

Aciers inoxydables

Mise en œuvre

par **Pierre-Jean CUNAT**
Directeur Technique EURO-INOX

1. Coupe-découpage	M 4 542	- 2
1.1 Cisaillage	—	2
1.2 Refendage	—	2
1.3 Découpage des flans	—	2
1.4 Grignotage	—	3
1.5 Poinçonnage	—	3
1.6 Sciage	—	4
1.7 Découpage au jet d'eau	—	4
1.8 Coupe thermique	—	4
2. Usinage	—	5
2.1 Introduction	—	5
2.2 Critères d'usinabilité	—	5
2.3 Comportement des différentes familles d'aciers inoxydables	—	5
2.4 Rôle des inclusions non métalliques	—	6
2.5 Choix des outils	—	6
2.6 Tournage ou chariotage	—	6
2.7 Perçage	—	6
2.8 Alésage	—	7
2.9 Fraisage	—	7
2.10 Taraudage	—	7
2.11 Filetage	—	7
3. Mise en forme par déformation plastique à froid	—	7
3.1 Emboutissage des produits plats	—	7
3.2 Frappe à froid des produits longs	—	11
4. Mise en forme par déformation à chaud	—	12
4.1 Formage à chaud des aciers martensitiques et ferritiques	—	12
4.2 Formage à chaud des aciers austénitiques	—	12
4.3 Formage à chaud des aciers austéno-ferritiques	—	12
5. Assemblage	—	12
5.1 Soudage	—	13
5.2 Brasages fort et tendre	—	20
5.3 Collage	—	21
5.4 Assemblages mécaniques	—	22
6. Traitement thermique	—	23
7. Traitements de finition	—	24
7.1 Décapage	—	24
7.2 Passivation	—	24
7.3 Décontamination	—	24
Pour en savoir plus	Doc. M 4 544	

Les propriétés intrinsèques d'un « matériau », la « conception » d'une pièce ou d'un ensemble complexe ainsi que la manière dont le matériau est « mis en œuvre » jouent un rôle fondamental sur les « performances » de la pièce ou de l'ensemble fini. C'est ce que schématise le diagramme de la figure **A**.

L'enchaînement « matériau », « conception », « mise en œuvre » conduisant à la réalisation de l'objet final ne doit pas être appréhendé comme un processus linéaire mais comme un processus interactif entre les trois différentes composantes. Les caractéristiques métalliques et mécaniques vont largement influencer les techniques de mise en œuvre (emboutissage, usinage, etc.) tandis que la résistance à la corrosion est plutôt en relation avec les propriétés d'usage. Quant à la conception, elle aura non seulement une influence directe sur les propriétés d'usage, mais également sur la résistance à certaines formes de corrosion.

L'étude complète du sujet comprend les articles :

- M 4 540 – Aciers inoxydables. Critères de choix et structure ;
- M 4 541 – Aciers inoxydables. Propriétés. Résistance à la corrosion ;
- M 4 542 – Aciers inoxydables. Mise en œuvre (le présent article) ;
- M 4 543 – Aciers inoxydables. Fabrication ;
- Doc. M 4 544 – Aciers inoxydables.

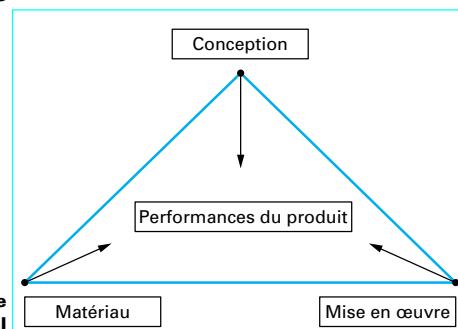


Figure A – Paramètres à prendre en compte pour optimiser les performances du produit final

1. Coupe-découpage

On entend par coupe-découpage l'ensemble des opérations destinées à produire des éléments destinés à être formés puis à être assemblés pour réaliser un appareil ou un ensemble plus complexe. En général, le terme découpage désigne les opérations effectuées mécaniquement (cisaillage, poinçonnage, sciage, etc.) alors que le terme coupe est relatif à des opérations de coupe thermique (plasma, laser, etc.).

1.1 Cisaillage

■ Cisaillage à la guillotine (figure 1)

Le cisaillage consiste généralement à découper des feuilles pour obtenir des flans de dimensions plus petites ou à découper une bobine dans le sens travers pour la transformer en feuilles. Avec les aciers inoxydables austénitiques, l'épaisseur maximale admissible est, pour une machine donnée, égale à 70 % de l'épaisseur maximale prévue pour l'acier doux. Le jeu entre les lames doit être d'environ 4 à 7 % de l'épaisseur des tôles avec une tolérance de $\pm 0,01$ mm. Pour les tôles de 1,5 mm d'épaisseur, le jeu recommandé est de 0,07 mm. Pour les épaisseurs supérieures à 1,5 mm, on préconise généralement un jeu de l'ordre de 0,1 mm. L'angle de coupe ou angle de cisaillage peut varier de $0^{\circ}30'$ à 2° , la valeur $1^{\circ}30'$ étant fréquemment utilisée. Les matériaux recommandés pour les lames sont les aciers à outil à l'état trempé ainsi que certains aciers au chrome. Comme pour les différentes opérations pendant lesquelles il y a un contact intime entre l'outil et l'acier inoxydable, il faut impérativement réserver les mêmes lames à leur découpe afin d'éliminer tout risque de contamination, notamment par des particules ferreuses. Dans l'équipement nécessaire au cisaillage, on veillera à ce que les serre-flans ne dégradent pas la surface des tôles (rayures, empreintes). Pour l'éviter, sur les tôles minces, les mâchoires des serre-flans seront revêtues d'élastomère. Après cisaillage, l'examen de la tranche de la tôle est un bon moyen de contrôle. Si le jeu est correct, la partie supérieure de la coupe (zone « tranchée ») doit correspondre à 40 % de l'épaisseur alors que la partie inférieure (zone « arrachée ») doit correspondre au solde, soit 60 %.

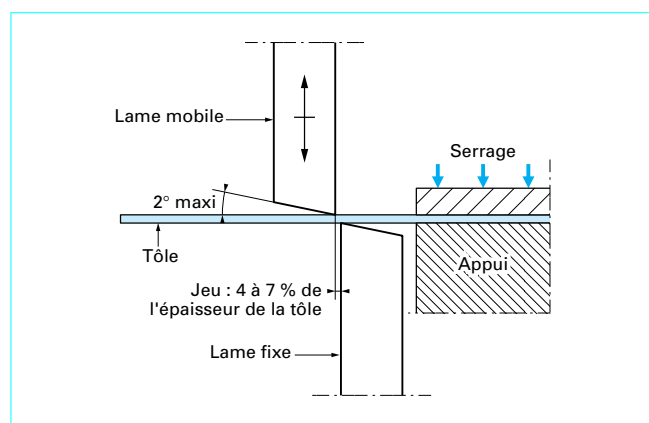


Figure 1 – Principe du cisaillage à la guillotine, d'après [17]

1.2 Refendage

Il consiste à débiter une bobine en une série de feuillards plus étroits. L'une des applications typiques est la production de feuillards destinés à la production de tubes dit « roulés-soudés ». Pour obtenir une coupe correcte, il est nécessaire d'ajuster le jeu et le chevauchement des lames ou couteaux circulaires. Un jeu égal à 5 % de l'épaisseur constitue une valeur moyenne. La vitesse linéaire de refendage, suivant la nuance et son épaisseur, varie de 60 à 200 m/min.

1.3 Découpage des flans

■ Découpage à la presse (figure 2)

Le découpage des flans à la presse exige des machines plus puissantes que pour l'acier doux. Pour faciliter la découpe, le poinçon ou la matrice peuvent présenter une pente depuis le bord jusqu'au centre dont la flèche est sensiblement égale à l'épaisseur du produit. En ce qui concerne le jeu entre le poinçon et la matrice, il sera compris entre 5 et 10 % de l'épaisseur du produit.

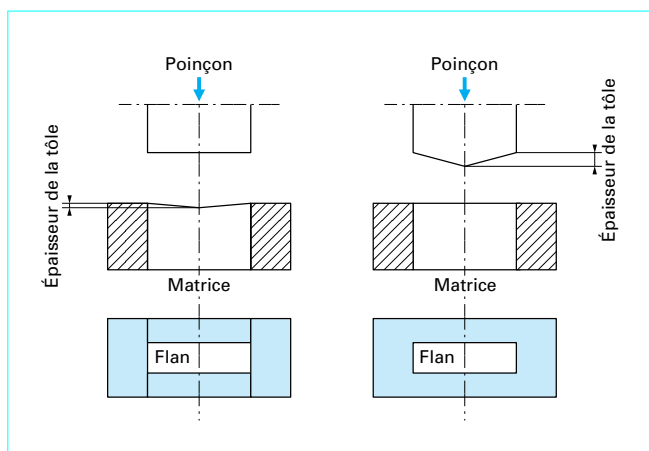


Figure 2 – Découpage de flans rectangulaires à la presse

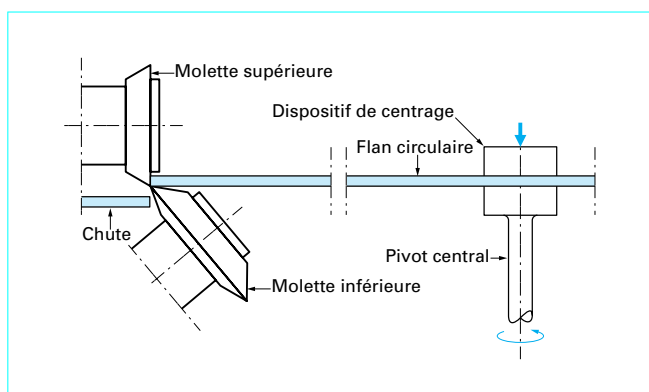


Figure 3 – Cisaillage circulaire à la molette, d'après [17]

■ Cisaillage circulaire à la molette (figure 3)

Les molettes doivent se chevaucher comme dans le cas du refendage rectiligne. Les cisailles utilisées pour cette opération produisent des flans circulaires de grands diamètres destinés à des fonds de cuves ou à des emboutis de grande dimension. La découpe (circulaire) est guidée par un pointeau centreur placé au centre du flan.

1.4 Grignotage

Le grignotage (figure 4) est une méthode de découpage par enlèvement de matière suivant une saignée dont la largeur est égale à celle du poinçon. L'outil supérieur (poinçon) est animé d'un mouvement alternatif et passe au travers de l'outil inférieur (matrice) en entraînant le métal coupé (lunule). En fait, le grignotage est une opération de poinçonnages successifs dont le jeu est réglé en fonction de l'épaisseur du produit à découper.

Avec cette méthode, il est possible de découper suivant un tracé précis que l'on peut suivre soit en utilisant un gabarit guide, soit en utilisant une machine à commande numérique.

Après grignotage, les rives présentent des marques successives (laissées par le poinçon) qu'il faut éliminer par un meulage fin.

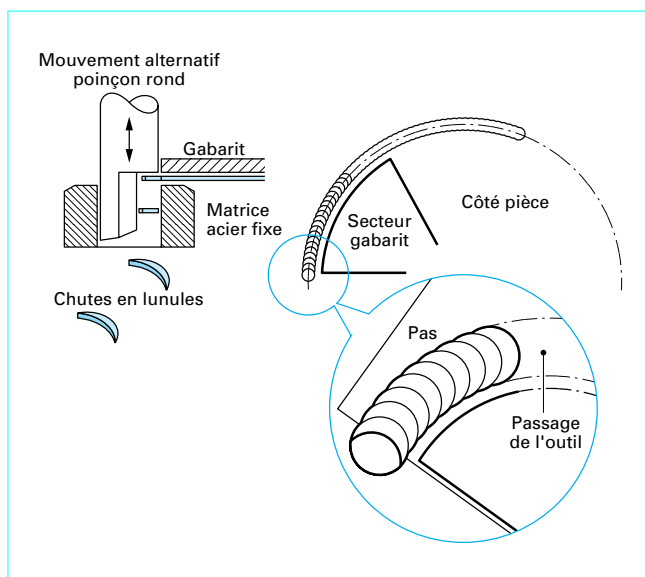


Figure 4 – Découpage par grignotage, d'après [17]

1.5 Poinçonnage

Le poinçonnage (figure 5) est couramment utilisé pour faire des trous dont le diamètre minimal doit être égal à deux fois l'épaisseur de la tôle et la distance minimale entre deux trous successifs égale à la moitié du diamètre du trou. Les efforts appliqués pour le poinçonnage des aciers inoxydables sont significativement plus élevés que ceux utilisés pour l'acier doux. Ils sont approximativement dans le rapport de leur résistance à la rupture respective.

Le jeu J entre la matrice de diamètre D et le poinçon de diamètre d peut s'exprimer par la relation :

$$J = D - d$$

Pour les travaux courants, le jeu sera donné par la relation :

$$J = 0,12 \times \text{épaisseur de la tôle}$$

et pour les travaux dits de *précision*, on adoptera la relation :

$$J = 0,07 \times \text{épaisseur de la tôle}.$$

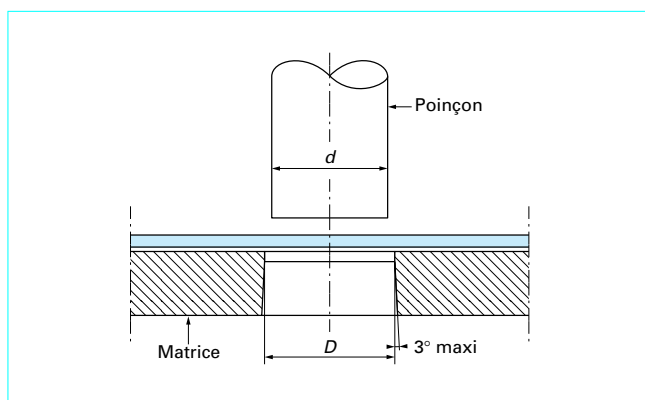


Figure 5 – Principe du poinçonnage

Les trous poinçonnés présentent toujours une conicité qui est d'autant plus marquée que l'épaisseur de la tôle est importante. L'angle de dépouille des matrices est au maximum de 3°.

Les poinçonneuses modernes sont à commande numérique. Tout en assurant une excellente précision sur le positionnement des trous (de l'ordre de $\pm 0,03$ mm), elles permettent d'atteindre une productivité élevée.

1.6 Sciage

■ Sciage manuel

Les aciers inoxydables peuvent facilement être découpés avec une scie à métaux. La cadence maximale sera de l'ordre de 50 courses par minute avec des lames dont la denture varie entre 7 et 12 dents par cm.

■ Sciage à la scie sauteuse

Les scies sauteuses sont équipées d'une lame verticale animée d'un mouvement vertical alternatif. Pour les aciers inoxydables, on utilise des lames courtes à denture fine. L'épaisseur maximale de la tôle, avec ce procédé, est d'environ 2,0 mm.

■ Sciage à la scie à ruban

C'est la méthode la plus courante. Elle est bien adaptée pour des découpes rectilignes dans une gamme d'épaisseur allant de 0,8 à 8,0 mm.

Suivant l'épaisseur et la nuance d'acier inoxydable, la vitesse du ruban varie de 15 à 40 m/min. Les vitesses les plus élevées sont relatives aux tôles minces alors que les vitesses comprises entre 15 et 30 m/min concernent les épaisseurs supérieures à 1,5 mm.

Pour ce type de coupe, il n'est pas nécessaire d'utiliser de lubrifiant, mais il est recommandé de souffler en permanence, sur la zone de coupe, de l'air comprimé pour éliminer les particules de métal et limiter l'échauffement.

Le sciage à la scie à ruban est également bien adapté à la découpe de produits longs (barres). Pour ces produits, la vitesse linéaire du ruban peut aller de 30 m/min pour la nuance austénitique courante X5CrNi18-10/1.4301 à 40 m/min pour la nuance austénitique de décolletage X8CrNiS18-9/1.4305 et jusqu'à 45 m/min pour la nuance ferritique de décolletage X14CrMoS17/1.4104.

1.7 Découpage au jet d'eau

Cette méthode consiste à projeter, au travers d'une buse calibrée, un jet d'eau sous haute pression (2000 à 5000 bar), contenant une poudre abrasive (grenat, corindon de 0,2 à 0,5 mm de diamètre), perpendiculairement à la surface du matériau à découper et à le déplacer à une vitesse de l'ordre de 20 cm/min. Le jet d'eau ainsi obtenu a un diamètre faible et, compte tenu de sa grande vitesse, il permet d'obtenir une coupe de grande qualité.

1.8 Coupe thermique

■ Oxycoupage à la flamme

Nous ne citerons ce procédé que pour mémoire, car il est mal adapté à la coupe des aciers inoxydables. En effet, il provoque une oxydation superficielle importante ainsi qu'une zone affectée thermiquement étendue. Tout au plus, il peut être considéré comme une solution de dépannage.

