

## Utilisation d'aciers d'armature inoxydables dans les ouvrages en béton

### Résumé

Par rapport aux aciers d'armature normaux, galvanisés ou revêtus de résine époxy, les aciers inoxydables témoignent d'une résistance à la corrosion beaucoup plus élevée. Malgré le coût plus élevé des matériaux, ils peuvent représenter une mesure complémentaire utile pour des éléments de constructions particulièrement menacés par la corrosion. On peut juger de leur utilité cas par cas au moyen du calcul durabilité/coûts. En raison des mauvaises et coûteuses expériences faites par le passé, les maîtres d'ouvrage sont de moins en moins prêts à prendre des risques qui peuvent être évités. Ils veulent que les ouvrages répondent aux exigences posées avec une plus grande certitude que jusqu'à présent. Les exemples toujours plus nombreux des utilisations d'aciers d'armature inoxydables dans le monde entier prouvent à l'évidence que les maîtres d'ouvrage s'efforcent de réaliser des ouvrages en béton durables et rentables avec des aciers d'armature inoxydables, et d'éviter à l'avenir les remises en état prématurées.

En évitant les importantes remises en état, on économise à long terme non seulement sur le plan financier, mais également en ce qui concerne les ressources en matériaux. L'utilisation d'acier d'armature inoxydable permet en outre d'éviter les risques liés à toute remise en état en ce qui concerne l'efficacité et la durabilité.

On réunit sous la désignation «aciers inoxydables» un grand groupe d'aciers, qui se distinguent des aciers non ou faiblement alliés par une plus grande résistance à la corrosion. Leur teneur en chrome est supérieure à 10.5 % et, souvent, ils contiennent en outre également du nickel, du molybdène et de l'azote, leur teneur en éléments accessoires tels que carbone, soufre et phosphore étant en même temps généralement faible. On peut les classer en cinq groupes, qui diffèrent nettement en ce qui concerne la microstructure et les propriétés:

- aciers inoxydables austénitiques
- aciers inoxydables austéno-ferritiques ou aciers duplex
- aciers inoxydables ferritiques
- aciers inoxydables martensitiques
- aciers inoxydables trempés par durcissement structural

Seuls les aciers des trois premiers groupes sont utilisés comme aciers d'armature.

On ne peut pas répondre de façon générale à la question de savoir pour quelles utilisations ou pour quels éléments d'ouvrage ou ouvrages les aciers inoxydables entrent en considération pour remplacer partiellement ou entièrement les aciers d'armature normaux. De nombreux facteurs et critères ne peuvent être évalués correctement que cas par cas. Les aciers inoxydables sont utilisés en raison de leur bonne résistance à la corrosion surtout, et de ce fait, principalement pour des éléments d'ouvrage exposés à une eau chlorurée, devant témoigner d'une grande durabilité, et dont la remise en état est difficile ou très coûteuse.

La résistance des aciers inoxydables à la corrosion par piqûres ou caverneuse dépend principalement des éléments chrome, molybdène et azote, qui exercent une influence positive,

et des éléments soufre, manganèse (surtout combiné au soufre) et carbone, dont l'influence est négative. La somme des éléments à action positive WS (Wirksumme) donne l'indice de résistance à la piqûration, également désigné par pitting resistance equivalent number). Le WS n'a pas de signification sur le plan strictement scientifique. Il représente tout de même une règle utilisable pour évaluer la résistance des aciers inoxydables (et alliages au nickel) à la corrosion par piqûres, à la corrosion cavernreuse et à la corrosion sous contrainte.

Les connaissances et expériences sur la résistance à la corrosion et les possibilités d'utilisation des aciers inoxydables dans le béton – basées sur une très vaste étude des publications spécialisées et sur les contacts avec plusieurs spécialistes étrangers – sont résumées dans le **tableau Z.1** (voir **chapitre 3**). La classification des aciers en classes de résistance donne une vue d'ensemble qui doit faciliter le choix de la nuance d'acier inoxydable appropriée pour une utilisation donnée. Les aciers d'armature normaux, galvanisés ou revêtus de résine époxy figurent également dans ce tableau, pour la comparaison. Une évaluation sûre du comportement à long terme des aciers revêtus de résine époxy est extrêmement difficile. Il n'y a pas à ce sujet de consensus à l'échelon international (voir **chapitres 3, 4.1, 4.3 et 4.7**). Le **tableau Z.2** donne un aperçu des aciers d'armature inoxydables nervurés actuellement à disposition.

