



Les avantages du nickel
NICKEL ET ACIER INOXYDABLE





Grâce au nickel, vous obtenez :

..Une grande variété étendue **d'aciers inoxydables polyvalents** appartenant à différentes familles : austénitiques séries 200 ou 300, duplex, et à durcissement structural (PH)

..des aciers inoxydables dont la **fiabilité** a été éprouvée dans des dizaines de milliers d'applications

..des aciers inoxydables qui, outre leur **résistance à la corrosion**, offrent une large gamme de caractéristiques mécaniques, sur une vaste étendue de températures, cryogéniques jusqu'à des températures élevées, tout en étant faciles à mettre en œuvre

..des aciers inoxydables **hygiéniques** appropriés à la fabrication d'équipements pour les industries alimentaires, de la boisson ou pharmaceutiques qui, tout en garantissant l'intégrité des substances, peuvent supporter des nettoyages avec des agents chimiques agressifs

..des aciers inoxydables du type 18/8, 18/10 ou 18/12, synonymes de **haute qualité** pour les biens de consommation

..des aciers inoxydables **malléables** qui répondent à des exigences extrêmes de formabilité

..des aciers inoxydables présentant une bonne **soudabilité** sur une large gamme d'épaisseurs

..des aciers inoxydables **faciles à trouver** dans de nombreuses formes et dimensions

..des aciers inoxydables qui offrent une grande variété de finitions de surface et même de couleurs donnant des résultats **impressionnants**

..des aciers inoxydables qui peuvent présenter une **faible perméabilité** magnétique adaptée aux applications électroniques et même aux prothèses médicales

..des aciers inoxydables qui accroissent la **durabilité** des équipements et dont les produits de récupération conservent une **valeur élevée** en fin de vie

Dans cette publication, vous découvrirez comment le nickel contribue à ces propriétés

..une multitude d'autres alliages de nickel pour des usages et applications techniques recherchées:

- Des alliages de nickel qui résistent à des conditions extrêmes de corrosion et de température
- Des alliages cuivre-nickel anti-encrassement
- Des alliages nickel-titane à mémoire de forme
- Des alliages fer-nickel à faible coefficient de dilatation thermique
- Le nickelage
- Les catalyseurs en nickel

Mis ensemble, tous ces attributs montrent que le nickel est un matériau hautement polyvalent

Cette publication a pour objet de fournir au lecteur des informations générales à titre indicatif, à ne pas utiliser à des fins précises sans s'être au préalable assuré de l'avis d'un professionnel.

Le Nickel Institute, ses membres, son personnel et ses consultants n'engagent ni ne garantissent sa convenance pour quelque usage général ou particulier que ce soit et n'assument aucune responsabilité de quelque nature que ce soit en relation avec le contenu du présent document.

Le Nickel Institute tiens à remercier François Moulinier de l'Institut de Développement de l'Inox - I.D. Inox pour la traduction du texte en français.

Photographies de haut en bas : les tours Petronas reproduites avec l'aimable autorisation de B-M, Cleanup Corporation, Johnsen Ultravac, Ron Arad Associates, Carl Pott



« Le Chrysler building à New-York témoigne de la longue durée de vie que l'on peut attendre des aciers inoxydables au nickel »

TABLE DES MATIÈRES

Introduction :	vue d'ensemble sur les aciers inoxydables au nickel	5
Chapitre 1 :	propriétés physiques et mécaniques	11
Chapitre 2 :	résistance à la corrosion	21
Chapitre 3 :	hautes températures	29
Chapitre 4 :	formage	35
Chapitre 5 :	assemblage	39
Chapitre 6 :	le nickel, matériau durable	44
Annexe :	sources d'informations	49
	Composition des alliages	50

Durabilité

L'autre avantage du nickel

L'intérêt du nickel n'est pas seulement limité aux seules améliorations que ce métal confère à un certain nombre de matériaux et procédés.

Certaines considérations environnementales et socio-économiques qui vont bien au-delà des aspects techniques justifient pleinement le choix du nickel ou de matériaux contenant du nickel.

Le nickel est à considérer comme un investissement qui rend possible l'émergence ou le développement de nombreux produits et procédés nouveaux dont le rôle est important dans **l'amélioration des performances environnementales**. Le nickel contribue à accroître **l'efficacité énergétique, la durabilité et la robustesse** des produits et procédés existants.

En soi la valeur même du nickel constitue la garantie d'une utilisation correcte et d'un taux de recyclage élevé.

Les qualités propres des matériaux contenant du nickel contribuent pleinement à **l'éco-efficacité**.

La production, l'utilisation et le recyclage du nickel constituent des **activités économiques créatrices de valeur** qui apportent ainsi un soutien aux gouvernements et collectivités.

Le nickel est produit par une industrie qui **assume pleinement ses responsabilités** vis-à-vis de son personnel, du public, des actionnaires et de l'environnement.

Le nickel apporte une **contribution significative à la durabilité**, il est géré de manière responsable tout au long de son cycle de vie par l'ensemble de la chaîne de transformation, à commencer par l'industrie du nickel elle-même.

« Le nickel est produit par une industrie qui assume pleinement ses responsabilités »



Photo : Ambassade des Etats-Unis à Pékin

Photo reproduite avec l'aimable autorisation du Nickel Institute

Introduction

Vue d'ensemble sur les
aciers inoxydables au nickel



Introduction

Vue d'ensemble sur les aciers inoxydables au nickel

L'acier inoxydable –l'inox- n'est pas un simple matériau : il est composé de cinq familles, chacune comportant de nombreuses nuances. Le nickel est un élément d'alliage présent dans presque les deux tiers des inox produits à ce jour.

Le chrome est l'élément d'alliage clé qui rend « inoxydables » les aciers inoxydables. Il faut en rajouter plus de 10,5% à l'acier pour qu'il puisse se former une couche d'oxyde protectrice, laquelle apporte la résistance à la corrosion, le brillant et l'aspect argenté. En général, plus on ajoute de chrome, meilleure est la résistance à la corrosion. Ceci a été découvert voici un siècle environ et certains de ces premiers inox contenaient du nickel. Depuis cette époque on utilise des nuances contenant du nickel. A ce jour, environ deux tiers des tonnages d'inox produits chaque année contiennent du nickel, même s'il est considéré comme un élément d'addition relativement coûteux. On peut donc se demander quel est le rôle du nickel et pourquoi il est si largement utilisé.

La fonction première du nickel est de stabiliser la structure austénitique de l'acier à température égale ou inférieure à l'ambiante. Cette structure austénitique (c'est-à-dire structure cristalline cubique à faces centrées) est particulièrement résistante et ductile. C'est cette propriété et d'autres encore qui confèrent à cette famille de nuances d'inox sa grande polyvalence. L'aluminium, le cuivre et le nickel lui-même sont d'autres bons exemples de structure austénitique.

La teneur minimum en nickel nécessaire à la stabilisation de la structure à l'ambiante étant de 8%, ceci explique le pourcentage présent dans la nuance d'acier inoxydable la plus largement utilisée le AISI 304*. Le 304 contient 18% de chrome et 8% de nickel (souvent dénommé 18/8). Cette composition a été l'une des toutes premières à être développée dans l'histoire des inox, au début du 20^e siècle. Elle était utilisée dans les usines chimiques et a servi au revêtement de l'emblématique Chrysler Building à New-York, achevé en 1929.

Les premiers ajouts de manganèse dans les inox remontent aux années 1930. Les séries 200, austénitiques à basse teneur en nickel ont été mises au point plus tard dans les années 1950 lorsque le nickel se faisait rare. Des progrès plus récents dans les techniques d'élaboration ont permis de maîtriser l'ajout de quantités de plus en plus importantes d'azote, lequel favorise puissamment la formation d'austénite. Ceci peut laisser supposer que le nickel pourrait être remplacé dans une structure qui resterait austénitique. Cependant, ce n'est pas aussi simple que cela, et toutes les nuances austénitiques à haute teneur en manganèse actuellement disponibles sur le marché contiennent encore certaines quantités de nickel. Bon nombre d'entre elles présentent également des teneurs en chrome quelque peu réduites afin de maintenir la structure austénitique. Comme nous allons le voir plus loin, ceci a également pour effet de diminuer la résistance à la corrosion de ces alliages par comparaison aux séries 300 standard au nickel.

Lorsque l'on réduit la teneur totale en éléments favorisant la formation d'austénite, la structure des inox se transforme de 100% d'austénite en un mélange d'austénite et de ferrite (structure cubique centrée). On obtient ainsi les inox austéno-ferritiques, encore appelés duplex. Le nickel continue à stabiliser la structure de la phase austénitique. Toutes les grandes nuances duplex mises sur le marché, même les « lean duplex » ou duplex « pauvres », contiennent environ 1% de nickel, ou plus, ajouté à dessein. La majeure partie des nuances duplex contient plus de chrome que les nuances austénitiques : plus la teneur moyenne en chrome est élevée, plus la teneur minimale de nickel doit aussi être élevée. Ceci s'applique également aux nuances de la série 200 que nous avons mentionnées précédemment.

*Pour les compositions des différentes nuances et leurs correspondances approchées voir l'annexe page 50



304 largement utilisé dans une usine de conditionnement de lait

Photo reproduite avec l'aimable autorisation de : Tetra Pack

« La fonction première du nickel est de stabiliser la structure austénitique »

La structure bi-phasée des nuances duplex leur confère à la base une résistance mécanique supérieure à celle des nuances austénitiques courantes. Avec une teneur en chrome légèrement plus élevée ils présentent également une résistance à la corrosion supérieure à celle des nuances standards. Et comme ils présentent aussi des caractéristiques spécifiques remarquables, il existe pour les duplex des applications de niches présentant beaucoup d'intérêt.

En poursuivant la diminution de la teneur en nickel, même en la réduisant à zéro, on obtient des nuances totalement exemptes d'austénite, de structure entièrement ferritique, comme la fonte ou les aciers doux qui ont une structure ferritique à l'ambiante.

Toutes les nuances ferritiques ne sont pas totalement exemptes de nickel. Il est bien connu que le nickel contribue à abaisser la température du point de transition ductile / fragile, c'est-à-dire la température en dessous de laquelle l'alliage devient fragile. La température de ce point de transition est également fonction d'autres facteurs tels que la taille du grain ou la présence d'autres éléments d'alliages. Au demeurant, certaines nuances superferritiques, fortement alliées, contiennent délibérément un peu de nickel aux fins d'améliorer le point de transition, en particulier dans les zones soudées.

Contrairement aux austénitiques, les nuances martensitiques peuvent être durcies par traitement thermique. Cependant, certaines de ces nuances contiennent du nickel ce qui, non seulement améliore leur dureté mais aussi permet d'augmenter leur teneur en chrome, et ainsi améliore leur résistance à la corrosion. Le traitement thermique de durcissement consiste en un chauffage à une certaine température, suivi d'une trempe puis d'un revenu.

Pour terminer, les nuances à durcissement structural permettent également d'obtenir des caractéristiques mécaniques élevées par traitement thermique. Il existe diverses familles de nuances à durcissement structural, et toutes contiennent du nickel. Pour cette famille de nuances, contrairement aux martensitiques, le traitement thermique se réalise sans trempe.

Aptitude au formage. De par ses caractéristiques une structure austénitique confère à cette famille d'aciers inoxydables une bonne ductilité et une bonne aptitude au formage, comme l'illustrent les diagrammes comparatifs de déformations limites. La nuance courante 18% de chrome / 8% de nickel présente des caractéristiques d'allongement particulièrement bonnes, mais avec un potentiel de rétreint un peu plus faible que certaines nuances ferritiques. Une légère augmentation de la teneur en nickel améliore la stabilité de l'austénite et réduit les effets de l'érouissage, par là même améliorant l'aptitude à l'emboutissage profond. Contrairement aux nuances traditionnelles à bas nickel et hautes teneurs en manganèse, ces nuances austénitiques au nickel ne sont pas sensibles à la fissuration à froid différée. Cette bonne aptitude au formage a donné lieu à l'utilisation très répandue des séries 300 austénitiques pour les matériels exigeant des emboutissages profonds tels que les éviers, casseroles et matériels de cuisson.

Soudabilité. De nombreux sous-ensembles d'équipements doivent être fabriqués par soudage. En général les austénitiques au nickel présentent une meilleure aptitude au soudage que les autres nuances, et les nuances d'inox type 304 ou 316 sont les plus largement fabriquées dans le monde. Elles ne sont pas sujettes à la fragilisation résultant du grossissement du grain à température élevée et les soudures présentent une bonne ductilité et une bonne résilience. Ces nuances sont plus faciles à souder que les autres dans les fortes épaisseurs : 2 mm et plus.

Les duplex sont beaucoup plus aptes au soudage que les nuances ferritiques pour une teneur en alliage équivalente, mais toutefois les duplex standard ou les nuances plus riches type superduplex demandent plus de soins lors du soudage que les nuances austénitiques équivalentes. Les séries 200 présentent des caractéristiques de soudabilité comparables à celles des austénitiques séries 300.

Résilience. La résilience est l'aptitude d'un matériau à absorber l'énergie sans casser, propriété essentielle dans de nombreuses applications. La plupart des inox possède une bonne résilience à la température ambiante, mais si la température diminue, la structure ferritique devient progressivement plus fragile et les inox ferritiques ne peuvent convenir pour des applications cryogéniques. En revanche, les austénitiques courants conservent une bonne résilience jusqu'à la température de l'hélium liquide.

Introduction

Vue d'ensemble des aciers inoxydables à teneur en nickel



Photos : utilisation innovante de l'inox

*Photos reproduites avec l'aimable autorisation de :
haut : Experience Music Project, Seattle
bas : Eero Hyrkäs*

« Les nuances d'aciers inoxydables type 304 et 316 sont les plus largement fabriquées dans le monde »

Introduction

Vue d'ensemble des aciers
inoxydables à teneur en nickel



Photo reproduite avec l'aimable
autorisation de : Nickel Institute /
Hyatt Chicago

C'est la raison pour laquelle les inox type 304 sont largement utilisés pour des applications cryogéniques.

Caractéristiques à haute température. L'addition de nickel confère aux inox austénitiques une tenue à haute température très supérieure à celle des autres nuances (en particulier la résistance au fluage). Ces aciers sont aussi beaucoup moins sensibles aux phases détériorantes lorsqu'ils sont exposés à des températures intermédiaires ou élevées. Le nickel favorise également la stabilité de la couche d'oxydes protectrice et contribue à diminuer la propension à l'écaillage qui survient lors des cycles thermiques. Il en résulte que les nuances austénitiques sont utilisées pour des applications dans les températures élevées et lorsque la résistance au feu est requise.

Il convient de noter qu'il existe une continuité dans la composition entre les aciers inoxydables austénitiques et les super alliages à base de nickel qui sont utilisés pour les applications aux températures élevées telles que les turbines à gaz.

Résistance à la corrosion. Comme nous l'avons déjà mentionné, c'est essentiellement la présence d'une couche d'oxydes riches en chrome qui procure aux inox leur résistance à la corrosion. Cependant cette couche peut être endommagée, notamment en présence de chlorures, et ceci peut conduire à une amorce de corrosion localisée, par piqûre ou caverneuse. Le molybdène, comme l'azote, améliorent la résistance à la formation de piqûres en présence de chlorures. Le nickel est sans effet sur l'initiation des piqûres, mais contribue de façon importante à retarder la vitesse de propagation de ces deux types de corrosion (voir fig.9). C'est un critère important d'évaluation de la gravité de la corrosion.

Le nickel exerce également une influence importante sur la résistance des inox à un autre type de corrosion localisée, appelé corrosion sous contrainte, en présence de chlorures. Toutefois, c'est à des teneurs en nickel de l'ordre de 8% que la résistance à la corrosion sous contrainte des inox est la plus faible, alors qu'elle est significativement meilleure lorsque la teneur en nickel est soit plus faible soit plus élevée.

D'une façon générale, l'augmentation des teneurs en nickel dans les inox, y compris les ferritiques, accroît également leur résistance à la corrosion aux acides réducteurs comme l'acide sulfurique. D'autres éléments d'addition comme le molybdène ou plus particulièrement le cuivre jouent un rôle important dans ce sens. Cependant, s'agissant de nuances ferritiques, il y a de sérieuses réserves à l'addition de nickel, liées à la corrosion sous contrainte ou à la formation de phases intermétalliques.

Brillance et finitions. A première vue, toutes les nuances d'inox se ressemblent. Cependant, mises côte à côte, des surfaces polies de façon identique peuvent révéler des différences de coloration et de brillance. Certes, l'aspect et l'esthétique sont une question de goût, mais les nuances des séries 200 apparaissent généralement plus foncées et les ferritiques plus froides que les nuances austénitiques au nickel. Dans certaines applications architecturales, la préférence peut être donnée à des colorations plus grises, mais les utilisateurs choisissent en général un métal plus brillant, plus blanc, comme en témoigne la popularité des séries 300. Les inox des séries 200 et 300 résistent mieux aux rayures en raison de leur meilleure aptitude à l'érouissage.

On trouve un large éventail de finitions de surface sur toutes les nuances d'inox, allant des finitions directes d'usine au polissage mécanique (aspect rugueux jusqu'au poli miroir), en passant par les finitions brossées, mat par projection de billes, ou à motif et bien d'autres encore. Toutes ces finitions témoignent de la polyvalence des inox permettant d'obtenir une gamme très étendue d'aspects de surface. Une mise en garde s'impose toutefois : une finition plus rugueuse aura une moins bonne résistance à la corrosion, surtout dans les applications architecturales en extérieur. Les milieux marins ou l'exposition aux sels de déverglaçage nécessitent des matériaux qui résistent mieux à la corrosion, soit des nuances du type 316L.

Durabilité. Si l'on se réfère à la définition du développement durable telle qu'énoncée dans le rapport Brundtland « un développement qui satisfait les besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à satisfaire les leurs », il est clair que les aciers inoxydables en général, et plus particulièrement ceux qui contiennent du nickel, ont un rôle majeur à jouer dans les domaines de la protection de l'environnement, de la croissance économique, et de l'équité sociale. Nous en donnons des exemples ci-dessous.

