

# Soudage par friction

par **Roland CAZES**

*Ingénieur de l'École supérieure d'électricité  
ex-Directeur des recherches, Société Sciaky*

<b>1. Principe</b> .....	B 7 745 - 2
<b>2. Friction pilotée</b> .....	— 2
2.1 Principe.....	— 2
2.2 Paramètres de soudage .....	— 3
<b>3. Friction inertielle</b> .....	— 4
3.1 Principe.....	— 4
3.2 Paramètres de soudage .....	— 4
<b>4. Mise en œuvre du soudage</b> .....	— 5
4.1 Préparation des pièces .....	— 5
4.2 Soudabilité .....	— 5
4.3 Caractéristiques des soudures .....	— 5
<b>5. Machines à souder</b> .....	— 6
5.1 Morphologie des machines .....	— 7
5.2 Éléments de machines .....	— 7
<b>6. Applications</b> .....	— 8

**C**onnu dès la fin du siècle dernier, mais rarement employé, le soudage par friction a été développé sous sa forme industrielle en Union soviétique vers 1956 puis en Grande-Bretagne et aux États-Unis quelques années plus tard.

Le soudage par friction permet de réaliser des **assemblages en bout de deux pièces dont l'une au moins a une symétrie de révolution**. Il met en œuvre l'effet thermique engendré dans leur plan de joint par la rotation rapide sous pression des pièces l'une sur l'autre ou encore par friction. La puissance de chauffe résulte du couple résistant et de la vitesse de rotation maintenue en principe constante. C'est un procédé d'assemblage global qui se classe parmi les procédés de forgeage. Du fait du fluage du matériau pendant la friction et lors du forgeage, la température de fusion n'est jamais atteinte.

Il est difficile d'emploi sur des matériaux n'ayant pas de caractéristiques favorables au phénomène de friction et en particulier les matériaux très électroconducteurs tels le cuivre et ses alliages.

Dans une application donnée, il peut entrer en compétition favorable avec les autres procédés utilisables, à savoir et essentiellement : le soudage en bout par résistance ou par étincelage, le soudage par bossage annulaire, le soudage par faisceau d'électrons et le brasage. **Son point fort se situe au niveau de sa source de chaleur** – de nature mécanique – **particulièrement facile à réaliser et à maîtriser** grâce à sa stabilité naturelle. Il en découle pour les machines une morphologie très simple et des avantages intéressants : pas d'appel de courant élevé, pas de projections, des outillages sans usure, pas d'apport de métal coûteux, un contrôle aisé, etc., appréciés dans les ateliers de construction mécanique.

Pour autant que l'on puisse appliquer des serrages appropriés à la transmission du couple de friction et de l'effort de forgeage, il prend la première place par rapport aux autres.

Le lecteur pourra également se reporter à l'article [B 7 700] pour les différents procédés de soudage.

# 1. Principe

La rotation est le moyen presque exclusivement utilisé pour créer la friction (figure 1). La pièce qui tourne est serrée dans un mandrin rotatif entraîné par un moteur ou un volant d'inertie ; aussi doit-elle présenter au moins dans la zone de soudage une symétrie de révolution.

Dans ce processus, les faces en contact s'échauffent et deviennent la source de chaleur qui, par diffusion, élève la température des extrémités des pièces. Celles-ci deviennent plastiques et un fluage se produit vers la périphérie en formant un bourrelet caractéristique, tandis que la chaleur continue de se diffuser. Lorsque la température de soudage est atteinte, la rotation est arrêtée et un effort de forgeage est appliqué pour former la soudure.

Dans la pratique, le soudage par friction s'applique de façon naturelle à des assemblages, selon leur axe commun, de deux pièces cylindriques, pleines ou creuses et de même section droite au niveau du joint. Les applications se rencontrent donc surtout dans la construction de pièces mécaniques.

Une opération de soudage par friction s'exécute sur une machine très spécifique et souvent adaptée à un type d'assemblage particulier. La figure 1b montre la vue en coupe d'un assemblage soudé par friction.

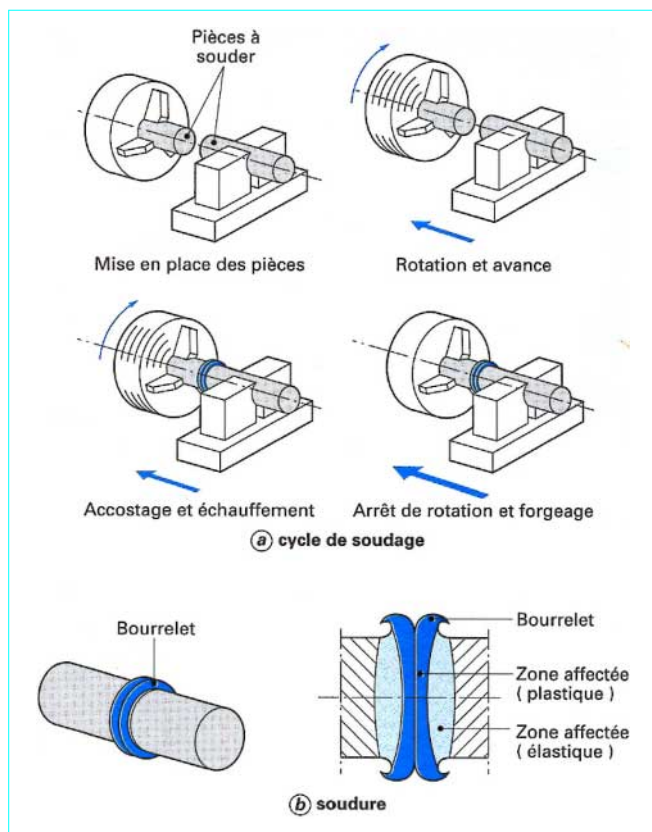


Figure 1 – Principe du soudage par friction

On a coutume de distinguer deux modes de soudage selon la façon dont on exécute la friction :

