# SOMMAIRE

*Le lecteur trouvera en début de chaque chapitre un sommaire détaillé.*


Chapitre 1 **Procédés d'alésage** 1

Chapitre 2 **Procédés d'assemblage** 2

Chapitre 3 **Procédés de brochage** 3

Chapitre 4 **Procédés de découpe** 4

Chapitre 5 **Procédés d'érosion** 5

Chapitre 6 **Procédés de filetage** 6

Chapitre 7 **Procédés de forgeage** 7

Chapitre 8 **Procédés de formage** 8

Chapitre 9 **Procédés de fraisage** 9

Chapitre 10 **Procédés de moulage** 10

Chapitre 11 **Procédés de perçage** 11

Chapitre 12 **Procédés de rectification** 12

Chapitre 13 **Procédés de superfinition** 13

Chapitre 14 **Procédés de taillage, rectification et superfinition des dentures** 14

Chapitre 15 **Procédés de tournage** 15

Chapitre 16 **Procédés d'ébavurage** 16

# AVANT-PROPOS

*Cet ouvrage de référence en productique-mécanique permettra à l'utilisateur qui doit appréhender une étude de conception ou de production de choisir un procédé optimum en fonction des contraintes économiques.*

*En effet, la polyvalence technique, actuellement nécessaire aux techniciens de tous niveaux, implique d'avoir les bases de connaissances sur l'ensemble des procédés de fabrication qui sont nécessaires dans les activités de projet et de mise en œuvre de production. Ces bases de connaissances permettront de mieux communiquer au sein des équipes pluridisciplinaires.*

*Ainsi, cet ouvrage véritable guide pratique, traite tous les procédés de la fabrication et permet de faire un choix des outils de transformation en expliquant les procédés, les règles et les paramétrages en fonction des matériaux et des machines utilisés et de donner une réponse immédiate à toute modification de conception et/ou de matériau.*

*Sont abordés les procédés d'alésage, d'assemblage, de brochage, de découpe, d'érosion, de filetage, de forgeage, de formage, de fraisage, de moulage, de superfinition, de perçage, de rectification, de taillage, de tournage et d'ébavurage.*

*Cet ouvrage de « l'Art » de la production s'intègre dans la démarche productique, carrefour des procédés de fabrication avec leur mise en œuvre, les méthodes, et l'organisation de la production. C'est un outil de travail qui pourra accompagner pendant la formation ou dans sa vie professionnelle, celle ou celui qui œuvre dans ce champ d'activité.*

# 1 PROCÉDÉS D'ALÉSAGE




1. Généralités ..... 9
   - 1.1 Opérations d'alésage ..... 9
   - 1.2 Mouvements générateurs ..... 9
   - 1.3 Précisions obtenues ..... 9

2. Outils utilisés : Outils de forme et outils d'enveloppe ..... 10
   - 2.1 Outils de forme : Alésoirs, broches ..... 10
   - 2.2 Outils d'enveloppe ..... 14
   - 2.3 Choix d'utilisation des outils d'alésage ..... 16

3. Alésage à l'outil de forme ..... 18
   - 3.1 Surépaisseur d'usinage ..... 18
   - 3.2 Évacuation des copeaux ..... 18
   - 3.3 Conditions de coupe des alésoirs ..... 19
   - 3.4 Alésage à l'alésoir monobloc ..... 19

4. Alésage à la barre ..... 20
   - 4.1 Généralités ..... 20
   - 4.2 Barres d'alésage à outils réglables ..... 22
   - 4.3 Barres d'alésage multi-outils ..... 25
   - 4.4 Lames d'alésage sur barre ..... 26
   - 4.5 Têtes à aléser et surfacer ..... 26
   - 4.6 Conditions de coupe des barres d'alésage ..... 26
   - 4.7 Système automatique d'alésage de précision ..... 27
   - 4.8 Têtes d'alésage de forme ..... 28

5 Alésage à la fraise ..... 28

6. Mise en œuvre ..... 29
   - 6.1 Puissance de coupe ..... 29
   - 6.2 Outillage porte-pièce(s) ..... 29
   - 6.3 Machines ..... 30

# 1. Généralités



Production par coupe de formes cylindriques intérieures, débouchantes ou borgnes, à l'aide d'outils d'enveloppe et de forme, en travaux d'ébauche et de finition, avec une précision généralement de qualité 7.

## 1.1 Opérations d'alésage

Elles s'effectuent sur perceuses, fraiseuses, tours, aléseuses, centres d'usinage et centres de tournage, brocheuses, rectifieuses, et sont à inclure dans les phases d'usinage de ces machines.

## 1.2 Mouvements générateurs

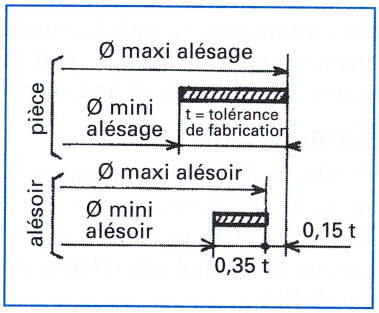
(À l'exclusion du brochage).
**Coupe** : Mouvement de rotation donné généralement à l'outil.
**Avance** : Mouvement donné à la pièce (fraiseuses, centres d'usinage) ou à l'outil (aléseuses, tours, centres de tournage, perceuses, rectifieuses).

## 1.3 Précisions obtenues

Elles dépendent des conditions de mise en œuvre (suite des opérations, matériaux à usiner, machine, lubrification, rigidité outil et pièce) (fig. 1.1).
La tolérance de fabrication (m6) des alésoirs est définie pour l'obtention des alésages H7, dans des conditions normales d'utilisation (NF E- 74- 100) (fig. 1.2).

| Outils utilisés en suite d'opérations | Qualités obtenues | | |
|---|---|---|---|
| | Diamètre (H...) | État de surface (Ra) | Rectitude sur 100 mm (centièmes) |
| Foret + alésoir | H7 | 0,8 – 1,6 | 20 |
| Foret + foret aléseur + alésoir | H7 | 0,4 – 0,8 | 5 |
| Foret + grain + alésoir ou grain | H7 – H6 | 0,4 – 0,8 | 2 |
| Brut (moulage, forgeage) + foret aléseur + alésoir | H7 | 0,4 – 0,8 | 10 |
| Brut (moulage, forgeage) + foret aléseur + alésoir | H7 – H6 | 0,4 – 0,8 | 2 |

**FIGURE 1.1** Précisions usuelles obtenues en alésage.




| ø mm de ... à | – 3 | 3 6 | 6 10 | 10 18 | 18 30 | 30 50 | 50 80 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| H8 | + 11 + 6 | + 15 + 8 | + 18 + 10 | + 22 + 12 | + 28 + 16 | + 33 + 19 | + 39 + 22 |
| H7 | + 8 + 4 | + 10 + 5 | + 12 + 6 | + 15 + 8 | + 17 + 9 | + 21 + 12 | + 25 + 14 |
| H6 | + 5 + 2 | + 6 + 3 | + 7 + 3 | + 9 + 5 | + 11 + 6 | + 13 + 7 | + 16 + 9 |

**FIGURE 1.2** Tolérances de fabrication des alésoirs (NF E 74.100). Écart en µm des alésoirs.

**Précision diamétrale.**
Obtenue en cote-outil (outils de forme) ou cote-fabriquée (outils d'enveloppe), en qualité usuelle : 7 à l'outil de forme (alésoir, broche) et outil-fraise d'enveloppe ; 6 avec outil d'enveloppe (grain sur barre et outil à aléser).

### Précision géométrique

**Circularité.** De qualité usuelle : 6 avec alésage ébauche précédant alésage finition à l'alésoir ou à la broche ; 7 avec finition à la fraise deux tailles.
**Rectitude.** Elle est fonction de : rigidité du couple broche porte-broche/outil ; obtention du trou d'ébauche et des opérations d'alésage.
Avec utilisation d'un grain d'alésage (barre ou outil à aléser) : correction de défaut de rectitude avant opération d'alésage finition.

### État de surface

Obtention usuelle de : 0,8 à 0,4 Ra avec alésoirs, barres d'alésage, outils à aléser, broches ; 1,8 à 0,8 Ra avec fraises deux tailles ; 0,4 à 0,02 Ra avec meule.

# 2. Outils utilisés : outils de forme et outils d'enveloppe

## 2.1 Outils de forme : Alésoirs, broches.

### Alésoirs.

Ils sont utilisés essentiellement en finition sur perceuses, fraiseuses, centres d'usinage, tours, centres de tournage, aléseuses, (fig. 1.3).

### Caractéristiques

Outils de forme, monoblocs avec queue ou alésage de maintien normalisés (NFE- 66-001..., 74-100). Ils ont de trois à douze dents (arêtes de coupe) selon leurs utilisations fonctionnelles.
**Arêtes coupantes** : Elles sont courtes, d'angle de direction d'arête $K_r = 60°$ (cas général). Le guidage outil s'effectue par les listels (arêtes secondaires) qui prolongent chaque arête de coupe de longueur au moins égale à 0.5 du diamètre normal (fig. 1.4).
Les alésoirs sont en acier rapide et à lames brasées carbure (micrograins K15 revêtu TIN).

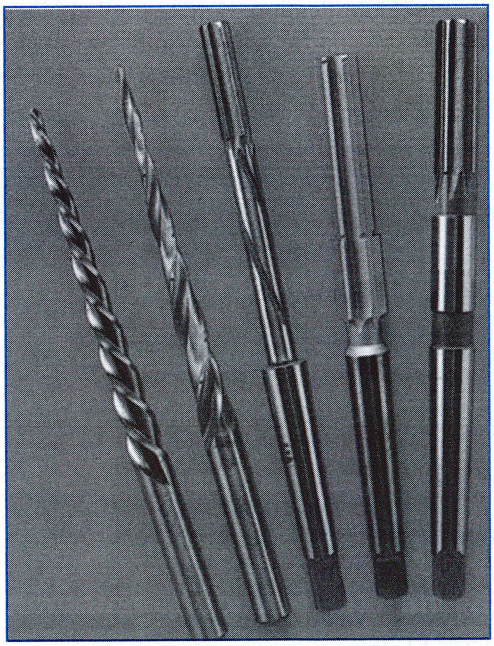


**FIGURE 1.3** Alésoirs Monoblocs.
*Doc. Magafor*

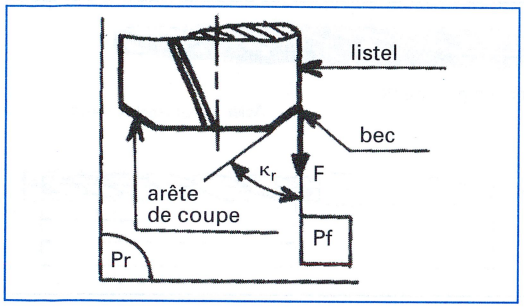



**FIGURE 1.4**
Arête de coupe principale des alésoirs.

## Utilisation

Elle est spécifique à la conception de chaque type d'alésoir (forets-aléseurs, alésoirs d'ébauche, alésoirs de chaudronnerie, alésoirs-machine, alésoirs coniques).
Ils sont utilisés pour le calibrage des trous en dimension et en forme (cylindricité et rectitude) par un faible enlèvement de matière.
Les forets aléseurs et alésoirs ébaucheurs sont utilisés pour calibrer géométriquement des trous, en forme et position.

**Alésoirs de trois à quatre dents.**
Ils sont utilisés pour l'alésage de trous brut de fonderie ou de forge : calibrage particulièrement en cylindricité avec les listels hélicoïdaux.

**Alésoirs ayant plus de quatre dents.**
Ils sont utilisés pour l'alésage de trous percés : calibrage de précision, avec les listels droits (parallèles à l'axe du corps d'outil).

**Forets-aléseurs.**
Ils ont 3 ou 4 arêtes de coupe à denture hélicoïdale, hélice à droite (22°). Généralement leurs diamètres varient de 3 à 60 mm avec queue conique ou cylindrique selon les dimensions.
Ils sont utilisés en pré-alésage de trous bruts de fonderie et de forge pour corriger des défauts géométriques (circularité, désaxage, rectitude,...) (fig. 1.5). Éventuellement ils sont utilisés en finition (qualité 8).

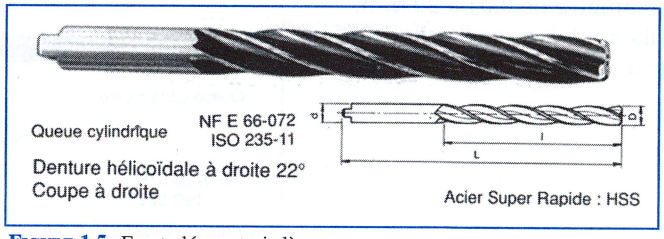



**FIGURE 1.5** Foret aléseur trois lèvres. *Doc. Leclerc*

**Alésoirs d'ébauche.**
Ils ont 4 arêtes de coupe, à denture hélicoïdale, hélice à droite. Leurs diamètres varient généralement de 20 à 60 mm, avec alésage de maintien (fig. 1.6).
Ils sont utilisés en alésage de demi-finition pour corriger des défauts géométriques.

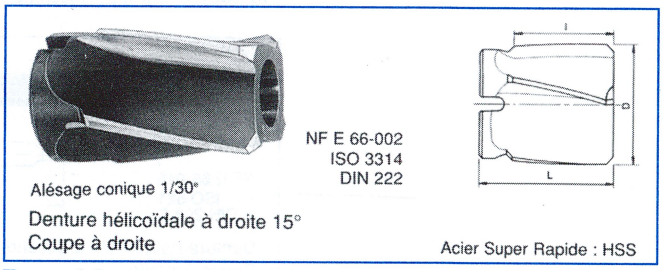



**FIGURE 1.6** Alésoir « creux » d'ébauche, quatre lèvres. *Doc. Leclerc*

**Alésoirs de chaudronnerie.**
Ils ont 5 arêtes coupantes à denture hélicoïdale, hélice à droite avec une longue entrée conique (10 % sur 30 à 90 mm suivant les diamètres). Leurs diamètres

varient de 6 à 40 mm avec queue conique (fig. 1.7).
Ils sont utilisés en alésage de trous de tôlerie pour obtenir la cylindricité.

**Alésoirs-machine.**
***Alésoirs-machine à denture droite.***
Ils ont de 4 à 8 arêtes de coupe à denture droite avec queue cylindrique pour les diamètres 1 à 20 mm et queue conique pour les diamètres 6 à 50 mm (fig. 1.8).
Ils sont utilisés en alésage de finition de trous percés ou pré-alésés.
***Alésoirs à denture hélicoïdales.***
Ils ont de 3 à 12 arêtes de coupe à denture hélicoïdale à gauche (8°, 10°, 15°, 45°), en acier rapide ou en carbure (lames brasées).
Leurs diamètres varient de 1 à 50 mm, en plusieurs séries, soit :
*Série d'alésoirs en palier* de diamètre de 0.01 à 20 mm.
Ils sont à queue cylindrique ou conique (fig. 1.9 et 1.10).

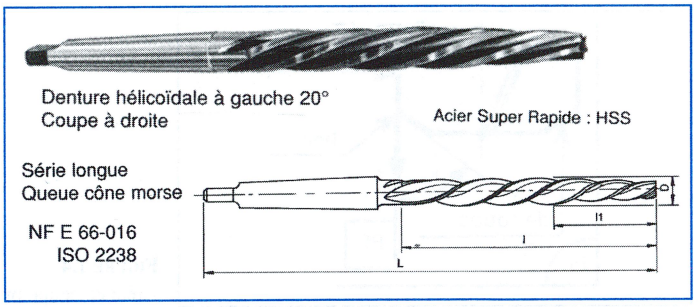



**FIGURE 1.7** Alésoir de chaudronnerie cinq lèvres. *Doc. Leclerc*

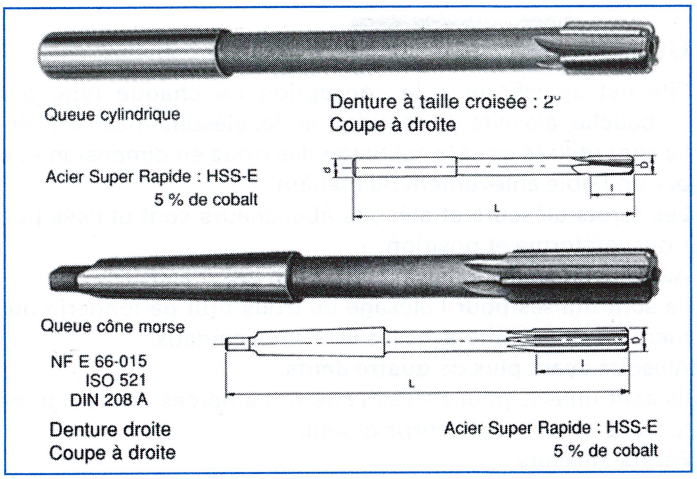



**FIGURE 1.8** Alésoirs « machines ». *Doc. Leclerc*

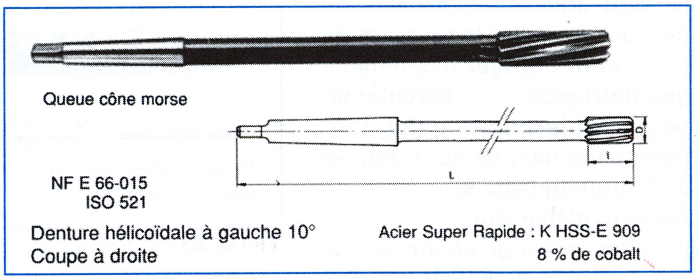



**FIGURE 1.9** Alésoir « machine » par 0,01. *Doc. Leclerc*

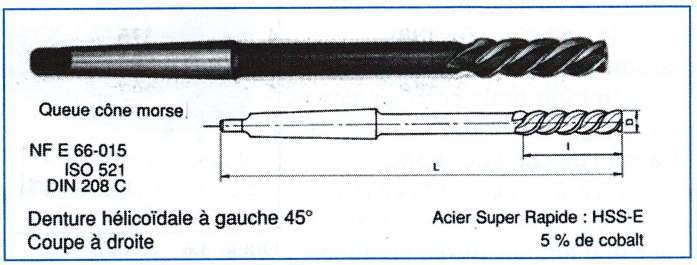



**FIGURE 1.10** Alésoir « machine ». *Doc. Leclerc*

*Série denture longue :* leurs diamètres varient de 6 mm (longueur utile de 47 mm), à 50 mm (longueur utile de 174 mm). Ils sont à queue conique (fig. 1.11).

*Série d'alésoir extra- longs.* Ils sont : à queue cylindrique du diamètre 3 mm avec une longueur utile de 90 mm, au diamètre 12 mm avec une longueur utile de 210 mm. (fig. 1.12) ; à queue conique, du diamètre 13 mm avec une longueur utile de 245 mm, au diamètre 50 mm avec une longueur utile de 415 mm.

**Alésoirs expansibles**

Ils sont à denture droite et à queue conique, des diamètres 6 à 32 mm.

Ils sont utilisés pour aléser à un diamètre supérieur au diamètre nominal (≅ 1%). (fig. 1.13).

**Alésoirs «creux»**

Ils sont avec alésage de maintien, de diamètres 20 à 60 mm, à denture droite en taille croisée (2 %) ou hélicoïdale à gauche (45°) (fig. 1.14).

**Alésoirs coniques.**

Ils sont de conicités correspondantes aux différentes utilisations, avec queue cylindrique ou conique, soit :

*Alésoir pour dépouille des outillages* (moules et matrices) de conicité 1 %. Ils sont à denture hélicoïdale (15°) à gauche avec 4 dents, de diamètres 1.25 à 6 mm. (fig. 1.15).

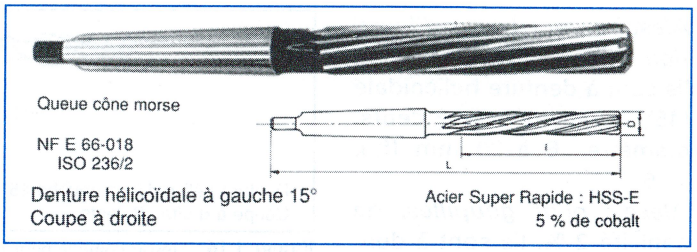



**FIGURE 1.11** Alésoir denture longue. *Doc. Leclerc*

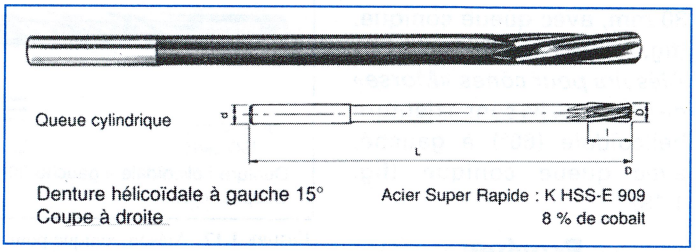



**FIGURE 1.12** Alésoir extra-long. *Doc. Leclerc*

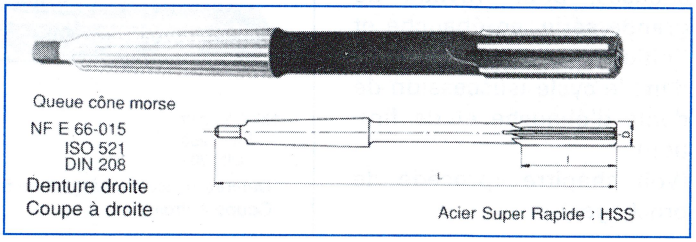



**FIGURE 1.13** Alésoir expansible. *Doc. Leclerc*

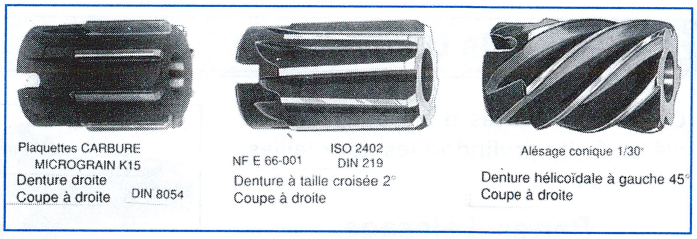



**FIGURE 1.14** Alésoirs « creux » de finition. *Doc. Leclerc*

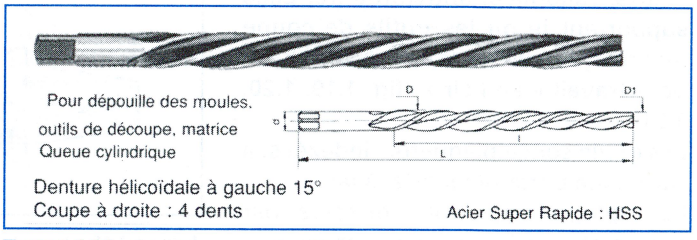



**FIGURE 1.15** Alésoir conique d'outillage. *Doc. Leclerc*

*Alésoirs pour buses d'injection*, de conicité 5 % ou 10 %. Ils sont à denture hélicoïdale (45°) à gauche avec 2 dents, diamètres 6 à 20 mm (fig. 1.16).

*Alésoir pour goupilles*, de conicité 2 %. Ils sont à denture hélicoïdale à gauche (30°), de diamètres 5 à 30 mm, avec queue conique. (fig. 1.17).

*Alésoirs pour cônes «Morse»* de CM 0 à 5. Ils sont à denture hélicoïdale (60°) à gauche, avec queue conique (fig. 1.18).

### Broches.

Elles sont utilisées sur brocheuses, pour travaux de grande série, en ébauche et finition avec le même outil dans le cycle (succession de dents d'ébauche et de finition).

(Voir chapitre «procédé de brochage»).

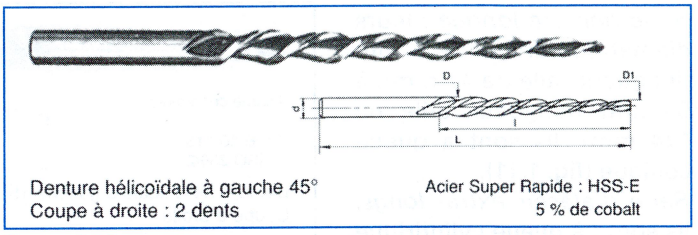



**FIGURE 1.16** Alésoir conique pour moules d'injection. *Doc. Leclerc*

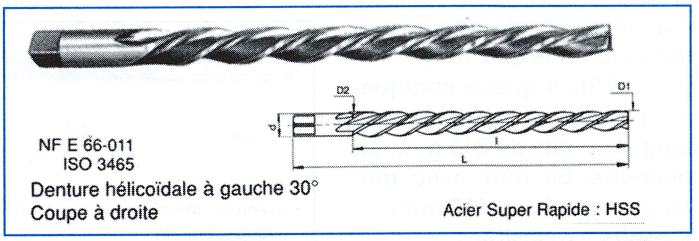



**FIGURE 1.17** Alésoir conique pour goupilles. *Doc. Leclerc*

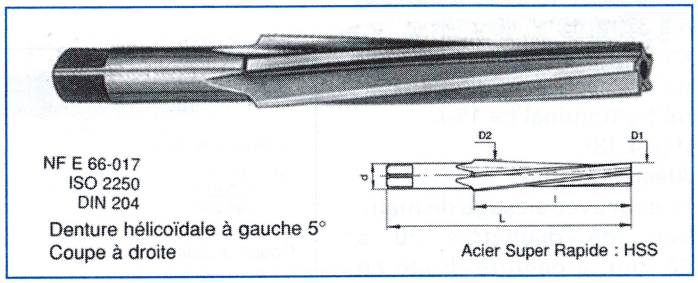



**FIGURE 1.18** Alésoir conique pour cône morse. *Doc. Leclerc*

## 2.2 Outils d'enveloppe.

Ce sont les barres d'alésage, outils à aléser, fraises cylindriques deux tailles, têtes à aléser.

### Barres d'alésage.

De conception monobloc ou modulaire courte, rallongée, antivibratoire. Elles supportent le ou les outils de coupe montés généralement en bout de barre, pour travail « en l'air » (fig. 1.19, 1.20, 1.21).

Les outils sont à plaquettes indexées, à cartouche porte-plaquette, à lames.

Le réglage diamètral s'effectue par excentration micrométrique de l'outil.

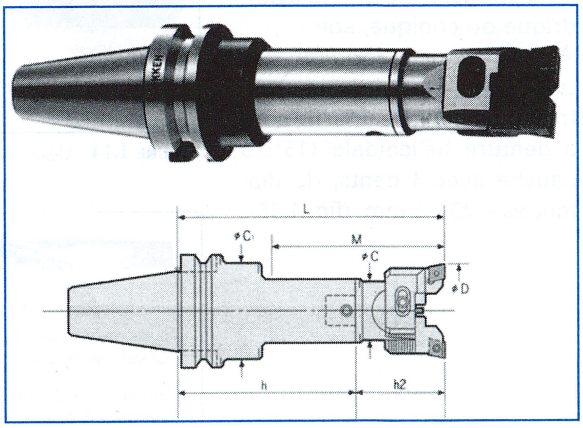
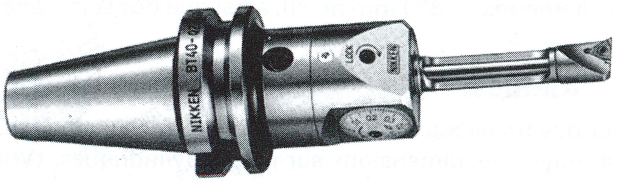



**FIGURE 1.19** Barre d'alésage d'ébauche «ßalance-cut».
*Doc. Nikken*




(La photo montre une vue en coupe d'outil à âme carbure.)

**FIGURE 1.20**
Barre d'alésage à réglage micrométrique, avec outil à âme carbure interchangeable.
*Doc. Nikken*

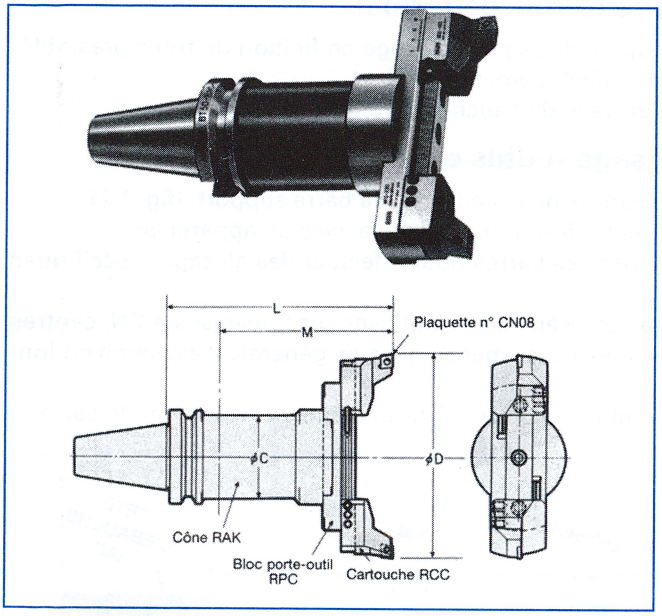



**FIGURE 1.21**
Barre d'alésage pour grands diamètres (avec vis de réglage de précision).
*Doc. Nikken*

**Utilisation.** Sur aléseuses, fraiseuses, centres d'usinage, tours, centres de tournage, avec des plages de diamètres pour chaque barre d'alésage, en ébauche et en finition.

## Outils à aléser.

Ils sont utilisés sur tours et centres de tournage, en ébauche et finition de tous diamètres (voir chapitre «procédé de tournage»).

## Fraises cylindriques «deux tailles».

Elles sont utilisées sur machines à commande numérique essentiellement (fraiseuses, centres d'usinage, centres de tournage, aléseuses) en ébauche et finition de tous diamètres et de longueur limitée à celle des arêtes de coupe.

### Têtes à aléser.

Elles sont utilisées sur aléseuses, fraiseuses, centres d'usinage, en ébauche et finition d'alésages de faible profondeur et de grands diamètres (≅ 800 mm maxi), ainsi que des surfaçages concentriques.

### Meules.

Elles sont utilisées sur rectifieuses, pour des travaux de grande précision (dimensionnelle et état de surface) d'alésages de petites à moyennes dimensions sur pièces cylindriques. (Voir chapitre «procédés de rectification»).

## 2.3 Choix d'utilisation des outils d'alésage

### Alésoirs (outils de forme).

Outils monoblocs multi-arêtes de coupe utilisés pour alésage en finition de trous préalablement ébauchés (diamètres 3 à 60 mm), généralement.
Les forets-aléseurs sont à utiliser en alésage d'ébauche.

### Barres d'alésage (outils d'enveloppe).

À plaquette de coupe fixée dans une cartouche installée sur la barre support. (fig. 1.21).
Capacités diamètrales : Jusqu'au diamètre 500 mm, et au delà avec un appareillage.
À lame d'alésage : elles peuvent équiper des barres pour effectuer des alésages spécifiques (pièce unitaire,...).
**Barres d'alésage courtes** : elles travaillent «en l'air». À utiliser sur fraiseuses à CN, centres d'usinage et aléseuses pour l'alésage des pièces mécaniques en général ; conception en longueur modulaire (fig. 1.22).
Opposition aux efforts de flexion durant la coupe : choisir un diamètre maximum de barre.

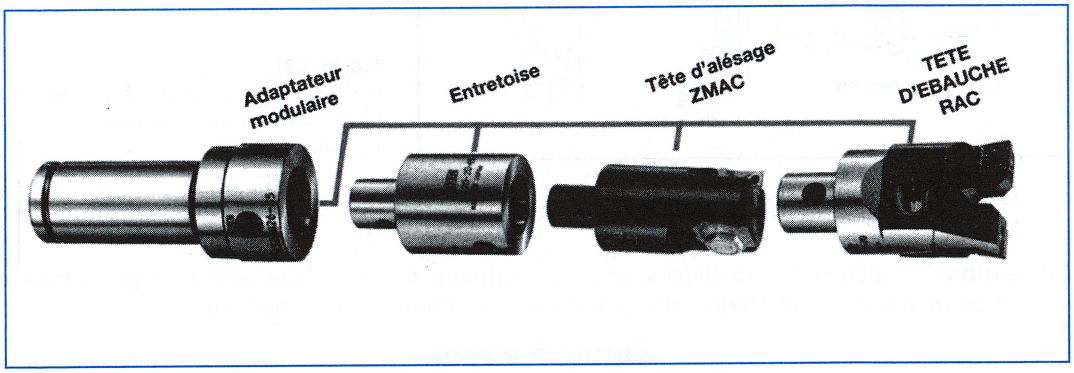
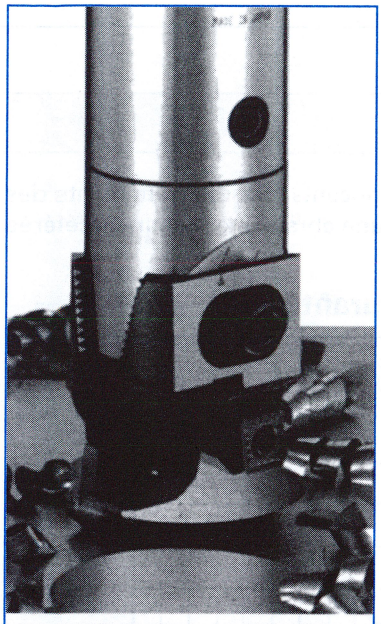



FIGURE 1.22 Barre d'alésage modulaire (à queue cylindrique). *Doc. Nikken*

**Barre rallongée.** Choisir une barre antivibratile qui absorbe les vibrations dues à la coupe.
Deux outils montés en opposition sur une barre d'alésage assure l'équilibrage des efforts de coupe (alésage d'ébauche) (fig. 1.23).
**Barres d'alésage longues.** À soutenir à leur extrémité par une lunette fixe : usinage de longs alésages et d'alésages en ligne (fig. 1.24).



- Vitesse de coupe 150 m/min
- Avance 0,4 à 0,6 mm
- Matière usinée 6 à 10 mm (au diamètre)
- Diamètre d'alésage 60 mm
- Matériau SNCM420

**FIGURE 1.23**
Exemple d'alésage à la barre «Balance-cut» à 2 plaquettes carbure
*Doc. Nikken*

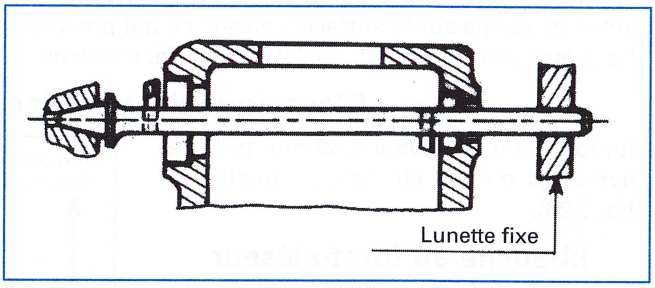



**FIGURE 1.24** Schéma d'usinage de 2 alésage avec barre d'alésage longue.

## Fraises deux tailles (outils d'enveloppe).

Elles sont utilisées en cycle de contournage (avec une commande numérique) : usinage de tous diamètres dans les limites de la machine utilisée (fig. 1.25). La cylindricité de la fraise est impérative pour obtenir la cylindricité de l'alésage.