Pour bien intégrer la notion de durabilité s'agissant d'un matériau, il faut prendre en considération l'ensemble de son cycle de vie, depuis l'extraction jusqu'à son recyclage ou sa mise en déchet ultime en fin de vie.

La plupart des matériaux contenant du nickel sont entièrement recyclables à la fin de la vie utile du produit auquel ils sont associés, ceci étant favorisé par leur valeur élevée. Le recyclage diminue l'impact environnemental parce qu'à la fois il réduit l'utilisation de minerais bruts et la consommation d'énergie. Par exemple, la quantité de ferrailles de récupération que l'on utilise aujourd'hui réduit la consommation d'énergie nécessaire à l'élaboration des aciers inoxydables d'environ 33% par rapport à ce qu'il faudrait consommer s'ils étaient élaborés à partir de 100% de minerais bruts (source Yale¹). Près de la moitié de cette réduction provient de ferrailles de récupération de fin de vie (d'après les données de l'ISSF²). Seule l'insuffisance de ferrailles de récupération, qui doit être attribuée à la longévité des équipements en acier inoxydable associée à une croissance considérable de l'usage des aciers inoxydables, limite cette réduction.

A condition d'être correctement utilisés, les aciers inoxydables contenant du nickel apportent une contribution essentielle au maintien et à l'amélioration de la qualité de vie des citoyens en permettant aux entreprises et autres organismes d'offrir des solutions de durabilité, lesquelles résultent des avantages que procure le nickel et des services qu'il rend : protection contre la corrosion, durabilité, nettoyabilité, résistance aux températures extrêmes et recyclabilité.

Introduction

Vue d'ensemble des aciers inoxydables à teneur en nickel



Histoire d'un exemple d'application : force monumentale

Le Air Force Memorial récemment inauguré à Washington D.C. se classe comme l'une des plus grandes applications mondiale de l'inox en structure, au même titre que la flèche de Dublin en Irlande ou le Gateway Arch, le plus grand monument des Etats-Unis.

Composé de trois flèches en inox s'élevant à 64 m de haut, le nouveau mémorial rend hommage aux millions d'hommes et de femmes, dont 54 000 sont morts au combat, qui ont apporté leur contribution à l'U.S. Air Force et ses prédécesseurs dans les années antérieures.

Chaque flèche est constituée d'une âme en béton recouverte d'une peau d'inox en nuance S31600 à bas soufre (0,005% max.) et 11% de nickel.

Les ingénieurs chargés de la conception ont choisi du S 31600 pour prévenir la corrosion et permettre que la structure conserve son aspect pendant des

décennies sans nécessiter de nettoyage manuel. Bien que Washington ne soit pas en zone côtière, ni particulièrement polluée, ce mémorial est entouré de trois autoroutes qui utilisent du sel de déverglaçage lequel aurait constitué une menace en cas d'utilisation d'un matériau de moindre qualité.

Le S 31600 assure également la stabilité de la structure en limitant la propension des spires courbes à osciller dans le vent.

Photo : Catherine Houska pour le Nickel Institute, U.S. Air Force Memorial à Washington D.C.

« La plupart des matériaux à teneur en nickel sont entièrement recyclables. »

¹ Johnson, J. et al, *The energy benefit of stainless steel recycling*, *Energy Policy*. Vol. 36, Issue 1, Jan. 2008, p181ff.

² www.worldstainless.org

Introduction

Vue d'ensemble des aciers
inoxydables à teneur en nickel

Ce sont les constructions qui témoignent le plus clairement de la durabilité de l'acier inoxydable. La restauration de la cathédrale Saint Paul et de la marquise de l'hôtel Savoy à Londres au Royaume-Uni (construits respectivement en 1925 et 1929), le Chrysler Building à New York City (1930), la digue de Progreso au Mexique dans l'Etat du Yucatan (autour des années 1940), le Thyssen Building à Düsseldorf en Allemagne (1960) et le Gateway Arch à Saint Louis, U.S.A. (1965) sont autant de témoins de l'impressionnante longévité que l'on peut attendre des inox au nickel.

Facilité de production. Ceci n'est pas évident aux yeux de tous les utilisateurs. Pourtant, s'agissant des nuances austénitiques, la longue expérience acquise dans leur élaboration, leur usage très répandu, la diversité de leurs applications, et l'importance des quantités produites, signifient qu'ils sont devenus des produits de commodité de haut de gamme. Ces nuances sont accessibles à de bonnes conditions économiques, sous toutes les formes et partout dans le monde.

Les aciers inoxydables à l'usage. L'idée qui vient généralement à l'esprit est que finalement les inox austénitiques au nickel courants permettent de tout faire : largement disponibles, bien maîtrisés, avec des applications très variées, et d'utilisation facile. Leur excellent comportement est prouvé, de même qu'ils sont hautement recyclables. C'est pour ces raisons qu'ils apparaissent souvent comme la solution la plus pratique et la moins risquée.



Comme cela fait très longtemps qu'ils sont utilisés, les inox de la série 300 sont souvent déjà homologués dans des applications où ils sont en contact avec les aliments ou l'eau potable. De surcroît, ils sont disponibles sous toutes les formes souhaitées.

Photo reproduite avec l'aimable autorisation de : Robert Lowell, pour le compte du Nickel Institute

« Les aciers
inoxydables
sont largement
disponibles, bien
maîtrisés et
d'utilisation facile...
la solution la plus
pratique et à
moindres risques. »

Chapitre 1

Propriétés physiques
et mécaniques



Chapitre 1

Propriétés physiques et mécaniques

Propriétés physiques. Les propriétés physiques des inox peuvent en gros être classées selon les familles auxquelles elles appartiennent comme l'illustre le tableau 1

Tableau 1 Propriétés physiques types des familles d'inox illustrées par des nuances caractéristiques											
Familles	Nuance	Densité		Conductivité thermique, 100 °C,		Résistivité électrique	Chaleur spécifique		Dilatation thermique 0-100°C,		Perméabilité magnétique
		g/cm ³	lb/in ³	W/m.K	Btu/ft.hr. °F		J/kg.K	Btu/lb. °F	10 ⁻⁶ /°C	10 ⁻⁶ /°F	
ferritique	430	7,8	0,28	26,1	15,1	600	460	0,11	10,4	5,8	600-1 000
martensitique	410	7,8	0,28	24,9	14,4	570	460	0,11	9,9	5,5	700-1 000
austénitique	304	8,0	0,29	16,2	9,4	720	500	0,12	17,2	9,6	1,02
austénitique (haute Mn)	201	7,8	0,28	16,2	9,4	690	500	0,12	15,7	8,7	1,02
superausténitique	S31254	8,0	0,29	14	8,1	850	500	0,12	16,5	9,2	c.1
Duplex	2205	7,8	0,28	16	9,3	800	500	0,12	13,0	7,2	>>1
Durcissement structural	17-4PH	7,8	0,28	18,3	10,6	800	460	0,11	10,8	6,0	95

Source : ASM Metals Handbook

Il y a relativement peu de différences de densité ou de chaleur spécifique entre les différentes familles. En revanche, pour la conductivité thermique et le coefficient de dilatation les différences entre familles sont significatives et ont une incidence sur le plan pratique (voir tableau 2). La plus faible conductivité thermique des nuances austénitiques peut avoir un intérêt pour limiter la vitesse de propagation du feu dans un édifice. Une plus faible conductivité thermique peut représenter un inconvénient si l'on cherche à accroître la vitesse de transmission de la chaleur; c'est pourquoi les ustensiles de cuisson ont un fond en cuivre ou en aluminium. Cependant, l'influence de la surface peut jouer beaucoup plus sur l'échange thermique que le seul transfert de chaleur à travers la paroi : voir l'exemple de l'échangeur dans le tableau. Les caractéristiques mécaniques plus élevées permettant d'utiliser des composants avec des parois plus minces, ceci peut plus que compenser une plus faible conductivité thermique.

Tableau 2 Effet de la conductivité thermique sur le coefficient de transmission thermique K Chauffage d'eau à partir de vapeur saturée									
Matériau	Coefficient de transmission thermique de surface				Conductivité thermique du métal		Coefficient k		
	h ₀		h ₁		W/m.K	Btu-in/hr/ft ² /°F	W/m ² .K	Btu/hr/ft ² /°F	
Cuivre	1 704	300	5 678	1 000	387	2 680	1 300	229	
Aluminium	1 704	300	5 678	1 000	226	1 570	1 295	228	
Acier carbone	1 704	300	5 678	1 000	66	460	1 266	223	
Acier inoxydable	1 704	300	5 678	1 000	15	105	1 124	198	

Où h₀ = coefficient de transmission thermique de surface, paroi externe
h₁ = coefficient de transmission thermique de surface, paroi interne
L'acier inoxydable est de la série 300

$$k = \frac{1}{\frac{1}{h_0} + \frac{\text{épaisseur paroi métallique}}{\text{conductivité thermique}} + \frac{1}{h_1}}$$

Source : publication n°9014 du Nickel Institute

« ...des caractéristiques mécaniques plus élevées...peuvent plus que compenser une conductivité thermique plus faible »

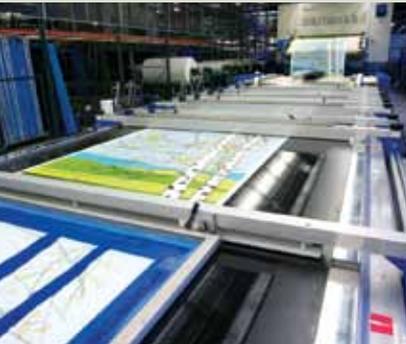


Photo reproduite avec l'aimable autorisation du Nickel Institute

Chapitre 1

Propriétés physiques
et mécaniques

Les coefficients de dilatation thermique des inox austénitiques sont de 60% à 70% supérieurs à ceux des autres nuances. En conséquence, ceci doit être pris en compte au moment de la conception lorsque l'on prévoit des variations cycliques de la température, par exemple dans le cas de la couverture, des installations cryogéniques, ou de matériels destinés à fonctionner à des températures élevées. La déformation lors du soudage est un problème en soi qui sera traité plus complètement dans le chapitre qui traite de la mise en œuvre. En règle générale, la solution consiste à réduire l'apport de chaleur au minimum.

Il convient de noter que le coefficient de dilatation thermique des aciers inoxydables austénitiques demeure inférieur à celui des d'autres matériaux métalliques courants tels que l'aluminium ou le cuivre.

Les nuances austénitiques sont en général amagnétiques à la température ambiante, ce qui n'est pas le cas d'autres nuances. Cette propriété permet de les utiliser dans les milieux où il faut éviter le ferromagnétisme, comme à proximité des puissants aimants employés dans les scanners en résonance magnétique dans l'imagerie corporelle ou en armatures de béton sur les quais servant à démagnétiser les navires de guerre. Certaines nuances austénitiques peuvent développer un peu de ferromagnétisme résultant de la formation de martensite lors d'une déformation à froid (voir figure 1 ci dessous). L'augmentation de la teneur en nickel atténue cet effet ; ainsi, tandis que ce phénomène est assez prononcé sur une nuance type 301, le 310 demeure bien amagnétique au terme d'une importante déformation à froid.



Au Japon les aciers inoxydables sont largement utilisés dans les réseaux d'alimentation d'eau dans les immeubles

Photo reproduite avec l'aimable autorisation de la Japanese Stainless Steel Association

« Les aciers austénitiques sont généralement amagnétiques à température ambiante... d'où leur utilisation dans les appareils d'imagerie médicale par résonance magnétique »

Chapitre 1

Propriétés physiques
et mécaniques

« Le non ferromagnétisme des nuances d'acier inoxydable austénitiques en facilite le tri...pour le recyclage »

Figure 1 :
Incidence de la déformation à froid sur la perméabilité magnétique des inox au chrome nickel.

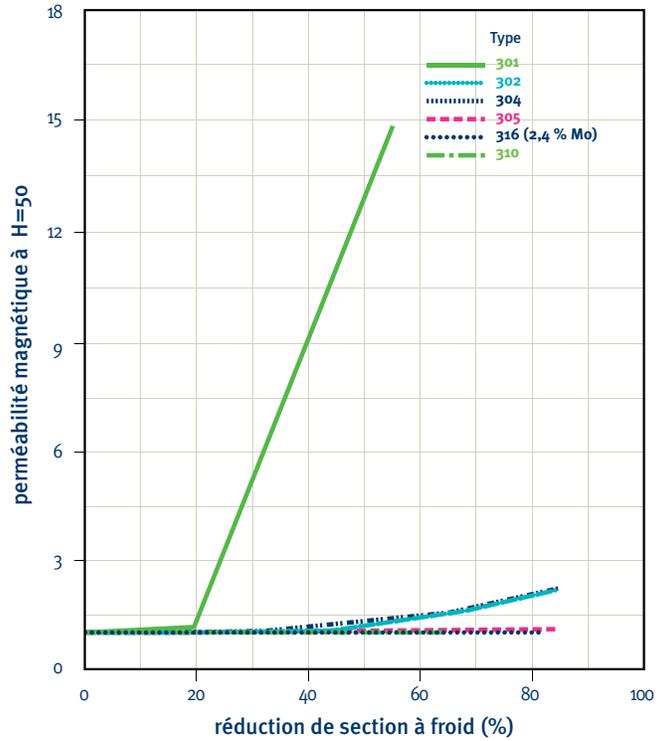


Photo : les aciers inoxydables austénitiques sont parmi les matériaux les plus recyclés au monde
(Photo reproduite avec l'aimable autorisation de Tim Pelling pour le Nickel Institute)

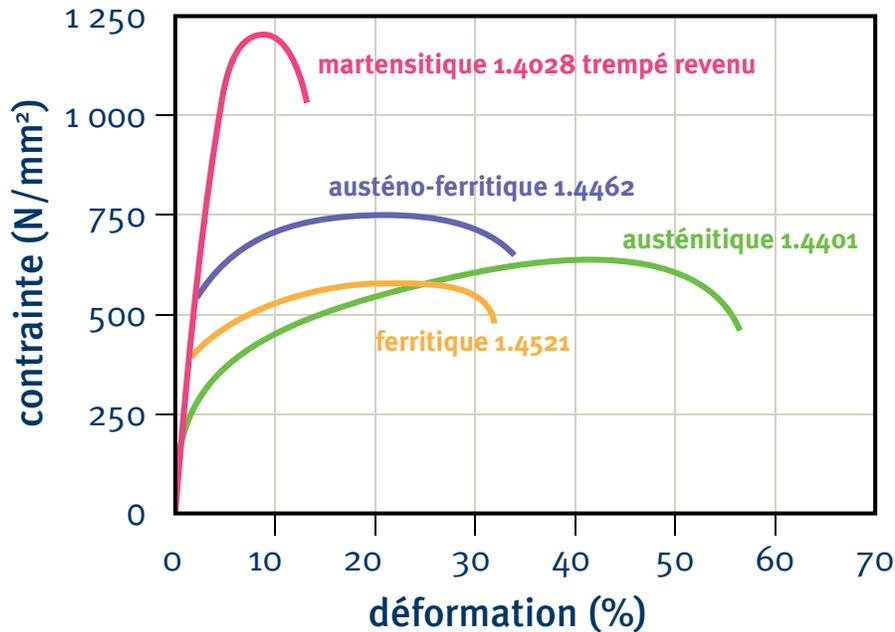
Le non ferromagnétisme des nuances d'acier inoxydable austénitiques les rend faciles à séparer des autres nuances d'acier inoxydable et des aciers au carbone lors du tri des déchets pour le recyclage.

Caractéristiques mécaniques à la température ambiante

Chapitre 1

Propriétés physiques
et mécaniques

Figure 2 :
Courbe de traction de 4 différents types d'aciers inoxydables



Dans la figure 2 la comparaison des courbes de traction met en évidence les différences de comportement considérables entre les différentes nuances. Toutes les nuances d'inox ont un module d'élasticité à température ambiante de l'ordre de 200 GPa, comparable à celui des autres aciers. Cependant, les similitudes de caractéristiques mécaniques à l'ambiante s'arrêtent là. Comme le montre la figure 2, les aciers inoxydables austénitiques présentent une grande capacité de déformation à froid et une grande ductilité à l'état adouci. Ceci peut être attribué à leur structure cristalline cubique faces centrées (CFC). Ainsi, tandis que leur limite élastique* est du même ordre que celle des nuances ferritiques, leur charge de rupture et leur ductilité sont beaucoup plus élevées. De ceci il résulte deux conséquences : la première est que les nuances austénitiques peuvent être écrouies pour obtenir des niveaux de résistance mécanique élevés, tout en conservant dans le même temps de bons niveaux de ductilité et de dureté ; la seconde est que, comme il faut beaucoup d'énergie pour les déformer ils présentent une grande capacité d'absorption de l'énergie comme par exemple dans un composant de véhicule automobile destiné à atténuer les effets d'un choc. Ils conservent cette dureté même à des niveaux de déformation élevés (là encore un facteur important de résistance au crash).

* les inox ne présentent pas une limite d'élasticité nettement définie ; c'est pourquoi la référence habituelle se rapporte à une déformation de 0,2 %



Photo reproduite avec l'aimable
autorisation de Cleanup Corporation

Chapitre 1

Propriétés physiques
et mécaniques

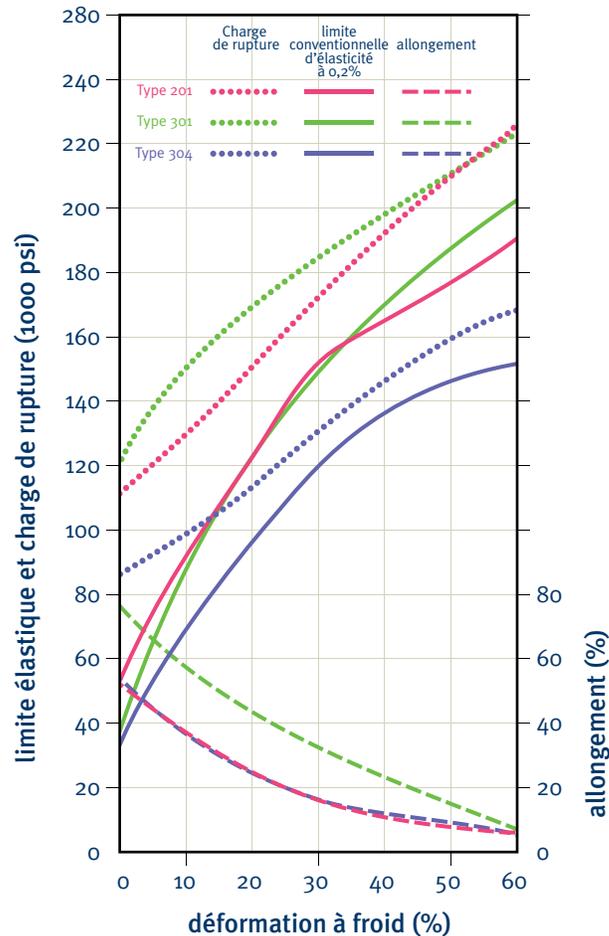
Les nuances austénitiques ne peuvent être durcies par traitement thermique. En revanche, on peut augmenter leurs caractéristiques mécaniques jusqu'à des niveaux très élevés par déformation à froid (écrouissage).