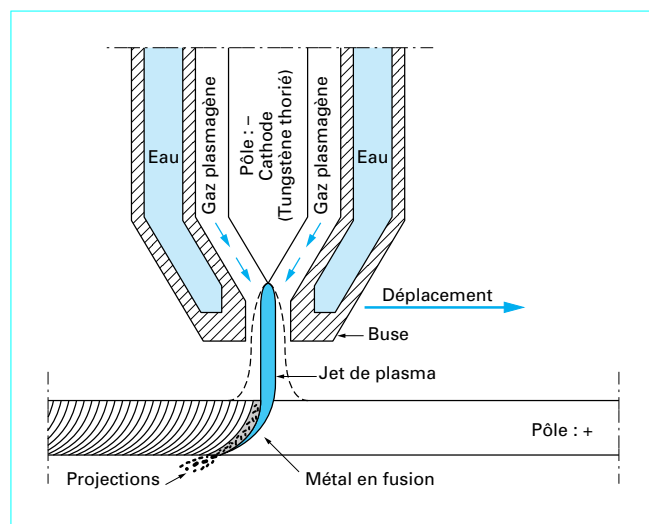


Figure 6 – Principe du découpage laser, d'après [17]

■ Coupe plasma (figure 6)

Il s'agit d'un procédé dans lequel un jet de plasma confiné, dont la température est très élevée (10 000 à 20 000 °C), fait fondre le matériau sur lequel il est dirigé. Le plasma proprement dit est un mélange gazeux fortement ionisé. Les gaz plasmagènes les plus utilisés sont l'argon et les mélanges argon-hydrogène, l'azote et l'air comprimé. Suivant le gaz plasmagène utilisé et le type d'acier inoxydable, l'oxydation et la contamination des rives seront plus ou moins importantes. En général, un meulage léger permet de retrouver le métal sain. La coupe plasma sous l'eau permet de réduire le phénomène d'oxydation et d'augmenter la vitesse. Pour des tôles en acier inoxydables austénitiques de 3,0 mm d'épaisseur, la vitesse de coupe est d'environ 3,5 m/min.

■ Coupe laser (figure 7)

En coupe, le laser (*light amplification by stimulated emission of radiation*) fonctionnera le plus souvent suivant deux modes d'émission :

- l'émission continue (elle permet d'obtenir de grandes vitesses de coupe) ;
- l'émission pulsée (elle permet de limiter l'étendue des zones affectées thermiquement).

Avec les lasers CO₂ (milieu émetteur : dioxyde de carbone CO₂, azote N₂ et hélium He), les puissances utilisées sont comprises entre 0,5 et 3 kW. Pour les lasers YAG (milieu émetteur : yttrium-aluminium-Garnet, c'est-à-dire grenat d'yttrium-aluminium), elles sont inférieures à 2 kW, ce qui limite leur puissance de coupe.

La source laser étant fixe, il faut acheminer le faisceau jusqu'à la pièce en utilisant soit un conduit optique équipé de miroirs de renvoi [laser (CO₂)], soit une fibre optique (laser YAG).

La focalisation va permettre non pas de concentrer le faisceau en un point, mais d'obtenir une tache focale dont le diamètre d est donné par la relation :

$$d = \lambda f / D$$

avec λ la longueur d'onde ($\lambda = 10,6 \mu\text{m}$ pour un laser (CO₂)),
 f la distance focale,
 D le diamètre du faisceau (parallèle), avant focalisation ;
 D est de l'ordre de 20 mm pour un laser (CO₂).

Par ailleurs, au diamètre de la tache focale, on doit associer la profondeur de champ. Cette dernière est proportionnelle à $\lambda/(f/D)^2$.

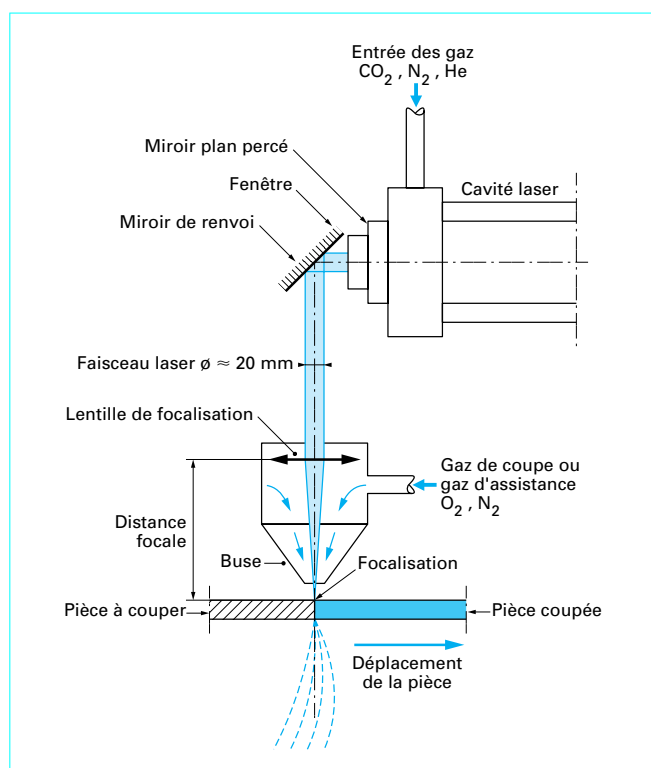


Figure 7 – Principe du laser CO₂ utilisé en coupe, d'après [17]

Si l'on rapproche les deux relations, on voit que pour obtenir une tache focale de petit diamètre, il faudrait une distance focale courte et que, dans le même temps, il faudrait que cette distance soit longue pour obtenir une grande profondeur de champ.

La solution industrielle sera un compromis entre une distance focale courte et une distance focale longue. Un bon compromis est une distance focale de l'ordre de 150 mm à laquelle sont associées une tache focale d'environ 0,3 mm et une profondeur de champ un peu inférieure au millimètre.

Compte tenu de leurs performances, ce sont surtout les lasers CO₂ qui sont utilisés en coupe. En plus du mélange gazeux (He, N₂, CO₂) constituant le milieu émetteur appelé aussi gaz « lasant », on utilise un gaz d'« assistance » (azote ou oxygène) qui est injecté concentriquement au faisceau et qui va permettre l'expulsion du métal en fusion. L'emploi d'oxygène provoque une réaction exothermique qui permet d'augmenter la vitesse de coupe. Pour obtenir une coupe régulière, il faut s'assurer que le faisceau est bien centré par rapport à la buse et que, d'autre part, la focalisation est sur la face supérieure de la tôle (tôles fines) ou à un tiers de l'épaisseur du matériau (tôles épaisses).

Tableau 1 – Vitesses de coupe obtenues avec un laser CO₂ de 1,5 kW sur un acier inoxydable de type X5CrNi18-10/1.4301

Épaisseur de la tôle (mm)	Vitesse de coupe (en m/min)	
	Gaz d'assistance : oxygène	Gaz d'assistance : azote
1,0	9,0	8,0
2,0	5,0	3,5
3,0	3,0	2,0
6,0	1,5	0,5

Avec un laser CO₂ d'une puissance de 1,5 kW, on obtient les performances résumées au tableau 1.

L'azote permet d'obtenir une coupe de très bel aspect, mais cela est obtenu au détriment de la vitesse.

2. Usinage

2.1 Introduction

Parmi les nombreuses techniques de mise en œuvre des aciers inoxydables, l'usinage concerne principalement les produits longs (barres). Les autres opérations d'usinage (perçage, fraisage, taraudage) également pratiquées sur les produits plats ne peuvent être négligées. Dans ce cas, elles précèdent souvent un assemblage à l'aide de moyens mécaniques : vis, boulons, rivets. À l'usinage qui est l'opération de mise en œuvre par enlèvement de matière à l'aide d'un outil de coupe, on associe le concept d'usinabilité concernant une nuance ou une famille de nuances.

Dans le but d'améliorer la mise en œuvre de leurs produits, les sidérurgistes ont développé des aciers inoxydables à usinabilité améliorée grâce à un meilleur contrôle de la nature et de la répartition des inclusions non métalliques. Deux types de nuances ont été développés :

- les nuances resulfurées appelées aussi *nuances de décolletage* ;
- les nuances à teneur en soufre contrôlée mais non resulfurées contenant des oxydes favorisant le fractionnement du copeau lors de l'usinage.

2.2 Critères d'usinabilité

Ces critères sont nombreux mais, pour des raisons pratiques, on en retiendra trois : le fractionnement du copeau, la durée de vie de l'outil et l'état de surface obtenu (caractérisé par sa rugosité).

2.3 Comportement des différentes familles d'aciers inoxydables

2.3.1 Aciers inoxydables austénitiques

Ces alliages sont facilement écrouissables. À l'état écroui, leurs caractéristiques mécaniques très élevées vont provoquer une usure prématurée des outils. À l'état écroui, ils gardent une *réserve* de ductilité qui va à la fois entraîner la formation de copeaux longs et favoriser le *collage* du copeau sur l'outil. Par voie de conséquence, les efforts de coupe sont élevés et ils provoquent une dégradation de l'arête de coupe de l'outil pouvant conduire à la rupture de l'outil lui-même.

Par ailleurs, ces nuances ont une conductivité thermique environ trois fois plus faible que celle des aciers en carbone. Il en résulte une température élevée au niveau de l'interface métal-outil provoquant un échauffement excessif de ce dernier et donc un risque accru de diminution de sa durée de vie.

Pour toutes ces raisons, les nuances austénitiques destinées à l'usinage sont généralement resulfurées et leur teneur en soufre est généralement comprise entre 0,15 et 0,35 %.

2.3.2 Aciers inoxydables ferritiques

Leur durcissement par écrouissage est beaucoup plus faible que celui des nuances austénitiques. Pour un taux d'écrouissage de

l'ordre de 50 %, l'augmentation de la contrainte de rupture n'est que d'environ 200 N/mm² alors qu'elle est supérieure à 1000 N/mm² pour certaines nuances austénitiques.

Même si leur conductivité thermique est supérieure à celle des nuances austénitiques, la tendance à la formation de copeaux longs ainsi que le risque de collage restent élevés. C'est la raison pour laquelle les aciers inoxydables ferritiques destinés à l'usinage sont presque toujours resulfurés.

2.3.3 Aciers inoxydables martensitiques

Leurs propriétés physiques se rapprochent de celles des aciers spéciaux alliés. Par contre, leur résistance à la rupture étant grande, les efforts de coupe demeurent à un niveau élevé.

2.4 Rôle des inclusions non métalliques

2.4.1 Inclusion à base de soufre : aciers resulfurés ou de « décolletage »

Cette voie utilisée depuis longtemps permet une amélioration spectaculaire de l'usinabilité. L'addition de soufre conduit à la formation de sulfures de manganèse dont le rôle est essentiel dans le fractionnement du copeau. Par contre, leur présence provoque une diminution importante de la résistance à la corrosion. Cela est particulièrement vrai de la résistance à la corrosion par piqûres. Par ailleurs, l'excès de soufre diminue nettement la soudabilité métallurgique en augmentant le risque de fissuration à chaud, c'est-à-dire pendant la solidification de la soudure.

Si l'**addition de soufre**, à des niveaux compris entre 0,15 et 0,35 %, permet d'améliorer très significativement l'usinabilité, cela se fait au détriment d'autres propriétés tout aussi fondamentales. C'est la raison pour laquelle les métallurgistes ont recherché des voies nouvelles permettant d'améliorer l'usinabilité sans dégrader les autres propriétés.

2.4.2 Inclusions à base d'oxydes

Il est bien établi que les *oxydes durs* (Al₂O₃, SiO₂, Cr₂O₃...) ne se déforment pas et gardent une dureté élevée à haute température. Ces oxydes *naturellement* présents dans les aciers inoxydables diminuent la durée de vie des outils de coupe.

Par contre, si l'on remplace les oxydes durs par des oxydes malléables à haute température de type SiO₂-CaO-Al₂O₃, on obtient des inclusions capables de se déformer lors de la coupe et de s'allonger dans les zones de cisaillement du copeau, facilitant ainsi le fractionnement de ce dernier. De plus, elles forment à l'interface outil-copeau une couche lubrifiante qui limite l'échauffement de l'outil. Les alliages de ce type permettent des gains de productivité de 25 % par rapport aux nuances standards sans réduire leur résistance à la corrosion.

2.4.3 Synergie entre les effets du soufre et ceux des oxydes malléables

L'addition de soufre et d'oxydes malléables conduit à une synergie de leurs effets et permet des gains de productivité de 45 %. Par contre, la présence de sulfures de manganèse provoque toujours une diminution de la résistance à la corrosion.

2.5 Choix des outils

Le choix des outils pour l'usinage des aciers inoxydables est primordial. La productivité est directement liée à celui-ci.

Les **principales familles** d'outils sont :

- les outils en acier rapide (HSS : *high speed steel*) ;
- les outils en carbure brasé ;
- les plaquettes en carbure revêtu ou non revêtu ;
- les cermets ;
- les céramiques.

Les outils en acier rapide ne sont pratiquement plus utilisés pour l'usinage des aciers inoxydables. Les carbures constitués à l'origine par des nuances binaires [carbure de tungstène-cobalt (WC-Co)] ont évolué ensuite vers des nuances plus complexes dans lesquelles on a introduit du carbure de titane (TiC) ou du carbure mixte de niobium et de tantalum [(Nb, Ta) C] pour améliorer la tenue à chaud.

La tendance actuelle est celles des carbures revêtus d'une multicouche composée généralement de quatre matériaux réfractaires : TiC, Ti (C, N), TiN et Al₂O₃. Pour les aciers inoxydables, la dernière couche est préférentiellement du nitrure de titane TiN. Les cermets sont constitués par une phase dure [carbure (sauf WC), nitrure, carbonitrure, borure] et d'une phase liante en métal ou alliage non ferreux (Co, Ni, Co-Ni-Fe, Ni-Cr, Ni-Mo, Ni-Cr-Mo). Aujourd'hui, les cermets sont majoritairement constitués par du carbonitrure de titane Ti (C, N) et par un liant Ni-Mo. Les cermets sont principalement utilisés pour les opérations de finition pour le tournage ou pour le filetage. Ils permettent d'obtenir de très beaux états de surface.

Les céramiques sont très peu utilisées pour l'usinage des aciers inoxydables en raison de performances insuffisantes.

Le tableau 2 donne ordre de grandeur des vitesses de coupe possibles en fonction de la nature des outils.

Tableau 2 – Gamme de vitesses de coupe en fonction de la nature de l'outil pour l'ensemble des aciers inoxydables

Outil de coupe	Vitesse de coupe (m/min)
Cermet	50 à 850
Plaquette : carbure revêtu de TiN.....	50 à 780
Plaquette : carbure non revêtu	50 à 350
Carbure brasé.....	50 à 250

2.6 Tournage ou chariotage

Les vitesses de coupe, suivant la nuance d'acier inoxydable, sont comprises entre 100 et 800 m/min. Les vitesses d'avance peuvent varier de 0,1 à 0,3 mm/tour pour une profondeur de passe de 1,5 mm avec un outil en carbure ou un outil en carbure revêtu.

2.7 Perçage

Le perçage concerne principalement les barres et les tôles épaisses. S'il doit être pratiqué sur des tôles minces, on a intérêt à les regrouper par paquets. Pour les petits diamètres, les forets peuvent être en acier rapide. Pour les diamètres de perçage supérieurs à 15-20 mm, on choisira de préférence des forets à plaquettes. Les forets en carbure monobloc couvrent l'ensemble de la gamme.

Tableau 3 – Vitesse de coupe pour les nuances d'aciers inoxydables austénitiques à 18 % de chrome et 10 % de nickel

Nuance	Diamètre du foret					
	3 mm		12 mm		18 mm	
	Vitesse de coupe (m/min)	Vitesse d'avance (mm/tr)	Vitesse de coupe (m/min)	Vitesse d'avance (mm/tr)	Vitesse de coupe (m/min)	Vitesse d'avance (mm/tr)
X5CrNi18-10/1.4301	16	0,07	20	0,13	22	0,15
X5CrNi18-10/1.4301 (1)	21	0,09	24	0,15	28	0,18
X8CrNi18-9/1.4305 (1)	26	0,17	37	0,24	40	0,30

(1) Nuances dites à usinabilité améliorée UGIMA

L'angle de pointe du foret est généralement compris entre 120 et 140° et l'angle de dépouille est de l'ordre de 6°. La vitesse de coupe sera fonction de la nuance utilisée et du type de foret. Le tableau 3 résume la situation pour la nuance à 18 % de chrome et 10 % de nickel et ces dérivées à usinabilité améliorée.

2.8 Alésage

L'opération d'alésage peut être réalisée au tour à l'aide d'un outil fixe ou à l'aide d'un alésoir ou d'une barre d'alésage mise en rotation. Afin d'éviter les problèmes dus aux vibrations et de conicité, on essaiera de diminuer au maximum le porte-à-faux de la barre d'alésage par rapport à son diamètre à un rapport de 4/1. Les vitesses de coupe sont sensiblement inférieures à celles du tournage, à profondeur de passe égale. En règle générale, on utilisera un coefficient réducteur de 0,5 pour les nuances standards et de 0,67 à 0,75 pour les nuances à usinabilité améliorée. Pour les avances, on utilisera celles du tournage, pour une même profondeur de passe si le porte-à-faux est inférieur ou égal à quatre fois le diamètre de la barre d'alésage ou, si le porte-à-faux est supérieur, on utilisera un coefficient réducteur de 0,67. Pour l'alésage à l'alésoir, on utilise le plus souvent des alésoirs en acier rapide à cannelures hélicoïdales ou droites pour la passe de finition. L'angle de coupe est compris entre 3 et 8°, tandis que l'angle de dépouille est de l'ordre de 7°.

Pour les nuances inoxydables à usinabilité améliorée, la vitesse de coupe sera identique à celle utilisée en perçage avec un foret en acier rapide. Pour les nuances « normales », elle sera égale à 0,67, voire 0,5 fois celle du perçage.

Les avances dépendent principalement du diamètre de l'alésoir. Elles sont généralement de l'ordre de 0,10 à 0,20 mm/tr pour un alésoir de 3 à 4 mm de diamètre et de 0,3 à 0,5 mm/tr pour un alésoir de 8 à 12 mm de diamètre.