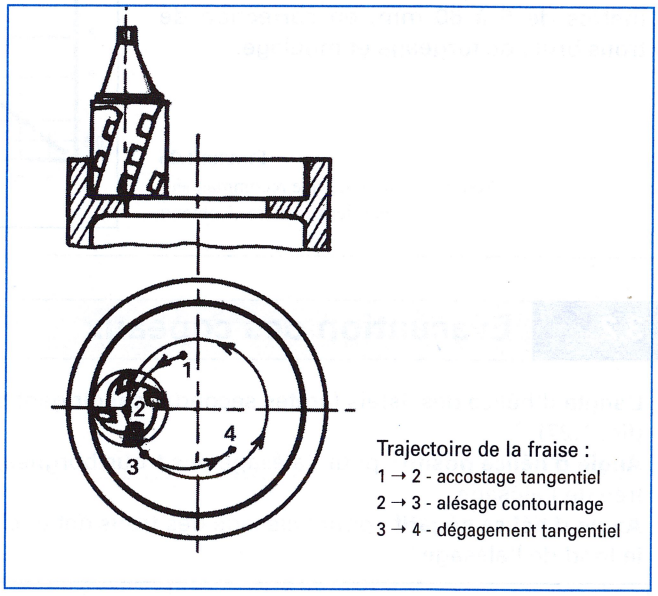



**FIGURE 1.25** Cycle d'alésage-contournage à la fraise cylindrique 2 tailles.

# 3. Alésage à l'outil de forme

## 3.1 Surépaisseur d'usinage

Elles ne seront pas inférieures aux recommandations des fabricants : Pas de frottements des arêtes de coupe sur la surface à aléser, ce qui provoquerait une abrasion et l'usure accélérée des arêtes avec altération de l'état de surface du trou.

### Mécanique de précision courante

Surépaisseur de 0.05 à 0,60 mm pour les diamètres de 5 à 60 mm, en qualité H7 (fig. 1.26).

### Ébauche au foret-aléseur et à l'alésoir d'ébauche.

Surépaisseur de 0.50 à 6 mm pour les diamètres de 5 à 60 mm, en correction de trous bruts de forgeage et moulage.

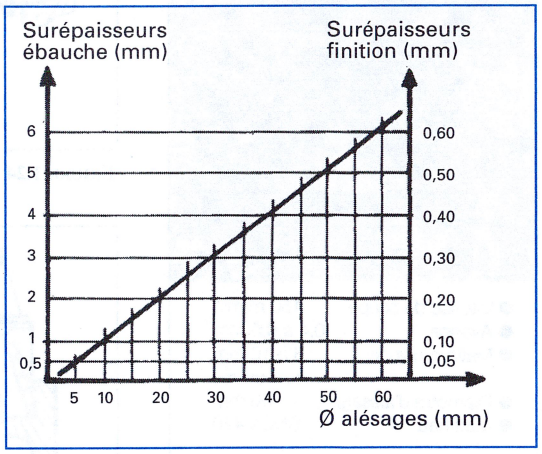



**FIGURE 1.26**
Surépaisseurs d'alésage recommandées selon les diamètres à obtenir

## 3.2 Évacuation des copeaux

L'angle d'hélice des listels (arêtes secondaires) dirigent sensiblement les copeaux (fig. 1.27).

**Angle d'hélice positif** : pour l'alésage des trous borgnes, les copeaux se dégageant vers l'entrée de l'alésage.

**Angle d'hélice négatif** : pour l'alésage des trous débouchants, les copeaux se dégageant vers le fond de l'alésage.

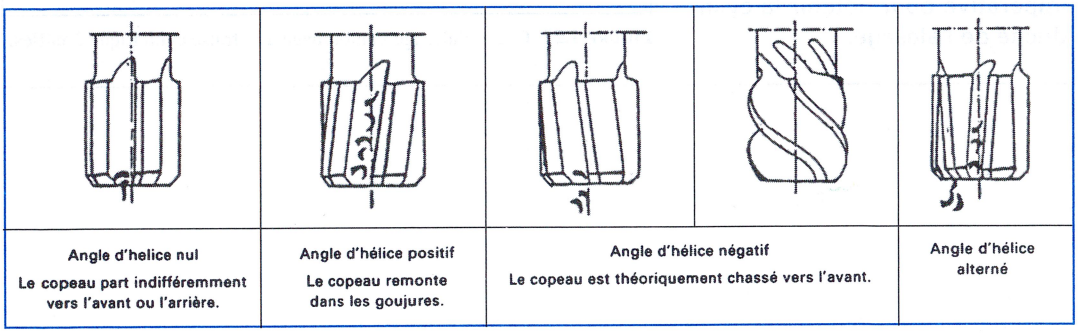



**FIGURE 1.27** Sens d'évacuation des copeaux selon le type d'alésoir.

*Doc. Leclerc*

## 3.3 Conditions de coupe des alésoirs

### Vitesses de coupe.

Elles sont relativement basses en alésage avec alésoirs monoblocs pour ne pas détruire prématurément les arêtes secondaires.
Outils en acier rapide et en carbure de 4 à 45 m/mm selon les matériaux usinés. (fig. 1.28 et 1.29).

| Matières à usiner | Vitesses de coupe m/mn | Avances en mm par tour suivant diamètres Jusqu'à Ø 8 | Ø10 à 20 | Ø 25 à 40 | Ø 50 et plus | Lubrifiants |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Aciers jusqu'à 50 daN / mm²..... | 10 à 15 | 0,1 à 0,12 | 0,15 à 0,25 | 0,25 à 0,35 | 0,35 à 0,4 | Huile soluble - Huile de colza |
| Aciers de 50 à 70 daN / mm²..... | 8 à 10 | 0,1 à 0,12 | 0,15 à 0,25 | 0,25 à 0,35 | 0,35 à 0,4 | Huile soluble - Huile de colza |
| Aciers de 70 à 90 daN / mm²..... | 6 à 8 | 0,1 à 0,12 | 0,15 à 0,25 | 0,25 à 0,35 | 0,35 à 0,4 | Huile soluble - Huile de colza |
| Aciers de plus de 90 daN / mm²..... | 4 à 6 | 0,08 à 0,1 | 0,1 à 0,2 | 0,2 à 0,3 | 0,3 à 0,4 | Huile soluble - Huile de colza |
| Fonte malléable < 160 HB..... | 8 à 12 | 0,15 à 0,2 | 0,2 à 0,3 | 0,3 à 0,4 | 0,35 à 0,45 | A sec |
| Fonte dure > 200 HB..... | 4 à 6 | 0,12 à 0,15 | 0,15 à 0,25 | 0,25 à 0,35 | 0,3 à 0,4 | A sec |
| Laitons..... | 15 à 20 | 0,15 à 0,25 | 0,3 à 0,4 | 0,4 à 0,5 | 0,5 à 0,6 | Huile de colza - A sec |
| Bronze..... | 6 à 12 | 0,1 à 0,2 | 0,2 à 0,3 | 0,3 à 0,45 | 0,5 à 0,6 | Huile de colza - A sec |
| Cuivre..... | 10 à 18 | 0,12 à 0,18 | 0,15 à 0,25 | 0,3 à 0,4 | 0,35 à 0,45 | Huile de colza - A sec - Huile soluble |
| Alliages légers..... | 30 à 45 | 0,12 à 0,18 | 0,2 à 0,25 | 0,3 à 0,4 | 0,4 à 0,5 | Pétrole - Térébenthine - Huile soluble |
| Matières plastiques tendres..... | 6 à 10 | 0,15 à 0,3 | 0,3 à 0,4 | 0,4 à 0,6 | 0,5 à 0,6 | A sec |
| Matières plastiques dures..... | 4 à 6 | 0,15 à 0,25 | 0,25 à 0,35 | 0,3 à 0,45 | 0,4 à 0,5 | A sec - Air comprimé |
| Aciers inoxydables..... | 4 à 6 | 0,05 à 0,08 | 0,1 à 0,18 | 0,15 à 0,25 | 0,25 à 0,3 | Huile soluble – Huile de colza |

**FIGURE 1.28** Conditions de coupe des alésoirs en ARS. *Doc. Leclerc*

| Matières à usiner | Vitesses de coupe m/mn | Avances en mm par tour suivant diamètres jusqu'à ⌀ 8 | ⌀ 10 à 20 | ⌀ 25 à 40 | ⌀ 50 et plus | Lubrifiants |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Aciers jusqu'à 70 daN/mm² ..... | 10 à 15 | 0,15 à 0,18 | 0,2 à 0,3 | 0,3 à 0,4 | 0,4 à 0,5 | Huile soluble - Huile de colza |
| Aciers de 70 à 100 daN/mm² ..... | 8 à 12 | 0,15 à 0,18 | 0,2 à 0,3 | 0,3 à 0,4 | 0,4 à 0,5 | Huile soluble - Huile de colza |
| Aciers de 100 à 140 daN/mm² ..... | 6 à 10 | 0,12 à 0,15 | 0,15 à 0,2 | 0,2 à 0,3 | 0,3 à 0,4 | Huile soluble - Huile de colza |
| Fonte malléable < 160 HB ..... | 8 à 12 | 0,15 à 0,18 | 0,2 à 0,3 | 0,3 à 0,4 | 0,4 à 0,5 | A sec |
| Fonte grise < 200 HB ..... | 8 à 15 | 0,2 à 0,3 | 0,3 à 0,4 | 0,4 à 0,5 | 0,5 à 0,6 | A sec |
| Fonte grise > 200 HB ..... | 6 à 12 | 0,15 à 0,18 | 0,2 à 0,3 | 0,3 à 0,4 | 0,4 à 0,5 | A sec |
| Laitons ..... | 15 à 30 | 0,2 à 0,25 | 0,25 à 0,35 | 0,4 à 0,5 | 0,5 à 0,6 | Huile de colza - A sec |
| Bronze ..... | 15 à 30 | 0,2 à 0,25 | 0,25 à 0,35 | 0,4 à 0,5 | 0,5 à 0,6 | Huile de colza - A sec |
| Cuivre ..... | 20 à 40 | 0,25 à 0,3 | 0,35 à 0,5 | 0,5 à 0,6 | 0,6 à 0,7 | Huile de colza - A sec - Huile soluble |
| Alliages légers ..... | 15 à 40 | 0,2 à 0,25 | 0,3 à 0,4 | 0,4 à 0,5 | 0,5 à 0,6 | Pétrole - Térébenthine - Huile soluble |
| Matières plastiques ..... | 15 à 30 | 0,25 à 0,3 | 0,35 à 0,5 | 0,5 à 0,6 | 0,6 à 0,7 | A sec |

**FIGURE 1.29** Conditions de coupe des alésoirs en carbure. *Doc. Leclerc*

### Vitesses d'avance.

Elles sont relativement grandes, évitant la coupe en dessous du copeau minimum. Selon le matériau à usiner, et le diamètre de l'alésoir, l'avance varie de 0.05 à 0,70 mm/tour.
(fig. 1.28 et 1.29).
Pour les alésoirs recouverts TIN, doubler les vitesses de coupe et d'avance.

## 3.4 Alésage à l'alésoir monobloc

Les alésoirs monoblocs, en acier rapide et en carbure, conviennent pour l'alésage de l'ensemble des matériaux.

### Carbure revêtu TIN.

Outre les vitesses de coupe et d'avance doublées, on obtient :
Diminution de l'usure des arêtes de coupe et des listels (résistance à l'abrasion).
Diminution du collage de copeaux : obtention d'un excellent état de surface.
**Utilisation** : en particulier pour l'alésage de matériaux à risque de grippage (acier inoxydables,...).

### Dégagement d'outil

Remontée du fond de l'alésage, en avance travail et sans inversion de la rotation pour ne pas détériorer les listels (fig. 1.30).

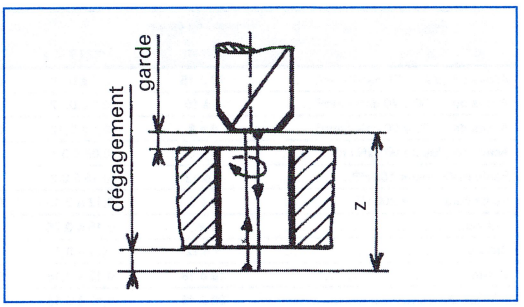



**FIGURE 1.30**
Schéma de cycle fixe d'alésage à l'alésoir pour MOCN.

# 4. Alésage à la barre

## 4.1 Généralités

Utilisation en ébauche et finition d'alésage brut (moulage, forgeage) ou percés.
Les angles d'utilisation de l'outil d'alésage sur barre $K_r$ et $\lambda_s$ (fig. 1.31) influent fortement sur l'usinage.

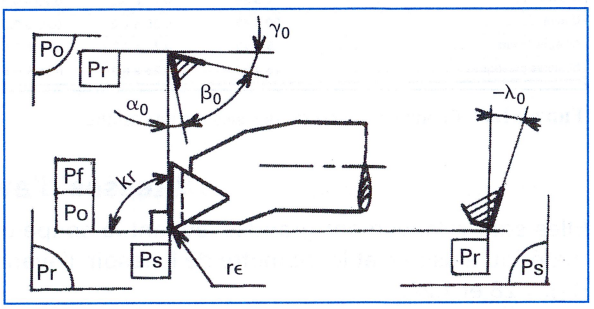



**FIGURE 1.31**
Angles de l'utilisateur des outils d'alésage.

### Angle de direction d'arête Kr

Angles limites de 75° à 95° avec le choix préférentiel de 90° pour annuler l'effort de flexion sous la force radiale : L'outil, travaillant généralement en bout, est sensible aux vibrations.

### Angle d'inclinaison d'arête $\lambda_s$ négatif.

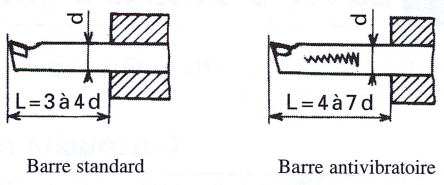
Cet angle négatif permet l'attaque progressive de l'arête de coupe protégeant le bec ($r_\epsilon$).
À utiliser en particulier en coupe discontinue.

## État de surface

Pour obtenir une excellente qualité (alésage de finition) choisir : un rayon de bec $r_\epsilon$ le plus petit possible (≅ 0,2 mm) ; un angle de coupe à 8° positif ; un matériau carbure ou acier rapide (de préférence au carbure revêtu dont l'arête est moins vive).

## Cylindricité des alésages

Choisir : le plus grand diamètre de barre admissible ; un porte-à-faux le plus réduit possible avec maintien de la barre efficace et rigide (fig. 1.32).

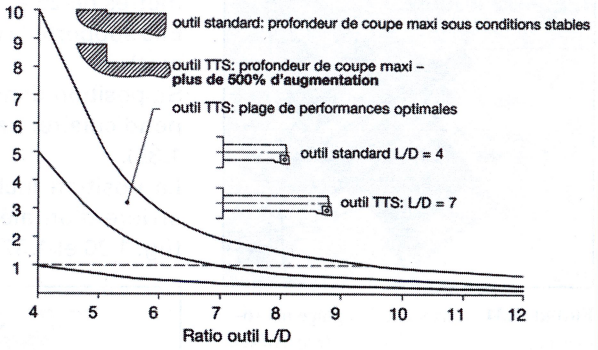



Barre standard — Barre antivibratoire

**FIGURE 1.32**
Longueur utile des barres d'alésage.

## Porte-à-faux maximum

On admet pour les cas généraux d'utilisation et selon le type de barre, une longueur en porte à faux de :
3 à 4 fois le diamètre des barres simples ;
4 à 7 fois le diamètre des barres antivibratoires (et non inférieur au minimum proposé par le constructeur).
7 à 10 fois le diamètre des barres antivibratoires, version longue.




Stabilité de l'outil après réglage (système TTS) *Doc Kennametal Hertel*

## Lubrification

En production de série, elle s'effectue sous-pression par le centre de la barre (à proximité de l'arête de coupe), permettant une amélioration de l'état de surface par : la réfrigération de l'arête de coupe et l'évacuation des copeaux du fond de trou (les rayures provoquées par copeaux sont évitées). (fig. 1.33, fig. 1.28, fig. 1.29).

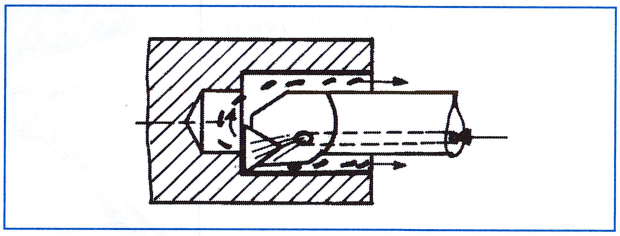


**FIGURE 1.33** Schéma de barre d'alésage avec lubrification par son centre.

## Cycle d'alésage

À utiliser en alésage avec barre équipée d'un seul outil.
L'outil ne devant pas rayer l'alésage au retour, ce cycle (de CN) provoque : rotation broche et avance travail ; arrêt indexé broche et dégagement de l'outil (qq mm. de l'alésage) ; retour rapide de la barre.

*Nota.* La barre est placée dans la broche, avec l'outil grain en Y positif.

## Alésages très longs ou en ligne

Ils sont réalisés avec des barres d'alésage soutenues à leur extrémité par une lunette fixe (opposition à la flexion) (fig. 1.24).

### Outils associés sur barre.

Deux outils travaillant en opposition (avec $K_r = 90°$), éliminent les efforts radiaux qui provoqueraient une flexion de barre (fig. 1.23).

## 4.2 Barres d'alésage à outils réglables

Utiliser des cartouches porte-outil à réglage micrométrique : assurent précision et flexibilité diamétrale des alésages.

### Cartouche micrométrique.

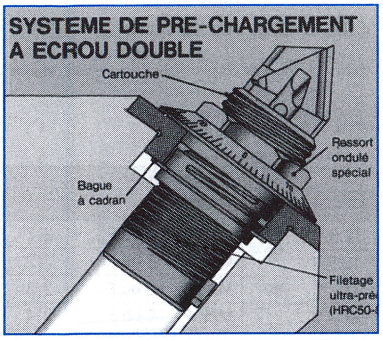



**FIGURE 1.34** Cartouche à réglage micrométrique. *Doc. Nikken*

D'une flexibilité diamétrale de 2.5 à 10 mm pour diamètres de 26 à 90 mm.
Elle supporte la plaquette de coupe (carbure, revêtue, cermet).
Sa position dans son logement en bout de barre est perpendiculaire, parallèle ou inclinée sur l'axe (fig. 1.34 et 1.35).
La position inclinée inverse permet de dresser la face arrière d'un alésage, sur MOCN, en cycle automatique (fig. 1.36 et 1.37).

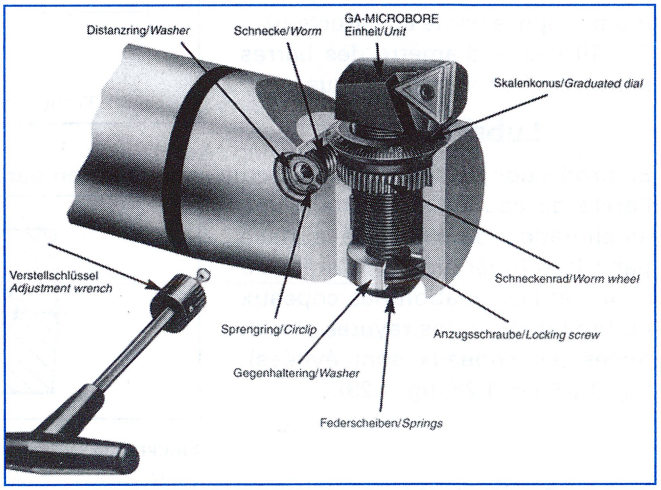
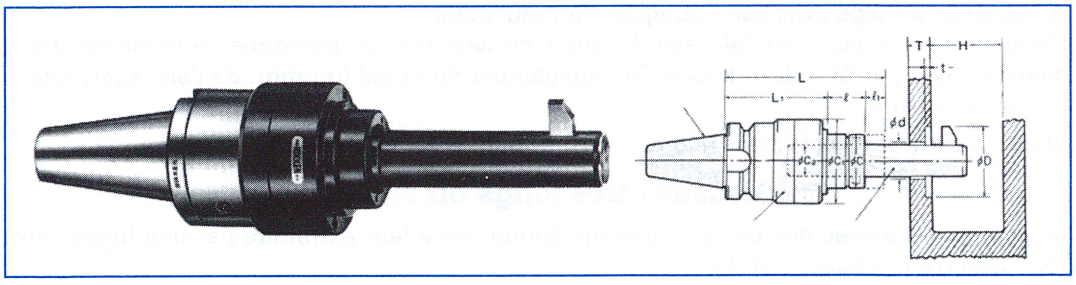



**FIGURE 1.35**
Cartouche à réglage micrométrique.
*Doc. Gildemeister-Devlieg*

**FIGURE 1.36** Appareil à lamer en tirant.
*Doc. Nikken*



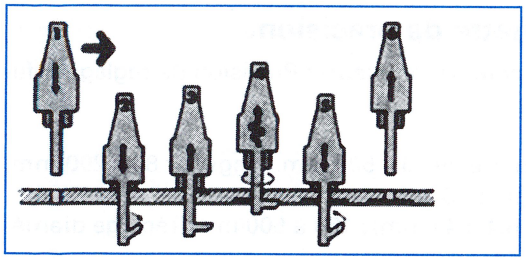


**FIGURE 1.37** Cycle d'utilisation de l'outil à lamer en tirant. *Doc. Nikken*

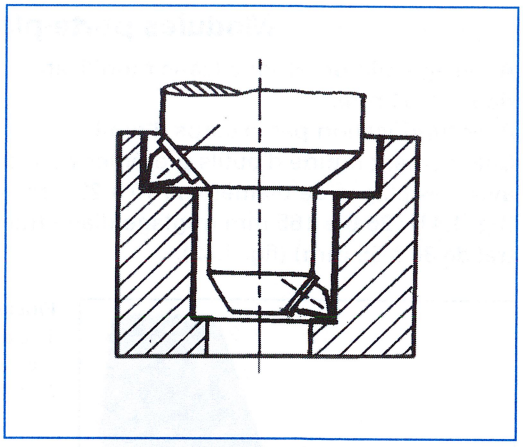


**FIGURE 1.38**
Schéma de cartouches micrométriques groupées sur une barre d'alésage.

## Barres à plusieurs cartouches.

- Utilisées pour l'obtention simultanée de plusieurs alésages, en travaux de série (fig. 1.38).
- Barres à 3 outils en ébauche et en finition de moyenne à grande capacité : améliore productivité et stabilité de la barre (fig. 1.39).

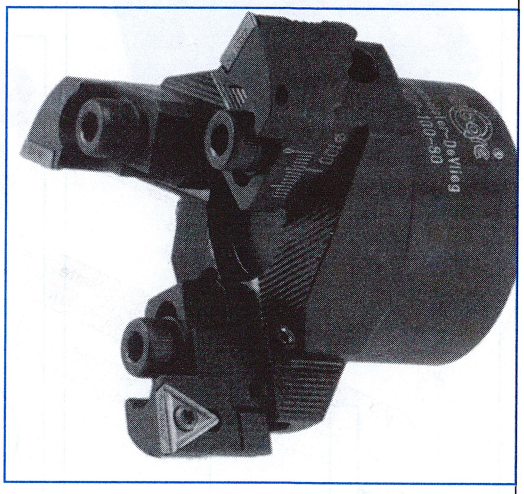


**FIGURE 1.39**
Tête d'alésage tribore
*Doc. Gildemeister-Devlieg*

## Modules porte-plaquette en bout de barre.

Plusieurs cartouches peuvent équiper une barre (courte, longue, antivibratoire) selon les outils à utiliser (fig. 1.40) : mise en œuvre rapide et réduction de l'outillage.

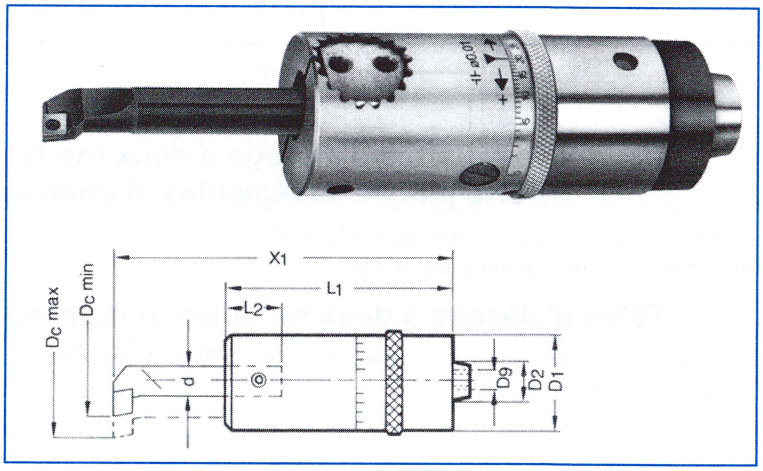



**FIGURE 1.40**
Outil d'alésage de finition «Novex» pour petit diamètres.
*Doc Walter*

## Modules porte-plaquette de précision.

À réglage micrométrique (sans modification de cote de longueur) : Précision de réglage inférieur à 0,01 mm.
Avec lubrification par le corps d'outil.
Changement rapide d'outils préréglés pour diamètre de 10 à 500 mm, longueur 80 à 200 mm, avec des plages de diamètres : 10 à 28 mm, longueur 30 mm (outil à aléser) (fig. 1.41) ; 26.5 à 165 mm (réglage diamétral de 6.4 à 44 mm) ; 150 à 500 mm (réglage diamétral de 30 à 55 mm) (fig. 1.42).

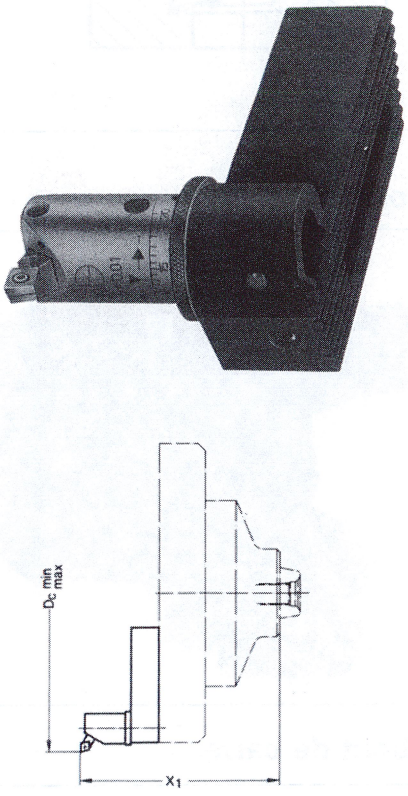
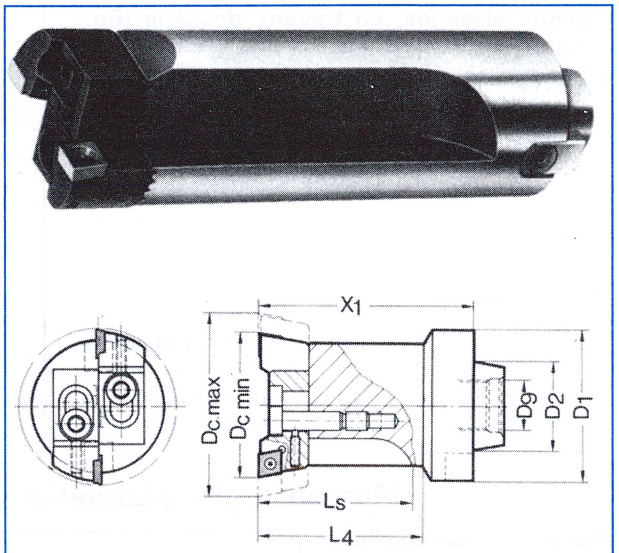



**FIGURE 1.41**
Tête d'alésage «Novex» micrométrique avec support pour grands diamètres.
*Doc. Walter*

**FIGURE 1,42**
Tête d'alésage à deux tranchants «Novex» modulaire
*Doc. Walter.*




## Barres d'alésage à deux modules porte-plaquette réglables diamétralement.

Alésage ébauche des diamètres de 25 à 580 mm, longueurs modulables avec grandes plages de réglage selon capacité (fig. 1.43).

## Têtes d'alésage à deux modules porte-plaquette réglables.

Alésage ébauche de grands diamètres : 135 à 500 mm avec plages de réglage 45 à 50 mm longueur 100 à 140 mm. (fig. 1.44).

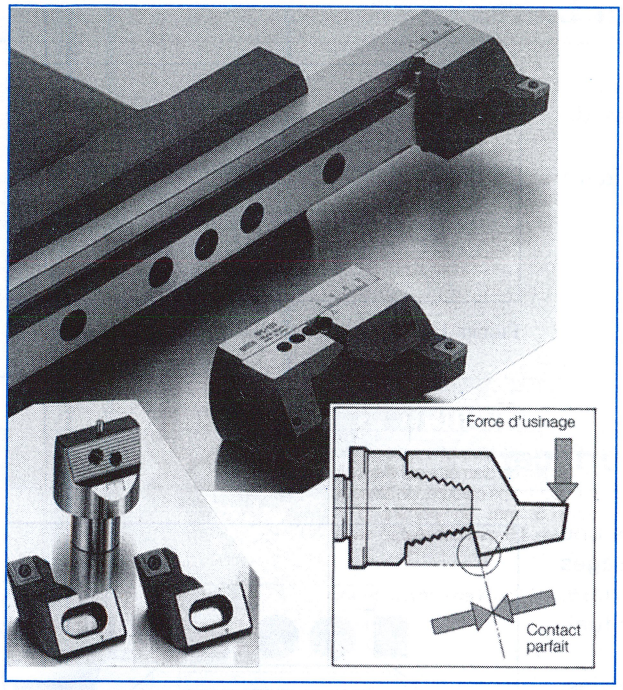
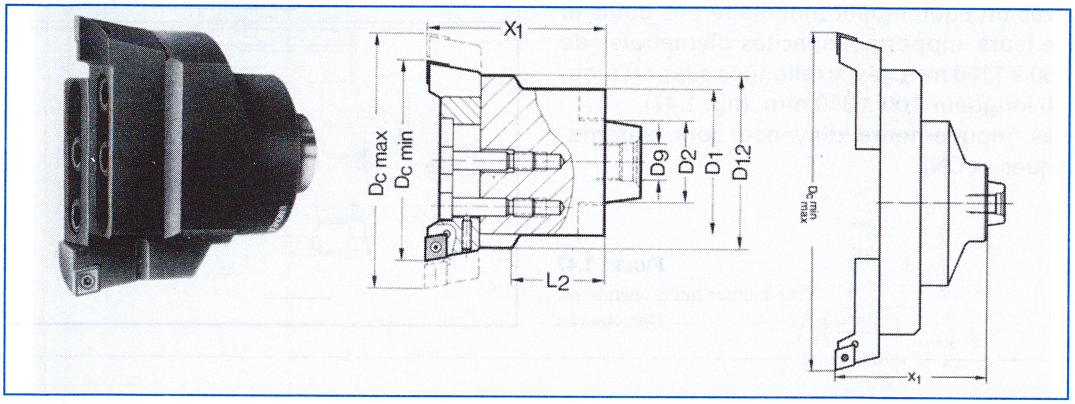



**FIGURE 1.43**
Barre d'alésage «Balance-Cut» à cartouche avec contact d'appui par épaulement.
*Doc. Nikken*

**FIGURE 1.44**
Tête d'alésage à deux cartouches porte-plaquette réglables «Novex».
*Doc. Walter.*




## 4.3 Barres d'alésage multi-outils

Outils spécifiques pour une opération d'alésage en grande série : usinage simultané d'alésages coaxiaux (fig. 1.45). Groupe de cartouches porte-outils interchangeables, avec réglage fin diamétralement.

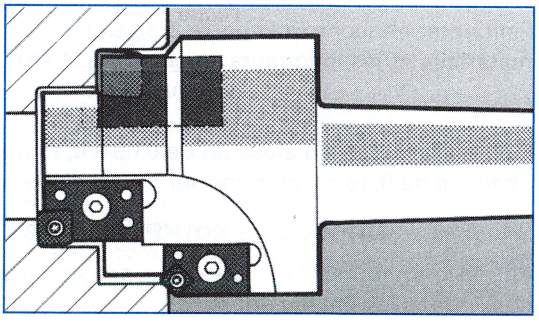


**FIGURE 1.45**
Barre d'alésage multi-outils
*Doc. Walter*

## 4.4 Lames d'alésage sur barre

Avec une ou deux lames en bout de barre.
Usinage en ébauche et finition d'alésages, de capacité standard 25.4 à 180 mm.
Utilisés en travaux de petite série à unitaire (fig. 1.46).

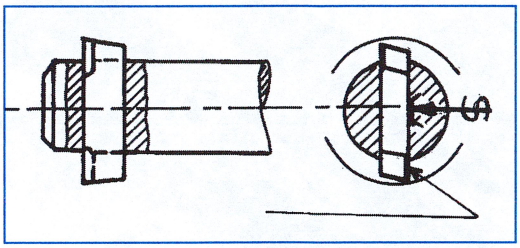


**FIGURE 1.46** Schéma de barre d'alésage avec lame.

## 4.5 Têtes à aléser et surfacer

Usinage, avec un seul porte-outil, dans une grande plage de diamètres pour : alésages concentriques, surfaçage avant et arrière, fonçage de gorges, tourillonnage, éventuellement filetage et perçage.
Utilisés en travaux unitaire et petites séries, avec un équipement modulaire des outils et de leurs supports. Capacités diamétrales de 250 à 1100 mm. (avec rallonges support d'outil) longueur 100 à 390 mm. (fig. 1.47).
Les mouvements d'avance sont automatiques (à CN).