La norme EN 10088-2 indique des niveaux d'amélioration des limites conventionnelles d'élasticité pouvant aller de 350 à 1300 MPa et des charges de rupture de 700 à 1 500 MPa. La norme ASTM A666 donne la liste des différents niveaux de duretés en fonction du degré d'écrouissage pour les inox des séries 200 et 300. Pour un degré d'écrouissage donné (par exemple ¼ dur) les propriétés varient légèrement selon les nuances.

Le manganèse est particulièrement effectif pour accroître le durcissement lors de l'écrouissage, par exemple dans les séries 201. Voir la figure 3 qui montre également que, pour des nuances austénitiques similaires, plus la teneur en nickel est faible, plus les effets de l'écrouissage sont prononcés.

Figure 3 :
Effets de l'écrouissage sur les propriétés mécaniques des nuances 201, 301 et 304
(source : Allegheny Ludlum Steel Corp.)

« Les nuances austénitiques peuvent être durcies par écrouissage jusqu'à des niveaux très élevés »



Chapitre 1

Propriétés physiques
et mécaniques

Toutefois, d'autres éléments d'alliage peuvent également contribuer à améliorer les caractéristiques mécaniques : certaines nuances très alliées peuvent ainsi avoir des propriétés mécaniques plus élevées, comme le montre le tableau 3.

Tableau 3 Propriétés mécaniques minimum de la spécification de base ASTM pour des aciers inoxydables austénitiques à haute performance							
Désignation	Numéro UNS	Spécification ASTM	Limite élastique (minimum)		Charge de rupture (minimum)		Allongement (minimum)
			MPa	ksi	MPa	ksi	%
201	S20100	A240	260	38	515	75	40
201LN	S20153	A240	310	45	655	95	45
304	S30400	A240	205	30	515	75	40
304L	S30403	A240	170	25	485	70	40
321	S32100	A240	205	30	515	75	40
Type 316L	S31603	A240	170	25	485	70	40
316Ti	S31635	A240	205	30	515	75	40
Type 317L	S31703	A240	205	30	515	75	40
Alliage 20	N08020	A240	240	35	550	80	30
317LMN	S31726	A240	240	35	550	80	40
904L	N08904	A240	220	31	490	71	35
Alliage 28	N08028	B709	214	31	500	73	40
6% Mo	S31254	A240	310	45	655	95	35
4565S	S34565	A240	415	60	795	115	35
7% Mo	S32654	A240	430	62	750	109	40

A la température ambiante, les nuances duplex ont intrinsèquement des caractéristiques mécaniques plus élevées que les austénitiques basiques. Ceci est dû à leur structure duplex comme l'illustre le tableau 4 ci-dessous.

Tableau 4 Caractéristiques mécaniques minima sur la spécification de base de l'ASTM Aciers inoxydables duplex en feuilles ou en bandes						
Désignation	Numéro UNS	Limite élastique (minimum)		Charge de rupture (minimum)		Allongement (maximum)
		MPa	ksi	MPa	ksi	%
2304	S32304	400	58	600	87	25
2205	S32205	450	65	655	95	25
2101	S32101	450	65	650	94	30
2507	S32750	550	80	795	116	15

Ceci résulte de la résistance intrinsèque élevée de la phase ferritique associée à la capacité élevée de durcissement par écrouissage de la phase austénitique. Les tendances récentes dans le développement des duplex s'orientent à la fois sur les nuances plus pauvres et les plus alliées.

Il est possible d'obtenir des duretés encore plus élevées avec les nuances à durcissement structural. On peut atteindre des limites élastiques jusqu'à 1793 MPa, dépassant ainsi celles des nuances martensitiques. Cette dureté est atteinte tout en conservant une bonne ductilité et une bonne résistance à la corrosion, et ceci avec un traitement thermique à température modeste ne dépassant pas 620°C.



Photo reproduite avec l'aimable autorisation de : iStockphoto

Chapitre 1

Propriétés physiques
et mécaniques



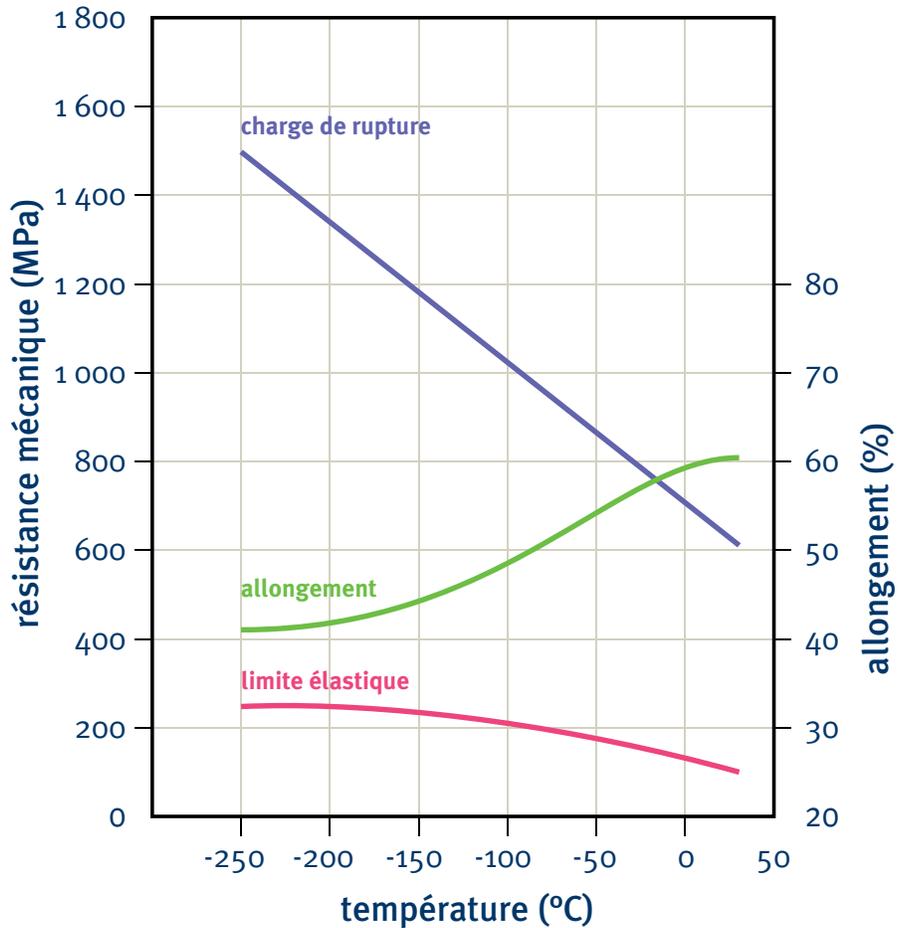
Fûts à bière en 304

Photo reproduite avec l'aimable autorisation de Tim Pelling pour le compte du Nickel Institute

L'addition de nickel (comme d'autres éléments) en solution solide accroît la limite élastique des nuances ferritiques. Cependant, du fait de la moindre écrouissabilité des nuances ferritiques, les charges de rupture sont moins élevées que celles des nuances austénitiques similaires.

Caractéristiques mécaniques à basse température. La limite élastique et la charge de rupture des nuances austénitiques s'accroissent également aux basses températures comme le montre la figure 4.

Figure 4 :
Propriétés mécaniques des aciers inoxydables type 304 à basse température

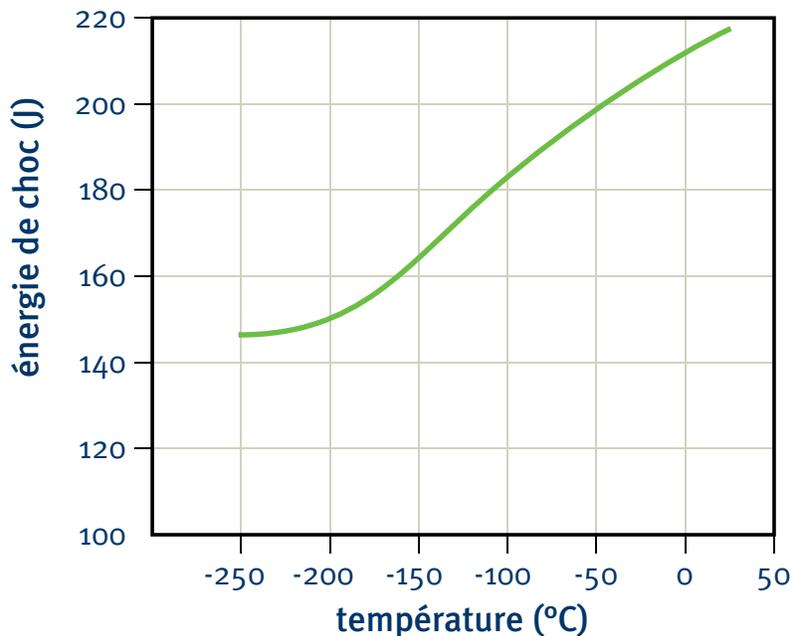


Les figures 4 et 5 illustrent également que (contrairement à d'autres familles d'aciers inoxydables) les aciers austénitiques conservent aux basses températures, à la fois leur ductilité et leur résistance mécanique. Il en est de même pour les matériaux durcis par déformation à froid. Par conséquent, les nuances austénitiques se prêtent bien à des applications à des très basses températures atteignant même celle de l'hélium liquide.

« Les nuances duplex ont intrinsèquement des caractéristiques mécaniques plus élevées »

Les duplex conservent leur excellente dureté jusqu'à des températures voisines de -100°C, plus basses que les ferritiques.

Figure 5 :
Résistance aux chocs (résilience) des aciers inoxydables type 304L aux basses températures



D'importantes additions d'azote dans les aciers austénitiques contribuent de manière significative à stabiliser la structure austénitique aux basses températures et ainsi maintiennent à un niveau bas la perméabilité magnétique de ces nuances à l'état adouci, comme le montre le tableau 5.

Tableau 5 Perméabilité magnétique des aciers inoxydables adoucis En fonction de la température			
Perméabilité magnétique des inox adoucis	μ max à 20°C	μ max à -196°C	μ max à -269°C
Type 304	1,005 - 1,03	2,02 - 2,03	-
Type 304L	1,08 - 1,3	1,2 - 1,6	1,1 - 1,5
Type 316	1,02 - 1,05	-	-
Type 316L	1,02 - 1,1	1,03 - 1,09	1,03 - 1,0
Type 321	1,03 - 2,0	-	2,75
Type 347	1,005 - 1,03	-	1,40
Type (316N)	1,0	1,0 - 1,01	1,03 - 1,06

Référence : publication du Nickel Institute n° 4368

Chapitre 1

Propriétés physiques
et mécaniques

« Les nuances austénitiques conservent leur ductilité aux températures cryogéniques »



Photo reproduite avec l'aimable autorisation de Babcock & Wilcox

Chapitre 1

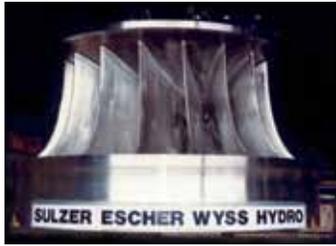
Propriétés physiques
et mécaniques

« La résistance au feu
et aux explosions
représente un
avantage »



« Cloud Gate »
d'Anish Kapoor

Photo reproduite avec l'aimable
autorisation de : Outokumpu et
James Steinkamp, Steinkamp
Photography.



Histoire d'un exemple d'application : le remplacement d'aubes de turbines augmente de 400 mégawatts la capacité de production

Depuis 1992 la compagnie Ontario Power Generation (OPG) (antérieurement Ontario Hydro) au centre du Canada a accru la capacité de production de ses turbines hydroélectriques en remplaçant les précédentes aubes par de nouvelles ailettes mieux conçues, plus légères et plus résistantes en acier inoxydable moulé J 91540 à 4% de nickel.

Cet alliage présente une bonne résistance à la corrosion et à la cavitation comparable à celle d'un S 30400.

La bonne soudabilité de l'alliage est importante lorsqu'il s'agit de réparer sur place les dommages engendrés par la cavitation. Sa résistance mécanique élevée est également importante en ce qu'elle améliore l'efficacité d'une ailette et contribue à augmenter la pression différentielle entre la face supérieure de l'aube en pression et la face inférieure en dépression.

Les nouvelles aubes ont permis d'accroître la capacité de chaque réacteur de 56 MW à 64 – 65, 4 MW.

Photo reproduite avec l'aimable autorisation d'Ontario Power Generation.

Propriétés mécaniques à haute température. Les deux facteurs importants à retenir ici sont la résistance mécanique à chaud et la stabilité thermique ; ceci sera développé en détail au chapitre 5.

Propriétés structurales. Les austénitiques comme les duplex sont utilisés en structure dans de nombreuses applications lorsque l'on recherche un avantage en résistance à la corrosion, au feu ou aux explosions. Le SCI (Steel Construction Institute www.steel-sci.org) a publié un document de référence intitulé A Design Manual For Structural Stainless Steel. Ce document est également disponible sur le site d'Euro-Inox (www.euro-inox.org). Autre outil de référence : ANSI/ASCE-8-90 Specification for the Design Cold-Formed Stainless Steel Structural Members.

Les aciers inoxydables moulés. Le présent document traite des aciers inoxydables obtenus à partir de produits forgés. La plupart des nuances d'aciers forgés austénitiques et duplex ont une nuance équivalente en fonderie, mais avec une désignation différente. Les aciers moulés ont une analyse légèrement modifiée afin d'améliorer leur fluidité et d'éviter la fissuration à chaud, ce qui peut avoir une incidence sur leur résistance à la corrosion dans certains milieux. La teneur en éléments résiduels peut également varier considérablement. La taille du grain peut être différente de celle des aciers forgés, ce qui a une incidence sur les caractéristiques mécaniques. Voir la brochure de Nickel Institute n° 11022 pour de plus amples détails.



Chapitre 2

Résistance à la corrosion

Chapitre 2

Résistance à la corrosion

« La plupart du temps les aciers inoxydables sont préconisés parce qu'ils résistent mieux à la corrosion »

La corrosion des matériaux est un processus complexe. La corrosivité d'un acide peut varier considérablement en fonction de la température, de la concentration en acide, du degré d'aération, de la présence d'impuretés (qui peuvent avoir un effet inhibiteur ou stimulant), du débit etc.. De surcroît, la conception, le soudage et la mise en œuvre, le traitement thermique, l'état de surface et les produits chimiques de nettoyage ont une influence sur la durée de vie d'un équipement.

La plupart du temps les aciers inoxydables sont préconisés de préférence aux aciers au carbone ou faiblement alliés parce qu'ils résistent mieux à la corrosion. Cependant, comme c'est souvent le cas dans toutes les généralisations, il y a des exceptions à la règle. Par exemple, il existe des cas où certains aciers inoxydables présentent une défaillance plus rapidement que les aciers au carbone. De même, tandis que, la plupart du temps, le 316L résiste mieux à la corrosion que le 304L, il existe des situations dans lesquelles ce dernier résiste mieux que celui-là, par exemple en présence d'acides très oxydants tels que les acides nitrique ou chromique.

Le nickel joue un rôle assez subtil dans la résistance à la corrosion des aciers inoxydables. Non seulement il intervient comme élément d'addition dans la masse, mais il exerce une influence sur la couche passive d'oxydes et la microstructure (par exemple en réduisant la formation des phases nuisibles). Choisir le bon alliage signifie déterminer celui qui aura la durée de vie requise sans contaminer le produit qu'il est destiné à contenir.

La corrosion généralisée. Dans le tableau 6 figurent des données extraites de Schwind et al¹. Parmi d'autres alliages, les nuances 304, 201 et 430 ont été testées selon la procédure MTI, dans laquelle, pour une concentration donnée d'acide, la température maxi correspond à celle pour laquelle la vitesse de corrosion est inférieure à 0,13 mm/an . Plus élevé est le chiffre, meilleure est la résistance à la corrosion de l'alliage.

Solution test	Température critique (°C)		
	304	201	430
Acide sulfurique à 96%	50	20	40
Acide phosphorique à 85%	80	70	<20
Acide nitrique à 10%	> p.é.	> p.é.	> p.é.
Acide nitrique à 65%	100	80	70
Acide acétique à 80%	100	100	<20
Hydroxide de sodium à 50%	90	65	90

p.é. = point d'ébullition

Il y a un milieu dans lequel les 3 alliages se comportent de façon similaire, bien que dans l'ensemble des milieux cités le 304 offre une résistance à la corrosion équivalente ou meilleure. Il y a des milieux dans lesquels le 201 est bien meilleur que le 430, aussi bien que des milieux dans lesquels le 430 est meilleur que le 201. Lorsque l'on traite de corrosion en général, il est toutefois important de se pencher non pas sur le rôle d'un seul élément d'alliages, mais sur la combinaison de ces éléments entre eux.