- le **soudage par friction pilotée** (FP) ou encore *par entraînement direct ou conventionnel* (en anglais, *continuous drive*) ;
- le **soudage par friction inertielle** (FI) ou encore *par accumulation d'énergie* (en anglais, *Inertia welding*, *Inertia* étant une marque de fabrique déposée par son inventeur).

Ils donnent lieu à des assemblages identiques mais ont en pratique des domaines d'application distincts.

Ces deux modes ont été normalisés (NF L 06-384) pour les constructions aéronautiques, afin de préciser les caractéristiques et la qualité des assemblages soudés obtenus.

Il est bon de savoir que l'on a utilisé, mais d'une manière peu courante, deux autres façons d'engendrer une soudure par friction :

- le **soudage radial**, particulièrement adapté aux pièces tubulaires de grande longueur, évitant la rotation de l'une d'elles grâce à un anneau intermédiaire formant la liaison ;
- le **soudage orbital**, qui permet de respecter l'alignement relatif des pièces ou de réaliser l'assemblage de deux barres de section carrée.

## 2. Friction pilotée

### 2.1 Principe

Développé le premier, le soudage par friction pilotée consiste à réaliser la soudure sur une machine à entraînement direct, c'est-à-dire dans laquelle le moteur fournit directement le couple de friction pendant la phase d'échauffement.

Une telle **machine** comporte schématiquement (figure 2a) :

- un mandrin rotatif fixé sur une broche entraînée par le moteur, par l'intermédiaire d'un embrayage et d'un frein ;
- un mandrin non tournant ou étau, coaxial au premier, associé à une table animée d'un mouvement d'approche et capable d'exercer sur l'assemblage les efforts de friction et de forgeage.

Les **différentes phases d'une opération** sont les suivantes :

- *mise en marche du moteur*, la broche étant débrayée et freinée ;
- *mise en place des pièces* dans les mandrins et fermeture de ces derniers ;
- *démarrage du cycle automatique* (figure 2b) qui comprend :
  - l'embrayage de la broche et la mise en rotation de la pièce correspondante,
  - l'accostage des pièces à vitesse lente et sous effort faible. Pendant cette approche, les pièces viennent en contact par leurs aspérités alors qu'un couple résistant erratique apparaît. Il n'y a pas échauffement mais égalisation mécanique des surfaces et apparition progressive du couple de friction proprement dite ;
  - *application de l'effort de chauffe* avec apparition du phénomène thermique. Ce phénomène se caractérise par un *couple stabilisé et pratiquement constant* et une *consommation de métal régulière en fonction du temps* et due à la formation du bourrelet. La chaleur diffuse de façon globale et symétrique de part et d'autre du plan de friction jusqu'à atteindre des conditions favorables au forgeage ;
  - *forgeage* par application d'un effort approprié après débrayage et freinage simultanés du mandrin tournant. Le bourrelet subit une nouvelle et définitive augmentation de volume ;
  - *desserrage des mandrins* et retrait de l'assemblage.

Dans ce mode piloté, le soudage est obtenu en **conditions dites thermiques** dans lesquelles les paramètres du forgeage sont définis, en fonction de la nature du matériau, par la température dans la zone soudée et par le temps de refroidissement. La mise au point de la soudure consiste à rechercher les conditions d'échauffement permettant un forgeage optimal et une zone affectée uniforme.

