

### 2.5.2 Cas de dommage

Malgré toutes les précautions, des cas de dommage ne peuvent pas être exclus. Pour éclaircir un cas de dommage, les indications suivantes sont nécessaires en plus des informations mentionnées au chapitre 2.5.1:

- Numéro et désignation de matière
- Le matériau a-t-il été soumis à un traitement thermique?
- Numéro de commande, de bulletin de livraison, de facture ou de charge
- Est-il possible que de l'air contaminé ait été aspiré (par ex. solvant, aérosols de sel à dégeler en hiver, usure de sols en ciment de bois contenant du chlore, vapeurs de fluides d'exploitation contenant des halogénures) ou que le matériau se soit trouvé en contact avec des substances qui n'ont pas été prévues ou prises en considération lors du projet, par ex. des produits de nettoyage ou de désinfection?

## 3 CLASSEMENT DES ACIERS INOXYDABLES

### 3.1 Généralités

Il existe divers critères pour la subdivision des aciers inoxydables, et les désignations sont en conséquence nombreuses:

#### a) Structure microscopique

- aciers ferritiques
- aciers martensitiques
- aciers austénitiques
- aciers austéno-ferritiques ou duplex
- aciers à durcissement par précipitation

#### b) Composition chimique (alliage)

- aciers austénitiques au chrome-nickel (aciéries V2A, aciers Cr-Ni, série AISI 300)
- aciers austénitiques au chrome-nickel-molybdène (aciéries V4A, aciers Cr-Ni-Mo, série AISI 300)
- aciers austénitiques au chrome-manganèse-(nickel) (série AISI 200)
- aciers au chrome, ferritique et martensitaire (série AISI 400)
- aciers alliés à l'azote
- aciers stabilisés au titane ou au niobium

#### c) But et domaine d'utilisation, caractéristiques

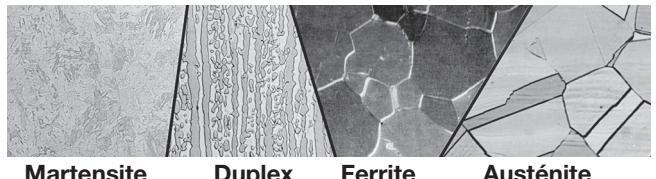
- aciers réfractaires
- aciers résistants au froid
- aciers résistants au fluage
- aciers amagnétiques
- aciers trempables
- aciers fortement résistants aux acides
- aciers à usinabilité améliorée (aciéries de décolletage)

Ces classements se chevauchant souvent, **on fait en pratique le plus souvent la répartition suivante:**

- aciers ferritiques
- aciers martensitiques
- aciers austénitiques
  - aciers austénitiques au chrome-nickel (V2A)
  - aciers austénit. au chrome-nickel-molybdène (V4A)
- superausténite ou aciers fortement résistants aux acides
- aciers austéno-ferritiques ou duplex
- aciers réfractaires
- aciers résistants au fluage

Des indications détaillées telles que la composition chimique, les caractéristiques mécaniques et physiques sont données au chapitre 7.

### 3.2 Structures des aciers inoxydables



Martensite

Duplex

Ferrite

Austénite

#### 3.2.1 Ferrite

La structure ferritique est formée de grains plus ou moins isométriques (sphériques) avec des limites nettement perceptibles.

La ferrite ne peut dissoudre que très peu de carbone, mais par contre de plus grandes quantités d'autres éléments d'alliage comme le chrome (Cr), le nickel (Ni) et le manganèse (Mn), qui influencent ses caractéristiques, comme par ex. la résistance à la corrosion.

#### 3.2.2 Martensite

La structure martensitique est une structure en fines aiguilles, non structurée, dure et fragile, c'est-à-dire sans limite des grains clairement perceptible. Elle se produit par un refroidissement rapide d'une structure austénitique (transformation structurale). Le refroidissement doit alors se faire si rapidement que le carbone dissout dans la structure austénitique initiale n'a pas le temps de quitter la maille de fer et ainsi la structure se tend. Cette structure dure tendue présente une grande dureté, mais aussi une fragilité élevée, de telle sorte qu'elle n'est pratiquement pas utilisable. Pour éliminer cette fragilité, la structure doit être chauffée une nouvelle fois (revenue). Par le revenu, on peut régler dans certaines plages les caractéristiques mécaniques (résistance à la traction, dureté, ténacité, etc.).