¹Schwind, M et al., *Stainless Steel World*, Mars 2008, p66ff



Centrale nucléaire

Photo reproduite avec l'aimable autorisation de Duke Energy

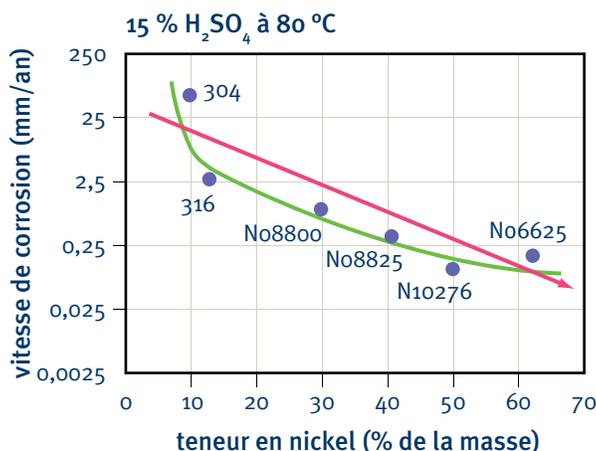
Chapitre 2

Résistance à la corrosion

Dans une solution réductrice telle que l'acide sulfurique, une manière d'améliorer la résistance à la corrosion consiste à augmenter la teneur en nickel. Normalement, on évite d'utiliser un alliage qui présente une vitesse de corrosion élevée, mais cela peut arriver dans des conditions de fonctionnement anormales ou très perturbées. La figure 6 montre l'influence de l'augmentation de la teneur en nickel sur la diminution de la vitesse de corrosion dans une solution d'acide sulfurique à 15% à 80°C. Comme nous l'avons mentionné plus haut, la résistance à la corrosion dépend non pas d'un seul élément d'alliage isolé, mais de la combinaison des éléments d'alliage.

Figure 6 :
Influence de la teneur en nickel sur la vitesse de corrosion de différents alliages dans une solution d'acide sulfurique 15% à 80°C

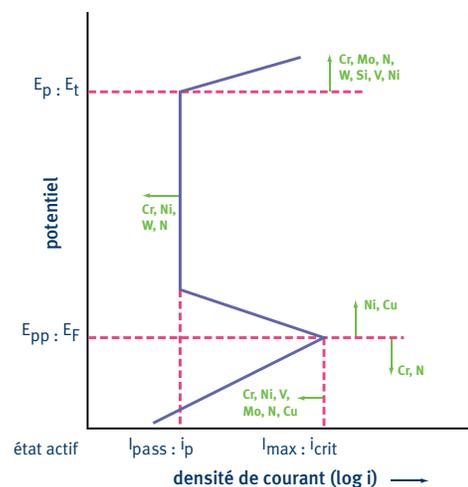
(source : Sedriks²)



Il est possible d'aborder différemment la résistance corrosion sous l'angle du comportement électrochimique. Ceci peut s'illustrer en schématisant l'influence des éléments d'alliage d'aciers inoxydables à partir des courbes de polarisation anodiques, figure 7.

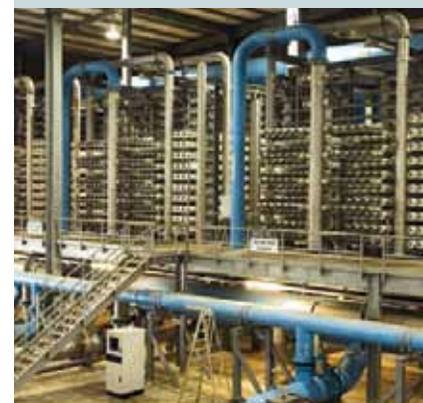
Figure 7 :
Représentation schématique de l'influence des différents éléments d'alliages sur la courbe de polarisation anodique des inox.

(source : Sedriks²)



Le nickel réduit la densité de courant du potentiel de passivation primaire (E_p) et déplace ce potentiel vers le sens plus noble. Il diminue la densité de courant de passivation, ce qui a pour résultat une plus faible vitesse de corrosion à l'état passif et augmente le potentiel (E_t) auquel le métal entre dans la phase de trans-passivité.

²Sedriks, A.J. (Corrosion of stainless steels, 2nd edition, Wiley-Interscience 1996)



Les usines de dessalement sont un cas typique d'utilisation d'aciers inoxydables austénitiques et duplex

Photo reproduite avec l'aimable autorisation de : Tim Pelling pour le compte du Nickel Institute.

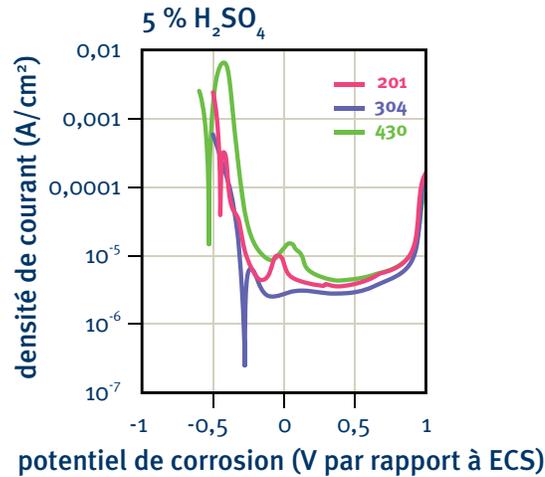
Chapitre 2

Résistance à la corrosion

La figure 8 montre comment cela fonctionne en pratique en comparant le 304, le 201 et le 430 dans une solution d'acide sulfurique à 5%.

Figure 8 :

Comparaison des courbes de polarisation du 304, du 201 et du 430 dans une solution d'acide sulfurique à 5%. (source : Schwind')



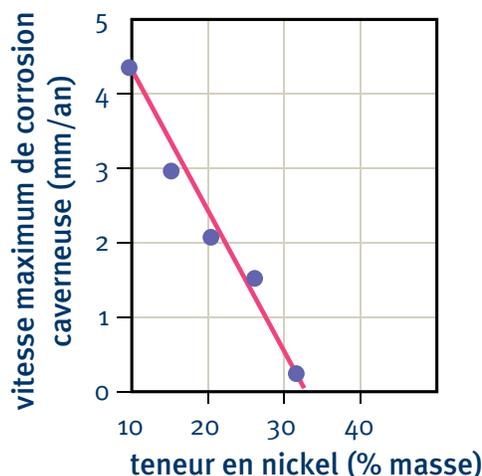
Cette comparaison met en évidence que le nickel réduit favorablement les vitesses de corrosion aussi bien dans la phase active que dans la phase de passivité d'un acier inoxydable. Normalement un alliage se choisit de façon que sa vitesse de corrosion soit acceptable à l'état passif. Cependant, des petits changements de mode opératoire, tels qu'une petite élévation temporaire de température, suffisent à faire basculer un alliage dans l'état actif. Il est alors important de disposer d'un alliage dont la vitesse de corrosion en phase active n'est pas déraisonnable et qui peut se re-passiver rapidement lorsque les conditions d'utilisation reviennent à la normale.

Résistance à la piqûre causée par les chlorures. La résistance relative à l'initiation de la corrosion par piqûre est donnée par la valeur du « Pitting Resistance Equivalent Number » (PREN). La formule la plus courante est : $PREN = \%Cr + 3,3 (\%Mo) + 16 (\%N)$, bien qu'il existe de nombreuses formules qui ont essayé d'établir une corrélation entre le comportement observé dans les tests et la composition chimique. Certains, par exemple, introduisent les effets positifs du tungstène, tandis que d'autres prennent en compte les effets négatifs du manganèse. Sedricks attribue un effet, positif mais léger, au nickel. La composition de l'alliage dans la masse est importante, mais ne constitue qu'un seul facteur pratique de détermination de la résistance à la piqûration d'un alliage. La présence de phases intermétalliques (sigma, chi, etc.) attribuables à un traitement thermique défectueux et la présence d'inclusions (notamment des sulfures de manganèse), sont un facteur majeur d'affaiblissement de la résistance à la corrosion par piqûre. Dans le cas des aciers inoxydables à forte teneur en chrome et molybdène, il peut se former des composés intermétalliques lors d'un soudage ordinaire ; les nuances ferritiques y sont extrêmement sensibles (voir le chapitre 5 sur l'assemblage). La contribution la plus significative du nickel à la résistance à la piqûration réside dans le changement de structure du matériau, ce qui rend facile la mise en œuvre quelles que soient les épaisseurs, avec un soudage aisé sans formation de composés intermétalliques préjudiciables, en particulier dans les nuances les plus fortement alliées.

Corrosion caverneuse. Le nickel est connu pour diminuer la vitesse de corrosion dans les cavernes ou zones confinées, comme l'indique la figure 9. Ceci est analogue à la diminution de la vitesse de corrosion en même temps que la teneur en nickel augmente comme le montre la figure 6. Dans les deux cas, la corrosion du métal est « active ».

Figure 9 :
Effet de la teneur en nickel sur la vitesse de propagation de la corrosion caverneuse pour un acier inoxydable 17% Cr – 2,5% Mo.

(source : Sedriks²)



Histoire d'un exemple d'application : zéro maintenance

Son tablier s'étend à 75 mètres au-dessus de l'entrée du port à containers Kwai Chung de Hong-Kong, et ses deux pylônes culmineront à 290 mètres dans le ciel. A son achèvement en 2009 le Stonecutters Bridge est devenu un élément clé de l'activité commerciale de la Chine.

Afin de répondre aux exigences rigoureuses de structure et de finition de surface, Arup Materials Consulting à Londres en Angleterre, a choisi d'utiliser des plaques en acier duplex S32205 (à teneur en nickel entre 4,5 et 6,5 %) laminées à chaud pour façonner la partie supérieure des flèches. Cela représente à peu près 2000 tonnes de S32205 principalement en épaisseur 20 mm.

Arup a également prescrit des armatures de béton armé en acier inoxydable S30400 (à teneur en nickel 8,0 à 10,5%) pour les piliers et les parties de l'ouvrage les plus exposées à l'action de la mer. Pour cela il a été utilisé 2882 tonnes de barres pour armatures dans des diamètres pouvant atteindre 50mm.

Dans la recherche du matériau pour l'habillage, il est apparu aux concepteurs que, bien que l'acier au carbone présentait avec 450 MPa la résistance mécanique requise, il ne permettait pas le zéro maintenance exigé. « L'acier inoxydable austénitique, avec une résistance mécanique de 300 MPa, ne permettait pas de satisfaire les exigences requises de résistance », explique Graham Gedge, spécialiste chez Arup des matériaux pour les projets. « Il aurait fallu augmenter les épaisseurs, donc le poids et par conséquent le prix : avec du S32205, nous savions que nous pouvions obtenir une résistance mécanique de 450 MPA avec des plaques laminées à chaud ».

Une autre raison a conduit à renoncer aux aciers austénitiques ordinaires : dans cet environnement marin pollué, il aurait fallu contrôler très soigneusement l'état de surface. Le niveau de durabilité que ces matériaux doivent atteindre dans cet environnement est de C5M, la pire des conditions d'exposition atmosphérique possible dans la classification ISO des environnements.

Le S32205 est idéal pour obtenir la finition spécifiée par les concepteurs. « Le S32205 est moins sujet à la piqure et à la souillure que les autres alliages possibles, et nous offre une plus grande flexibilité dans le choix des surfaces de finition » explique Graham Gedge. « Le contrôle de la rugosité de surface devient moins crucial, même si quelques saletés et du sel viennent s'accrocher ».

La combinaison de flèches en acier duplex et d'armatures pour béton armé en inox devrait garantir à cet ouvrage une grande durabilité.

Photo : Arup Materials Consulting, Arup Hong-Kong [bridge]



Bouilloire Alessi

Photo reproduite avec l'aimable autorisation de : Alessi

Chapitre 2

Résistance à la corrosion

« Le nickel contribue à la résistance à la corrosion »



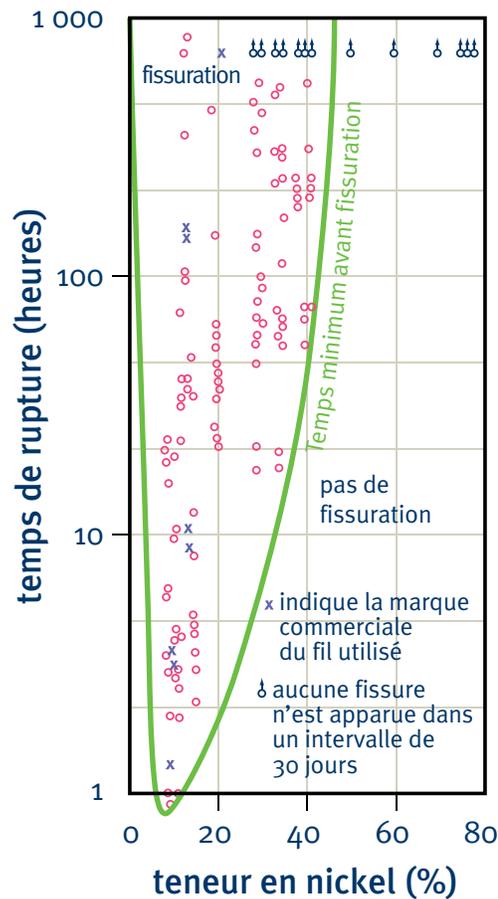
Utilisation innovante de l'inox pour la réflexion des rayons solaires dans le cadre des économies d'énergie.

Photo reproduite avec l'aimable autorisation de : Rafael Vinoly Architectes PD (Pittsburgh Convention Center)

Résistance à la corrosion sous contrainte. Il y a de nombreux types de corrosion sous contrainte. Les aciers inoxydables austénitiques ont une excellente résistance à la corrosion sous contrainte dans les milieux d'hydrogène sulfuré, comme ceux que l'on rencontre dans le secteur du gaz naturel. Les inox austénitiques et plus récemment les duplex ont fait la preuve de leurs excellentes performances dans la durée. Les consignes d'utilisation figurent dans les normes comme la NACE MR 0175/ISO 15156.

Cela fait de nombreuses années que la corrosion sous contrainte en présence de chlorures fait l'objet d'études, et nombreux sont ceux qui sont familiarisés avec la « courbe de Copson », issue d'essais dans un milieu agressif de chlorure de magnésium à l'ébullition. Ces essais ont montré que les inox ferritiques exempts de nickel sont meilleurs que les nuances d'inox courantes contenant 6 à 12% de nickel. Des alliages contenant plus de 45% de nickel se sont avérés être virtuellement insensibles à la corrosion sous contrainte dans le chlorure de magnésium. En pratique, la plupart des autres solutions chlorurées sont beaucoup moins agressives que le chlorure de magnésium et, alors que l'on évite les nuances type 304 ou 316L, les alliages inoxydables à 6% de molybdène présentent dans la plupart des cas une résistance à la corrosion suffisante, tout comme les duplex.

Figure 10 :
Courbe de Copson
Influence du nickel sur la sensibilité des aciers inoxydables à la corrosion sous contrainte dans une solution de chlorure de magnésium à ébullition



Chapitre 2

Résistance à la corrosion

« Les nuances austénitiques sont très utiles dans les milieux riches en hydrogène sulfuré »



Les plateformes offshore reposent sur les inox austénitiques au nickel pour les équipements de traitement et les tuyauteries, aussi bien que pour prévenir la corrosion par l'eau de mer.

Photo reproduite avec l'aimable autorisation de KM Europa Metal



Histoire d'un exemple d'application : cuves de fermentation de sauce au soja

Les mêmes qualités qui procurent son originalité à la sauce au soja, créent des conditions tellement sévères pendant la fermentation que les cuves en acier inoxydable couramment utilisées dans les autres industries alimentaires ne donnent pas satisfaction pour le brassage de cette sauce populaire. En remplacement, le Japon a utilisé de la fibre de verre et de l'acier revêtu de résine, l'un et l'autre résistant à la corrosion.

Les acides qui se forment pendant la fermentation abaissent le niveau du pH jusqu'à environ 4,7 dans de la vapeur qui contient déjà à peu près 17% de chlorures. Le problème est que la corrosivité du mélange d'acides organiques et de chlorure de sodium de la sauce étant si grande et le processus de fermentation si long (environ 6 mois), le coût d'entretien des cuves peut devenir prohibitif.

Une étude récente montre que les super austénitiques à haute teneur en molybdène S 32053 résistent à la même corrosion que celle qui affecte les autres aciers inoxydables immergés dans des cuves de brassage traditionnel.

« L'inox super-austénitique est moins sujet à la corrosion, tandis que le S31603 est atteint par la corrosion cavernueuse et la corrosion sous contrainte, et les duplex S32506 peuvent être atteints par de la corrosion cavernueuse » écrit Yucata Kobayashi de Nippon Yakin Kogyo, l'un des plus grands producteurs d'inox au Japon.

Sur la base de résultats expérimentaux, Yamasa Corporation, qui fabrique de la sauce au soja depuis 1645, a construit 100 cuves de fermentation en S32053 pour des capacités atteignant 390 000 litres pour ses opérations au Japon. Les cuves sont en fonctionnement depuis octobre 2002 sans aucune trace de corrosion.

Si les cuves en S32053 passent l'épreuve du temps dans l'usine Yamasa, leur développement commercial sera considérable. Les occasions d'utiliser les aciers inoxydables super austénitiques pour de nouvelles cuves de fermentation semblent très prometteuses.

Photo : Tom Skudra pour le Nickel Institute / Nippon Yakin Kogyo Co. Ltd.

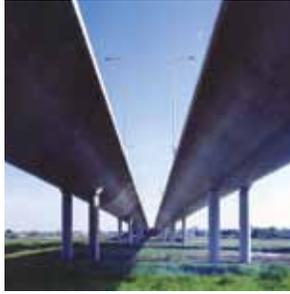


Photo reproduite avec l'aimable autorisation de : Veer

Chapitre 2

Résistance à la corrosion

« Pas de maintenance
pendant 120 ans »



Histoire d'un exemple d'application : armatures pour béton armé

Imaginez le temps et l'argent gagné si un pont enjambant un estuaire sur la mer devait ne pas nécessiter de maintenance pendant, disons, 120 ans. Nul besoin de casser et purger les piliers en béton pour remplacer les armatures rouillées, plus d'embouteillages pendant que les équipes d'entretien s'occupent des réparations.