2.9 Fraisage

Compte tenu des efforts de coupe généralement élevés, il faut utiliser des machines puissantes et **éliminer les jeux surtout lors du fraisage en avalant**. Comme pour le tournage, il est recommandé d'utiliser des outils ou plaquettes en carbure revêtu ou non. Avec des fraises en carbure monobloc, on utilisera des vitesses de coupe comprises entre 90 et 200 m/min pour les nuances à usinabilité améliorée et entre 50 et 150 m/min pour les nuances « normales ». Les avances seront comprises entre 0,012 et 0,125 mm/(tr.dent) en fonction du diamètre de la fraise.

Avec des fraises à plaquettes, les vitesses de coupe seront de l'ordre de 80 à 400 m/min pour les nuances à usinabilité améliorée

et de l'ordre de 50 à 300 m/min pour les autres nuances. Les avances seront comprises entre 0,05 et 0,2 mm/(tr.dent).

2.10 Taraudage

Cette opération est délicate avec les nuances austénitiques, surtout lorsqu'il s'agit de trous de petits diamètres.

La tendance à former un copeau filiforme peut entraîner la rupture de l'outil. Pour limiter ce risque, on utilisera des tarauds à 3 cannelures pour les petits diamètres et à 4 cannelures pour les autres diamètres.

Les angles de coupe sont généralement compris entre 10 à 15° alors que les vitesses de coupe varient de 5 à 30 m/min. La lubrification doit être importante. Si elle est réalisée sous pression, elle facilitera le dégagement du copeau.

2.11 Filetage

On distingue plusieurs méthodes de filetage :

- le filetage à l'outil (outil ou plaquette carbure) ;
- le filetage à la filière ;
- le filetage avec une tête de filetage. Le procédé est surtout utilisé sur les machines de décolletage ;
- le filetage par roulage des filets.

Pour le filetage à l'outil, les vitesses de coupe seront égales aux 2/3 de celles du tournage pour les nuances à usinabilité améliorée et au 1/2 de celles du tournage pour les nuances « normales ».

Pour les autres procédés de filetage, et pour des outils en acier rapide, les vitesses de coupe seront comprises entre 5 et 25 m/min.

3. Mise en forme par déformation plastique à froid

3.1 Emboutissage des produits plats

On pourra se reporter à la référence [17].

3.1.1 Principe et analyse des déformations

L'état des déformations d'un élément de flan est correctement décrit à partir des déformations dans trois directions principales :

— dans le **sens de la longueur** (généralement la direction de laminage) :

$$\varepsilon_1 = \ln(L/L_0)$$

avec L_0 longueur initiale,

L longueur finale de l'élément ;

— dans le **sens de la largeur** (généralement la direction perpendiculaire du sens du laminage) :

$$\varepsilon_2 = \ln(b/b_0)$$

avec b_0 largeur initiale,

b largeur finale de l'élément ;

— dans le **sens de l'épaisseur** :

$$\varepsilon_3 = \ln(e/e_0)$$

avec e_0 épaisseur initiale,

e épaisseur finale de l'élément.

La conservation du volume pendant la déformation permet d'écrire :

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0$$

En emboutissage, on distingue deux modes principaux de déformation. Ce sont :

— le **mode en expansion** (figure 8) suivant lequel le flan est bloqué entre le serre-flan et la matrice ;

— le **mode en rétreint** (figure 9) suivant lequel le métal est amené à glisser entre la matrice et le serre-flan de manière à réaliser la partie droite ou jupe de l'embouti.

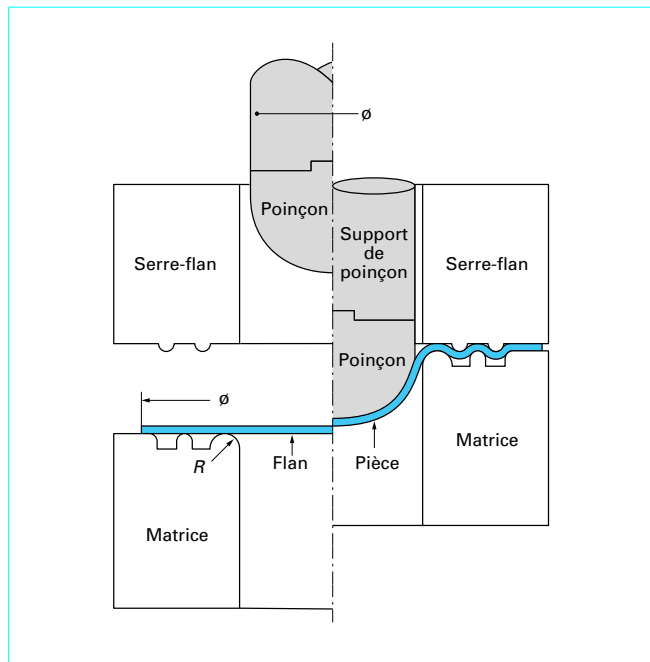


Figure 8 – Déformation de type expansion :
le flan est bloqué entre la matrice et le serre-flan

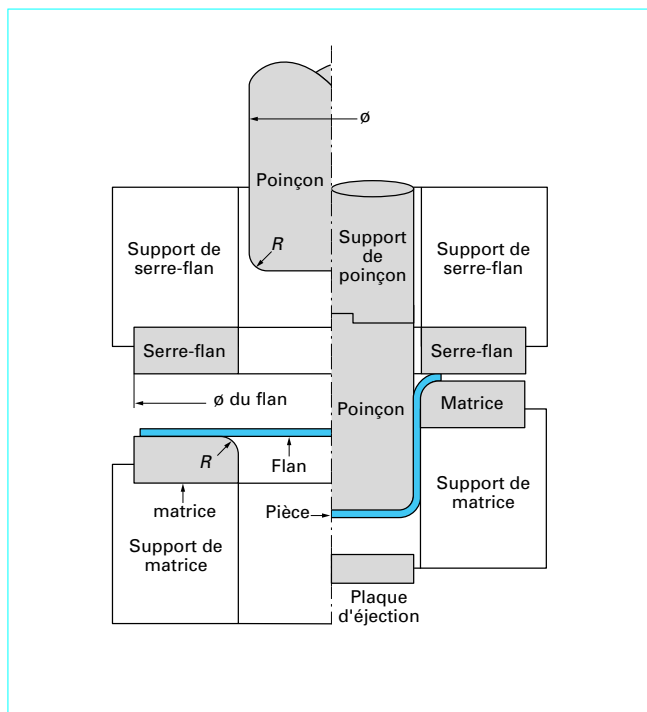


Figure 9 – Déformation de type rétreint :
le flan glisse entre la matrice et le serre-flan

Dans le premier cas (mode en expansion), le poinçon cylindrique présente une extrémité hémisphérique alors que dans le second cas (mode en rétreint) le poinçon cylindrique est à fond plat.

À la figure 10, on a représenté les principaux modes de déformation tels qu'ils apparaissent sur des emboutis servant à des essais de caractérisation (essais Swift, Erichsen, etc.).

La représentation la plus fidèle des déformations sur un embouti pendant et après formage est donnée par les déformations rationnelles qui peuvent être représentées dans un diagramme dont les axes orthogonaux sont les déformations principale ε_1 , ε_2 .

Le **domaine de l'expansion** est défini par la surface comprise entre les demi-droites :

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 \text{ et } \varepsilon_1 = -\varepsilon_2$$

Le **domaine du rétreint** est défini par les demi-droites :

$$\varepsilon_1 = -2 \varepsilon_2 \text{ et } \varepsilon_1 = -1/2 \varepsilon_2$$

Dans le mode de déformation en rétreint, on notera, en particulier, l'augmentation d'épaisseur au sommet de la jupe de l'embouti ($\varepsilon_3 > 0$), alors que dans le mode en expansion il y a amincissement de l'épaisseur du flan sous le nez du poinçon ($\varepsilon_3 < 0$).

■ Dans l'**essai Swift** pendant lequel le flan circulaire va glisser entre la matrice et le serre-flan sous l'action d'un poinçon cylindrique de 33,0 mm de diamètre à extrémité plate, on va mesurer le **rapport limite d'emboutissage** ou *limiting drawing ratio* (LDR) donnant le rapport limite entre le diamètre maximal du flan au-delà duquel il y a rupture, et celui du poinçon qui reste constant. Il est défini par la relation simple :

$$\text{LDR} = \text{diamètre du flan} / \text{diamètre du poinçon}$$

Avec les mêmes nuances que précédemment, on a obtenu les résultats donnés au tableau 4.

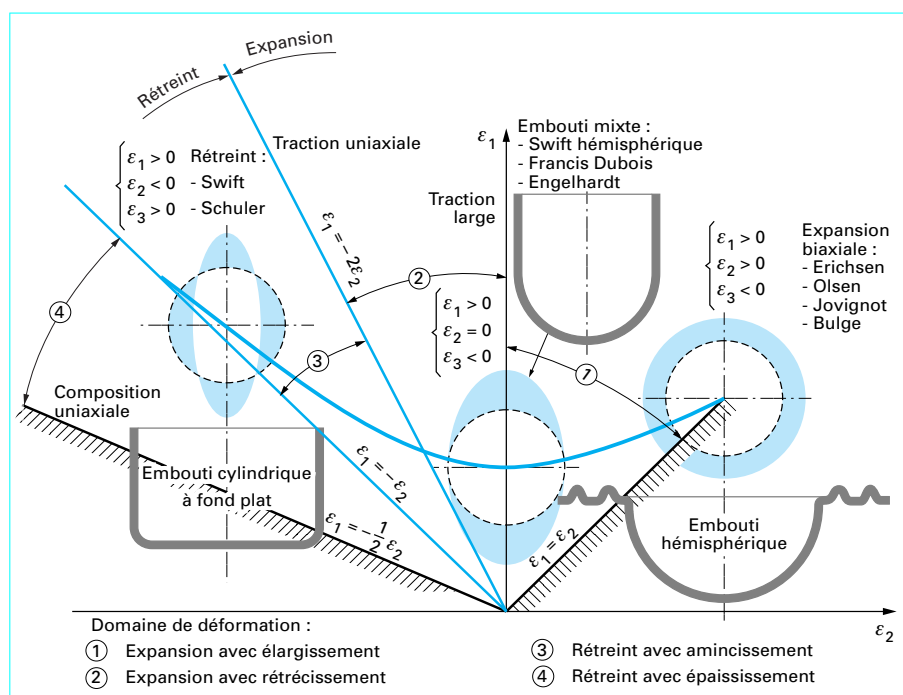


Tableau 4 – Rapport limite d'emboutissage (LDR) suivant l'essai Swift pratiqué sur des flans circulaires de 0,8 mm d'épaisseur

Désignation européenne : NF EN 10088-2		LDR (limiting drawing ratio)
Nom	Numéro	
X6Cr17	1.4016	2,05 à 2,10
X3CrTi17	1.4510	2,15 à 2,25
X5CrNi18-10	1.4301	2,00 à 2,05

Même si globalement la capacité d'emboutissage des aciers inoxydables austénitiques (alliages : fer-chrome-nickel) est meilleure que celles des alliages inoxydables ferritiques (alliages : fer-chrome) le tableau 4 montre le très bon comportement de la nuance à 17 % de chrome stabilisée au titane. Pour des emboutis de ce type, cette nuance ferritique peut être un substitut intéressant car moins cher qu'un produit austénitique.

■ Dans l'**essai Erichsen** qui est réalisé à flan bloqué entre la matrice et le serre-flan, on mesure la profondeur d'emboutissage ou *flèche Erichsen* lorsque apparaît le phénomène de striction précédant la rupture.

Pour un flan d'épaisseur initiale (e_0) égale à 0,8 mm, on obtient les flèches Erichsen données au tableau 5 qui montre, pour ce mode de déformation, la supériorité de la nuance austénitique X5CrNi18-10.

Parmi les essais d'emboutissage les plus répandus, on retiendra, pour le mode en expansion, l'essai Erichsen et pour le mode en rétreint, l'essai Swift.

■ D'un point de vue plus fondamental, l'aptitude au formage d'un acier inoxydable peut être déduite de la courbe de traction rationnelle donnant la **contrainte vraie** σ en fonction de la **déformation rationnelle** ε :

$$\sigma = f(\varepsilon)$$

Tableau 5 – Flèche Erichsen pour des flans de 0,8 mm d'épaisseur de nuances ferritiques et austénitiques

Désignation européenne : NF EN 10088-2		Flèche Erichsen (mm)
Nom	Numéro	
X6Cr17	1.4016	8,7
X3CrTi17	1.4510	9,6
X5CrNi18-10	1.4301	11,5

Le tracé de la courbe de traction rationnelle $\sigma = f(\varepsilon)$ permet de représenter l'aptitude à l'écroutissage. En effet, la surface limitée par cette courbe et l'axe des abscisses représente le travail fourni pour effectuer la déformation correspondante.

L'augmentation de σ en fonction de ε représente le taux d'écroutissage ou taux de consolidation de l'alliage. En général, l'équation de la courbe de traction rationnelle est pour les **aciers doux** de la forme :

$$\sigma = f(\varepsilon) = k\varepsilon^n$$

L'exposant n représente le **coefficient d'écroutissage**, c'est-à-dire la capacité du matériau à accroître sa résistance à la déformation ; c'est le **phénomène de consolidation**.

L'expression $\sigma = k\varepsilon^n$ peut s'écrire sous forme logarithmique :

$$\ln \sigma = \ln k + n \ln \varepsilon$$

Dans laquelle n représente la pente de la droite donnant $\ln \sigma$ en fonction de $\ln \varepsilon$.

En fait, cette loi n'est qu'approximative pour les nuances inoxydables ferritiques et, même si on y fait référence pour les nuances austénitiques (cf. [M 4 541], § 2.3), elle est éloignée de la réalité.

En pratique, le coefficient d'écroutissage n n'étant pas constant, le meilleur compromis en emboutissage consiste à effectuer la mesure

à l'aide de la partie de la courbe de traction rationnelle qui correspond aux déformations plastiques comprises entre 0,15 et la striction.

Par ailleurs, il existe une proportionnalité entre la déformation rationnelle dans le sens de la largeur ε_2 et celle dans le sens de l'épaisseur ε_3 , définie par le **coefficient d'anisotropie** :

$$r = \varepsilon_2 / \varepsilon_3$$

Il représente, en fait, la façon dont l'alliage se comporte entre le rétrécissement et l'amincissement. Si $r < 1$, le métal aura tendance à s'amincir plutôt qu'à se rétrécir alors que si $r > 1$, le métal aura plutôt tendance à se rétrécir qu'à s'amincir.

Le coefficient d'anisotropie r dépend de la direction de la déformation. Ainsi, pour caractériser l'anisotropie d'un matériau, il est nécessaire de la mesurer à 45°, à 90° et dans le sens de laminage (direction 0°).

Ainsi, on définit le **coefficient d'anisotropie moyen** :

$$r_n = 1/4 (r_0 + r_{90} + 2r_{45})$$

et le **coefficient d'anisotropie plane** :

$$\Delta r = 1/2 (r_0 + r_{90} - 2r_{45})$$

Cette dernière formule ne s'applique pas toujours correctement aux aciers inoxydables et on lui préfère souvent la formule :

$$\Delta r = [(r_0 - r_n)^2 + (r_{90} - r_n)^2 + (r_{45} - r_n)^2]^{1/2}$$

La détermination du coefficient d'anisotropie est simple puisqu'il suffit de mesurer la largeur et l'épaisseur d'une éprouvette ayant subi un allongement déterminé, par exemple de 20 ou 40 %.

Le coefficient d'anisotropie moyen permet de traduire l'aptitude au rétreint de la tôle et le **coefficient d'anisotropie plane** Δr présente une bonne corrélation avec la hauteur des cornes observées sur embouti (figure 11).

Le **taux de cornes** est défini par la relation :

$$\frac{H - h}{H + h} \times 200$$

Le tableau 6 indique le taux de cornes pour différentes nuances.

Il existe une assez bonne corrélation entre le coefficient d'écroissage n , le coefficient d'anisotropie moyen r_n et les résultats des essais d'emboutissage en expansion (Erichsen) et en rétreint (Swift).

Pour des déformations sollicitant le matériau en expansion, on choisira une nuance dont le coefficient d'écroissage n est élevé. À l'inverse, s'il s'agit de déformation en rétreint, on choisira une nuance dont le coefficient d'anisotropie moyen r_n est élevé. En fait, les coefficients n et r_n sont des caractéristiques intrinsèques et globales du matériau alors que les phénomènes critiques intervenant lors de l'emboutissage sont des phénomènes locaux (striction ou rupture). La signification et l'intérêt de ces deux coefficients doivent donc être relativisés.

