

LE TRAVAIL DU CUIVRE*

* Titre original : Trennen und Verbinden von Kupfer und Kupferlegierungen

Edité par le DKI en 2006 et traduit par le Cicla en 2007

Centre d'Information du Cuivre, Laitons et Alliages - 17, rue Hamelin 75016 PARIS
Tél. 01 42 25 25 67 - Fax 01 49 53 03 82 - www.cuivre.org

T A B L E D E S M A T I E R E S

1	PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DE BASE	6
2	DÉCOUPE - CISAILLAGE	7
2.1	Découpe	7
2.2	L'opération de découpe	8
2.3	Intervalle de découpe	8
2.4	La force de cisaillement	8
2.5	Procédés de cisaillement	9
2.6	Découpe manuelle du métal	9
2.7	Découpe du métal avec entraîneur manuel	9
2.8	Découpe en guillotine	10
2.9	Découpe à l'aide de lames mobiles	10
2.10	Découpe et perçage par poinçonnage	10
2.11	Intervalle de découpe	13
2.12	Avance en plongée du matériau	13
3	UTILISATION DE MACHINES LASER	14
3.1	Propriétés du faisceau laser	14
3.2	Lentilles laser	14
3.3	Découpe du cuivre	15
3.4	La technologie de la découpe au faisceau laser	15
4	DÉCOUPE À L'AIDE D'UN JET D'EAU À HAUTE PRESSION	17
4.1	Têtes de coupe et adjuvants de coupe	17
4.2	Performances de découpe	18

5	DÉCOUPE – DISPOSITIFS D'ÉJECTION DES MATÉRIAUX	20
5.1	Opérations de sciage	21
5.2	Sciage manuel	21
5.3	Outils	23
5.4	Fluides de lubrification et de refroidissement	24
5.5	Outils de tour	24
6	FRAISAGE	27
7	PERÇAGE	28
8	ASSEMBLAGES MÉCANIQUES	30
8.1	Vissage	30
8.2	Matériaux de fabrication	30
8.3	Applications	31
8.4	Rivetage	31
8.5	Rivet à tête de mandrin prisonnier	33
8.6	Rivets à visser	33
8.7	Rivets à corps cylindrique	34
9	ASSEMBLAGES PAR COMPRESSION	35
9.1	Joint Collé	36
9.2	Joints collés – Influence de l'état de surface	36
9.3	Contraintes mises en jeu	36
9.4	Pouvoir adhésif – Importance de la conception	37
9.5	Force de résistance des joints collés	37
9.6	Conception	38
10	ASSEMBLAGES THERMIQUES	39
10.1	Les différentes électrodes	41
10.2	Courants de soudage	41
10.3	Soudage aux gaz métal/inerte	42

10.4	Courant de soudage	43
10.5	Les différents systèmes et leurs constituants	44
10.6	Les têtes de soudage et les différents types de cordons	44
10.7	Caractéristiques du procédé	48
10.8	Brasage	48
11	AFFINAGE DE SURFACE	51
11.1	Moyens mécaniques	51
11.2	Pré-meulage	52
11.3	Meulage de finition et meulage fin	52
11.4	Polissage	52
11.5	Décapage	53
12	CHIMIE ET ÉLECTROCHIMIE	54
12.1	Electropolissage	54
12.2	Conditions requises pour l'électropolissage	54
12.3	L'enrobage	55

INTRODUCTION

« Grise est la théorie, vert est l'arbre de la vie », disait le Faust de Goethe. Cette citation célèbre montre bien l'insuffisance d'un savoir purement théorique, et porte à notre attention des sujets d'ordre pratique. Mais il est aussi parfaitement évident que l'on ne peut progresser dans la vie sans une somme d'acquis préalables.

Architectes, artisans et autres, pour qui cette notion fait partie du quotidien professionnel, pourraient certainement en développer longuement le bien-fondé. On ne saurait travailler le cuivre ou ses alliages (comme d'ailleurs n'importe quel autre matériau) sans prendre en compte les caractéristiques et les spécificités propres à ce métal. C'est à cette condition que l'on peut espérer obtenir les meilleurs résultats.

Les informations fournies dans cet ouvrage concernant la découpe, le raccordement, l'assemblage, le traitement de surface et la finition du cuivre ont pour but de donner aux professionnels de ce domaine des références qui les aideront à traiter et travailler ce matériau afin d'obtenir les meilleurs résultats possibles.

1 Propriétés mécaniques de base

Les propriétés mécaniques des différents matériaux à base de cuivre ne divergent que très peu les uns des autres. D'un point de vue artisanal, les diverses méthodes de transformation et d'utilisation de ces matériaux, qu'elles s'appliquent aux feuilles, aux bandes, aux tubes ou aux profilés, ne posent pas de problème particulier. Et il faut bien garder en tête certaines des caractéristiques et propriétés de ces matériaux :

- Résistance faible ou modérée
- Bonne déformabilité
- Haute conductivité thermique
- Excellente conductivité
- Bonne résistance à la corrosion

Ces propriétés facilitent certains procédés spécifiques ainsi que le travail et l'utilisation du cuivre ou de certains de ses alliages à base de zinc (comme le laiton), d'étain (bronze) ou de plomb. (Il s'agit de caractéristiques utiles dans le cas de dispositifs d'éjection des copeaux : Par exemple, un dispositif pour évacuer les copeaux des creux de la denture de la lame sous forme d'un éjecteur en étoile).

2 Découpe - Cisailage

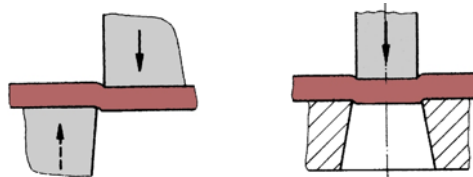
2.1 Découpe

Le travail du cuivre ne nécessite ni lubrification importante, ni surfaces d'outillage sophistiquées. Les forces nécessaires à la déformation du métal sont modestes, la formation d'une couche de lubrifiant s'avère aisée, et la ductilité des couches d'oxyde (toujours présentes à la surface) révèle, dans ce contexte, une interaction avantageuse.

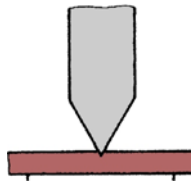
La découpe, selon la norme allemande DIN 8588, implique la découpe mécanique de tous types de matériaux et de formes ne générant ni « copeaux » ni « poussière de métal ».

Les méthodes les plus fréquemment utilisées pour la découpe sont la découpe par cisailage, la découpe au couteau, et le refendage.

Ces méthodes sont utilisées principalement dans le travail de feuilles de cuivre ; un angle de découpe assez large est typique de ces procédés de découpe.



On appelle **cisailage** la découpe du métal entre deux lames se déplaçant l'une part rapport à l'autre, avec une découpe ouverte (figure de gauche) ou fermée (figure de droite).



On appelle **découpe au couteau** la découpe du métal utilisant une lame aiguisée en pointe (figure ci-dessus).

On appelle **refendage** la découpe du métal à l'aide d'outils aiguisés, y compris les outils rotatifs, dans le cas de découpe de bandes de métal très fin qui sont guidées pour être usinées.

En outre, on peut distinguer plusieurs procédés de découpe :

- **En une passe** : la découpe est exécutée en une seule fois tout le long de la ligne de découpe. Cette méthode est la plus utilisée dans les ateliers de découpe industriels.
- **En plusieurs passes progressives** : la découpe est effectuée en plusieurs passes ou par étapes, l'alimentation en métal se faisant à mesure. Cette méthode est typique des découpes de grignotage ou avec ciseaux à métaux, chaque morceau de découpe étant plus court que la longueur totale de la ligne de découpe.
- **En découpe continue** : la découpe est exécutée de façon continue tout le long de la ligne de découpe. L'exemple le plus répandu de ce type de découpe est celui des lignes de découpage par outils rotatifs.

2.2 L'opération de découpe

L'opération de découpe se divise en quatre étapes:

- Déformation élastique, accompagnée de la formation d'un bord guide généralement placé dans le sens de la découpe, mais aussi parfois perpendiculairement à celle-ci.
- Déformation plastique et écoulement du métal dans la direction de la découpe.
- Apparition de fissures depuis les bords de découpe de deux outils de découpes
- Déchirement (Défaut qui se caractérise par de petites cassures ou fissures)

La composante de déformation élastique restante est la principale cause de blocage du processus de découpe et de la perte de métal sur les buses de découpe après découpe complète, au cours de l'opération de poinçonnage ou de découpage. (On appelle « poinçonnage » l'opération qui consiste à découper le métal en l'attaquant entre deux outils, le poinçon et la matrice, qui s'ajustent l'un dans l'autre.)

2.3 Intervalle de découpe

On appelle « intervalle de découpe » la distance qui sépare, d'une part, les lames (des couteaux ou des outils de découpe) et les têtes et les bords de coupe et, d'autre part, la surface perpendiculaire au plan de coupe.

Dans le cas de la découpe du cuivre ou de l'un de ses alliages, l'intervalle de découpe est de

5% (1/20) de l'épaisseur de la plaque

On appelle « jeu de cisaillement » (entre le poinçon et la matrice) la distance entre la matrice ou le poinçon et l'ouverture de découpe. Le jeu de cisaillement est donc égal à deux fois l'intervalle de découpe.

2.4 La force de cisaillement

La force de cisaillement F peut être calculée en appliquant la formule suivante :

$$F = S \cdot \tau_{aBmax}$$

Dans laquelle :

F	=	force de cisaillement en N ou (KN cuivre)
S	=	surface de découpe en mm^2
τ_{aBmax}	=	force maximale de cisaillement, exprimée en N/mm^2

(Pour le cuivre : entre 240 et 430 N/mm^2 , en fonction de l'état au moment du traitement

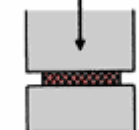
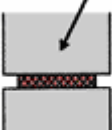
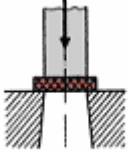
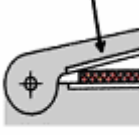
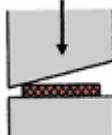
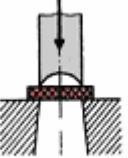
Pour les alliages de cuivre : de 260 à 730 N/mm^2).

2.5 Procédés de cisaillement

On peut classer les différents procédés de cisaillement comme suit :

- Découpe pleine largeur à l'aide de lames droites ou aiguës
- Découpe perpendiculaire à l'aide de lames droites ou arrondies.

On peut utiliser des outils à main ou des machines dans un cas comme dans l'autre.

CISAILLE A TOILE		TROU D'OUTIL	
 <p>lourdement</p>	 <p>amment</p>	 <p>lourdement</p>	VOLUME A AERETES
 <p>lourdement</p>	 <p>amment</p>	 <p>amment</p>	

2.6 Découpe manuelle du métal

La forme des outils de découpe utilisés peut varier en fonction de l'application particulière que l'on recherche. Ils sont le plus souvent utilisés pour découper de fines feuilles de métal.

Différents procédés sont disponibles dans le commerce :

- Pour réaliser de longues coupes droites
- Pour réaliser des coupes courtes et incurvées
- Pour réaliser de longues découpes continues
- Avec ou sans entraîneur
- Avec des lames de découpe interchangeables
- Destinés à une gamme de matériaux divers

2.7 Découpe du métal avec entraîneur manuel

La forme des outils peut varier selon l'application recherchée. Dans la plupart des cas, les cisailles employées s'accompagnent de divers accessoires qui permettent de les adapter à la section concernée et sont équipées de serre-tôle. La force de cisaillement est générée par des entraîneurs ou par des segments dentés.

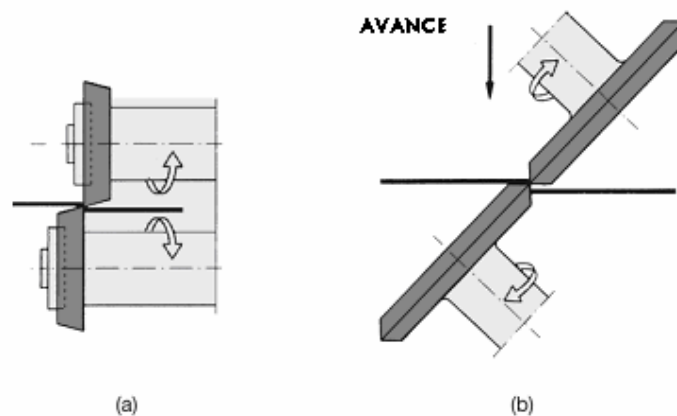
Avec ce type d'outils de cisailage, seule une petite partie des bords de coupe est coupée. Les lames sont positionnées en angle ou en forme de voûte. Ce type d'outil peut être utilisé pour découper des feuilles de métal dont l'épaisseur n'excède pas 12 mm environ. Ils peuvent être utilisés « en mains libres », ou être posés sur une structure solide. On distingue plusieurs types de mouvements de coupe.

2.8 Découpe en guillotine

Les outils de découpe en guillotine conviennent à la découpe de grandes plaques. La lame supérieure est généralement commandée hydrauliquement. Les cisailles de coupe sont équipées de serre tôle et de dispositifs de sécurité. L'arrêt est commandé mécaniquement ou électroniquement. Ce type d'outil s'utilise également sur des lignes de production automatisées de plaques et de feuilles. Il s'est avéré que, dans ce cas, une découpe « en tirant » se révélait préférable.

2.9 Découpe à l'aide de lames mobiles

Dans ce type de découpe, l'outil comporte une lame supérieure amovible commandée par un système électrique ou pneumatique. Avec ce procédé, les chutes de découpe qui en résultent peuvent être déformées, contrairement à la plaque ou la feuille que l'on découpe. La faible pression requise pour entraîner le processus permet une utilisation manuelle de l'outil. On peut ainsi obtenir des cercles de faible rayon. L'emploi d'une guillotine permet de réaliser de longues coupes droites. Le poids modéré et la facilité d'utilisation de tels outils les rendent parfaitement adaptés aux chantiers de construction.



On utilise ces cisailles rotatives pour la découpe à partir de formes en voûte ou circulaires.