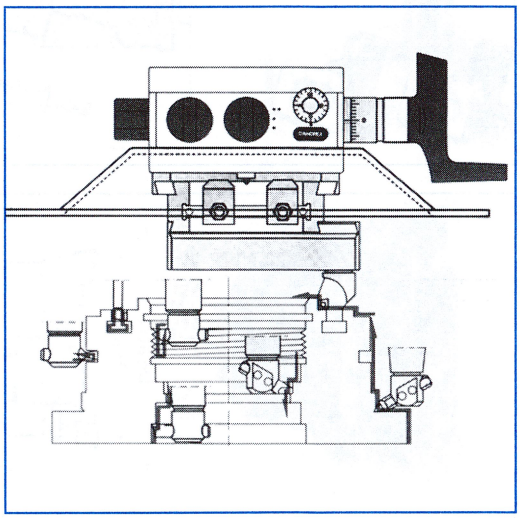


**FIGURE 1.47**
Tête à aléser multi-opérations.
*Doc. Andrea*

## 4.6 Conditions de coupe des barres d'alésage

### Vitesse de coupe.

Finition et ébauche (à la barre d'alésage) : 80 à 250 m/min (plaquettes en carbure) selon les matériaux et les longueurs à usiner (fig. 1.48).

### Vitesses d'avance

Finition (à la barre d'alésage) de 0.05 à 0,15 mm/tour, selon les longueurs à usiner.
Ébauche de 0.15 à 0,60 mm/tour, selon diamètres et longueurs à usiner (fig. 1.48).

### Choix des conditions de coupe à la barre d'alésage.

Plus la longueur et le diamètre à usiner sont grands, plus la vitesse de coupe et l'avance le sont aussi (dans les limites données).

| Matières | Diamètres d'alésage (mm) | Vitesses de coupe (m/min ) | Avance (mm/tour) | |
|---|---|---|---|---|
| | | | Ébauche | Finition |
| **Aciers** (non alliés, alliés, de cémentation) | Ø < 20 | 80 à 100 | 0,10 à 0,20 | 0,05 à 0,15 |
| | 20 à 30 | 90 à 120 | 0,20 à 0,35 | 0,05 à 0,15 |
| | 30 à 45 | 120 à 140 | 0,20 à 0,45 | 0,05 à 0,15 |
| | 45 à 60 | 120 à 140 | 0,30 à 0,50 | 0,06 à 0,15 |
| | 60 à 80 | 120 à 140 | 0,40 à 0,60 | 0,08 à 0,15 |
| | 80 à 120 | 120 à 140 | 0,40 à 0,60 | 0,08 à 0,15 |
| | Ø > 120 | 120 à 140 | 0,40 à 0,60 | 0,10 à 0,20 |
| **Fontes** (malléable, grise, GS) | Ø < 20 | 60 à 120 | 0,10 à 0,20 | 0,05 à 0,15 |
| | 20 à 30 | 60 à 120 | 0,15 à 0,30 | 0,05 à 0,15 |
| **Alliages de bronze et de laiton** | 30 à 45 | 60 à 120 | 0,20 à 0,40 | 0,05 à 0,15 |
| | 45 à 60 | 60 à 120 | 0,20 à 0,40 | 0,05 à 0,15 |
| | 60 à 80 | 60 à 120 | 0,20 à 0,45 | 0,05 à 0,20 |
| | 80 à 120 | 60 à 120 | 0,20 à 0,45 | 0,05 à 0,20 |
| | Ø > 120 | 60 à 120 | 0,20 à 0,45 | 0,05 à 0,20 |
| **Alliages d'aluminium** | Ø < 20 | 100 à 140 | 0,10 à 0,20 | 0,05 à 0,15 |
| | 20 à 30 | 130 à 160 | 0,15 à 0,30 | 0,05 à 0,15 |
| | 30 à 45 | 180 à 220 | 0,30 à 0,40 | 0,05 à 0,15 |
| | 45 à 60 | 180 à 220 | 0,40 à 0,50 | 0,05 à 0,15 |
| | 60 à 80 | 200 à 250 | 0,40 à 0,60 | 0,05 à 0,20 |
| | Ø > 80 | 200 à 250 | 0,40 à 0,60 | 0,05 à 0,20 |

**FIGURE 1.48** Conditions de coupe et d'avance des barres d'alésage avec outils carbure. (Ordre de grandeur).

## 4.7 Système automatique d'alésage de précision

Système intégrable à la plupart des machines d'usinage *«Sandvik autocomp»* (fig. 1.49). Obtention d'alésages de qualité avec répétabilité, (semi-finition et finition en cycle automatique) : une jauge de mesure détecte la dimension de l'alésage usiné et adresse l'information à un moniteur de commande pour ordre de correction dimensionnelle agissant sur la barre d'alésage déformante.

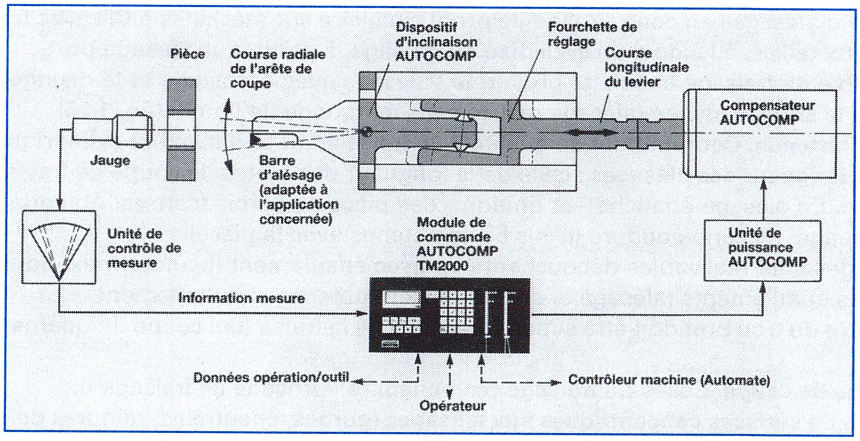



**FIGURE 1.49** Schéma de principe du système de mesure «Autocomp» relié à une barre d'alésage.
*Doc. Sandvik-Coromant*

## 4.8 Têtes d'alésage de forme

Usinage de formes axiles en intérieur et extérieur avec un outil d'enveloppe travaillant par tourbillonnement (fig. 1.50).
Têtes d'alésage *«formbore»* pour tours à CN, centres de tournage, aléseuses à CN, fraiseuses à CN, centres d'usinage (fig. 1.51).
Utilisation en travaux unitaires et petites séries de formes débouchantes ou non de faible profondeur, avec précision de positionnement du profil usiné et de sa profondeur.

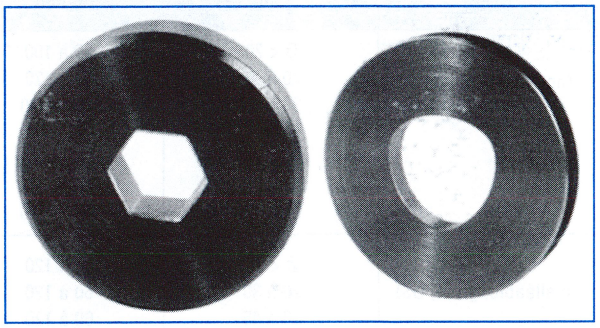


**FIGURE 1.50** Exemples de formes obtenues avec une tête d'alésage «Formbore» *Doc. Gildemeister-Devlieg*

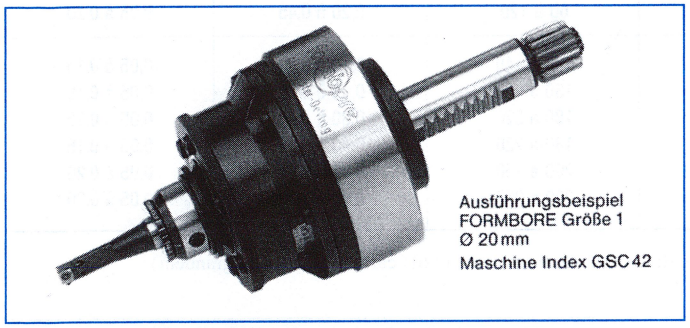



**FIGURE 1.51** Tête d'alésage de forme «Formbore»
*Doc. Gildemeister-Devlieg*

# 5. Alésage à la fraise

Obtention d'alésages en contournage de profil circulaire sur machines à CN avec fraise cylindrique deux tailles, à l'aide d'un cycle fixe de fraisage, à partir d'un alésage brut.
Le cycle fixe de fraisage circulaire provoque l'alésage avec accostage et le dégagement tangentiels à la surface usinée (alésage réalisé sans marquage de l'outil) (fig. 1.25).
**Précision obtenue.** Couramment de qualité 7, la fraise étant parfaitement cylindrique.
**Limite de longueur des alésages :** celle de la longueur des arêtes de coupe de fraise.
**Utilisation.** En alésage ébauche - et finition - des pièces à parois (carters) obtenue par moulage, forgeage, mécano-soudure (trous bruts obtenus avec la pièce).
Les alésages sont réalisables débouchants ou avec épaulement (hauteur maxi donnée par la fraise). Les épaulements (alésage et dressage) sont obtenus simultanément.
Le diamètre du trou brut doit être supérieur à celui de la fraise (qui coupe uniquement en périphérie).
**Conditions de coupe.** Celles du fraisage (voir chapitre «procédé de fraisage»).
**Obtention de surfaces concentriques aux alésages** (gorges, chanfreins, rainures de circlips de tous diamètres) avec fraises de forme au profil correspondant, en cycle fixe de fraisage circulaire.

# 6. Mise en œuvre



## 6.1 Puissance de coupe

La puissance disponible à la broche des différentes machines-outils employées est généralement suffisante (faible surépaisseur d'usinage), sauf éventuellement en alésage d'ébauche, avec outils d'enveloppe (fraises, barres d'alésage).

### Barres d'alésage

Utiliser la formule pour tournage :

$$P_u = K_a . f . s . V_c / 60 . \eta$$

(voir chapitre «procédés de tournage»).

### Fraises deux tailles.

Utiliser la formule pour le fraisage :

$$P_u = s . l . n . z . F_z . K_a / 6120 . \eta$$

(voir chapitre «procédés de fraisage»).

## 6.2 Outillage porte-pièce(s)

Identiques à ceux utilisés en fraisage, sur fraiseuses et centres d'usinage, aux conditions essentielles :
– non déformation des pièces sous les actions de fixation et de coupe.
– accessibilité à un maximum de faces à usiner (fig. 1.52); (voir chapitre «procédés de fraisage»).

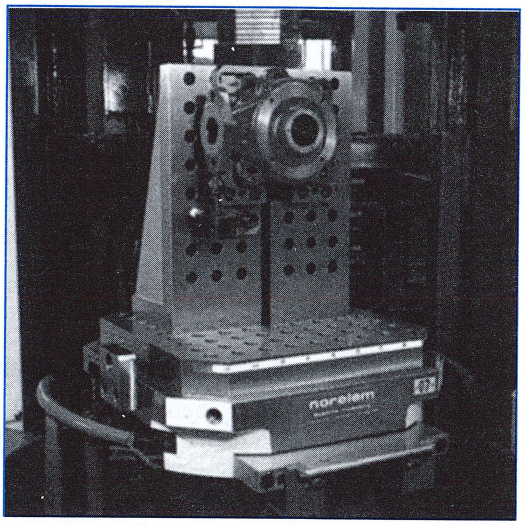



**FIGURE 1.52**
Porte-pièce modulaire sur équerre.
*Doc. Norelem*

### Rappel (fraisage)

**Pièces volumineuses.** À maintenir en position par des éléments modulaires simples (brides, chandelles, cales, butées,...) avec des appuis complémentaires à l'isostatisme, évitant des déformations possibles sous les efforts de coupe.
**Pièces de dimensions moyennes** (≅ 800 mm maxi au cube). Maintenir en montages modulaires standards (optimisation de l'outillage).
**Pièces de petites dimensions.** À groupes en panoplie dans un porte-pièce.

## 6.3 Machines

### Machines à broche verticale (perceuses, centres d'usinage,...)

Pour usiner des pièces comportant des alésages de petits diamètres (obtenus par perçage et alésage à l'alésoir) :
Les opérations d'alésage sont à grouper dans la phase avec les autres opérations (fraisage, perçage, tournage,...) sur les machines-outils utilisées (capacités palettes ≅ 500 au cube maxi ; table ≅ 1 000 x 500 mm) (voir chapitre «procédés de fraisage»).

### Centres d'usinage à broche horizontale

Pour usinage de pièces de ≅ 200 à 1 000 au cube (selon les capacités - machine) avec accès à un maximum de faces sur la pièce, (axe d'indexage palette). (fig. 1.53).

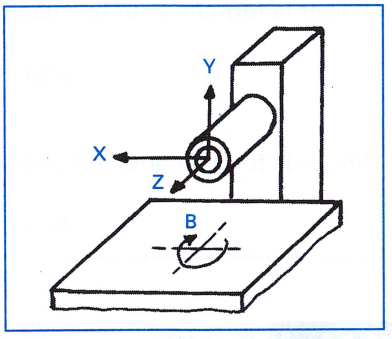



**FIGURE 1.53**
Schéma d'un centre d'usinage
4 axes X, Y, Z; B, broche horizontale.

### Aléseuses de grande capacité.

Machine à table fixe (poids important des pièces : plusieurs tonnes).
Les axes numérisés sont affectés à l'ensemble banc - montant - chariot porte-broche, assurant l'accès à un maximum de surfaces sur la pièce en position fixe.

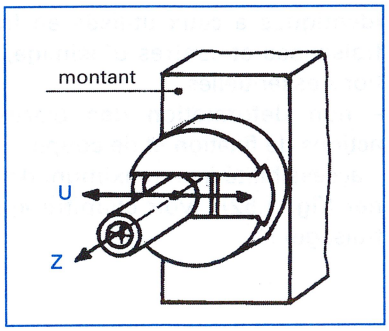



**FIGURE 1.54**
Schéma d'un coulisseau radial d'aléseuse
à broche horizontale.

### Usinage des pièces très volumineuses.

Utiliser des aléseuses-fraiseuses à broche horizontale, ayant un maximum de flexibilité, obtenu par : un coulisseau à déplacement radial, permettant le surfaçage de grands diamètres, (fig. 1.54) ; un maximum d'axes numérisés (5 minimum) ; éventuellement, deux broches en parallèles : une broche de puissance (opérations de surfaçage très importantes) et une broche de vitesse (autres opérations : perçage, alésage, fraisage) ; un fourreau de broche mobile : pour l'accès d'outils aux surfaces éloignées du nez de broche (fig. 1.55).

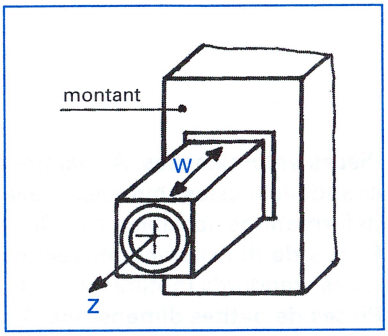



**FIGURE 1.55**
Schéma de fourreau de broche mobile.

# 2 PROCÉDÉS D'ASSEMBLAGE



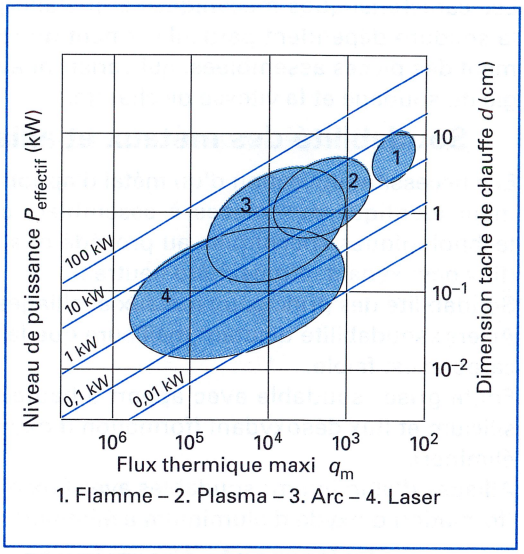

1. Soudage ..... 33
   1.1 Généralités ..... 33
   1.2 Les procédés de soudage ..... 36
   1.3 Brasage et soudo-brasage ..... 37
   1.4 Soudage oxyacétylénique ..... 40
   1.5 Soudage par aluminothermie ..... 41
   1.6 Soudage à l'arc électrique avec électrode enrobée ..... 42
   1.7 Soudage électrique TIG ..... 44
   1.8 Soudage électrique MIG ..... 46
   1.9 Soudage électrique MAG ..... 49
   1.10 Soudage sous flux conducteur ..... 50
   1.11 Soudage à l'arc plasma ..... 52
   1.12 Soudage par résistance ..... 54
   1.13 Soudage par points ..... 54
   1.14 Soudage à la molette ..... 57
   1.15 Soudage par bossages ..... 58
   1.16 Soudage par étincelage ..... 59
   1.17 Soudage par résistance-étincelage ..... 59
   1.18 Soudage par arc tournant ..... 60
   1.19 Soudage par friction ..... 60
   1.20 Soudage par explosion ..... 62
   1.21 Soudage par ultrasons ..... 63
   1.22 Soudage par faisceau d'électrons ..... 64
   1.23 Soudage au laser ..... 67

2. Procédés d'assemblage par adhésion ..... 72
2.1 Généralités ..... 72
2.2 Classification des colles ..... 72
2.3 Choix des colles ..... 74
2.4 Caractéristiques du collage ..... 74
2.5 Caractéristiques des assemblages ..... 75
2.6 Essais mécaniques ..... 78
2.7 Mise en œuvre ..... 80
2.8 Utilisation ..... 80
3. Assemblage par rivetage et sertissage ..... 81
3.1 Rivetage-sertissage par mouvements combinés ..... 81
3.2 Rivetage par autopoinçonnage ..... 82
3.3 Sertissage ..... 82

# 1. Soudage

## 1.1 Généralités

Procédé d'assemblage permanent, étanche si la soudure est continue, des matériaux métalliques quelles que soient leurs épaisseurs.
C'est la fusion localisée des pièces à assembler, avec ou sans métal d'apport, qui provoque la liaison après solidification (fig. 2.1).
La soudure s'effectue en phase liquide sans pression des pièces, ou en phase pâteuse, sous une pression des pièces.



1. Flamme – 2. Plasma – 3. Arc – 4. Laser

**FIGURE 2.1** Surface chauffée selon procédé.

### Phase liquide

Elle provoque localement des modifications métallurgiques (résilience et A % diminuent) et mécaniques (déformations).
Une soudure en phase liquide est effective lorsqu'il y a mouillage, soit l'étalement du liant en fusion (fig. 2.2).
Le mouillage s'obtient par la propreté des surfaces à assembler, la température de soudage, l'affinité des matériaux, pièces et apport.

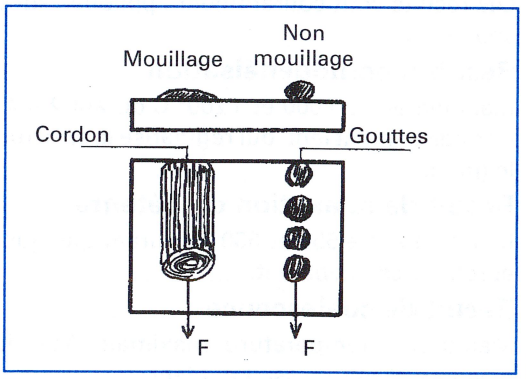



**FIGURE 2.2** Mouillage des soudures.

### Phase pâteuse

Les modifications, métallurgiques et mécaniques, sont très localisées.

### Oxydation thermique

Les métaux s'oxydent à l'air d'autant plus que leur température s'élève.
L'oxyde s'oppose à la liaison pièces/apport ; il est nécessaire de s'opposer à la contamination atmosphérique du métal fondu par des flux de gaz (inerte ou actif) ou le vide :
en soudant à l'abri de l'oxygène, en atmosphère inerte, évitant l'oxydation ;
en réduisant l'oxyde par combinaison avec un flux moins dense que l'apport : le flux remonte avant l'atteinte de la température de soudage.

### Durée de chauffe

La plus courte possible : le grain constitutif du métal ou de l'alliage des pièces à souder ne devant pas grossir dans la zone affectée thermiquement (modification des caractéristiques métallurgiques).

### Dilatation thermique

L'inertie des parties froides environnantes à la soudure et le maintien des pièces à assembler s'opposent à la dilatation volumique du métal chauffé : la dilatation s'effectue suivant le plus grand degré de liberté, soit généralement l'épaisseur.

## Refroidissement des pièces

Les parties non chauffées s'opposent au retour à la forme initiale, engendrant des déformations sous des contraintes de compression et d'extension, dues aux états successifs du matériau.
Les caractéristiques mécaniques et métallurgiques de la soudure dépendent particulièrement du refroidissement des pièces assemblées, qui varieront avec l'énergie du soudage et la vitesse de chauffe.

## Soudabilité des métaux et alliages

Elle nécessite : utilisation d'un métal d'apport sensiblement identique aux pièces à assembler ; conditions technologiques spécifiques au procédé mis en œuvre (flux désoxydant, atmosphère neutre..).
Soudabilité des principaux métaux et alliages :
Aciers : soudabilité d'autant meilleure que la teneur en carbone est faible.
Fonte grise : soudable avec apport à haute teneur en silicium et flux désoxydant (formation d'oxyde de fer à éliminer).
Alliages d'aluminium : soudables avec flux désoxydant (formation d'oxyde d'aluminium à éliminer).

## Traitements thermiques

Les recuits sont couramment appliqués sur les pièces soudées.

### Recuit d'homogénéisation

Maintien entre 1 000 et 1 200° C durant 2 à 4 heures et refroidissement lent, qui régularise la structure et affine le grain.

### Recuit de relaxation ou détente

Maintien entre 550 et 650 °C durant quelques minutes et refroidissement lent.

### Recuit de coalescence

Maintien à température maximale Ac1 durant 2 à 4 heures et refroidissement lent.

### Recuit de recristallisation

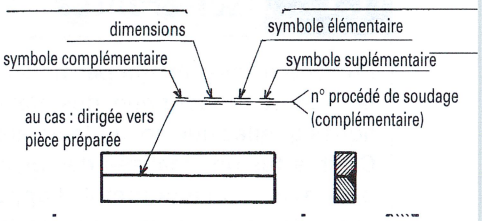
Maintien entre 500 et 700 °C durant quelques minutes, et refroidissement lent contrôlé.

### Recuit de normalisation

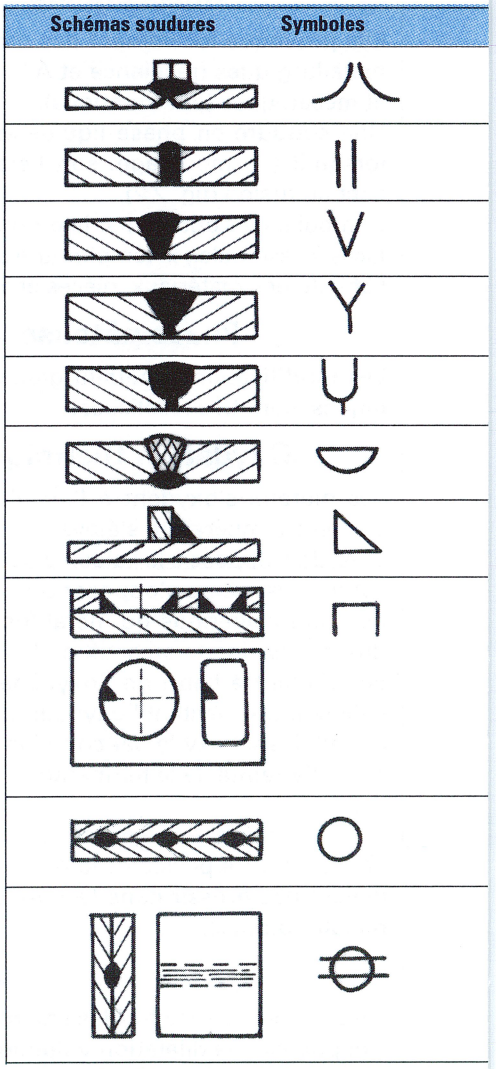
Maintien à température supérieure à Ac3 + 50 °C durant quelques minutes et refroidissement lent.

## Représentation des soudures

Définies par les normes NF E 04 020 et 021, avec représentation graphique : symboles sur les dessins (au lieu de la représentation conventionnelle toujours possible) (fig. 2.3 a...e).




a) Indications normalisées des soudures sur dessins.




b) Symboles élémentaires principaux.

| Soudures | Symboles |
|---|---|
| Soudure plate | |
| Soudure convexe | |
| Soudure concave | |

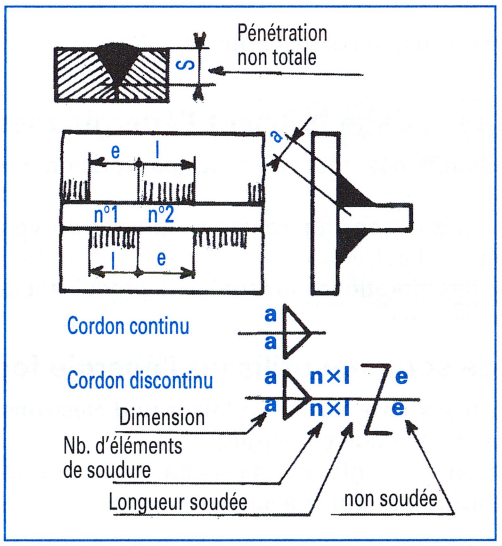
| Soudures | Symboles |
|---|---|
| Soudure périphérique | |
| Soudure sur chantier | |
| N° procédé de soudage | |

c) Symboles supplémentaires.

| Soudures |
|---|
| Bords relevés complètement fondus |
| Bords droits |
| En V |
| En Y |
| En U |
| Reprise à l'envers |
| D'angle |
| En bouchon ou en entaille |
| Par points |
| En ligne continue avec recouvrement |

d) Symboles complémentaires.

| Numéros normalisés des principaux procédés de soudage | |
|---|---|
| Brasage tendre aux gaz | 942 |
| Brasage tendre au four | 943 |
| Brasage fort aux gaz | 912 |
| Brasage fort au four | 913 |
| Soudo-brasage aux gaz | 971 |
| Soudo-brasage à l'arc | 972 |
| Oxyacétylénique | 311 |
| Aluminothermie | 71 |
| Arc électrique électrode enrobée | 111 |
| Électrique TIG | 141 |
| Électrique MIG | 131 |
| Électrique MAG | 135 |
| Flux conducteur | 136 |
| Arc plasma | 149 |
| Par points | 21 |
| À la molette | 22 |
| Par brossage | 23 |
| Par étincelage | 24 |
| Par résistance-étincelage | 26 |
| Par arc tournant | 25 |
| Par friction | 42 |
| Par explosion | 441 |
| Par ultrasons | 41 |
| Par faisceau d'électrons | 76 |
| Au laser | 751 |




e) Dimensions des soudures.

**FIGURE 2.3** Définition symbolique normalisée des soudures.

## Brasage tendre

Il s'effectue à une température de fusion inférieure à 450 °C : 180 °C à 280 °C, selon la composition des apports (fig. 2.8).

| Types de brasage tendre | % Sn | % Ph | $t°$ | Principales utilisations |
|---|---|---|---|---|
| De plombier | 30 | 70 | 280 | Pâteuse longtemps ; peut être modelée |
| Au tiers ou de charge | 35 | 65 | 260 | Renforcement de raccords brasés |
| De chaudronnier | 40 | 60 | 250 | Peu fluide, mais peu cassante |
| Claire | 50 | 50 | 220 | Fluide pour cuivrerie et ferblanterie |
| Fine | 60 | 40 | 200 | Très fluide, cassante pour cuivrerie |
| Extra-fine | 95 | 5 | 220 | Cassante, pour conserverie |

FIGURE 2.8 Composition et utilisation des brasures tendres étain-plomb.

### Apports

Ce sont des alliages à base d'étain : étain-plomb, étain-argent, étain-antimoine, selon les matériaux à braser ou/et l'utilisation des pièces assemblées, soit :
aciers : apport en cuivre-zinc ;
alliages d'aluminium : apport en aluminium-silicium ;
brasures en électricité-électronique : apport en cuivre-or ;
résistance à la corrosion : apport en argent-manganèse ;
résistances mécaniques à chaud : apport à base de nickel ;
utilisations en général : apport en cuivre-argent-zinc-cadmium.

### Flux

Réducteur d'oxydes : doit correspondre à chaque matériau à braser.
**Constitution.** Borure d'éthyle, d'alcalis, d'acides et agent mouillant (de stabilité nécessaire pour protéger les surfaces avant la fusion de l'apport et surnager sur le bain avant solidification).
Les résidus de flux sont très corrosifs : à éliminer impérativement (par lavage).
Un antimouillant permet, éventuellement, de localiser l'écoulement de l'apport.

### Utilisation

Plomberie, ferblanterie (alimentaire...) cuivrerie, assemblages délicats (brasures spécifiques ne devant pas subir d'efforts mécaniques : la résistance dépend de celle de l'apport).

## Brasage fort

S'effectue à température supérieure à 450 °C, avec apports en alliage de cuivre (cuivre-zinc) d'argent, d'aluminium (aluminium-silicium) (fig. 2.9).

| Utilisation | Brasure | | | Résistance | Malléabilité |
|---|---|---|---|---|---|
| | $t°$ fusion | ≃ % Co | ≃ % Zn | | |
| Acier/acier | 1 000 | 80 | 20 | Très bonne | Très bonne |
| Acier/cuivre | 900 | 70 | 30 | Bonne | Bonne |
| Cuivre/cuivre | 850 | 60 | 40 | Bonne | Bonne |
| Métaux cuivreux | 750 | 40 | 60 | Bonne | Faible |

FIGURE 2.9 Composition et utilisation de brasures fortes en laiton.

### Utilisation

Avec apports adaptés, assemblage de matériaux généralement cuivreux, des alliages d'aluminium.

## Soudo-brasage

Soudure hétérogène (apport différent des pièces à assembler).
Les pièces ne sont généralement pas à chauffer à la température de fusion de l'apport.
La jonction des pièces s'effectue en continu, progressivement comme tout soudage, créant le cordon de brasure (fig. 2.10).

### Apport

Température de fusion supérieure à 450 °C : alliage de cuivre (cuivre, zinc, silicium, de fusion à 880 °C) ; alliage d'argent ; alliage d'aluminium.

### Cordon de brasure

Peu fluide, largeur minimale pour assurer son accrochage : trois épaisseurs des pièces non chanfreinées ; chanfrein sur pièces d'épaisseur > 4 mm (fig. 2.11).
L'assemblage s'effectue en recouvrement ou bout à bout (avec espace pour logement du cordon) (fig. 2.12).

### Flux

En utilisation pulvérulente ou gazeuse : protège la zone en cours de brasage de l'oxydation ou scorifie les oxydes qui s'y forment.

### Utilisation

Avec apports adaptés, assemblage de : aciers, cuivre et ses alliages (cupro-aluminium...), fonte, aluminium, pièces galvanisées.

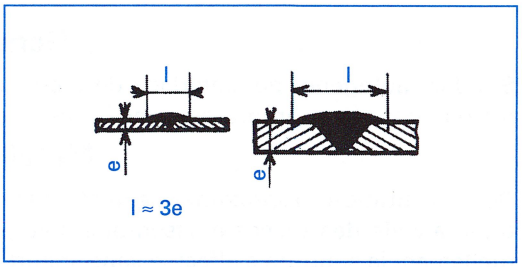



**FIGURE 2.10** Jonction des pièces en soudo-brasage.

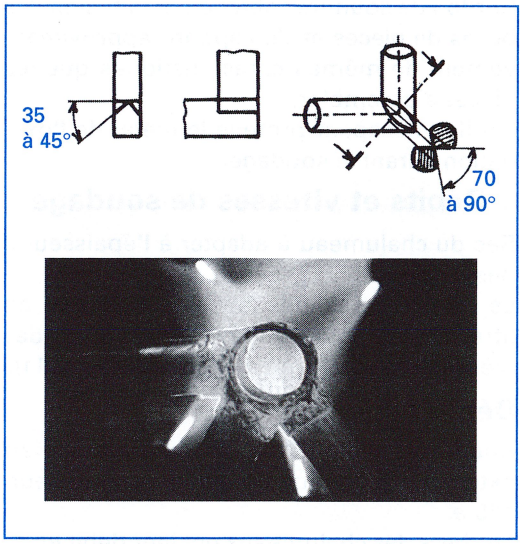



**FIGURE 2.11** Préparation de pièces pour soudo-brasage et exemple. *Doc. Air liquide*

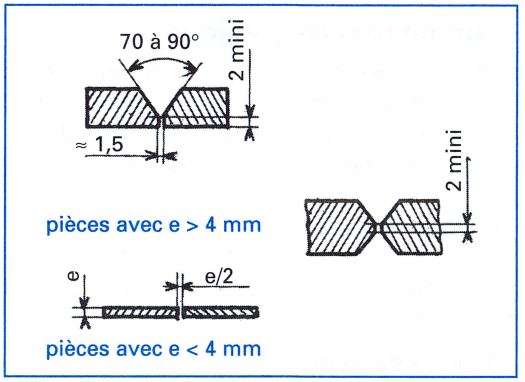



**FIGURE 2.12** Préparation des pièces plates pour soudo-brasage.

# 1.4 Soudage oxyacétylénique

## Généralités

Soudure autogène de matériaux de même nature, y compris le métal d'apport, obtenu par fusion localisée et progressive des bords à assembler.

## Métal d'apport

De constitution approximativement identique à celle des pièces à assembler. Éventuellement la soudure s'effectue sans apport.
Température de fusion (3 000 °C, fournie par l'inflammation d'un mélange oxygène-acétylène (fig. 2.13).
Cordon de soudure : obtenu par la fusion des bords de pièces et de l'apport (approximativement de mêmes caractéristiques que les pièces à assembler).
Un flux décapant protège le métal de l'oxydation durant le soudage.

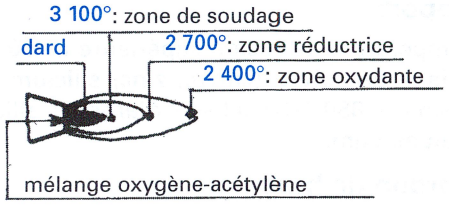



**FIGURE 2.13** Flamme oxyacétylénique.

## Débits et vitesses de soudage

Bec du chalumeau à adapter à l'épaisseur *e* des pièces.
Le débit d'acétylène est indiqué en litres/heure, pour soudage bout à bout des pièces à plat de 1 mm d'épaisseur (fig. 2.14).

