Cours de Technologie de Soudage

Kamel FEDAOUI

cours de Mr. Ahmed KTARI

Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sousse

Département de mécanique avancée

Plan de cours

- Généralités
- Les procédés de Soudage (Classification)
  - Soudage Oxyacétylénique
  - Soudage avec Electrode enrobée
  - Soudage sous Flux solide en poudre
  - Soudage sous Flux gazeux (MIG, MAG et TIG)
  - Soudage par Résistance
  - Soudage par Ultrason
- Microstructure et propriétés des soudures
- Types de soudures

Généralités

L'assemblage par soudage occupe une place importante dans l'univers de la construction des bateaux, trains, avions, automobiles, ponts, tuyaux, réservoirs…

Le procédé de soudage

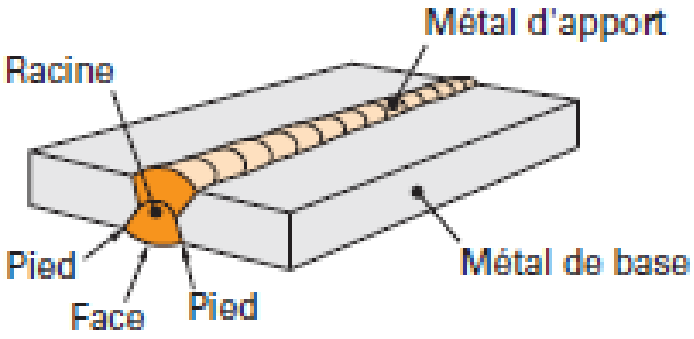
Opération consistant à **réunir** deux ou plusieurs **parties constitutives d'un assemblage**, de manière à **assurer la continuité** entre les parties à assembler, soit par chauffage, soit par intervention de pression, soit par l'un et l'autre, **avec ou sans emploi d'un produit d'apport** dont la température de fusion est du même ordre de grandeur que celle du matériau de base.

On distingue deux type de soudure :

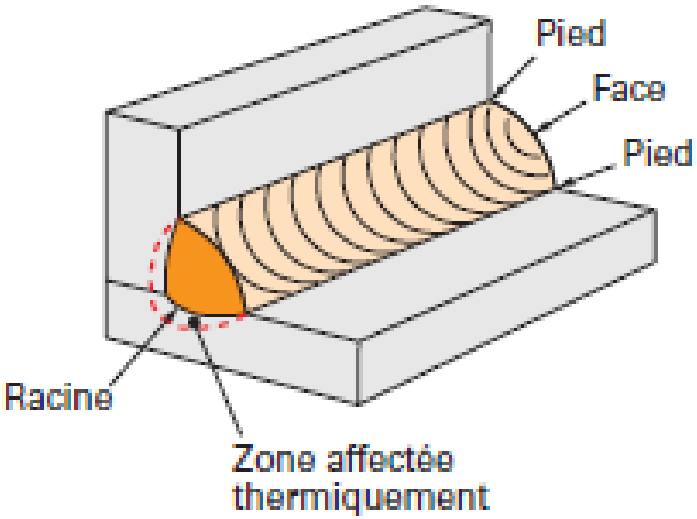
- **La soudure Autogène:** Le métal qui compose le joint est de même nature que les pièces à souder ;
- **La soudure Hétérogène:** Le métal qui compose le joint est de nature différente des pièces à souder.

Terminologie de la soudure

- Le **métal de base** est le matériau constitutif des éléments à souder ;
- Le **métal d'apport** est la matière dont est constituée l'électrode utilisée dans le processus de soudage ;
- La **racine** désigne l'endroit de l'assemblage jusqu'où le métal d'apport a pénétré ;
- La **face** représente la surface extérieure de la soudure ;
- Le **pied** correspond à la ligne de séparation, sur la face de la soudure, entre le métal de base et le métal d'apport ;



Soudure en bout



Soudure d'angle

- La **zone affectée thermiquement (ou ZAT)** est la partie du matériau de base qui n'est pas rentrée en fusion avec le métal d'apport mais qui a subi un échauffement et un refroidissement très rapides (Traitement thermique) au moment du soudage.