#### 3.2.3 Austénite

La caractéristique d'une structure austénitique est donnée par une délimitation marquée des grains, partiellement rectilignes et parallèles. Par des teneurs correspondantes en Ni et Mn, cette structure peut aussi être stable à température ambiante. Les structures austénitiques sont (au contraire des structures ferritiques et martensitiques) amagnétiques, tenaces et elles ne peuvent être durcies que par déformation à froid (écrouissage).

#### 3.2.4 Duplex

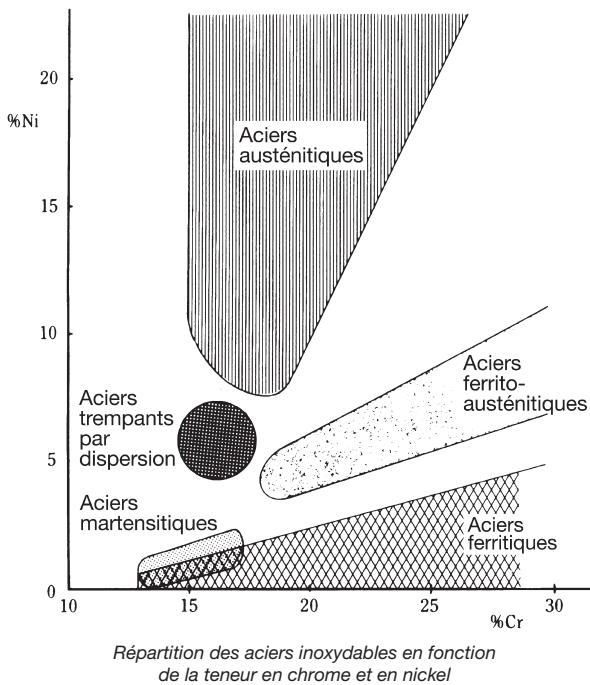
La structure duplex se compose de deux constituants clairement reconnaissables (phases), de 50% chacun, l'un ferritique et l'autre austénitique. Cette structure réunit en conséquence beaucoup de caractéristiques positives provenant des deux constituants de la structure.

#### 3.2.5 Structure à durcissement par précipitation

Les aciers à durcissement par précipitation contiennent de petites quantités d'éléments d'alliage spéciaux comme par ex. le cuivre (Cu) et le niobium (Nb). Par un recuit de mise en solution, tous les éléments d'alliage sont dissous dans la structure du fer. Par un refroidissement rapide qui suit, ces éléments restent dissous, c'est-à-dire qu'il se produit un état métastable. L'acier tendant cependant à un état stable, ces éléments dissous de force se séparent au cours du temps et forment dans la structure de fines précipitations réparties régulièrement, qui provoquent une augmentation de la résistance. Par un traitement thermique correspondant (vieillissement, maturation), ce processus de précipitation peut être accéléré et influencé selon planification. Les aciers trempables par dispersion présentent une structure austénitique, martensitique ou austénitique-martensitique.

### 3.3 Les principaux éléments d'alliage et leur influence sur les caractéristiques de l'acier

La structure microscopique des aciers, est fortement influencée d'une part par la composition chimique (alliage) et d'autre part par un éventuel traitement thermique. L'effet des principaux éléments d'alliage sur les aciers inoxydables peut être résumé de la manière suivante. L'influence des éléments favorisant la formation d'austénite ou de ferrite sur la formation de la structure peut être lue sur le diagramme de Schaeffler (voir chap. 7.7) et sur le graphique ci-dessous.



#### 3.3.1 Chrome (Cr)

Les aciers inoxydables doivent leur résistance chimique entre autres à l'élément d'alliage Cr, qui forme à la surface de l'acier une couche d'oxyde passive adhérant bien et présentant une très bonne résistance et étanchéité chimique (voir aussi chap. 2.3). A partir d'une teneur en Cr de 12,5%, on parle d'acier inoxydable. Le Cr augmente en outre notablement la résistance mécanique de l'acier sans diminuer fortement sa ductilité. De plus, la résistance à chaud et à l'oxydation à chaud peuvent être notablement améliorée.