Les experts d'Ove Arup basées à Dublin ont non seulement imaginé un tel pont « sans soucis », mais ils l'ont conçu et réalisé en utilisant des armatures pour béton armé en inox. Les travées jumelles du pont de Broadmeadow dans l'est de l'Irlande, partie de l'autoroute qui relie Dublin à Belfast ont été

ouvertes à la circulation en juin 2003.

« Nous avons un environnement très agressif – eau salée, zones de marnage avec des alternances de mouillage et de séchage- avec des accès de maintenance très très difficiles » selon les propos de Troy Burton directeur associé chez Ove Arup et ingénieur principal pour la conception de ce pont. « Nous souhaitons garantir pour ce pont une durée de vie de 120 ans..et nous devons convaincre notre client que nous avons une solution durable peu coûteuse en maintenance. »

La solution consistait à utiliser des armatures en inox S31600 pour le renforcement des 16 piliers qui supportent les deux ponts de 313 mètres qui enjambent l'estuaire.

L'utilisation d'armatures inox était une première pour Ove Arup. « Elles ont joliment bien garni tous les caissons en tant que solution permanente et durable » selon Burton.

Au total, 169 tonnes d'acier inoxydable ont été utilisées.

D'après Mr Burton le recours à des armatures inox n'a engendré que 3% de surcoût aux 12 millions d'euros qu'a coûté le pont – une dépense somme toute négligeable en regard des économies de maintenance et de réparation sur toute la durée de vie de l'ouvrage. L'accès aux piliers du Breadmeadow Bridge est difficile si l'on veut éviter de porter atteinte aux vasières écologiquement sensibles, ce qui souligne l'importance d'éviter les interventions de maintenance sur la structure.

Photo : Arup Consulting Engineers

Chapitre 3

Températures élevées



Chapitre 3

Températures élevées

« La stabilité de la structure est l'une des raisons majeures de leur large utilisation aux températures élevées »

Aux températures élevées comme aux basses températures, la sélection d'un matériau repose sur ses propriétés, et habituellement elle résulte de compromis. Aux températures élevées, parmi les propriétés recherchées par les concepteurs il y a les caractéristiques mécaniques, comme la limite élastique ou la charge de rupture, la résistance au fluage, la ductilité, la fatigue thermique et la résistance aux chocs thermiques. Parmi les propriétés physiques, celles qui peuvent présenter un intérêt sont la dilatation thermique, la conductivité thermique, la conductibilité électrique. Les propriétés de résistance au milieu environnant sont la résistance à l'oxydation, à l'enrichissement en carbone, la sulfuration, et la nitruration. Pour la mise en œuvre, les propriétés recherchées sont la soudabilité et la facilité de mise en œuvre. D'autres caractéristiques telles que la résistance à l'usure et au grippage, ou la réflectivité doivent être prises en considération.

Ces propriétés, dans leur ensemble, présentent un intérêt à toutes températures, mais il est important de bien considérer les modifications potentielles des propriétés pendant la durée de service. La stabilité de la structure des aciers inoxydables austénitiques est l'une des raisons majeures de leur utilisation étendue aux températures élevées.

En général les aciers inoxydables austénitiques conservent une bonne résistance aux températures élevées, du moins en comparaison avec les autres matériaux. La figure 11 compare la limite élastique et la charge de rupture instantanées de quelques nuances austénitiques et ferritiques à différentes températures. En dessous d'environ 540°C (1000°F) les différences ne sont pas si importantes. Au dessus de cette température la résistance des ferritiques chute rapidement. Certaines nuances ferritiques peuvent être enrichies en éléments d'alliages afin d'accroître la résistance mécanique aux températures élevées.



Histoire d'un exemple d'application : les enceintes à vide

Situé à l'université de Saskatchewan au Canada, le synchrotron, c'est son nom, produit des électrons pouvant produire une lumière des millions de fois plus brillante que celle du soleil que nous percevons sur terre. Les chercheurs utilisent cette lumière pour différents projets en conception et fabrication.

L'acier inoxydable, et les nuances les plus courantes S30400, S30403 et S31603, est très largement utilisé dans les chambres à vide parce qu'il ne désorbe pas.

Pour réaliser l'ultravide il faut retirer la plus grande quantité possible de molécules. Les impuretés, non seulement affaiblissent le faisceau lumineux mais elles diffractent les électrons tout à fait de la même manière que le brouillard trouble les rayons des phares d'une voiture. D'après Mark de Jong, directeur des opérations du CLS certains synchrotrons ont été fabriqués en cuivre ou en aluminium, mais, du point de vue du fabricant, l'inox est beaucoup plus couramment utilisé.



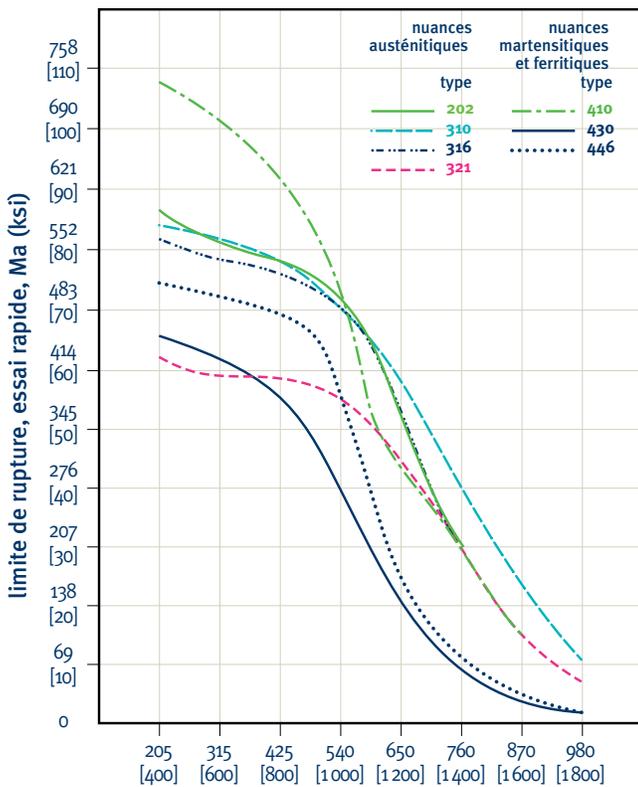
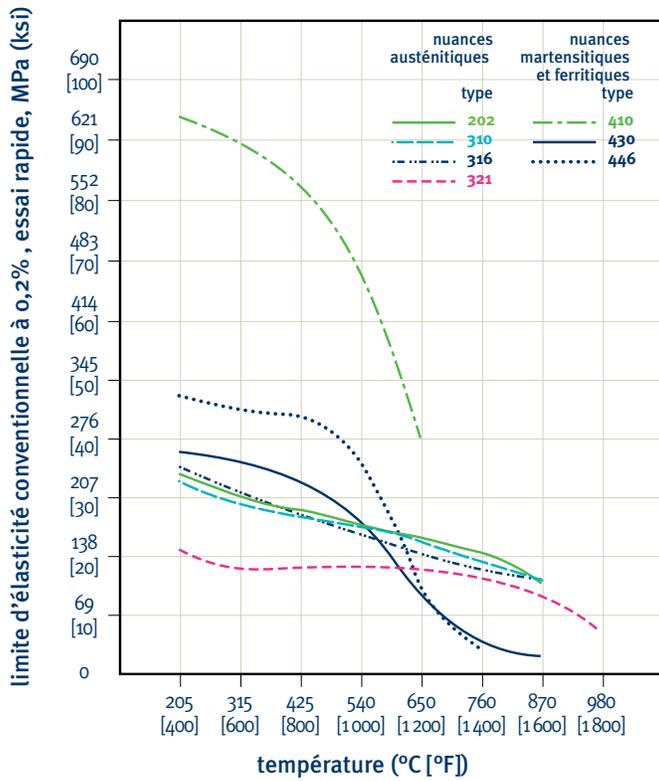
Les composants d'une chambre à vide doivent être maintenus en température dans d'énormes fours pendant 40 heures à 250°C. Ceci sert à extraire les gaz qui ont été absorbés au cours de la fabrication. Tandis que l'aluminium commence par perdre sa résistance mécanique à 150°C, ce n'est pas le cas de l'inox : c'est là un attribut essentiel si l'on considère que les composants sont chauffés sous vide. « L'inox ne perd pas de résistance aux niveaux de pression que nous utilisons couramment pendant les maintiens en température » confie Mark de Jong.

La Société Johnsen Ultravac basée à Ontario au Canada utilise de l'inox S30400 pour un certain nombre de chambres à vide qu'elle fabrique. Comparé à d'autres métaux, le S30400 coûte moins cher. Il est également plus facile à usiner et souder et suffisamment dur pour pénétrer dans les joints de cuivre. Les multiples raccords, brides, pompes à ions et vannes sont tous en acier inoxydable ce qui en simplifie l'assemblage avec les matériaux quasi métalliques.

Un demi kilomètre de tuyau en acier inoxydable de diamètre 203,2 mm et un demi-kilomètre en diamètre 76,2 servent au transport d'eau dé-ionisée pour le refroidissement blocs de cuivre des électro-aimants et absorbeurs de rayons X dans les cylindres des pompes en acier inoxydable. On a choisi les nuances S31600 et S31603 parce que l'eau dé-ionisée risque de corroder l'acier au carbone.

Photo : Canadian Light Source Inc., Johnsen Ultravac, University of Saskatchewan

Figure 11 :
 Limite élastique et limite de rupture des aciers inoxydables aux températures élevées
 (source : publication du Nickel Institute 9004)



Chapitre 3

Températures élevées

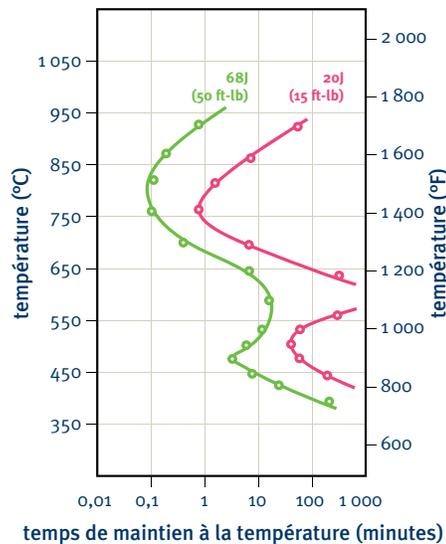
« L'austénite ne fragilise pas jusqu'à 475°C »



Photo reproduite avec l'aimable autorisation de M. Eero Hyrkäs

Les inox ferritiques à 13% de chrome ou plus fragilisent rapidement dans une fourchette de températures de 400 à 550°C (750 – 1020°F) et les nuances plus fortement alliées (chrome/ molybdène) plus lentement à des températures ne dépassant pas 270°C. La température à laquelle la fragilisation est la plus rapide, appelée « nez de la courbe » se situe aux alentours de 475°C (885°F), et ce phénomène s'appelle ainsi « fragilisation à 475°C » (ou « fragilisation à 885°F »). Le phénomène de fragilisation que l'on voit en figure 12 comme le « nez » le plus bas affecte également la phase ferrite dans les aciers inoxydables duplex, ce qui explique que la température maximum d'exposition de longue durée des duplex se situe autour de 275°C ou légèrement plus basse. Bien que l'austénite soit insensible à cette fragilisation, la ferrite que l'on trouve dans les soudures austénitiques et les pièces de fonderie pourra fragiliser, bien qu'en étant en quantité suffisamment faible pour ne pas avoir d'effet défavorable sur les propriétés sauf aux températures cryogéniques. Les aciers inoxydables ferritiques contenant moins de 13% de chrome telles que le 409 ou le 410S, peuvent ne pas être sujets à cette fragilisation sauf éventuellement en cas d'exposition prolongée selon la quantité de chrome qu'ils contiennent. Néanmoins, leur faible teneur en chrome et leurs faibles caractéristiques mécaniques en limitent la température d'utilisation à environ 650°C

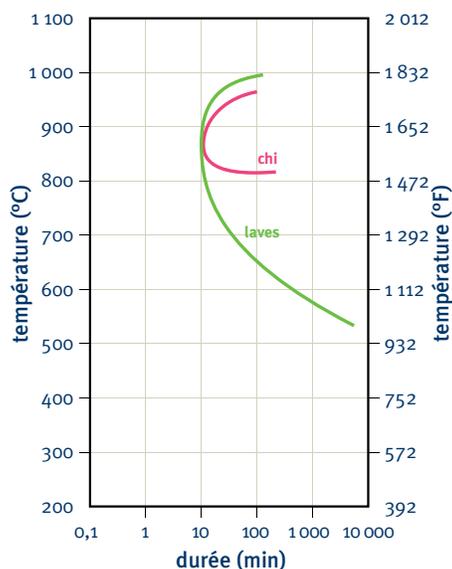
Figure 12 :
Courbe d'un alliage ferritique S44800 montrant la fragilisation à la fois à partir de 475°C et à partir de la formation d'une phase intermétallique
(source : Allegheny Ludlum)



(1200°F). Les inox ferritiques faiblement alliés sont très couramment utilisés dans les systèmes d'échappements automobiles. Il faut également prendre en considération une autre modification de la microstructure qui est la formation de composés intermétalliques nuisibles durs et fragiles de la phase sigma. Pour simplifier, nous utiliserons le vocable « phase sigma » pour désigner l'ensemble de ces composés intermétalliques. Ils peuvent se former autant dans les aciers inoxydables austénitiques que ferritiques, y compris les duplex. Le « nez » supérieur sur la figure 12 figure cette fragilisation dans un acier ferritique très allié. La figure 13 montre la formation de composés intermétalliques dans un inox à 5% de molybdène. La température de formation de cette phase dépend de la composition de l'alliage, mais elle se situe généralement dans une fourchette de 565 – 980 °C. Toutefois, certaines des nuances à plus bas chrome peuvent faire de la phase sigma à des températures pouvant descendre à 480°C (900°F), mais, il faut le dire, sur des durées très longues. Le nez de la courbe se situe en général dans la partie supérieure de la fourchette de température. En plus de la température, le temps nécessaire à la formation de la phase sigma varie considérablement selon la composition et l'élaboration (le taux d'érouissage par exemple). Le chrome, le silicium, le molybdène, le niobium, l'aluminium et le titane favorisent la phase sigma, tandis que le nickel le carbone et l'azote en ralentissent la formation. Avec un niveau suffisamment élevé de nickel, la phase sigma peut être entièrement éliminée. Lorsqu'un matériau doit être utilisé dans la fourchette de température de la formation de phase sigma, il est important d'estimer le degré de fragilisation probable pendant la durée de vie du composant et quelle en sera l'incidence sur les performances de ce composant. Normalement la fragilisation n'est pas un problème à la température de fonctionnement (sauf en cas de fatigue thermique), mais peut le devenir sérieusement à la température ambiante.

La taille des grains compte beaucoup lors de l'utilisation d'un matériau à haute température. Dans les aciers austénitiques, les grains fins ne sont pas souhaités parce qu'ils diminuent la résistance au fluage.

Figure 13 :
Cinétique des précipitations isothermes
dans les composés intermédiaires
de l'alliage 0,05C-17Cr-13Ni-5Mo
renfermant 0,145 % d'azote recuit à
1 150 °C (2 102 °F)



La meilleure combinaison des propriétés peut s'obtenir avec des grains fins à moyens, bien que dans certains cas, lorsque l'on recherche une bonne résistance au fluage et à la rupture, un grain plus grossier dans une nuance austénitique soit préférable. Un grain grossier présente un double inconvénient : il abaisse la résistance à la fatigue thermique et la résistance aux chocs thermiques. Dans les aciers purement ferritiques, le grossissement du grain peut survenir rapidement au-delà de 1100°C (2010°F). Cela peut se produire lors du soudage et se traduit par l'apparition dans la zone affectée thermiquement d'un grain grossier peu ductile. Le grossissement des grains est plus rapide dans les nuances ferritiques que dans les nuances austénitiques. En général le carbone dans les aciers inoxydables austénitiques favorise la tenue aux températures élevées, par accroissement de la résistance au fluage. S'il se forme des carbures, cela peut engendrer quelques problèmes de corrosion en présence d'agents corrosifs (en général à plus basses températures pendant les périodes d'arrêt). Dans la plupart des règles de conception des appareils à pression, certaines nuances d'acier inoxydable austénitique sont indiquées avec une teneur en carbone minimum et maximum qui présentent des caractéristiques mécaniques plus élevées que les nuances à bas carbone ou sans minimum de

carbone indiqué. Par exemple le 304H présente une teneur en carbone mini de 0,04%.

Quel que soit le matériau que l'on utilise à température élevée, le coefficient de dilatation thermique doit être pris en compte lors de la conception, sans quoi il y aura des défaillances. Le coefficient de dilatation des ferritiques est plus faible que celui des nuances austénitiques mais doit néanmoins toujours être pris en compte dans les calculs. Les nuances austénitiques plus riches en nickel comme le 310 et le 330 présentent un coefficient de dilatation thermique plus bas que les nuances standard 304 ou ses variantes stabilisées. Les alliages de nickel (l'alliage 600 par exemple) ont des coefficients de dilatation plus faibles.

En pratique, de nombreux facteurs influent sur la conductivité thermique. Les nuances austénitiques présentent une conductivité thermique plus faible que n'importe quelle nuance d'acier inoxydable ferritique ou d'acier au carbone, ce qui revient à dire que leur coefficient de transfert thermique à travers le métal est plus faible. Les pellicules d'oxydes qui se forment à la surface agissent également comme des obstacles au transfert thermique.

La résistance à l'oxydation d'un alliage est également importante et relativement facile à mesurer, bien que les problèmes puissent apparaître lors des applications réelles. Dans l'idéal, on devrait voir apparaître une couche d'oxyde à la surface qui se développe de plus en plus lentement jusqu'à atteindre, dans le temps, des niveaux de croissance très faibles. L'oxyde devrait aussi avoir le même coefficient de dilatation thermique que l'inox. Dans la réalité, lorsque la couche d'oxydes s'épaissit au-delà d'un certain niveau et lorsque la température fluctue, la couche d'oxydes s'écaille et une nouvelle oxydation démarre. Les températures maxima en service continu ou intermittent sont indiquées.