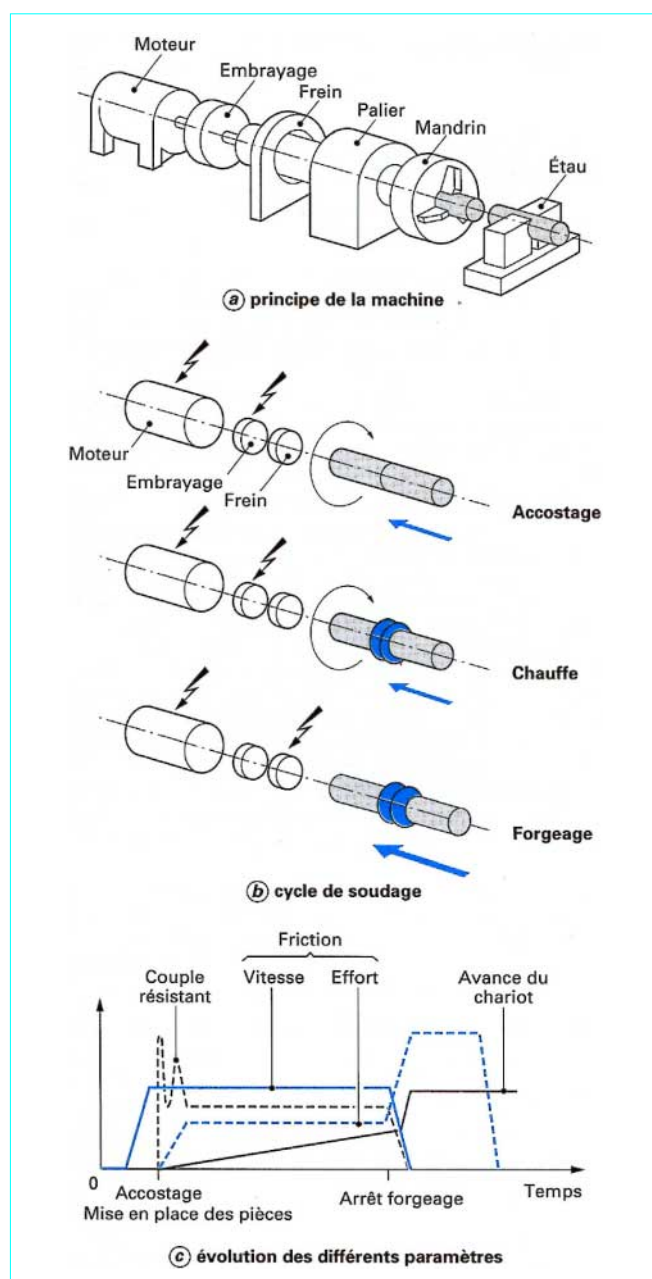


Figure 2 – Soudage par friction pilotée

## 2.2 Paramètres de soudage

Les paramètres de soudage par friction pilotée se déterminent d'après les caractéristiques des matériaux, leur coefficient de friction et leur section (surface et nature : pleine ou creuse).

Ce sont essentiellement :

- pour la friction, la vitesse, l'effort et la durée ;
- pour le forgeage, l'effort et la durée d'application de cet effort.

■ **Vitesse de friction** : physiquement, pour un matériau et une pression donnés, le couple passe par un maximum en fonction de la vitesse. Ces conditions sont à déterminer dans un essai préalable exécuté sur un assemblage tubulaire de diamètre donné. Ainsi, pour les aciers en général, on obtient une vitesse de 2 m/s pour un effort de 5 daN/mm<sup>2</sup>.

Pour appliquer ces valeurs à une section pleine de diamètre  $D$  pour laquelle les vitesses de friction vont varier de zéro, au centre, au maximum à la périphérie, on choisit un diamètre dit de friction à  $2 D/3$ . En pratique, pour une section pleine en acier, la diffusion thermique transversale intervient favorablement dans le temps total de friction. La valeur ci-dessus n'est pas critique et cela permet de disposer de machines standards dont la vitesse de rotation est fixée par construction ou réglable par paliers pour être globalement en rapport avec la section à souder et la capacité de la machine.

Dans le cas de pièces tubulaires, la vitesse doit être déterminée de façon plus précise en fonction du diamètre moyen.

■ **Durée de friction** : elle est déterminée expérimentalement et mise en évidence par le tableau 1. Un temps trop court fournit une zone affectée thermiquement irrégulière ; en revanche, un temps trop long entraîne une consommation de métal surabondante.

Tableau 1 – Effet du temps et de l'énergie sur la forme de la soudure

Durée d'échappement	Énergie (1)		
	Faible énergie	Énergie moyenne	Forte énergie
2 à 3 s			
7 à 8 s			

(1)

**Faible énergie** : grande vitesse de 3 m/s, faible pression de 2 daN/mm<sup>2</sup> et avance du chariot de 1 mm/s

**Énergie moyenne** : vitesse optimale de 2 m/s, pression normale de 5 daN/mm<sup>2</sup> et avance du chariot de 3 mm/s

**Forte énergie** : faible vitesse de 1 m/s, forte pression de 10 daN/mm<sup>2</sup> et avance du chariot de 7 mm/s

■ **Effort de friction** : pour une vitesse donnée, le couple résistant passe également par un maximum en fonction de l'effort appliqué. Le réglage de l'effort permet donc d'optimiser le flux de chaleur et par suite l'efficacité de l'échauffement dont la durée est finalement raccourcie. Sous un effort trop faible, le métal trop plastique n'est pas expulsé et, sous un effort élevé, l'expulsion est surabondante et le métal reste froid. Dans les deux cas, le rendement est faible.

Le tableau 2 donne des ordres de grandeur d'efforts de friction en fonction du matériau.

■ **Effort et durée de forgeage** : ils n'ont rien à voir avec la friction et ne dépendent que des conditions métallurgiques relevant de la nature des matériaux. On admet ainsi pour les aciers courants des valeurs de 8 à 12 daN/mm<sup>2</sup>, et des valeurs plus élevées pour des aciers à haute résistance (tableau 2).

Les tableaux 3 et 4 donnent sur deux exemples une comparaison paramétrique des procédés par friction pilotée et par friction inertielle.