On peut encore mentionner d'autres procédés de découpe :

2.10 Découpe et perçage par poinçonnage

Lors de la découpe, on procède à la coupe de surfaces ou de fractions planes à partir des bords d'une plaque. Lors du poinçonnage, on produit un élément géométrique complet en une seule opération.

a. Découpe

Il est important de faire la distinction entre deux procédés industriels :

▪ *Découpe de matériaux plans*

Pour obtenir une forme en creux à partir d'une feuille rectangulaire, il est nécessaire d'entailler les coins. Pour cette opération, on utilise des outils de découpe à main, des cisailles crocodiles commandées manuellement, des cisailles crocodiles électriques ou des machines de découpe

hydrauliques, dotées ou non d'un système de contrôle.

▪ **Découpage des surfaces**

Lorsqu'il s'agit d'obtenir une section à bords vifs et de forme arrondie, il est nécessaire d'entailler certaines parties de la surface. Pour cette opération, on utilise des cisailles crocodiles commandées manuellement, des cisailles crocodiles électriques, des machines de découpe hydrauliques ou hydrauliques à commande numérique.

b. Poinçonnage

Il est important de faire la distinction entre deux procédés industriels :

▪ **Poinçonnage de plaques ou de feuilles et poinçonnage de surfaces**

Lors du poinçonnage, l'élément fini est obtenu en une seule opération. Le résidu de découpe est perdu.

▪ **Poinçonnage et grignotage**

-Poinçonnage

Les outils utilisés pour cette opération consistent en un poinçon et une matrice.

Le poinçon a les dimensions finales de l'élément poinçonné. La matrice doit être plus grande, et ses dimensions sont calculées en multipliant par deux l'intervalle de découpe. Ces outils sont généralement complétés par un serre tôle. Cette précaution permet de réduire le risque de déformation du métal pendant l'opération de découpe ou lors du retrait du poinçon. Le type de matériau et l'épaisseur du composant à découper déterminent l'intervalle de découpe entre le poinçon et la matrice. L'intervalle de découpe doit respecter certaines valeurs si l'on veut obtenir une découpe nette et pratiquement dénuée d'ébarbures.

Si l'on procède au poinçonnage dans une zone située trop près des bords du matériau, on risque de voir se produire de sévères déformations qu'il ne sera pas complètement possible de maîtriser même avec une serre tôle. Il est donc nécessaire, pour cette raison, de respecter un espacement minimal.

En pratique, les limites d'utilisation du poinçonnage sont déterminées par les facteurs suivants :

- Puissance disponible de la machine
- Force exigée par le matériau à découper
- Longueur de coupe de l'outil
- Épaisseur du composant destiné à être découpé
- Force du poinçon à la compression

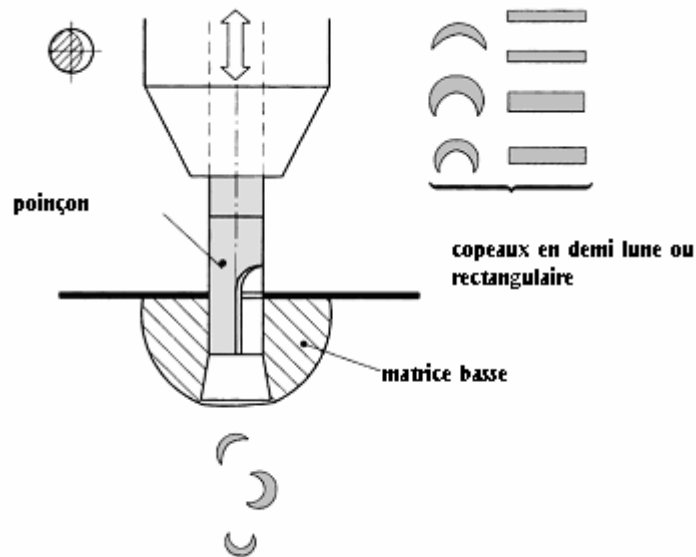
-Grignotage

Lors du grignotage, une étroite fente ou « boutonnière » est produite dans la feuille de métal en utilisant un outil comportant un poinçon et une matrice.

Le grignotage est une sorte de poinçonnage continu

Le mouvement continu du poinçon, de haut en bas et de bas en haut, permet de couper le matériau et d'obtenir finalement la forme géométrique souhaitée. Cette méthode est utilisée quelles que soient les quantités désirées, depuis l'exemplaire unique jusqu'à la production en série. Les outils de coupe, dans ce genre d'opération, consistent généralement en des machines de grignotage commandées à la main, soit dans des ateliers, soit sur des chantiers de construction.

Les déchets de coupe (copeaux) ont principalement la forme de croissants ou de rectangles (voir figure).



Les machines de poinçonnage fixes sont généralement des postes de découpe du métal équipés d'un contrôle par machine à commande numérique (MCN). Elles permettent d'exécuter du poinçonnage ou du perçage par poinçonnage, mais aussi, selon les modèles, à du grignotage et de la mise en forme.

Les alliages de cuivre se prêtent bien, voire très bien, au poinçonnage et au grignotage, à condition que la lubrification de l'outil de découpe ait été adaptée au matériau. Plus le matériau est tendre (état au moment du traitement), plus le risque est grand de voir s'accumuler des copeaux sur les bords de l'outil de poinçonnage ou de grignotage.

Les postes de découpe du métal utilisent une large gamme d'outils pour accomplir des tâches très variées. Ci-dessus figure une liste détaillant les outils les plus couramment utilisés :

- Outils standards : rond, carré, rectangulaire, triangulaire, hexagonal, en fente.
- Outils permettant de faire de trous de gros calibre : ces outils, munis d'une base carrée, comportent des flancs arrondis ; ils présentent deux avantages principaux : d'une part, ils permettent d'obtenir une moindre rugosité, et d'autre part ils rendent inutile la collecte des copeaux.
- Outils de gaufrage
- Poinçons permettant la gravure de lettres ou de chiffres
- Outils de découpe et de poinçonnage
- Boutons de commande
- Outils de lamage
- Barrettes
- Outils de gaufrage en forme de pont
- Tronquoirs
- Tronquoirs et outils à sertir
- Outils de serrage
- Outils de filetage

En fonction des différents fabricants, on trouve également des outils spéciaux pour obtenir de fines rayures ou pour des opérations de poinçonnage ou de grignotage sur tout cuivre traité en surface, sur les plaques en alliage de cuivre et sur les matériaux en feuille.

2.11 Intervalle de découpe

Pour les opérations de poinçonnage ou de grignotage du cuivre ou d'un de ses alliages, l'intervalle de découpe (entre le poinçon et la matrice) est, dans tous les cas, de :

10% de l'épaisseur du matériau à travailler

2.12 Avance en plongée du matériau

Lors du grignotage, l'avancement de l'outil entre deux frappes dépend généralement du type d'outillage et du système de contrôle.

**Calcul du déplacement lors de l'avance en plongée =
Longueur de l'outil de découpe – 1 à 2 mm**

3 Utilisation de machines laser

Introduction

Le laser est une source radiative qui émet, après apport d'énergie, des ondes électromagnétiques dans une zone allant selon les cas de l'ultraviolet à l'infrarouge. La découpe au laser dépend de la capacité d'absorption du métal concerné, de la surface de travail, de l'angle de coupe, de la longueur d'onde du laser et de la température du point de focalisation.

Le faisceau laser est composé d'une seule longueur d'onde définie précisément pour chaque laser. Dans le cas des lasers au CO_2 , cette longueur d'onde est de 10 600 nm ; elle est donc située dans le spectre infrarouge invisible.

Dans le cas des lasers à l'hélium ou au néon, la longueur d'onde est de 680 nm ; le faisceau est donc visible sous forme d'une lumière de couleur rouge.

Voici les principales caractéristiques du traitement laser des métaux :

- Haut rendement d'usinage
- Extrême précision
- Stabilité des performances
- Bonne efficacité
- Fiabilité du processus
- Faible rugosité laissée en surface

3.1 Propriétés du faisceau laser

Le faisceau (lumière) généré par un laser doit être focalisé par l'intermédiaire de systèmes optiques comprenant des lentilles et des miroirs afin d'atteindre la densité de puissance (jusqu'à 10^7 W/cm^2) nécessaire à l'opération de découpe. Le point de convergence qui en résulte a approximativement un diamètre compris entre 0.15 et 0.3 mm. Cette caractéristique des outils au laser entraîne en conséquence un intervalle de découpe très étroit.

Pour l'acier, la réaction exothermique de l'oxygène avec le métal accroît le rythme de découpe de 80%. On utilise alors de l'oxygène d'une pureté de 3.5 ($\text{O}_2 = 99.95 \%$ vol.) et une pression comprise entre 6 et 15 bars. La consommation maximale est de $2.5 \text{ m}^3/\text{h}$; elle est plus importante avec les matériaux minces (rythme de découpe plus rapide).

Le matériau qui, sous l'effet du faisceau laser, fond dans l'intervalle de découpe est rejeté par l'intermédiaire d'un jet d'oxygène.

L'un des autres avantages présentés par l'utilisation du faisceau laser concerne la facilité à diriger le rayon à l'aide de miroirs, sans courir le risque de modifier le diamètre du rayon ou son point d'impact.

3.2 Lentilles laser

Pour éviter tout risque d'ébarbure, la mise au point doit être faite sur l'envers de la plaque à découper.

Une lentille à double foyer permet d'améliorer la forme de l'intervalle dans le cas d'épaisseurs de coupe plus importantes. Une portion circulaire au centre du rayon laser est focalisée sur la zone inférieure de l'intervalle de découpe, pour éviter les ébarbures. La portion restante, de forme annulaire, est positionnée sur la partie supérieure de la plaque à découper ; à cet endroit, elle provoque une hausse de la température.

On observe les résultats suivants : une qualité améliorée et plus fiable, une augmentation de la vitesse de découpe et une sensible réduction de la consommation de gaz grâce à une pression plus basse et un diamètre de tête de coupe plus étroit.

Des lentilles à double foyer adaptées à l'épaisseur du matériau peuvent être utilisées avec profit en lieu et place des classiques lentilles ZnSe sur des têtes de coupe laser très largement répandues.

3.3 Découpe du cuivre

A cause de son indice de réflexion élevé, le cuivre pur ne peut être découpé à l'aide de machines laser sans quelques adaptations spécialement conçues pour cet usage. La lumière laser réfléchiée par la surface découpée pourrait en effet endommager les lentilles et/ou les miroirs du système optique. Seul de l'oxygène extrêmement pur peut servir de gaz de découpe. Il est également possible de découper des alliages de cuivre de type zinc ou étain à la condition d'avoir procédé aux ajustements suivants.

Les paramètres de la machine doivent être modifiés par rapport à ceux employés dans la découpe de l'aluminium :

- Vitesse de coupe diminuée de 40% maxi
- Pression du gaz de coupe augmentée de 12% maxi
- Foyer déplacé vers le bord inférieur de la tête de coupe (+ 0)

Le guide de précision concernant l'acier et les tables de performances technologiques fournis avec la machine doivent garantir :

- De faibles seuils de tolérance
- Des bords de coupe sans ébarbures
- Des rendements élevés.

3.4 La technologie de la découpe au faisceau laser

La découpe au faisceau laser est un procédé de découpe thermique, dans lequel le rayon laser est guidé par un jet de gaz de coupe ; ce jet est orienté de façon coaxiale au rayon et focalisé sur le matériau ; l'énergie provenant de la chaleur dégagée autour du point de convergence entraîne un intervalle de découpe ; le métal éliminé est évacué sous forme de vapeur ou de plasma, ou encore fondu sous l'action du jet de gaz de coupe. Le processus n'entraîne aucun contact mécanique entre le métal à couper et l'outil de découpe. Le déplacement des éléments se fait indifféremment : soit c'est le métal qui se déplace, soit c'est la tête de coupe.

La formation de l'intervalle de découpe dépend du matériau utilisé, de la chaleur au niveau du point de convergence, de la nature du gaz de coupe et de la méthode employée pour l'obtention du jet de ce gaz.

On dénombre trois méthodes distinctes de découpe au laser ; elles se différencient par la manière dont la matière est évacuée au moment de la coupe : il peut s'agir de coupage par fusion (avec élimination de matière liquide), d'oxycoupage à la flamme (avec élimination de matière oxydée) ou encore de coupage par sublimation (avec dégagement de matière gazeuse). Dans la pratique cependant, la distinction entre ces trois méthodes est assez floue, et il arrive couramment qu'on ait recours à plusieurs procédés de découpe.

La découpe au laser par fusion nécessite l'emploi d'un gaz inerte - généralement de l'azote, de l'argon ou de l'air comprimé - pour évacuer la matière en fusion. L'emploi d'un gaz inerte évite l'oxydation de la matière en fusion et permet d'obtenir une coupe franche d'aspect brillant métallisé. Dans la pratique, la pression du gaz est réglée entre 8 et 25 bars, voire davantage, pour réduire le risque de rayures sur les bords de coupe.

La découpe au laser à la flamme entraîne l'emploi, comme gaz de coupe, d'oxygène sous une pression de 6 bars maximum. La présence d'oxygène induit une réaction exothermique dans l'intervalle de découpe, ce qui augmente la production de chaleur ; l'énergie dégagée pouvant alors être un multiple de celle déposée originellement par le laser. On peut ainsi atteindre des vitesses de coupe de six à huit fois supérieures à celles d'une découpe au laser par fusion. Dans le cas de l'oxycoupage à la flamme cependant, les bords de coupe sont oxydés et montrent une structure sensiblement rainurée, ce qui peut nécessiter un usinage ultérieur.

La production du faisceau laser doit être en adéquation avec le type et l'épaisseur du matériau à découper. Plus l'épaisseur est grande, plus il faut réduire la vitesse de coupe. Dans le cas d'épaisseurs importantes, il faut augmenter non seulement la puissance du faisceau mais aussi la distance focale. Pour des raisons inhérentes à la production d'un faisceau laser, la puissance du rayon produit est inversement proportionnelle à la qualité du rayon lui-même ; lorsqu'en même temps il faut allonger la longueur focale, le point de convergence devient sensiblement plus grand, ce qui entraîne une réduction de l'intensité du faisceau.

Trois types de lasers sont commercialisés pour des procédés de découpe : laser au CO_2 , laser à cristal et, plus récemment, laser à diode de grande puissance.

Le laser au CO_2 offre l'avantage d'un rayon de bonne qualité et d'une grande fiabilité. On l'utilise principalement aujourd'hui pour la découpe de feuilles d'acier ou de métaux non ferreux comme des alliages de cuivre ou de l'aluminium. Cependant, il faut tenir compte, lorsqu'on focalise le rayon sur le travail, de sa longueur d'onde extrêmement élevée (10,6 μm).