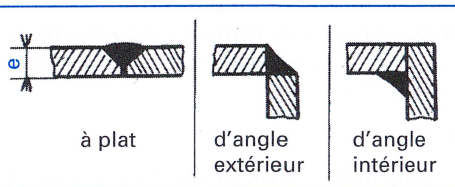



**FIGURE 2.14** Types d'assemblage pour soudage.

### Débits approximatifs

Soudure à plat, 100 *e* ; soudure d'angle en extérieur, 75 *e* ; soudure d'angle en intérieur, 125 *e*.
Les becs des chalumeaux ont leur débit identifié par un numéro (00,0,1,2,3) normalisé NF A 84-541, pour les valeurs de 10 à 5 000 litres/heure d'acétylène (fig. 2.15).

| | |
|---|---|
| N° 00 | de 10 à 63 l/h de $C_2H_2$ |
| N° 0 | de 100 à 400 l/h |
| N° 1 | de 250 à 1 000 l/h |
| N° 2 | de 1 000 à 4 000 l/h |
| N° 3 | > 4 000 l/h |

**FIGURE 2.15** Débits des chalumeaux de soudage.

### Flamme oxyacétylénique

Elle est considérée comme normale avec le rapport des volumes oxygène/acétylène égal à environ 1 ; oxydante avec un excès d'oxygène ; carburante avec un excès d'acétylène (fig. 2.16).
Puissance de chauffe : elle est proportionnelle à sa vitesse de propagation et se transmet aux pièces par convection et rayonnement.

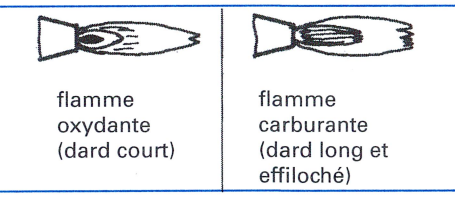



**FIGURE 2.16** Types de flammes non utilisables.

### Vitesse de soudage

V = k/e ; avec k, coefficient de soudage du matériau = 12 pour aciers, 30 pour alliages d'aluminium, 60 pour alliages de cuivre ; e, épaisseur des pièces.

## Mise en œuvre

Cordon de soudure : il provoque une déformation de retrait : s'y opposer ou à localiser dans des zones neutres, sur des formes symétriques (fig. 2.17).
Préparation des bords à assembler :
nécessaire en soudage à plat (fig. 2.18).
Pièces minces : de préférence souder sans métal d'apport, les bords à assembler étant relevés de *e*.
Pièces peu épaisses : bords chanfreinés en vé ; éventuellement, bords non chanfreinés espacés de *e*/2.
Pièces épaisses : bords chanfreinés des deux côtés (deux vés opposés) ; éventuellement, avec soudage d'un côté accessible : une rainure profonde.
Autres positions de soudage : d'angle intérieur et extérieur... aucune préparation n'est nécessaire.

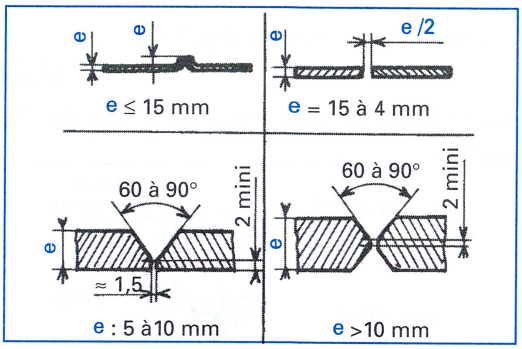



**FIGURE 2.17** Préparation des pièces à souder à plat.

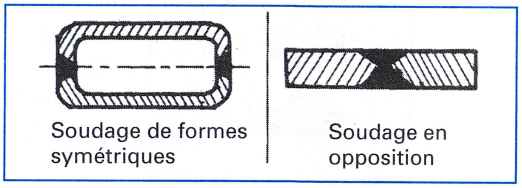



**FIGURE 2.18** Cordons de soudure s'opposant à la déformation.

## Utilisation

La plupart des matériaux métalliques sont soudables par fusion oxyacétylénique.
Pour certains matériaux (aciers inoxydables et de teneur en carbone supérieure à 0,25 %, fontes, cuivre, alliages constitués d'éléments volatils à la température de soudage) : avec métal d'apport spécifique.
Soudage en une passe : assemblage permanent en particulier des pièces peu épaisses : tubes et profilés en construction métallique (mécano-soudure), chaudronnerie... : tôles en cartérisation (électroménager, transport...)

# 1.5 Soudage par aluminothermie

## Généralités

Réaction chimique exothermique de réduction de l'oxyde de fer par de l'aluminium en poudre.
On a : $Fe_2O_3 + 2\,Al$ qui devient $Al_2O_3 + 2Fe$ produisant environ 180 000 calories.
Thermit : mélange constitué d'aluminium en granulés, d'oxydes de fer pulvérulent additionné d'éventuels éléments d'addition (carbone, silicium...).
L'oxyde de fer et les éléments d'addition produisent l'alliage du cordon.
La réaction chimique est amorcée par un apport de chaleur de 1 200 °C environ et se propage ensuite rapidement (de 30 secondes à 2 minutes) dans le thermit jusqu'à la température de 2 400 °C maximum.

## Mise en œuvre

Les bouts de pièces à assembler, non oxydés, sont préchauffés avant la coulée de l'apport en fusion.

Ils sont maintenus dans un moule (destructible, avec coulée en source et en chute) constitué d'aluminium en poudre (fig. 2.19).

### Utilisation

Assemblage permanent bout à bout des fortes sections de pièces massives (construction lourde).

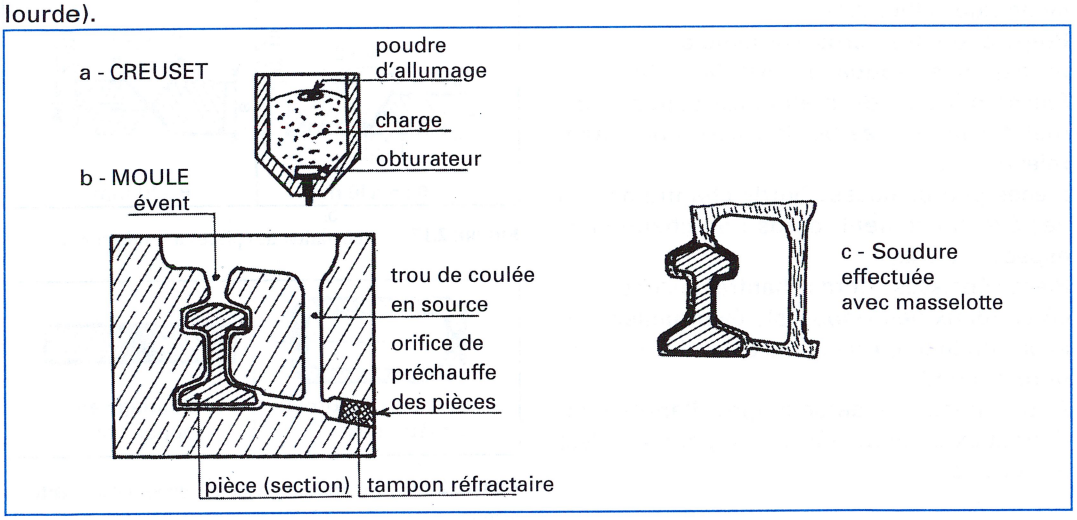



**FIGURE 2.19** Schéma de moule de soudage par alumothermie.

## 1.6 Soudage à l'arc électrique avec électrode enrobée

### Généralités

Soudure autogène de matériaux métalliques de même nature, avec métal d'apport de composition sensiblement identique aux pièces à assembler.

La fusion, localisée et continue, est obtenue au point d'impact d'un arc électrique créé instantanément entre les pièces à assembler et l'extrémité d'une électrode.

Au point d'arc, les deux pièces et le métal d'apport fondent, créant une soudure autogène (fig. 2.20).

Le courant électrique de soudage, continu ou alternatif, est défini en tension et intensité.

L'arc est obtenu par thermo-ionisation, avec l'émission d'électrons d'une cathode incandescente (l'électrode) bombardant l'anode (les pièces) avec ionisation du gaz situé entre l'électrode et les pièces.

Il est fonction de trois paramètres : tension aux bornes, intensité du courant le parcourant, distance anode-cathode.

L'anode, bombardée électroniquement, est plus chaude que la cathode.

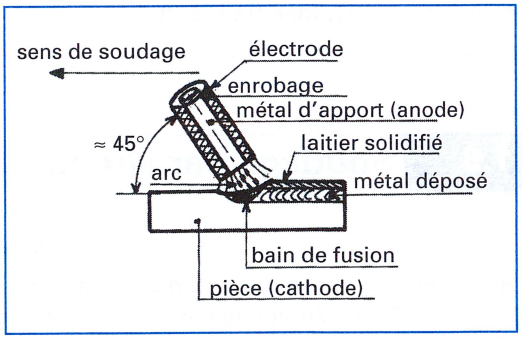



**FIGURE 2.20** Schéma de la zone de soudure avec électrode enrobée.

La différence de température dépend de : l'intensité du courant, la différence de potentiel entre anode et cathode ; la distance entre elles (longueur d'arc).

## Intensité

Pour une intensité donnée, la tension est en fonction croissante de la longueur d'arc (fig. 2.21).
En courant continu, l'arc est stable ; en courant alternatif, la stabilité de l'arc est assurée par assistance (d'un oscillateur haute fréquence, d'un enrobage des électrodes...).

*Nota :* Les intensités de soudage maxi-mini sont indiquées sur le conditionnement des électrodes.

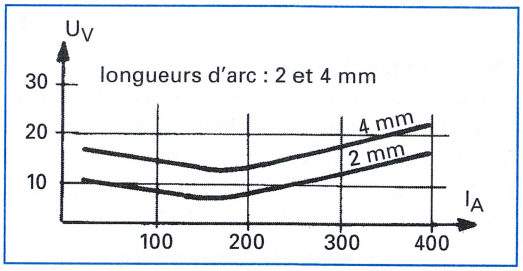



**FIGURE 2.21** Tension en fonction de l'intensité de soudage et de la longueur d'arc.

## Électrode

Sa fusion constitue l'apport de métal.
Elle amorce, maintient, dirige l'arc électrique et s'oppose, avec son enrobage, à l'oxydation par l'air ambiant du métal en fusion.
Les électrodes sont normalisées avec des diamètres standards (1.2, 1.6, 2, 2.5, 3.15, 4, 5, 6.3), et des couleurs conventionnelles spécifiant leurs caractéristiques (fig. 2.22).
Le choix est fonction des pièces à assembler (matériau, épaisseur, méthode) avec Ø électrode ≤ épaisseur à souder.

| Couleur | Rose | Rouge | Jaune | Blanc | Vert |
|---|---|---|---|---|---|
| Rm daN/mm² | < 40 | 40 à 48 | 48 à 56 | 56 à 65 | > 65 |

**FIGURE 2.22** Couleurs des électrodes de soudage.

## Enrobage de l'électrode

Fusible, il se dépose en laitier protecteur sur le bain d'alliage en fusion : stabilise l'arc, désoxyde l'alliage, favorise la cristallisation.
Sa fusion est retardée par rapport au métal de l'électrode créant un canon directement de l'arc et engendrant une atmosphère ionisée et désoxydante.
Il a des effets électrique, mécanique, métallurgique.
Électrique, par l'amorce et le maintien de l'arc stable.
Mécanique, par la viscosité du laitier maintenant le métal en fusion avec formation d'un cratère guidant les gouttes.
Métallurgique, par la protection du métal en fusion contre l'oxydation, l'atténuation des effets de trempe, le dégazage.
Il est lié à l'utilisation de l'électrode, soit :
Basique, pour un maximum d'utilisations, en toutes positions. Le transfert s'effectue en grosses gouttes.
Cellulosique, pour gros travaux, position descendante, dans chanfreins, rechargement (de l'hydrogène augmente la température de l'arc, donc la pénétration).
À base de Rutile, pour travaux de précision, en toutes positions, de bonnes qualités mécaniques.
Le transfert s'effectue à fines gouttes, avec production d'un métal non oxydé.
Avec adjonction de poudres métalliques, pour travaux spécifiques.

## Utilisation

Construction métallique (charpente, chaudronnerie ; construction mécanique (machines, appareillages,...) ; assemblage de tôles d'épaisseur minimales ≃1 mm.

# 1.7 Soudage électrique TIG

## Généralités

TIG = Tungsten Inert Gas
Fusion des pièces à assembler par l'énergie calorifique qu'un arc électrique dégage (à 3000 °C) en éclatant dans une atmosphère protectrice, entre une électrode réfractaire et les pièces à assembler (fig. 2.23).

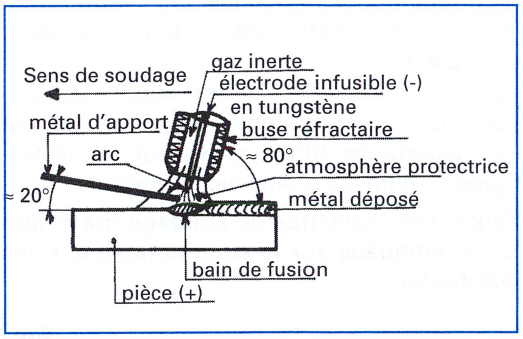



**FIGURE 2.23** Schéma de la zone de soudage avec torche TIG.

## Torche de soudage

Supporte l'électrode réfractaire, dirige un jet de gaz inerte sur le métal en fusion, protégeant le bain de soudure de l'oxydation.
Il y a opposition à toute réaction chimique et pas de production de laitier.
Elle est refroidie par l'air ambiant et la circulation du gaz en soudage de faible intensité (≃150 ampères) ; par l'eau au-delà de 150 A.
L'électrode, en tungstène (avec addition de thorium pour les aciers) est au pôle négatif (cathode) ; son diamètre est en rapport avec l'intensité de soudage (fig. 2.24).

| Diamètre des électrodes | Diamètre des buses | Intensité |
|---|---|---|
| 1 | 6 à 9 | 15 à 50 |
| 1,6 | 9 à 11 | 60 à 150 |
| 2 | 11 à 13 | 100 à 200 |
| 2,4 | 13 à 15 | 130 à 250 |
| 3,2 | 15 à 18 | 220 à 300 |
| 4 | 15 à 18 | 300 à 400 |
| 5 | 18 à 22 | 350 à 550 |

**FIGURE 2.24** Intensité de soudage en fonction du diamètre de l'électrode.

### Métal d'apport

Amené automatiquement dans la zone de fusion par dévidage d'un fil à vitesse constante.
Introduit en bordure du bain, il ne transfère pas dans l'arc, d'où aucune surchauffe de l'apport : évite la dégradation chimique (pureté du métal conservée) et la volatilisation (pas de fumée nocive).
Il peut contenir des éléments désoxydants (silicium, manganèse).
Son dévidage est indépendant de l'arc : soudage éventuel sans apport (facilite début et fin de l'opération).

### Vitesse de soudage

8 à 40 cm/min, selon les épaisseurs à souder et les matériaux.
Les soudures s'effectuent manuellement et automatiquement, sauf pour TIG FORCE (essentiellement soudage manuel).

## TIG FORCE

Avec une protection du bain sous double circuit gazeux, l'arc de soudage est rigidifié, assurant : réduction de l'intensité de soudage (jusqu'à 50 %) ; augmentation de l'épaisseur soudable ; diminution de la déformation des pièces (fig. 2.25).
**Utilisation.**
Essentiellement en soudage manuel. L'arc est stable, contribuant à une fusion et une pénétration régulières.

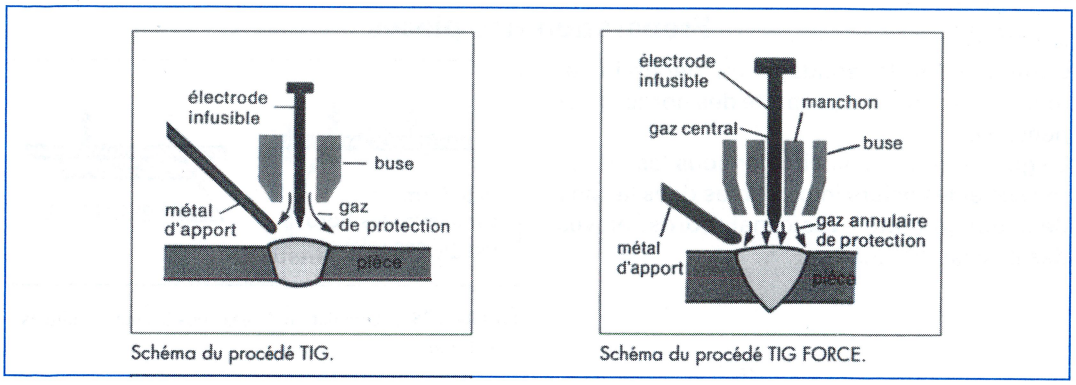



**FIGURE 2.25** Forme des cordons de soudure. Soudage avec torches TIG et TIG FORCE. *Doc. Air liquide*

## TIG chaud

Avec préchauffe du métal d'apport, par effet Joule, la quantité de son dépôt est réglable.

## Gaz de soudage

L'argon avec généralement addition d'hélium et d'hydrogène, conformément à la norme européenne EN 439.
Chimiquement non oxydant, étant spécifique au matériau à assembler, on utilise :
Aciers non et faiblement alliés. Hélium et hydrogène : améliorent la productivité et les conditions de travail.
Aciers inoxydables. Mélange argon-hélium-oxygène, métallurgiquement compatible avec le matériau-pièces.
Soudage monopasse sans chanfrein et multipasses avec : forte pénétration de la soudure ; amélioration des performances et des conditions de travail (réduction des oxydes d'azote) (fig. 2.26).
Alliages d'aluminium et de cuivre. Le gaz est nécessairement inerte pour protéger métallurgiquement le métal en fusion.
Une forte teneur en hélium permet le soudage sans chanfrein ni écartement des pièces.
Métaux et alliages spéciaux (titane, tantale...) Une protection gazeuse complémentaire s'oppose à la fragilisation des pièces par affinité chimique gaz-métal.
Une protection pré et post-bain de fusion est nécessaire pour éviter la contamination (fig. 2.27).

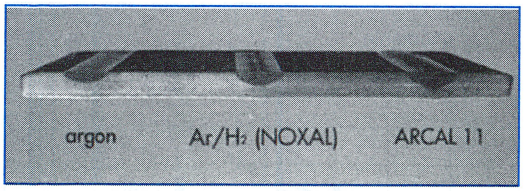



**FIGURE 2.26** Pénétration des soudures TIG FORCE, sans chanfreinage des pièces. *Doc. Air liquide*

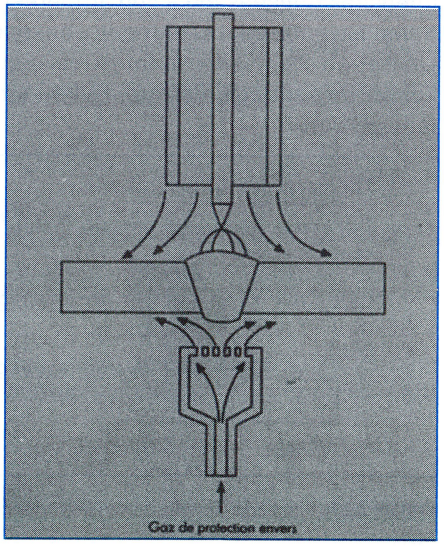



**FIGURE 2.27** Protection gazeuse pré et post-bain de fusion. *Doc. Air liquide*

## Préparation des pièces

Comme pour le soudage en général (vé, tulipe, x...) avec une propreté des bords indispensable.
Le gaz devra pouvoir circuler sous les pièces minces et les aciers inoxydables dans la zone de soudage (latte avec canal, bords relevés des pièces) (fig. 2.28).

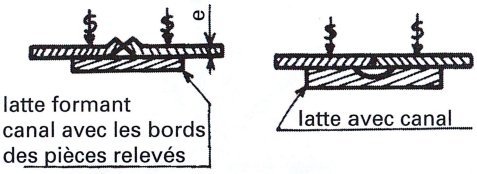



**FIGURE 2.28** Circulation du gaz sous les pièces minces ($e < 1$ mm).

## Utilisation

Les matériaux oxydables sont particulièrement soudables: aciers non et faiblement alliés, inoxydables, alliages d'aluminium et de cuivre, alliages spéciaux.
Réalisation de soudures de grande qualité métallurgique et esthétique (industries chimiques, alimentaires, aéronautiques, chaudronnerie d'inoxydables...) : pièces de faible épaisseur (quelques dixièmes de mm) ; soudures en passes de fond.

# 1.8 Soudage électrique MIG

## Généralités

MIG: Metal Inert Gas
Fusion des pièces à assembler par l'énergie calorifique qu'un arc électrique dégage sous atmosphère protectrice entre un fil-électrode fusible et les pièces à assembler (fig. 2.29).

### Fil-électrode

Au pôle positif (anode) par tube de contact conduisant le courant.
Métal d'apport amené automatiquement à vitesse constante de 2 à 12 m/min, en fonction des intensités utilisées (50 à 500 ampères) (fig. 2.30).
Selon les épaisseurs à souder, son diamètre est de 0,5 à 2,4 mm.
Utilisation d'un fil nu ou fourré (fil creux contenant un flux solide) (fig. 2.31).
Torche de soudage. Refroidie à l'air ambiant jusqu'à environ 350 ampères ; au-delà, par circulation d'eau.

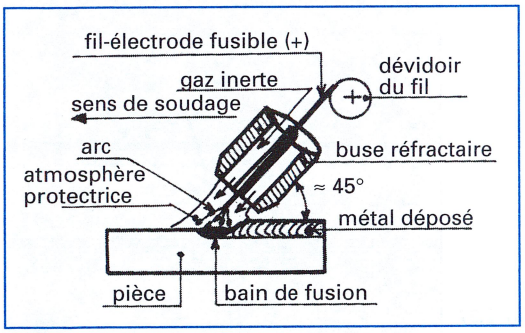



**FIGURE 2.29** Schéma de zone de soudage avec touche MIG.

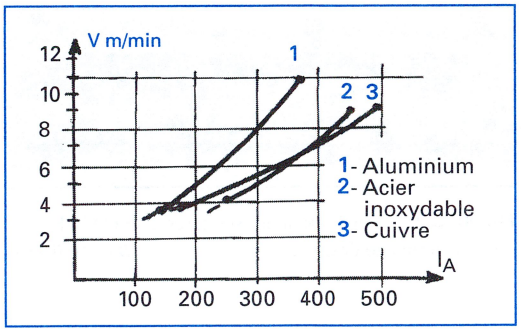



**FIGURE 2.30** Dévidement de l'apport selon l'intensité de soudage (pour fil Ø 1,6).

Le courant utilisé est un courant redressé. Le transformateur-redresseur délivre une tension constante, du fait de ses caractéristiques externes « plates ».
La polarité inverse (électrode-anode) produit des gouttelettes fines et nombreuses.

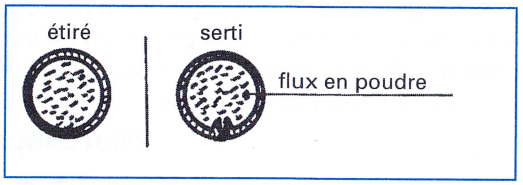



**FIGURE 2.31** Différents fils fourrés (Ø 1,6 à 4 mm).

## Régimes de transfert du métal d'apport et utilisation

L'arc est produit sous plusieurs régimes, la fusion du fil-électrode et son dépôt variant en fonction de la densité du courant (A/mm²), soit les régimes principaux de transfert du métal dans l'arc (fig. 2.32).

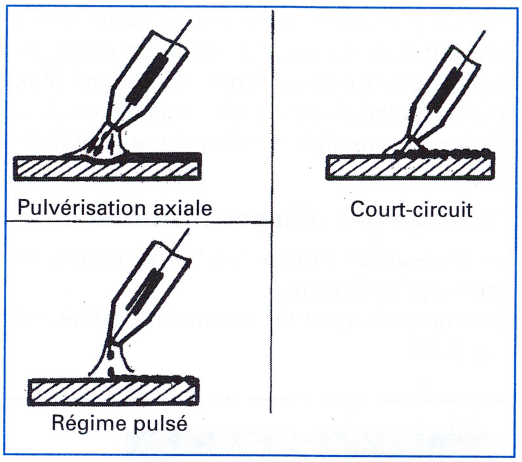



**FIGURE 2.32** Différents régimes de soudage.

### Régime pulvérisation axiale (SPRAY ARC)

Le métal transfère sous fortes intensités dans l'arc, en fines gouttes, très régulièrement.
Utilisation en soudage des fortes épaisseurs (au-delà de 5 mm) en position à plat.

### Régime court-circuit (SHORT ARC)

Le métal transfère dans l'arc par alternance de courts-circuits et de périodes d'arc.
Le court-circuit s'établit au contact goutte/pièces provoquant le transfert, la faible tension limite le diamètre des gouttes.
Utilisation en soudage de faibles épaisseurs, en toutes positions sans support arrière.

### Régime pulsé

Un générateur de soudage, provoquant des pulsations, transfère le métal en gouttes du diamètre désiré.
Utilisation en soudage de faibles épaisseurs et en grosses gouttes.
L'arc est stabilisé par la superposition d'un courant pulsé.

## Gaz de soudage

Ils ont une action sur le mode de transfert du métal d'apport, généralement métallurgique, par leur comportement chimique et leur influence au refroidissement du bain (fig. 2.33).

| | | GAMME | QUALITE COURANTE | | ARCAL | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | GAZ | CARGAL 1 | NOXALIC 12 | ARCAL 12 | ARCAL 112 | ARCAL 121 |
| CONDITIONS DE TRAVAIL | PRODUCTIVITÉ | VITESSE DE SOUDAGE | | | | | |
| | | PENETRATION | | | | | |
| | | ABSENSE DE PROJECTION | | | | | |
| | QUALITÉ ASSEMBLAGE ASPECT | MOUILLAGE | | | | | |
| | | OXYDATION | | | | | |
| | | ABSENCE DE PROJECTION | | | | | |
| | CONFORT OPÉRATOIRE | STABILITE D'ARC | | | | | |
| | | ABSENCE DE PROJECTION | | | | | |
| | | FACILITE DE REGLAGE | | | | | |
| | POLYVALENCE | REGIME D'ARC | | | | | |
| | | MATERIAUX | | | | | |
| | | MULTIPASSES | | | | | |
| | | POSITIONS | | | | | |
| | | FILS PLEINS ET FOURRES | | | | | |
| | ENVIRONNEMENT | FUMEES | | | | | |
| | | EFFLUENTS GAZEUX NOCIFS (CO - NOX - O3) | | | | | |

EXCELLENT BON MEDIOCRE

**FIGURE 2.33**
Utilisation de gaz en soudage MIG des aciers.
*Doc. Air liquide.*

**Gaz neutre.** L'argon, avec addition d'hydrogène, d'oxygène ou d'hélium, selon les matériaux à souder et éventuellement pour un régime donné.
**L'hélium.** À tous les régimes, en soudage mono ou multipasses : oxydation réduite du cordon ; nocivité réduite ; vitesse de soudage accrue (≃15 %).

## Matériaux soudables

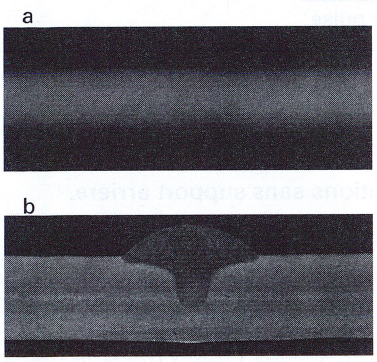
Aciers non et faiblement alliés, inoxydables, alliages d'aluminium, de cuivre, de nickel.

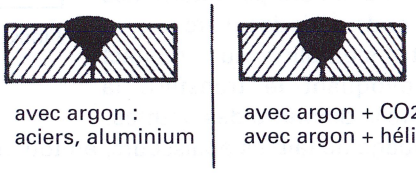
### Soudage des aciers

L'arc est stabilisé par un mélange faiblement oxydant, facilitant le mouillage.
Régime pulsation axiale. Argon additionné d'un faible pourcentage d'oxygène : réduction des tensions superficielles du bain. Soudage en monopasse et multipasses.
Régime court-circuit. Argon additionné d'oxygène et d'hydrogène. Soudage en position.
Régime pulsé. Argon additionné de tous les gaz utilisés. Soudage des aciers inoxydables austénitiques : qualité métallurgique (stabilité de l'arc avec oxydation réduite) rapidité de soudage.

### Soudage des alliages d'aluminium, de cuivre, de nickel

Mélange argon-hélium (70 % maximum) assure : stabilité de l'arc avec un minimum de nocivité (oxydes d'azote).
Soudures de qualité : compacité, pénétration massive, résistance à la fissuration à chaud (fig. 2.34).




a. Contrôle radiographique de sousure MIG
b. Soudage MIG avec ARCAL 12.

**FIGURE 2.34** Qualité et formes de soudures MIG. *Doc. Air liquide.*

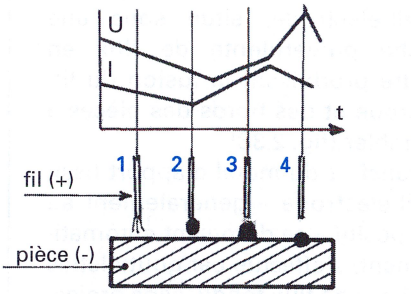
## Utilisation

Soudage manuel (appelé semi-automatique par suite de l'alimentation du fil en continu).
Soudage automatique (dont robotisé) : soudures en toutes positions et rapidité en constructions maritime, civile, ferroviaire, automobile, chaudronnerie, métallerie, etc.

# 1.9 Soudage électrique MAG

## Généralités

MAG = Metal Active Gas.
Similaire au procédé MIG, à la différence que le gaz est actif sur la zone de soudage.
L'arc est produit sous les mêmes régimes que le procédé similaire TIG (pulvérisation axiale, court-circuit, pulsé).
En régime pulsé, la qualité des soudures est excellente : compacité du métal, très bonne pénétration (fig. 2.35).




1- amorce de l'arc
2- formation de la goutte
3- court-circuit: goutte séparée
4- arc: soudage

**FIGURE 2.35** Allure du transfert en régime pulsé.

## Gaz de soudage

Le gaz actif est un mélange binaire ou tertiaire de gaz carbonique, d'argon, d'oxygène, d'hélium.
Les éléments oxydants du mélange stabilisant l'arc sont actifs par leur action sur la viscosité du bain et la compacité de la soudure obtenue (fig. 2.36).
Ces mélanges peuvent être polyvalents ou spécifiques à une utilisation (technique et sécurité) et un régime d'arc.

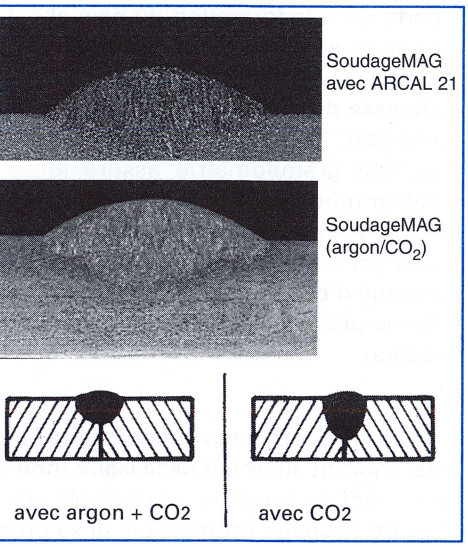



**FIGURE 2.36** Qualité et formes de soudures MAG.
*Doc. Air liquide*

## Utilisation

Assemblage essentiellement des aciers non alliés et faiblement alliés, en production industrielle : soudage automatisé et robotisé en continu et par points.
Les tôles minces sont soudables en toutes positions sous le régime pulsé (superposé au courant de faible intensité, permettant un plus faible dégagement de chaleur).

### Soudage à plat

Il s'effectue en régime sous arc long, le transfert se produisant en pluie, avec une intensité supérieure à 200 ampères (fig. 2.37 a).

### Soudage en toutes positions

Il s'effectue en régime sous arc court, le transfert se produisant en grosses gouttes, avec une intensité inférieure à 200 ampères (fig. 2.37 b).

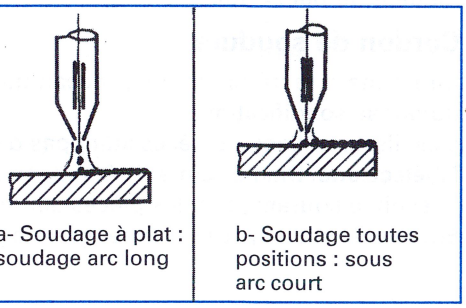



**FIGURE 2.37**
Régimes de soudage MAG.

# 1.10 Soudage sous flux conducteur

## Généralités

Jaillissement d'un arc électrique sur un fil-électrode, situé sous une couche pulvérulente de flux en poudre produisant la fusion du fil-électrode et des bords des pièces à assembler (fig. 2.38).
Le transfert du métal d'apport (issu du fil-électrode – généralement au pôle positif – se déroulant automatiquement) s'effectue par gouttelettes enrobées de flux fondu, sans projections.