Tableau 2 – Efforts de soudage par friction

Matériau	Effort unitaire		Effort maximal pour barre de Ø 20 mm (daN)
	de friction (daN/mm <sup>2</sup> )	de forgeage (daN/mm <sup>2</sup> )	
Acier doux.....	3,5 à 6	8 à 12	3 800
Acier mi-dur.....	5 à 8	10 à 20	6 300
Aciers rapides et spéciaux.....	8 à 16	20 à 35	11 000
Aciers inoxydables et réfractaires.....	8 à 12	20 à 40	12 500
Alliages d'aluminium.....	1 à 3	3 à 6	2 000

Tableau 3 – Comparaison sur barres d'acier au carbone entre soudage par friction pilotée et friction inertielle

Type de soudage	Friction pilotée	Friction inertielle
<b>Diamètre des pièces à souder : Ø 20 à 60 mm</b>		
Temps de cycle (non compris le chargement et le déchargement) ..... (s)	5 à 25	8
Vitesse de broche ..... (tr/min)	1 500	4 800
Effort de poussée..... (kN)	410	726
Puissance motrice ..... (kW)	29,5	73,6
Masse de la machine..... (kg)	4 550	15 650
<b>Diamètre des pièces à souder : Ø 50 à 100 mm</b>		
Temps de cycle (non compris le chargement et le déchargement) ..... (s)	20 à 40	18
Vitesse de broche ..... (tr/min)	1 000	3 000
Effort de poussée..... (kN)	1 000	2 427
Puissance motrice ..... (kW)	110	184
Masse de la machine..... (kg)	9 700	47 600

Tableau 4 – Comparaison des procédés

Type de soudage	Friction pilotée	Friction inertielle
<b>Avantages</b>	Temps de soudage court. Zone affectée thermiquement faible. Bonne tenue en fatigue des assemblages.	Facilité de réglage. Excellente reproductibilité. Grandes tolérances des longueurs avant soudage. Bonnes caractéristiques métallurgiques.
<b>Inconvénients</b>	Centre peu chauffé. Réglages pointus. Duretés dans le cordon. Tolérances serrées des pièces avant soudage.	Temps de soudage long. Zone affectée thermiquement forte.

## 3. Friction inertielle

### 3.1 Principe

La friction inertielle a été développée plus tard et diffusée au départ sous le nom de *Inertia welding*. Elle vient de l'idée d'**opérer en temps courts** en vue d'accroître les caractéristiques des soudures de certains métaux à haute résistance et à faible diffusivité thermique.

L'expérience montre que pour ces matériaux la soudabilité est excellente lorsque l'on met en œuvre des efforts de forgeage plus importants qu'en friction pilotée dans des conditions thermiques différentes.

Le principe découle des observations suivantes :

— si l'on veut obtenir, sur un assemblage de deux barreaux pleins, des conditions de friction et d'échauffement uniformes sur toute la section, il faut faire varier la vitesse de rotation depuis une vitesse élevée, efficace près de l'axe, jusqu'à une vitesse plus basse, efficace en périphérie. On obtient cela de façon simple en utilisant un volant d'inertie préalablement accéléré et dont on va ensuite libérer l'énergie par le freinage dû à la friction sous pression élevée. Cette libération s'accompagne d'une diminution de la vitesse jusqu'à l'arrêt. On observe alors que la consommation de métal commence à se produire après un temps de rotation non négligeable au bout duquel l'échauffement s'est étendu à toute la section ;

— lors de l'arrêt naturel, la force de friction devient la force de forgeage sans aucun laps de temps préjudiciable à la formation de la liaison obtenue ainsi dans des conditions thermiques notablement réduites.

Ces conditions sont réunies dans une **machine à souder inertielle** dont le principe est donné sur la figure 3.a. Dans une telle machine, le mandrin tournant est conçu pour recevoir divers volants d'inertie dont la conjugaison permet d'ajuster la masse *inertielle* et par suite l'énergie engagée par accumulation.

Les **différentes phases d'une opération** sont les suivantes :

— *mise en place des pièces* dans les mandrins et fermeture de ces derniers ;

— *démarrage du cycle automatique* (figure 3.b) qui comprend ;

- la mise en marche du moteur, la broche étant embrayée et le volant entraîné jusqu'à la vitesse de régime à vide réglée en conséquence,
- le découplage,
- l'accostage sous effort faible,

- application de l'effort de friction avec apparition du couple résistant, jusqu'à l'arrêt ;

— *desserrage des mandrins* et retrait de l'assemblage.

Le phénomène se caractérise par un *couple stabilisé et pratiquement constant* et une *consommation de métal d'abord insignifiante puis régulière* en fonction du temps due à la formation du bourrelet. Pendant toute cette phase, la vitesse de rotation diminue de façon linéaire, montrant qu'une grande partie de l'énergie cinétique a été consommée lors de la première période.

Lorsque la vitesse est suffisamment basse, le mandrin s'arrête rapidement sous l'effet de la force appliquée qui exerce un forgeage élevé et à relativement faible température.

Dans cette variante, la liaison résulte de deux effets mécaniques, l'un axial et l'autre radial (figure 4), ce dernier donnant lieu à une rotation de fibres métalliques.

### 3.2 Paramètres de soudage

Les paramètres de soudage par friction inertielle sont essentiellement :

- la masse (et les dimensions) du volant ;
- la vitesse de lancement ou vitesse de départ du cycle ;
- l'effort de friction et de forgeage ;
- le temps de forgeage à l'arrêt.