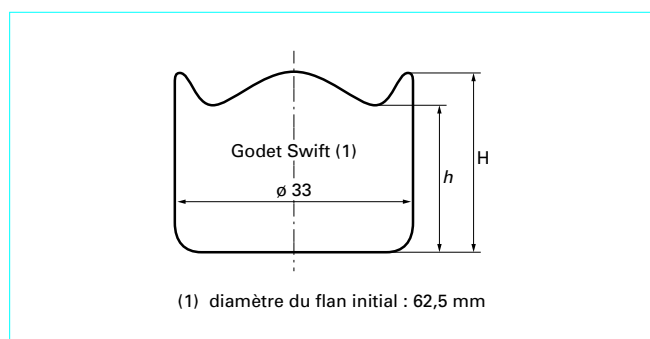


Figure 11 – Hauteur relative des cornes

Tableau 6 – Taux de cornes pour différentes nuances

Désignation européenne		Δr	Taux de cornes %
Nom	Numéro		
X6Cr17	1.4016	0,50	8 à 12
X3CrTi17	1.4510	0,35	4 à 6
X5CrNi18-10	1.4301	0,45	5 à 7

Tableau 7 – Coefficients d'anisotropie moyen r_n et d'anisotropie plane Δr et coefficient d'écroissage n pour différentes nuances

Désignation européenne : NF EN 10088-2		r_n	Δr	n
Nom	Numéro			
X6Cr17	1.4016	1,1 à 1,6	0,50	0,20 à 0,25
X3CrTi17	1.4510	1,6 à 2,0	0,35	0,22 à 0,28
X5CrNi18-10	1.4301	1,0 à 1,3	0,45	0,50 à 0,70

Ils donnent une indication générale sur le comportement et donc sur l'aptitude à l'emboutissage des différentes nuances, mais demeurent insuffisants, pour résoudre un problème spécifique. On trouvera au tableau 7 les valeurs caractéristiques de n , r_n et Δr pour les principales nuances ferritiques et austénitiques utilisées en emboutissage.

Les facteurs locaux que nous venons d'évoquer (striction, rupture) ont des causes multiples.

Certains sont liés aux caractéristiques métallurgiques de l'alliage. Ce sont, par exemple, la grosseur du grain, la taille et la répartition des inclusions et/ou des précipités, la rugosité superficielle qui va influencer la prise de lubrifiant, etc.

À ces facteurs d'ordre métallurgique vont s'ajouter des facteurs d'ordre technologique dont le rôle est souvent déterminant. Les plus importants sont : le jeu entre le poinçon et la matrice, la pression de serre-flan, les rayons du poinçon et de la matrice, la nature et la qualité de surface des outils et enfin le type de lubrifiant.

3.1.2 Courbes limites de formage

Dans le but d'observer, sur un embouti, les déformations pendant et à la fin du formage, on utilise les déformations rationnelles principales, longitudinale ε_1 (ou radicale ε_r s'il s'agit d'un embouti circulaire) et transversale ε_2 (ou circonférentielle ε_c pour la même raison que précédemment).

Aux figures 12 et 13, on a représenté respectivement les courbes limites de formage pour un acier inoxydable ferritique à 17 % de chrome (X6Cr17/1.4016) et pour un acier inoxydable ferritique à 18 % de chrome et 9 % de nickel (X5CrNi18-10/1.4301).

L'axe des abscisses ε_2 sépare les domaines de l'allongement et du raccourcissement.

L'axe des ordonnées ε_1 sépare les domaines de l'élargissement et du rétrécissement. Les courbes limites de formage qui représentent le lieu géométrique des déformations principales ε_1 et ε_2 sont obtenues à l'aide d'essais spécifiques tels que ceux décrits précédemment. Pour le tracé des courbes limites de formage présentées aux figures 12 et 13, on a utilisé six types d'essais, ce sont : soit des essais de traction sur éprouvettes lisses, soit des essais de traction sur éprouvettes entaillées, soit des essais : Erichsen, Olsen, Bulge et Swift avec différents lubrifiants.

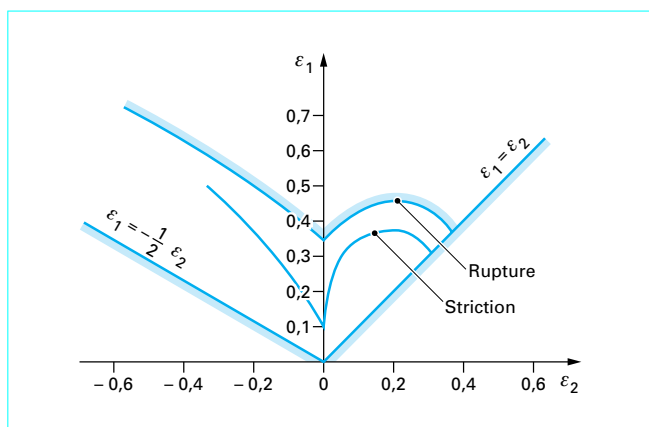


Figure 12 – Courbes limites de formage : X6Cr17, d'après [17]

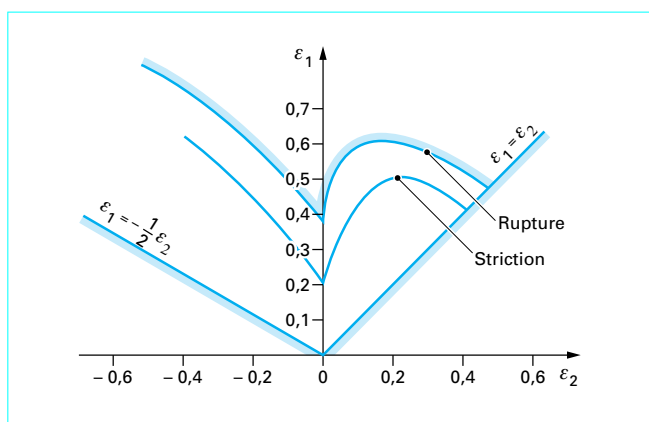


Figure 13 – Courbes limites de formage : X5CrNi18-10, d'après [17]

Dans le tracé des courbes limites de formage, on admet que les trajectoires de formage sont rectilignes, c'est-à-dire que le rapport $\varepsilon_2/\varepsilon_1$ est constant. Pratiquement, les déformations principales sont mesurées à l'aide de grilles, généralement à motifs circulaires entrelacés, de 2 mm de diamètre imprimées sur le flan par gravure électrochimique. La mesure proprement dite est réalisée avec un appareil optique de type projecteur de profil dont le grossissement est de l'ordre de dix. Les études récentes ont cependant montré l'influence des trajectoires de déformation sur la position de la courbe limite de formage.

Si la déformation se fait suivant des séquences « rétreint puis expansion », « traction uniaxiale puis expansion » et « traction plane puis expansion », les valeurs de ε_1 à l'apparition de la striction sont plus grandes que celles prévues par la courbe limite obtenues par des essais directs. Par contre, si la déformation se fait suivant des séquences « rétreint puis traction uniaxiale » et « traction plane puis traction uniaxiale », les valeurs de ε_1 sont nettement plus faibles que celles obtenues par des trajectoires directes.

3.2 Frappe à froid des produits longs

Les produits longs en acier inoxydable sont aussi mis en forme, à froid, par déformation plastique. Les vis, boulons, rivets, etc., constituent la plus grande partie des produits réalisés par frappe à froid. En effet, cette technique présente plusieurs avantages par rapport à l'usinage ou au décolletage :

- productivité élevée ;
- très peu de perte de matière ;
- produits à caractéristiques mécaniques élevées grâce au phénomène d'écroutissage.

Les procédés utilisés se classent en deux catégories :

- les procédés provoquant un évasement du métal ; ce sont les techniques de refoulement ;
- les procédés entraînant une réduction de la section initiale du produit, c'est-à-dire l'extrusion et le filage.

3.2.1 Caractérisation de la frappe

L'opération de frappe peut être caractérisée par les paramètres suivants.

■ Corroyage

Le corroyage C est défini par le rapport :

$$C = H_0/H$$

avec H_0 la hauteur initiale,
 H la hauteur finale.

■ Retour élastique

Lors des opérations de frappe, on constate que la hauteur de la pièce finie est plus grande que celle initialement prévue. Ce phénomène est dû, pour l'essentiel, au retour élastique de l'acier inoxydable. Le retour élastique augmente avec le corroyage, il commence à être sensible à partir d'un coefficient de corroyage $C = 4$. Il augmente également avec l'écroutissabilité et est plus faible en frappe lente qu'en frappe rapide.

■ Corroyages théorique et réel

Le retour élastique influe sur le tracé des courbes d'écroutissage. Ce que l'on observe en réalité, c'est le corroyage :

$$C_r = C_0/(1 + R)$$

avec C_r le corroyage réel,
 C_0 le corroyage théorique,
 R le retour élastique.

Dans la pratique, le corroyage varie de 2 à 4. Pour des pièces à corroyage élevé, on utilise des nuances peu écroutissables.

3.2.2 Choix des nuances

Au cours de la déformation à froid, l'alliage s'écroute, ce qui produit un durcissement et une baisse de la ductilité résiduelle. Plus l'écroutissage est important, plus l'énergie nécessaire à la déformation est grande. Cette énergie est proportionnelle à l'aire sous la courbe de traction rationnelle $\sigma = f(\varepsilon)$. Pour limiter l'écroutissage, on utilise des nuances dont le taux de consolidation n est le plus faible possible. Le taux de consolidation diminue si les teneurs en nickel et cuivre augmentent.

En fonction du corroyage C , on a observé les **retours élastiques** donnés par la formule :

$$R(\%) = [(H_R - H_T)/H_T] 100$$

avec H_R la hauteur réelle,
 H_T la hauteur théorique.

Lors d'essais réalisés sur une presse mécanique permettant un refoulement libre, les valeurs calculées à l'aide de la formule ci-dessus sont consignées au tableau 8.

Les nuances indiquées au tableau 7 sont celles qui sont les plus utilisées. En plus des critères précédemment définis (corroyage : C et consolidation : $d\sigma/d\varepsilon$), on cherche à ce que l'énergie nécessaire à la déformation soit la plus faible possible. On montre en effet que, pour une énergie de déformation de l'ordre de 450 kJ avec la nuance X5CrNi18-10, on obtient seulement 410 kJ avec la nuance X3CrNiCu18-9-4, le rapport des énergies de déformation étant sensiblement égal à celui des taux de consolidation respectifs.

Tableau 8 – Retour élastique en fonction du corroyage pour différents aciers inoxydables

Corroyage C	Nuances			
	X6Cr17 1.4016	X3CrNiCu18-9-4 1.4567	X4CrNi18-12 1.4303	X5CrNi18-10 1.4301
2	0	0,4	0,8	0,9
3	2,3	3,6	4,2	4,7
4	6,4	8,9	10	10,2
6	24,3	31,0	32	33

■ Flambement

C'est un phénomène bien connu dès que le rapport : hauteur H /diamètre D est supérieur à 3.

Il est peu dépendant de la nuance et n'est pas fonction du corroyage. Si l'on désigne par **rétreint** le rapport :

$$R = [(D^2 - d^2)/D^2] 100$$

avec d le diamètre initial,

D le diamètre final,

on montre que, pratiquement, on ne doit pas dépasser le seuil de 40 %.

4. Mise en forme par déformation à chaud

Pour mener à bien les opérations de mise en forme par déformation à chaud, il est indispensable de prendre en compte les propriétés physiques ainsi que les caractéristiques mécaniques à haute température des aciers inoxydables. Elles présentent des différences significatives comparées à celles des aciers au carbone. Leur conductivité thermique étant faible, il faudra observer, en général, des montées progressives en température.

Leurs caractéristiques mécaniques à chaud restant élevées, il faudra dimensionner en conséquence les outillages.

Lorsque la mise en forme est réalisée à partir d'ébauche brute de coulée de type lingot, leur structure ségrégée impose des chauffages d'homogénéisation suffisamment longs pour recouvrer une structure homogène.

La tendance au grossissement du grain de certaines nuances (aciers ferritiques notamment) impose un strict contrôle de la température.

4.1 Formage à chaud des aciers martensitiques et ferritiques

Les températures de forgeage sont comprises entre 1100 et 1250 °C pour les nuances martensitiques. Si l'affinage du grain est possible dans le cas des aciers martensitiques car ils subissent une transformation lors du traitement thermique, il n'en est rien pour les aciers ferritiques dont le grain obtenu pendant le forgeage est définitivement conservé.

Avec les aciers martensitiques on observera une montée lente en température jusqu'à 700-800 °C. Ensuite, le chauffage sera rapide jusqu'à 1100-1250 °C, la température de 1250 °C ne devant pas être dépassée. Le travail à chaud devra être effectué à l'air calme. Pour être suffisamment lent et à l'abri des courants d'air, le refroidissement sera généralement effectué au four jusqu'à une température de l'ordre de 150-200 °C. La phase finale du refroidissement pourra se poursuivre à l'air libre.

Les opérations de formage à chaud des aciers ferritiques concernent essentiellement les tôles fortes. Suivant la teneur en chrome de la nuance (11 à 29 % de chrome), le formage sera pratiqué entre 850 °C et 1100 °C. Au cours du refroidissement, il existe un risque de sensibilisation par précipitation de carbures de chrome aux joints de grains pour certaines nuances. Pour l'éviter, le refroidissement devra être rapide. Dans le cas contraire, il faudra effectuer un traitement thermique d'adoucissement entre 750 °C et 850 °C suivi d'un refroidissement rapide à l'air ou à l'eau.

4.2 Formage à chaud des aciers austénitiques

Le **formage** à chaud des aciers austénitiques est pratiqué entre 950 °C et 1300 °C. Pour les opérations de **forgeage** proprement dites, les températures de début de l'opération de suite 1150 °C et 1250 °C et la température de fin de l'opération doit être supérieure à 900 °C. La forgeabilité est négativement affectée par la présence même faible (quelques dizaines de p.p.m.) d'éléments tels que le plomb, le bismuth, l'étain et l'antimoine. La présence d'un élément tel que le bore à des teneurs inférieures à 50 p.p.m. a par contre un effet favorable. L'addition de petites quantités (inférieures à 0,10 %) de *mish-metal* (alliage cérium-lanthane) a également un effet favorable.

Les cinétiques de chauffage et de refroidissement ont également une importance de premier ordre. Si les vitesses de chauffage et de refroidissement sont suffisamment rapides, le risque de formation de carbures de chrome entre 500 °C et 900 °C est quasi nul. Dans ces conditions, on admettra que le refroidissement est assimilable à une hypotrempe. Si tel n'est pas le cas, un traitement d'hypotrempe sera nécessaire. Il consiste en un chauffage et un maintien à 1100 °C suivi d'un refroidissement très rapide jusqu'à la température ambiante. Lors d'opérations à chaud telles que le **matricage** et l'**estampage**, il faut tenir compte de la grande rigidité à chaud des aciers austénitiques et donc dimensionner en conséquence les outils et les machines.

La **conformation** à chaud des aciers austénitiques par **pliage** et **emboutissage** est assez rare. On lui préfère pour des raisons évidentes (absence de dégradations de l'état de surface) la conformation à froid. Cependant, lorsque cela est nécessaire, on respectera les températures indiquées ci-dessus. Le chauffage étant généralement effectué à la flamme, on veillera à ce que celle-ci ne soit pas réductrice (risque de carburation) mais légèrement oxydante. On veillera également à ce que la surface du matériau ne soit pas contaminée par des corps organiques qui lors du chauffage peuvent provoquer une carburation localisée.

4.3 Formage à chaud des aciers austénoferritiques

Le formage à chaud doit impérativement être effectué à plus de 950 °C ; la limite supérieure étant de 1150 °C. Si la température a été maintenue entre 950 °C et 1150 °C pendant tout le formage et si le refroidissement qui a suivi a été rapide, il n'est pas nécessaire d'effectuer un traitement d'hypotrempe. Dans le cas contraire, il est indispensable de pratiquer ce traitement après chauffage et maintien à 1100 °C-1150 °C.

5. Assemblage

Les aciers inoxydables sont livrés sous la forme de demi-produits. Ce sont pour l'essentiel des produits plats (bobines, feuillards, tôles), des produits longs (barres, fils), des tubes et des pièces

moulées ou forgées. Ces demi-produits sont ensuite découpés, mis en forme puis assemblés par les utilisateurs ([M 4 540], § 1.3 *Les grands domaines d'utilisation*). L'assemblage constitue l'une des composantes majeures du processus de mise en œuvre.

5.1 Soudage

On pourra se reporter aux références [17] et [49].

Il existe un grand nombre de procédés de soudage pouvant être appliqués aux aciers inoxydables. Les principaux sont indiqués au tableau 9.

En regard de l'opération du soudage et plus particulièrement du procédé utilisé, les différents types d'acier inoxydable subissent des modifications structurales. Les recommandations qu'elles suggèrent sont résumées au tableau 10.

Tableau 9 – Principaux procédés de soudage appliqués aux aciers inoxydables

Procédés à l'arc électrique	Procédés par résistance et induction	Procédés par énergie de rayonnement
● Avec électrode réfractaire : — GTAW ou TIG ou WIG ; — PAW (plasma). ● Avec électrode fusible : — GMAW ou MIG ; — SMAW (électrode enrobée) ; — SAW (sous flux solide) ; — FCAW (fil fourré).	● Par résistance pure (effet Joule) : — par points ; — à la molette ; — par bossage. ● Par étincelage (soudage en bout) ● Par induction HF (haute fréquence) et MF (moyenne fréquence)	● Laser ● Par faisceau d'électrons
Les sigles utilisés dans ce tableau sont explicités dans les paragraphes suivants.		