#### 3.3.2 Carbone (C)

Avec une teneur croissante en C, la résistance mécanique de l'acier ainsi que la trempabilité des aciers martensitiques augmentent. Par contre, la soudabilité, la ductilité, l'aptitude au forgeage et à l'usinage diminuent. Le Cr forme facilement des carbures avec C. Pour empêcher que du Cr soit enlevé à la structure par la formation de carbures, et ainsi que la résistance à la corrosion soit localement réduite, la teneur en C des aciers inoxydables doit être tenue très basse ou il faut empêcher la formation de carbures par des éléments stabilisateurs qui forment des carbures encore plus facilement que le Cr. Le C favorise la formation d'austénite.

#### 3.3.3 Nickel (Ni)

Le Ni améliore la résistance à la corrosion en général et à l'oxydation à chaud ainsi que la résilience aux basses températures. Il augmente en outre la résistance mécanique, entre

autres la résistance à chaud et à la fatigue, au détriment de l'aptitude à l'usinage et au forgeage.

#### 3.3.4 Molybdène (Mo)

Le Mo améliore la résistance à la corrosion, en particulier à la corrosion par piqûres dans les solutions contenant des chlorures, de manière considérable déjà pour des teneurs de quelques pour cent. Il agit comme le Ni sur les caractéristiques mécaniques. Le Mo favorise la formation de ferrite.

#### 3.3.5 Cuivre (Cu)

Le Cu augmente déjà à partir de concentrations de 1,5% la résistance de l'acier aux acides réducteurs, comme par ex. l'acide sulfurique.

#### 3.3.6 Silicium (Si), aluminium (Al)

Le Si et l'Al favorisent la formation de ferrite. Ils augmentent en particulier, pour les aciers ferritiques (aciéries inoxydables à relativement basse teneur en C) la résistance à l'oxydation à chaud, c'est-à-dire qu'ils augmentent la température de calaminage.

#### 3.3.7 Titane (Ti), niobium (Nb)

Le Ti et le Nb sont ajoutés aux aciers ferritiques et austénitiques en tant qu'éléments de stabilisation. Ils forment des carbures encore plus facilement que le Cr. Ils empêchent ainsi la formation de carbures aux joints des grains et ils assurent en particulier dans les cordons de soudure une amélioration de la résistance à la corrosion intercristalline. Toutefois l'aptitude à l'usinage et au polissage se trouve quelque peu réduite.

#### 3.3.8 Manganèse (Mn)

Le Mn augmente la résistance mécanique ainsi que la résistance à l'usure des aciers.

#### 3.3.9 Soufre (S)

Le S est en tant qu'élément non métallique est à vrai dire une impureté de l'acier, qui influence négativement diverses caractéristiques de l'acier comme la résistance à la corrosion, la ténacité, l'aptitude à la déformation, au polissage, au soudage et au forgeage. Normalement, la teneur en soufre dans l'acier est tenue aussi basse que possible. Dans les aciers inoxydables de décolletage, on ajoute à dessein jusqu'à 0,35% S. Le sulfure de manganèse qui se forme améliore notablement l'usinabilité. Une diminution de la résistance à la corrosion étant spécialement indésirable dans les aciers inoxydables, divers aciéristes ajoutent à leurs aciers inoxydables de décolletage une poudre de calcium et de silicium qui assure les mêmes caractéristiques de cassure du copeau que l'addition de S, mais toutefois sans influencer la résistance à la corrosion. Les aciers correspondants sont disponibles sous diverses désignations d'usine, comme par ex. les aciers PRODEC ou VALIMA (voir chap. 5.3.4).

Selon la norme européenne EN 10088, la teneur maximale en soufre est fixée à 0,030% pour les barres, fils, profils et semi-ouvrés correspondants et à 0,015% pour les tôles. Pour tous les produits à usiner, une teneur en soufre réglée de 0,015 à 0,030% est recommandée et admissible.

#### 3.3.10 Azote (N)

Le N stabilise la structure austénitique à peu près avec la même force que le C et améliore les caractéristiques de résistance, toutefois aux dépens de la ténacité. Le N est ajouté pour augmenter la résistance spécialement dans les aciers à bas carbone, comme par ex. 1.4311 et 1.4429. Le N améliore la résistance à la corrosion des nuances d'aciéries austénitiques et Duplex en milieux chlorés.