La mise au point d'une opération de soudage consiste à déterminer les valeurs de la masse du volant d'inertie, de sa vitesse de lancement et de l'effort de friction (freinage du volant) dont les effets sont très liés. Ils déterminent en effet la puissance de friction et, compte tenu de l'énergie accumulée, la durée du processus nécessaire à l'obtention d'une liaison complète satisfaisante.

La prise en considération séparée de chacun de ces paramètres n'est pas, contrairement à la friction pilotée, aussi bien définie. Cela



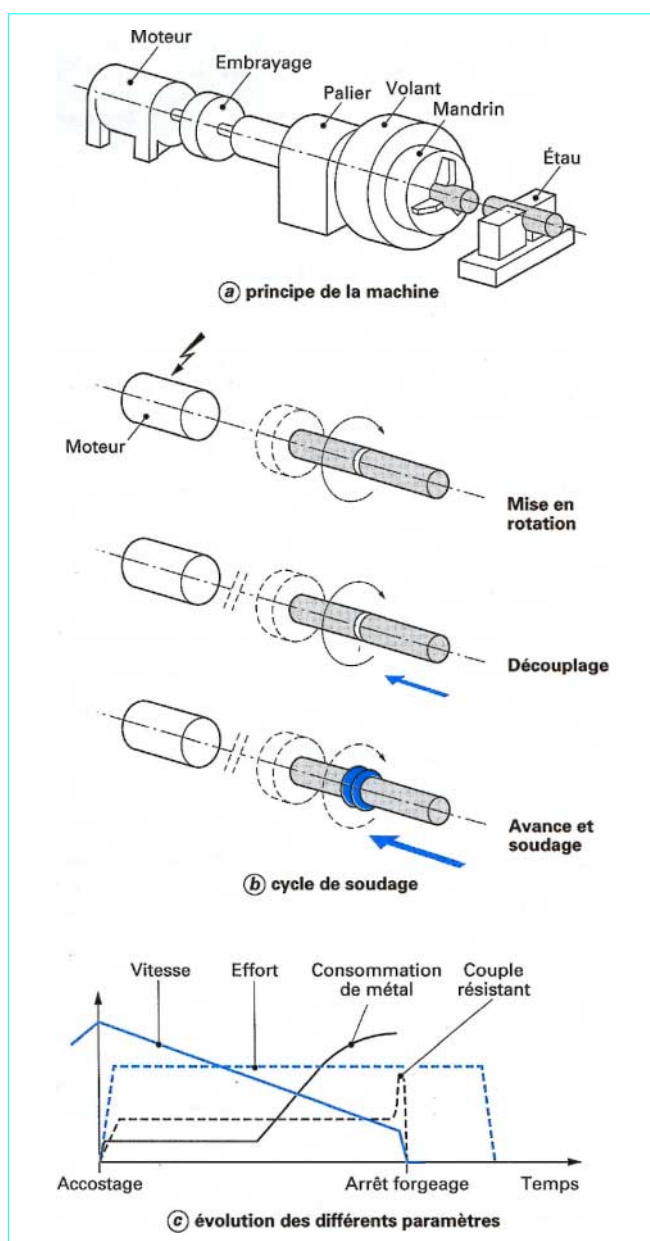


Figure 3 – Soudage par friction inertielle

explique la difficulté de réglage de ce type de machine et la sensibilité du soudage à la préparation des pièces avant soudure.

Les tableaux 3 et 4 donnent une comparaison paramétrique des procédés par friction pilotée et par friction inertielle.

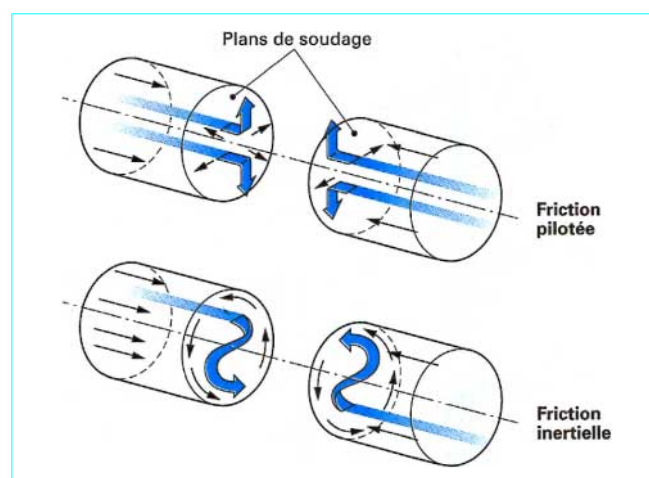


Figure 4 – Torsion des fibres en soudage par friction

## 4. Mise en œuvre du soudage

### 4.1 Préparation des pièces

Du point de vue strict de la géométrie, tous les assemblages de révolution sont réalisables par friction.

Lorsque les sections ne sont pas égales, il peut être nécessaire de réaliser sur la plus grande pièce une préparation visant à obtenir la symétrie et à permettre une meilleure répartition thermique en vue d'un fluage équilibré. La figure 5 donne quelques principes de base utilisés couramment.

Lorsque les métaux sont dissemblables, cela se traduit par une configuration dissymétrique des bourrelets (figure 6).