Le laser à cristal le plus répandu est sans nul doute le laser YAG/Nd qui, avec une longueur d'onde de 1,06 μm , fonctionne avec des longueurs d'onde évidemment beaucoup plus courtes. Le YAG/Nd offre, par rapport au laser au CO_2 , trois avantages essentiels : une meilleure absorption du métal ; une grande facilité de positionnement du faisceau, par l'intermédiaire de câbles à fibre optique flexibles et, au moins dans le cas de puissances moindres, un foyer plus petit.

On assiste par ailleurs au développement de lasers à diode de grande puissance (HDL), qui font appel à une technologie très récente. L'augmentation de leur efficacité, qui peut être de l'ordre de 40%, en fait bien entendu des produits commercialement très attractifs. Cependant, il s'agit d'émetteurs « multi-rayons », dont la longueur d'onde se situe autour de 808 nm, ce qui complique la focalisation de la lumière. On dispose déjà d'outils tout nouveaux qui font appel à cette technologie et sont destinés au soudage ou la découpe de l'acier. Ces nouvelles machines exploitent l'intérêt principal des HDL : leur capacité à produire, pratiquement à la demande, un faisceau parfaitement adapté aux produits que l'on veut obtenir.

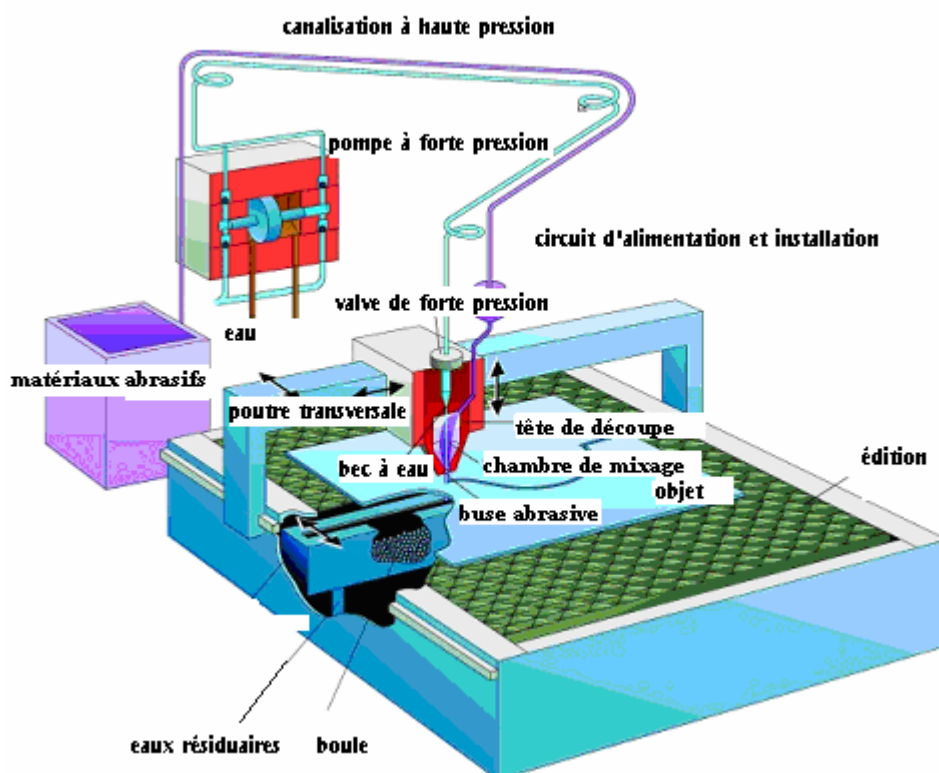
4 Découpe à l'aide d'un jet d'eau à haute pression

Introduction

Ce type de découpe, qui utilise un jet d'eau à très haute pression, permet la découpe d'une gamme très étendue de matériaux. Il faut ici faire la distinction entre les jets à haute pression simple, et les jets abrasifs utilisés pour la découpe de matériaux résistants comme les métaux.

Les figures ci-dessous montrent une vue schématique et une photographie d'une installation de découpe à jet d'eau abrasif.

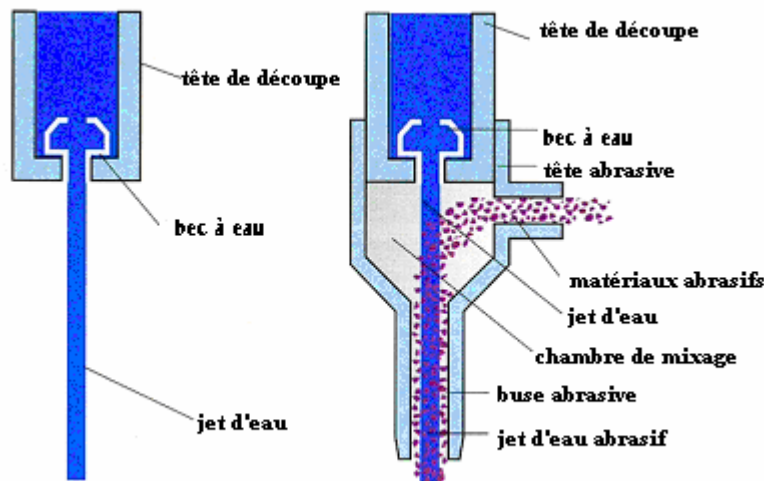
Contrairement à ce qui se passe avec un système de découpe au laser, les machines à jet d'eau peuvent également être utilisées pour la découpe de matériaux non métalliques.



4.1 Têtes de coupe et adjuvants de coupe

Les têtes de coupe varient en fonction des différents procédés de découpe au jet d'eau (voir figure schématique d'une tête de coupe). Dans tous les cas, elles sont réalisées dans des matériaux très résistants qui utilisent des pierres précieuses (diamants, rubis ou saphirs) pour garantir une longue durée d'utilisation avec des adjuvants abrasifs.

Le diamètre des têtes de coupe est compris entre 0,1 et 0,3 mm. La pression du jet peut atteindre 4000 bars.



Lors de la coupe avec des adjuvants abrasifs tels que des minéraux aiguisés (grenats ou olivines), les éléments sont projetés à une vitesse de 900 m/s dans la tête de coupe et frappent le plan de travail depuis une distance de 1 à 2 mm.

La quantité de matériaux adjuvants nécessaire pour la découpe varie entre 100 g/mn et, au maximum, 260 g/mn, en fonction du matériau à découper.

4.2 Performances de découpe

Le tableau ci-dessous montre les performances de découpe pour le cuivre, le zinc et l'étain :

Type de découpe	Epaisseur (mm)	Vitesse de coupe (m/min)
Coupe grossière	Jusqu'à 60	Environ 0,3
Coupe de qualité	Jusqu'à 30	Environ 0,6
Coupe de précision	Jusqu'à 15	Environ 0,6

Les bords de coupe sont conformes à l'obtention d'une zone lisse et d'une zone résiduelle de surface. L'évaluation de la qualité et la tolérance pour les dimensions sont conformes à la norme allemande DIN 2310, partie 5.

La découpe au jet d'eau à haute pression jusqu'à 4000 bars constitue une alternative sans utilisation de chaleur à la découpe au laser. Elle s'utilise dans les cas où les caractéristiques spécifiques du matériau à découper excluent l'utilisation d'une découpe thermique au laser, ou pour des matériaux de grande épaisseur. La découpe au jet d'eau requiert généralement l'emploi d'adjuvants abrasifs. Le jet d'eau est dirigé vers une chambre de mélange et une deuxième tête de coupe, en général sensiblement plus grande que la première, dans laquelle on fait intervenir un sable abrasif spécifique (obtenu à partir de pierres semi-précieuses broyées, comme le grenat ou l'olivine). Pendant l'opération de mélange, le jet d'eau est ralenti à une vitesse d'environ 300 m/s, mais son action abrasive est garantie par la présence du sable. L'action d'abrasion entraîne la formation d'un intervalle d'une largeur de 1 mm environ.

La découpe au laser guidé par jet d'eau est un procédé qui utilise conjointement les avantages du faisceau laser et du jet d'eau à haute pression, sans en exclure les inconvénients. On dirige un faisceau laser, en exploitant le très haut indice de réflexion, à l'intérieur d'un jet d'eau. Le jet, extrêmement étroit, est soumis à une pression de 20 à 500 bars et a un diamètre d'environ 0,1 mm ; il joue le même rôle que les câbles à fibre optique et permet en outre de refroidir la zone de découpe. Des lasers pulsés à cristal avec des puissances allant de quelques Watts à 1kW peuvent être intégrés à de tels systèmes.

5 Découpe – Dispositifs d'éjection des matériaux

Introduction

Selon les exigences requises, plusieurs facteurs d'évaluation permettent de définir différents critères pour les dispositifs d'éjection des copeaux :

- La durée d'utilisation entre deux maintenances
- La force de coupe
- La qualité de la surface
- La production de copeaux et d'ébarbures

La **durée d'utilisation entre deux maintenances** d'un outil correspond à l'intervalle de temps qui sépare deux opérations d'abrasion ou d'affûtage au cours desquelles un outil exécute une tâche d'éjection des copeaux (travail de découpe). L'approche de la fin de la durée d'utilisation est signalée par une grande production de chaleur, une usure des surfaces de coupe ou d'évacuation des résidus ou encore une irrégularité excessive de la surface sur les pièces finies.

La durée d'utilisation entre deux maintenances dépend de :

- La relation entre matériau de coupe et matériau à couper
- La forme des outils de coupe et, surtout, par...
- Les conditions de coupe, en particulier, par...
- La vitesse de coupe

Une augmentation, même très modeste, de la vitesse de coupe entraîne généralement une diminution significative de la durée d'utilisation.

L'usure de l'outil au cours de l'opération d'évacuation des résidus pendant la découpe du cuivre est relativement importante. A cause de sa faible résistance, le cuivre a une nette tendance à couler et à coller. Pour cette raison, l'usure d'un cuivre dur est moins prononcée que celle d'un cuivre tendre. Les températures entraînées par les procédés de cisaillement n'ont pratiquement aucune influence sur l'usure, dans la mesure où le cuivre a une bonne conductivité et que la chaleur ne s'accumule pas.

On n'observe aucune tendance à l'adhérence entre cuivre et diamant. Toutefois, à cause de sa fragilité, le diamant convient seulement à des pièces de petite taille. Les outils utilisant le diamant sont donc réservés à des tâches de précision.

Dans le cadre de l'usinage des dispositifs d'éjection de copeaux de cuivre, l'ampleur de la force de coupe n'a qu'une importance relative. Les forces de coupe nécessaires s'avèrent en effet relativement faibles si on les compare à celles qui interviennent dans l'usinage de l'acier.

Pour cette raison, le choix des matériaux de coupe doit essentiellement souscrire à deux conditions :

- Grande résistance à l'usure
- Grande résistance des bords, pour permettre la coupe de petits angles de tranchant et, parallèlement de grands angles de coupe.

Dans le cas des tâches de précision, on accorde beaucoup d'importance à la qualité des surfaces obtenues, qui devient ainsi le critère prioritaire du choix de l'outil. La qualité de surface que l'on peut obtenir avec du cuivre est extrêmement bonne. En travaillant avec des vitesses de coupe réduites, on peut prévenir la formation d'ébarbures qui nuisent à la qualité de la surface.

En plus du rythme d'avancement du matériau ou de la vitesse de coupe, la forme à obtenir a une certaine importance sur les éventuelles irrégularités de surface. Les angles de coupe très ouverts ont en effet tendance à améliorer la qualité des surfaces, mais à diminuer la durée d'utilisation des outils, en raison de l'usure de la partie coupante.

5.1 Opérations de sciage

Tel qu'il est défini dans la norme allemande DIN 8589, le sciage est une forme de découpe et d'éjection des copeaux qui utilise une lame géométriquement définie. Le mouvement de coupe peut être rectiligne ou circulaire.

L'éjection des copeaux se fait au moyen d'un grand nombre de lames disposées les unes à la suite des autres. Une largeur de coupe réduite constitue un avantage non négligeable. L'avancement du matériau à découper est généralement déterminé par l'outil de sciage.

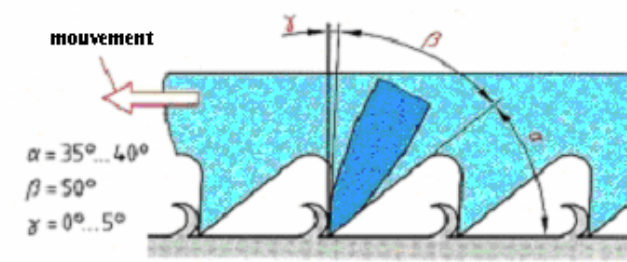
On utilise la technique du sciage pour découper des surfaces aux longueurs adaptées, procéder à la découpe de trous, découper des fentes, des boutonnières ou des formes diverses. Cette technique convient à toutes les matières solides.

5.2 Sciage manuel

On utilise principalement comme outils de sciage des scies à chantourner munies de lames manuelles maintenues entre un support assurant la fixation et un support assurant la tension.

Forme des dents de la scie

La forme géométrique de base d'une dent de scie est l'équivalent de la forme du taillant d'un poinçon. L'angle des parties coupantes dépend du matériau à découper.



- **Avec des matériaux résistants**
 - grand angle de tranchant
 - petit angle de dégagement orthogonal et petit angle de coupe

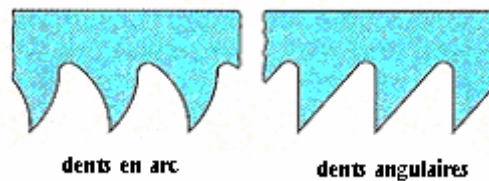
- **Avec des matériaux tendres**
 - petit angle de tranchant
 - grand angle de dégagement orthogonal et grand angle de coupe

En raison du changement continu de la force de coupe, l'utilisation de lames de scie manuelles présente un risque de coincement des lames. Pour cette raison, on a choisi ici un angle de coupe de 0°.

En principe, on doit distinguer deux types de formes de dents :

- la dent en chevrons (Herringbone) : surfaces planes
- la dent de forme arrondie (voir figure) : surfaces courbes.

Les deux formes sont utilisées pour des scies à main et des scies mécaniques. Le choix de la forme des dents la plus appropriée au travail dépend du matériau à découper. Les dents de forme arrondies ont un rythme de coupe plus élevé et peuvent absorber plus de force que les dents en chevrons.