Pour les aciers inoxydables, les limites des classes de résistance ont été fixées de façon conservative par rapport aux résultats des analyses en laboratoire et in situ. Il est ainsi tenu compte de « conditions d'essai » plus rudes dans la pratique. Le **tableau Z.1** ne doit pas être interprété de façon excessive, car de nombreux facteurs jouent un rôle dans l'induction et la progression de la corrosion (voir **chapitre 4.4**). De plus, la résistance à la corrosion peut être influencée défavorablement par diverses opérations (p. ex. formage à froid, soudage, traitements thermiques – voir **chapitres 3 et 4.4**).

Pour les éléments d'ouvrage ou ouvrages sollicités moyennement à fortement par les chlorures, qui doivent avoir une très longue durée de service sans remise en état (70 à 100 ans), ou dont la remise en état est très difficile, très longue ou très coûteuse, seuls doivent être utilisés des aciers CrNi ou CrNiMo avec indice de résistance à la piqûration WS de >17. Les aciers au chrome ne sont pas conseillés pour des utilisations de ce genre.

Si des teneurs en chlorures élevées à très élevées sont prévisibles au niveau de l'armature, si d'autres conditions ou influences favorisant la corrosion s'ajoutent à une forte sollicitation par les chlorures (p. ex. fissures où de l'eau s'écoule, enrobage inférieur à 30 mm, béton pas très dense ou avec des défauts de compactage, températures élevées), ou s'il y a de grandes incertitudes quant à l'exécution, seuls doivent être utilisés des aciers CrNiMo avec WS de >23 (classe de résistance 3) ou même de >31 (classe de résistance 4). Cela s'applique également à des zones particulièrement importantes de l'armature, qui ne doivent en aucun cas se corroder, qui ne sont pas ou difficilement accessibles, ou dont le contrôle ou la remise en état est difficile ou impossible.

Il faut en outre signaler que pour des éléments d'ouvrage présentant un danger d'incendie et pouvant être soumis à une action de températures de >300 °C de longue durée, les aciers duplex ne doivent pas être utilisés en raison du danger de fragilisation à partir de 475 °C.

Les aciers inoxydables étant beaucoup plus chers que les aciers d'armature normaux, ils doivent être utilisés de façon ciblée et sélective, ou de façon partielle. Cela conduit à des armatures mixtes et à la question de la compatibilité des aciers normaux et des aciers inoxydables. En théorie aussi bien qu'en pratique, les armatures mixtes sont admissibles sans restriction ou risques particuliers, ainsi que le mentionne le **chapitre 4.5**. Le danger de corrosion n'est pas plus grand que pour des éléments d'ouvrage avec armature traditionnelle.

Pour savoir ce qu'il en est en Suisse de l'utilisation d'aciers inoxydables pour les ouvrages en béton armé, une enquête a été effectuée auprès des offices cantonaux des travaux publics, ainsi que complémentirement, auprès de deux offices fédéraux, sept offices des travaux publics municipaux, cinq exploitants de chemins de fer et quelques fournisseurs suisses d'acier (voir **chapitre 4.1**).

Les résultats de cette enquête sont les suivants:

- Seuls trois offices cantonaux des travaux publics ont utilisé jusqu'à présent des aciers d'armature inoxydables.
- Une grande partie des offices cantonaux des travaux publics est convaincue que d'autres mesures (p. ex. construction, qualité du béton, enrobage, protection de surface ou planification en tant que pièces d'usure, meilleur management de la qualité) sont plus rentables.
- La grande majorité des offices cantonaux des travaux publics déclarent que les coûts sont le principal obstacle pour l'utilisation d'aciers inoxydables.
- Le manque de normes et de directives ainsi que les connaissances insuffisantes des intervenants sont considérés par les offices cantonaux des travaux publics comme d'autres obstacles importants.
- De nombreux offices cantonaux des travaux publics apprécieraient une directive pour l'utilisation d'aciers inoxydables dans la construction en béton ainsi qu'une plus ample formation dans ce domaine.