Procédés utilisés et domaines d'emploi

Les procédés de soudage utilisés peuvent être classés en trois catégories :

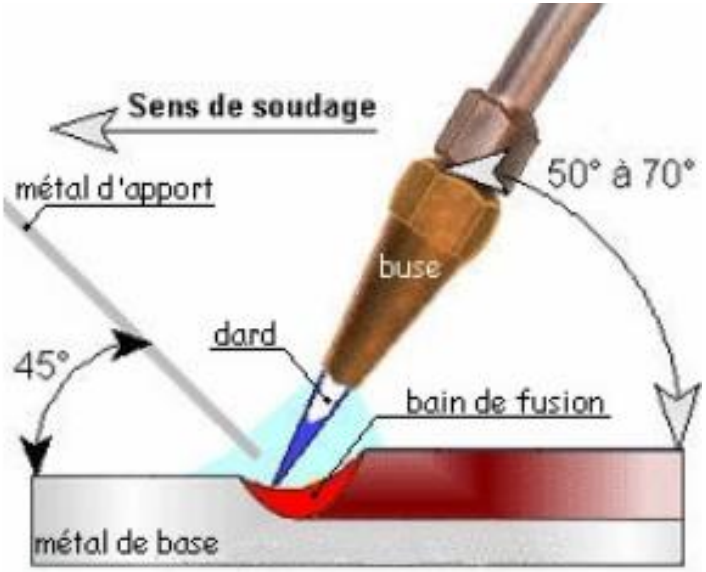
- **le soudage manuel:** le seul moyen possible pour réaliser des soudures dont l'accès est difficile ou de petite longueur ;
- **le soudage semi-automatique:** avancement automatique de l'électrode avec une torche (chauffage) tenue à la main. C'est celui qui est appliqué de manière générale ;
- **le soudage automatique:** la tête de soudage est montée, soit sur un chariot dont l'avancement est automatique, soit sur un robot de soudage. Il s'applique surtout aux soudures continues d'une certaine longueur.

Procédés utilisés et domaines d'emploi

Soudage manuel oxyacétylénique (1/2)

Le soudage Oxyacéthylénique est un procédé de **soudure à la flamme**. Le soudage est réalisé à partir de la chaleur d'une flamme née de la combustion d'un gaz combustible l'acétylène (C_2H_2) avec un gaz comburant d'oxygène (O_2) .

La **température de la flamme** peut atteindre les **3200 °C** à l'extrémité du **dard**, lorsque le mélange C_2H_2 et O_2 est correctement équilibré dans le chalumeau (On notera qu'une trop forte proportion d'oxygène entraîne une chaleur plus importante mais le risque d'oxydation augmente).



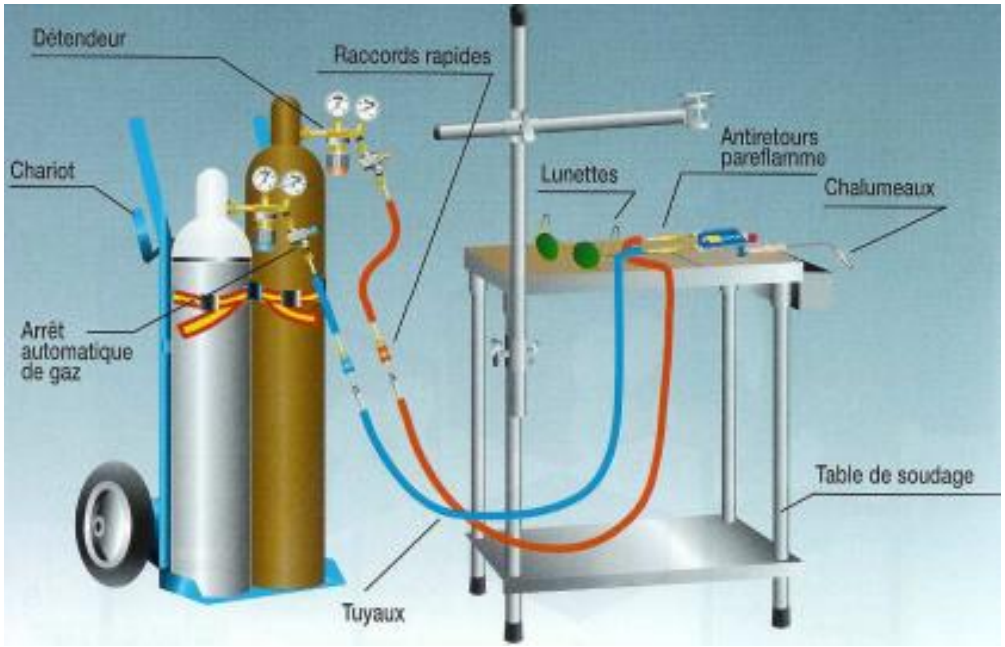
Le métal d'apport (baguette de Ø 0,8 mm à Ø 4,0 mm) est amené manuellement dans le bain de fusion.