Tableau 10 – Caractéristiques « métallurgiques » du joint soudé en fonction de la nuance d'acier inoxydable

Type de nuance d'acier inoxydable	Caractéristiques principales du joint soudé à l'état brut de soudage et recommandations
Martensitique 10,5 à 13 % Cr 0,10 à 0,5 % C	● Sensible à la fissuration martensitique (fonction des teneurs en carbone et hydrogène et du niveau de contrainte) en dessous de 400 °C environ, d'où les recommandations suivantes : — préchauffage (200 à 300 °C) généralement nécessaire ; — emploi de produits d'apport à bas hydrogène ; — postchauffage (300 °C) généralement nécessaire. ● Résistance à la rupture et dureté élevées sauf pour les nuances à bas carbone. ● Bonne ténacité en particulier pour les nuances à plus bas carbone.
Semi-ferritique 17 % Cr 0,04 % C	● Sensible à la fragilisation par grossissement du grain au-dessus de 1 150 °C (préchauffage interdit). ● Ténacité et ductilité médiocres (en particulier dans la zone thermiquement affectée – ZAT). ● Un traitement thermique postopératoire (800 °C environ) restaure les caractéristiques mécaniques et la résistance à la corrosion intergranulaire.
Ferritique 17 à 30 % Cr 0,02 % C Stabilisé : Ti Nb	● Sensible à la fragilisation par grossissement du grain au-dessus de 1 150 °C (préchauffage interdit). ● Ductilité correcte et ténacité améliorée par rapport aux nuances semi-ferritiques. ● Généralement insensible à la corrosion intergranulaire.
Austénitique 18 % Cr-8 % Ni 0,05 % C	Structure entièrement austénitique ● Sensible à la fissuration à chaud (se manifestant pendant la solidification). ● Bonne résistance à la corrosion intergranulaire pour les nuances stabilisées ou à bas carbone. ● Très bonne ténacité et très bonne ductilité. Structure austénitique avec quelques pour-cent de ferrite ● Insensible à la fissuration à chaud. ● Bonne résistance à la corrosion intergranulaire pour les nuances stabilisées ou à bas carbone. ● Risque de fragilisation par décomposition de la ferrite en phase σ entre 550 °C et 900 °C après des maintiens de longue durée pouvant être associés au soudage de tôles fortes (un maintien de 1 000 h à 650 °C est sensiblement équivalent à un maintien de 10 h à 750 °C).
Austénoferritique 22 % Cr-5 % Ni 3 % Mo-0,02 % C	● Structure austénoferritique insensible à la fissuration à chaud. ● Très bonne ténacité et bonne ductilité dans l'intervalle de température – 40 °C/ + 275 °C. ● Sensible à un phénomène de fragilisation (phase σ) après maintien entre 500 et 900 °C. ● Maintien de l'équilibre des phases ferrite/austénite par un refroidissement contrôlé.

5.1.1 Soudage à l'arc

5.1.1.1 Procédé GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) ou TIG (Tungsten Inert Gas) ou WIG (Wolfram Inert Gas)

Dans ce procédé, l'énergie nécessaire à la fusion du métal est fournie par un arc amorcé et entretenu entre une électrode réfractaire (alliage de tungstène) et la pièce à souder, au sein d'une atmosphère inerte (figure 14).

Le soudage des aciers inoxydables est toujours effectué en courant continu en polarité directe (pôle négatif du générateur relié à l'électrode). Dans ces conditions, c'est la pièce qui est soumise au bombardement électronique alors que l'électrode réfractaire ne s'use que très peu. Le soudage peut se faire manuellement (torche tenue à la main) ou de manière automatique. Le flux de gaz inerte qui protège la zone de l'arc de l'atmosphère ambiante permet d'obtenir un arc très stable.

En **soudage manuel**, c'est généralement l'argon pur qui est utilisé.

Les **mélanges argon-hélium** sont utilisés lorsque l'on recherche un compromis entre la stabilité de l'arc et la facilité d'amorçage donnée par l'argon, la pénétration, la vitesse de soudage et la compacité donnée par l'hélium. Les mélanges de ce type conviennent pour les **aciers inoxydables austénitiques, ferritiques et martensitiques**.

Les **mélanges argon-hydrogène** sont largement utilisés pour le soudage des **aciers inoxydables austénitiques**. Par contre, ils sont à proscrire pour le soudage des aciers inoxydables ferritiques, martensitiques et austénoferritiques car la présence d'hydrogène dans le bain de fusion peut provoquer une fragilisation du joint soudé.

Pour le **soudage sans métal d'apport** des **aciers inoxydables austénoferritiques**, on utilise souvent un **mélange argon-azote** à la torche afin de maintenir l'équilibre ferrite-austénite dans le joint soudé ; l'azote étant un puissant élément gammagène.

Pour le **gaz de protection envers**, c'est l'argon qui est le plus fréquemment utilisé. L'azote peut également être utilisé comme protection envers lors du soudage des aciers inoxydables austénoferritiques ou des aciers austénitiques lorsqu'on veut diminuer la teneur en ferrite à la racine du joint soudé.

Les produits d'apport éventuellement utilisés se présentent soit sous la forme de baguettes nues en soudage manuel, soit sous la forme de fil bobiné en soudage automatique.

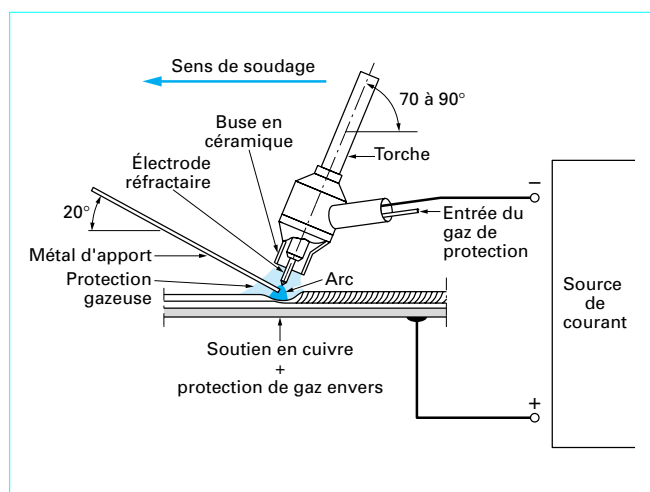


Figure 14 – Principe du soudage (manuel) à l'arc électrique avec électrode réfractaire (GTAW ou TIG), d'après [17]

Le procédé GTAW s'adapte bien au soudage automatique pour deux raisons essentielles :

- une usure faible de l'électrode ;
- un arc très stable.

Le problème de l'automatisation se ramène à déplacer l'arc le long du joint à une vitesse choisie et à maintenir sa vitesse constante. Dans tous les cas, il est essentiel d'avoir une préparation soignée des bords à assembler et, si on l'utilise, d'avoir une vitesse régulière d'amenée du fil d'apport.

5.1.1.2 Procédé Plasma PAW (Plasma Arc Welding)

Si le procédé plasma est dérivé du procédé GTAW, il présente une différence essentielle, c'est le confinement de l'arc. Grâce au confinement de l'arc électrique, on obtient une veine gazeuse ionisée (plasma) parfaitement conductrice du courant électrique. L'énergie disponible est donc fortement concentrée et les températures atteintes très élevées.

Le jet de plasma étant très étroit, il ne peut assurer une protection correcte du bain de fusion ; il est donc nécessaire de lui adjoindre une protection gazeuse annulaire de plus grand diamètre (figure 15).

Les gaz utilisés sont analogues à ceux employés avec le procédé GTAW, qu'il s'agisse du gaz plasmagène ou du gaz de protection dit aussi gaz annulaire.

Les mélanges hydrogènes sont recommandés pour le soudage des nuances austénitiques. Comme pour le soudage GTAW, ils sont à proscrire pour le soudage des nuances martensitiques, ferritiques et austénoferritiques. Pour ces dernières, il est recommandé d'ajouter de l'azote pour maintenir l'équilibre ferrite-austénite dans le joint soudé.

Par rapport au procédé GTAW, l'avantage essentiel du procédé plasma réside dans la remarquable stabilité de l'arc électrique. Cela se traduit par :

- un arc rigidifié qui permet de mieux maîtriser l'apport d'énergie ;
- une bonne tolérance aux variations de distance entre l'extrémité de la buse et la pièce sans modifier sensiblement la morphologie du cordon de soudure ;
- une zone affectée thermiquement (ZAT) plus étroite et des vitesses de soudage généralement plus élevées ;
- une plus grande tolérance vis-à-vis des défauts de préparation.

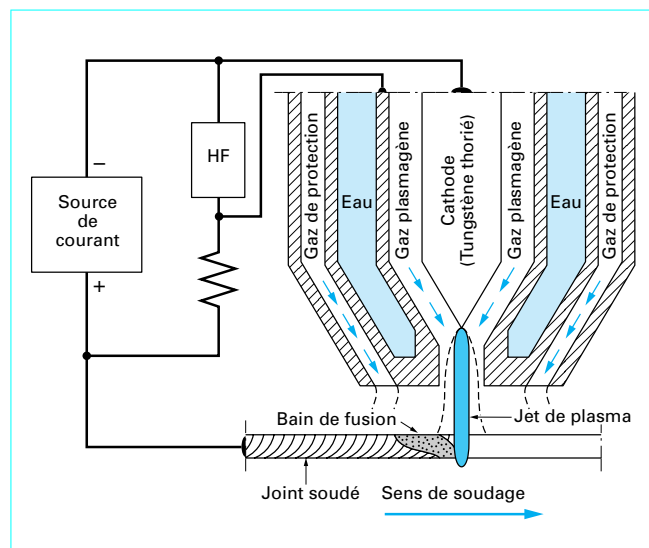
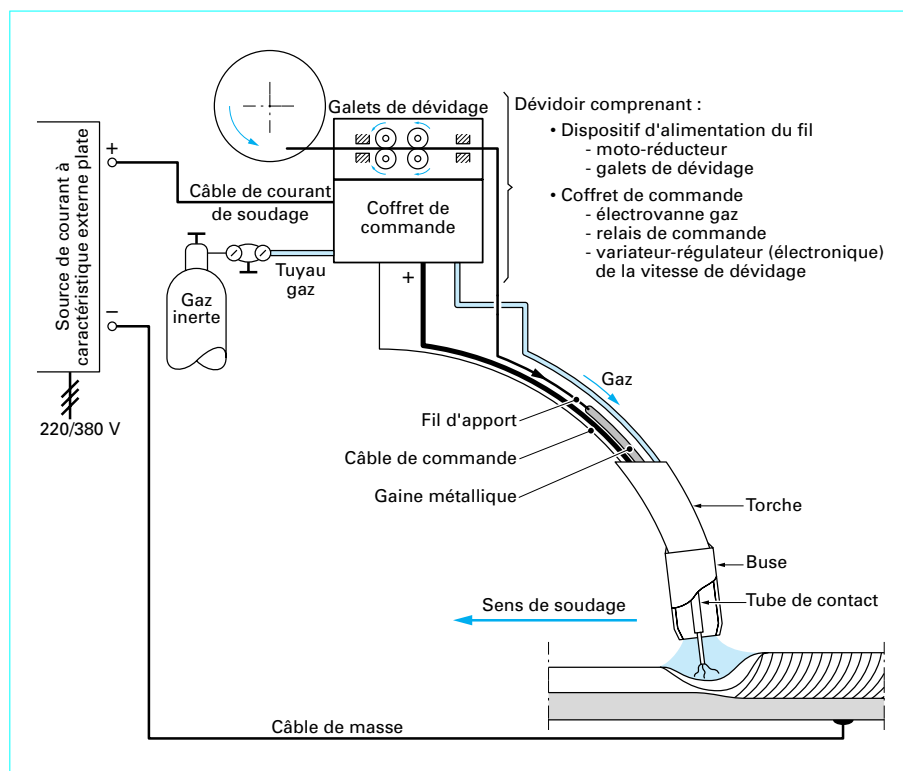


Figure 15 – Principe du soudage plasma (PAW), d'après [17]



5.1.1.3 Procédé GMAW (Gas Metal Arc Welding) ou MIG (Metal Inert Gas)

Dans ce procédé et contrairement au procédé GTAW, l'électrode est consommable. Il s'agit, en fait, d'un procédé à l'arc électrique sous protection gazeuse dans lequel l'arc est établi entre un fil électrode fusible et les pièces à assembler (figure 16).

Le soudage des aciers inoxydables s'effectue toujours en courant continu en polarité directe (pôle positif à l'électrode). Dans ces conditions, c'est le fil électrode qui est soumis au bombardement électronique. On favorise ainsi sa fusion.

La torche de soudage peut être tenue manuellement (procédé dit « semi-automatique ») ou fixée sur un chariot (procédé dit « automatique »).

Le **transfert du métal dans l'arc** est l'une des caractéristiques du procédé. On distingue essentiellement trois modes de transfert :

- le **transfert par court-circuit** : il est associé à de faibles densités de courant de soudage (25 A/mm^2). La fusion se fait par grosses gouttes dont la taille peut dépasser celle du fil d'électrode ;
- le **transfert en vol libre** avec fusion globulaire : il est associé à des densités de courant intermédiaires comme dans le cas précédent, la fusion se fait par grosses gouttes ;
- le **transfert par pulvérisation** : lorsqu'on atteint des densités de courant élevées, la fusion du fil se fait par fines gouttelettes.

Les **gaz de protection** utilisés doivent être inertes ou légèrement réducteurs, ou très légèrement oxydants. Les principaux mélanges gazeux sont :

- les **mélanges argon-oxygène** : l'oxygène, même pour de faibles teneurs, fait diminuer la tension superficielle du métal liquide et accroît la stabilité de l'arc. On observe alors un bon mouillage du cordon de soudure. Pratiquement, la teneur en oxygène est limitée à 2 % en volume ;
- les **mélanges argon-dioxyde de carbone** : le CO_2 , sur le transfert, des effets similaires à ceux de l'oxygène. Son pouvoir oxydant

étant beaucoup plus faible que celui de l'oxygène, sa teneur maximale dans le mélange peut atteindre 3 % en volume. On montre, par ailleurs, que l'enrichissement en carbone qu'il provoque dans le métal déposé reste inférieur à 0,01 % pour cette même valeur de 3 % ;

- les **mélanges argon-dioxyde de carbone-hydrogène** : ces mélanges ont une composition moyenne en volume de 95 % Ar, 3 % CO_2 et de 2 % H_2 . Ils procurent une excellente stabilité de l'arc et ne provoquent pas d'enrichissement significatif en carbone. Par contre, leur teneur en hydrogène est suffisamment élevée pour déconseiller leur emploi pour le soudage des aciers inoxydables martensitiques et ferritiques ;

- les **mélanges argon-oxygène-azote** et **argon-dioxyde de carbone-azote** : lors du soudage des aciers austénitiques à l'azote et des aciers inoxydables austénoferritiques, on peut ajouter de l'azote pour minimiser les pertes en azote dans le métal fondu. Pour ces derniers, on connaît le rôle important que joue l'équilibre austénite/ferritique de la structure.

5.1.1.4 Procédé fil fourré : FCAW (Flux Cored Arc Welding)

L'une des variantes du procédé GMAW est le soudage avec fil fourré. Ce dernier est constitué par une gaine en acier inoxydable (enveloppe) à l'intérieur de laquelle on a introduit un flux solide dont les rôles sont analogues à ceux de l'enrobage d'une électrode enrobée pour soudage manuel (figure 17).

L'intérêt majeur du procédé « fil fourré » est de réunir les avantages de l'électrode enrobée (présence d'un laitier) et ceux inhérents à un procédé automatique ou semi-automatique à haute productivité grâce au dévidage continu du fil constituant l'électrode.

On notera enfin que, si une protection gazeuse est toujours associée au procédé GMAW, certains fils fourrés fonctionnent sans protection gazeuse d'origine externe ; c'est le flux du fil fourré qui la génère, d'où le terme quelquefois utilisé : fil fourré *autoprotégé*.

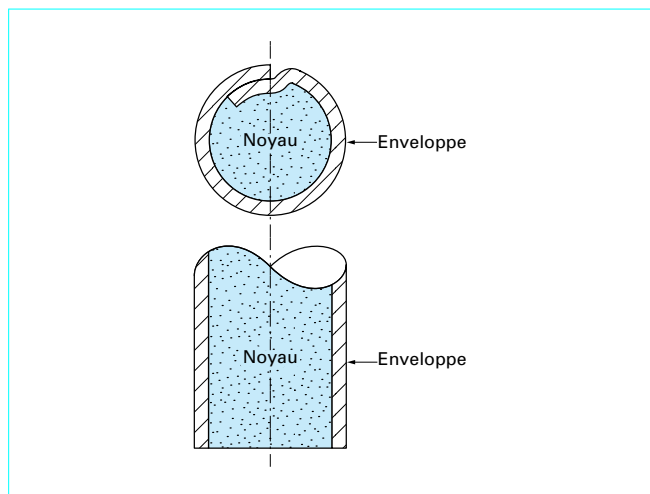


Figure 17 – Principe du soudage avec fil fourré

5.1.1.5 Procédé à l'arc sous flux solide : SAW (Submerged Arc Welding)

Il est presque exclusivement utilisé en soudage automatique dans lequel un ou plusieurs fil électrodes sont mis en fusion sous la protection d'un flux en poudre entrant en fusion lui aussi et recouvrant complètement le bain de soudage sous la forme d'un laitier (figure 18).

Le courant de soudage est généralement continu, le pôle positif étant relié au fil électrode (polarité inverse).

Le choix du flux de soudage est important.