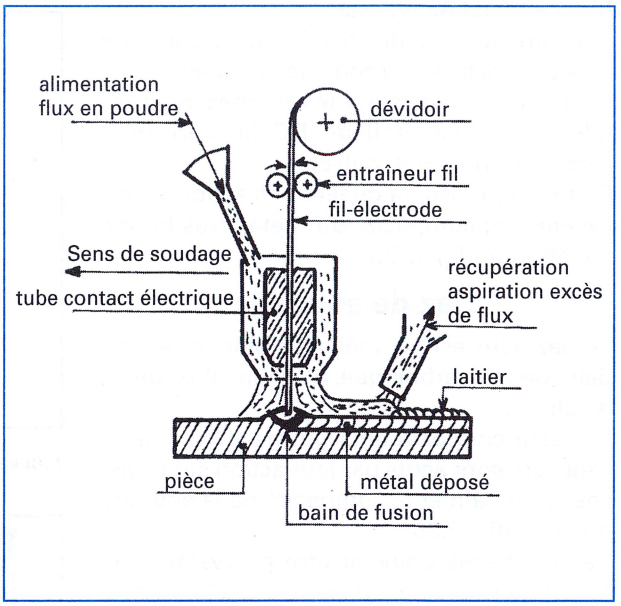



**FIGURE 2.38** Schéma de zone de soudage sous flux conducteur.

### Le flux

Il est conducteur du courant, à chaud, comme l'enrobage du courant.
Il participe à la formation du bain et provoque son lent refroidissement avec un important dépôt.
La finesse du flux agit sur la largeur du cordon.
Une fine granulométrie assure le meilleur mouillage. Le cordon sera plus large et la pénétration sensiblement plus faible.
Une grosse granulométrie favorise le dégazage du bain et la non-porosité de la soudure.
Il contient des éléments désoxydants (agissant comme l'enrobage d'électrode et pouvant être constitué d'éléments d'addition avec des caractéristiques mécaniques du joint améliorées).
Il forme une couche de laitier sur la soudure. L'excédent, non fondu, est aspiré à l'arrière du soudage.

### L'arc

Il est régulé, comme avec le procédé MIG. Il est stable en courant continu jusqu'à ≃ 500 A ; au-delà, courant alternatif nécessaire (non-déviation de l'arc).
Le courant de soudage est de faible tension (25 à 40 volts).
L'arc de soudage est invisible. Il se produit sous l'apport du flux, ne nécessitant pas de protection visuelle (masque de soudage) pour opérateur.
Le bain est important, avec risque de fissuration à chaud : respecter un rapport longueur/profondeur du bain = 1,5.

### Cordon de soudure

De bonne qualité (chimique, mécanique, esthétique) : la gangue du laitier protège le bain durant sa solidification.
Il est lisse, brillant, ne nécessitant pas d'opération de finition.
**Fil-électrode.** Diamètre maxi 10 mm, en alliage de soudage désiré.
Il reçoit le courant près des pièces par un tube contacteur.
Énergie de soudage très élevée : grande pénétration, vitesse de soudage très élevée (3 m/min).

## Torches de soudage

De trois types : avec fil toronné, avec fil enrobé, sous flux magnétique.

### Torche avec fil toronné

Le fil-électrode est entouré d'un toron de fils d'acier conduisant le courant à l'extrémité du fil : suppression des effets d'induction (fig. 2.39 a).

### Torche avec fil enrobé

Le fil-électrode est dans une gaine contenant le flux qui l'enrobe : obtention de soudures relativement fines (fig. 2.39 b).

### Torche sous flux magnétique

Le flux contient des éléments magnétiques le faisant adhérer au fil-électrode par le champ magnétique agissant à la fusion (fig. 2.39 c).

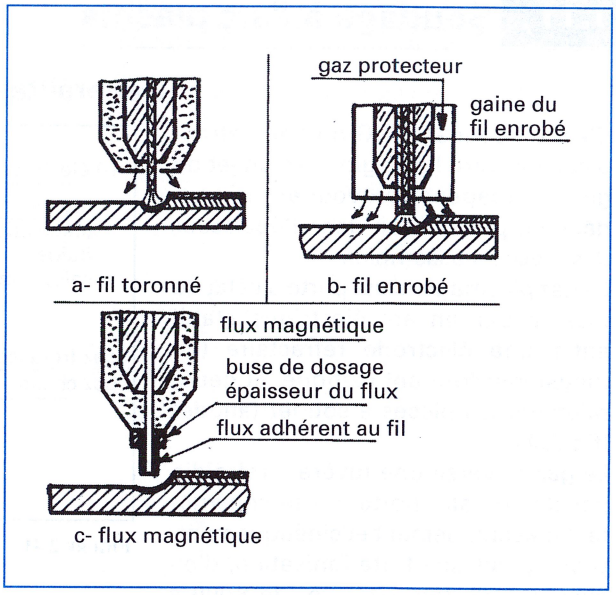



**FIGURE 2.39** Schéma des différentes torches de soudage.

## Pièces à assembler

À préparer sans chanfrein (fig. 2.40) : énergie de soudage élevée.
Le soudage s'effectue essentiellement à plat – sauf appareillage spécial – le flux devant être déversé sur l'arc pour le protéger.
Une fine granulométrie du flux soutient l'arc en fusion : soudage possible en position légèrement inclinée.

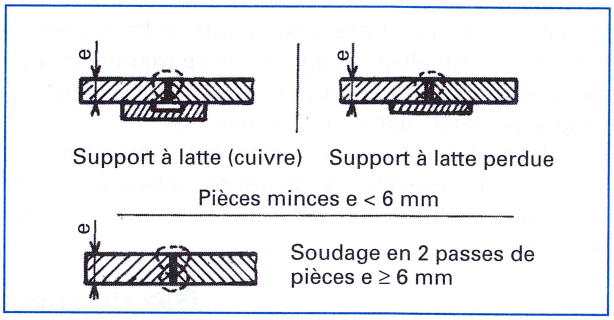



**FIGURE 2.40** Préparation de pièces sans chanfreins.

## Machines

De fonctionnement automatique : avance de soudage, déroulement de l'apport et amenée du flux.
L'apport s'effectue : à un fil ; à deux fils simultanément ou par feuillard augmentant le débit d'apport et la vitesse de soudage.
Le système de production (machine de soudage, fixation et positionnement des pièces, mouvement d'avance) pour pièces d'importantes dimensions, nécessite une production de série.

## Utilisation

Exclusivement en soudage des aciers (alliés, non alliés, inoxydables) de grandes pièces (longs cordons de soudure) : poutres de section constituée en plaques soudées (caisson, IPN,... ) tôles de réservoirs sous pression, raboutage de tôles, etc.

# 1.11 Soudage à l'arc plasma

## Généralités

C'est un soudage TIG où l'arc, étranglé, concentre l'énergie avec un jet de gaz plasmagène, provoquant le soudage en pénétration dans l'épaisseur des pièces à assembler.
Le gaz plasmagène est porté à l'état de plasma par un arc électrique établi entre une électrode réfractaire (en tungstène) formant cathode, et généralement les pièces à souder (anode) (fig. 2.41).
Le gaz traverse une tuyère – refroidie par fluide caloriporteur – le constrictant mécaniquement et cinétiquement, provoquant une forte ionisation, d'où élévation de température (de 8 000 à 25 000 °C) localisée dans l'axe de la colonne d'arc.

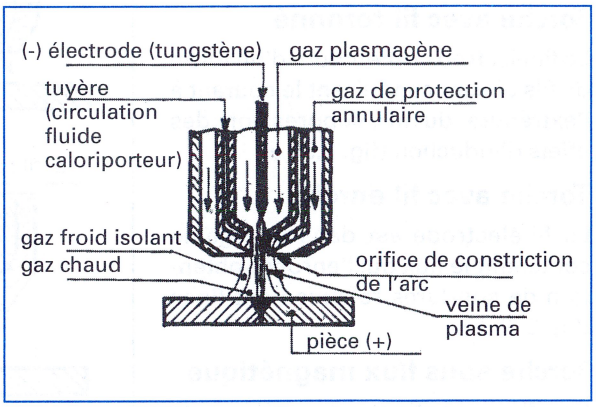



**FIGURE 2.41** Schéma de zone de soudage à l'arc plasma.

Le gaz ionisé, à son passage autour de l'électrode, le plasma, crée un champ électromagnétique se manifestant par effet de striction tendant à regrouper les particules ionisées – les plus chaudes – dans l'axe de la colonne d'arc.
Le débit de la tuyère est fonction de l'intensité du courant.
Avec une intensité élevée, on pourra utiliser une tuyère convergente-divergente, limitant la formation d'arcs parasites (fig. 2.42).

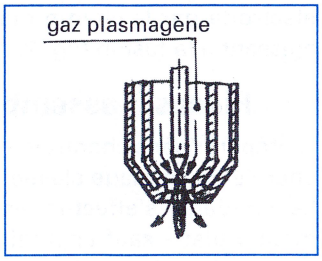



**FIGURE 2.42** Schéma de tuyère convergente-divergente.

## Gaz de soudage

### Gaz plasmagène

L'argon, d'un faible potentiel d'ionisation.
L'hydrogène, en addition de 2 à 5 %, sauf contraintes métallurgiques : augmente la conductibilité thermique, d'où la vitesse de soudage.

### Gaz de protection (gaz annulaire)

Argon additionné d'hydrogène (10 % maxi).
Diffusion en périphérie du jet : limite une fusion superficielle aux bords de la soudure (par dilution du jet plasma autour d'un jet central) ; protège de l'oxydation le métal en fusion (fig. 2.41).
L'hydrogène améliore l'aspect du cordon, le mouillage et augmente la vitesse de soudage.
L'hélium, en remplacement de l'hydrogène néfaste au métal des pièces à souder, en gaz d'addition pour certains matériaux (zirconium...).

### Gaz envers de protection

Nécessaire pour protéger les matériaux sensibles à la contamination par l'air ambiant (titane, tantale...) et pour les aciers inoxydables, comme en soudage TIG (fig. 2.27).

*Nota :* Un apport de métal, en fil dévidé automatiquement devant la torche, peut être éventuellement effectué.

## Régimes de soudage

L'arc produit peut être transféré ou soufflé (fig. 2.43 a et b).
Pour chacun d'eux, le courant de soudage est redressé avec une tension à vide de 80 volts minimum.
L'arc électrique, restant relativement stable à faible intensité, permet la microsoudure (microplasma ou miniplasma).

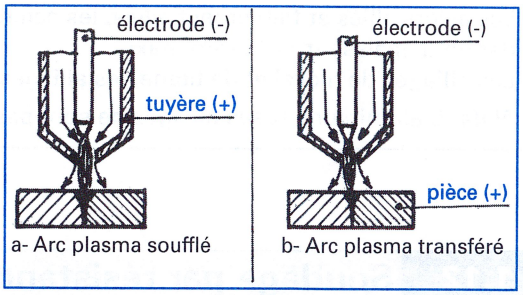



**FIGURE 2.43** Schéma d'arcs plasma.

### Soudage à l'arc plasma soufflé

L'arc jaillit entre l'électrode-cathode et la tuyère formant anode : soudage à faible énergie de matériaux conducteurs ou non de l'électricité.
C'est un complément au soudage TIG.
Vitesse de soudage 100 à 200 mm/min sous intensité de 0,2 à 30 ampères ; ionisation auxiliaire du gaz.

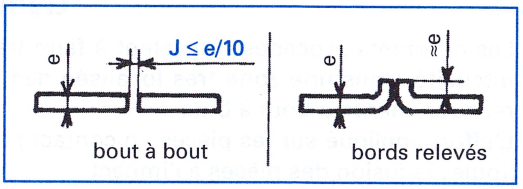



**FIGURE 2.44** Préparation de pièces minces.

### Utilisation

Mini et microplasma en soudage automatique, sans métal d'apport, de pièces minces (0,01 à 1 mm).
Préparation des pièces : en soudage en bout, avec jeu maxi = 1/10 épaisseur de pièces (très délicat), à recouvrement, à bords relevés (fig. 2.44).

### Soudage de l'arc plasma transféré

L'arc s'établit entre l'électrode-cathode et les pièces à souder (anode).
Le jet de plasma provoque une forte pénétration de fusion, produisant un trou de serrure (« Key-hole ») qui se referme avec le déplacement du jet, formant soudure.
Soudure en profondeur (jusqu'à 10 mm) avec compacité, sans support envers (fig. 2.45).
Soudage avec raccordement du cordon départ-arrivée (soudure circulaire).
Effectué en passage d'un cycle à jet débouchant à un cycle d'évanouissement de l'arc (jet non débouchant, puis extinction).

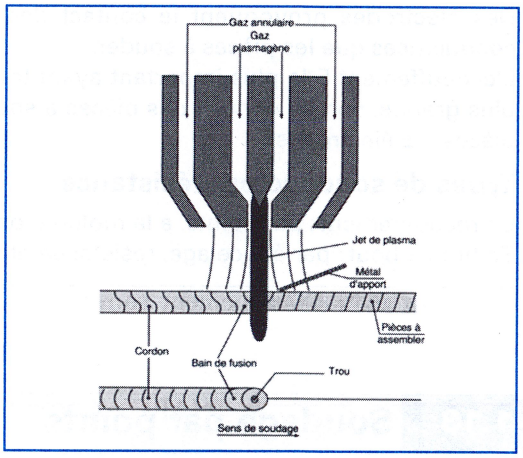



**FIGURE 2.45** Bain de fusion autour du « key-hole ».
*Doc. Air liquide*

### Utilisation

Obtention, par soudage automatique, de soudures compactées à forte pénétration (à jet débouchant), d'excellente qualité métallurgique.
Soudage en une seule passe, généralement sans métal d'apport et sans soutien à l'envers pour des épaisseurs de 3 à 10 mm (fig. 2.46 a et b).
Préparation des pièces : aucune en bord à bord.

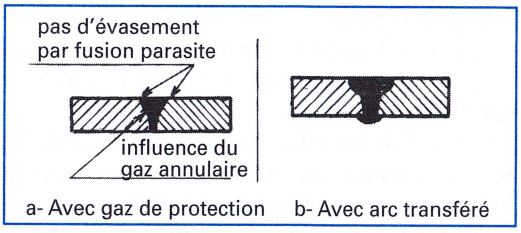



**FIGURE 2.46** Schéma de soudures à l'arc plasma.

### Matériaux soudables

Les aciers alliés et faiblement alliés, les aciers inoxydables et les matériaux sensibles à l'oxydation d'épaisseur ≃ 10 mm maxi.
Les alliages de nickel et de titane, les alliages de cuivre en faible épaisseur.

*Nota :* L'aluminium et ses alliages ne sont pas soudables par ce procédé.

## 1.12 Soudage par résistance

### Généralités

Les différents procédés consistent à faire traverser un courant de basse tension et de forte intensité, dans une zone très localisée des pièces à assembler maintenues en contact par recouvrement ou bout à bout.
L'effort appliqué sur les pièces en contact provoque l'accostage de l'arc ; la chauffe par effet Joule ; la fusion des pièces à l'impact.
Après coupure de courant, l'effort de contact assure le soudage des deux pièces sans métal d'apport.
Des électrodes provoquent le contact des pièces. Elles sont nécessairement meilleures conductrices que les pièces à souder.
L'échauffement E le plus important ayant toujours lieu là où la résistance électrique R est la plus grande, soit au contact des pièces à souder, on a donc : R électrodes < R pièces, d'où E pièces > E électrodes.

### Types de soudage par résistance

En recouvrement : par points, à la molette, par bossages.
En bout à bout : par étincelage, résistance-étincelage.

## 1.13 Soudage par points

### Généralités

Il est obtenu sur les pièces à recouvrement maintenues entre deux électrodes en cuivre ou alliage de cuivre.
Le contact s'établit par : compression des pièces entre les deux électrodes refroidies par circulation d'eau ; accostage, faisant passer un courant (de forte intensité et basse tension) entre les deux électrodes.
Il se produit un échauffement puis une fusion de métal dans la zone à plus grande résistivité et non refroidie, soit au contact des pièces dans l'axe des électrodes (fig. 2.47).
Le noyau de métal fondu, refroidi, assure la soudure.
Épaisseur de pièces > ≃ 2 mm : un effort complémentaire de compression assure le forgeage de l'assemblage.
Le temps de soudage court, obtenu par la forte intensité, évite la déformation des pièces et la détérioration des électrodes.

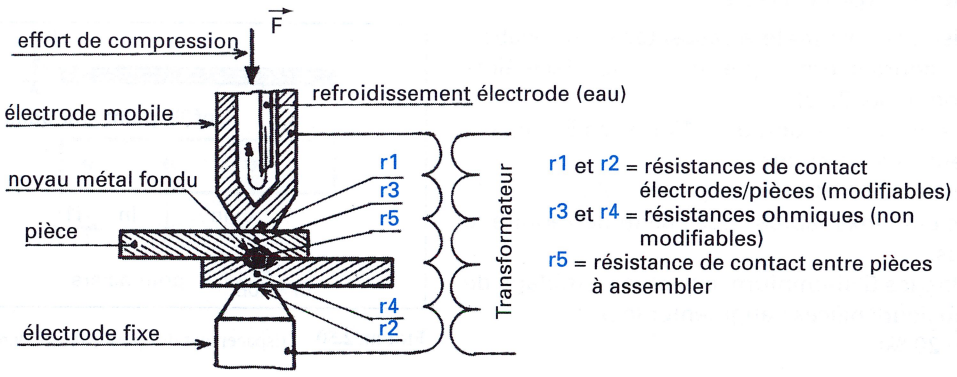



**FIGURE 2.47** Schéma de la zone de soudage par points.

## Électrodes

Leur extrémité est adaptée au matériau et à l'épaisseur à souder pour assurer : le passage de la densité de courant nécessaire ; la résistance mécanique du point sous l'effort de compression.

### Soudage des aciers

Extrémité des électrodes coniques avec un diamètre au sommet
$d = 2e + 3$ mm si $e \leq 8$ mm, et $+ 2$ mm si $e >$ 8 mm, avec e = épaisseur d'une pièce à assembler (fig. 2.48 a).

### Soudage des alliages d'aluminium

Extrémité des électrodes sphérique : contact électrode/pièce réduit (fig. 2.48 b).

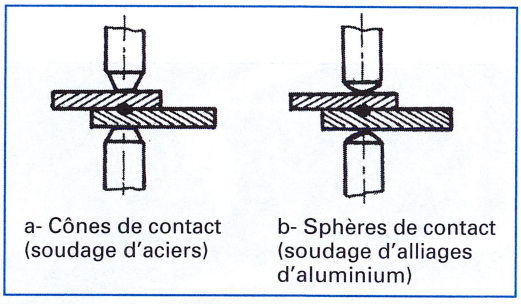
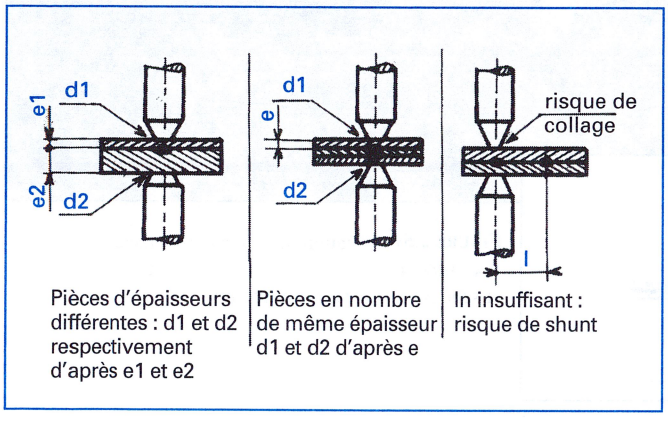



**FIGURE 2.48** Extrémités de contact des électrodes.

## Mise en œuvre

Différence d'épaisseurs des deux pièces à assembler : à limiter au rapport d'environ 1/3.
Diamètre au sommet des électrodes : en rapport avec chaque épaisseur de pièce (fig. 2.49).




Épaisseur totale soudable : ≃ 20 mm, pour pièces de même épaisseur.
Plusieurs pièces peuvent être soudées ensemble, simultanément.

**FIGURE 2.49** Différents cas de soudage par points.

## Pas d'espacement

Distance minimale à respecter (la dérivation du courant provoque le collage pièce/électrode) (fig. 2.50).
Distance entre points ≃ 10 E avec E = épaisseur totale à souder ;
Distance point/bord de pièce ≃ 3E.
Aciers inoxydables : possibilité de réduire le pas.
Alliages d'aluminium, cuivre, assemblage de plusieurs pièces : augmenter le pas (≃ 20 %).

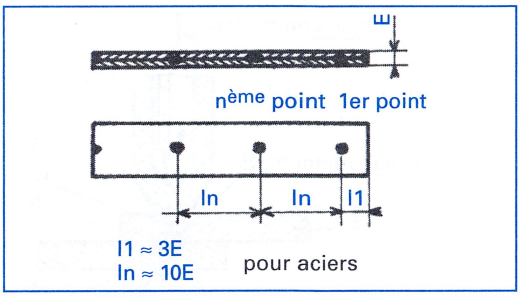
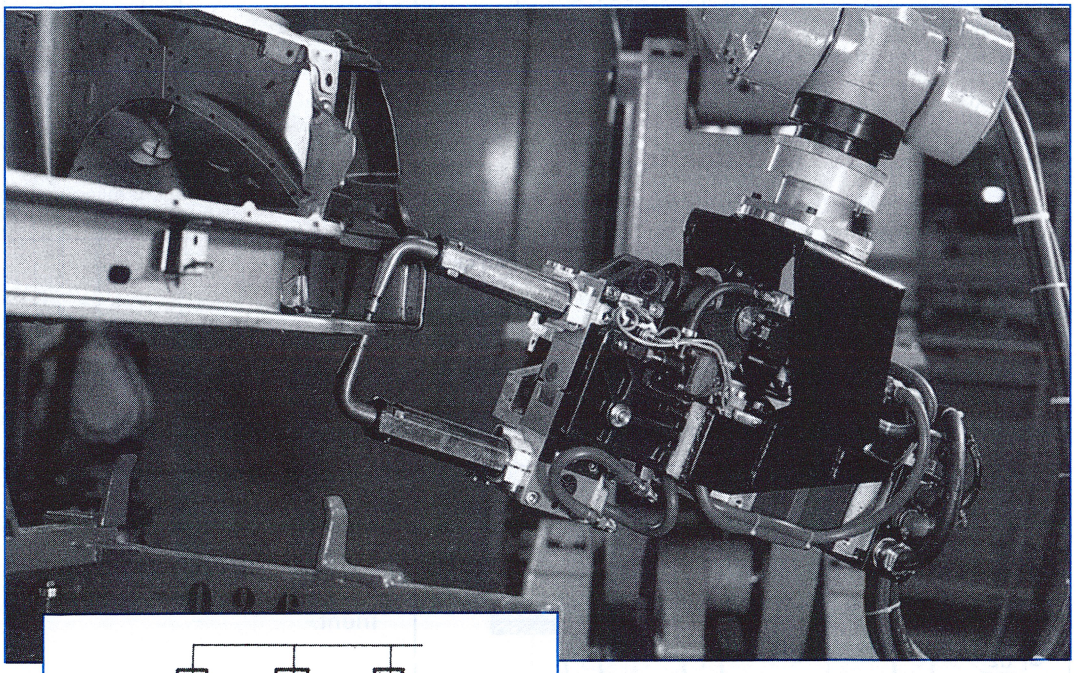



**FIGURE 2.50** Espacement des points de soudure.

## Utilisation

Assemblage de pièces peu épaisses (tôlerie) de formes quelconques, en travaux unitaire et de série.
Soudage en série de pièces minces en acier : possible en multipoints (fig. 2.51).
Les machines à souder, mono ou multipoints, sont fixes.
Appareils portatifs pour soudage sur grands ensembles métalliques et chantiers.
Robots de soudage pour grande série (chaîne d'assemblage) ou système de soudage en flexibilité.



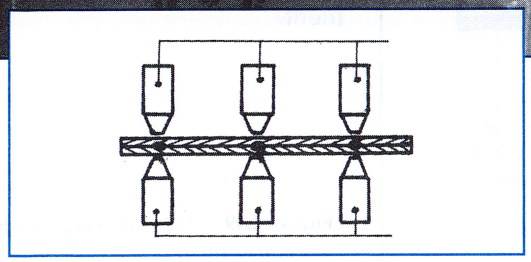


**FIGURE 2.51** Station de soudage robotisée
*Doc. ARO SA*
et schéma de soudage multipoints.

# 1.14 Soudage à la molette

## Généralités

Deux molettes-électrodes, animées d'un mouvement de rotation, provoquent une soudure continue (à points jointifs) ou discontinue (à points espacés) des pièces situées entre les molettes (fig. 2.52).

Les molettes, en cuivre ou alliage de cuivre, ont un diamètre relativement grand (≃ 300 mm).

Épaisseur totale des pièces à souder (de même épaisseur chacune) : ≃ 6 mm maxi.

L'assemblage obtenu est étanche.

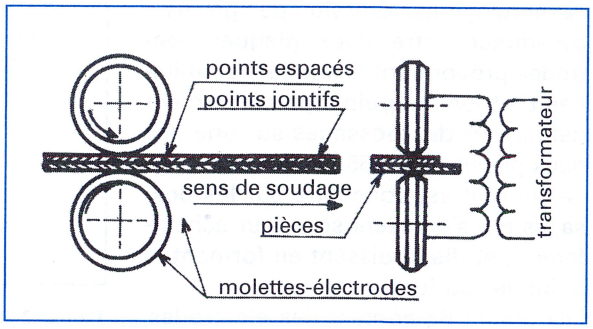



FIGURE 2.52 schéma de zone de soudage à la molette.

Les points de soudure sont discontinus ou continus, selon : la vitesse de rotation des molettes ; la fréquence des impulsions du courant.

Méplat sur la périphérie des molettes-électrodes : d'autant plus large que les pièces à souder sont épaisses (l'effort de compression et l'intensité augmentent).

Vitesses de soudage : 1 à 40 mètres/min, selon l'épaisseur et le type de pièces à assembler (données machine).

## Utilisation

Assemblage de pièces de faible épaisseur : quelques centièmes de mm à ≃ 4+4 mm maxi.

### Pièces plates

Les deux molettes opposées et tournantes provoquent le soudage en points plus ou moins rapprochés, jusqu'à la soudure en continu.

### Pièces tubulaires (longues)

La pièce à souder peut être maintenue en pression bord à bord par des galets. Les deux molettes provoquent le soudage en continu avec écrasement des bords (fig. 2.53).

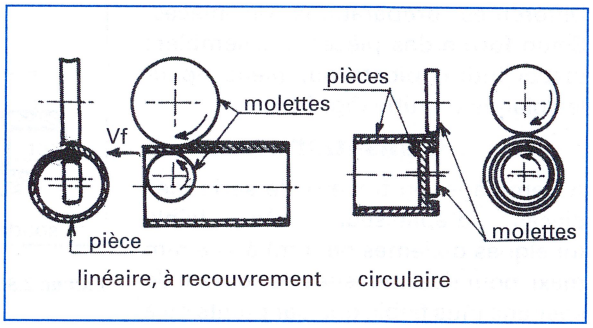



FIGURE 2.53 Schéma de soudage à recouvrement par molette.

### Soudage bord à bord

Avec apport de deux bandes métalliques minces (quelques dixièmes de mm) placées sur le joint, entre les molettes (de largeur adaptée aux bandes) ; ou avec un fil d'apport situé sur le joint, sous une molette (fig. 2.54).

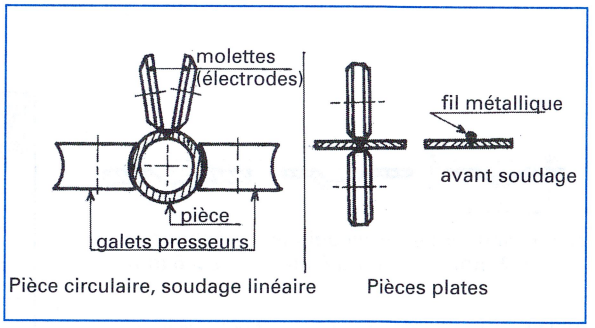



FIGURE 2.54 Schéma de soudage bord à bord.

# 1.15 Soudage par bossages

## Généralités

Assemblage par pression des pièces à assembler entre deux plaques-électrodes provoquant la soudure simultanée de tous les points préalablement définis par des bossages sur une des deux pièces (fig. 2.55).

Le courant est concentré sur les bossages qui s'écrasent sous leur échauffement et disparaissent en formant le point de soudure.

Les points de contact des électrodes, définis par les bossages, permettent de situer les pièces en position, réduisant l'énergie nécessaire.

Épaisseurs différentes des pièces à assembler : les bossages sont à effectuer sur la pièce la plus épaisse (réduit le déséquilibre de chauffage).

**Effort de forgeage.** Le double de celui du soudage par points pour assurer écrasement et assemblage.

Différentes préparations de pièces. Selon forme des pièces à assembler : plat/cylindre, picot/trou, pièce épaulée/plaque ou tube (fig. 2.56).

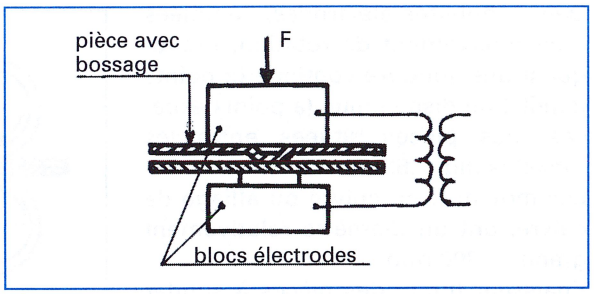



**FIGURE 2.55** Schéma de zone de soudage par bossage.

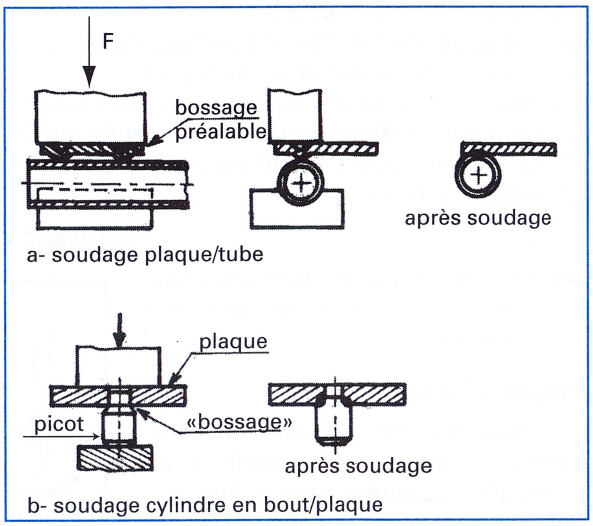



**FIGURE 2.56** Schéma de soudage par bossage.

## Utilisation

Assemblage, en travaux de série, des pièces d'épaisseur très faible (quelques dixièmes de mm) à ≃ 6 mm maxi, pour des intensités de courant de soudage plus faible que par points ou à la molette (fig. 2.57).




**FIGURE 2.57** Formes de bossages et ordre de grandeur des dimensions.

| Épaisseur pièce e (mm) | Hauteur bossage h (mm) | Diamètre point d (mm) |
|---|---|---|
| 0,2 à 0,5 | 0,5 | 2,5 |
| 0,5 à 0,8 | 0,7 | 3,5 |
| 0,8 à 1,5 | 1 | 4 |
| 1,5 à 2 | 1,2 | 4,5 |
| 2 à 3 | 1,5 | 5,5 |
| 3 à 5 | 1,7 | 6 |
| 5 à 7 | 1,8 | 7 |

## 1.16 Soudage par étincelage

### Généralités

Soudage bout à bout, les pièces à assembler faisant électrodes sont accostées sous pression axiale provoquant la fusion des sections en contact, avec étincelage (fig. 2.58).
Les bouts à assembler, bruts de découpe, ont des aspérités provoquant un accostage progressif.
Au premier contact, les aspérités fondent sous la surcharge électrique, provoquant des cratères ; ce processus continue jusqu'au contact total des deux bouts à souder.
Les gaz dégagés chassent l'air ambiant, empêchant la contamination de la soudure.
Pression de contact.
Avant coupure du courant : amorce le soudage du métal en fusion.
Après coupure du courant, la pression axiale de forgeage (5 à 25 daN/mm$^2$) provoque la soudure des deux pièces avec une diminution de longueur (quelques mm).
Sections maximales soudées bout à bout : $\simeq$ 120 cm$^2$, de pièces en section et résistivité pouvant être différente.

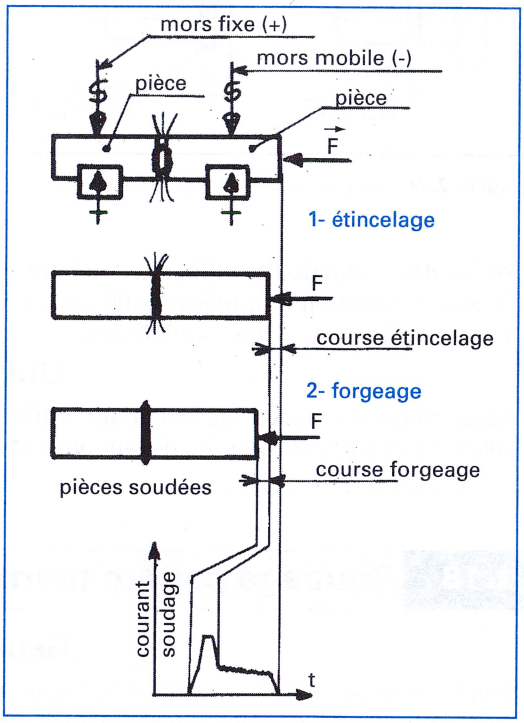



FIGURE 2.58 Cycle de soudage par étincelage.

### Utilisation

Assemblage de pièces axiles, généralement brut de découpe, en matériaux et sections identiques ou non.

## 1.17 Soudage par résistance-étincelage

### Généralités

Soudage bout à bout, les pièces faisant électrodes, avec alternance de chauffe par effet Joule et par étincelage, limitent la puissance électrique consommée (fig. 2.59).
Pièces de sections différentes. Éviter la formation de criques par :
– réduction plus grande section égale à plus petite section ; ou plus petite section maintenue dans le mors mobile (fig. 2.60).

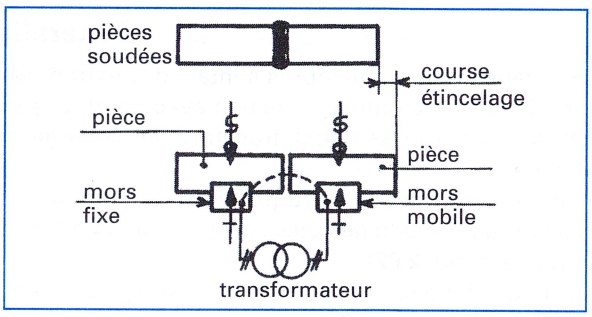



FIGURE 2.59 Schéma de zone de soudage par résistance-étincelage.