L'énergie calorifique de la flamme fait fondre localement la pièce à assembler et le fil d'apport pour constituer le bain de fusion (Cordon de soudure après refroidissement).

Procédés utilisés et domaines d'emploi

Soudage manuel oxyacétylénique (2/2)

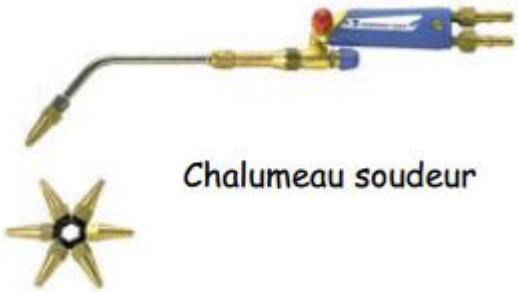
Une installation de soudage comprend : Une source d'oxygène, une source d'acétylène, des détendeurs, des systèmes de sécurité (dispositifs anti-retour), un chalumeau.

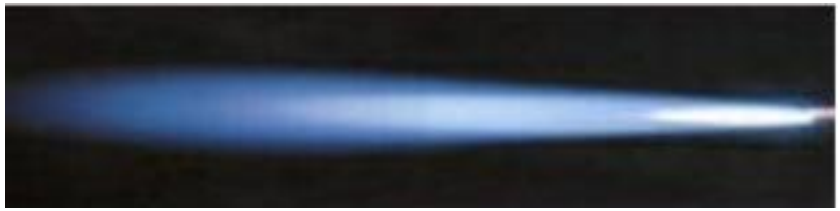


- **Détendeurs :** Permettent de détendre les gaz de la pression de stockage (dans les bouteilles) à la pression d'utilisation.
- **Chalumeaux :** Permettent de mélanger les gaz afin d'obtenir une flamme conforme à de bonnes conditions de soudage.
- **Buses :** Permettent de changer le débit des gaz en fonction de l'épaisseur et de la position de soudage.

Procédés utilisés et domaines d'emploi

Soudage manuel oxyacétylénique





Mauvais réglage : flamme carburante excès d'acétylène le dard est brillant avec une auréole, la soudure sera plus dure et plus cassante.

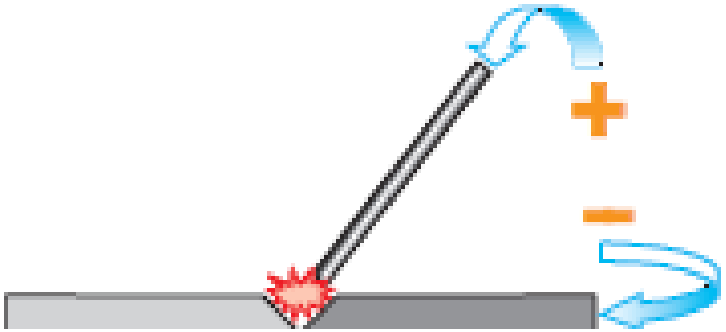
Mauvais réglage : flamme oxydante (excès d'oxygène), le dard est plus pointu la flamme siffle, la soudure sera oxydée avec des soufflures.

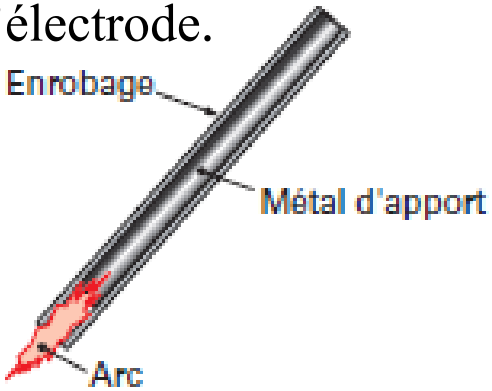
Bon réglage : flamme neutre, dite réductrice (T=3100°C), le dard est brillant et bien net. C'est la flamme à utiliser en soudage, en brasage en chauffage et en découpage.