▪ **Pas de denture**

Plus les dents se trouvent proches les unes des autres, plus l'espace de coupe est réduit. La distance entre deux extrémités de dents de scie est appelée pas de denture. On peut le calculer comme suit :

Pas de denture	Longueur de référence
=	(en cm)
	Nombre de dents

Les scies avec un pas de denture large conviennent mieux à la découpe du cuivre et des alliages à base de cuivre, dans la mesure où il est nécessaire de disposer d'un espace suffisamment grand pour l'évacuation des copeaux. L'opération de sciage doit cependant utiliser au moins trois dents, faute de quoi la scie risque de se coincer, surtout dans le cas de scie manuelle. On utilise des lames comportant 16 à 22 dents par pouce (1 pouce = 2,5 cm environ)

- **Scies mécaniques et semi-mécaniques**

La distinction entre ces deux types de scies se fait en fonction des critères suivants :

- **Scies alternatives**

Il s'agit d'un mouvement de coupe rectiligne et répété. On compte, parmi les outils appropriés, des scies à chantourner, des scies sauteuses et des scies circulaires à ailettes.

- **Scies circulaires**

Ces scies effectuent un travail de découpe circulaire ; les dents se succèdent comme dans une lame de scie sans fin. Les scies circulaires ont une vitesse périphérique élevée et n'ont pas de course de retour ; elles sont capables de hauts rendements pour l'éjection des matériaux.

- Scies à bande

Il s'agit ici d'un mouvement de coupe rectiligne dans lequel les dents se succèdent comme dans une lame de scie sans fin. On utilise les scies à bande pour la mise en forme des découpes ou pour des coupes isolées.

Dans tous les cas de figure, il est nécessaire de s'assurer que les copeaux sont bien éjectés de l'outil dès que la lame est sortie du matériau à couper. Les scies automatiques sont équipées de dispositifs de nettoyage de la poussière de métal et/ou de souffleries à air comprimé. Le bon fonctionnement de ces dispositifs doit être vérifié régulièrement.

On distingue les différentes machines en fonction du procédé utilisé. Les scies peuvent être manuelles ou électriques ; leur forme et leur type dépendent du travail considéré. On peut avantageusement utiliser des scies CNC même pour des pièces de petite taille. Lorsqu'il s'agit de découper des éléments sectionnels à la suite, on emploie des machines équipées de deux scies, voire plus, qui travaillent simultanément ou par intervalles.

5.3 Outils

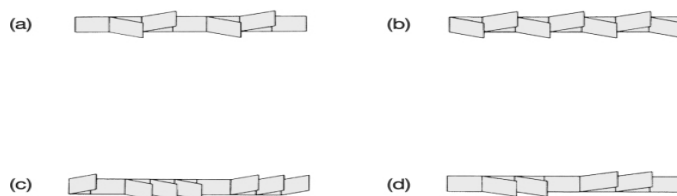
En ce qui concerne les outils permettant l'éjection des copeaux, c'est le type de tâche à effectuer qui détermine les éléments à prendre en considération tels que la forme des découpes, la vitesse de coupe, le rythme d'avancement du travail ou le pas de denture.

On distingue plusieurs types de lames de scies circulaires :

- **Lames de scies tout acier AHV (Acier haute Vitesse)** : lames rigides, coupes extrêmement précises ;
- **Lames de scies à segments AHV** : ces lames permettent le remplacement de segments rivetés au corps de la lame de scie. Il suffit de changer l'un de ces segments lorsqu'une dent se casse ou se trouve abîmée ;
- **Lames au carbure** : au lieu de segments, comme dans le modèle précédent, on trouve, soudées sur ces lames, des dents individuelles au carbure. Les scies dotées de lames au carbure se caractérisent par une longue durée d'utilisation entre deux maintenances et des vitesses de coupe élevées. Les lames destinées aux scies mécaniques ont généralement un angle de coupe positif.

Les lames de scies sont évacuées après la découpe selon différentes méthodes (voir figure).

On utilise des lames de scies à dents rigides ou des lames striées :



- a. Denture standard pour tous matériaux
- b. Dents droites ou gauches pour matériaux tendres et métaux non ferreux
- c. Schéma de denture striée pour sections de coupes ultra-minces
- d. Dents regroupées en grappes pour de hautes vitesses de coupe avec sections de coupes minces

Tableau des dispositifs d'éjection des copeaux :

Matériau	Résistance (N/mm ²)	Vitesse de coupe (m/min)	Angle de coupe γ / Angle de dégagement orthogonal α
cuivre	Jusqu'à 390	60..... 400	18...20 / 8...10
zinc	Jusqu'à 670	400600	12 / 10
zinc	Jusqu'à 460	40.....120	5...10 / 10

5.4 Fluides de lubrification et de refroidissement

Ce sont les conditions de la découpe qui dictent le choix des fluides de refroidissement ou de lubrification. Il est nécessaire que le lubrifiant puisse permettre l'évacuation de la chaleur avec des vitesses de coupe élevées et puisse adhérer suffisamment à la surface de travail. Les liquides de refroidissement doivent se présenter sous des formes sans chlorates ni soufre.

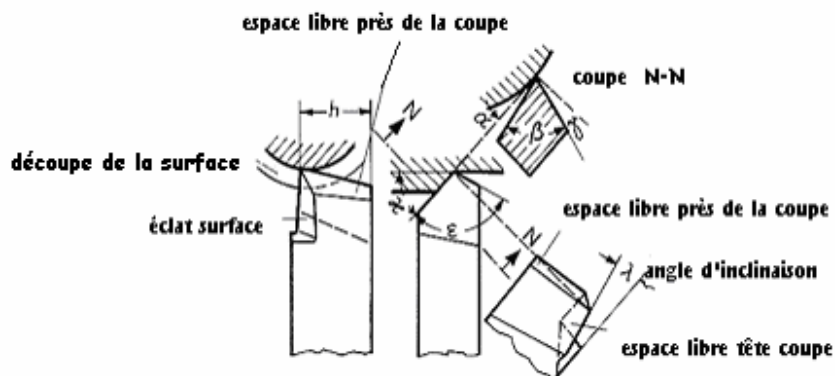
5.5 Outils de tour

Forme de découpe d'un outil de tour, avec définition des angles tranchants ; cette forme est valable également pour les outils destinés à l'éjection des copeaux.

- **Angle de découpe d'un outil de tour**

α = angle de dégagement orthogonal; γ = angle de coupe; β = angle de tranchant;
 λ = inclinaison du bord de coupe; ε = angle de tête ; χ = angle de bord de coupe

Tableau des formes de coupe des outils de tour :



Matériau de découpe	Angle de travail			Vitesse de coupe v	Rythme d'avancement
	Angle de Dégagement orthogonal α	Angle de coupe γ	Inclinaison du bord de coupe λ		
	En degrés	En degrés	En degrés	m/min	mm/U
HSS	10...20	20...30	-10.....-20	25...90	0,08.....0,6
Métal dur	6.....10	18...25	0.....- 4	180...200	0,04.....0, 6

L'usure se fait sur la face de dépouille de l'outil et la surface des copeaux pendant l'opération d'éjection des copeaux de cuivre. Seule doit être prise en compte l'usure de la face de dépouille. Il faut cependant noter que c'est elle qui détermine la précision dans les dimensions et la qualité de la surface obtenue.

Tous les paramètres qui entrent en ligne de compte dans les dispositifs d'éjection des copeaux doivent être étudiés en fonction de la composition de l'alliage considéré. La présence de plomb permet des améliorations décisives par rapport aux types d'usinage utilisés pour les alliages cuivre/zinc.

Les illustrations qui suivent montrent différentes formes de copeaux produits en cours de fabrication.



CuZn37

Copeaux plats hélicoïdaux susceptibles d'être la cause d'interruptions pendant la production en grande série.



CuZn37Pb0, 5

Copeaux hélicoïdaux parfois susceptibles de se briser, en raison de la présence de plomb.

**CuZn39Pb2**

Copeaux en aiguilles. L'ajout de plomb supplémentaire entraîne l'apparition de copeaux de petite taille sans danger pour la production.

6 Fraisage

Le fraisage consiste à éjecter les copeaux selon un procédé de mouvement de découpe circulaire.

Le matériau est évacué par suite du mouvement rotatif de l'outil muni d'une ou plusieurs lames de coupe. Le rythme d'avancement est donné soit par l'outil, soit par le plan de travail.

En termes de rythme d'avancement et de sens de la rotation, il est utile de faire la distinction entre le fraisage en opposition et le fraisage en avalant, qui doit être préféré au précédent d'une manière générale. Ce type de fraisage produit en effet des surfaces de meilleure qualité et la durée d'utilisation entre deux maintenances est plus longue. Ce procédé permet, en outre, un auto nettoyage de l'outil. Ce procédé ne peut être employé qu'avec des machines dotées d'un système de rythme d'avancement libre.

Matériau de coupe	Type de fraisage	Vitesse de coupe V (m/min)	Rythme d'avancement S_z (mm/dent)	Angle de travail		
				Angle de dégagement orthogonal α (Degrés)	Angle de coupe γ (Degrés)	Inclinaison du bord de coupe Λ (Degrés)
Matériau AHV	Fraisage en roulant	30...50	0,2...0,25	6	20	45
	Fraisage de face	70...130	0,2	8	18	5
Métal dur	Fraisage en roulant	120...200	0,2...0,4	10...12	15	5
	Fraisage de face	150...300	0,1...0,2	10...12	15	5

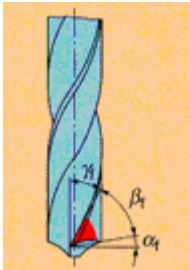
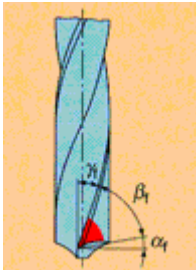
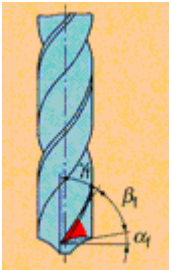
Les indications de fraisage sont données par le tableau ci-dessus. On peut obtenir un fraisage grossier avec un rythme d'avancement de matériau rapide et une profondeur de coupe peu importante, tandis qu'un fraisage de finition sera obtenu avec un rythme d'avancement lent et une profondeur de coupe importante.

La forme des lames, les spécifications des lubrifiants et fluides de refroidissement et l'influence liée à la composition des différents alliages de cuivre sont autant de facteurs qui entrent en ligne de compte, dans le fraisage comme dans les opérations précédemment mentionnées.

7 Perçage

Action de faire des trous cylindriques en utilisant des outils adaptés. Plusieurs opérations mécaniques sont à distinguer : perçage, forage et poinçonnage.

Plusieurs types de mèches sont utilisés pour le perçage des différents matériaux. On distingue ainsi les mèches de types N, H et W.

TYPE DE MECHES	TYPE N		TYPE H			TYPE W
						
Angle d'affûtage	$y_f = 19^\circ - 40^\circ$		$y_f = 10^\circ - 19^\circ$			$y_f = 27^\circ - 45^\circ$
Clavette de coupe	Clavette de taille moyenne		Clavette de coupe stable			Clavette mince
UTILISATION	Matériau à dureté et résistance moyenne		Matériau dur à très dur (fragile)			Matériau tendre ou procédé à copeau long
Angle de pointe	118°	130°	80°	118°	130°	130°
EXEMPLES DE MATERIAUX	Acier, fonte d'acier fer et graphite	Alliage de cuivre à haute propriété mécanique	Thermo plastique	Acier d'outil fortement allié	Acier trempé	Cuivre, alliage de cuivre à faible propriété mécanique, plomb, étain, aluminium.

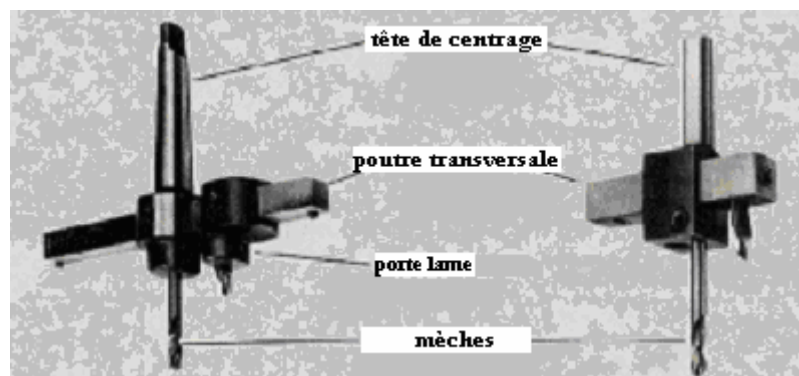
Des mèches à trois pointes et des fraises multipans peuvent être utilisées lors du perçage de feuilles, de bandes et de surfaces dont l'épaisseur peut aller jusqu'à 4 mm, à la place de mèches hélicoïdales (voir figure) :



Les avantages:

- trous circulaires
- pas de vibration de l'outil
- absence de marques sur les produits assemblés
- pas de déformation de l'élément percé
- longue durée de vie
- découpe silencieuse (force d'arrachement de matière et couple faibles)

Les scies cloches (voir figure) permettent de percer des trous d'un diamètre maximum de 400 mm dans des tôles d'épaisseur allant jusqu'à 5 mm. Pour ces applications on a recours à des carbures métalliques (alliages à base de carbures de W, Ta, Ti, Mo, V, Cr liés par du cobalt ou du nickel).



8 Assemblages mécaniques

Le terme assemblage décrit les processus ayant pour but :

1. l'assemblage permanent d'au moins deux éléments de forme géométrique définie, ou ;
2. l'assemblage permanent d'éléments de forme géométrique définie, en ayant recours à un matériau ou une substance amorphe.

8.1 Vissage

Vis et boulons permettent d'assembler des éléments de manière à pouvoir les détacher. Les exigences en matière de vis et de boulons sont particulièrement nombreuses et diverses. On différenciera les types de vis et de boulons selon les caractéristiques adaptées aux différentes utilisations :

- forme de tête
- type de filetage
- taille de filetage
- dimensions
- matériau

Les différentes catégories d'assemblage par le moyen de vis et de boulons sont différenciées comme suit selon leurs utilisations :

- vis et boulons de fixation
- vis et boulons de déplacement
- vis et boulons d'ajustement
- vis et boulons de mesure
- vis et boulons d'étanchéité
- vis et boulons d'agrafage

Il existe 3 types d'assemblage

- par boulons
- par vis d'assemblage
- par vis sans tête ou goujon fileté

8.2 Matériaux de fabrication

Du fait de leur bonne résistance à la corrosion, seuls les alliages Chrome-Nickel, Cuivre-Zinc ou Cuivre-Étain sont utilisés pour la fabrication de ce type d'éléments de connexion, ainsi que pour tous les accessoires de type écrous, rondelles ou autres éléments de verrouillage et de sécurité.