La teneur en chrome est un facteur important pour qu'une couche d'oxydes protectrice se forme au fur et à mesure de l'augmentation de la température, facteur parfois favorisé par de plus petites additions de silicium, d'aluminium ou de cérium. La couche d'oxydes n'est jamais parfaite et sous l'effet simultané des dilatations / contractions et des contraintes mécaniques, il apparaîtra des fissures et autres défauts. Si les couches d'oxydes plus épaisses s'écaillent, une nouvelle couche d'oxydes apparaît alors en dessous et il peut en résulter une perte d'épaisseur du métal.



Incinérateur avec
récupération d'énergie

Photo reproduite avec l'aimable autorisation de la Technical University of Denmark

« Il faut toujours tenir compte du coefficient de dilatation thermique »

Chapitre 3

Températures élevées

Comme les inox austénitiques ont un coefficient de dilatation supérieur à celui des ferritiques, dans les tests normalisés, ils se comportent mieux en service continu qu'en régime intermittent. Ceci est illustré dans le tableau 7 qui indique la température approximative d'apparition de calamine écaillante et les températures maxi conseillées à l'air libre en service continu et en service intermittent pour quelques nuances d'aciers inoxydables. Il est possible de trouver un certain nombre d'aciers inoxydables spéciaux présentant des propriétés d'oxydation optimisées. Le manganèse exerce un effet défavorable sur la résistance à l'oxydation et par conséquent l'usage des séries 200 est très limité dans températures élevées.



Histoire d'un exemple d'application : Désulfuration des gaz de cheminée.

Les systèmes de désulfuration des gaz de combustion est essentiel pour réduire la pollution des centrales à énergies fossiles. La corrosivité du milieu peut être très sévère. La gamme de matériaux utilisés va des alliages à fort nickel dans les milieux très agressifs, aux aciers inoxydables au nickel si le milieu est moins corrosif. Ces tubes vaporisateurs sont en acier inoxydable UNS N08367 à 24% de nickel et 6% de molybdène, sélectionné pour sa résistance à la corrosion et la facilité de mise en œuvre dans ces dimensions.

(photo) Source : Rolled Alloys

« Pour éviter que le métal se délite en poussière il faut utiliser des alliages spéciaux de nickel »

Tableau 7 Résistance à l'oxydation de quelques nuances standard						
Nuance	Température approximative d'écaillage		Température de service maximum dans l'air			
			Service continu		Service intermittent	
	°C	°F	°C	°F	°C	°F
403	700	1 300	700	1 300	820	1 500
430	825	1 500	820	1 500	870	1 600
446	1 100	2 000	1 100	2 000	1 175	2 150
304	900	1 650	925	1 700	870	1 600
309	1 065	1 950	1 000	1 850	1 000	1 850
310	1 150	2 100	1 150	2 100	1 040	1 900

La résistance d'un acier inoxydable à la carburation dépend de la nature de la couche protectrice d'oxydes et de sa teneur en nickel. Les environnements réducteurs à température élevée qui contiennent soit du monoxyde de carbone ou des hydrocarbures peuvent amener le carbone à se dissoudre dans le métal, engendrant une surface dure et fragile. La solubilité du carbone dans un acier inoxydable décroît à mesure que la teneur en nickel augmente. C'est pourquoi les alliages que l'on utilise dans des milieux très carburants sont soit les aciers inoxydables riches en nickel ou bien les alliages de nickel.

Le silicium contribue à améliorer la couche protectrice, c'est pourquoi l'alliage choisi sera riche en silicium. L'alliage 330 à 19% de chrome, 35% de nickel et 1,25% de silicium est couramment utilisé. Les aciers sans nickel ont une faible résistance à la carburation. Pour éviter que le métal ne devienne pulvérulent, ce que l'on appelle aussi « carburation catastrophique », une forme particulière de carburation, il faut recourir à des alliages de nickel spéciaux. En revanche le soufre, lorsqu'il est présent dans les gaz très chauds, peut être dommageable aux nuances à forte teneur en nickel, notamment dans un milieu naturellement réducteur. En général, il vaudra mieux choisir une nuance austénitique contenant moins de nickel ou, dans les cas sévères, une nuance ferritique riche en chrome. Dans ce genre de cas, il faut faire un compromis entre les différentes propriétés, et peu importe la nuance choisie.

Chapitre 4

Formage



Chapitre 4

Formage

« Il existe une large variété de procédés pour le formage des aciers inoxydables austénitiques »



Photo reproduite avec l'aimable autorisation d'Alessi

Formage à haute température. Les aptitudes au formage à haute température des aciers inoxydables austénitiques des séries 200 et 300 sont considérées comme excellentes lors des opérations par exemple de roulage à chaud, forgeage et extrusion. Le bas de la fourchette de températures pour ce type d'opérations se situe au démarrage quelque peu en-dessous de la température d'hypertrempe. Le tableau 8 indique des températures types de formage pour quelques nuances courantes d'aciers inoxydables austénitiques et quelques nuances duplex à rapprocher des températures d'hypertrempe. Ce sont là des fourchettes générales ; pour des opérations et des nuances plus spécifiques, ces données sont plus restrictives.

Comme les parties plus chaudes se déforment plus facilement que les parties froides, il est important que la température de la pièce soit uniforme. La plupart du temps, on fera subir aux pièces formées à chaud une hypertrempe pour remise en solution complète afin de s'assurer d'une résistance à la corrosion optimum. Un soin tout particulier devra être apporté pour le formage à chaud des nuances austénitiques très alliées telles que les aciers inoxydables à 6% de molybdène. Celles-ci sont sujettes à la fissuration à chaud pendant le forgeage et, lors de l'hypertrempe qu'elles subiront ultérieurement, le temps de maintien devra être adéquat afin d'éliminer les composés intermétalliques qui se seront formés pendant l'opération de formage à chaud. Les nuances duplex, alors qu'elles possèdent des caractéristiques plus élevées aux plus basses températures, sont en général assez molles aux températures de formage à chaud et de trempe ; aussi doivent-elles faire l'objet d'un soin particulier afin de s'assurer de leur stabilité dimensionnelle pendant ces opérations. Il faut se renseigner sur les données spécifiques propres à chaque nuance et des essais doivent être conduits à l'issue des opérations à chaud afin de s'assurer que le matériau possède bien les propriétés attendues de résistance à la corrosion.

Tableau 8
Fourchettes suggérées de températures de formage à chaud et comparaison aux températures de trempe pour remise en solution pour quelques nuances choisies d'aciers inoxydables duplex, séries 200, séries 300

Nuance	Température de formage à chaud		Température de mise en solution	
	°C	°F	°C	°F
Nuances standard Types 304, 305, 316, 321 etc.	1 200-925	2 200-1 700	1 040 min.	1 900 min.
Nuances réfractaires Types 309, 310	1 175-980	2 150-1 800	1 050 min.	1 925 min.
Nuances 6% Mo	1 200-980	2 200-1 800	1 150 min.	2 100 min.
201, 202, 204	1 200-925	2 200-1 700	1 000-1 120	1 850-2 050
S32205	1 230-950	2 250-1 750	1 040 min.	1 900 min.
S32750	1 230-1025	2 250-1 875	1 050-1 125	1 925-2 050

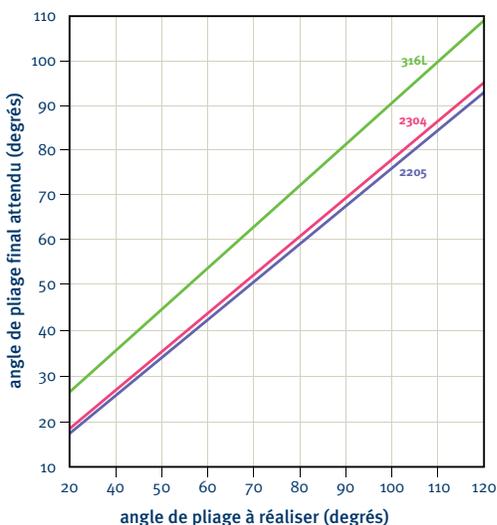
Formage à chaud. Il n'est pas inhabituel de chauffer une pièce en acier inoxydable austénitique pour faciliter sa mise en forme. Contrairement aux nuances ferritiques ou duplex, les austénitiques ne sont pas sujets au risque de fragilisation à 475°C mentionné au chapitre 3. Les nuances d'aciers austénitiques à bas carbone ou stabilisées peuvent supporter de brèves périodes à des températures allant jusqu'à 600°C (1100°F) sans effets dommageables sur leur résistance à la corrosion. Pour les duplex, éviter le formage à chaud au dessus de 300°C (575°F).

Formage à froid. Les aciers inoxydables austénitiques ont une ductilité remarquable. Un critère général d'acceptation est de pouvoir les plier à 180° avec un rayon de la moitié de l'épaisseur, indépendamment du sens de laminage. Cependant lors du formage des aciers inoxydables austénitiques écrouis, le sens du laminage est

important et les arêtes vives doivent être en travers du sens de laminage. Le rayon de pliage minimum doit être augmenté à mesure que l'écrouissage (résistance mécanique) augmente. Par exemple, une tôle type 304 1/2 dur de limite élastique 760 MPa (110 ksi) doit pouvoir être pliée sur un mandrin d'un rayon égal à son épaisseur. En général les aciers inoxydables duplex ne sont pas aussi ductiles que les austénitiques, mais présentent encore une bonne ductilité à l'état recuit. Il n'est pas d'usage d'utiliser des nuances duplex à l'état écroui, sauf en fil tréfilé.

La plupart des nuances duplex et les aciers inoxydables des séries 200 et 300 à plus hautes caractéristiques mécaniques peuvent être plus difficiles à former à froid, ceci en raison de leur plus haute limite élastique. Une pièce qui peut être proche de la limite de faisabilité en acier inoxydable série 300 peut présenter de grandes difficultés avec d'autres matériaux de même épaisseur mais plus résistants. En raison de l'écrouissage, il faut se préoccuper du retour élastique pour toutes les nuances austénitiques et duplex. En général, plus la dureté initiale est élevée, et plus le taux de formage est grand, plus le retour élastique est important. La figure 14 compare les caractéristiques de retour élastique au pliage d'un 316L hypertrempé et d'un duplex 2205. Dans ce cas le duplex réclame un sur-pliage plus important que l'austénitique. Pour réaliser un angle à 90°, le 316L doit être plié à 100°, tandis que le duplex, plus dur au départ, demande à être plié à 110°.

Figure 14 :
Comparaison des caractéristiques de retour élastique d'un 316L hypertrempé et de nuances duplex S32304 et S32205



« Le formage des nuances type 304 et de ses variantes devrait être considéré comme exceptionnel, si ce n'est qu'il est devenu pratique courante depuis de nombreuses années »

Le profilage est un moyen de fabrication très pratique et efficace de grandes longueurs de profils tels que des cornières ou des U avec tous types d'aciers inoxydables austénitiques ou duplex.

Emboutissage –rétreint et expansion. Les austénitiques, comme les ferritiques sont couramment transformés par emboutissage, rétreint et expansion. La combinaison d'une excellente ductilité et d'une grande capacité de durcissement par écrouissage qui est très caractéristique des aciers inoxydables austénitiques leur confère une aptitude au formage exceptionnelle en produits plats.

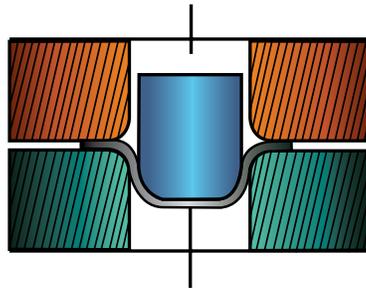
L'emboutissage ou l'emboutissage profond conduit à former un flan sans serrer le serre-flans. Le métal s'écoule dans le plan de la tôle en s'amincissant au minimum. En général on préférera pour des opérations de rétreint pur un matériau austénitique (par exemple type 304) qui présente un faible taux d'écrouissage. Le formage par expansion consiste à former la tôle à travers un poinçon en serrant fort les rebords du flan avec le serre-flans. Toute la déformation se fait par étirement avec amincissement correspondant de la feuille. Dans ce cas, on préférera une nuance type 301 qui présente un fort taux d'écrouissabilité, plus intéressant parce qu'il permet des emboutissages plus profonds. La technologie d'emboutissage des flans est complexe et, en pratique, dans la plupart des cas, le formage actuel résulte d'une combinaison de ces deux types d'emboutissage. L'état de surface, la séquence des opérations et la lubrification sont essentiels pour obtenir un aspect lisse et l'apparence d'une grande qualité qui sont propres aux aciers inoxydables austénitiques. Le formage des nuances type 304 et de ses variantes devrait être considéré comme exceptionnel, si ce n'est qu'il est devenu pratique courante depuis de nombreuses années. Même en tenant compte de la grande ductilité des aciers inoxydables austénitiques, dans des applications de formage extrêmes, il peut s'avérer nécessaire de prévoir des étapes intermédiaires de recuit pour restaurer la ductilité poursuivre l'emboutissage.

Chapitre 4

Formage

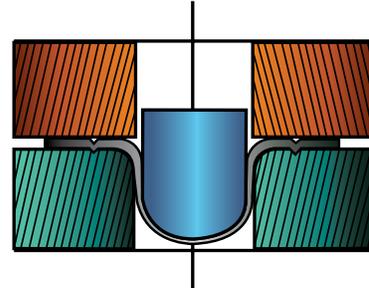
Emboutissage par rétreint

- le métal s'écoule librement dans la Matrice.
- la déformation du large disque à l'intérieur du cylindre étroit doit être alimentée par la déformation et non par l'épaisseur (= haute anisotropie « r »)



Emboutissage par expansion

- le métal est retenu par le serre-flan
- réduction très importante de l'épaisseur
- les taux d'allongement (A%) et de durcissement doivent être élevés

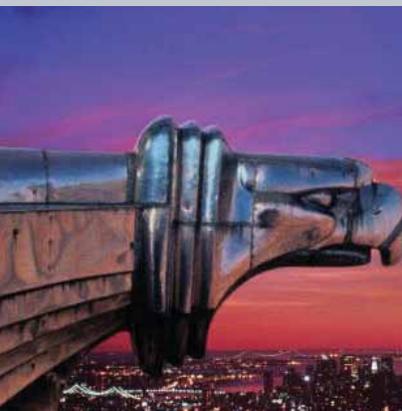


Source : http://www.euro-inox.org/fla_113_EN.html

L'emboutissage par rétreint ou expansion n'est pas courant pour les duplex. Pour obtenir de bons résultats les outillages et les matrices doivent être modifiés pour tenir compte d'une moindre ductilité et d'une résistance plus élevée.

Formage par fluotournage. Le fluotournage est une méthode de formage des produits plats en plaques ou en feuilles, largement utilisée pour fabriquer des pièces de révolution. Cette méthode convient bien pour la mise en forme des parties coniques, relativement difficiles à sortir par d'autres méthodes. La déformation de la feuille peut être importante, et des nuances à faible taux d'écrouissabilité type 305 peuvent présenter un avantage. Les nuances type 305 ont des teneurs en nickel et en chrome légèrement plus élevées, l'une et l'autre contribuant à réduire le taux d'écrouissabilité. Les nuances duplex sont également aptes au fluotournage mais avec des machines plus puissantes et probablement un plus grand nombre de recuits intermédiaires.

Frappe à froid. En produits longs, il est courant de fabriquer des têtes de vis, de boulons et de toutes autres fixations par des opérations d'estampage axial dans une matrice. Le matériau utilisé doit avoir une bonne ductilité, et s'il est un petit peu écrouissable, cela représentera un avantage. Les nuances type 305 ou un 18/8 avec du cuivre (qu'on appelle parfois type 302 HQ) sont souvent utilisées pour cette application. Certaines nuances d'aciers inoxydables de la série 200 présentant une faible écrouissabilité conviennent aussi pour la frappe à froid. Ce procédé s'est déjà pratiqué sur certaines nuances de duplex.



Photos reproduites avec l'aimable autorisation de Getty Images



Histoire d'un exemple d'application : les montres

« Nous sommes fiers de fabriquer une montre que les gens peuvent mettre le matin, puis mener toutes activités qui leur font plaisir, que ce soit la plongée sous-marine, le surf, le ski, ou le snowboard, et enfin sortir le soir sans avoir besoin d'enlever la montre de leur poignet. » dit Jimmy Olmes, fondateur de Reactor Watches en Californie.

Source : Reactor Watches

« Nous avons choisi le S31603 pour sa résistance à l'usure et à la corrosion, sa durabilité et sa robustesse et aussi parce que c'est aussi un matériau raisonnablement facile à usiner. Il est maintenant devenu la norme dans l'industrie des montres de sport ». Et, comme la plupart des aciers inoxydables, ses qualités de résistance à la corrosion signifient que son usage est approprié aux personnes qui seraient allergiques au nickel.

Chapitre 5

Assemblage



Chapitre 5

Assemblage

Soudage

Le nickel apporte une contribution majeure à la soudabilité de tous les types d'aciers inoxydables. Les nuances austénitiques ont une bonne nature, ce qui signifie qu'ils permettent d'obtenir de bons résultats, et reproductibles, même si les conditions sont difficiles. Lors du soudage des aciers inoxydables, quelle que soit la nuance, il convient de respecter quelques étapes, y compris la propreté et le nettoyage après soudage, afin de s'assurer d'une bonne qualité. Les aciers inoxydables sont souvent utilisés dans des applications rigoureuses, exigeant par exemple une bonne résistance à la corrosion et des caractéristiques mécaniques à haute température, si bien que les zones soudées ne doivent pas devenir le maillon faible. En général, plus une nuance est alliée, plus il faut prendre de soin et de précautions.

Les aciers inoxydables austénitiques. Ils ont, parmi leurs propriétés, celle de ne pas durcir par traitement thermique ni sous l'effet de la chaleur du soudage. Comme ils ne sont pas sensibles à la fragilisation par l'hydrogène, les aciers inoxydables austénitiques ne requièrent pas de traitement thermique pré- ou post-soudage. Ils sont faciles à souder à toutes épaisseurs. La propreté (absence d'huile, de graisses, d'eau, d'oxydes, etc.) est très importante.