### 3.4 Caractéristiques des aciers inoxydables

Des indications détaillées (formes de livraison, caractéristiques techniques) sur les divers alliages et groupes d'acier sont données au chapitre 7.

#### 3.4.1 Aciérs ferritiques

##### Caractéristiques:

Ces aciers restent ferritiques à toutes les températures. Cela est dû à une faible part d'éléments d'alliage favorisant la formation d'austénite, comme le Ni, et à une forte part d'éléments favorisant la ferrite, surtout le Cr. Leurs caractéristiques sont: limite élastique élevée, haute ductilité, bonne aptitude à l'emboutissage profond et bonne soudabilité. Leur résistance peut être augmentée jusqu'à un certain degré par déformation à froid. En comparaison des aciers austénitiques, ils présentent une résistance et une ductilité moindres. Par rapport aux aciers austénitiques, les aciers ferritiques présentent une moins bonne résistance à la corrosion par piqûres, mais par contre ils résistent mieux à la corrosion fissurante sous tension. Les aciers ferritiques usuels sont relativement bon marché.

##### Applications:

Les aciers ferritiques les plus simples (entre autres 1.4016) sont utilisés de préférence pour les ustensiles ménagers comme les casseroles, les appareils ménagers et les éviers, où les exigences de résistance à la corrosion ne sont pas poussées. D'autres applications sont les revêtements de parois intérieures et les tôles de protection. Les aciers ferritiques avec de très basses teneurs en carbone et en azote ont leur principal domaine d'application sous des conditions d'utilisation présentant des risques de corrosion fissurante sous tension. Les aciers avec de très hautes teneurs en chrome, par ex. 25% Cr, sont aussi utilisés aux hautes températures, car ils présentent une excellente résistance aux fumées contenant du soufre.

#### 3.4.2 Aciérs martensitiques

##### Caractéristiques:

En raison de leur teneur en carbone relativement élevée, leur résistance et leur dureté peuvent être modifiées par un traitement thermique approprié, respectivement adaptées aux exigences. On peut atteindre des résistances à la rupture de plus de 1300 N/mm<sup>2</sup>. La teneur en carbone relativement élevée réduit cependant la résistance à la corrosion, de plus, ces aciers sont difficiles à déformer et à souder. Ces aciers présentent une teneur en C de 0.1 à 1.2 % et une teneur en Cr de 12 à 18 %. Une partie de ces aciers est alliée en outre avec 0.5 à 2.5 % de Ni et jusqu'à 1.2 % de Mo.

Avec la teneur croissante en C, la dureté qui peut être atteinte augmente (0.1 % C → env. 40 HRC, 0.9 % C → env. 58 HRC).

##### Applications:

Ces aciers sont utilisés principalement pour des éléments de construction soumis à de fortes sollicitations mécaniques comme des éléments de fixation, axes de pompes, pales de turbines et tiges de soupapes ainsi que pour des outils trempés et de coutellerie présentant une résistance accrue aux acides oxydants.

#### 3.4.3 Aciérs austénitiques au chrome-nickel («V2A»)

##### Caractéristiques:

Les aciers austénitiques alliés au chrome-nickel ont une bonne

résistance générale à la corrosion, une bonne ténacité pour une basse limite élastique et une bonne marge de sécurité à la rupture fragile également à de basses températures. Leur résistance mécanique peut être augmentée dans certaines limites par une déformation à froid, toutefois cela les rend légèrement magnétiques et leur résistance à la corrosion baisse. Ils sont en outre bien soudables. Un refroidissement lent après un traitement thermique ou après soudage conduit cependant dans le domaine critique de températures de 500 à 900 °C à la précipitation de carbures de chrome à la limite des grains (voir aussi chapitre 2.2.6 «Corrosion intercristalline»).

##### Applications:

Ces aciers sont utilisés principalement dans des applications soudées, dans le domaine des fluides exempts d'acide et de chlorure, comme par ex. dans l'industrie alimentaire, pour les appareils ménagers et les machines à laver. Ils trouvent en outre une application croissante dans l'architecture intérieure et extérieure.