Catégories de résistance des vis/boulons et écrous :

Type de matériau	Résistance maximale R_m (N / mm ²)	Limite élastique $R_{p 0,2}$ (N / mm ²)
A 2	K 500	250
A 4	à K 800	à 600
Cu Zn 37	370...440	250...340
CuZn39 Pb3	370...440	250...340
CuSn6	400...470	200...340

8.3 Applications

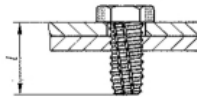
Architecture

La plupart des éléments d'assemblage sont fréquemment utilisés pour l'architecture et la construction. Dans ces domaines, boulons et vis jouent souvent un rôle esthétique et décoratif en plus de leur fonction première. C'est pourquoi leur utilisation systématique doit être prise en compte.

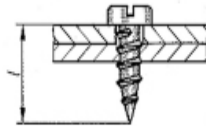
Les profondeurs de pénétration minimales des vis et boulons dans un élément ne sont pas toujours suffisantes lorsqu'il s'agit d'assemblage de feuilles de métal, de plaques fines ou de revêtements muraux fins.

On pourra alors utiliser les éléments suivants comme alternative :

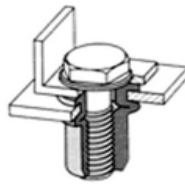
- Vis métallique où filetage assure le perçage



- vis auto taraudeuse



- douille taraudée

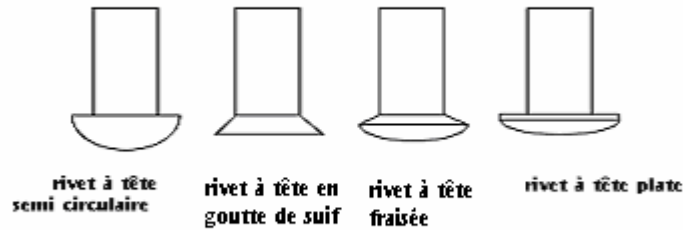


L'utilisation en extérieur d'éléments de façade et autres revêtements, doit obéir à des critères d'installation propres à certains matériaux tout en offrant une protection à la corrosion dans le cas de matériaux de différentes natures.

8.4 Rivetage

Le rivetage permet d'assembler des éléments de façon permanente suivant des modes de fixation de type **solide**, **solide et serré** ou **serré** selon le mode de rivetage. Les rivets doivent développer une force de fixation suffisante tout en garantissant une capacité de déformation adéquate. Dans le cadre de nombreuses applications le rivetage est une opération entièrement manuelle.

FORME DES RIVETS



Les matériaux utilisés pour les rivets sont :

- cuivre
- alliages cuivre-zinc
- alliages alluminés
- aciers chrome-nickel

Les rivets se présentent sous la forme d'une tige cylindrique, généralement métallique, pleine ou creuse qui est munie à l'une de ses extrémités d'une "tête" c'est à dire une partie de section plus grande. L'autre extrémité sera aplatie et élargie par écrasement, pour solidariser les éléments qu'on veut riveter ensemble. Ces éléments (par exemple deux plaques de métal) ont été percées au préalable chacune d'un trou permettant à la tige du rivet de traverser l'une et l'autre.

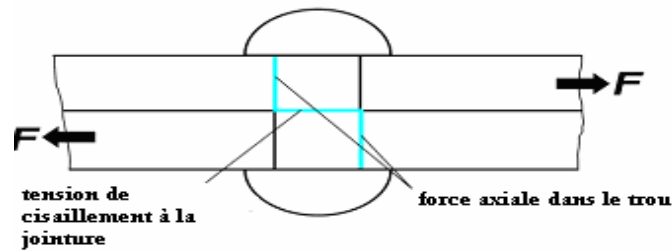
La plupart des rivets sont en aluminium avec tige en acier. Mais il existe aussi des rivets en titane pour l'aviation ou en plastique avec une faible tenue mécanique mais résistant à la corrosion.

Dans la mesure du possible, les rivets doivent être du même matériau que les éléments à assembler, et ce afin d'éviter tout risque de corrosion électrochimique par contact. Une isolation adéquate contre la corrosion électrochimique doit être mise en place pour toutes les applications en extérieur.

Différentes formes de rivets existent:

- rivets à tête ronde,
- rivets à tête bombée (ou) à tête en goutte de suif,
- rivets à tête fraisée,
- rivets à tête noyée (ou) perdue,
- rivets à tête fraisée et bombée,
- rivets à tête plate,
- rivets à tête tronconique

LE RIVETAGE



L'installation et l'utilisation correctes des rivets sont des conditions nécessaires pour le maintien de charges résultant de forces de cisaillement et/ou de torsion

Il existe d'autres types de rivets que ceux présentés ci-dessus, notamment des rivets fabriqués à partir d'alliages de cuivre pour la fixation des revêtements extérieurs de façade.

En effet, l'accessibilité réduite d'une des faces pour ce type d'application, nécessite l'utilisation de rivets dits « aveugles ».

Comme pour les rivets classiques, les instructions d'installation doivent être respectées afin d'éviter tout défaut mécanique ou problème de corrosion.

Sous la dénomination rivet aveugle on compte:

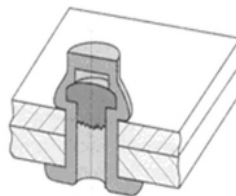
8.5 Rivet à tête de mandrin prisonnier

Les rivets à tête de mandrin prisonnier sont constitués d'un rivet associé à un mandrin dont la tête peut être ronde, plate ou conique. La tête du mandrin est enfoncée dans l'embout.

Les rivets à tête de mandrin prisonnier sont constitués d'un corps creux (tube avec collerette) en alliage déformable, et d'une tige dont une extrémité est renflée (le clou). Pour mieux répartir l'effort de serrage, la tête peut être ronde, fraisée ou large. Il est posé avec une pince spéciale qui tire sur la tige dont le bout renflé pénètre dans le corps du rivet pour réaliser le rivetage. Lorsque le blocage s'effectue, la tige se casse automatiquement en laissant le rivet en place.

Il existe des rivets aveugles dont le corps n'est pas percé de bout en bout, mais seulement d'un côté. Ce qui donne un rivet étanche.

Les rivets aveugles standards répondent à des normes françaises AFNOR ou allemandes DIN.

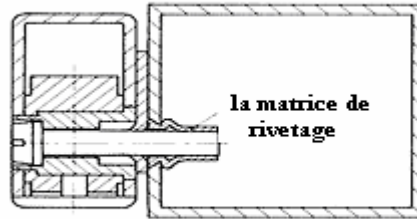


8.6 Rivets à visser

Les rivets à visser sont utilisés pour assurer la fixation d'éléments sur des murs de faible épaisseur derrière lesquels se trouvent des cavités inaccessibles.

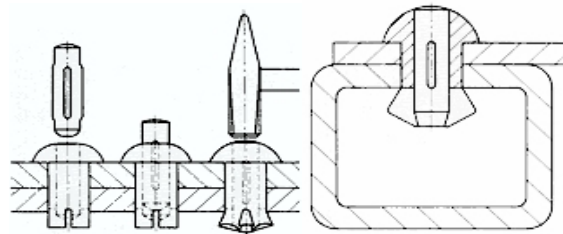
Un manchon taraudé creux est enfoncé dans trou pré-percé dans le mur. Un boulon est ensuite

vissé dans le manchon. On utilise ensuite un outil spécial pour tirer le boulon, ce qui engendre une déformation du manchon sous forme d'un bombement qui permet de retenir le manchon dans le mur. L'assemblage des éléments est alors assuré par vissage du boulon dans le manchon.



8.7 Rivets à corps cylindrique

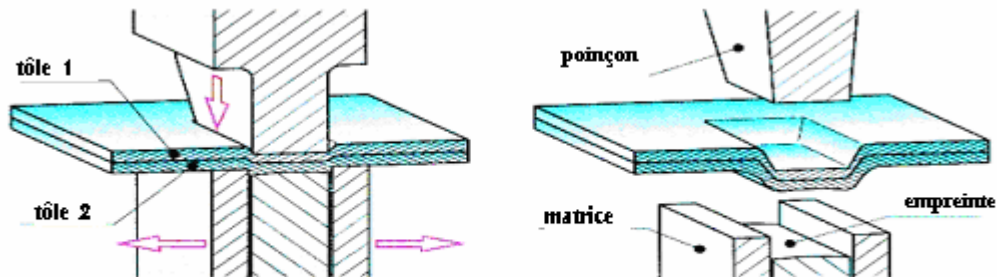
Les rivets à corps cylindriques sont utilisés pour assembler rapidement des métaux non ferreux qui ne sont pas soumis à des contraintes mécaniques fortes. Ils sont constitués d'un rivet creux et d'une cheville cylindrique que l'on vient enfoncer en force dans le rivet creux. En s'enfonçant la cheville élargie la tête du rivet assurant ainsi l'assemblage des éléments.



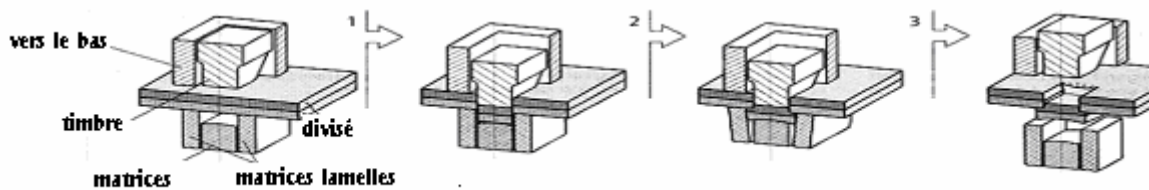
9 Assemblages par compression

L'assemblage par compression est une alternative moins complexe et moins onéreuse que l'assemblage par pliage ou par jonction. Les éléments à assembler sont déformés (emboutissage) de façon à générer une force s'opposant au détachement desdits éléments.

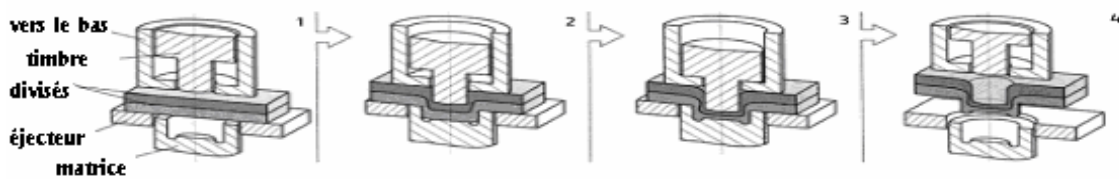
Cette méthode est principalement utilisée pour des feuilles de métal d'épaisseur inférieure à 3 mm.



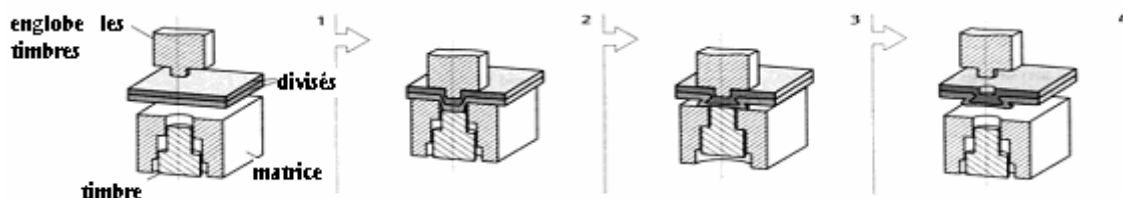
On utilise des presses mobiles ou en poste fixe pour extruder et/ou couper et mettre en forme les éléments à assembler sans apport de matière au cours d'un processus de formage à froid. Les films de protection, les couches intermédiaires et autres composés d'isolement et d'étanchéité ne sont pas endommagés pendant ce processus.



Assemblage par compression rectangulaire (non étanche aux liquides)



Assemblage par compression circulaire (étanche aux liquides)



Assemblage par compression en forme de cercle, de rectangle ou de carré en deux étapes (étanche aux liquides)

Un assemblage par compression étanche aux gaz et aux liquides peut être réalisé par ajout d'agents d'étanchéité élastiques et résistants au vieillissement (voir figure).

9.1 Joint Collé

Le terme joint collé est utilisé pour décrire l'assemblage d'éléments de nature identique ou différente sur une grande partie de leur surface. On utilise pour cela une substance adhésive de nature complètement différente adhérant aux surfaces des éléments devant être collés et dont la fonction sera de transmettre les efforts d'un élément vers l'autre. L'application de ce type d'adhésif peut se faire en appliquant une certaine pression, ou un apport calorifique. La plus grande attention doit être apportée à la préparation et à la réalisation des joints collés afin de garantir la qualité et la solidité du collage.

Les joints collés présentent une alternative intéressante aux autres méthodes d'assemblage telles que la soudure, le rivetage, le vissage, le boulonnage, le brasage, etc.

▪ Avantages

- pas d'effets thermiques sur les éléments à assembler
- répartition uniforme des contraintes
- collage sur de grandes surfaces
- plusieurs types de matériau peuvent être collés
- collage d'éléments très fins
- joints étanches au gaz et aux liquides
- pas de crevasse due à la corrosion
- pas de formation de corrosion de contact

▪ Inconvénients

- préparation très soignée des surfaces à coller
- temps de séchage (durcissement)
- impossibilité de transmettre les forces surfaciques
- épaisseur d'adhésif à définir et dimensionner précisément

▪ Limites d'utilisation

- résistance à chaud limitée
- caractéristiques des joints collés évoluant dans le temps (détérioration progressive)
- résistance chimique
- résistance aux émissions UV
- restrictions de conception
- réalisation d'essai non destructif limitée

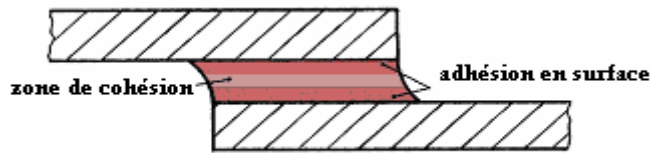
9.2 Joints collés – Influence de l'état de surface

Les molécules de la substance adhésive et celles des éléments à coller doivent être en contact pour que le collage puisse avoir lieu. Ceci ne peut être obtenu que si les surfaces à coller sont parfaitement propres. Le collage par adhésif n'est donc pas approprié pour des surfaces sales ou graisseuses.