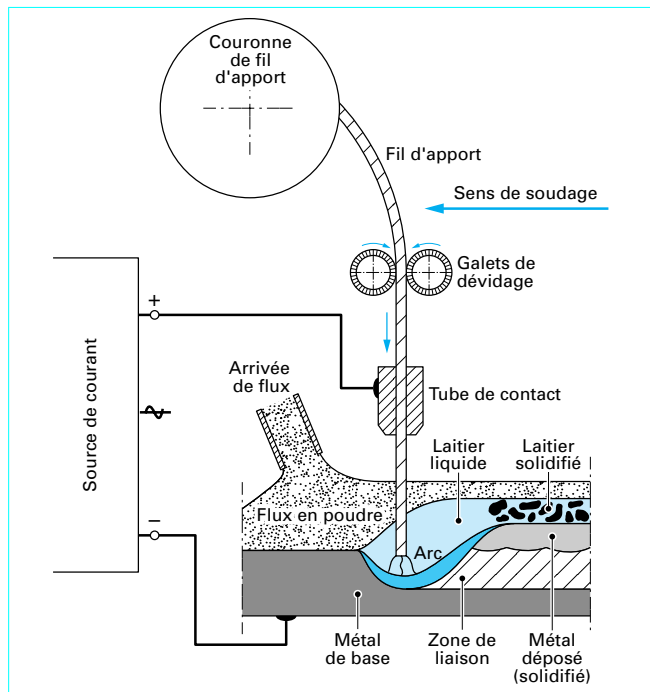


Figure 18 – Principe du soudage à l'arc électrique sous flux solide (SAW), d'après [17]

Pour les aciers inoxydables, on utilise généralement des flux basiques dont la composition type est :

$25 \% < \text{CaO} + \text{MgO} < 40 \%, \text{SiO}_2 < 15 \% \text{ et } 20 \% < \text{CaF}_2 < 35 \%$.

Le transfert des éléments du fil d'apport dans le bain de soudage est fonction de l'indice de basicité du laitier. Plus cet indice sera élevé et plus le transfert des éléments d'alliage sera grand. Avec les flux à faible indice de basicité, l'oxydation du chrome peut atteindre 30 %, alors qu'avec les flux fortement basiques elle reste inférieure à 10 % et peut être facilement compensée par des ajouts de ferrochrome dans le flux (flux chromisant). Le nickel et le molybdène, éléments peu oxydables, ont un bon coefficient de transfert dans l'arc électrique.

Le procédé sous flux solide s'appliquant surtout aux tôles de forte épaisseur en acier inoxydable austénitique, on veillera à éviter la formation de phase σ due notamment à l'utilisation de fortes énergies de soudage. Cela est particulièrement vrai pour les nuances austénitiques à forte teneur en chrome et/ou à teneur élevée en ferri-

5.1.1.6 Procédé à l'arc électrique avec électrode enrobée : SMAW (Shielded Metal Arc Welding)

L'électrode enrobée est constituée par une âme métallique centrale autour de laquelle est disposé concentriquement l'enrobage (figure 19). Le plus généralement, l'âme est constituée par un fil plein en acier inoxydable, dans certains cas particuliers, l'âme peut être constituée par un fil fourré ou un fil en acier doux (électrodes dites *synthétiques*). L'enrobage des électrodes contient des oxydes complexes, des fondants et des carbonates intimement mélangés puis agglomérés à l'acide de silicates alcalins. Par dissociation à haute température des carbonates, il est possible de générer une protection gazeuse tandis que les oxydes sous la forme d'un laitier participent aux réactions d'affinage du bain de fusion.

Les électrodes à enrobage rutile (TiO_2) peuvent s'employer en courant alternatif et en courant continu, tandis que les électrodes à enrobage basique s'utilisent surtout en courant continu polarité inverse (pôle positif à l'électrode).

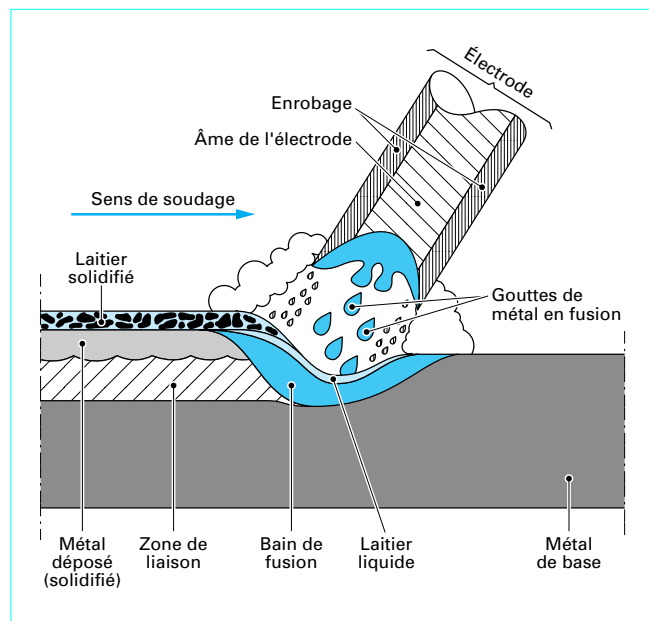


Figure 19 – Principe du soudage à l'arc électrique avec électrode enrobée (SMAW), d'après [17]

5.1.2 Soudage électrique par résistance

5.1.2.1 Soudage par résistance par points : RSW (Resistance Spot Welding)

Ce procédé est bien adapté au soudage des tôles inoxydables minces quelle que soit leur nuance. Compte tenu des efforts à appliquer aux électrodes, elles seront faites en alliage cuivre-béryllium qui offre le meilleur compromis entre une faible résistivité électrique et des caractéristiques mécaniques élevées.

La formation du point de soudure ou noyau (figure 20) est fonction de l'intensité du courant de soudage, du temps de soudage et de l'effort de serrage entre les électrodes.

L'énergie nécessaire à la formation du point de soudure est donnée par la relation :

$$W = RI^2t$$

expression dans laquelle :

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5$$

représente la résistance du circuit appliquée au secondaire du transformateur :

avec R_4 et R_5 résistances des tôles à assembler, dépend de leur résistivité,

R_2 résistance de contact entre les deux tôles, dépend de l'état de surface et de l'effort de serrage F ,

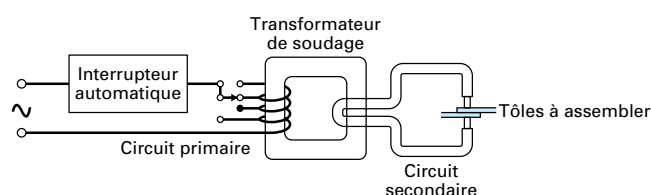
R_1 et R_3 résistances de contact entre tôles et électrodes.

Les paramètres de soudage doivent être optimisés en fonction de l'état de surface des tôles (décapé, glacé, recuit brillant) qui conditionne pour une part importante la résistance électrique à l'interface. Cette dernière va jouer un rôle déterminant dans l'initiation du noyau fondu. Si la procédure de soudage est bien maîtrisée, il est possible de contrôler la pénétration (hauteur du noyau) et de limiter l'importance de la zone affectée thermiquement (ZAT) de façon à ne pas altérer la surface de la tôle.

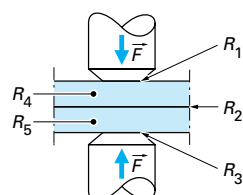
5.1.2.2 Soudage électrique par résistance à la molette : SW (Seam Welding)

Le soudage par résistance à la molette, dérivé du soudage par points, répond à l'exigence de réaliser une soudure par un procédé en continu. La différence essentielle, par rapport au soudage par points, réside dans la forme des électrodes (molettes) et par l'adjonction d'un dispositif de mise en rotation de ces dernières (figure 21). Par rapport au soudage par points dont les paramètres de base sont l'intensité du courant de soudage, l'effort de serrage entre électrodes et le temps de soudage, il faut ajouter dans le soudage à la molette : la modulation ou pulsation du courant de soudage et la vitesse de soudage, c'est-à-dire la vitesse linéaire des molettes entraînant le déplacement des tôles.

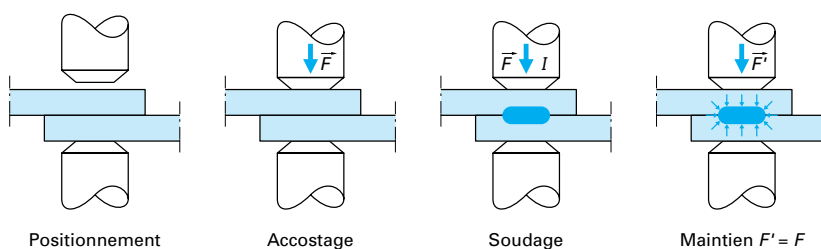
L'alliage le plus utilisé pour réaliser les molettes est à base de cuivre avec addition de cobalt et de béryllium pour en améliorer les caractéristiques mécaniques.



(a) schéma général



(b) résistances de contact au droit ou sous les électrodes



(c) séquence ou cycle de soudage

Figure 20 – Principe du soudage électrique par résistance par points, d'après [17]

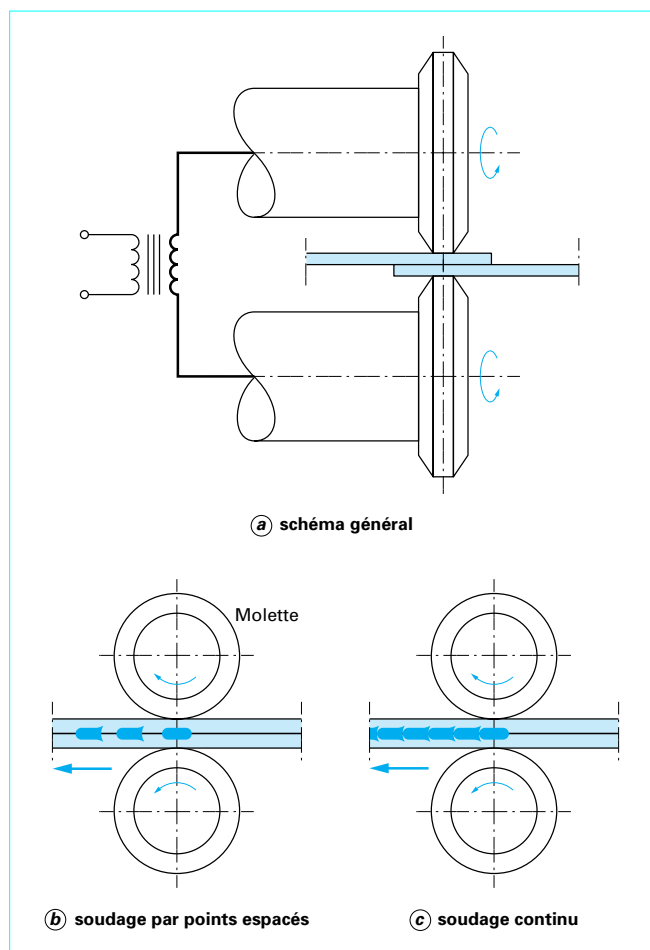


Figure 21 – Principe du soudage électrique par résistance à la molette, d'après [17]

Qu'il s'agisse du soudage par points ou à la molette, les avantages principaux sont :

- une étendue limitée des zones affectées thermiquement ;
- une oxydation superficielle quasi nulle si les tôles sont correctement refroidies (par un ruissellement d'eau froide) ;
- une déformation très réduite des tôles après soudage.

5.1.2.3 Soudage en bout par résistance pure : UW (Upset Welding)

Ce procédé concerne essentiellement les produits longs : fils, barres, tubes et profilés.

La soudure est obtenue exclusivement par effet Joule, ce qui implique un excellent contact entre les deux faces à assembler. Les deux pièces à souder sont serrées dans des mâchoires qui servent également de connexion pour l'amenée du courant (figure 22). Lorsque l'échauffement à l'interface, produit par effet Joule, est suffisant, on applique entre les deux mâchoires (fixe et mobile) un effort de refoulement de manière à réaliser une soudure par forgeage. L'effort de refoulement étant important, il est nécessaire que les pièces aient une rigidité suffisante pour éviter tout flambement.

5.1.2.4 Soudage en bout par étincelage : FW (Flash Welding)

Si, contrairement au cas précédent, les faces à assembler sont assez irrégulières, le courant débité par des points de contact en

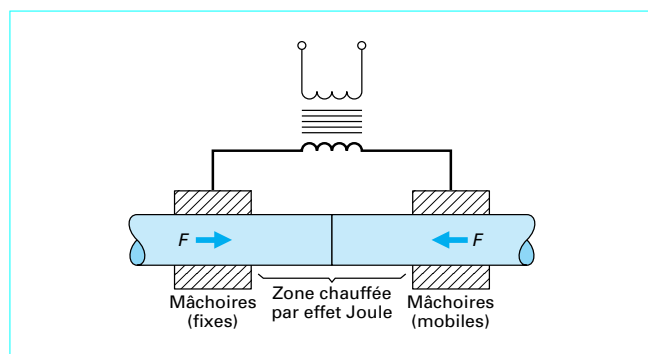


Figure 22 – Principe du soudage électrique en bout par résistance pure, d'après [17]

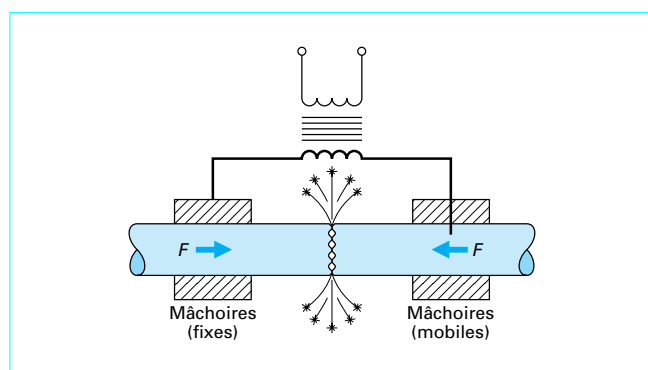


Figure 23 – Principe du soudage électrique en bout par étincelage, d'après [17]

nombre limité sont le siège de très fortes densités de courant. Ces contacts initiaux fondent rapidement par effet Joule et amorcent une série d'arcs repoussant violemment le métal fondu vers l'extérieur du joint ; c'est le phénomène d'étincelage (figure 23).

5.1.3 Soudage par induction : HFIW (High Frequency Induction Welding)

Le soudage par induction haute fréquence s'applique essentiellement à la fabrication de tubes selon la technique dite « roulé », « soudé ». La fabrication qui s'effectue au défilé comprend une ligne de formage multigalet et un dispositif de soudage (figure 24). À la sortie de la dernière cage de formage, le tube présente une fente qui va être fermée après son passage dans la tête de soudage. La formation du joint soudé est obtenue par contact solide/solide, par rapprochement, avec fusion intermédiaire.

Ce procédé de soudage à haute productivité s'est essentiellement développé pour fabriquer des tubes en acier inoxydable ferritique X2CrTi12/1.4512 car il permet d'éviter tout grossissement du grain auquel ces nuances sont sensibles. Le forgeage pratiqué au moment du rapprochement par les deux galets de soudage va permettre l'expulsion des oxydes qui se sont formés sur la rive du feuillard pendant le chauffage, même si ce dernier est quasi instantané. Cela implique une excellente stabilité de la géométrie du vè, une pression de forgeage et une impédance électrique constantes. Si tel n'est pas le cas, on observe sur une coupe longitudinale du joint soudé des zones alternées de « bonnes » soudures et de zones « froides » (figure 25) ; ces dernières contiennent généralement des oxydes sous forme de plaquettes. Elles constituent des zones de moindre résistance pouvant occasionner des ruptures lors de la conformation des tubes.

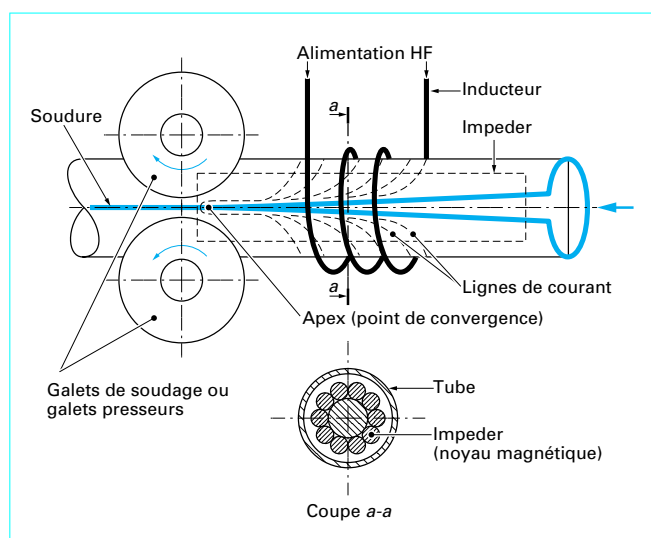


Figure 24 – Principe du soudage par induction, d'après [17]

Suivant le diamètre (30 à 70 mm) et l'épaisseur des tubes, les puissances nécessaires sont comprises entre 150 et 300 kW et la vitesse de soudage va de 50 à 90 m/min.

5.1.4 Soudage par faisceau laser : LBW (Laser Beam Welding)

La possibilité de réaliser sans contact un apport d'énergie de densité élevée sur une surface très réduite est apparu intéressant pour les applications dans le domaine du soudage. C'est ce que permet notamment le procédé laser. De plus, il ne nécessite pas la réalisation d'un vide comme c'est généralement le cas en soudage par faisceau d'électrons.

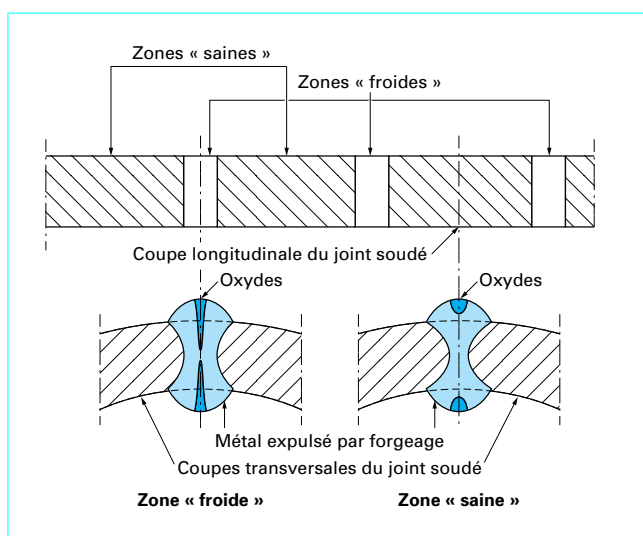


Figure 25 – Coupes longitudinales et transversales d'un tube soudé par induction haute fréquence présentant une alternance de zones saines et de zones froides

La majorité des sources utilisées en soudage sont les lasers à dioxyde de carbone (figure 26) et les lasers YAG (yttrium-aluminium-garnet).