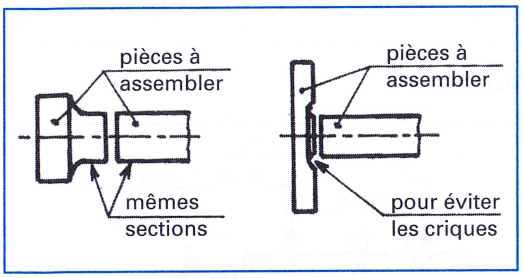



**FIGURE 2.60** Pièces à assembler par résistance-étincelage.

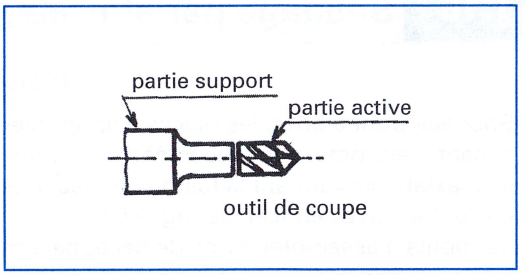



**FIGURE 2.61** Soudage de deux matériaux différents.

**Pièces de conductibilité différente.** Maintenir dans le mors mobile, la moins conductible. Sections maximales soudées : ≃ 60 $cm^2$, avec des intensités de 10 000 à 40 000 ampères et sous des efforts de 1 500 à 40 000 daN.

### Utilisation

Assemblage de pièces : de matériaux différents (aciers inoxydables, galvanisé, étamé, non alliés...) ; de forte section : ne devant pas subir de chocs thermiques (fig. 2.61).

## 1.18 Soudage par arc tournant

### Généralités

Soudage en bout, où les extrémités des deux pièces à assembler sont chauffées par un arc électrique qui se déplace circulairement autour de la surface de contact, avec un champ magnétique créé.
À l'état pâteux, les pièces sont soudées en forgeage, par une forte poussée axiale.

### Utilisation

Assemblage de pièces de matériaux différents (comme en soudage par friction).

## 1.19 Soudage par friction

### Généralités

Soudage en bout, où, après contact des extrémités de pièces à assembler, la température de soudage est obtenue par friction avec un mouvement de rotation (80 à 150 m/min) d'une des deux pièces (ou les deux), transformant l'énergie mécanique de frottement en énergie calorifique.
Une poussée axiale provoque la soudure par forgeage, après arrêt (brutal) de la rotation.
La longueur totale des pièces est réduite (4 à 5 mm), le refoulement provoquant un bourrelet circulaire (fig. 2.62).
Le bourrelet peut être éliminé par usinage sur la machine à souder (production de série).
**Temps de soudage.** Très rapide : 3 à 12 secondes, selon les matériaux, avec accostage (1 à 3 secondes) ; chauffe par friction (1 à 5 secondes) ; forgeage (1 à 4 secondes).

## Précisions obtenues

Les pièces étant maintenues efficacement: coaxialité 0,1 à 0,4 mm, indexation 0,5 à 0,10 degré.
Qualité de soudure : saine, sans inclusions, de caractéristiques mécaniques équivalentes aux pièces assemblées (pas de fusion de métal, grain affiné par forgeage).

## Matériaux soudables

La plupart des métaux et alliages métalliques.
Les deux pièces à assembler peuvent être de matériaux différents.
Pièces longues (câbles...) : Soudage avec une bague intermédiaire recevant le mouvement de rotation (fig. 2.63).

## Section des pièces

Sections de jonction cylindriques, pleines ou tubulaires.
Diamètres soudables de quelques mm à ≃ 200 mm.
Une des deux sections, au moins, sera cylindrique à la jonction.
Elles peuvent être différentes, mais il est préférable qu'elles soient identiques (par épaulement) (fig. 2.64).

## Utilisation

Assemblage de pièces avec position angulaire non nécessaire, soit: pièces en matériaux différents ne pouvant pas être soudés avec d'autres procédés (fig. 2.65). (Acier non allié/acier rapide, acier inoxydable/titane, aluminium/cuivre...) ; pièces très longues (câbles...) ; pièces tubulaires (tubes de forage...).

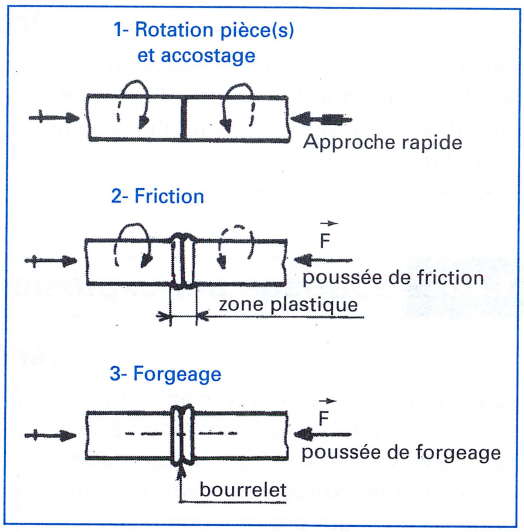



**FIGURE 2.62** Cycle de soudage par friction.

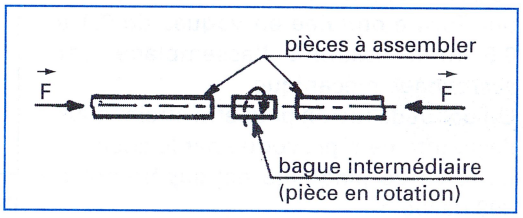



**FIGURE 2.63** Soudage de pièces longues.

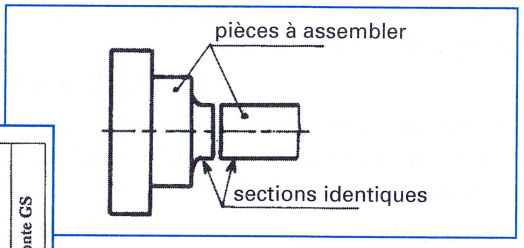



**FIGURE 2.64** Exemple de soudage de pièces de sections différentes.

| Soudabilité | Aciers alliés | Acier coulé | Acier inoxydable | Aciers spéciaux | Aluminium | Alliages d'aluminium | Laiton | Bronze | Cuivre | Cuivre - nickel | Invar | Fonte GS |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Aciers alliés | ▨ | ▨ | ▨ | ▨ | ▨ | ◪ | | ▨ | ▨ | | | ◪ |
| Acier coulé | ▨ | ▨ | ▨ | ▨ | | | | ◪ | | | | |
| Acier inoxydable | ▨ | ▨ | ▨ | ▨ | ▨ | ◪ | | | ▨ | ◪ | | |
| Aciers spéciaux | ▨ | ▨ | ▨ | ▨ | | | | | | | | |
| Aluminium | ▨ | | ▨ | | ▨ | ▨ | ▨ | | ▨ | | | |
| Alliages d'aluminium | ◪ | | ◪ | | ▨ | ▨ | | | | | ◪ | |
| Laiton | ◪ | ◪ | | | ▨ | ◪ | ◪ | | ◪ | | ◪ | |
| Bronze | ◪ | ◪ | | | | ◪ | | ◪ | | | | |
| Cuivre | ▨ | | | | ▨ | | ◪ | | | | | |
| Cuivre – nickel | | ◪ | ◪ | | | ◪ | | | | ▨ | | |
| Invar | | | | | | | ◪ | | | | | |
| Fonte GS | ◪ | ◪ | | | | | | | | | | ▨ |

▨ Bonne ◪ Assez bonne Difficile

**FIGURE 2.65**
Soudabilité par friction de différents matériaux.

## Machines

Les machines étant spécifiques, la production est effectuée en travail de série.
Machines de soudage inertiel. Réalisation de soudures à fibres orientées en spirale.
On utilise l'énergie cinétique d'un volant, avec arrêt naturel progressif de la rotation (volant d'inertie).

# 1.20 Soudage par explosion

## Généralités

Assemblage par une déformation plastique considérable qui se produit à l'interface des pièces, suite à la détonation d'une charge explosive provoquant une onde de choc qui projette une pièce sur l'autre (fig. 2.66).
La déformation plastique obtenue prend une forme ondulée en vagues de 0,1 à 0,5 mm, assurant l'assemblage par accrochage mécanique.
Un début de fusion peut être atteint sous l'échauffement provoqué par le choc.
La force de plaquage est supérieure à 300 daN/cm$^2$.

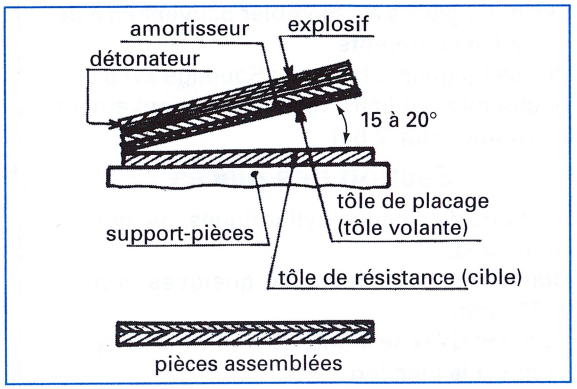



**Figure 2.66** Schéma de soudure par explosion de pièces plates.

### Explosif

Il peut être concentré au-dessus de la tôle à plaquer, ou constitué d'une feuille plastique d'explosif placée sur l'amortisseur.

## Qualité de l'assemblage

Elle dépend tout particulièrement de la vitesse de propagation de l'onde de choc : elle doit être suffisamment grande (exemple : supérieure à 225 m/s pour l'aluminium) et inférieure à la vitesse du son dans la cible.

## Pièces à assembler

Elles ne seront pas oxydées pour obtenir un assemblage sain.
La pièce à plaquer sur celle de base reçoit la charge explosive, protégée par un amortisseur en plastique, (manchon dans pièce tubulaire à plaquer ; plaque couvrant la surface de la pièce à plaquer).
Cette pièce, la tôle volante, est plane, généralement inclinée (15 à 25°) sur la pièce réceptive, la tôle de base.

## Utilisation

Assemblage de tôles, bi ou tri-métalliques : de grandes dimensions, en matériaux différents (obtention de conditions spécifiques d'utilisation : rigidité et anticorrosion avec aluminium/acier, etc.).
Assemblage de tubes sur des pièces métalliques en matériaux identiques ou différents avec rapidité ; zone non affectée thermiquement (fig. 2.67).

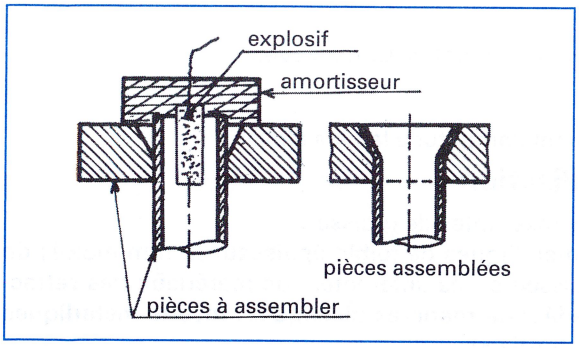



**FIGURE 2.67** Schéma de soudage de pièce plate avec pièce tubulaire.



# 1.21 Soudage par ultrasons

## Généralités

Assemblage par vibrations ultrasonores dans la zone de jonction des pièces à assembler, provoquant des frictions avec déformations plastiques localisées et interpénétration moléculaire (griffage intermoléculaire) (fig. 2.68).

L'énergie transmise par la pièce au contact de la sonotrode, à la pièce inférieure en appui sur l'enclume, se transforme en chaleur.

La température s'élève et provoque la liaison des deux pièces (analogie au soudage par friction).

La fréquence des ultrasons est égale ou supérieure à 20 000 hertz.

La transmission s'effectue à une vitesse variant avec la célérité du matériau.

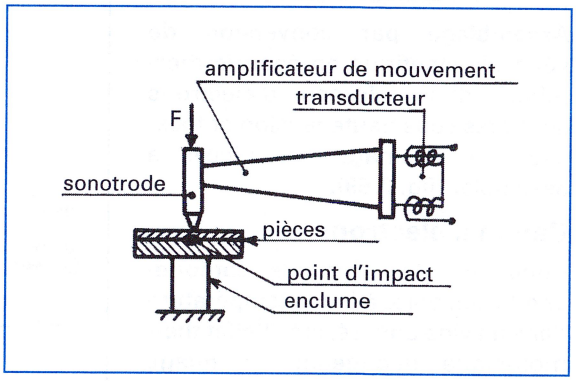



**FIGURE 2.68** Schéma simplifié de soudage par ultrasons.

Le ventre des vibrations se situe à l'interface des deux pièces à assembler, où s'engendre un système d'ondes stationnaires.

### Sonotrode

De forme adaptée aux pièces à souder, elle doit être à la même fréquence de résonance du système électro-acoustique.

### Enclume

Sur laquelle repose la pièce inférieure ; placée en opposition à la sonotrode, elle doit être massive pour agir en déflexion des ondes.

### Générateur haute fréquence

Permet au convertisseur électro-acoustique (transducteur et amplificateur) de fonctionner à amplitude constante.

Un supplément de puissance du générateur compense la diminution d'amplitude qui se crée au contact sonotrode/pièce.

### Transducteur

Du type piézo-électrique avec céramique ayant un point de Curie élevé.

### Amplificateur de mouvement

Généralement de forme bicylindrique, donnant l'amplitude la plus élevée.

### Utilisation

Les pièces à assembler doivent être propres (exemptes de graisse).
Assemblage : principalement des feuilles métalliques de faible épaisseur (2 mm maxi) ; de matériaux identiques ou différents et d'épaisseurs très différentes ; de matériaux très réfractaires, non soudables par les autres procédés ; de matières plastiques : inserts métalliques dans pièce en plastique (voir chapitre « Plasturgie »).

## 1.22 Soudage par faisceau d'électrons

### Généralités

Assemblage par conversion de l'énergie cinétique en énergie thermique d'un faisceau d'électrons accélérés sous haute tension et focalisés au voisinage des pièces à assembler (fig. 2.69).

### Canon à électrons

Constitué d'un système cathode-anode qui, porté à haute température dans un vide poussé, crée l'effet thermoïonique dégageant un nuage d'électrons.
Un vide secondaire de $10^{-5}$ torr est assuré dans l'émetteur (anode-wehnelt-cathode) ; dans la chambre de soudage régnera un vide de $10^{-2}$ à $10^{-5}$ torr (obtenu en quelques secondes).

### Effet thermoïonique

Provoque la vaporisation instantanée du matériau avec finition d'un trou capillaire qui se remplit du métal en fusion avec le déplacement du faisceau, produisant la soudure après solidification.
L'apport d'énergie étant plus rapide que son évacuation par conduction, de la matière se volatilisant est interceptée par le faisceau, créant un cratère tapissé de métal liquide.

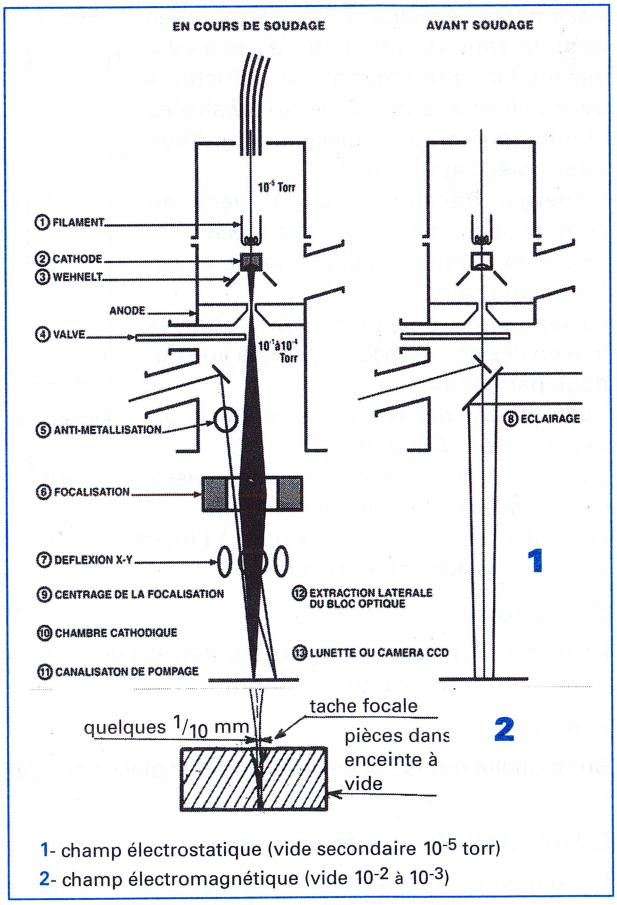



**FIGURE 2.69** Schéma de canon de soudage par faisceau d'électrons.
*Doc. TECHNÉTA*

La pénétration maximale est atteinte lorsque l'énergie du faisceau est absorbée par le plasma qui se forme dans le cratère.

### Cathode

En tantale-tungstène, chauffée indirectement (par effet Joule) ou directement.
Produit avec l'anode, le champ électrique accélérant les électrons qui sont précipités sur les pièces à souder par un trou situé dans l'anode.
Un wehnelt polarisé négativement conforme le champ électrique et accélère les électrons sortant de l'anode au positif.

### Faisceau d'électrons

Focalisé sur les pièces à souder par des lentilles magnétiques : produit une grande concentration de puissance et provoque la fusion des pièces à la zone d'impact.
Des bobines de déflexion, par champ magnétique, dirigent le faisceau et régulent la zone d'impact.
Le joint de soudage obtenu est fin : la visée est très précise (caméra, écran TV, etc.).

## Caractéristiques des soudures

De grande qualité (très saines), le soudage s'effectuant sous vide. Contraintes thermiques et déformations très réduites ; zone affectée thermiquement étroite (limite l'échauffement à la soudure).
Le joint présente un renflement à l'impact.

### Profondeur

Elle peut être importante et varie selon : la position du soudage ; la focalisation ; la vitesse de soudage (fig. 2.70).

### Soudage à plat

Pénétration maxi 150 mm : limite causée par le métal en fusion au fond du cratère (par son propre poids).

### Soudage en corniche

Pénétration maxi 500 mm : le métal en fusion n'est pas entraîné au fond du cratère par son propre poids.

### Focalisation

Étant maximale, avec augmentation de la puissance, la pénétration l'est également jusqu'à une limite (fig. 2.71).

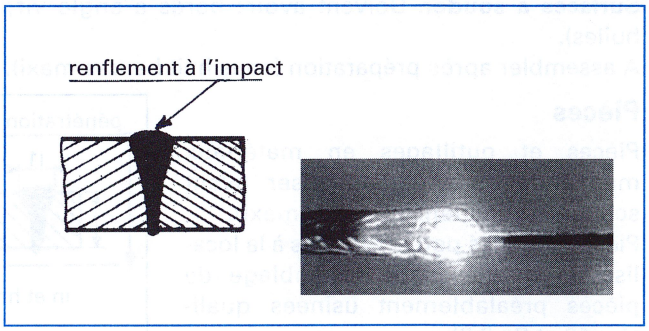



**FIGURE 2.70** Soudage par faisceau d'électrons.
*Doc. TECHNÉTA*

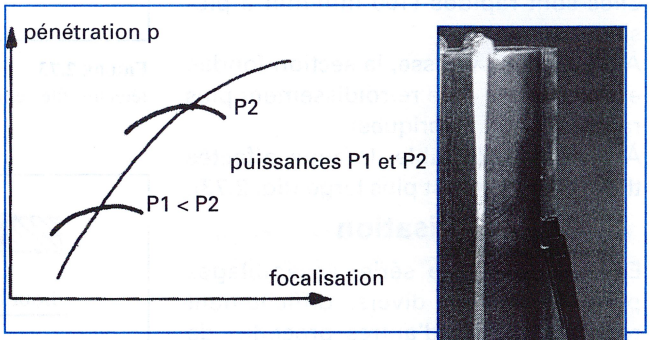



**FIGURE 2.71** Pénétration de la soudure suivant focalisation et puissance.
*Doc. TECHNÉTA*

### Vitesse de soudage

Diminuant, la pénétration tend vers une limite minimale (fig. 2.72).

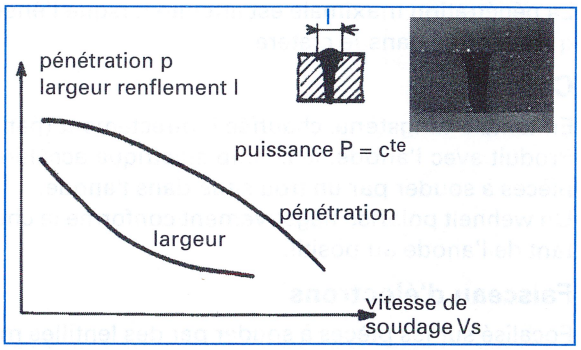



**FIGURE 2.72** Pénétration de la soudure suivant la vitesse de soudage. *Doc. TECHNÉTA*

## Matériaux soudables

La plupart des métaux et alliages.
Soudage en particulier: les alliages s'oxydant facilement; des matériaux réfractaires.

Alliages composés d'éléments volatils (fontes, zinc etc.) sont à écarter (inclusions gazeuses dans le joint): soudage avec canon à pulsations évitant sa pollution.

## Mise en œuvre

Soudage généralement en une passe, sans métal d'apport, en bord à bord, sans jeu de positionnement (0,5 mm maxi).
Un fil d'apport peut être amené pour remplissage d'un chanfrein.
**Passe de lissage.** Réalisée en défocalisant le faisceau: réduction de défauts de surface.
**Surfaces à souder.** Doivent avoir: bords à angle vif; exemption d'impuretés (oxydation, huiles).
À assembler après préparation (sous huit heures maxi).

### Pièces

Pièces et outillages en matériaux magnétiques: à démagnétiser avant soudage (rémanence 1 gauss maxi).
Pièces soudées peu déformées à la localisation du faisceau: assemblage de pièces préalablement usinées qualité ≃10 et Ra 3.2).

### Vitesses de soudage

Elles sont rapides (100 mm/min à plusieurs m/min).
À très grande vitesse, la section fondue est plus faible et le refroidissement plus rapide (risque de criques).
À vitesse trop faible, la zone affectée thermiquement est plus large (fig. 2.73).

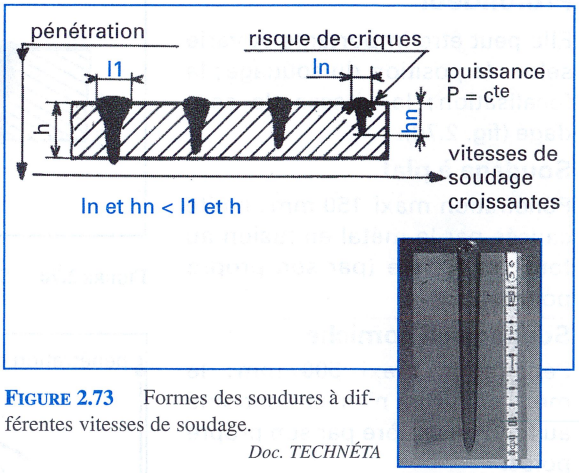



**FIGURE 2.73** Formes des soudures à différentes vitesses de soudage. *Doc. TECHNÉTA*

## Utilisation

En production de série, assemblages permanents très divers, difficilement réalisables avec d'autres procédés de soudage (fig. 2.74).

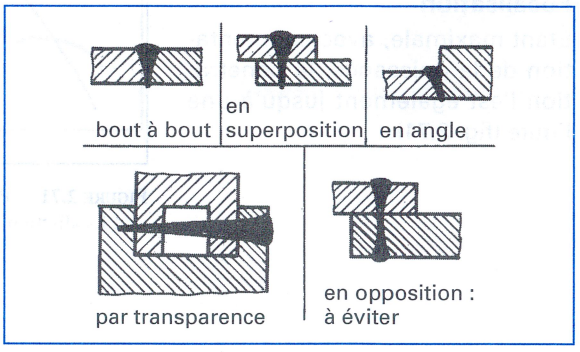



**FIGURE 2.74**
Différentes soudures produites par faisceau d'électrons.

## Machines

Unités de production, pour utilisation en grande série (électroménager, etc.) et de qualité maximale.
Elles comprennent: le canon à électrons, une enceinte de soudage sous vide où sont installées les pièces mobiles sous le faisceau.
Appareillage de vibrations du faisceau: pour effectuer éventuellement des soudures élargies.
Puissance des machines: jusqu'à 200 kW pour grosses unités de soudage.

## Sécurité

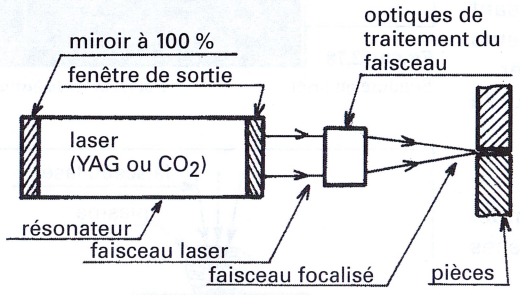
Nécessite des verres au plomb pour hublots de surveillance (protection des opérateurs contre les rayons X).



# 1.23 Soudage au laser

## Généralités

Focalisation d'un faisceau de lumière cohérente produisant une densité de puissance suffisante pour obtenir un bain de fusion et la jonction au refroidissement du bain, sans apport (fig. 2.75).



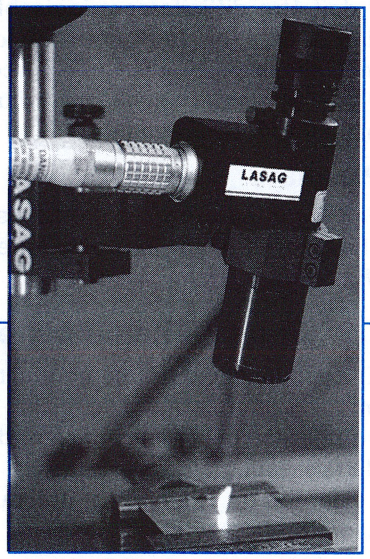




**FIGURE 2.75** Schéma de principe des lasers de soudage
*Doc. LASAG-Industrial-lasers*

Le faisceau laser est transmis dans l'atmosphère, à distance de plusieurs mètres sans être affaibli.
Il peut être dévié (par miroir ou fibre optique).
La focalisation dépend: de la longueur d'onde λ de la focale de la lentille f, du diamètre du faisceau D avant focalisation (fig. 2.76).

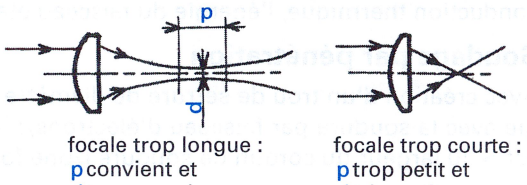



**FIGURE 2.76**
Focalisation du faisceau de lumière.

La lumière laser est réfléchie, en partie, par le matériau qui la reçoit ; le rayon, absorbé ou réfringent, produit la fusion.
Le taux d'absorption du matériau varie suivant : la longueur d'onde du faisceau ; la température du matériau (fig. 2.77).
Les forts gradients de température et de pression communiquent, sur une faible largeur : des transferts de chaleur aux pièces, engendrant la formation d'un étroit cordon de soudure.
La pression de vapeur dans la cavité produit un bourrelet superficiel sur le cordon (fig. 2.78).
La zone affectée thermiquement est réduite : peu de déformations et de contraintes résiduelles ; diminution de fissurations à froid.

| Matériaux | YAG | $CO_2$ |
|---|---|---|
| Aciers non alliés | 35 | 6 |
| Aluminium | 25 | 3 |
| Cuivre | 9 | 2 |
| Tungstène | 31 | 4 |
| Verre | 5 | 94 |
| Papier | 25 | 95 |

**FIGURE 2.77** Taux d'absorption de quelques matériaux.

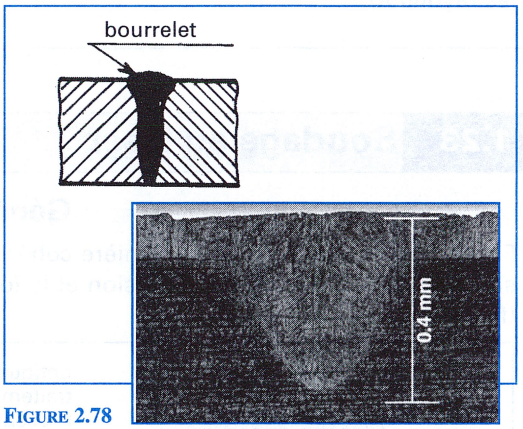



**FIGURE 2.78**
Soudure au laser. *Doc. LASAG-Industrial-lasers*

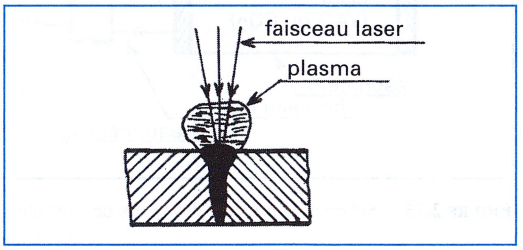



**FIGURE 2.79** Plasma localisant l'énergie.

## Gaz de protection

Argon ou hélium, il protège : le bain de la contamination, la lentille de la tête de soudage.
Il doit être difficilement ionisable, agissant dans la création du plasma avec des vapeurs métalliques produites par le faisceau laser.
Il peut également avoir une influence sur la pénétration du faisceau.

### Plasma

Fait écran autour du bain de fusion, empêchant toute l'énergie d'atteindre les pièces (fig. 2.79).

## Soudabilité du matériau

Elle est fonction de : sa conductibilité thermique, sa température de fusion, son opacité en phase vapeur ; le coefficient d'absorption du faisceau.
Le cordon de soudure est obtenu par conduction ou par pénétration en fonction de la puissance du faisceau laser.

### Soudage par conduction

Avec des puissances inférieures à 1 kW, la pénétration de chaleur dans les pièces se fait par conduction thermique, l'énergie du faisceau étant absorbée à la surface de la pièce.

### Soudage par pénétration

Avec création d'un trou de serrure de diamètre équivalent à celui du faisceau focalisé (analogie avec la soudure par faisceau d'électrons) : la profondeur de pénétration du faisceau laser est $\simeq$ 10 largeur du cordon de soudure (zone fondue) (fig. 2.80).

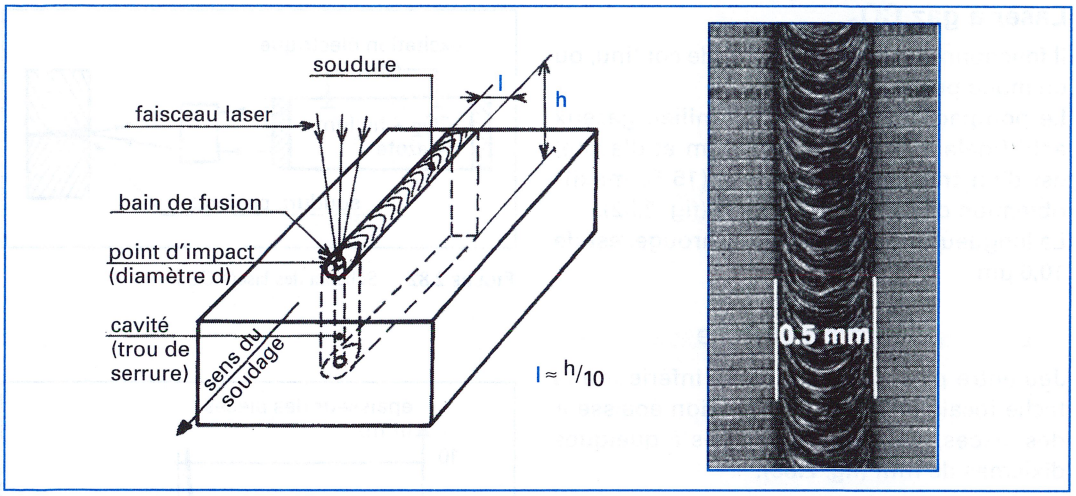



**FIGURE 2.80** Cordon de soudure au laser. *Photo. LASAG-Industrial-lasers*

## Matériaux soudables

Ceux assemblés par fusion, avec les caractéristiques de faisceau à haute densité d'énergie: aciers non et faiblement alliés, inoxydables, titane, alliage d'aluminium, de cuivre, etc.
Matériau ayant une certaine teneur en gaz dissous: risque de fissuration à chaud, la soudure pouvant être poreuse (le bain n'a pas suffisamment de temps pour totalement dégazer, la vitesse de refroidissement étant élevée).

## Lasers de soudage

De deux types: à solide YAG, à gaz $CO_2$.

### Laser à solide YAG

Il fonctionne en mode continu ou en mode pulsé avec un rendement de 5 % maxi.
La source laser irradie les pièces pour atteindre la température de fusion.
Le pompage optique du barreau YAG est obtenu par un flash de lumière blanche de forte puissance, émettant dans le proche d'infrarouge (la longueur d'onde est de 0,7 à 1,06 µm).
L'énergie fournie par impulsions est favorable au soudage par points (fig. 2.81).
La vitesse de passage du faisceau produit une faible épaisseur de cordon.

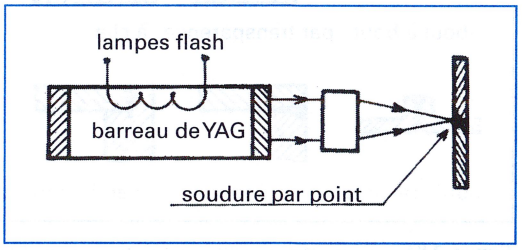



**FIGURE 2.81** Schéma des lasers YAG.

#### Mode continu

La puissance maximale est faible (environ 1 500 watts).

#### Mode pulsé

La puissance de crête peut atteindre jusqu'à 20 kW par excitation discontinue du milieu actif (fréquence des pulsations maxi 500 hertz).

## Laser à gaz $CO_2$

Il fonctionne en principe en mode continu, ou en mode pulsé.
Le pompage électrique d'un milieu gazeux actif (mélange de $CO_2$, d'hélium et d'azote) est d'un très bon rendement (15 % maxi) : obtention de fortes puissances (fig. 2.82).
La longueur d'onde, dans l'infrarouge, est de 10,6 µm.

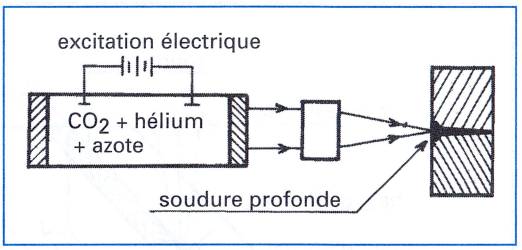



FIGURE 2.82 Schéma des lasers $CO_2$.

## Mise en œuvre

Jeu entre pièces à la jonction, inférieur à la tache focale (0,2 à 0,4 mm) : selon épaisseur des pièces, quelques centièmes à quelques dixièmes de mm (fig. 2.83).