#### 3.4.4 Aciérs austénitiques au chrome-nickel-molybdène («V4A»)

##### Caractéristiques:

Avec une teneur croissante en molybdène, la résistance à la corrosion de ces matériaux s'améliore fortement. Afin que la structure reste cependant austénitique (le Mo favorise la formation de ferrite), la teneur en Ni doit être augmentée à au moins 10.5%. Par l'addition de molybdène, la résistance à la corrosion se trouve notablement améliorée, en particulier contre la corrosion par piqûres dans un environnement contenant des chlorures ainsi que dans des acides réducteurs. Les additions de Mo sont plutôt défavorables dans l'acide nitrique et les gaz nitreux.

Ces aciers présentent une très haute ductilité et ténacité pour des valeurs de résistance plutôt basses. Ils ne perdent pas leur ductilité aux températures cryogéniques et ils sont bien soudables.

##### Applications:

Les matières 1.4404, 1.4432 et 1.4435 sont les aciers les plus fréquemment utilisés en contact avec l'eau adoucie, les acides réducteurs et les fluides dont la composition et l'agressivité ne peuvent être qu'estimées, mais pas définies avec certitude. Dans des fluides contenant de fortes quantités de chlorures, il faut cependant utiliser des matières beaucoup plus fortement alliées (superausténite). La principale application des ces aciers réside dans les industries chimiques et pharmaceutiques, dans le traitement de l'eau, dans les industries de la cellulose et du caoutchouc ainsi que dans la construction de piscines.

#### 3.4.5 Superausténite

##### Caractéristiques:

Les aciers superausténites sont hautement alliés avec du Cr, Ni, N et en particulier avec du Mo. La valeur PRE est > 40. Leur haute résistance générale à la corrosion, en particulier dans les acides contenant des halogénures (chlorures, bromures, iodures ou fluorures), dépasse celle des aciers inoxydables usuels. Sous ces conditions de service, les aciers inoxydables usuels sont soumis à des limites étroites. Dans de tels cas, il fallait auparavant recourir à de coûteux alliages à base de nickel ou au titane. Les superausténites sont donc des alternatives économiques et peuvent dans de nombreux cas prendre la place des alliages à base de nickel les plus résistants et du titane.

### Applications:

Ces matériaux ont été développés pour répondre aux plus hautes exigences de résistance à la corrosion. Ils sont donc utilisés sous les conditions de corrosion les plus difficiles dans la chimie, la pharmacie et en contact avec l'eau de mer (des-salement de l'eau de mer, offshore) où ils font parfaitement leurs preuves depuis de nombreuses années.

### 3.4.6 Aciérs duplex

#### Caractéristiques:

Les aciers duplex ont réuni en eux beaucoup des caractéristiques positives des aciers ferritiques et austénitiques. Par leurs teneurs élevées en Cr et Mo, ces aciers présentent une résistance élevée à la corrosion par piqûres et dans les fissures dans les fluides contenant de l'hydrogène sulfuré (par ex. espace d'air de fosses à purin). Ils possèdent en outre une grande résistance mécanique, à la corrosion par fatigue, à l'érosion et à l'usure. En comparaison avec les aciers austénitiques, les aciers duplex présentent une résistance élevée à la corrosion fissurante sous tension.

Les aciers duplex sont sensibles aux précipitations intermétalliques. Dans le domaine de 350 à 525°C, il faut s'attendre à la fragilisation à 475°C, alors que la phase sigma peut se former dans le domaine de 700 à 975°C. Dans le cas de processus normaux de soudage et de traitement thermique, il n'y a cependant aucun risque de fragilisation. Ces aciers ne doivent pas être soumis pendant de longues durées à des températures supérieures à 250°C.

#### Applications:

Ces aciers sont utilisés où l'on a besoin de bonnes caractéristiques mécaniques en combinaison avec de bonnes caractéristiques de résistance à la corrosion, comme par ex. pour des arbres de pompes, des pièces de machines, la technique offshore, l'industrie du bâtiment et le dessalement de l'eau de mer.