Les lasers YAG sont généralement utilisés pour le soudage d'aciers inoxydables minces (épaisseur < 1,5 mm) en régime pulsé. Les lasers CO₂ sont bien adaptés au soudage des aciers inoxydables d'épaisseur moyenne (1,5 mm < e < 6,0 mm).

Cela concerne le rabotage de flans de différentes épaisseurs, le soudage de viroles et la fabrication de tubes.

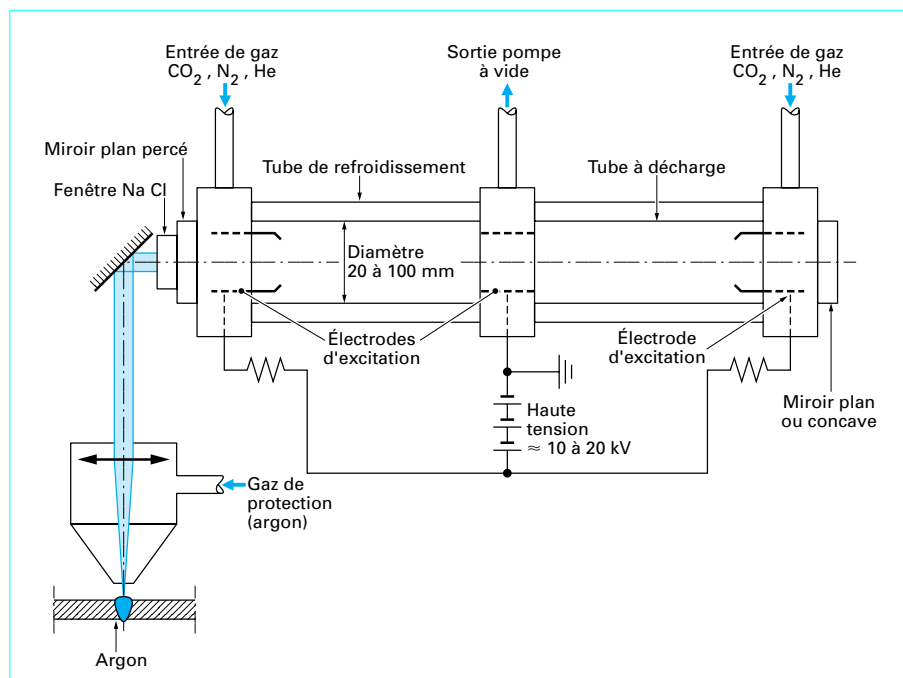


Figure 26 – Principe du laser à dioxyde de carbone (CO₂, N₂, He) utilisé en soudage, d'après [17]

5.2 Brasages fort et tendre

Le brasage est une opération qui consiste à assurer l'assemblage de pièces métalliques en utilisant un produit d'apport dont la température de fusion est nettement inférieure à celle des métaux de base. On distingue :

— le **brasage tendre** (improprement appelé soudage à l'étain) qui est réalisé avec une brasure dont la température de fusion est inférieure à 450 °C ;

— le **brasage fort** qui est réalisé avec une brasure dont la température est supérieure à 450 °C. Le métal de base restant à l'état solide et le produit d'apport ou brasure étant porté à l'état liquide, il est absolument nécessaire que la brasure à l'état fondu mouille parfaitement le métal de base (figure 27)

La présence de la couche passive sur les aciers inoxydables s'opposant au mouillage de la brasure, on a recours à des fours sous vide, à des fours sous atmosphère contrôlée. Si l'atmosphère est légèrement oxydante, on utilisera un flux approprié capable de dissoudre l'oxyde de chrome. Il faudra alors, après l'opération de brasage, éliminer soigneusement les résidus de flux dont le caractère corrosif est connu.

5.2.1 Brasage fort

Les principaux alliages utilisés pour le brasage fort des aciers inoxydables sont :

— les alliages à base d'argent avec addition de cuivre, zinc, cadmium et nickel avec lesquels les températures de brasage sont comprises entre 620 et 900 °C ;

— les alliages à base de nickel avec addition de chrome, silicium et bore avec lesquels les températures de brasage sont comprises entre 1 070 et 1 200 °C.

Le choix de l'alliage se fera en fonction de la forme du joint et du jeu admissible, de la résistance mécanique, du moyen de chauffage et, évidemment, de considérations économiques.

La conception du joint a également une grande importance. Autant que faire ce peut, il faut concevoir des joints de manière à ce que l'assemblage ne soit sollicité qu'au cisaillement.

De plus, il est souhaitable de limiter les jeux. Les valeurs pour des jeux faibles vont de 0,05 à 0,10 mm. Dans ces conditions, les résistances au cisaillement vont de 200 à 250 N/mm² pour les brasures à base de nickel.

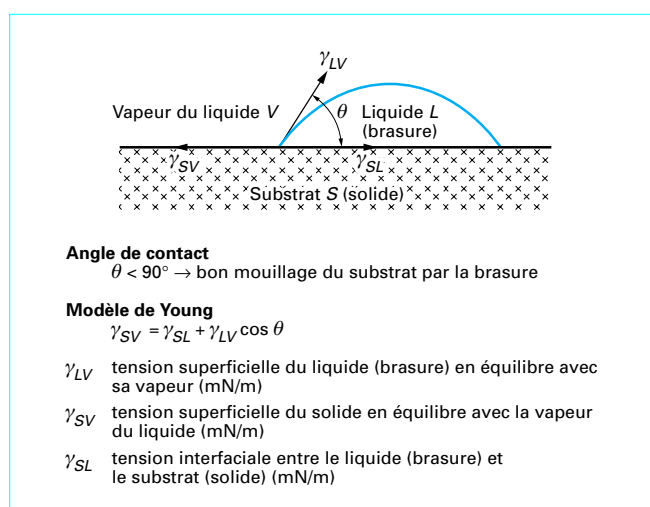


Figure 27 – Mouillage du substrat par la brasure, d'après [17]

La technique de chauffage est déterminée en fonction du type d'assemblage à réaliser et par des considérations économiques. Quelle que soit la technique retenue, il est recommandé d'**observer les deux règles de base** suivantes :

— le chauffage doit être rapide pour obtenir une fusion homogène de la brasure de manière à éviter tout phénomène de « liquation » et également toute modification structurale des matériaux à assembler ;

— le joint à assembler doit être porté à une température uniforme légèrement supérieure à celle du point de fusion de la brasure utilisée.

■ Les **principaux types de chauffage** utilisés sont :

● Chauffage au chalumeau

Les pièces à assembler devront être protégées par un flux pour éviter l'oxydation du métal de base ;

● Chauffage par induction

Le chauffage par induction permet un chauffage rapide des métaux de base et de la brasure dont la durée est de l'ordre de 30 s. Pour être efficace, la forme de l'inducteur doit être bien adaptée à celle des pièces à assembler. Le courant induit par l'inducteur provoque, par effet Joule, le chauffage de la pièce. La profondeur de la zone chauffée est fonction de la fréquence. Elle est donnée par la relation :

$$P = K (\varphi / \mu f)^{1/2}$$

avec P la profondeur de la zone chauffée,
 K une constante,
 φ la résistivité,
 μ la perméabilité,
 f la fréquence.

L'inducteur peut être alimenté par un courant de plusieurs dizaines de kilohertz (moyenne fréquence – MF) ou un courant de plusieurs centaines de kilohertz (haute fréquence – HF). Le chauffage par induction MF est mieux adapté aux pièces de masse moyenne ou élevée alors que le chauffage par induction HF est mieux adapté aux pièces de faible masse.

Le chauffage peut s'effectuer dans l'air avec des brasures dont la température de fusion est relativement basse. Dans ce cas, il est nécessaire d'utiliser un flux protecteur et décapant dont il faudra impérativement éliminer les résidus. Le chauffage peut également s'effectuer dans une atmosphère protectrice pour minimiser l'oxydation.

● Chauffage au four

Les aciers inoxydables austénitiques (alliages fer-chrome-nickel) se brasent facilement à l'aide de produits d'apport à base d'argent ou de nickel. Les aciers inoxydables ferritiques (alliages fer-chrome) se brasent couramment avec des produits d'apport de type argent-cuivre-étain-nickel ou argent-cuivre-zinc-nickel.

Dans le four à moufle ou à passage, la chaleur est fournie par la combustion d'un gaz ou électriquement par effet Joule. Afin d'éviter l'oxydation de l'acier inoxydable, l'opération de brasage se fait sous atmosphère contrôlée, sous vide (10^{-3} à 10^{-4} Pa) ou sous une atmosphère réductrice composée d'hydrogène ou d'ammoniac craqué (mélange N_2-H_2) sec. Les atmosphères réductrices doivent avoir un point de rosée de – 55 °C au minimum et si possible de – 70 °C. Suivant le produit d'apport utilisé, la température du four peut aller de 600 à 1 200 °C avec une montée de l'ordre de 15 à 20 °C/min. Le refroidissement s'effectue d'abord sous vide puis de manière accélérée sous atmosphère neutre ou réductrice pour éviter l'oxydation. Dans tous les cas, on ne maintiendra pas la pièce à la température de brasage plus longtemps qu'il n'est nécessaire pour réaliser le joint brasé, c'est-à-dire un bon mouillage de la brasure sur le métal de base.

5.2.2 Brasage tendre

Pour le brasage tendre des aciers inoxydables, on utilise essentiellement deux types de brasage. La première est de l'étain quasi pur dont le point de fusion est d'environ 230 °C, la seconde est un alliage étain-argent dont l'intervalle de fusion est 215-225 °C.

Le chauffage est généralement réalisé à l'aide d'un fer (appelé improprement fer à souder).

Les alliages inoxydables austénitiques de type 18 % Cr-9 % Ni présentent une excellente aptitude au brasage tendre, les aciers ferritiques à 17 % Cr nécessitent une préparation de surface. Comme dans tout phénomène de mouillage, le fini de surface joue un rôle important. Le fini décapé (fini N° 1 ou fini 2D) présente une meilleure aptitude que le fini glacé (fini 2B) et a fortiori que le recuit brillant (fini 2R). Il existe certains types de finis à rugosité contrôlée qui facilitent le mouillage de la brasure.

Pour aider à l'opération de brasage tendre, il est nécessaire d'utiliser un flux. Ceux à base d'acide orthophosphorique donnent de bons résultats. Par contre, il faut proscrire ceux contenant des chlorures. Dans tous les cas, après l'opération de brasage, il est indispensable de bien rincer les surfaces à l'eau claire de manière à éliminer tout résidu de flux.

5.3 Collage

5.3.1 Intérêt du collage

Le collage est une technique d'assemblage complémentaire aux fonctions « mécaniques » (boulonnage, vissage, rivetage, clinchage...). De plus, elle s'applique bien aux produits minces en acier inoxydable pour lesquels l'aspect de surface ne doit pas être altéré. Enfin, l'opération de collage n'induit ni modifications structurales de l'alliage ni modifications géométriques du joint à réaliser.

À ces avantages, on doit concéder des caractéristiques mécaniques des joints collés plus faibles que celles des joints soudés ou brasés. La résistance au cisaillement d'un joint collé varie de 1 à 30 N/mm² alors que celle d'un joint brasé varie de 200 à 350 N/mm² et que celle d'un joint soudé est de l'ordre de 500 N/mm².

Pour qu'il puisse réellement participer à la résistance mécanique d'une jonction, un joint collé devra être à recouvrement et n'être sollicité qu'en traction-cisaillement.

5.3.2 Adhésion. Préparation de surface

Il existe de nombreuses théories relatives au mécanisme d'adhésion. Aucune de ces théories n'explique à elle seule le phénomène d'adhésion. Il semble cependant que la théorie mécanique basée sur l'ancrage de la colle dans les microaspérités de la surface ainsi que la théorie thermodynamique soient les plus représentatives des phénomènes observés.

Comme dans le cas du brasage (figure 27), la condition préalable à un bon collage est le mouillage du substrat par l'adhésif. L'aptitude d'une colle à mouiller une surface dépend de la valeur des tensions superficielles de la colle ou adhésif ($\gamma_{\text{adhésif}}$) et du substrat (γ_{substrat}). Pour bien mouiller le substrat, il faut que les tensions superficielles de l'adhésif et du substrat répondent à l'inégalité :

$$\gamma_{\text{substrat}} > \gamma_{\text{adhésif}}$$

La préparation des surfaces avant collage a pour but d'obtenir un bon mouillage. Pour ce faire, on peut avoir recours à plusieurs techniques qui pour l'essentiel sont : la préparation mécanique, le nettoyage et le traitement chimique. Le traitement mécanique a pour but d'augmenter la rugosité et donc l'ancrage mécanique de la colle.

La **préparation mécanique** consiste généralement en un sablage à l'aide de particules abrasives (silice, alumine) ou une abrasion à l'aide de bandes ou de roues abrasives. L'abrasif lui-même pouvant être à base d'alumine (corindon), de carbure de silicium (carborundum) ou d'oxyde de zirconium. Après l'opération de sablage ou d'abrasion, il est nécessaire d'éliminer tout résidu d'abrasif.

La **préparation de surface** peut se limiter à un nettoyage destiné à éliminer les éléments étrangers ayant contaminé la surface de l'acier inoxydable. Pour ce faire, on utilise soit un dégraissage dans des bains alcalins chauds, soit un dégraissage aux solvants. Dans les deux cas, l'opération de nettoyage sera suivie d'un rinçage abondant à l'eau pure.

Les **traitements chimiques** sont essentiellement de deux types :

- décapage en bain acide qui peut être de type fluonitrique ;
- décapage et traitement d'anodisation en milieu nitrique ou sulfochromique.

5.3.3 Conception des assemblages collés

Pour réaliser un assemblage collé donnant une bonne tenue en service, il faut observer plusieurs règles de base. L'**assemblage ne doit être soumis qu'à des contraintes de traction-cisaillement**, voire de compression. Il faut donc **proscrire** toutes les sollicitations en **pelage** ou en **clivage**. Il faut déterminer l'aire des surfaces de collage de manière à avoir un recouvrement suffisant. Pour les colles à « haute performance », le recouvrement peut être limité de 15 à 30 fois l'épaisseur des substrats métalliques. Pour les autres colles, le recouvrement sera de l'ordre de 100 fois.

Si l'on désigne par e (mm) l'épaisseur de substrats, R_p (N/mm²) leur limite d'élasticité et τ (N/mm²) la résistance au cisaillement de l'adhésif, la **longueur de recouvrement** sera donnée par la formule :

$$L = R_p e / \tau$$

Exemple : pour les substrats en acier inoxydable austénitique X5CrNi18-10/1.4301 de 0,5 mm d'épaisseur et pour une colle dont la résistance au cisaillement est de 20 N/mm², la longueur de recouvrement est :

$$L = 320 \times 0,5 / 20 = 8 \text{ mm.}$$

Il faut également optimiser l'épaisseur des substrats métalliques et celle du joint de colle sur le plan de la tenue mécanique, de manière à ce que la résistance du joint collé soit bien adaptée aux contraintes de service et éviter tout effet de clivage. Pour les colles à hautes caractéristiques mécaniques (colles époxydiques), l'épaisseur du joint de colle sera de l'ordre de 0,2 mm. Par contre, avec certains adhésifs souples, notamment les mastics, une épaisseur de 2,0 mm est courante.

5.3.4 Caractéristiques mécaniques des joints collés

La caractéristique mécanique principale d'un joint collé est sa résistance à la rupture. Pour être prise en compte, elle devra toujours être de type cohésif (c'est-à-dire dans le joint de colle) par rapport à une rupture adhésive se produisant à l'intervalle métal/adhésif.

Avec différents types de colles et adhésifs, on a obtenu, avec de l'acier inoxydable austénitique X5CrNi18-10/1.4301 de fini 2B dont la rugosité R_a allait de 0,03 à 0,2 μm , les résultats notés dans le tableau 11.

Tableau 11 – Résultats obtenus pour différents types de colles et adhésifs avec de l'acier inoxydable austénitique X5CrNi18-10/1.4301 de fini 2B (Ra de 0,03 à 0,2 µm)

Colle ou adhésif	Temps de collage	Résistance au cisaillement	Épaisseur du joint de colle ou remarque
Colle acrylique	Réticulation à la température ambiante pendant une durée minimale de 20 min	13 N/mm ² quelle que soit la préparation de surface (1)	(1) L'épaisseur du joint de colle étant de 200 µm
Colle polyuréthane	Réticulation à la température ambiante pendant une durée minimale de 2 h sous pression de contact, ou 48 h sans pression de contact	12 N/mm ² avec un primaire d'accrochage (2)	(2) Les valeurs les plus courantes avec ce type de colle ne sont habituellement que de l'ordre de 2 N/mm ²
Adhésifs époxydiques	À la température ambiante, la durée de réticulation va de 48 h à plusieurs jours. À des températures comprises entre 100 et 170 °C, la durée de réticulation est réduite à quelques dizaines de minutes	30 N/mm ² (3)	(3) Pour des joints dont l'épaisseur est de l'ordre de 0,2 mm
Mastics (polyuréthanes, silicones)		1 à 3 N/mm ² (4)	(4) Ces adhésifs permettent de réaliser des joints collés épais, c'est-à-dire dont l'épaisseur est supérieure au millimètre

5.4 Assemblages mécaniques

Les procédés d'assemblage, autres que le soudage, le brasage et le collage appliqués aux aciers au carbone sont transposables aux aciers inoxydables. Par contre, il est indispensable de s'assurer que les surfaces en contact ne vont pas engendrer un phénomène de corrosion galvanique. Pour l'éviter, il est nécessaire que les pièces à assembler soient réalisées dans la même nuance d'acier inoxydable ou à défaut que le potentiel libre entre les deux matériaux n'excède pas 50 mV (cf. [M 4 451], § 1.5.1 *Résistance à la corrosion galvanique*). Par ailleurs, il faut veiller, dans ce type d'assemblage, à l'équilibre des surfaces anodiques et cathodiques ; une surface anodique faible ayant un effet aggravant.