Dans la pratique, les conditions d'emploi sont, pour les plus importantes :

- la possibilité d'appliquer aux deux pièces un serrage suffisant et de leur transmettre le couple de friction ;
- des pièces suffisamment rigides pour donner lieu à un processus stable en évitant les flexions parasites ;
- une meilleure symétrie possible, avec préparation si besoin de l'une des pièces pour s'approcher du meilleur équilibre thermique.

### 4.2 Soudabilité

Le procédé de soudage par friction s'applique à un grand nombre de matériaux semblables et dissemblables ainsi que le montre le tableau 5. Il présente, de ce fait, par rapport aux soudages par étincelage et à l'arc, un avantage substantiel.

### 4.3 Caractéristiques des soudures

■ **Qualités mécaniques** : la géométrie des assemblages obtenus par friction permet d'envisager son emploi sur les pièces finies. Les dispersions dimensionnelles, tant en longueur qu'en désalignement, sont largement inférieures à 0,5 mm. Elles dépendent de la qualité des montages mais également de celle de la machine (fiabilité du contrôle de longueur, flexions des bâtis, répétabilité du cycle, etc.).

Tableau 5 – Soudabilité des métaux et alliages les plus couramment utilisés en soudage par friction

Métaux et alliages	Aluminium	Alliages d'Al	Bronze	Cuivre	Magnésium	Monel	Nickel	Nimonic	Acier	Acier coulé	Aciers spéciaux	Aciers inoxydables	Titane
Aluminium .....	■	■	□	■	▲	□	■	□	■	□	□	■	■
Alliages d'Al .....	■	■	□	□	▲	□	□	□	●	□	□	▲	□
Bronze .....	□	□	▲	□	□	□	□	□	▲	▲	□	□	□
Cuivre .....	■	□	□	▲	□	□	□	□	■	□	□	■	□
Magnésium .....	▲	▲	□	□	▲	□	□	□	□	□	□	□	▲
Monel .....	□	□	□	□	□	■	□	□	□	■	□	■	□
Nickel .....	■	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	■
Nimonic .....	□	□	□	□	□	□	□	■	■	■	□	■	□
Aciers .....	■	●	▲	■	□	□	□	■	■	■	■	■	▲
Aciers coulés .....	□	□	▲	□	□	■	□	■	■	■	■	■	□
Aciers spéciaux .....	□	□	□	□	□	□	□	□	■	■	■	■	□
Aciers inoxydables .....	■	▲	□	■	□	■	□	■	■	■	■	■	▲
Titane .....	■	□	□	□	▲	□	■	□	▲	□	□	▲	■

■ bonne soudabilité    ▲ soudable    ● soudure délicate    □ impossible ou non essayé

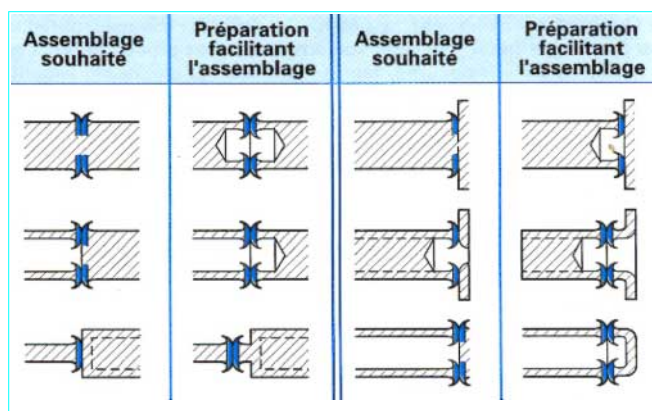


Figure 5 – Exemples de préparations de pièces par soudage par friction

■ **Qualités métallurgiques** : l'expulsion à l'extérieur du joint des parties initialement en contact a les caractéristiques suivantes :

- pratiquement pas de nettoyage des surfaces à souder ;
- une soudure saine des faces en contact par formation de liaisons métalliques est obtenue ; sa tenue est au moins égale à celle du métal de base, voire supérieure ;
- les zones affectées par la chaleur et déformées plastiquement sont étroites et les caractéristiques des matériaux de base ne sont pas dégradées ;
- le plan de joint présente un grain plus fin que les métaux de base ;
- un forgeage adéquat expulse les grains austénitiques surchauffés de la périphérie tandis qu'il affine ceux de la zone soudée ;
- dans le cas des métaux dissimilaires, la résistance est au moins égale à celle du métal de moindre résistance ; la tenue d'une soudure peut être exprimée par le coefficient de joint : (résistance du joint/résistance métal de base le moins résistant) × 100 ;
- il n'y a pas de risque de décarburation superficielle des aciers.