Procédés utilisés et domaines d'emploi

Soudage manuel avec électrode enrobée

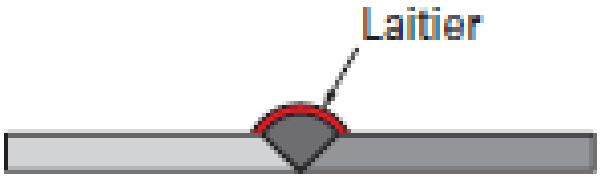
Le soudage manuel constitue l'un des modes opératoires de **soudage à l'arc** les plus répandus. Il nécessite un **personnel très qualifié**. **L'électrode** est constituée d'un fil à cœur d'acier d'un diamètre de 3 à 8 mm et d'un **flux d'enrobage** contenant des éléments alliés (manganèse et silice par exemple). La source de chaleur est constituée d'un arc de faible voltage (15 à 35 V) mais d'intensité élevée (jusqu'à 500 A). L'arc fait fondre le métal de base et l'électrode.





Au fur et à mesure que le métal est transféré du bout du fil en acier au bain de fusion, le soudeur déplace l'électrode de manière à garder une longueur constante à l'arc (*la largeur du cordon est en grande partie liée à la longueur de l'arc*).

Le flux fond avec le fil de cœur et coule sur la surface du bain de fusion pour former un laitier qui doit être enlevé après la solidification.



Procédés utilisés et domaines d'emploi

Soudage manuel avec électrode enrobée

Le soudage manuel présente les **avantages** suivants :

- faibles investissements ;
- liberté de mouvement (on peut l'utiliser jusqu'à 20 m de l'alimentation électrique, ce qui est intéressant sur chantier) ;
- utilisation possible dans toutes les positions ;
- convient pour des aciers au carbone et les aciers inoxydables.

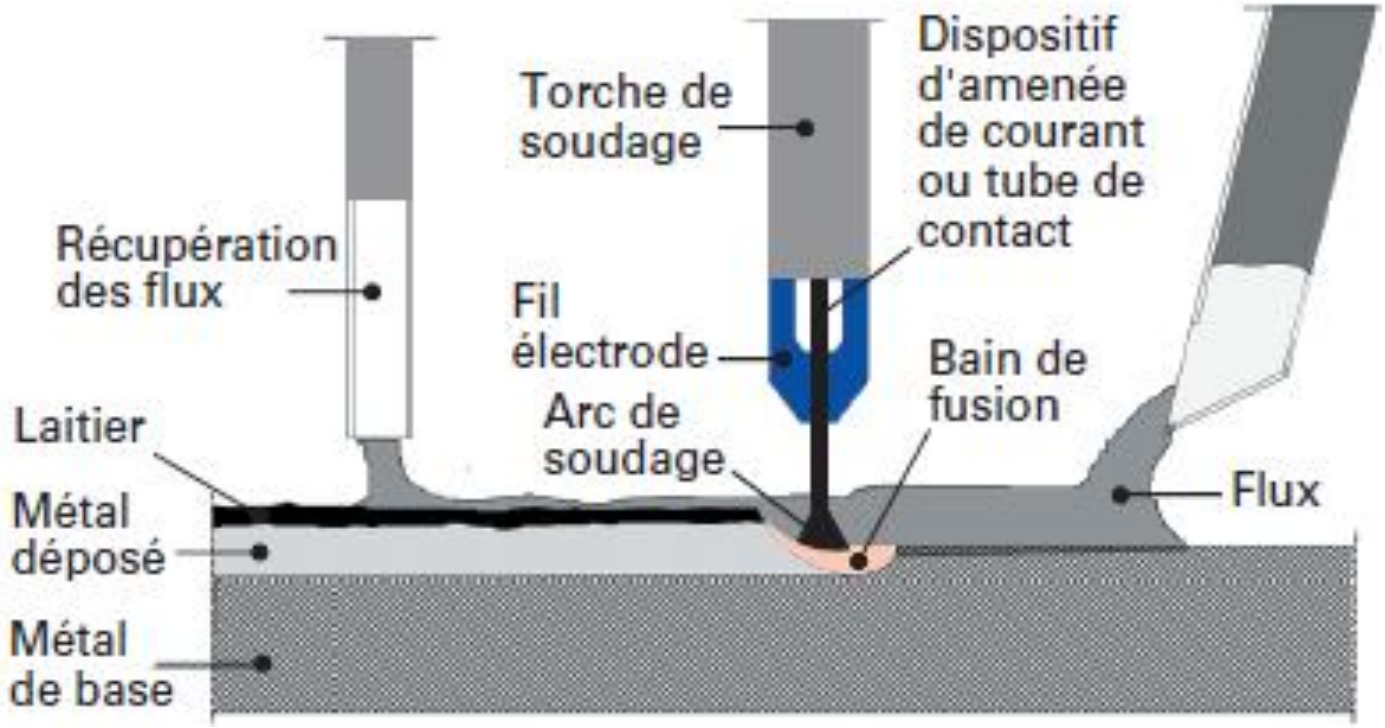
Son principal **inconvénient** est un **faible cycle de travail**, c'est-à-dire qu'il n'y a qu'un faible volume de métal déposé avant que le soudeur ne s'arrête pour insérer une autre électrode. Cela ne constitue pas un problème pour des soudures courtes, mais devient un problème pour des soudures longues, en particulier lorsque les coûts de main d'oeuvre sont élevés.