Le soudage des aciers inoxydables austénitiques s'effectue au moyen de tous les procédés existant dans le commerce, à l'exception du chalumeau oxy-acétylénique qui est proscrit sur l'ensemble des aciers inoxydables. Les procédés les plus courants sont : le soudage à l'arc à électrode enrobée (procédé SMAW), à l'arc fusible sous gaz (procédé MIG ou MAG ou GMAW), à l'arc sous électrode réfractaire (procédé TIG ou GTAW), à l'arc sous flux solide (procédé SAW), à l'arc avec fil fourré (procédé FCAW), par points ou par résistance, au faisceau laser et au faisceau à électrons. Beaucoup d'aciers inoxydables austénitiques, mais pas tous, peuvent être soudés sans métal d'apport et sans traitement thermique supplémentaire. Pour la plupart des alliages super-austénitiques, il faut utiliser du métal d'apport afin d'avoir une bonne résistance à la corrosion du cordon de soudure. Normalement le métal soudé présente les mêmes caractéristiques mécaniques (rupture, limite élastique) que le métal de base hypereffort. La ductilité des soudures est en général moins bonne que celle du métal de base, mais elle demeure toutefois élevée. Pour une bonne tenue à la corrosion, on utilise des nuances et métal d'apport à bas carbone (nuances « L »). Pour les applications à haute température, un métal d'apport à plus fort carbone peut contribuer à améliorer les performances de résistance à haute température.

La composition de bon nombre de métaux d'apport de la série 300 est ajustée de façon qu'une certaine quantité de ferrite s'ajoute au produit de solidification pour éviter la fissuration à chaud pendant la phase de solidification. Ceci permet de travailler à des températures plus élevées et ainsi d'augmenter les vitesses de soudage. La présence d'un peu de ferrite implique que la zone soudée devienne un peu ferromagnétique. Ceux des alliages qui restent entièrement austénitiques, ou presque, à la solidification, demandent moins d'apport de chaleur. Si l'on souhaite, dans certaines applications, que le métal soudé présente une basse teneur en ferrite, il est possible de trouver du métal d'apport correspondant. Pour la plupart des aciers inoxydables de la série 300, le métal d'apport le mieux adapté est celui qui est le plus proche de la nuance de base, avec toutefois, à cette règle, les quelques exceptions suivantes :

- 1) Pour souder des nuances stabilisées au titane, il faut presque toujours utiliser du métal d'apport stabilisé au niobium, parce que le titane s'oxyde dans l'arc ; par exemple, pour souder du 321, il faut du métal d'apport en 347
- 2) Les aciers inoxydables à 6% de molybdène ou plus se soudent avec du métal d'apport du type Ni-Cr-Mo (par exemple, alliage 625 ou type « C »). Il existe quelques cas où les nuances ne contenant que 3% de molybdène se soudent avec du métal d'apport plus chargé en molybdène.



Photo reproduite avec l'aimable autorisation de Rafaël Vinoly Architects PC

« Les nuances austénitiques ont une bonne nature »

3) La plupart du temps, pour souder des séries 200, on utilise du métal d'apport de la série 300 avec la résistance appropriée, parce que plus facile à se procurer et d'une certaine manière plus facile à souder. Les séries 200 à forte teneur en azote peuvent perdre un peu d'azote pendant le soudage. Dans quelques applications il faut du métal d'apport en série 200 pour garantir certaines propriétés (mais habituellement à un coût plus élevé). Les métaux d'apport utilisés pour les nuances 304L et 316L sont de loin les plus faciles à se procurer.

4) Les aciers inoxydables austénitiques à haute usinabilité comme les 303 contiennent de fortes teneurs en soufre et sont considérés en général comme non soudables. En cas d'absolue nécessité, les petits soudages se feront en utilisant un métal d'apport 312, et même dans ce cas il pourra apparaître de petites fissures qui ne supporteront pas beaucoup d'efforts. En général, il vaut mieux éviter de souder cette nuance.

Les métaux austénitiques de base ont en général d'excellentes propriétés cryogéniques. Par exemple le code ASME Boiler and Pressure Vessels (chaudières et appareils à pression) n'exige pas de test de choc à basse température sur les nuances d'aciers inoxydables austénitiques laminés tels que 304, 304L et 316L, pour des températures pouvant descendre jusqu'à -254°C (-450°F). Cependant les pièces de fonderie et les métaux soudés doivent être éprouvés du fait qu'ils contiennent un peu de ferrite qui provoque de la fragilisation à basse température. Certains procédés de soudage et/ou certains métaux d'apport peuvent être prescrits pour satisfaire les exigences de résistance aux chocs à basse température.

Lorsque l'on soude des métaux dissemblables entre eux comme par exemple le 304L avec le 316L, il faut utiliser du métal d'apport austénitique. Le choix de la nuance dépend des propriétés recherchées du métal soudé, le plus souvent la résistance à la corrosion. Pour souder de l'acier au carbone, de l'acier ferritique, martensitique ou à durcissement structural avec un acier inoxydable austénitique, là encore on utilisera le plus souvent un métal d'apport austénitique. De même, il faut bien connaître les propriétés après soudage que l'on veut obtenir avant de choisir le métal d'apport. C'est dans ce but qu'il existe des métaux d'apport comme le 309L, 309MoL et le 312 qui tous engendrent des teneurs en ferrite plus élevées que les nuances standard, à condition d'être plus indulgents sur certaines impuretés et des différences de dilatation thermique.

Pour de plus amples informations sur le soudage des aciers inoxydables austénitiques, nous conseillons de vous reporter à la brochure du Nickel Institute n°11007, « *guidelines for the welded fabrication of nickel-containing stainless steels for resistant corrosion service* » (*guide de soudage des aciers austénitiques au nickel pour résistance à la corrosion*)

Aciers inoxydables duplex. La composition de base de la plupart des aciers inoxydables duplex est contrôlée et ils subissent un traitement thermique contrôlé qui leur donne un taux de ferrite entre 40 et 55% pour faire la balance avec la phase austénitique. Lors des opérations de soudage, les vitesses de chauffage et de refroidissement sont moins maîtrisées ce qui peut engendrer un taux de ferrite plus élevé. Il est important d'éviter des conditions de soudage conduisant à un taux de ferrite de 65 -70% soit dans le cordon de soudure, soit dans la zone affectée thermiquement par la soudure (ZAT) qui pourraient avoir des effets très défavorables sur la résistance à la corrosion ou sur les propriétés mécaniques.

Pour des raisons similaires la plupart des spécifications vont prescrire un taux de ferrite minimum de 25 ou 30%, bien que cela ne porte pas à des conséquences trop graves. Afin d'éviter des taux de ferrite élevés, la plupart des métaux d'apport pour duplex contiennent 2% à 3% de nickel de plus que le métal de base. En général, il faut éviter le soudage sans métal d'apport. Dans le cas d'un « lean duplex » (duplex peu allié) à environ 1,5% de nickel, le métal d'apport contient environ 6 à 7% de nickel supplémentaire pour garantir des propriétés correctes de la zone soudée. Un traitement thermique approprié des soudures duplex permet souvent de ramener la teneur en ferrite à des niveaux acceptables ; en conséquence, les pièces moulées, les tubes et raccords soudés peuvent être soudés avec du métal d'apport sans nickel élevé ou même sans aucun métal d'apport.



Photo reproduite avec l'aimable autorisation du Nickel Institute

« La plupart des métaux d'apport pour les nuances duplex contiennent 2 à 3% de nickel de plus que le métal de base »

Chapitre 5

Assemblage



Photo reproduite avec l'aimable autorisation de : Photos.com

Normalement les aciers inoxydables duplex se soudent sans préchauffage ni traitement thermique après soudage. Pour souder des aciers inoxydables duplex avec des austénitiques, on utilisera indifféremment du métal d'apport duplex ou austénitique. Dans ce dernier cas, la soudure sera plus molle que la base métallique duplex mais plus résistante qu'une base métallique austénitique. Pour souder des duplex sur des aciers au carbone, on utilisera en métal d'apport soit la nuance austénitique la plus riche en ferrite (309L ou 309MoL) soit une nuance duplex. Lors du soudage de métaux de nature différente – acier au carbone plus résistant ou aciers faiblement alliés- il faudra procéder à un préchauffage et un traitement thermique du métal après soudage du métal non inoxydable, ce qui peut avoir une incidence sur l'acier inoxydable duplex. Dans ce cas, il est préférable de demander conseil à un expert.

Les aciers inoxydables duplex, et en particulier les plus alliés, utilisés dans les environnements sévères, sont soumis à d'autres étapes ultérieures pour s'assurer que la soudure répondra bien aux attentes de résistance à la corrosion et de caractéristiques mécaniques. On pourra trouver de plus amples informations sur le soudage des duplex dans la publication de l'IMOA « *practical guidelines for the fabrication of duplex Stainless steels* » (publication du Nickel Institute n° 16000)

Aciers inoxydables ferritiques. Les nuances d'aciers inoxydables ferritiques à 10,5 -12%, qui en principe ne subissent pas de traitement thermique pour améliorer leur résistance mécanique, se soudent la plupart du temps sans métal d'apport ou bien avec du métal d'apport de même nature mais, lui, souvent stabilisé. Lorsque l'on veut être sûr de trouver du métal d'apport, il est également possible d'utiliser de l'austénitique type 308L. Parmi les métaux de base ferritiques soudables, certains contiennent du nickel ajouté qui permet de mieux contrôler la taille du grain à la fois pendant l'élaboration des plus fortes épaisseurs et pendant le soudage. En fait ce ne sont pas véritablement des aciers inoxydables ferritiques, et il vaut mieux les appeler « alliages ferritiques martensitiques ». On les soude en général avec un 309L ou occasionnellement avec d'autres métaux d'apport austénitiques.

Aciers inoxydables martensitiques et à durcissement structural (PH). Ces matériaux ne sont pas spécialement évidents à souder. Si l'on souhaite que la partie soudée soit aussi résistante que le métal de base, il faut alors utiliser du métal d'apport qui puisse subir le même traitement thermique que le métal de base, ce qui, la plupart du temps, n'est pas le cas et l'on utilise alors en métal d'apport soit de l'acier inoxydable austénitique soit un alliage de nickel. Au final, les soudures seront moins résistantes que le métal de base mais bien ductiles. Avec les nuances martensitiques, il faut faire un préchauffage avant soudage et un traitement thermique post soudage, tandis qu'avec les nuances à durcissement structural, ceci n'est nécessaire que pour les plus fortes épaisseurs.

Nettoyage après soudage

Comme tous les aciers inoxydables tirent leurs propriétés de résistance à la corrosion de la couche protectrice d'oxydes, il est fondamental de procéder à un nettoyage après soudage adapté à l'utilisation finale. Les détails de ces opérations figurent dans la publication du Nickel Institute n° 10004.

Autres procédés d'assemblage

Parmi les autres procédés d'assemblage on trouve le brasage fort et le brasage tendre, de même que les méthodes d'assemblage mécanique mentionnées ci-dessous.

Brasage dur. Il est courant d'assembler les aciers inoxydables austénitiques par brasage dur. Les alliages de brasure à base d'argent sont les plus répandus bien qu'assez chers. Ils sont faciles à utiliser à assez basse température et en conservant une bonne résistance à la corrosion. Les métaux d'apport de brasage au nickel et certains avec du chrome, présentent une meilleure résistance à la corrosion, mais se brasent à plus haute température. Pour des applications spéciales, on utilise du métal d'apport de brasage à base de cuivre et d'or. Avant de choisir un métal, il faut bien prendre en considération l'utilisation qui en sera faite vis-à-vis des caractéristiques mécaniques, de la résistance à la corrosion, de l'incidence de la température de brasage sur le métal de base, et d'une possible interaction préjudiciable entre le métal de brasage et le métal de base.

Brasage tendre. Tous les aciers inoxydables ont une bonne aptitude au brasage tendre, à l'exception des nuances stabilisées au titane qui peuvent poser problème. Habituellement on utilise pour le brasage tendre de l'étain plomb ou de l'étain argent. Il est important que la couche d'oxyde protectrice soit enlevée par le flux de brasage. Toutes les soudures ont une résistance à la corrosion et des caractéristiques mécaniques sensiblement inférieures à celles de métaux de base.

Assemblages mécaniques. Les assemblages mécaniques obtenus par boulonnage, vissage, rivetage, clinchage, agrafage et collage sont tous d'usage courant pour les aciers inoxydables. En règle générale, tous ces assemblages présenteront des caractéristiques mécaniques plus faibles que les assemblages obtenus par soudage. Il existe des risques d'apparition de corrosion caverneuse dans les interstices ainsi formés. Les assemblages mécaniques en acier inoxydable des systèmes de distribution d'eau potable à l'intérieur des constructions (press fittings) sont en général sûrs et compétitifs. Il ne faut pas oublier la corrosion galvanique qui implique des métaux différents et même des alliages en acier inoxydable très éloignés. Par exemple des fixations en aluminium et en acier galvanisé sont moins nobles que l'acier inoxydable et peuvent démarrer très rapidement une corrosion, et ce d'autant plus que le rapport de surface par rapport à l'inox est plus faible.

« Il est courant d'assembler les aciers inoxydables austénitiques par brasage »

Références et correspondances des métaux d'apport mentionnés dans ce chapitre

AWS (A5.4)	EN (1600)
308L	19 9 L
309L	23 12 L
309MoL	23 12 2 L
312	29 9
316L	19 12 2 L

Chapitre 6

Le nickel, matériau durable



Chapitre 6

Le nickel, matériau durable

Les précédents chapitres avaient trait aux aspects métallurgiques en rapport avec les exigences de conception et la performance. Le présent chapitre met en évidence des aspects élargis de ces attributs sous l'angle de la durabilité.

Les individus, comme les sociétés, investissent dans des produits et des systèmes qui satisfont leurs besoins. Dans notre époque complexe, les besoins sont multiples et croissants et peuvent en général être satisfaits de différentes façons. Le coût des ressources nécessaires, y compris les conséquences de leur approvisionnement, met à l'épreuve les capacités de la planète à fournir. Les matériaux qui peuvent réduire l'intensité de consommation deviennent vitaux et ici le nickel apporte sa contribution.

Il est essentiel qu'un matériau soit utilisé efficacement. Le luxe qui consiste à répondre aux besoins de façon grossière et approximative- ce qui veut dire gaspiller une grande quantité de matière et d'énergie- ne peut plus durer. Lorsque dans un acier inoxydable on utilise de petites quantités de nickel, très souvent cela permet de réduire les besoins en matière et en énergie et ouvre la voie à des solutions plus légères, plus chaleureuses, plus efficaces, plus élégantes pour répondre aux besoins de la société. La présence ou l'absence de nickel est, de bien des façons, une mesure de l'éco-efficacité où c'est la présence de nickel qui permet de faire la bonne différence.

Il ne sera présenté ici que quelques exemples, mais cependant représentatifs de milliers d'autres exemples.

Construire une infrastructure durable

Résistance mécanique. Si quelque chose – une partie d'une infrastructure, une partie d'équipement – peut remplir la même fonction avec moins de matière, c'est un progrès. Du fait de leur résistance mécanique couplée à leur résistance à la corrosion, les armatures pour béton armé contenant du nickel peuvent être de plus faible diamètre tout en supportant les mêmes charges. Comme on diminue le poids d'acier dans la structure, on peut dans les mêmes proportions réduire la quantité de béton pour construire les piles. Dans cet exemple, la présence d'une petite quantité de nickel permet de diminuer significativement la quantité de ferrailage, de ciment et d'agrégats tout en remplissant la même fonction.

Meilleure résistance à la corrosion. Dans les régions climatiques et géographiques lourdement industrialisées ou avec beaucoup de sel, l'ajout d'une petite quantité de nickel permettra de diminuer énormément la consommation de ressources sur l'ensemble du cycle de vie de la structure ou du produit. Dans de nombreux cas, cela démultipliera la durée de vie du produit (et sans interruption du service). Cela peut aussi – mais en fonction du produit ou de la fonction- supprimer tous besoins de maintenance régulière ou de réhabilitation : pas de peinture, pas de réparation coûteuse d'épaufrures du béton dues à la corrosion des armatures, pas de temps perdu pour les usagers (sans gaspillage de gasoil) et / ou de déviations (avec accroissement de la consommation de gasoil). De surcroît l'enrobage (épaisseur de béton et d'asphalte) nécessaire à la protection des armatures contre les attaques de corrosion est diminué. Moins de béton et d'asphalte signifie moindre poids à supporter, et la possibilité d'avoir des piles et des poutres plus légères eux-mêmes fabriqués avec moins de matériaux. Ce cercle vertueux résulte de l'utilisation d'aciers inoxydables contenant du nickel.

Durabilité. Les analyses indicatives démontrent que la consommation de matériaux d'un pont ou d'une passerelle sur la totalité de son cycle de vie peut être réduite de 50% grâce à l'utilisation d'aciers inoxydables au nickel. Les éléments qui entrent dans cette estimation prennent en compte la quantité d'énergie associée à la production,

« Si quelque chose peut rendre le même service avec moins de matière, c'est une avancée »

« La consommation de matériaux d'un pont sur l'ensemble de son cycle de vie peut être diminuée de 50% »

Chapitre 6

Le nickel, matériau durable

l'utilisation et l'élimination des matières allant de la peinture à l'asphalte et le plus fort pourcentage de matériaux récupérés et recyclés en fin de vie parce que les aciers inoxydables qui contiennent du nickel auront conservé toute leur qualité et leur valeur. Voici donc un matériau (ainsi que des ressources financières et du travail) qui peut combler d'autres besoins de la société tout en diminuant l'impact environnemental de la structure.

Améliorer l'efficacité énergétique de la structure

Réfectivité. Garder la chaleur à l'intérieur des habitations l'hiver quand il fait froid et l'empêcher de rentrer l'été constitue un défi. Habituellement on y parvient au moyen de l'énergie : énergie pour chauffer, énergie pour refroidir, tout cela n'étant pas sans incidence sur le changement climatique. Il vaut mieux une conception intelligente. On peut faire des toitures en acier inoxydable durable avec des finitions de surface et des pentes appropriées pour obtenir un meilleur bilan thermique. Il en résulte une moindre utilisation de matériaux –les toitures durent aussi longtemps que le bâtiment avant d'être recyclées à des taux approchant 100%– et une moindre consommation d'énergie.