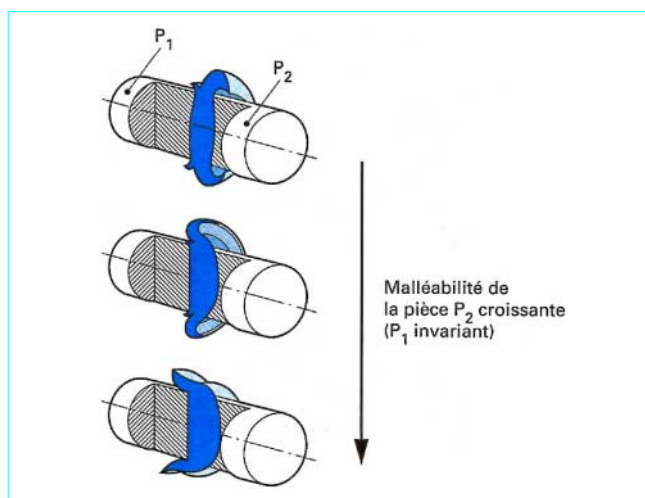


Figure 6 – Forme des soudures de matériaux très dissimilaires

## 5. Machines à souder

Une machine à friction se caractérise en première approche par l'effort maximal qu'elle peut produire au forgeage. Ce paramètre fournit, en effet, une indication de la taille de machine ainsi que de sa capacité. On admet que, en soudage d'aciers peu alliés, l'effort unitaire moyen de forgeage est de 8 à 12 daN/mm<sup>2</sup> (tableau 2).

Cela permet de déduire :

- la section maximale pleine ou tubulaire soudable par la machine ;
- la puissance et la vitesse de broche pour une section pleine correspondante.

À titre d'exemple, le tableau 6 fournit les caractéristiques de quelques machines à souder par friction pilotée.

Il existe actuellement sur le marché des équipements allant de quelques centaines de newtons à 200 000 daN et plus.

## 5.1 Morphologie des machines

On considère :

- les machines standards d'emploi général ;
- les machines spécifiques adaptées à un travail particulier.

Dans chacun de ces domaines, les machines peuvent se distinguer par leur cinématique de principe et par la disposition relative de leurs éléments.

Une machine à friction combine essentiellement une broche tournante et une commande d'avance produisant un effort, l'ensemble étant supporté par le bâti. Quelques exemples de dispositions de machines sont regroupés sur la figure 7.

Les constructeurs ont tendance à s'orienter actuellement vers des conceptions **cinématiques intégrées** et des **efforts refermés** par une conception appropriée du bâti. Les machines correspondantes gagnent en fiabilité et en performances.

## 5.2 Éléments de machines

Ce sont essentiellement la broche, le guidage de la partie mobile et le bâti, le mandrin rotatif et l'étau, la centrale hydraulique, l'armoire de commande et les accessoires éventuels (dispositif de chargement et déchargement automatiques, d'ébavurage, etc.).

■ **Broche** : son rôle est de recevoir le mandrin tournant auquel elle transmet le couple de friction provenant :

- du moteur par l'intermédiaire d'un embrayage et d'un frein dans le soudage par friction pilotée ;
- du volant d'inertie dans le soudage par friction inertielle.

La broche est essentiellement un palier dont l'axe peut être plein ou creux, et dont les roulements sont dimensionnés en conséquence.

À noter la présence éventuelle dans le cas des machines de forte puissance d'un **vérin de réaction ou de compensation** qui soulage à 80 ou 90 % l'action sur les roulements de la poussée du forgeage.

■ **Commande d'avance et bâti de réaction** : on distingue les deux dispositions classiques :

- les machines à broche fixe et tables mobiles avec séparation des fonctions de rotation et d'avance-effort ;
- les machines à broche mobile en translation.

L'avance est commandée hydrauliquement, car le cycle comporte des phases successives d'approche à vitesse rapide puis lente, ensuite d'appui à divers niveaux d'efforts, difficiles à réaliser autrement.

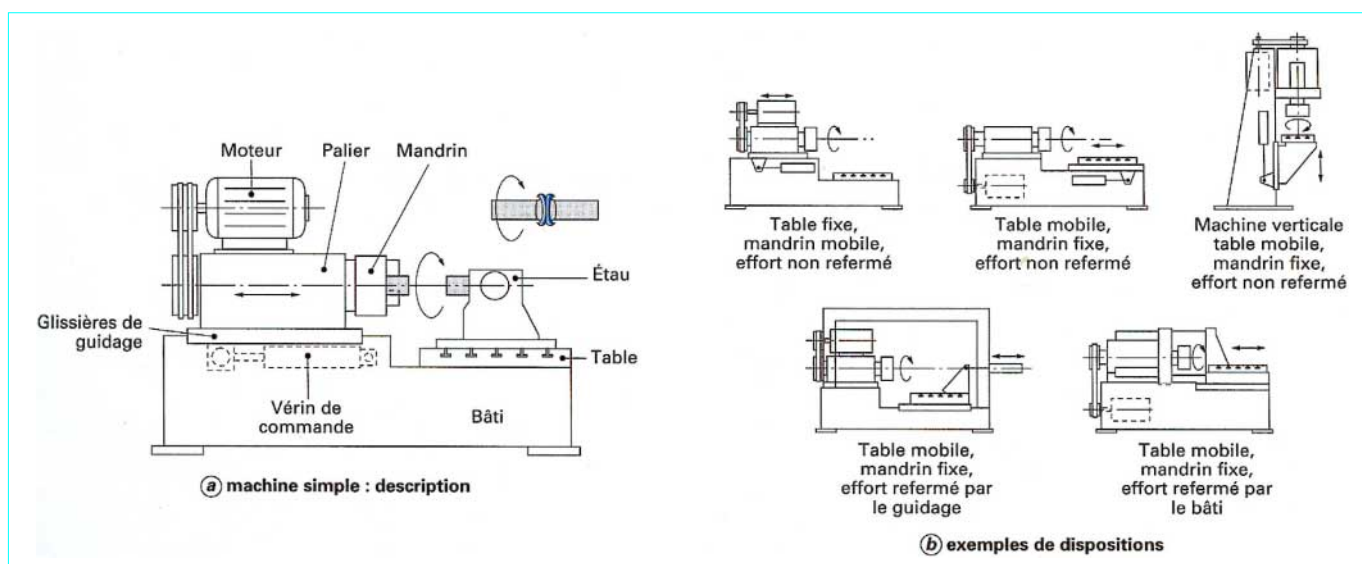
■ **Étaux et mandrins** : ils sont sollicités radialement et axialement. La tenue des pièces est primordiale, et l'expérience montre que la qualité des assemblages dépend en grande partie de la qualité de ces éléments qui reçoivent des sollicitations supérieures à celle des mandrins ou étaux des machines-outils. L'accostage de pièces brutes engendre en effet des efforts erratiques quelconques en direction et en grandeur.