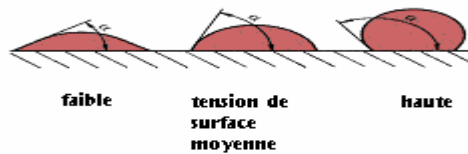
9.3 Contraintes mises en jeu

Les forces d'adhésion à l'interface de l'élément à coller et de l'adhésif, et les forces de cohésion à l'intérieur même de l'adhésif, sont entièrement définies par la qualité des joints collés.

Les forces de cohésion sont, en général, très inférieures aux forces d'adhésion.



La qualité, et donc la force d'adhésion de surface, sont dues au pouvoir de mouillage de l'adhésif sur les surfaces jointes. Plus l'angle α de la tension superficielle sera petit, plus le mouillage des surfaces à joindre sera élevé, et meilleures seront les forces de collage.



De trop grandes différences de surface entre points hauts et points bas impliquent des épaisseurs de joints trop importantes, avec comme conséquence des contraintes transmises uniquement au travers des forces de cohésion. Il en résulte que les surfaces devant être jointes doivent être les plus lisses possibles (absence de rainures...)

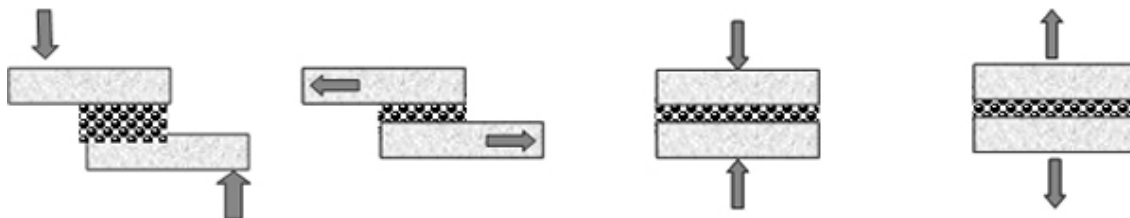


Surface lisse: bon pouvoir adhésif

surface rugueuse : mauvais pouvoir adhésif

9.4 Pouvoir adhésif – Importance de la conception

Les propriétés et les caractéristiques des adhésifs doivent être prises en compte lors de la réalisation des joints afin d'assurer le meilleur collage possible. Ces caractéristiques doivent prendre en compte les différents types de charges. On distingue :



Contraintes de décollement

contraintes d'arrachement

contraintes de compression

contraintes d'arrachement

9.5 Force de résistance des joints collés

La force de résistance des joints collés n'est en règle générale importante que dans le cas où le joint est soumis à des contraintes importantes.

Les contraintes les plus communément rencontrées sont de type : arrachement, torsion, compression, poussée, décollement.

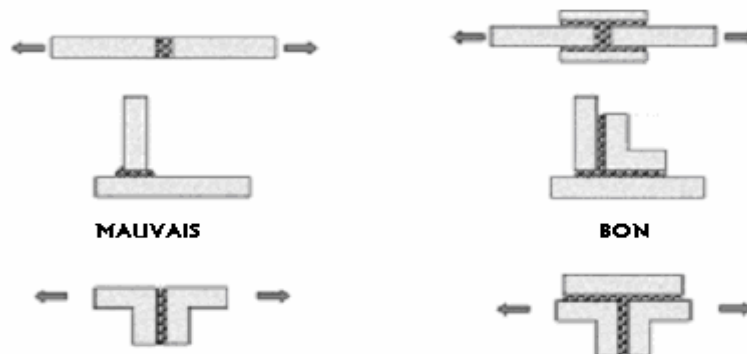
La plupart des joints adhésifs ont pour valeur de force de résistance les valeurs suivantes :

Type d'adhésif	Application	Max. Application Température (°C)	Force moyenne de déchirement élastique à 20 °C (N/mm ²)	Remarques
Résine Epoxy (RE)	Métal - Métal Métal - Synthétiques	120	10...35	Bonne force de capillarité
Résine Polyester (UP)	Métal - Métal Métal - Synthétiques	80	10...20	Non applicable pour des joints renforcés
EP-Polyamide	Métal - Métal Métal - Synthétiques	120	35...49	Grande flexibilité
Cyanide Acryl	Métal - Métal	20	17...19	Fixation rapide

Les valeurs des forces sont fournies, en général, pour des charges statiques et peuvent être diminuées de 30% dans le cas de charges dynamiques pour des joints collés.

9.6 Conception

La transmission des forces doit se faire comme cela est décrit ci-dessous pour les différents types de joints.



10 Assemblages thermiques

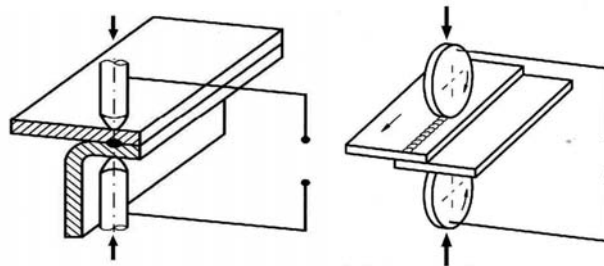
a. Soudage

Le soudage est, en fait, l'assemblage de matériaux de même nature à l'état liquide ; le soudage est réalisé localement, par apport de chaleur et/ou sous pression et avec ou sans apport de matière additionnelle (dite "matériau d'apport").

Le soudage est une des méthodes d'assemblage par fusion.

Le cuivre et ses alliages peuvent être assemblés par la plupart des procédés de soudage.

Le soudage par points ou par résistance électrique à la mollette convient à tous les matériaux cuivreux dans certaines limites et uniquement en utilisant certains types d'électrodes.



Une attention particulière doit être apportée aux caractéristiques suivantes, lorsque l'on souhaite pratiquer le soudage du cuivre et de ses alliages :

- Grande conductivité thermique
- Grande dilatation thermique
- Grande capacité d'absorption gazeuse à l'état liquide
- Du fait de la grande résistivité thermique du cuivre, les échantillons épais de cuivre pur ne pourront être soudés de façon satisfaisante que s'ils ont été préchauffés.
- Ce que l'on appelle la "maladie de l'hydrogène" (fragilisation due à l'hydrogène, provoquée par une ségrégation structurale) apparaît dans le cuivre liquide contenant de l'oxygène comme la conséquence de la possible absorption de l'hydrogène atmosphérique. Seul un cuivre exempt d'oxygène (à savoir, Cu-HCP et Cu-DHP) devrait être utilisé lors du soudage, ou, si le cuivre contient de l'oxygène (à savoir, Cu-ETP), il conviendra de travailler en atmosphère contenant un gaz protecteur.
- Le soudage d'alliages cuivre-zinc présente des difficultés du fait que le zinc risque de s'évaporer en cours de soudage, sa température de fusion étant basse (906° C). Il n'est pas possible d'éviter l'évaporation du zinc au cours du soudage. Le zinc évaporé modifie la couleur de la pièce soudée. Cette modification peut être évitée ou rendue réversible au moyen d'un alliage complémentaire au zinc, en utilisant un matériau d'apport spécial.
- La couche supérieure d'oxyde d'aluminium peut également provoquer des difficultés lors de soudage sur des pièces en cuivre contenant de l'aluminium ou sur des alliages Cu-Al. Au cours du soudage, cette couche de surface doit être éliminée au moyen d'une protection de gaz actif ou par soudage à l'arc HF. Les alliages Cu-Al présentent, cependant, une bonne soudabilité.

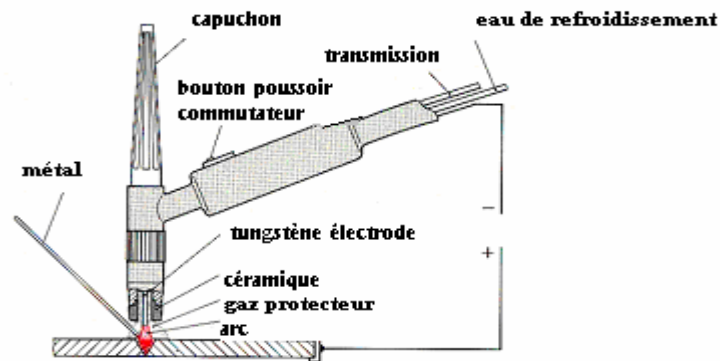
b. Soudage aux gaz Tungstène/inerte

Dans le soudage aux gaz Tungstène/inerte (TIG), l'arc s'établit entre l'électrode de tungstène et la pièce. Les gaz rares tels que l'argon, l'hélium ou leurs mélanges peuvent être utilisés comme gaz inertes (réactivité faible ou négative, c'est-à-dire, pas de réaction avec le métal liquide déposé).

Le soudage TGI du cuivre et de ses alliages est réalisé sous courant continu. L'électrode correspond à la polarité négative.

Le chalumeau, dans un procédé de soudage TIG, est constitué d'un bec en céramique, d'une électrode au tungstène amovible maintenue par une pince de serrage, et d'un embout de sécurité pour le chalumeau.

Le passage de gaines contient les câbles de puissance, l'arrivée de gaz protecteurs ainsi que l'eau de refroidissement pour le brûleur qui peut fonctionner en circuit fermé selon les systèmes. L'amorçage de l'arc est obtenu sans contact grâce à un système haute fréquence.



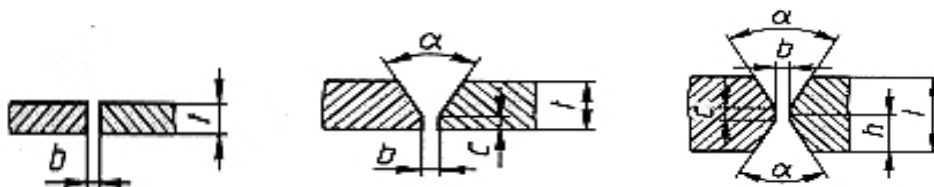
Comme dans le cas du dispositif de guidage du chalumeau, l'apport de matière additionnelle peut aussi bien être manuel que mécanique.

Le matériau de soudure d'apport est tenu à la main. L'approvisionnement en matière est automatique sur les systèmes de soudage mécanique.

Le soudage TIG permet la réalisation de soudures de haute qualité particulièrement propres. Le rendement quant à l'apport de matière ainsi que celui du soudage sont moins élevés que dans le cas du soudage aux gaz métal/inerte (MIG). Le soudage TIG convient pour le soudage de l'aluminium, du cuivre, des alliages à base de cuivre et des aciers fortement alliés. Ce processus de soudage est économiquement rentable pour des épaisseurs de matière allant jusqu'à 5 mm. Les parties à souder doivent être préchauffées pour réaliser du soudage sur du cuivre avec des épaisseurs de matière supérieures à 5 mm.

c. Préparation des pièces à souder

Les meilleurs résultats de soudage sont obtenus lorsque les parties à assembler sont préparées avec la plus haute brillance métallique. Selon l'alliage mis en jeu, les parties à assembler dont l'épaisseur est supérieure à 10 mm doivent être préchauffées entre 200 et 500° C (il convient de se conformer aux prescriptions du fournisseur).



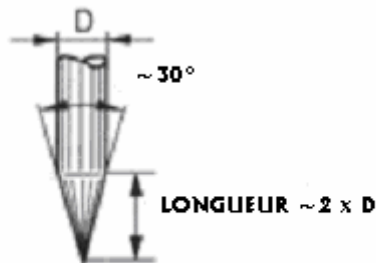
La préparation des pièces à souder est proposée schématiquement ci-dessus.

10.1 Les différentes électrodes

Les électrodes au tungstène contiennent, en complément du tungstène, les éléments entrant dans la composition de l'alliage présentés dans ce tableau

Appellation courte	Combinaison			Repérage		
	Oxyde Ajoutés		Pollution	Tungstène % m/m	Repérage de couleur selon la RAL	
	% m/m	Type	% m/m		Teinte	Couleur No.
WP	-		≤ 0,20	99,8	vert	6018
WT 4	De 0,35 à 0,55	Th O ₂	≤ 0,20	Complément	bleu clair	5012
WT 10	De 0,80 à 1,20	Th O ₂	≤ 0,20	Complément	jaune	1018
WT 20	De 1,70 à 2,20	Th O ₂	≤ 0,20	Complément	rouge	3000
WT 30	De 2,80 à 3,20	Th O ₂	≤ 0,20	Complément	violet	4003
WT 40	De 3,80 à 4,20	Th O ₂	≤ 0,20	Complément	orange	2000
WZ 3	De 0,15 à 0,50	Zr O ₂	≤ 0,20	Complément	marron	8001
WZ 8	De 0,70 à 0,90	Zr O ₂	≤ 0,20	Complément	blanc	9010
WL 10	De 0,90 à 1,20	La ₂ O ₃	≤ 0,20	Complément	noir	9005
WL 20	De 1,70 à 2,20	La ₂ O ₃	≤ 0,20	Complément	bleu outremer	5002
WC 20	De 1,80 à 2,20	Ce O ₂	≤ 0,20	Complément	gris	7011

Les électrodes doivent être préparées selon l'usinage proposé sur la figure ci-dessous. Son extrémité faisant contact avec la terre permet de réaliser un arc électrique hautement concentré.



10.2 Courants de soudage

Le courant de soudage est défini comme une fonction de :

- La position de soudage et
- de l'épaisseur de la pièce.

Des chiffres indicatifs figurent dans le tableau suivant.

Epaisseur de pièce mm	Position de soudage	Diamètre des électrodes de tungstène (mm)	Diamètre de la tige d'apport des alliés (mm)	Intensité du courant (A)
< 1,5	Horizontal (PA, PB)	1,0 resp. 1,6	1,2 et 1,6	70 ... 105
	Vertical- (PF) ou en position supérieure (PE)	1,0 resp. 1,6	1,2 et 1,6	50 ... 90
> 1,5	Horizontal (PA, PB)	1,6 resp. 2,4	Jusqu'à 2,4	100 ... 200
	Vertical- (PF) ou en position supérieure (PE)	1,6 resp. 2,4	Jusqu'à 2,4	75 ... 130

Le soudage TIG est pratiqué sur le cuivre et pratiquement tous ses alliages. Les parties à assembler doivent impérativement être préchauffées si leur épaisseur est > 5 mm.