Procédés utilisés et domaines d'emploi

Soudage automatique et semi-automatique

▪ Soudage sous flux solide en poudre

C'est un procédé entièrement automatisé dans lequel **la tête de soudage se déplace de façon automatique le long du joint**. L'électrode est constituée d'un fil nu dont l'avancement est commandé par un moteur asservi.

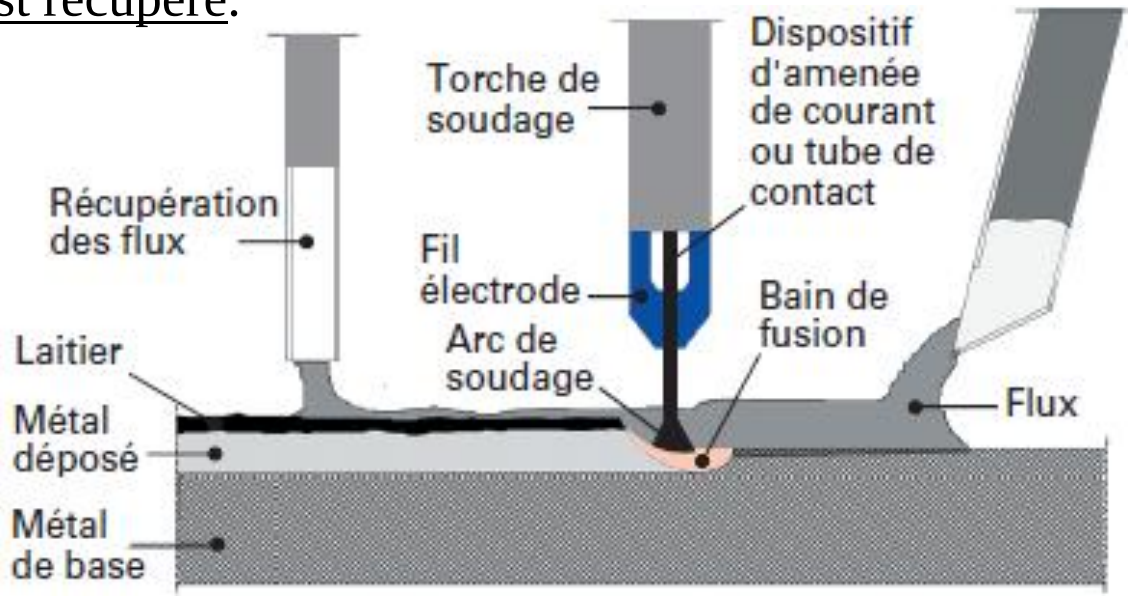


Procédés utilisés et domaines d'emploi

Soudage automatique et semi-automatique

▪ Soudage sous flux solide en poudre

Le **flux**, sous forme de particules, est déposé à la surface du joint. **L'arc électrique** est immergé sous la surface du flux dont il fond une partie pour former un **laitier** qui se solidifie immédiatement après en assurant la protection de la soudure. Le flux non fondu est récupéré.