**Tableau 6 – Caractéristiques de quelques machines à souder par friction pilotée**

<b>Effort maximal en forgeage</b> ..... (daN)	3 000	6 000	12 000	25 000	50 000	100 000	200 000
<b>Capacité (section) maximale sur acier mi-dur (1)</b> .... (mm <sup>2</sup> )	200	400	800	1 600	3 200	6 400	13 000
<b>Ø de barre correspondant</b> .....(mm)	16	22,5	32	46	64	90	129
<b>Vitesse de rotation nominale de broche (2)</b> ..... (tr/min)	3 000 et 1 500	3 000 et 1 500	2 200 et 1 100	1 460 et 730	1 200 et 900	1 000 et 500	350 et 700
<b>Puissance du moteur de broche</b> ..... (kW)	11	14,7	22	29,5	51,5	73,6	89

(1) La capacité minimale (effort minimal et vitesse maximale) peut être 1/10 ou 1/20 de la capacité maximale.

(2) Sur machines de production, la vitesse est ajustable par modification du rapport d'entraînement.



**Figure 7 – Exemples de dispositions de machines à souder par friction**

### ■ Commandes du cycle :

- *rotation* : moteur électrique à courant continu ou alternatif (une ou deux vitesses) ;
- *embrayage/frein* : commande hydraulique ;
- *avance et cycle d'efforts* : commande hydraulique ;
- *mandrins et étaux* : commande hydraulique ou pneumatique ;
- *cycle simple* du type machine-outil.

### ■ Accessoires :

- *alimentation automatique* : l'automatisme du cycle des machines à souder par friction s'accorde parfaitement à la mise en œuvre d'une alimentation et d'une éjection automatiques ; pour de petites pièces, comme les soupapes de moteur d'automobiles, de tels dispositifs permettent d'obtenir des cadences de 600 pièces/h ;
- *ébavurage* : les machines peuvent être équipées également d'un porte-outil commandé, destiné à l'élimination à chaud du bourrelet de soudage immédiatement après la soudure.

## 6. Applications

Le soudage par friction a trouvé un intérêt dans la **petite mécanique** pour laquelle le soudage en bout par étincelage présente l'inconvénient de sa phase d'échauffement et le soudage par faisceau d'électrons celui de son coût. Ce procédé essentiellement *mécanique* a reçu la faveur des **ateliers d'usinage dont les plus fréquents sont ceux de la construction automobile**. Il faut signaler que les conditions de friction ne sont pas critiques et il faut s'assurer que le domaine où le phénomène est le plus *actif* est bien présent à la fois pour les dimensions et les matériaux rencontrés en mécanique. Dès que l'on sort de ces données, la friction perd de son intérêt. Sous certaines conditions, pour des assemblages dissymétriques cuivre-aluminium

dont on sait que l'un et l'autre se soudent à froid, la friction semble n'avoir pour rôle que le nettoyage mécanique des surfaces nécessaires à l'installation de la liaison.

Dès lors que l'on s'intéresse à des matériaux à haute résistance où le phénomène de frottement n'est pas évident, les conditions de friction sont difficiles à établir. C'est l'idée qui a prévalu dans l'invention de la soudure inertielle développée pour des assemblages en bout très critiques d'arbres de réacteurs d'avions ou de turbines en acier à haute résistance et de forts diamètres pouvant bénéficier alors de liaisons forgées à la place de liaisons vissées ou soudées par fusion (FE par exemple).

De façon générale, les limites en diamètre du soudage par friction vont de quelques millimètres (vitesses très élevées) à une centaine de millimètres (difficulté de concevoir des mandrins tournants capables de contenir des efforts axiaux importants).

La liste suivante récapitule les principaux exemples d'assemblages soudés par friction.

### ■ Industrie automobile :

- pièces primaires de forge pour pignonneries ;
- transmissions (cardans, arbres) ;
- ponts arrière et fusées ;
- tiges de soupapes ;
- arbres de compresseurs ou de pompes ;
- embouts de cylindres ;
- embouts de tubulures.

### ■ Industrie électrique : pour des liaisons composites de métaux dissemblables :

- cosses électriques (cuivre-aluminium) ;
- électrodes (acier-aluminium).

### ■ Industrie aéronautique : axes de turbines.

### ■ Autres industries : industrie pétrolière (tubes de forage), chemins de fer, etc.