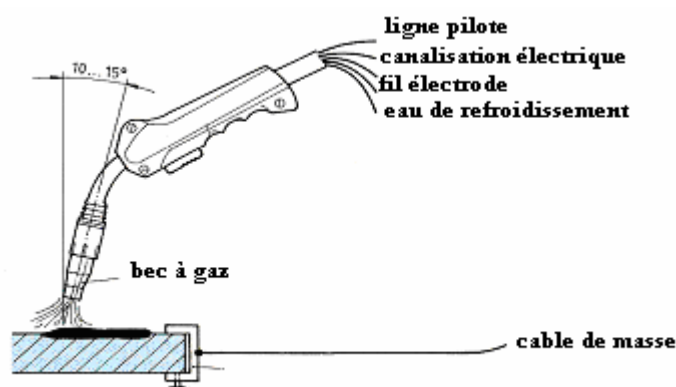
10.3 Soudage aux gaz métal/inerte

Dans le cas du soudage aux gaz métal/inerte (MIG), l'arc est établi entre une électrode de matière perdue alimentée mécaniquement et la pièce. De ce fait, l'électrode constitue l'apport de matière et est automatiquement alimentée depuis un rouleau au travers d'un dévidoir. L'alimentation électrique est réalisée grâce à un guide-fil. Le gaz protecteur est inerte, soit de l'argon, soit de l'hélium ou encore un mélange des deux, comme pour le soudage TIG.

Le montage compact de ces systèmes de soudage inclut l'alimentation en courant continu grâce à un système de régulation assurant une tension constante. Le passage de gaine (3 à 5 mm de longueur) renferme, comme le montre la figure le câble d'amenée du courant de soudage, le dévidoir, le tuyau de gaz protecteurs et le câble de contrôle (et, selon le système de sortie, les alimentations aller et retour en eau de refroidissement). Le retour du circuit de puissance électrique se fait par un câble connecté sur la pièce à souder (câble ou connexion vers la terre).

Le soudage MIG exige des niveaux de courant plus élevés que le soudage TIG. Cela conduit à de meilleurs rendements lors du dépôt de matière.

L'utilisation de machines de soudage impulsives MIG rend ce procédé économiquement rentable à partir d'épaisseurs aussi faibles que 1 mm.



Le courant de soudage est fonction du diamètre de l'électrode de soudage et doit être choisi dans le tableau de choix ci-dessous :

diamètre de l'électrode de soudage	Tension de soudage (V)	Courant de soudage (A)
0,8	19...23	100...150
1,0	21...26	Jusqu'à 180
1,2	Jusqu'à 28	Jusqu'à 250
1,6	Jusqu'à 30	Jusqu'à 400

Le soudage MIG doit être préférentiellement choisi pour des épaisseurs de métal importantes, quelles que soient la position de soudage et pour tous les types d'assemblage.

10.4 Courant de soudage

Différents matériaux de transition peuvent être obtenus avec divers types d'arc selon la nature des gaz protecteurs et des niveaux de courants utilisés. Les possibilités sont les suivantes :

- Rendement faible ou élevé de dépôt de métal, basse ou haute pénétration
- Nature des ponts réalisés
- Taille des cordons de soudure et leur nombre

Le tableau suivant définit les différentes transitions :

Soudage à l'arc de pulvérisation	Soudage à l'arc court	Soudage à l'arc impulsionnel
Egouttement fin à super-fin, pratiquement libre de court-circuit	Egouttement fin, Uniquement en court-circuit	Egouttement fin, séquence contrôlée par fréquence impulsionnelle
MIG	MIG	MIG

Les différents types d'arc électrique et la longueur de fil mise en œuvre (distance entre le guide-fil et la pièce) ont une influence directe sur les conditions de pénétration de la soudure. Le cas général se situe entre 15 et 20 mm. Plus cette valeur est basse, plus la pénétration est élevée.

Une attention toute particulière doit être apportée lors du soudage du cuivre et de ses alliages pour adapter la protection du mélange de matières en fusion contre l'oxygène. Le besoin en flux de gaz protecteurs dépend de la position de soudage et du type d'assemblage. Le flux nécessaire varie en fonction du diamètre de l'électrode et ne doit pas être inférieur aux ordres de grandeur suivants :

- Diamètre de l'électrode $\times 10 + 2$ l

Exemple:

Diamètre de l'électrode : 0.8 mm

$$\square 0.8 \times 10 = 8 + 2 = 10 \text{ l/min.}$$

- **Soudage à l'arc manuel**

Ce procédé de soudage convient également aux matériaux à base de cuivre. Il ne supporte cependant pas la comparaison avec les deux autres procédés décrits plus haut du fait des exigences en termes de garantie de qualité et des spécifications quant à la résistance requise.

- **Soudage laser**

Les exigences techniques, tant sur le plan des produits que sur celui des services justifient l'usage de techniques de soudage innovantes. L'efficacité et les performances des systèmes mis en œuvre dans le soudage laser permettent de satisfaire à ces exigences pour de la production en série, aussi bien pour le cuivre que pour ses alliages.

10.5 Les différents systèmes et leurs constituants

Les diverses exigences des différents procédés de soudage utilisés imposent l'usage systématique de systèmes de soudage adaptés. Les configurations possibles, selon le mode d'alignement et la géométrie des pièces sont les suivantes :

- 1D (une dimension)
- 2D (deux dimensions)
- 3D (trois dimensions)

Systèmes de soudage avec :

- "optiques mobiles" (machines pour lesquelles le système optique est en mouvement)
- machines pour lesquelles la pièce à traiter est en mouvement
- machines hybrides (la pièce à traiter et le système optique sont tous deux en mouvement).

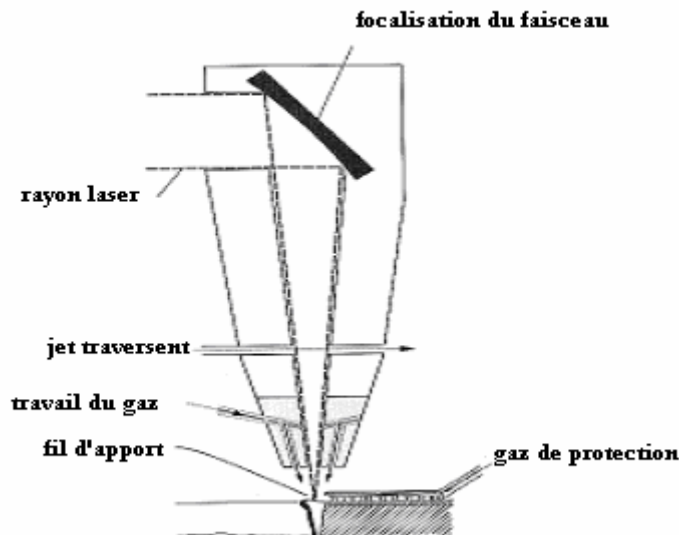
Le laser (pour les alliages du cuivre, laser YAG/Nd) permet de guider le faisceau, proche des longueurs d'onde du visible (infrarouge) dans de la fibre optique. Cette transmission par fibre optique autorise l'intégration du système de convergence optique à l'aide de robots à bras articulés et il en résulte une très grande flexibilité lors de travaux tridimensionnels.

10.6 Les têtes de soudage et les différents types de cordons

La tête de soudage (dont la figure présente la structure schématique) possède les fonctionnalités suivantes : focalisation du faisceau sur le point de soudage, apport des gaz nécessaires et, si besoin, le fil d'apport de matière.

Les couches d'oxydes doivent être éliminées des surfaces de contact afin d'éviter l'apparition de porosités :

- Les surfaces de contact seront débarrassées de l'huile, de la graisse et de la moisissure sinon :
 - Il y a danger d'explosions violentes lors du soudage et
 - Le système de focalisation risque d'être endommagé par les projections de soudure



Les exigences concernant la qualité et la précision des points de contact entre les pièces à souder sont élevées du fait que les méthodes mises en jeu dans le soudage laser sont répétées sur des intervalles de temps très courts et dans un espace extrêmement confiné.

Un positionnement précis du laser sur les bords à assembler est indispensable sinon l'assemblage ne sera pas possible car le cordon est très étroit.

Le procédé de soudage requiert une préparation extrêmement précise. Une focalisation du faisceau laser entre 0.3 et 0.6 mm impose l'utilisation de pinces de serrage adaptées qui seront capables d'appliquer des contraintes suffisantes pour presser les pièces à assembler sans qu'aucun espace n'apparaisse entre elles en cours de soudage.

La déformation thermique, pratiquement inévitable lors de soudage laser, contribue également à modifier ces contraintes en cours de soudage.

La géométrie de l'assemblage doit être adaptée à la forme des pièces.



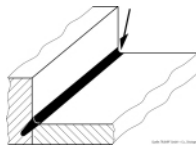
▪ **Assemblage sur bords en équerre :**

- Préparation très facile
- Tendance à couler défavorable
- Très bonne accessibilité
- Caractéristiques spécifiques : besoin important en apport, grande rigidité de l'assemblage



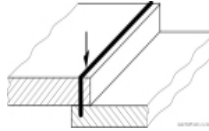
▪ **Assemblage en I :**

- Demande beaucoup de préparation
- Tendance à couler favorable
- Bonne accessibilité
- Caractéristiques spécifiques : l'espace entre les pièces doit être très petit



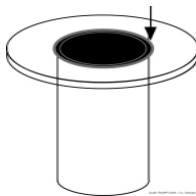
▪ **Soudure à congé :**

- Demande beaucoup de préparation
- Tendance à couler favorable
- Accessibilité médiocre
- Caractéristiques spécifiques : du fait de la médiocre accessibilité, à tendance à favoriser les défauts d'assemblage



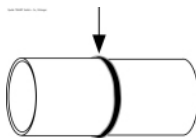
▪ **Soudage par recouvrement :**

- préparation très facile
- tendance à couler défavorable
- très bonne accessibilité
- caractéristiques particulières : la découpe de la surface dépend de la largeur de la soudure (et non pas de son épaisseur !)



▪ **Soudage circulaire axial :**

- préparation : ajustement par point de soudure ou à la presse
- cause : les surfaces en regard gagnent en volume en début de soudage
- tendance à couler favorable
- l'accessibilité dépend de la géométrie de l'outil



▪ **Soudage circulaire radial :**

- préparation facile
- tendance à couler favorable
- bonne accessibilité
- caractéristiques particulières : le soudage radial est préférable au soudage axial (un positionnement meilleur et plus facile est ainsi possible)

▪ **Soudage des goujons**

Le soudage à l'arc des goujons, utilise les différents procédés de soudage suivants, selon la méthode employée : soudage des goujons à l'arc étiré, à amorçage à arc par point ou à amorçage

par arc annulaire.

Le procédé est décrit de façon plus détaillée ci-dessous, conditionné par l'adéquation du rapport de l'épaisseur de métal au diamètre du goujon, qui est environ $\leq 10:1$ dans le cas du soudage des goujons à amorçage à arc par point.

Les différents types de procédés de soudage des goujons sont bien adaptés pour les éléments de dispositifs de fixation, du fait de la rapidité de soudage et du faible apport de chaleur associé.

- Le soudage rapide assure une faible pénétration et une faible distorsion.
- L'objectif est de réaliser un soudage sur une grande surface afin de pouvoir supporter des contraintes élevées.
- Des applications de diverses natures sont possibles, selon les procédés.
- Il est possible de travailler dans toutes les positions de soudage en utilisant des pistolets de soudage légers.
- Même dans le cas de feuilles de 0,8 mm d'épaisseur, des broches à visser de type M4, soudées sur la face arrière ne provoquent pas de dégradation appréciable de la face avant de la pièce, sous réserve que les conditions de soudage soient correctement réalisées.
- La surface de travail de la pièce métallique doit être dure et ne pas être électriquement conductrice (prise en compte du phénomène de soufflage).
- Les valeurs de réglage prescrites par le constructeur doivent être respectées, afin d'éviter que la soudure apparaisse sur la face visible.

10.7 Caractéristiques du procédé

Pendant le soudage, le goujon est déplacé vers la pièce sous la pression d'un ressort. L'arc électrique est amorcé par le contact de la surface travaillante (électrode) avec la pièce. Le ressort presse le goujon dans le métal en fusion.

Déplacement du goujon ; inflammation (amorçage de l'arc) ; soudage

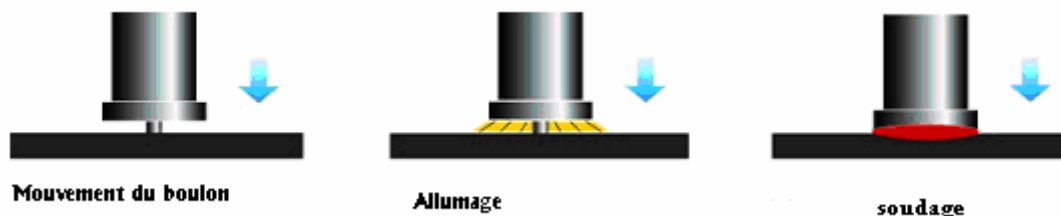
Le soudage à l'arc électrique avec amorçage à arc par point est utilisé dans les soudages suivants :

- Boulons filetés
- Tiges et goujons
- Bagues et emboîtures à filetage interne
- Tiges supports de calorifugeage
- Connecteurs plats
- Goujons spéciaux
- Pièces nécessitant un soudage spécial

Avec des diamètres entre 2 et 6 mm dans le cas du cuivre et des ses alliages cuivre/zinc (laiton), selon les besoins et la composition. Le soudage indéformable est réalisé de façon semi- ou totalement automatique.

Au cours du soudage, l'énergie emmagasinée (jusqu'à 20000 A) dans des batteries de condensateurs est déchargée au travers de l'électrode dans un temps extrêmement court, compris entre 1 et 3 ms (0,001 à 0,003 sec.). Des éléments auxiliaires comme du gaz protecteur ou des anneaux en céramique ne sont pas nécessaires.

Du fait de son extrêmement faible profondeur de pénétration qui n'atteint approximativement que 0.1 mm, cette méthode est principalement utilisée pour souder des goujons sur de minces feuilles de 0.5 mm d'épaisseur et au-delà.

