrete research*, vol. 40, Nr 142, 13-27, mars 1988.

BERTOLINI, BOLZONI, PASTORE, PEDEFERRI. « Stainless steel behaviour in simulated concrete pore solution ». *Britisch Corrosion journal*, N° 31, p3, 1996.

NURNBERGER, BEUL, ONUSEIT, OTTO. « Corrosion Behaviour of welded stainless reinforced in concrete ». *Graf Journal 4*, 225-259, 1994.

Normes et documents de référence

1. Documents de référence

Fascicule 65-A Exécution des ouvrages de génie civil en béton armé ou en béton précontraint par post-tension, août 2000.

Additif au fascicule 65-A Exécution des ouvrages de génie civil en béton armé ou en béton précontraint, août 2000.

2. Eurocodes

EN 1990 Eurocode 0 - Base de Calcul des structures.

NF EN 1991-1-1
Mars 2003 Eurocode 1 - Actions sur les structures -
Partie 1-1 : actions générales - Poids volumiques, poids propres, charges d'exploitation des bâtiments

EN 1991-1.3 Charges de neige.

EN 1991-1.4 Actions dues au vent.

EN 1991-1.5 Actions thermiques.

EN 1991-1.6 Actions en cours de construction.

EN 1991-2 Charges sur les ponts dues au trafic

EN 1992-1-1 Eurocode 2 : calcul des structures en béton - Règles communes pour les bâtiments et ouvrages de génie civil

EN 1992 - 2 Pont.

3. Normes

XP A 35-014	Aciers pour béton armé – Barres et couronnes lisses, à verrous ou à empreintes en acier inoxydables (décembre 2003).
NF EN 206-1	Béton – Partie 1 : spécification, performances, production et conformité.
NF EN 197.1	Ciment – Partie 1 : composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants (février 2001).
NF P 18-201	DTU 21 – Travaux de bâtiment – Exécution des ouvrages en béton – Cahier des clauses techniques (mars 2004).
NF EN 10088-1	Aciers inoxydables – Partie 1 : liste des aciers inoxydables (novembre 1995).
NF EN 10088-2	Aciers inoxydables – Partie 2 : conditions techniques de livraison des tôles et bandes pour usage général (novembre 1995, 2 ^{ème} tirage, avril 1997).
NF EN 10088-3	Aciers inoxydables – Partie 3 : conditions techniques de livraison pour les demi-produits, barres, fils machine et profils pour usage général (novembre 1995).
NF EN 10204	Produits métalliques – Types de documents de contrôle (décembre 1997).

Maquette et réalisation

Amprincipe – Paris

R.C.S. Paris B 389 103 805

Impression

Imprimerie Chirat

Édition, avril 2004



Immeuble Galilée – avenue Marcelin Berthelot – 44 812 Saint Herblain cedex

Tél. : 02 40 43 77 64 – Fax 02 40 43 48 12

E-mail : contact@idinox.com – Internet : www.idinox.com

CIM Béton

CENTRE D'INFORMATION SUR LE CIMENT ET SES APPLICATIONS

7, place de la Défense • 92974 Paris-la-Défense Cedex • Tél. : 01 55 23 01 00 • Fax : 01 55 23 01 10

E-mail : centrinfo@cimbeton.net • internet : www.infociments.fr