5.4.1 Visserie. Boulonnerie

La visserie en acier inoxydable est fabriquée dans les principales nuances ; les aciers martensitiques à 13 % de chrome étant utilisés lorsqu'on désire une très grande résistance mécanique.

Les différents produits (vis et boulons) sont fabriqués suivant trois procédés : par décolletage (c'est-à-dire par usinage), par déformation à froid (frappe et extrusion plus frappe) et par matriçage à chaud.

Il faut également noter que la visserie et la boulonnerie réalisées par déformation à froid permettent d'obtenir, avec certains aciers inoxydables ayant une capacité de consolidation élevée, des caractéristiques mécaniques de type haute résistance.

5.4.2 Rivetage

Le rivetage est presque exclusivement réalisé à froid à l'aide de rivets dont le diamètre maximal est de l'ordre de 5,0 mm.

Les principaux produits sont majoritairement en acier austénitique, ils sont livrés sous la forme de rivets pleins à têtes rondes, de rivets tubulaires et de rivets tubulaires POP lorsque l'une des deux faces n'est pas accessible.

Il est vivement conseillé de concevoir les assemblages de manière à faire travailler les rivets au cisaillement et donc d'éviter toute sollicitation en traction.

5.4.3 Clinchage

Le clinchage est une technique d'assemblage assez récente qui peut, dans certains cas, se substituer avantageusement au rivetage ou au soudage par points. Le principe en est donné à la figure 28.

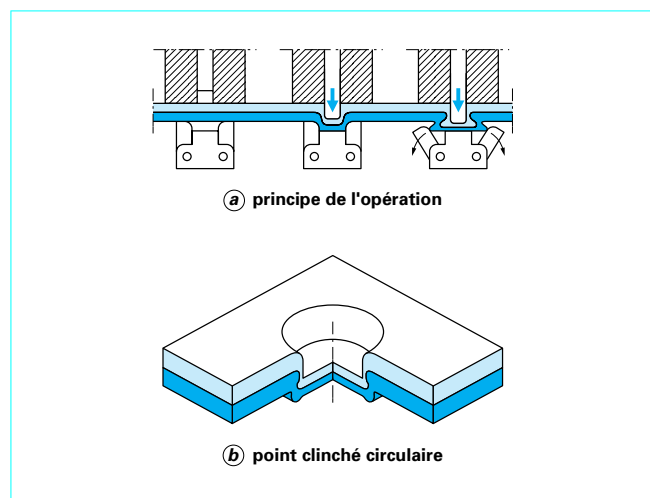


Figure 28 – Principe du clinchage

Compte tenu de leur grande capacité de déformation, il s'applique bien aux aciers inoxydables. Comme il s'agit d'un procédé « à froid », il n'engendre ni modification de la structure ni altération de l'état de surface. L'assemblage se faisant avec un recouvrement des tôles, il peut engendrer la formation d'un espace confiné propice à initier un phénomène de corrosion caverneuse. Pour prévenir ce risque, on l'associe souvent à un collage qui permet d'obtenir un joint étanche.

Ce type d'assemblage a été réalisé avec des nuances ferritiques X2CrTi12/1.4512 et X6Cr17/1.4016 et austénitiques X5CrNi18-10/1.4301. Les épaisseurs maximales sont de l'ordre de 1,5 mm pour les nuances ferritiques et de 1,0 mm pour les nuances austénitiques. Pour ces dernières, les outillages doivent être conçus en tenant compte du retour élastique. En ce qui concerne l'effort au poinçon, il sera, par rapport à l'acier doux, 1,5 fois plus élevé avec l'acier inoxydable ferritique X6Cr17/1.4016 et 2 fois plus élevé avec l'acier inoxydable austénitique X5CrNi18-10/1.4301.

5.4.4 Sertissage

Il s'agit d'un mode d'assemblage dans lequel l'une ou les deux extrémités des tôles à assembler sont pliées à 180 °C pour réaliser

l'assemblage. Le principe du sertissage simple ou double est donné à la figure 29. Pour le réaliser on utilise, le plus souvent, un roulage avec un outillage à galets.

Comme le clinchage, il permet de réaliser des assemblages hétérogènes, par exemple celui d'une pièce en acier inoxydable austénitique X5CrNi18-10/1.4301 fortement emboutie sur une pièce en acier inoxydable ferritique X6Cr17/1.4016 peu conformée et dont la résistance à la corrosion vis-à-vis du milieu est suffisante.

5.4.5 Dudgeonnage

Le dudgeonnage appelé aussi mandrinage consiste à fixer de manière rigide et étanche l'extrémité d'un tube d'échangeur dans l'alésage d'une plaque tubulaire (figure 30).

Les tubes en acier inoxydable utilisés dans des opérations de dudgeonnage appartiennent non seulement à la famille des austénitiques, mais à celle des ferritiques de types X3CrTi17/1.4510 (évaporateurs de sucreries) et X2CrMoTi29-4/1.4592 (échangeurs « eau de mer »).

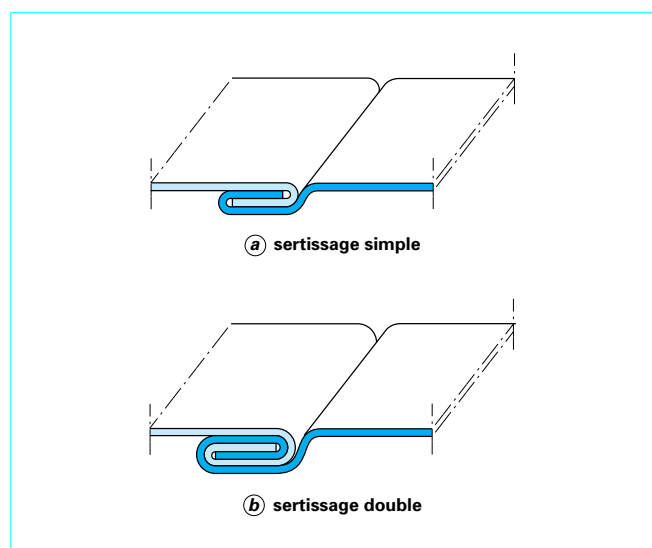


Figure 29 – Assemblages par sertissage

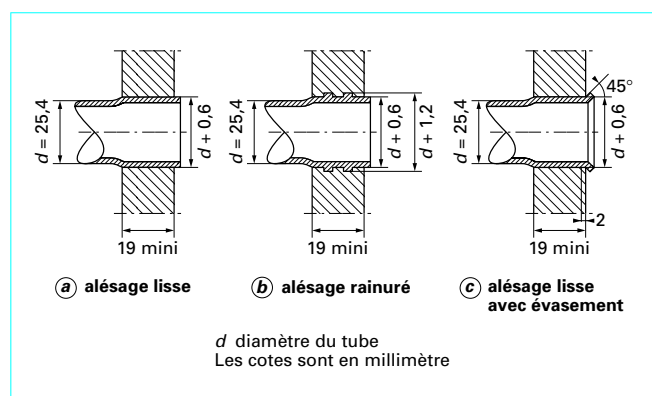


Figure 30 – Assemblages par dudgeonnage

Les jeux initiaux entre le diamètre extérieur du tube et le diamètre de l'alésage dans la plaque tubulaire varient entre 0,2 mm pour les tubes de petit diamètre à 0,4 mm à partir d'un diamètre de 30 mm. Il existe trois types d'assemblage par dudgeonnage :

- le dudgeonnage dans un alésage lisse ;
- le dudgeonnage dans un alésage rainuré ;
- le dudgeonnage dans un alésage lisse avec évasement de l'extrémité du tube. Avec ce tube d'assemblage, l'étanchéité est généralement bien assurée jusqu'à des pressions internes de l'ordre de 50 bar et des températures d'environ 150 °C.

6. Traitement thermique

Les traitements thermiques confèrent aux aciers inoxydables des propriétés qui conviennent à leur emploi, pour l'essentiel il s'agit des caractéristiques mécaniques (ductilité, ténacité et dureté) et de la résistance à la corrosion. Les traitements thermiques sont spécifiques à chaque famille d'aciers inoxydables.

■ Pour les **aciers inoxydables martensitiques**, ils sont donnés dans l'article (cf. [M 4 540], paragraphe 2.3). Avec ces nuances, on recherche essentiellement une dureté élevée ainsi qu'une bonne résistance à la corrosion.

■ Pour les **aciers inoxydables ferritiques**, il convient de faire une distinction entre ceux qui restent ferritiques dans tout l'intervalle de température et ceux dits semi-ferritiques formant jusqu'à 30 % d'austénite à chaud ; cette dernière se transformant en martensite au cours du refroidissement. De plus, pour les nuances non stabilisées ou semi-ferritiques, tout maintien à des températures comprises entre 900 et 950 °C suivi d'un refroidissement lent entraîne la précipitation de carbures de chrome aux joints de grains et donc une sensibilité à la corrosion intergranulaire.

La ductilité et la résistance à la corrosion de ces alliages sont restaurées par un chauffage suivi d'un maintien entre 750 et 850 °C. La durée du maintien est fonction de l'épaisseur du matériau. On conseille généralement 1 à 2 min par millimètre d'épaisseur. Dans tous les cas, le refroidissement devra être rapide pour éviter le risque de fragilisation à 475 °C provoqué par une démixtion du chrome dans la matrice ferritique. Les nuances ferritiques à 11 % de chrome sont quasi insensibles à ce phénomène, celles à 17 % de chrome ne le sont que très faiblement tandis que celles à plus de 25 % de chrome y sont très sensibles.

Les nuances contenant plus de 25 % de chrome sont également sensibles à la formation de phase σ entre 500 et 800 °C. Pour l'éliminer il faut effectuer un traitement thermique à 1 000 °C pendant environ une demi-heure, puis refroidir rapidement.

Les alliages semi-ferritiques à 17 % de chrome possèdent un domaine ferrite-austénite entre 850 et 1 100 °C. Si l'alliage a été maintenu à cette température pendant sa mise en œuvre (soudage), il y aura présence de martensite à l'état final, c'est-à-dire à la température ambiante. En fait, la fragilisation due à la présence de martensite est très relative et elle est souvent moins préjudiciable que la présence de carbures de chrome intergranulaires qui non seulement compromettent la résistance à la corrosion mais provoquent un déchaussement des grains lorsque les contraintes sont élevées. La fragilisation des alliages semi-ferritiques à 17 % de chrome par précipitation de carbures, nitrures et carbonitrures de chrome apparaît après des maintiens au-dessus de 900 ou 950 °C.

Pour restaurer l'état initial après ces modifications structurales, c'est un traitement thermique entre 750 et 850 °C qu'il convient d'appliquer.

Pour éviter ces phénomènes et être dispensé d'appliquer ces traitements thermiques il faut utiliser une nuance ferritique stabilisée ; le principe de la stabilisation a été décrit (cf. [M 4 540], paragraphe 2.4.2).

Dans le cas des aciers inoxydables ferritiques stabilisés qui gardent leur structure ferritique dans tout l'intervalle de température, on peut cependant appliquer un recuit entre 850 et 1 000 °C dont le but est d'accélérer le phénomène de restauration ou de recristallisation.

■ Pour les **aciers inoxydables austénitiques**, il faut faire la distinction entre les nuances à bas carbone ($C < 0,03 \%$) et celles à teneur moyenne ($C \approx 0,06 \%$) susceptibles d'être sensibilisées à l'issue d'une opération de mise en œuvre (par exemple après soudage). Dans ce cas, le traitement qui doit être pratiqué est une hypertrempe. Il a pour but d'obtenir à la température ambiante une structure austénitique homogène. Pour ce faire, on chauffe l'alliage entre 1 000 et 1 150 °C ; le maintien étant de l'ordre de 1 à 3 min par millimètre d'épaisseur. Ce maintien est suivi d'un refroidissement très rapide dans l'air ou dans l'eau.

Avec les **nuances austénitiques à bas carbone**, les joints soudés, à l'état brut de soudage, ne sont pas sensibilisés et, de ce point de vue, il n'est pas nécessaire de pratiquer une hypertrempe. Par contre, les joints soudés contiennent quelques pour-cent de ferrite qu'il sera nécessaire, dans des cas spécifiques, de faire régresser en pratiquant une hypertrempe.

Les opérations de soudage peuvent provoquer des contraintes résiduelles qu'il sera nécessaire d'éliminer ou de réduire par un traitement de détensionnement.

Il existe deux types de traitement de détensionnement. Le premier a l'avantage de ne pas provoquer de modifications d'ordre métallurgique. Il s'agit d'un traitement long entre 200 et 400 °C suivi d'un refroidissement lent. Le temps de maintien à la température de traitement varie entre 10 et 20 min par millimètre d'épaisseur. Le second s'applique aux nuances à bas carbone, insensibles à la corrosion intergranulaire. Il s'agit d'un traitement court à environ 850 °C. Le temps de maintien à la température de traitement est de l'ordre de 3 min par millimètre d'épaisseur suivi d'un refroidissement relativement lent.

Pour les **aciers inoxydables austénoferritiques**, le traitement normal est une hypertrempe entre 1 000 et 1 150 °C. Souvent l'opération de soudage détruit l'équilibre ferrite/austénite dans le joint soudé. Son rétablissement passe par une hypertrempe à 1 050 °C pour les nuances sans molybdène et à 1 100 °C pour les nuances avec molybdène.

■ Avec les **aciers inoxydables à durcissement par précipitation**, les opérations de mise en œuvre (soudage) sont réalisées après trempe ou hypertrempe. C'est à l'issue de ces opérations que l'ensemble de la pièce sera soumise à traitement thermique complet (cf. [M 4 540], § 2.7).

7. Traitements de finition

Ils concernent essentiellement les joints soudés (et les pièces ayant subi un traitement thermique) qui, selon le procédé, peuvent être recouverts d'oxydes. La présence de ces oxydes signifie l'absence de couche passive et donc une résistance à la corrosion fortement diminuée. Avec certains procédés de soudage (soudage par résistance), la surface du matériau n'est pratiquement pas altérée et un brossage peut suffire. Dans le cas contraire, il faut procéder à un traitement de décapage-passivation.

7.1 Décapage

Lorsque le joint soudé ou l'ensemble d'une pièce est recouvert d'oxydes colorés, il faut les éliminer pour redonner ultérieurement à l'alliage son caractère passif.

Plusieurs techniques peuvent être utilisées.

■ Décapage au bain

La composition type est :

- acide nitrique à 52 % en masse (36° Baumé ou densité : 1,33 à 15°C) ... 100 L ;
 - acide fluorhydrique à 65 % (densité $\approx 1,40$) ... 20 L ;
- ou
- ou fluorure de sodium ... 30 kg ;
 - eau ... 900 L.

Les durées d'immersion à la température de 20 °C varient généralement entre 1 et 3 h. La température du bain et la durée d'immersion doivent être soigneusement contrôlées pour prévenir une corrosion des pièces. Après décapage, les pièces doivent être abondamment rincées à l'eau claire.

■ Décapage à la pâte ou au gel

L'emploi de pâtes ou de gels permet de limiter le traitement aux seules zones oxydées. Leur composition est variable, mais elles contiennent toutes de l'acide nitrique. La pâte ou le gel est étendu au pinceau puis on procède à un brossage à l'aide d'une brosse en acier inoxydable. Comme précédemment, on termine l'opération par un rinçage à l'eau claire.

7.2 Passivation

Après l'opération de décapage, l'alliage n'est plus immédiatement protégé et il faut reconstituer la couche passive pour qu'il recouvre sa résistance à la corrosion.

■ Passivation au bain

Les pièces sont immergées dans un bain acide dont la composition approximative est :

- acide nitrique à 52 % en masse (36 ° Baumé ou densité : 1,33 à 15 °C) ... 250 L ;
- eau ... 750 L.

Les durées d'immersion, à la température de 20 °C, varient généralement entre 15 min et 1 h. Après passivation, les pièces sont encore soigneusement rincées à l'eau claire.

■ Passivation à la pâte ou au gel

C'est également une méthode locale qui permet de ne traiter que les zones préalablement décapées. Le produit, à base d'acide nitrique, est étendu sur les surfaces à traiter puis il doit être totalement éliminé par brossage (brosses en acier inoxydable ou brosses en nylon). La surface passivée doit être rincée à l'eau claire.

7.3 Décontamination

Les différentes opérations effectuées en chaudronnerie (cisailage, pliage, formage...) peuvent laisser à la surface des particules ferreuses qu'il faut éliminer. Bien que le but soit différent, les méthodes utilisées pour décontaminer sont analogues à celles utilisées pour passer.