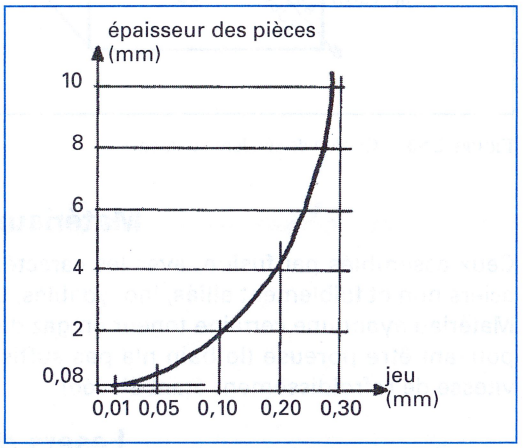
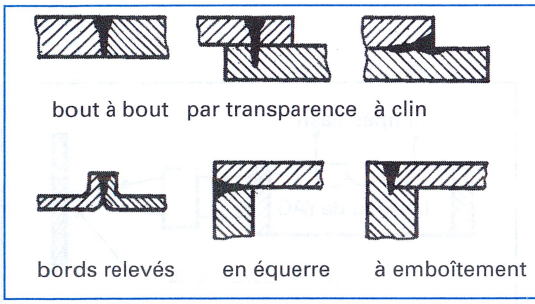



FIGURE 2.83 Jeux de soudage des pièces.

## Pièces

Exemptes de graisses et d'oxydes.
État de surface régulier pour conserver la même réflexion de la lumière laser.
Assemblage : de différentes méthodes (bord à bord, point à point) ; en toutes positions (faible largeur de la zone fondue et solidification rapide (fig. 2.84).



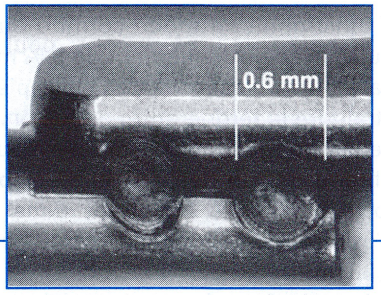




FIGURE 2.84 Différentes soudures par laser. *Photo LASAG-Industrial-*

## Vitesses de soudage

Elles sont rapides.
Laser $CO_2$ ≃ 40 m/min maxi, soudage en une passe jusqu'à 25 mm d'épaisseur avec 20 kW de puissance.
Laser YAG ≃ 400 mm/min maxi.

## Utilisation

Laser YAG pulsé. Assemblage permanent avec précision, de pièces de faible épaisseur (quelques dixièmes de mm à quelques mm) devant subir un minimum de contraintes.

Soudage en continu, bord à bord et point à point (énergie par impulsions).
Laser $CO_2$ continu. Assemblage permanent, à grande vitesse (et fortes puissances) de pièces épaisses, en continu, bord à bord et par transparence.

## Machines de soudage

Possibilité de dévier le rayon pour souder : à distance (quelques mètres) ; à des endroits peu accessibles ; en plusieurs endroits simultanément par division du faisceau.
Déviation du faisceau. Par miroir (laser $CO_2$) ou par fibre optique (laser YAG) (fig. 2.85).
**Opération annexe.** La découpe, en particulier, peut s'effectuer sur la machine.

## Sécurité

Le rayon laser est dangereux pour les yeux des opérateurs : lunettes de protection spécifiques impératives.

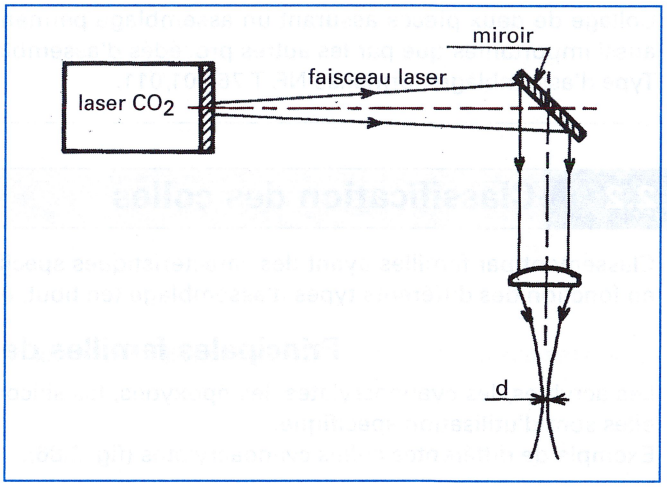



**FIGURE 2.85** Schéma de déviation du faisceau laser ($CO_2$).

# 2. Procédés d'assemblage par adhésion

## 2.1 Généralités

Collage de deux pièces assurant un assemblage permanent pouvant supporter des charges aussi importantes que par les autres procédés d'assemblage.
Type d'assemblage normalisé NF. T 76.001/011.

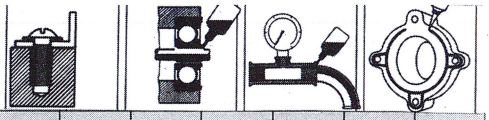
## 2.2 Classification des colles

Classement par familles ayant des caractéristiques spécifiques de performances d'adhésion, en fonction des différents types d'assemblage (en bout, en équerre...).

### Principales familles de colles

Les acrylites, les cyanoacrylates, les époxydes, les silicones: de caractéristiques différentes, elles sont d'utilisation spécifique.
Exemple de différentes colles cyanoacrylates (fig. 2.86).

Guide de sélection



| WEICON Contact / Matériaux | VA 20 | VA 8312 | VA 100 | VA 300 | VA 1500 | VA 2500 HT | VA 250 Black | Gel | VA 1460 | VM 20 | VM 120 | VM 2000 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Métal | + | + | ++ | + | + | + | + | + | + | ++ | ++ | ++ |
| Plastiques | ++ | ++ | ++ | ++ | ++ | ++ | ++ | + | ++ | + | + | + |
| Caoutchouc | ++ | ++ | ++ | + | ++ | ++ | ++ | + | ++ | + | + | + |
| Elastomères EPDM | + | ++ | + | + | + | + | + | | + | | | |
| Bois | | | + | ++ | + | + | + | + | | | | |
| Bois de balsa | + | + | + | + | + | + | + | ++ | | | | |
| Verre/Céramique | + | | ++ | ++ | + | + | + | ++ | + | | | |
| Cuir | | + | ++ | ++ | ++ | + | + | ++ | + | | | |

Approprié (+) Très approprié (++)
Dans le cadre des recommandations susmentionnées, il est possible de coller aussi d'autres combinaisons, p. ex. métaux sur caoutchouc et métaux sur matières plastiques.

| WEICON Contact liquide | VA 20 | VA 8312 | VA 100 | VA 300 | VA 1500 | VA 2500 HT | VA 250 Black | Gel | VA 1460 | VM 20 | VM 120 | VM 2000 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Types d'ester | éthyle | | | | | | | | alcooxy-éthyle | méthyle | | |
| Constitution | liquide incolore, VA 2500 HT opaque, VA 250 Black noir | | | | | | | | | | | |
| Propriétés | utilisé de préférence pour le collage de matières synthétiques et de caoutchouc | | | | | résistance aux hautes-températures, élasticité résiduelle | | gel, ne coule pas | presque inodore, sans efflorescence | utilisé de préférence pour coller les métaux | | |
| Viscosité à +20°C (mPa·s) Brookfield | < 20 | 20-40 | 60-120 | 200-300 | 1000-1500 | 2000-3000 | 2000-3000 | 60000-90000 | 120-200 | 20-40 | 100-130 | 1700-2000 |
| Poids volumique à +20°C (g/cm³) | 1,04 | 1,05 | 1,06 | 1,07 | 1,08 | 1,06 | 1,06 | 1,08 | 1,02 | 1,10 | 1,10 | 1,12 |
| Point éclair selon Abel-Pensky DIN 55213 en °C | 87 | | | | | | | | | | | |
| Adhérence initiale* en secondes sur aluminium [1] | 30-60 | 30-60 | 30-60 | 60-90 | 90-120 | 40-80 | 90-120 | 90-120 | 30-60 | 50-70 | 50-70 | 70-90 |
| sur caoutchouc d'essai NORA [2] | 2-15 | 2-10 | 3-20 | 2-10 | 5-30 | 25-50 | 20-40 | 20-30 | 10-60 | 10-80 | 10-60 | 10-90 |
| sur PVC rigide [3] | 5-60 | 5-30 | 10-60 | 10-60 | 10-120 | 25-100 | 40-80 | 40-80 | 20-150 | 30-120 | 30-120 | 30-150 |

*Déterminée à +23°C et 50% d'humidité de l'air. Dans les temps indiqués, une résistance de maniement peut être atteinte.

1) Aluminium, Type Al Cu Mg 2pl., non-prétraité
2) Caoutchouc d'essai Nora, poli
3) PVC rigide Trovidur® EN, non-prétraité

| WEICON Contact - durci | |
|---|---|
| Résistance à la température | tous types de -20°C à env. +80°C (à court terme -30°C à +100°C) -- VA 2500 HT et VA 250 Black à +135°C |
| Secteur de ramollissement en °C | 160-170 |
| Indice de réfraction $n^{D^{20}}$ | 1,49 (correspond au verre) / non-applicable pour les types VA 2500 HT et VA 250 Black |
| Résistivité spécifique selon DIN 53482* (Ωmm) | $> 10^{15}$ |
| Constante diélectrique $\varepsilon r$ à 1 MHz DIN 53483* | 5,4 |
| Rigidité diélectrique selon DIN 53481* (KV/mm) | 11-13 |
| Solubilité en | Formamide de diméthyle, oxyde sulfonique de diméthyle, nitrile d'acétone, alcalis. Le contact prolongé avec l'ester acétique, l'acétone et le chlorure de méthylène peut faire gonfler la colle durcie. |

* Suivant l'exemple de la norme DIN, mesurés sur joints collés

**FIGURE 2.86** Caractéristiques et sélection des colles cyanoacrylates Xeicon-contact.

*Doc. P.W. Weidling et Sohn, importateur SAFI*

### Résistance à la rupture en traction du joint

$\tau_0$(Mpa) = 0,6. $\tau_r$, avec $\tau_r$ = caractéristique de la colle utilisée.
Charge de rupture $F_{r0}$ admissible. Pour vérifier si elle est supérieure à la force à laquelle l'assemblage est soumis, soit: $F_{r0}(N) = \tau_{ro}. l_0. h$, avec h = largeur de l'assemblage.

## Adhésion par emmanchement

### Longueur de recouvrement

Assemblages cylindriques tube/tube ou cylindre (fig. 2.90), prendre $h = \pi D$, avec D (mm) = diamètre d'emmanchement.
Assemblages tube/tube ou cylindre, appliquer $l_0$ (mm) = $\pi D \tau_r / F$.

### Résistance à la torsion

Pour emmanchements cylindriques $Fr(N) = 2.M_c / D$, avec moment du couple $M_c$(mm).

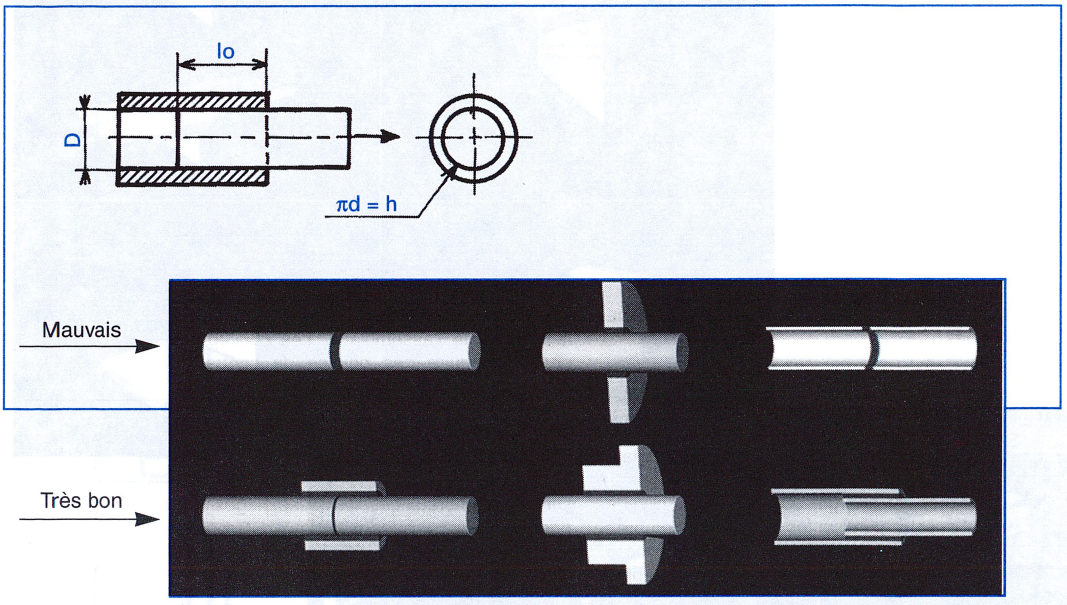



**FIGURE 2.90** Recouvrement par collage d'assemblages cylindriques. *Doc. Loctite*

## 2.6 Essais mécaniques

Le collage nécessite que des essais soient effectués pour vérifier si les contraintes d'utilisation sont respectées.
Les essais mécaniques permettent de vérifier les limites des assemblages par adhésion, en fonction des sollicitations d'utilisation, soit: traction, compression, cisaillement, pelage, clivage.
Également température maxi et mini admises, cohésion (fig. 2.91).
Éventuellement résistances aux chocs et aux solvants.

| | |
|---|---|
| | Traction σ(MPa) = charge à la rupture / surface du joint |
| | Compression σ(N/mm²) = limité à 450 N/mm² |
| à recouvrement simple | Cisaillement τ(N/mm²) = charge à la rupture / surface du joint |
| à recouvrement double | |

| | |
|---|---|
| | Clivage Q(N/mm²) = charge à la rupture / largeur du joint |
| en té | Pelage R(N/mm²) = charge à la rupture / largeur du joint |
| à 180° | |
| | Choc W(j/cm²) = énergie absorbée / surface du joint |
| de -60° C à +250° C | Température θ (° C) |

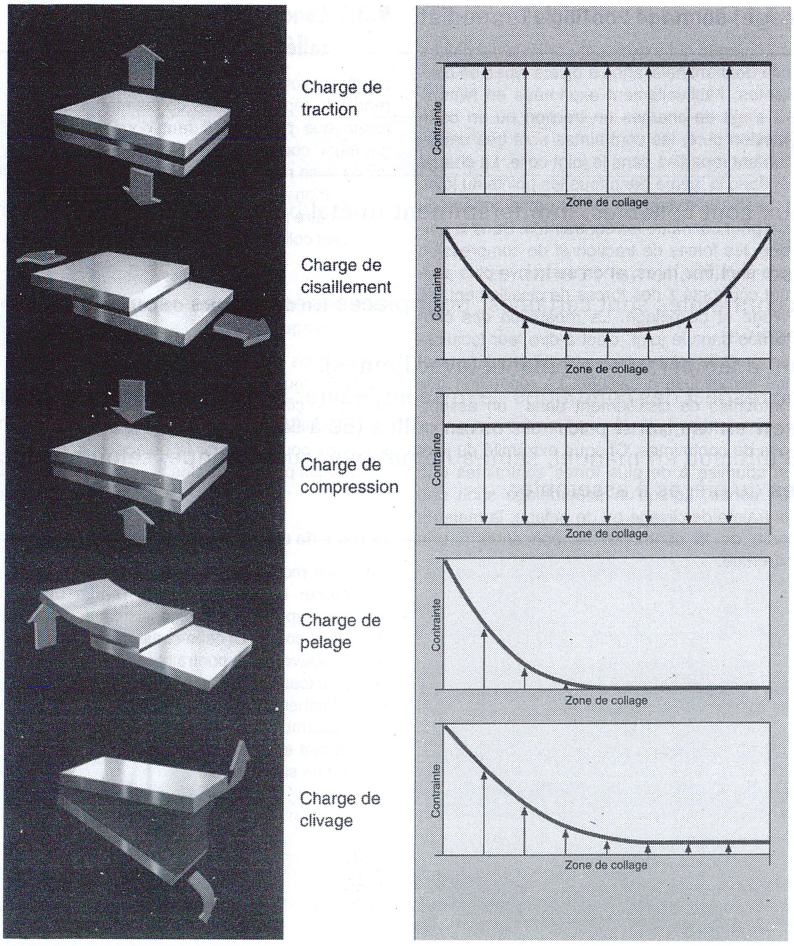



**FIGURE 2.91**
Essais mécaniques des assemblages par collage et charges les plus courantes avec répartition des contraintes résultantes dans le joint collé. *Doc. Loctite*

## 2.7 Mise en œuvre

**Surfaces à encoller.** Impérativement décontaminées (oxydation, graisse...) pour assurer le mouillage.
**Encollage.** Immédiatement après nettoyage (éviter humidité, poussière...).
Avec dégraissage par produit chimique: collage instantanément après ou application d'une couche de primaire.

### Aciers

D'après Topfix: dégraissage au trichloréthylène, sablage ou grenaillage, nettoyage au trichloréthylène; collage après évaporation.
Ou dégraissage au trichloréthylène, trempe au bain d'acide sulfurique additionné de bichromate de soude (4 %), double rinçage à l'eau bouillante et à l'eau déminéralisée; collage après séchage.

### Alliages d'aluminium

D'après Framusi: dégraissage au trichloréthylène, sablage, dépoussiérage, collage.
Ou dégraissage au trichloréthylène, lessivage (avec une solution spécifique), séchage; collage.

### Alliages de cuivre

Dégraissage au trichloréthylène, lessivage avec une solution spécifique (chlorure ferrique, acide nitrique, eau), rinçage, séchage; collage immédiat.

## 2.8 Utilisation

La plupart des matériaux sont collables, indifféremment (métal/bois, métal/plastique...) et d'épaisseurs quelconques.
Les aciers inoxydables sont difficilement collables.
Collage à utiliser: si les contraintes sont certaines; pour pièces mécaniques «sous-utilisées», à durée de vie non excessive.
À effectuer généralement à température ambiante (avec limites).
**Cohésion.** Optimale avec respect des conditions de mise en œuvre: temps, température, pression de contact; durcissement à chaud pour certaines colles (50 à 60 °C).
**Opération de collage.** S'effectue en manuel, semi-automatique, automatique, selon production-productivité et types de pièces à assembler.

# 3. Assemblage par rivetage et sertissage

## 3.1 Rivetage-sertissage par mouvements combinés

**Fluage** radial de la matière sous un mouvement de frappe rectiligne - alternatif, sans rotation du poinçon (la bouterolle) incliné de quelques degrés et animé simultanément d'une trajectoire circulaire ou en rosette.

### Fluage orbital

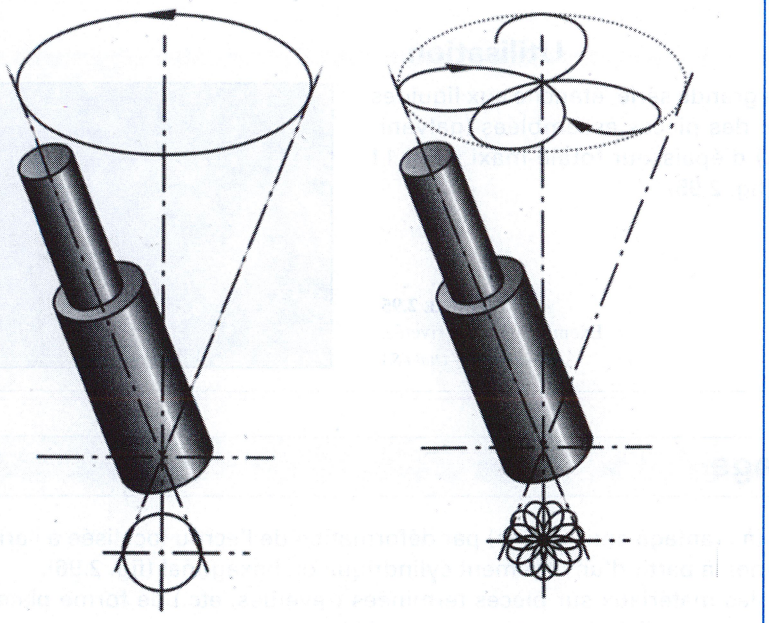
La bouterolle tourne orbitalement (à vitesse rapide) dans son cône d'action (fig. 2.92a).

### fluage en rosette

La bouterolle décrit (à vitesse lente) dans son cône d'action, les mouvements en rosette produisant des assemblages de diverses formes (circulaire, carrée...) (fig. 2.92b).

### Utilisation

Rivetage et sertissage unitaire à grande série sur pièces pleines ou creuses, picots et soyages, de sections diverses.



a. Rivetage orbital

b. Rivetage en rosette

**FIGURE 2.92**
Principes de rivetage
*Doc. Guillemin SA*

## 3.2 Rivetage par autopoinçonnage

Assemblage de pièces minces (tôles) avec rivet inséte sans préperçage, à l'aide d'un outillage standard poinçon-matrice (fig. 2.93).
**Le rivet autopoinçonneur,** de forme adaptée à la matrice, s'évase dans la pièce inférieure (sans la percér) après avoir traversé la ou les pièces supérieures (fig. 2.94).
**L'outillage** de rivetage (vérin) peut êre équipé d'un presse-flan : assemblage tôles fines.

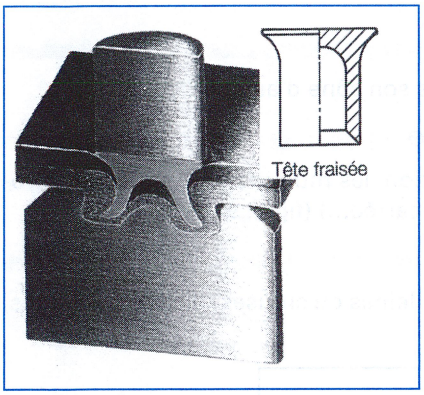



**FIGURE 2.93** Schéma de principe de l'autopoinçonnage
*Doc. Bollhoff-Otalu SA*

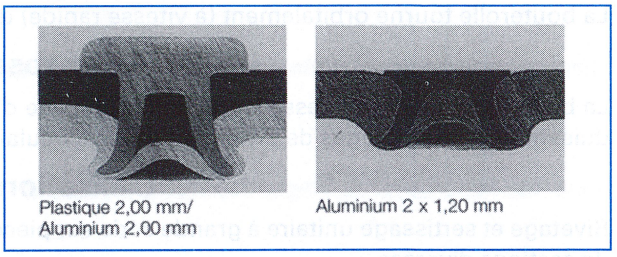



**FIGURE 2.94** Exemples de rivetage
*Doc. Bollhoff-Otalu SA*

### Utilisation

Assemblage unitaire à grande série, étanche aux liquides et gaz, sans altération des pièces assemblées (galvanisées, prélaquées, etc.) d'épaisseur totale maxi 6,5 à 11 mm selon matériaux (fig. 2.95).

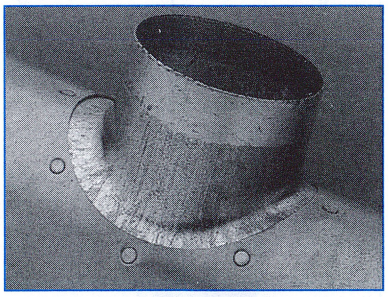


**FIGURE 2.95**
Exemple de pièce rivetée.
*Doc. Bollhoff-Otalu SA*

## 3.3 Sertissage

**Assemblage** d'écrous (à crantage antirotation) par déformation de l'écrou localisée à l'arrière de la pièce (zone borgne), à partir d'un logement cylindrique ou hexagonal (fig. 2.96).
**Utilisation.** Dans tous les matériaux sur pièces terminées (revêtues, etc.) de forme plate, en caisson, profilée, avec accessibilité d'un coté, pour vis M10 maxi.

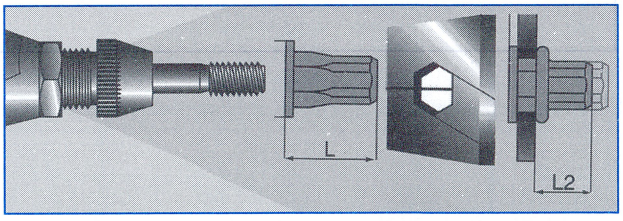



**FIGURE 2.96** Sertissage d'un écrou noyé
*Bollhoff-Otalu SA , (écrou RIVKLE plus)*

# 3 PROCÉDÉS DE BROCHAGE




1. Généralités ..... 85
   - 1.1 Mode d'action ..... 85
   - 1.2 Brochage d'intérieur ..... 85
   - 1.3 Brochage d'extérieur ..... 86

2. Outils de brochage ..... 86
   - 2.1 Broches d'intérieur ..... 86
   - 2.2 Broches d'extérieur ..... 88
   - 2.3 Denture ..... 88
   - 2.4 Angles de coupe ..... 90
   - 2.5 Efforts de coupe ..... 91
   - 2.6 Précisions obtenues ..... 92

3. Conditions de coupe ..... 92
   - 3.1 Vitesses de coupe ..... 92
   - 3.2 Épaisseur du copeau ou progression ..... 92
   - 3.3 Lubrification ..... 92

4. Mise en œuvre ..... 93
   - 4.1 Forme des ébauches ..... 93
   - 4.2 Réduction d'usure des dents ..... 95
   - 4.3 Autres conditions d'usinage ..... 95

5. Porte-pièce ..... 96
   - 5.1 Brochage d'intérieur ..... 96
   - 5.2 Brochage d'extérieur ..... 96

6. Machines ..... 97
   - 6.1 Mouvement de coupe ..... 97
   - 6.2 Brochage circulaire ..... 98

7. Utilisation ..... 98

8. Rainurage ..... 99
   - 8.1 Utilisation ..... 99

# 3 PROJETS DE BROCHAGE

# 1. Généralités

Le brochage consiste à usiner simultanément, avec rapidité et précision, des surfaces parallèles, débouchantes et à directrices rectilignes ou hélicoïdales de formes intérieures et extérieures non limitées par un épaulement.
Les broches, outils de forme, sont constituées d'une série de dents travaillant successivement. Chaque dent a son arête de coupe décalée de la précédente d'une distance de l'épaisseur du copeau (la progression) (fig. 3.1).

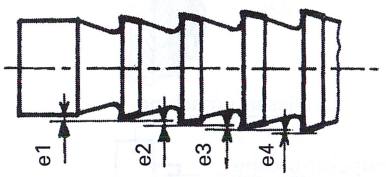



**FIGURE 3.1** Progression des dents de broche.



## 1.1 Mode d'action

L'ensemble des dents génère le profil fini à partir du profil brut, par le passage de la broche, au travers de la pièce (brochage d'intérieur) ou devant la pièce (brochage d'extérieur) suivant le mouvement de coupe rectiligne (il n'y a pas de mouvement d'avance, la profondeur de passe est donnée par la progression).

## 1.2 Brochage d'intérieur

Le brochage s'effectue par le passage de broche dans le trou d'ébauche.
La broche de type axile est attelée à la brocheuse par la tête de traction. L'effort de coupe plaque et maintient la pièce sur son appui perpendiculaire au mouvement de coupe (fig.3.2). La fixation de la pièce n'est généralement pas nécessaire.

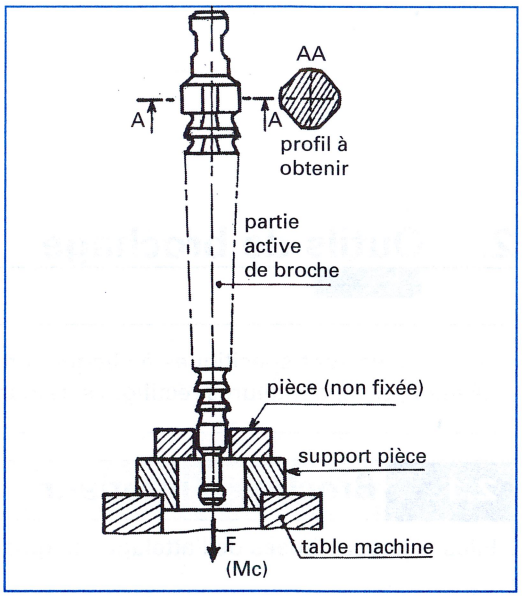



**FIGURE 3.2**
Schéma de brochage d'intérieur.

## 1.3 Brochage d'extérieur

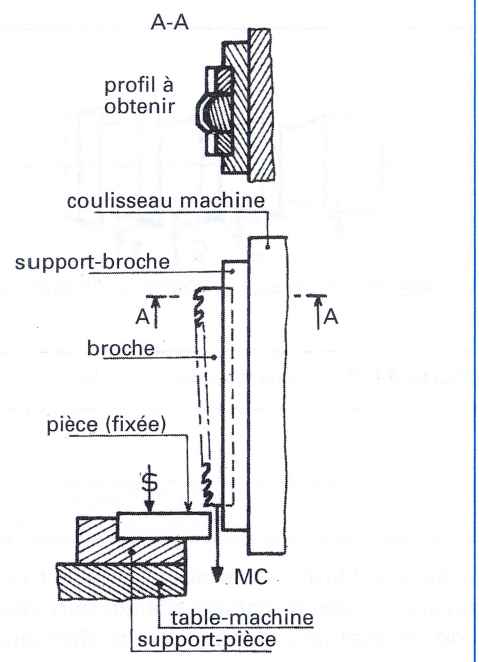



FIGURE 3.3 Schéma de brochage d'extérieur.

La broche, de type prismatique, est fixée au coulisseau de la machine (fig. 3.3).
Le brochage s'effectue généralement à partir de l'ébauche du profil brut (de forgeage, moulage, etc.).
Il est simultané pour un groupe de formes associées sur une pièce ou une grappe de petites pièces (fig. 3.4).
La ou les pièces sont à maintenir efficacement pour s'opposer à la poussée latérale.

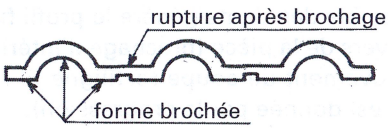



FIGURE 3.4 Schéma de pièces coulées en grappe pour brochage simultané d'extérieur.

# 2. Outils de brochage

Les broches sont spécifiques à chaque forme à obtenir (cannelures à flancs parallèles et en développante, dentelures rectilignes, rainures de clavetage...).

## 2.1 Broches d'intérieur

Elles sont constituées de l'attelage, du guide, de la denture, de la queue (fig. 3.5).

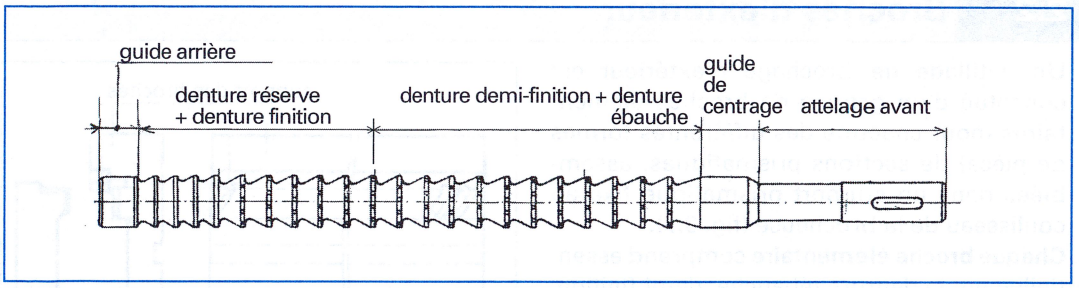



**FIGURE 3.5** Conception de broches d'intérieur.

## Attelage

De différentes formes, à accrochage manuel ou automatique, de dimensions permettant son passage dans le trou d'ébauche de la pièce (fig. 3.5 et 3.6).

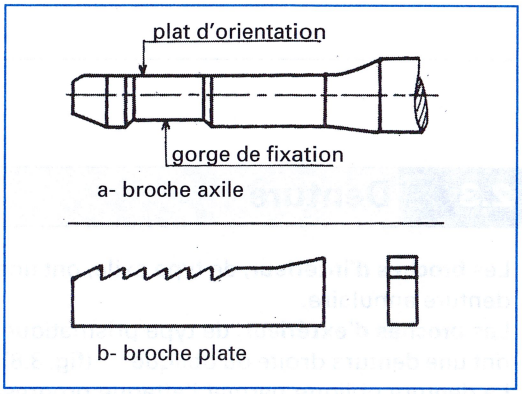



**FIGURE 3.6** Schémas d'attelages des broches.

## Guide

Assure la mise en position broche/pièce ; son diamètre est inférieur, avec jeu fonctionnel, au trou d'ébauche.

## Queue

Permet d'assurer le maintien arrière de la broche en fabrication, affûtage, manutention, stockage.

## Denture

Progression de dents, à partir d'une forme cylindrique de départ qui progresse jusqu'à la forme finale du profil à obtenir.
Comprend des dents d'ébauche, de demi-finition, de finition et de réserve fig. 3.5).

## Les dents

Sont taillées dans le corps (outil en ARS) ou rapportées (outils en carbure) sur un corps en acier.
**Dents d'ébauche.** Les arêtes de coupe, pouvant comprendre des brise-copeaux, ébauchent la forme à obtenir.
**Dents de demi-finition.** Elles profilent la forme désirée.
**Dents de finition.** D'un nombre réduit à quelques dents, elles calibrent la forme au profil final.
**Dents de réserve.** Généralement au nombre de cinq, elles sont de la forme du profil final, augmentant la durée de vie des broches, après des affûtages successifs.

## 2.2 Broches d'extérieur

Un outillage de brochage d'extérieur est constitué d'un groupe de broches élémentaires (pour chacune des différentes formes de pièce) de sections prismatiques, assemblées dans un support prismatique fixé au coulisseau de la brocheuse (fig. 3.7).
**Chaque broche élémentaire** comprend essentiellement la denture (ébauche, demi-finition, finition, réserve), conçue comme les broches d'intérieur.

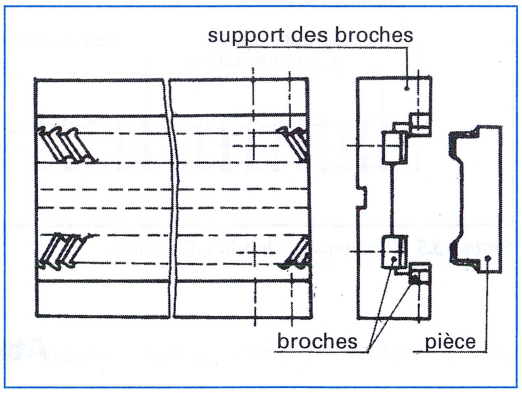



FIGURE 3.7 Schéma de conception de broches d'intérieur.