Photo : centre des congrès de Pittsburgh

Photo reproduite avec l'aimable autorisation de Rafael Vinoly Architects PC

Résistance à la corrosion améliorée. L'apport évident des murs rideaux et des toitures a déjà été traité.

Il existe cependant de nombreuses petites applications, qui utilisent peu de matière et qui contribuent significativement à l'amélioration de l'efficacité énergétique. Exemple : les chaudières à gaz à condensation. Ce sont actuellement les chaudières les plus éco-énergétiques du marché, avec des rendements approchant 90%, une performance rendue possible grâce à des échangeurs de chaleur en acier inoxydable contenant du nickel. Dans la partie échangeur, les gaz de combustion sont refroidis jusqu'à la température de condensation de l'eau générant ainsi un apport de chaleur supplémentaire dans le bâtiment.

« La couverture en acier inoxydable permet un meilleur équilibre thermique »

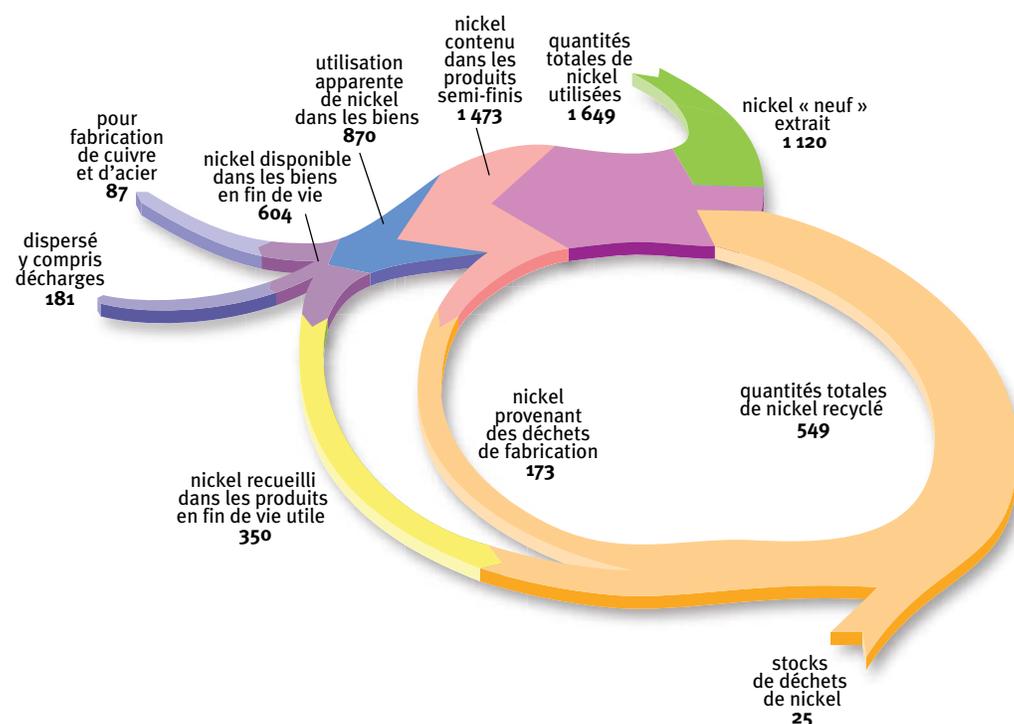
Recyclage en fin de cycle de vie

Presque tous les matériaux peuvent être recyclés. Les différences tournent autour de la quantité d'effort –y compris d'énergie- nécessaire à l'accomplissement du recyclage et de la qualité du matériau recyclé. Sous cet angle, les métaux sont performants et les aciers inoxydables contenant du nickel sont excellents pour le recyclage. Les déchets qui contiennent du nickel ont une valeur économique significative ; ils sous tendent une vaste industrie de collecte et de retraitement des déchets, et contribuent à la production continue et le développement de « nouveaux » aciers inoxydables contenant environ 60% de matière recyclée qui conservent intégralement leur qualité.

Le chiffre de 60% de matière recyclée contenue dans les nuances courantes ne correspond pas à une limite métallurgique. La contrainte est liée à la disponibilité. L'accroissement de la demande en aciers inoxydables, combinée à la longévité des équipements qui contiennent des aciers inoxydables, crée une insuffisance de ferrailles. Il n'existe aucune raison métallurgique pour que la quantité de produits recyclés contenus dans les aciers inoxydables au nickel n'approche pas les 100%.

Le recyclage conserve très bien les ressources naturelles, mais il fait plus que cela. Il réduit les besoins en énergie de 33% et les émissions de CO₂ de 32% par tonne. A mesure que la proportion de déchets récupérés par rapport aux matériaux neufs entrant dans la production d'aciers inoxydables s'accroît, les économies potentielles peuvent atteindre 67% pour l'énergie et 70% pour le CO₂ (Yale').

Stocks et flux de nickel pour l'année 2000, en milliers de tonnes métriques



« Le recyclage réduit les besoins en énergie de 33% et les émissions de CO₂ de 32% par tonne » »

Une grande partie des réserves de nickel sont actuellement en cours d'utilisation, intégrées dans des structures durables, des moteurs ou des tuyauteries et remplit son office à l'intérieur le cycle de vie des produits.

Source : Yale University, 2008

¹Johnson, J. and al, *The energy benefit of stainless steel recycling*, Energy Policy. Vol. 36, Issue 1, jan. 2008, p181ff.

Chapitre 6

Le nickel, matériau durable

Une production et une utilisation responsables

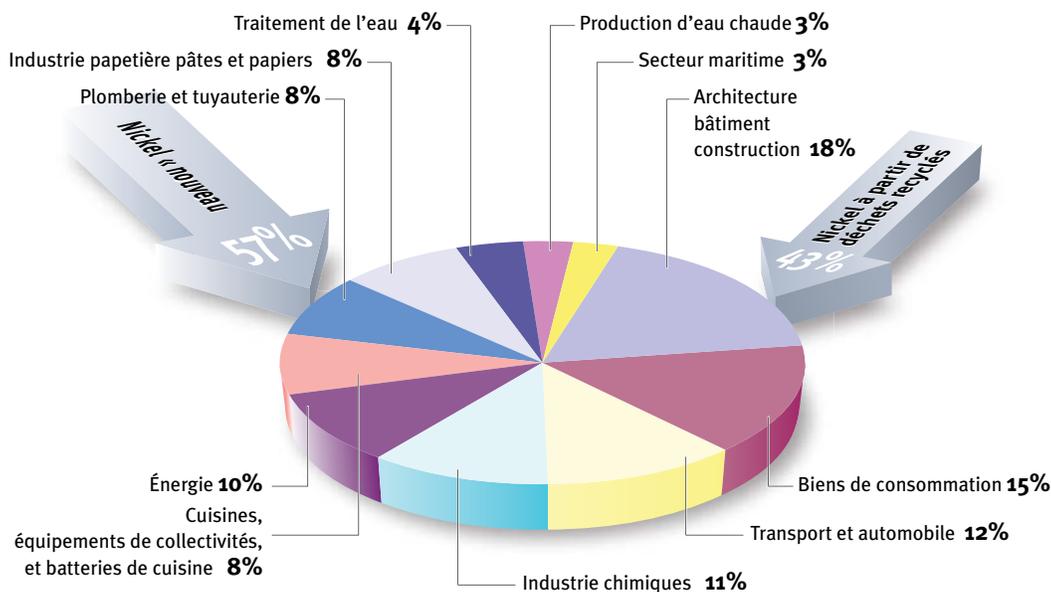
L'industrie de production du nickel et la chaîne de valorisation qui ainsi soutient directement l'éco-utilisation des matériaux et d'énergie est globale. L'industrie primaire du nickel est présente et active dans toutes les zones climatiques et géographiques du globe et apporte sa contribution aux économies des pays quel que soit leur stade de développement.

Les dirigeants de l'industrie de production du nickel sont engagés à suivre un comportement responsable dans toutes les opérations. Peut-être, en soi, cela peut passer inaperçu, mais l'industrie du nickel va au-delà en impliquant à ses côtés la chaîne de transformation pour transférer les technologies et les techniques, optimiser les rendements, pour améliorer les normes et performances de santé au travail, accroître le recyclage et soutenir la recherche scientifique fondamentale sur la santé et l'environnement.

Cet engagement est codifié dans la charte du Développement Durable du Nickel Institute (Nickel Institute Sustainability Charter) et acté à travers un programme formel de pilotage des produits et matériaux et par son adhésion au Conseil International des Mines et Métaux (ICMM).

Pour résumer, il y a de nombreuses raisons d'utiliser les avantages du nickel comme solution technique face aux défis lancés par l'ingénierie et l'architecture. Dans le même temps, les différentes formes de contribution du nickel au développement durable et à l'atténuation des changements climatiques sont en train d'être optimisées et le nickel lui-même est maîtrisé tout au long de son cycle de vie de façon responsable par l'ensemble de la chaîne de valorisation, à commencer par l'industrie primaire elle-même.

Utilisations finales du nickel



Le nickel est utilisé dans une vaste panoplie d'applications. L'architecture, les biens de consommation, le matériel de transport et les industries chimiques consomment à eux seuls plus de 50% de production totale de nickel.

Source : Pariser, 2007.

« Sur le plan métallurgique, il n'y a aucune raison pour que la proportion de nickel recyclé dans les aciers inoxydables n'approche pas 100% »

Sources d'information sur les aciers inoxydables contenant du nickel

Il existe de nombreuses sources d'information disponibles sur les aciers inoxydables, y compris ceux qui contiennent du nickel ; elles contiennent des informations plus détaillées que le contenu de cette brochure. En voici quelques-unes :

Nickel Institute : vérifiez le catalogue des dernières publications disponibles ou notre site internet www.nickelinstitute.org qui, en plus des inox, vous informe sur les alliages de nickel, les fontes et aciers avec du nickel et le nickelage. En outre le Nickel Magazine présente de nombreux articles sur l'utilisation du nickel ; les nombreux numéros publiés antérieurement sont en archives dans notre site web. Parmi les publications particulièrement populaires et pertinentes sur le sujet des aciers inoxydables, on trouve :

N° de la publication	Titre
14056	Stainless Steels: An Introduction to their Metallurgy and Corrosion Resistance
11021	High Performance Stainless Steels
11022	Castings - Stainless Steel and Nickel-base
2980	Engineering Properties of Austenitic Chromium-Nickel Stainless Steel at Elevated Temperatures
9004	High Temperature Characteristics of Stainless Steels
313	Austenitic Chromium-Nickel Stainless Steel at Subzero Temperatures
11023	Timeless Stainless Architecture
11024	Stainless Steels in Architecture, Building and Construction
10087	Stainless Steel for Potable Water Treatment Plants
10076	Stainless Steel in Municipal Waste Water Treatment Plants
12010	Stainless Steel in Swimming Pool Buildings
11003	Nickel Stainless Steels for Marine Environments, Natural Waters and Brines
11025	Stainless Steels and Specialty Alloys for Modern Pulp and Paper Mills
10057	Selection and Performance of Stainless Steels and other Nickel-bearing alloys in Sulphuric Acid
10075	Selection and Use of Stainless Steels and Nickel-bearing alloys in Nitric Acid
10063	Selection and Use of Stainless Steels and Nickel-bearing alloys in Organic Acids
10020	Alloys to Resist Chlorine, Hydrogen Chloride and Hydrochloric Acid
10015	Alloy Selection in Wet-Process Phosphoric Acid Plants
10074	Nickel-containing alloys in Hydrofluoric Acid, Hydrogen Fluoride, and Fluorine
10019	Alloy Selection for Caustic Soda Service
10071	Wrought and Cast Heat Resistant Stainless Steels and Nickel Alloys for the Refining and Petrochemical Industries
10073	Corrosion Resistant Alloys in the Oil and gas Industry
14054	Alloys for Marine Fasteners
11007	Guidelines for the Welded Fabrication of Nickel-containing Stainless Steels for Corrosion Resistant Applications
16000	Practical Guidelines for the Fabrication of Duplex Stainless Steels(Publ. by IMOA)
11026	Fabricating Stainless Steels for the Water Industry
10004	Fabrication and Post-fabrication Cleanup of Stainless Steels
10068	Specifying Stainless Steel Surface Treatment

Annexe

ISSF (*International Stainless Steel Forum*) – www.worldstainless.org

Leur site web délivre des informations sur la production et l'utilisation des aciers inoxydables y compris sur les questions de santé et d'environnement. Il offre également un cours de spécialisation sur les aciers inoxydables. Liens avec d'autres sites.

De nombreux pays et régions possèdent leur propre organisation dédiée à la bonne utilisation des aciers inoxydables. Les principaux organismes de langue anglaise sont :

Euro-Inox (*European Stainless Steel Development Association*) – www.euro-inox.org

Excellentes publications traduites dans de nombreuses langues européennes. Les membres sont les différentes associations nationales de développement de l'inox, y compris BSSA (British Stainless Steel Association) www.bssa.org

SSINA (*Specialty Steel Industry of North America*) – www.ssina.com

ASSDA (*Australian Stainless Steel Development Association*) – www.assda.asn.org

NZSSA (*New Zealand Stainless Steel Development Association*) – www.hera.org/nz/nzssda/

ISSDA (*Indian Stainless Steel Development Association*) www.stainlessindia.org

SASSDA (*South African Stainless Steel Development Association*) – www.sassda.co.za

Parmi les autres associations de développement de l'inox, on trouve:

Brésil – www.nucleoinox.org.br

Chine – www.cssc.org.cn

Japon – www.jssa.gr.jp

Mexique – www.cendi.org.mx

Thaïlande – www.tssda.org

Autres associations :

IMOA (*International Molybdenum Association*) – www.imoa.info/

ICDA (*International Chromium Development Association*) – www.icdachromium.com

Composition des alliages cités dans cette publication

Valeurs caractéristiques en % du poids sauf autres indications

UNS	AISI ou désignation habituelle	Nuance EN (approchée)	C (max)	Cr	Ni	Mo	Autres
Austénitiques série 300							
S30100	301	1,4310	0,15	17	7	-	-
S30200	302	1,4319	0,15	18	9	-	-
S30430	302HQ	1,4567	0,10	18	9	-	Cu
S30300	303	1,4305	0,15	18	9	-	S
S30400	304	1,4301	0,08	19	9	-	-
S30403	304L	1,4301	0,03	19	9	-	-
S30409	304H	1,4948	0,10 max. 0,04 min.	19	9	-	-
S30500	305	1,4303	0,12	18	12	-	-
S30900	309	1,4833	0,20	23	13	-	-
S31000	310	1,4841	0,25	25	20	-	-
S31600	316	1,4401	0,08	17	11	2,2	-
S31603	316L	1,4404	0,03	17	11	2,2	-
S31635	316Ti	1,4571	0,03	17	11	2,2	Ti
S31703	317L	1,4438	0,03	19	12	3,2	-
S31726	317LMN	1,4439	0,03	19	15	4,2	N
S32100	321	1,4541	0,08	18	10	-	Ti
S34700	347	1,4550	0,08	18	10	-	Nb
S31254	-	1,4547	0,02	20	18	6,2	N, Cu
S32053	-	-	0,03	23	25	5,5	N
S32654	-	1,4652	0,02	24	22	7,2	N, Cu, Mn
S34565	-	1,4565	0,03	24	17	4,5	N, Mn
N08020	Alliage 20	2,4660	0,06	20	34	2,5	Cu, Nb
N08028	Alliage 28	1,4877	0,03	27	32	3,5	Cu
N08330	330	1,4864	0,08	18	35	-	Si
N08904	904L	1,4539	0,02	20	25	4,5	Cu
Austénitiques série 200							
S20100	201	1,4372	0,15	17	4,5	-	Mn
S20153	201LN	-	0,03	17	4,5	-	Mn, N
S20200	202	1,4373	0,15	18	5	-	Mn
duplex							
S32101	2101	1,4162	0,03	21	1,5	-	Mn, N
S32304	2304	1,4362	0,03	23	4	0,2	N
S32205	2205	1,4462	0,03	22,5	5,5	3,2	N
S32506	-	-	0,03	25	6,5	3,3	N, W
S32750	2507	1,4410	0,03	25	7	4	N
Ferritiques série 400							
S40900	409	1,4512	0,08	11	-	-	Ti
S43000	430	1,4016	0,12	17	-	-	-
S44600	446	1,4749	0,20	25	-	-	-
S44800	29-4-2	-	0,010	29	2,2	4	-
Martensitiques série 400							
S41003	-	1,4003	0,03	11	0,5	-	-
S41000	410	1,4006	0,15	12	-	-	-
J91450	CA6NM	1,4317	0,06	13	4	0,7	-
Autres types							
S17400	630/17-4PH	1,4542	0,03	17	4	-	Cu, Nb

Bureaux du *Nickel Institute* à travers le monde

Siège social du Nickel Institute

Brookfield Place
2700-161 Bay Street
Toronto, Ontario (Canada) M5J 2S1
Téléphone : + 1 416 591 7999
ni_toronto@nickelinstitute.org

Nickel Institute – Chine

Room 677-678, Poly Plaza Office Building
14 Dongzhimen Nandajie
Beijing (Chine) 100027
Téléphone : + 86 10 6553 3060
Télécopieur : + 86 10 6501 0261
ni_china@nickelinstitute.org
info@ni-china.org

Nickel Institute – Bruxelles

8e étage
Avenue des Arts 14
1210 Bruxelles, Belgique
Téléphone : + 32 2 290 3200
Télécopieur : + 32 2 290 3220
brussels@nickelinstitute.org

Nickel Institute – Japon

Shimbashi Sumitomo Bldg. 1F
5-11-3, Shimbashi, Minato
Tokyo (Japon) 105-8716
Téléphone : + 81 3 3436 7953
Télécopieur : + 81 3 3436 2132
ni_japan@nickelinstitute.org

Nickel Producers Environmental Research Association (NiPERA)

2525 Meridian Parkway, Suite 240
Durham, North Carolina (États-Unis) 27713
Téléphone : + 1 919 595 1947
Télécopieur : + 919 595 1955
info@nipera.org

Nickel
An Element of Quality