Le surplus de coûts ayant résultés de l'utilisation d'aciers d'armature inoxydables (1.4003, 1.4462, 1.4571) en Suisse pour des ponts et galeries (voir **chapitres 4.1, 4.6 et annexe**) se situait selon les indications des offices cantonaux des travaux publics entre 0.4 % et 8 % des coûts globaux. Les coûts des matériaux seulement se situaient entre quelque 4.80 et 19.50 fr./kg. La part d'aciers d'armature inoxydables était en l'occurrence d'env. 0.6 à 7.5 % de l'ensemble de l'armature.

Les exemples, aussi bien en Suisse qu'à l'étranger, montrent que l'utilisation d'aciers inoxydables peut augmenter les coûts de réalisation. Le surplus de coûts dépend alors du genre et de la quantité d'acier inoxydable utilisé, mais aussi du mode d'utilisation. Mais si les considérations pour le choix du matériau sont basées sur le rapport coûts/durabilité, il en ressort que l'utilisation d'aciers inoxydables est absolument judicieuse, c'est-à-dire qu'elle peut être rentable, pour des éléments d'ouvrage exposés et menacés. Des éléments d'ouvrage plus durables présentent de nets avantages et réduisent:

- les frais de service, d'entretien, de maintenance, de remise en état et de remplacement.
- les frais dus aux arrêts de service (coûts internes et externes tels que coûts dus aux bouchons et déviations de circulation pour les usagers et coûts pour les arrêts de production).
- les risques pratiquement inévitables concernant l'efficacité et la durabilité des remises en état. Cela s'applique en particulier aux éléments d'ouvrage qui ne sont que difficilement accessibles, et qui, de ce fait, ne peuvent souvent pas être remis en état dans les règles de l'art (p. ex. joints, banquettes de culées ou articulations Gerber).
- les frais administratifs des services publics et propriétaires (p. ex. pour relevés de l'état, planification, soumission, adjudication et surveillance des remises en état).
- la pollution de l'environnement.

La conviction des maîtres d'ouvrages et des mandants que les risques de corrosion de l'armature d'éléments d'ouvrage fortement sollicités par les chlorures peuvent être écartés de façon plus économique avec les mesures actuellement à disposition (p. ex. construction, qualité du béton, enrobage, protection de surface ou planification en tant que pièces d'usure, meilleur management de la qualité) qu'avec l'utilisation d'aciers inoxydables devrait être étayée par des

considérations fondées s'étendant à l'ensemble de la durée de service. Cette conviction est partiellement en contradiction avec les résultats de modélisations (voir **chapitre 1**).

En se basant sur les expériences faites jusqu'à ce jour et sur les connaissances actuelles, on peut estimer que les aciers inoxydables ne seront pas à l'avenir, pour des raisons économiques, utilisés moins souvent que jusqu'à présent, mais le seront au contraire dans nettement plus de cas. Cela exige une directive SIA qui traite de tous les aspects de l'utilisation d'aciers inoxydables (corrosion, dimensionnement, fatigue, adhérence, durabilité/nuance d'acier, incendie, etc.) et les règle. De nombreuses confusions et incertitudes pourraient être ainsi éliminées. Le présent rapport, ainsi que les normes anglaise et américaine sur les aciers d'armature inoxydables représentent une bonne base pour une telle directive (voir **chapitre 4.8**). D'autres informations sur les mesures à prendre et les besoins de recherche figurent au **chapitre 4.9**.

**Tableau Z.1:** Vue d'ensemble de l'utilisation d'aciers d'armature inoxydables pour des éléments d'ouvrage en béton très fortement sollicités, avec un enrobage de plus de 30 mm, comparés à d'autres genres d'armature. Nuances d'acier possibles: voir **tableau Z.2**.