## 2.3 Denture

Les **broches d'intérieur**, de type axile, ont une denture annulaire.
Les **broches d'extérieur**, de type prismatique, ont une denture droite ou oblique (fig. 3.8).
La denture oblique permet l'attaque progressive dans la matière, réduisant les risques de rupture de dents.

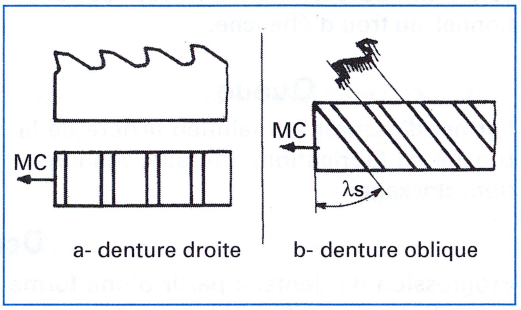



FIGURE 3.8 Schéma de dentures de broches d'extérieur.

### Nombre de dents d'une broche

Il est fonction de la surépaisseur totale d'usinage et des épaisseurs de copeaux (profondeurs de passe).
Pour chaque opération (ébauche, demi-finition, finition) on a *n* dents = surépaisseur d'usinage de l'opération/épaisseur du copeau.
On considère, selon la surépaisseur totale d'usinage :
**Finition.** 2 à 10 dents, pour une surépaisseur d'usinage de 0,05 à 0,1 mm.
**Demi-finition.** 5 à 15 dents, pour une surépaisseur d'usinage de 0,2 à 0,4 mm.
**Ébauche.** Le nombre de dents est à déterminer en fonction de la surépaisseur restante, (totale, moins demi-finition et finition) jusqu'au maximum limité par la longueur de broche admise (course de la machine).

*Nota :* pour une denture nécessitant une longueur supérieure à la course-machine, envisager deux broches, ou une modification éventuelle de la pièce.

## Pas de la denture

C'est la distance entre deux arêtes de coupe consécutives. On admet ce pas P en fonction de la longueur à brocher L, avec P = 0.4 L pour L ≤ 16 mm et 1.75 $\sqrt{L}$ pour L > 16 mm.

## Inter-dents

Ils doivent permettre de loger les copeaux produits durant le passage de chaque dent dans la longueur brochée (les copeaux s'évacuent après le contact dent/pièce (fig. 3.9).

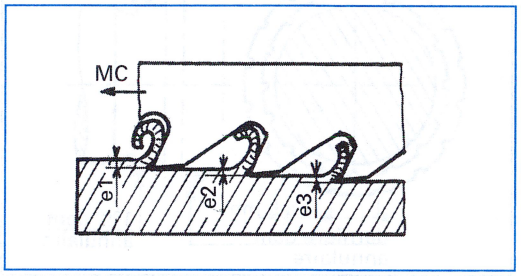



**FIGURE 3.9** Logement de copeaux inter-dents.

### Section inter-dents

Elle est définie par (fig.3.10) :

La hauteur du logement *h* = P/3 ; l'angle de contre-dépouille (α' = 30° à 50° ; le rayon de raccordement contre-dépouille/face de coupe suivante *r* = P/5.

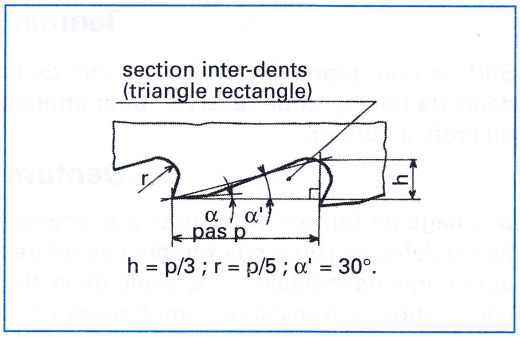



**FIGURE 3.10** Section d'inter-dents.

### Dents d'ébauche

Vérifier la capacité du logement de copeaux par rapport au volume de copeaux produits pour une dent (assimiler la section de l'inter-dents à un triangle rectangle).

Volume de l'inter-dents Vi : on admet Vi ≥ 3 volumes de copeaux.

### Logement de copeaux

Si insuffisant ou hauteur h trop grande (réduisant excessivement la section du noyau de broche) : adopter une denture allongée (fig. 3.11).

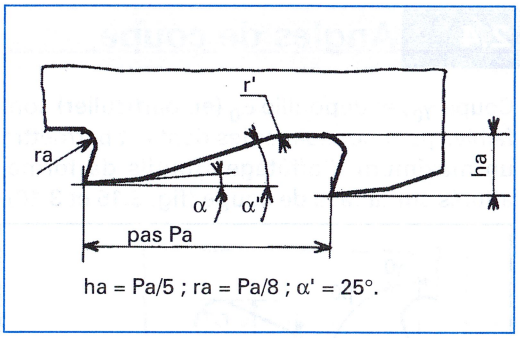



**FIGURE 3.11** Section d'inter-dents allongé.

## Denture à pas variable

Avec accroissement de 0,1 à 1 mm par dent d'une fréquence de 3 à 5 dents, pour éviter le broutement.

## Brise-copeaux

Sur les dents d'ébauche et de demi-finition, ils sont obtenus par des rainures sur les faces de dépouille (fig. 3.12 et 3.13).

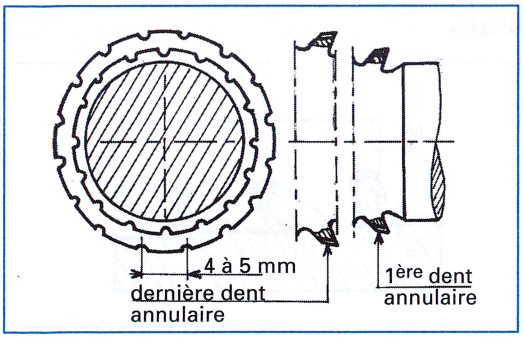



**Figure 3.12** Brise-copeaux sur dents d'ébauche, broche cylindrique.

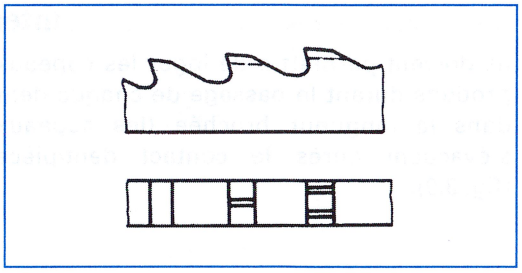


**Figure 3.13** Brise-copeaux sur dents d'ébauche (alternance des dents).

## Témoin d'affûtage

Surface non dépouillée de 0,1 à 1 mm de large. À concevoir sur les faces de dépouille des dents de finition et de réserve : pour affûtages successifs tout en conservant les dimensions du profil à obtenir.

## Denture hélicoïdale

Brochage de formes intérieures à directrices hélicoïdales (écrou à pas rapide, cannelures et rainures hélicoïdales...) d'angle maxi 45°, par rotation et translation simultanées de la broche (fig. 3.14).

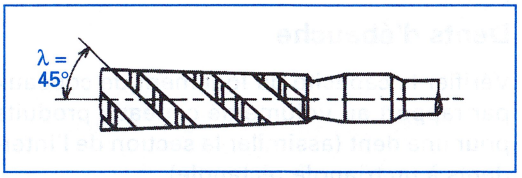



**Figure 3.14** Schéma de broche à denture hélicoïdale.

# 2.4 Angles de coupe

Coupe $\gamma_0$, et dépouille $\alpha_0$ (en particulier) sont faibles pour consolider les dents et permettre un maximum d'affûtages (outils de forme, affûtés sur la face de coupe (fig. 3.15 et 3.16).

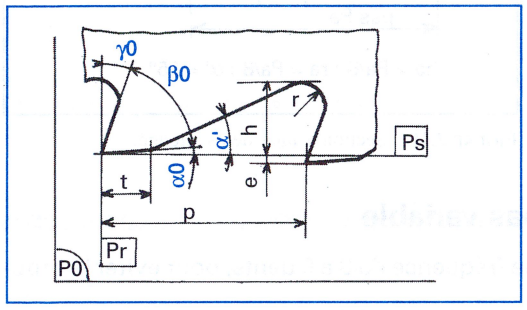


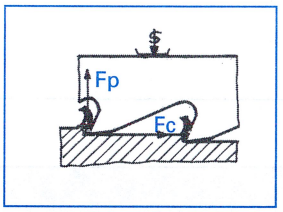

**Figure 3.15** Angles de coupe caractéristiques des dents de broche.

| Matériaux | Dépouille $\alpha_0$ | | | Coupe $\gamma_0$ |
|---|---|---|---|---|
| | Ébauche | 1/2 finition | Finition et réserve | |
| Fontes et aciers | 3° à 1°30 | 0°30 à 1° | 0° à 1° | Aciers : 10° à 20° Fontes : 5° à 15° |
| Alliages légers | 3° à 5 ° | 1° à 3° | 0° à 3° | 15° à 25° |
| Laitons et bronzes | 0° à 1° | 0° à 1° | 0°30 à 0° | 0° à 10° |

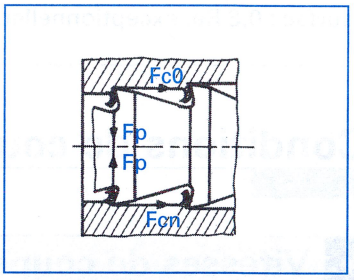
**Figure 3.16** Ordre de grandeur des angles de coupe $\gamma_0$ et de dépouille des dents de broche.

## 2.5 Efforts de coupe

Efforts appliqués sur l'outil (fig. 3.17), pour une dent.




*a – Broche plate*




*b – Broche cylindrique*

**FIGURE 3.17** Efforts de coupe appliqués sur une dent de broche.

### Effort de refoulement, ou effort de pénétration Fp

Il s'équilibre sur la dent opposée (broche d'intérieur) ou sur son support (broche d'extérieur).

### Effort tangentiel, ou effort de coupe Fc

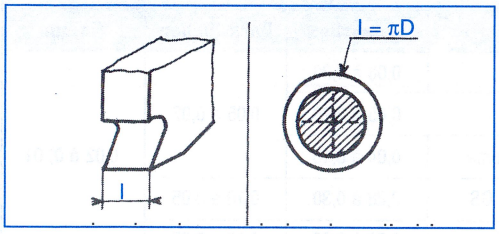
$$Fc = S \cdot K_a \cdot z$$

avec

S ($mm^2$) = section du copeau en ébauche (largeur brochée $l$ × progression $e$) ;

$z$ = nombre de dents en travail simultanément ;

$K_a$ = pression spécifique de coupe daN/$mm^2$ (fig. 3.18).




*a – Broche plate* *b – Broche cylindrique*

| Matériaux | $K_a$ daN / $mm^2$ | | |
|---|---|---|---|
| | e < 0,1 | e = 0,1 à 0,25 | e ≥ 0,3 |
| Aciers R < 90 | 360 | 260 | 190 |
| Aciers R ≥ 90 | 470 | 360 | 250 |
| Aciers au chrome | 520 | 380 | 270 |
| Fontes grises, GS | 300 | 200 | 150 |
| Bronzes | 340 | 240 | 180 |
| Laiton | 160 | 110 | 80 |
| Alliages d'aluminium | 140 | 100 | 70 |

**FIGURE 3.18** Pressions spécifiques de coupe en brochage (ordre de grandeur) et définition de $l$.

### Vérification rigidité de la broche

L'effort de traction de la brocheuse Ft, doit être suffisant. Il faut Ft > Fc.
La section minimale du noyau de broche Sn doit supporter, sans se rompre, l'effort de traction. Il faut Ft < Rp. Sn, avec Rp = Résistance pratique ou charge unitaire (≃16 daN / $mm^2$).

*Nota :* L'effort maximal de traction admissible est gravé sur chaque broche.

### Puissance utile de brochage

$Pu_w$ = Fc . Vc / 60, avec Vc = m/min.

## 2.6 Précisions obtenues

Dimensionnelle : qualité 6, exceptionnellement 5.
État de surfac : 0,8 Ra, exceptionnellement 0,4 Ra.

# 3. Conditions de coupe

## 3.1 Vitesses de coupe

Elles sont faibles pour éviter une rupture et une usure prématurée des dents de la broche. Selon les matériaux à brocher, elles varient de 2 à 50 m/min, la meilleure durée de vie d'outil étant recherchée (fig. 3.19).
Le temps d'usinage est court, la forme à obtenir étant réalisée durant la course aller de la broche (longueur maxi environ 1,50 m).
Les vitesses de retour de broche sont de 10 à 50 m/min.

| Matériaux | Broches | |
|---|---|---|
| | Acier rapide | Carbure |
| Aciers R < 90 | 2 à 12 | 12 à 50 |
| Aciers R ≥ 90 | 2 à 8 | 8 à 40 |
| Aciers au chrome | 2 à 6 | 6 à 30 |
| Fontes grises, GS | 2 à 10 | 10 à 30 |
| Alliages d'aluminium | 5 à 15 | 15 à 50 |
| Bronzes - Laitons | 3 à 8 | 8 à 30 |
| $V_c$. Selon complexité du profil et longueur à brocher. | | |

FIGURE 3.19 Vitesses de coupe recommandées en brochage.

## 3.2 Épaisseur du copeau ou progression

C'est la différence dimensionnelle entre deux dents consécutives. Elle est de 0,01 à 0,5 mm, en fonction de chaque opération (ébauche, demi-finition, finition) et du matériau à usiner (fig. 3.20).
La progression sera constante pour l'ensemble des dents d'une broche devant effectuer essentiellement une opération de finition.

| Matériaux | Épaisseur du copeau *e* | | |
|---|---|---|---|
| | Ébauche | Demi-finition | Finition |
| Aciers R < 90 | 0,08 à 0,30 | 0,05 à 0,02 | 0,02 à 0, 01 |
| Aciers R ≥ 90 | 0,05 à 0,20 | | |
| Aciers au chrome | 0,04 à 0,15 | | |
| Fontes grises, GS | 0,08 à 0,30 | 0,10 à 0,05 | |
| Bronzes – Laitons | 0,08 à 0,20 | 0,20 à 0,05 | |
| Alliages d'aluminium | 0,10 à 0,40 | 0,20 à 0,08 | 0,05 à 0,02 |

FIGURE 3.20 Épaisseurs de copeaux recommandées en brochage.

## 3.3 Lubrification

Elle doit être abondante, avec une huile de coupe entière, visqueuse, adhérente, fortement anti-soudure et anti-usure : elle doit assurer au maximum la protection des arêtes de coupe et l'obtention d'un état de surface de qualité.
Brochage de formes longues : l'huile de coupe soluble assure l'évacuation des calories.

# 4. Mise en œuvre

## 4.1 Forme des ébauches

### Face d'appui de la pièce

Elle doit être perpendiculaire au mouvement de coupe.
À usiner avant brochage pour assurer un appui plan.

### Formes de section cylindrique (alésages débouchants)

Les ébauches sont obtenues à partir d'un trou qui sera :

#### Cas général

Obtenu par perçage, moulage de précision, calibrage en forgeage.

#### Grande série

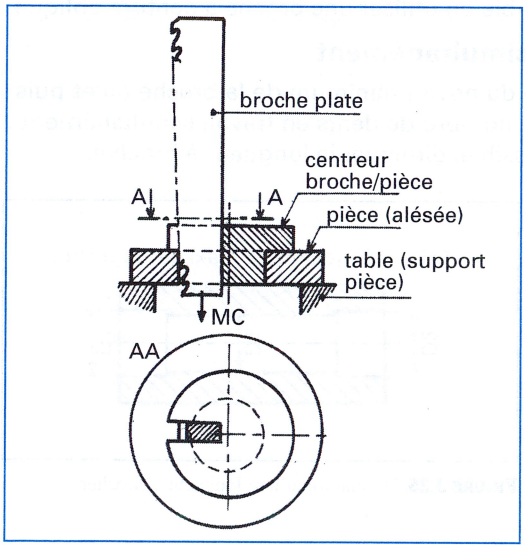
À partir d'un trou moulé ou forgé, les broches utilisées auront des dents d'ébauche de section polygonale (hexagonale...), décalées angulairement les unes des autres.
(fig. 3.21).

#### Petite série

Trou alésé à une cote de demi-finition avant brochage (finition) avec une broche à denture essentiellement de finition et de réserve.

#### Matériaux non ferreux, ductiles

Obtention des alésages de précision avec une broche comportant des dents de calibrage (travaillant par refoulement) (fig. 3.22).



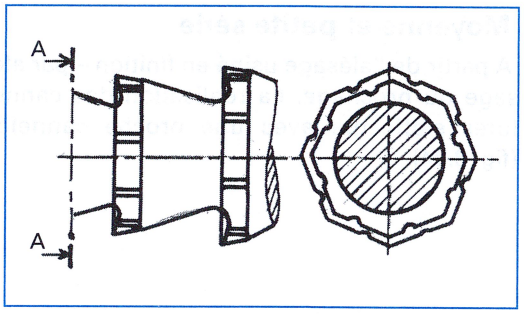




FIGURE 3.21 Dents d'ébauche de broche d'alésage de trous brut de forgeage et moulage.

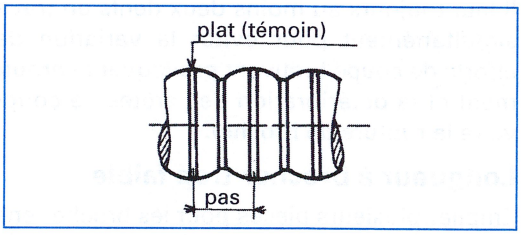



FIGURE 3.22 Dents de calibrage pour matériaux ductiles.

### Alésages avec rainure

Ils sont généralement obtenus en deux phases : alésage – ou brochage – de la forme alésage ; brochage de la rainure avec une broche plate maintenue dans un centreur pour petites séries (fig. 3.23), ou à section triangulaire avec portées cylindriques.
En petites séries, plusieurs rainures pouvant être brochées, rainure par rainure, la pièce est fixée sur un porte-pièce diviseur.

FIGURE 3.23 Schéma de brochage d'une forme complémentaire à un alésage usiné.

## Formes polygonales

Elles sont brochées à partir d'un trou d'ébauche, avec une broche à denture en coupe alternée, de préférence oblique.

## Alésages cannelés (centrage sur cercle extérieur)

Les formes sont obtenues avec des broches différentes selon l'importance des séries, à partir de l'alésage usiné en finition ou demi-finition.

### Grande série

À partir de l'alésage usiné en demi-finition (ou brut précis) avec deux types de broches :
Avec dents d'ébauche et de finition alternée (circulaire et cannelée).
Avec dents associées, l'avant de la broche pour l'alésage et l'arrière pour les cannelures.

### Moyenne et petite série

À partir de l'alésage usiné en finition – par alésage ou brochage. La réalisation des cannelures s'effectue avec une broche cannelée (fig. 3.24).

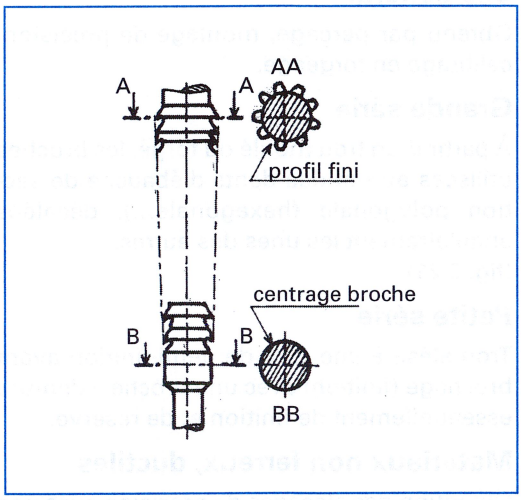



**FIGURE 3.24** Schéma de broche d'usinage de cannelures.

## Longueur à brocher

Il faut toujours au moins deux dents en travail simultanément pour éviter la variation des efforts de coupe (pouvant provoquer le broutement et la détérioration des arêtes de coupe, voire la rupture de broche).

### Longueur à brocher trop faible

Empiler plusieurs pièces pour les brocher ensemble ou utiliser une broche à denture oblique.

### Trop grand nombre de dents en travail simultanément

Effort de coupe Fc trop grand pour la résistance du noyau minimum de la broche ou/et puissance de brochage insuffisante, il faut réduire le nombre de dents en travail simultanément : utiliser une broche à denture allongée, ou, si possible, diminuer la longueur à brocher.

### Diminution longueur à brocher

À effectuer aux extrémités de la forme pour assurer la continuité du brochage évitant le bourrage de copeaux dans les inter-dents : rupture de broche (fig. 3.25).

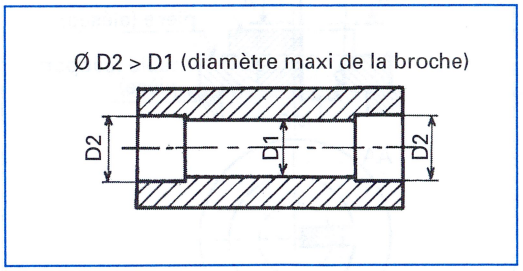



**FIGURE 3.25** Diminution d'une longueur à brocher.

### Petites séries

Limiter le brochage au profil difficilement usinable (la forme alésage étant obtenue préalablement en demi-finition ou finition).

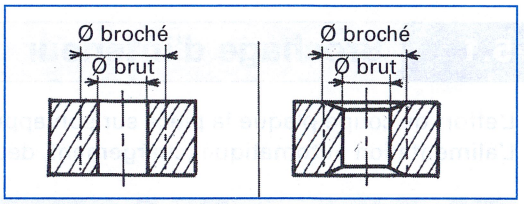
### Brochage d'intérieur

Les dents travaillant sur toute la périphérie de l'outil, la longueur maximale à brocher sera : au plus, égale à deux diamètres de broche ; non multiple du pas de denture (évite le risque de coupe saccadée avec état de surface irrégulier).



## 4.2 Réduction d'usure des dents

Pour protéger les arêtes coupantes, effectuer au préalable :
Un dressage de la face attaquée par les dents pour supprimer le contact arête de coupe/surface brute (de coulée ou formage).
Un chanfrein d'entrée qui évite également un éventuel ébavurage (de même pour chanfrein de sortie) (fig. 3.26).




*a – Faces dressées (d'appui ; d'attaque).* *b – Chanfreins (entrée, sortie) et face d'appui dressée.*

**FIGURE 3.26** Préparation de pièces à brocher en intérieur.

## 4.3 Autres conditions d'usinage

### Évidement dans une forme

À usiner après brochage (rainure, gorge...) :

#### Sur une forme extérieure

Pour ne pas affaiblir localement la pièce, évitant la possible déformation d'une paroi mince sous les efforts de coupe (fig. 3.27).

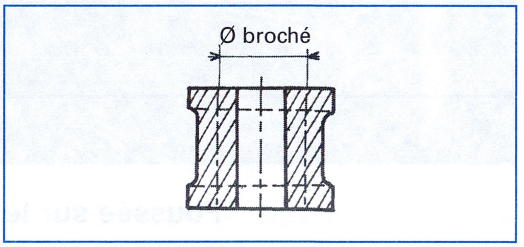



**FIGURE 3.27** Usinage après brochage : évidement extérieur.

#### Dans une forme intérieure

La coupe de chaque dent doit être continue : évite le bourrage de copeaux dans l'évidement (risque de rupture de la broche) (fig. 3.28).

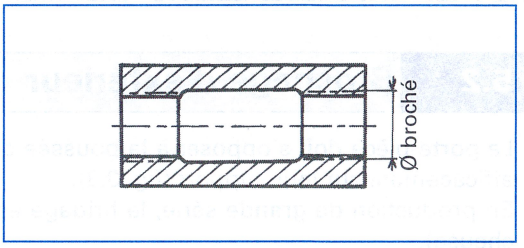



**FIGURE 3.28** Usinage après brochage : évidement intérieur.

### Matériaux

De dureté supérieure à 100 daN/mm$^2$, provoquent une usure rapide des arêtes de coupe.

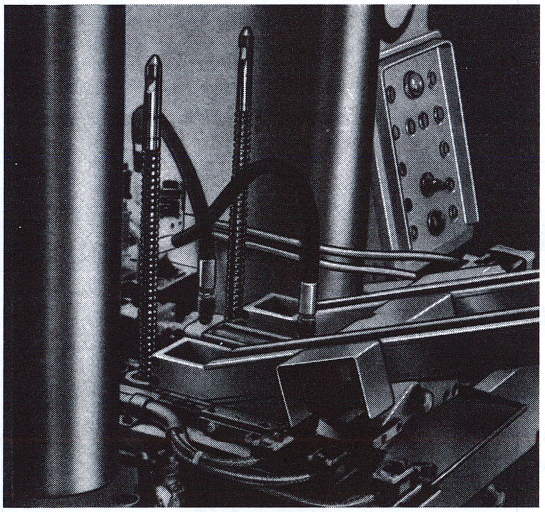
### Traitement thermique d'homogénéisation

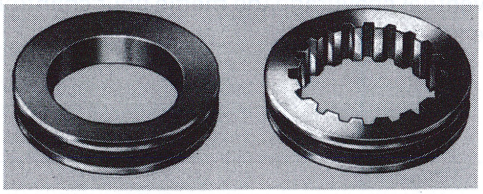
Améliore l'état de surface obtenu au brochage ; évite l'arrachement de particules sur la forme brochée.

# 5. Porte-pièce

## 5.1 Brochage d'intérieur

L'effort de coupe plaque la pièce sur son appui (fig. 3.29).
L'alimentation automatique (chargement, déchargement) est aisé (fig. 3.29).





*a – Avant brochage* *b – Après brochage*

**FIGURE 3.29** Exemple de brochage avec alimentation automatique.
*Doc. A. KLINK-GMBH*

### Poussée sur les dents en travail

À équilibrer par l'outillage si les dents ne travaillent pas en opposition (cas des broches plates de rainurage nécessitant un centreur de broche dans l'alésage) (fig. 3.23).

## 5.2 Brochage d'extérieur

Le porte-pièce doit s'opposer à la poussée des dents en travail : la ou les pièces sont à fixer efficacement sur leur support (fig. 3.3).
En production de grande série, le bridage est automatisé (assistance hydraulique de la brocheuse).

# 6. Machines

Les brocheuses travaillent en tirant, afin que l'outil ne flambe pas sous l'effort de coupe souvent très important (plusieurs dents en prise sur tout le profil de la forme) (fig. 3.30).
Elles sont généralement de conception verticale avec courses de 0,600 à 2,400 mètres, selon les machines.



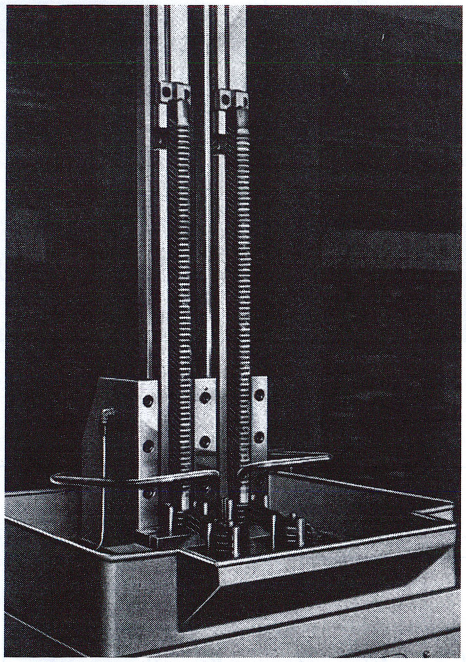


**FIGURE 3.30** Brochage d'intérieur de groupe de pièces.
*Doc. A. KLINK-GMBH*

## 6.1 Mouvement de coupe

Il est obtenu par vérin(s) hydraulique(s) :
- machines de puissance 1 000 à 5 000 daN, avec un vérin ;
- machines de puissance 5 000 à 8 000 daN, généralement avec 2 vérins en parallèle (fig. 3.31).

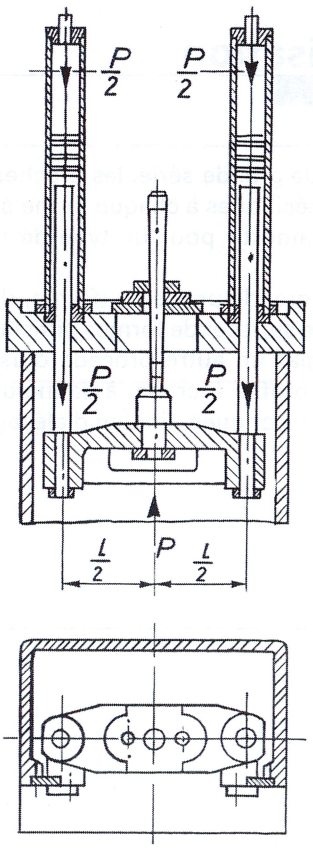



**FIGURE 3.31**
Schéma de brocheuse d'intérieur à deux vérins de traction.
*Doc. A. KLINK-GMBH*

## 6.2 Brochage circulaire

Broches de type cylindrique utilisées sur machines spécifiques (fig. 3.32).

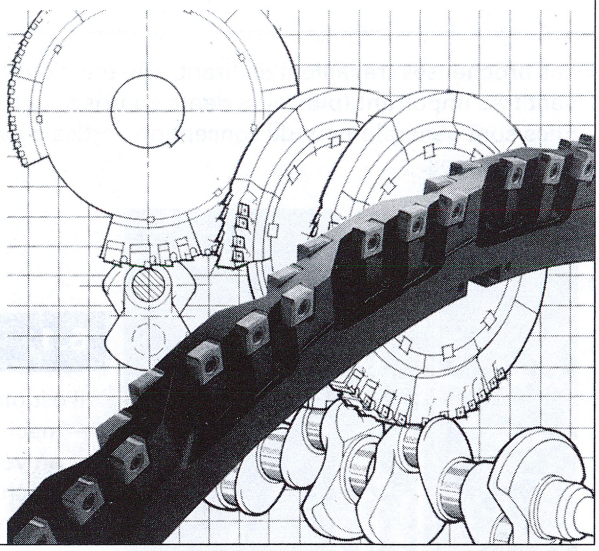


**FIGURE 3.32**
Élément de broche circulaire pour machine spécifique.
*Doc. Sandwik-coromant*

# 7. Utilisation

Production de grande série, les broches sont des outils spécifiques à chaque forme à obtenir, donc à amortir pour un type de pièces donné.
Usinage de grande précision (forme, dimensions, état de surface) de formes difficilement réalisables par un autre procédé d'usinage (fig. 3.33) : profils à crans, à cannelures, à dentures, quelconques, finition d'alésage.

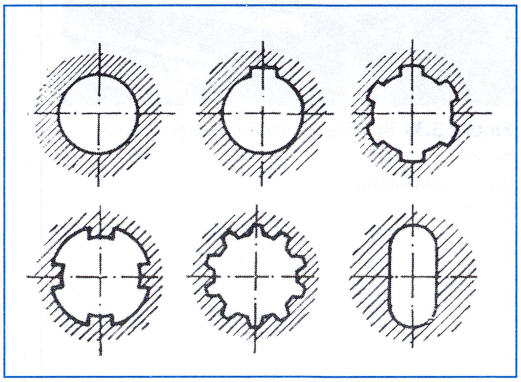


**FIGURE 3.33** Différentes formes réalisables en brochage d'intérieur. *Doc. FRÖMAG*

# 8. Rainurage

Réalisation d'une rainure, par passes successives d'un outil mono-arête en coupe rectiligne-alternative.
La génération de rainure est automatique : coupe en tirant l'outil, retour outil dégagé.
Profondeur de passe et hauteur de rainure à programmer en début de cycle.
L'outil est guidé dans un centreur qui intègre un coin de prise profondeur de passe.
Machine à broche verticale (fig. 3.34). La pièce repose sur la table, avec des bagues de centrage supérieur et inférieur : usinage pièces de petite à grande dimension et masse importante.

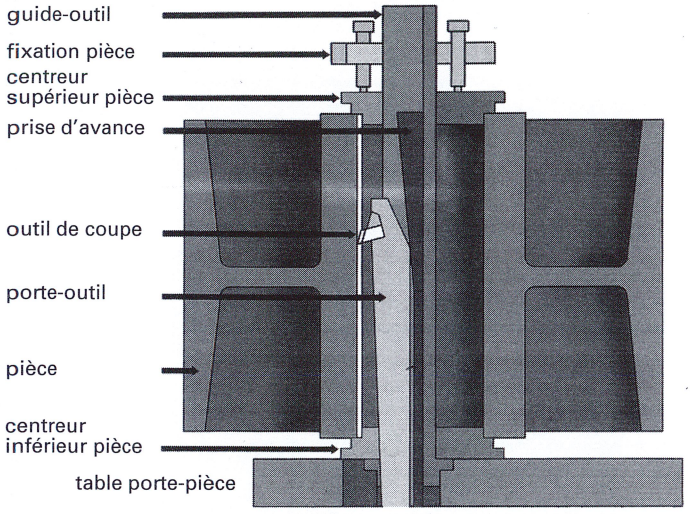
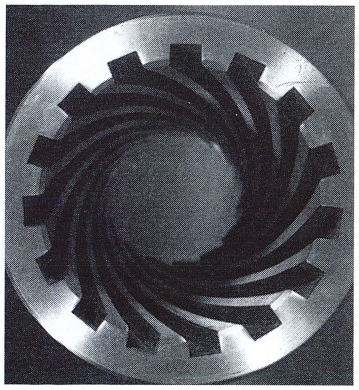



**FIGURE 3.34** Schéma de rainurage (zone de travail).
*Doc. FRÖMAG*

## 8.1 Utilisation

Travaux unitaire et de série en rainurage : rainures normalisées et de profils quelconques (outils de conception simple).
Avec CN, brochage rectiligne et hélicoïdal de dentures au profil quelconque (fig. 3.35).



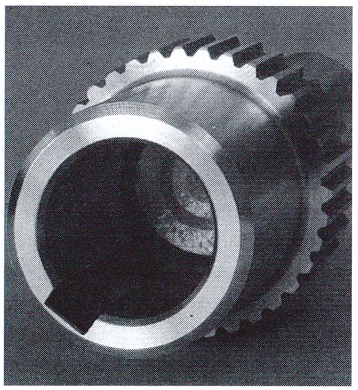


**FIGURE 3.35** Pièces obtenues sur rainureuse.
*Doc. FRÖMAG*