### 3.4.7 Récapitulation de diverses propriétés

structure	tremvable	magnétisable	soudable
ferritique	-	✓	✓
martensitique	✓	✓	3)
austénitique	1)	2)	✓
superausténitique	-	-	✓
Duplex	-	✓	✓

- 1) possible seulement par déformation à froid
- 2) peut devenir légèrement magnétique en cas de forte déformation à froid
- 3) seulement avec des mesures spéciales

### 3.4.8 Aciérs réfractaires

#### Caractéristiques:

- bon comportement à l'oxydation, spécialement pour des conditions de charge cycliques
- haute température de calaminage
- relativement haute limite élastique et résistance à la traction aux hautes températures
- haute résistance au fluage
- bonne stabilité structurelle
- bonne résistance à la corrosion et à l'érosion aux hautes températures en atmosphères moyennement agressives

La plupart des alliages travaillant aux hautes températures ont tendance, après échauffement à des températures de

550–850°C, à une fragilisation à température ambiante. La cause en est la précipitation de phases intermédiaires, telles que sigma, chi et laves. Afin de réduire la formation de ces phases, les alliages pour hautes températures d'**Outokumpu** (153 MA, 253 MA, 353 MA) sont alliés avec du silicium, de l'azote et du céryum.

Lors de l'emploi aux hautes températures et en contact avec des gaz chauds, il se forme une couche étanche d'oxyde à la surface de l'acier. L'étanchéité est particulièrement importante afin que la couche d'oxydation adhère bien et empêche la poursuite de l'oxydation.

En plus du Cr et Ni, ces nouveaux matériaux sont alliés avec du Si, N et C, et encore avec des micro-quantités de minéraux rares. Cela conduit à un accroissement considérable de la résistance à l'oxydation, en particulier sous des conditions de charge cycliques, ainsi qu'à une haute résistance au fluage et une bonne soudabilité. En raison de leur composition, ces matériaux ne sont pas sensibles à la fissuration à chaud dans les zones d'influence de la chaleur ainsi que dans les parties soudées.

A la suite de leurs conditions d'utilisation particulières, il faut tenir compte pour les aciers réfractaires des mécanismes d'endommagement suivants:

#### Attaques par le soufre

Le S et ses combinaisons se trouvent souvent dans les fumées ainsi que dans divers gaz de processus et ils attaquent les alliages réfractaires. Dans des environnements oxydants, une teneur élevée en Cr et Si augmente la résistance d'un alliage aux attaques par le soufre. Dans des atmosphères réductrices, où aucune couche d'oxyde protectrice ne peut se former, il faut éviter des matières ayant une haute teneur en nickel. Cela concerne en particulier les alliages avec une teneur en nickel > 50% et une teneur en Cr < 20%. Dans les alliages au nickel, une teneur en Cr > 25% augmente la résistance aux attaques par le soufre.

#### Absorption de carbone

En petites quantités, le C ainsi que le N peuvent améliorer les caractéristiques mécaniques d'une matière. Une absorption exagérée de ces éléments conduit cependant à une réduction de la résistance à l'oxydation et à une fragilisation de la matière. Cela est dû à la précipitation de carbures et/ou de nitrures de Cr aux joints des grains. L'appauvrissement en Cr de la structure qui en résulte réduit la capacité de régénérer la couche d'oxyde endommagée d'une matière. Les matériaux réfractaires deviennent ainsi plus sensibles aux actions de substances agressives, spécialement dans des atmosphères alternativement carburantes et oxydantes. Des carburations peuvent avoir lieu dans des fours lors du traitement thermique de pièces qui sont souillées de restes d'huile.

#### Absorption d'azote

Le risque d'une absorption de N est particulièrement grand dans des fours qui travaillent avec des gaz protecteurs sans O<sub>2</sub> (gaz de décomposition d'ammoniac ou mélange N<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>) à de hautes températures. Par l'augmentation de la teneur en Ni, on peut améliorer la résistance d'une matière à l'absorption de C et de N. Le même effet peut cependant aussi être obtenu par l'addition de puissants formateurs d'oxydes comme le Cr, le Si et l'Al.

#### Corrosion humide

Les aciers réfractaires ne sont en raison de leur composition résistants qu'à la corrosion par des gaz chauds. Sous des conditions chimiques humides, ils tendent à la sensibilisation et à la corrosion intercristalline.