**BK:** classe de résistance à la corrosion

**WS:** indice de résistance à la piqûration (Wirksumme)

**Évaluation:** + approprié – inapproprié

Valeurs entre parenthèses: évaluation incertaine

**Remarque:**

**Tenir compte absolument des notes en bas de page et autres indications des chapitres 4.3 et 4.4!**

Matériau pour armature	WS 1)	BK	Béton carbonaté					
			Non	Oui	Non	Oui	Oui 2)	Oui 2)
			Teneur en chlorures 3)					
			Nulle	Nulle	Faible	Faible	Moy- enne	Ele- vée
Acier d'armature normal	0	0	+	-	+/-	(-)	-	-
Acier revêtu de résine époxy	0	?	4)					
Acier galvanisé	0	0/1	+	+	(+)	-	-	-
Aciers au chrome 5)	10-16	1	+	+	+	(+/-)	(+/-)	-
Aciers chrome-nickel et aciers chrome-nickel-molybdène	17-22	2	+	+	+	+	+	(+)
Aciers chrome-nickel-molybdène	23-30	3	+	+	+	+	+	+
Aciers chrome-nickel-molybdène	>31	4	Pour cas spéciaux, p.ex.: - teneur en chlorures très élevée - teneur en chlorures élevée avec autres conditions défavorables					

1) WS: indice de résistance à la piqûration calculée avec:  $WS = \%Cr + 3.3\%Mo + 0\%N$ .

On a utilisé la teneur minimale en chrome et molybdène pour le calcul selon norme EN 10088 et "Stahlschlüssel" (Allemagne). La teneur en azote n'a pas été prise en considération.

- 2) L'influence de la teneur en chlorures est dominante, alors que celle de la carbonatation est secondaire, car la vitesse de carbonatation est petite ou l'enrobage de l'armature épais.
- 3) Teneur en chlorures:
 

faible:	≤0.6 M.% - masse de ciment
moyenne:	≥0.6, mais ≤1.5 M.% - masse de ciment
élevée:	≥1.5, mais ≤5 M.% - masse de ciment
très élevée	>5 M.% - masse de ciment
- 4) L'évaluation est incertaine/controversée. Considérations comparatives et évaluations: voir **chapitre 4.7**.
- 5) La sensibilité à la piqûration des aciers au chrome à faible teneur en chrome augmente fortement lorsque la valeur pH diminue. C'est pourquoi la carbonatation du béton joue un rôle plus ou moins important, selon l'enrobage.

**Tableau Z.2:** Exemples d'aciers d'armature inoxydables nervurés disponibles.  
L'indice de résistance à la piqûration WS a été calculé d'après les indications figurant dans le **tableau Z.1**.

Acier	Désignation	Cr, % - masse	Mo, % - masse	Indice de résistance à la piqûration WS	Classe de résistance
<b>Aciers ferritiques</b>					
1.4003	X2CrNi12/X2Cr11	10.5		11	1
<b>Aciers austéno-ferritiques ou aciers duplex</b>					
1.4462	X2CrNiMoN 22-5-3	21.0	2.5	29	3
1.4501	X2CrNiMoCuWN 25-7-4	24.0	3.0	34	4
<b>Aciers austénitiques</b>					
1.4301	X5CrNi 18-10	17.0		17	2
1.4306	X2CrNi 19-11	18.0		18	2
1.4311	X2CrNiN 18-10	17.0		17	2
1.4401	X5CrNiMo 17-12-2	16.5	2.0	23	3
1.4404	X2CrNiMo 17-12-2	16.5	2.0	23	3
1.4571	X6CrNiMoTi 17-12-2	16.5	2.0	23	3
1.4429	X2CrNiMoN 17-13-3	16.5	2.5	25	3
1.4529	X1CrNiMoCuN 25-20-7 / X1CrNiMoCuN 25-20-6	19.0	6.0	39	4

**Dr. F. Hunkeler, TFB, Wildegg**

**Bericht VSS Nr. 543, Mai 2000 (deutsch)**  
**Rapport VSS Nr. 558, Septembre 2001**

Le rapport complet peut être commandé au VSS, Seefeldstrasse 9, 8008 Zürich.