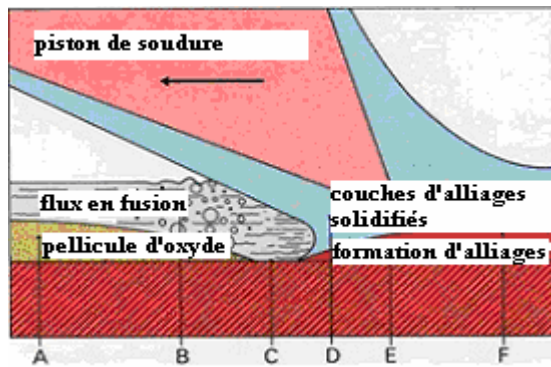


10.8 Brasage

Le brasage est un procédé thermique qui permet l'assemblage par fusion et l'enrobage de pièces, en exploitant l'apparition d'une phase liquide grâce à la fusion de la dite brasure (brasage par fusion) ou au moyen de la diffusion de la brasure dans les interstices entre surfaces de contact (brasage par diffusion). Les brasures doivent avoir une température de fusion plus basse que celles des matériaux à assembler.

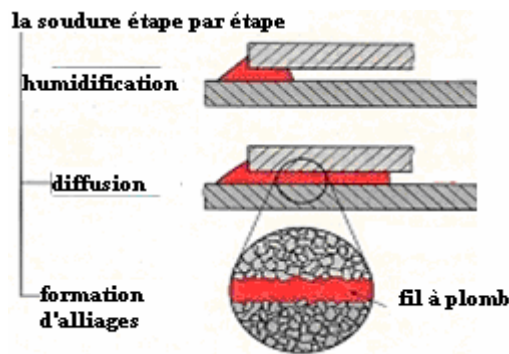
Le procédé de brasage se réalise en un nombre d'étapes déterminé.

Une fois que la surface brillante métallique de la pièce (température de surface = point de fusion de la brasure) a été mouillée par la brasure, un écoulement apparaît avec, simultanément, la formation d'alliages du matériau parent sur les couches de surface, caractéristique de procédés de diffusion et due au phénomène de capillarité à l'endroit du brasage, au niveau de la surface élargie de la goutte de brasure.



- A) pellicule d'oxyde
- B) flux en fusion
- C) surface brillante métallique
- D) brasure liquide
- E) formation d'alliages
- F) couche d'alliages solidifiés

La largeur idéale pour une opération de brasage est de 0,05 à 0,2 mm.
L'utilisation des flux dépend du procédé utilisé :



Pour le **brasage tendre** la température de la brasure liquide est inférieure à 450°C.
Pour **brasage fort** la température de la brasure liquide est supérieure à 450°C.

Les brasures sont des éléments métalliques (métaux et alliages de métaux), qui sont conditionnées sous la forme de bobine, de bâton, de feuille, de profilé, de barre, de tranche, de grains, de pâtes, etc. Les propriétés caractéristiques des brasures sont leurs températures de fusion et de travail, qui dépendent de leur constitution respective.




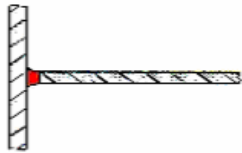
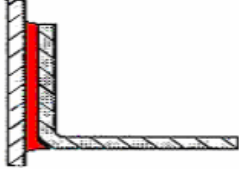
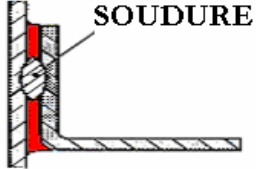
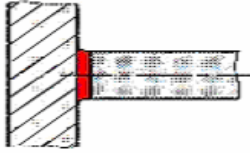
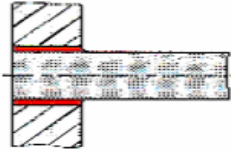
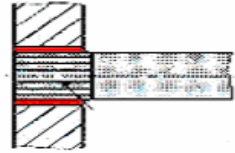
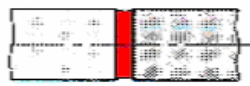
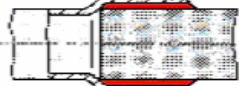
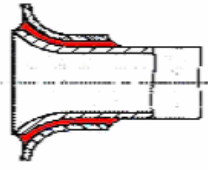
Les points suivants, dans le cadre de la production et de la fabrication, sont à respecter :

- La température de travail d'une brasure est la plus basse température de surface de la pièce au point de brasage pour laquelle la brasure est capable de mouiller le matériau parent, de s'étaler et de faire contact avec le matériau parent. La température de travail est toujours supérieure à la température de solidification.
- Les flux sont constitués de matières non métalliques. En prenant soin, au préalable, de nettoyer correctement les surfaces à brasier, les flux vont servir à éliminer tous les films de surface restant et empêcher qu'ils ne se reforment, afin que la brasure puisse mouiller la surface de brasage.
- Les brasures les plus usuelles pour les matériaux cuivreux sont les brasures plomb-étain et étain-plomb, habituellement regroupés sous le nom de « brasures tendres ».
- Les brasures pouvant contenir de l'argent ou non sont utilisées pour le brasage fort des

matériaux métalliques. Le cuivre pur convient parfaitement aussi bien pour le brasage tendre ou fort. La présence d'un film protecteur d'oxyde d'aluminium sur les matériaux en cuivre contenant de l'aluminium oblige de le traiter à l'aide de flux spéciaux lors des brasages tendre et fort. L'évaporation de zinc peut se produire lors du brasage d'alliages cuivre-zinc à de très hautes températures de travail

Pour des raisons de production et de conception, le soin le plus attentif doit être apporté à la forme du brasage. Les contraintes pour le positionnement seront obtenues par des mises en tension et/ou en cisaillement.

Les figures suivantes illustrent différentes situations :

PREPARATION DE JOINT DE SOUDURE			
TYPE DE SOUDURE	BOUT A BOUT	RECOUVREMENT	EPAULEMENT
JOINT A PLAT			
JOINT EN T			
ARRONDI PAR MOULAGE			
AVEC ABRASAGE			
EFFICACITE DE LA SOUDURE	INADEQUAT	BIEN APPROPRIE	CONSEILLE

11 Affinage de surface

Grâce à leurs propriétés matérielles spécifiques telles que :

- Résistance aux substances chimiques
- Résistance à la corrosion
- "Propriétés d'urgence"
- Bonne malléabilité à chaud et à froid
- Bonnes caractéristiques pour évacuer les copeaux
- Soudabilité
- Conductivité thermique et électrique extrêmement élevée
- Résistance à l'usure

les matériaux en cuivre ont une très large gamme d'utilisation possible.

Des traitements de surface adaptés aux produits et spécifiques à une production donnée sont réalisés dans les cas où il convient d'anticiper les attaques à la surface du cuivre et de les éviter et/ou dans les cas où d'autres propriétés que celles proposées par la matière centrale du métal sont nécessaires en surface.

Des traitements de coloration de surface sont utiles lorsque qu'une couleur non disponible dans la gamme des coloris naturels des matériaux cuivreux est nécessaire. Si la coloration intrinsèque de la pièce en cuivre ne satisfait pas le besoin technologique, la surface peut être prétraitée par des moyens mécaniques, chimiques, électrolytiques et, dans de nombreux cas, une combinaison de ces possibilités.

11.1 Moyens mécaniques

Les surfaces utiles peuvent être obtenues grâce à des procédés de meulage, de tournage et de fraisage.

Si les exigences concernant les surfaces sont supérieures, il conviendra de faire appel à des techniques de bufflage ou de « meulage fin » et de polissage.



Des machines de meulage à la main sont utilisées, en dernier ressort, pour réaliser le traitement manuel des matériaux cuivreux :

- Meules d'angle
- "Mini-meules"
- outils à arbre flexible, comprenant les porte-outils
- Outils de meulage simples



Les agents de meulage sont choisis en fonction d'un usage bien déterminé :

Procédé	Granulation de l'agent de meulage	Vitesse de meulage (m/s)	Broche mécanique Rotation en tr/min.
Pré-meulage	60... 80	12... 25	avec Ø 250 mm → 1 000 - 2 000
Meulage de finition	120...220 30	avec Ø 250 mm → jusqu'à 3 500
Meulage fin 36030	
Polissage	400...600 40	

Les agents suivants peuvent être utilisés :

Procédé	Agent de meulage
Pré-meulage	Meules laminées, broches pour le meulage, meules striées
Meulage de finition	Meules laminées, broches pour le meulage, meules striées
Meulage fin	Meule à pression
Polissage	Patins en coton, patins à buffler, patins en sisal, patins en feutre

11.2 Pré-meulage

Meules coupantes abrasives, meules de dégrossissage, meules striées, tourets équipés de disques à meuler en fibre.

11.3 Meulage de finition et meulage fin

Meules laminées, disques et rouleaux abrasifs non tissés pour le meulage, courroies et rouleaux flexibles pour le meulage.

11.4 Polissage

Outils à polir, patins en feutre, brosses en fibre, patins à buffler en coton.

Toute élévation excessive de température des pièces est à éviter lors des opérations de meulage. Dans le cas contraire, il y a risque de marbrage.

11.5 Décapage

Les procédés de décapage au jet abrasif sont possibles ; selon l'agent abrasif, il est possible d'obtenir des surfaces au fini mat et non orientées.

Les agents abrasifs suivants sont utilisés :

- Boulettes et poudres non ferreuses
- Perles ou micro-perles de verre
- Granulés de CO_2

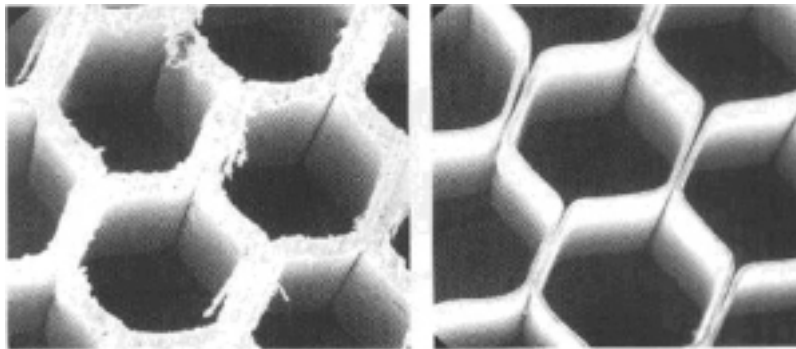
Au-delà de sa fonction de traitement de surface, le décapage a également, plus ou moins comme effet secondaire, la propriété de durcissage à froid des matériaux.

12 Chimie et électrochimie

12.1 Electropolissage

Le terme "polissage électrolytique" décrit un traitement électrochimique qui favorise l'aplatissement et l'obtention d'un rendu brillant d'une surface métallique à l'origine mate et rugueuse. L'électropolissage est un des procédés de production permettant électriquement de retirer de la matière. Ce résultat est obtenu grâce à l'échange de charges électriques entre la pièce métallique et un milieu liquide, l'électrolyte.

L'électropolissage est, en principe, le phénomène inverse de la galvanisation, en imposant le potentiel positif d'une source DC (à savoir, l'anode) à la pièce à travailler. Le passage du courant continu permet à l'électrolyte de dissoudre des éléments de surface de la pièce. La surface est alors rendue plus lisse et plate.



(Figure, à gauche : surface après polissage ; figure, à droite : surface après électropolissage)

L'électropolissage est utilisé chaque fois qu'une surface de grande qualité ainsi qu'une absence de réactivité chimique sont requises, par exemple pour les éléments décoratifs de l'industrie du bâtiment comme :

- Les parements de façade
- Les parements en feuille de métal pour les intérieurs
- Les pièces de garde-corps et de parapets
- Les meubles

12.2 Conditions requises pour l'électropolissage

- Géométrie des pièces adaptée, c'est à dire, bonne accessibilité pour installer les cathodes dans les trous, les saignées et les creux
- Possibilité de manutention en vrac de pièces massives pour un polissage dans des tambours ou des cloches, afin d'éviter qu'elles s'accrochent entre elles, se coincent ou se bloquent.
- Une épaisseur des parois suffisante afin que la distribution du courant ne soit pas altérée par la résistance électrique du matériau.
- Un nombre adapté de points de contact corrects afin d'assurer la conduction du courant.
- Des surfaces assurant une bonne conduction électrique, libres de substances diélectriques parasites telles que la graisse ou la calamine.
- Une bonne qualité de surface car les défauts mécaniques tels que les éraflures ou les rayures restent visibles après l'électropolissage.

12.3 L'enrobage

Les fines couches d'oxyde, qui initialement constituent un premier film protecteur et qui, associées aux couches suivantes qui se forment ensuite, protègent de réactions de surface et procurent ainsi aux matériaux traités une grande résistance à la corrosion, apparaissent, au cours du temps, du fait de l'exposition aux intempéries et à l'environnement, sur les surfaces brillantes métallisées du cuivre et du laiton (alliage cuivre-zinc). La couleur rouge du cuivre, par exemple, se modifie par apparition d'une couche d'oxyde pour aller du marron rouge au bleu anthracite en passant par le marron foncé. Progressivement, après un certain temps, une couche protectrice (patine), résistante aux intempéries, très adhérente, non toxique se forme ; elle est constituée essentiellement des principaux sels de cuivre. Cette patine naturelle est la raison pour laquelle, les objets d'art anciens réalisés en cuivre ont conservé jusqu'à ce jour leur forme. Ces modifications de surface sont extrêmement populaires pour des raisons décoratives et esthétiques selon le champ d'application et sont, en fait, obtenues de façon artificielle au moyen de procédés de coloration divers, dans de nombreuses utilisations du cuivre et de ses alliages. Les objets qui sont amenés à être fréquemment touchés par les humains, comme par exemple les boutons de porte et les poignées, vont conserver leur surface naturelle du fait des propriétés bactériologiques des matériaux cuivreux.

La peinture est une bonne façon d'embellir et de protéger les objets souvent utilisés.

Les types de peinture suivants proposent de bonnes caractéristiques, aussi bien pour des applications intérieures qu'extérieures :

- Résines acryliques (traitement à chaud ou à froid, sous la forme de films protecteurs à un ou deux composants)
- Résines époxy (deux composants, avec de bonnes propriétés adhésives et les caractéristiques suivantes : résistance aux chocs, souplesse, résistance à l'abrasion)

La bonne réussite de l'enrobage nécessite un traitement préalable soigné :

- Décapage et polissage
- Nettoyage et dégraissage
- Rinçage et séchage