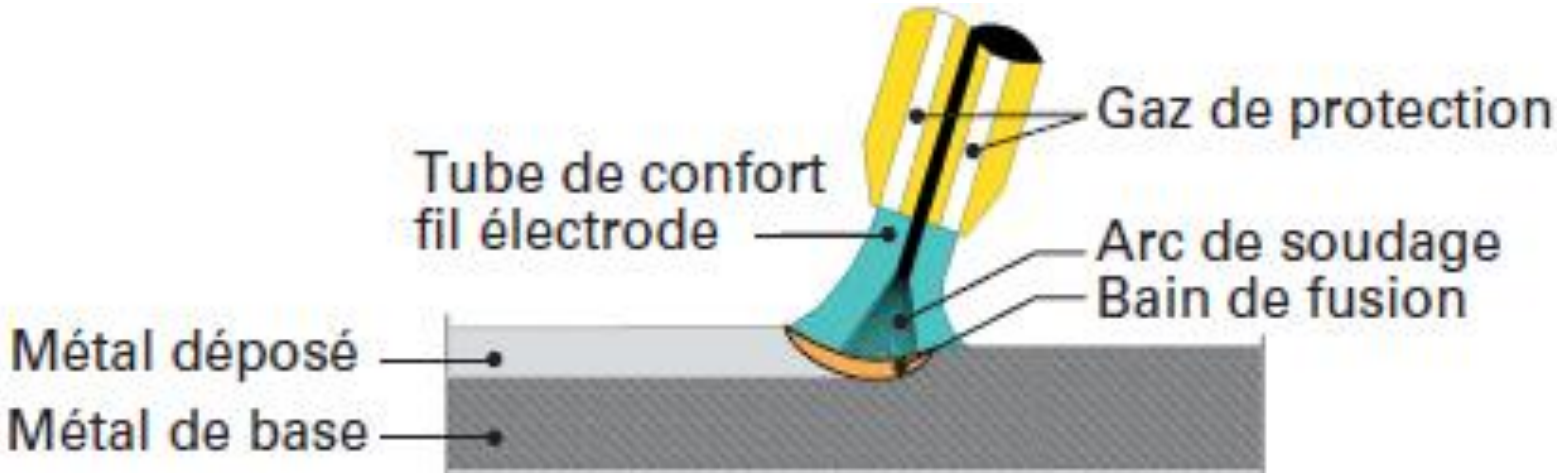
(Le soudage à l'arc sous flux en poudre nécessite des intensités comprises entre 400 et 1000 A)

Ce procédé est intéressant pour souder des **joints longs** (supérieurs à 1 m de longueur). Les vitesses de soudage élevées et l'opération en continu conduisent à une **productivité élevée**.

Procédés utilisés et domaines d'emploi

Soudage automatique et semi-automatique

- **Soudage sous flux gazeux (procédés MIG, MAG et TIG)**



Pour le ***soudage sous flux gazeux***, la ***protection*** vis-à-vis de l'atmosphère ambiante est obtenue par ***un gaz*** insufflé dans une buse concentrique à l'électrode.

- Si le **gaz est inerte**, il s'agit du procédé ***MIG (Metal Inert Gas)***;
- Si le **gaz est actif**, c'est le procédé ***MAG (Metal Active Gas)***;
- Pour certains métaux contenant beaucoup de Nickel, il existe un procédé sous flux de **gaz inerte** mais pour lequel <u>l'électrode est en Tungstène</u> et ne constitue pas le métal d'apport (ce dernier se présente par ailleurs sous forme de fil **non fusible**). Il s'agit du procédé ***TIG (Tungsten Inert Gas)***.

Soudage automatique et semi-automatique

▪ Soudage par résistance (1/2)

L'invention du soudage par résistance est due à l'Américain Thomson en 1877

Ce procédé met en œuvre **l'effet Joule** d'un courant de forte intensité traversant les pièces à assembler, mises au contact l'une de l'autre

La chaleur produite *Q* s'exprime par la formule :

$$Q = \int_0^T R I^2 \, \mathrm{d}t$$

avec *R résistance électrique rencontrée par le courant,*
I intensité du courant,
T durée du phénomène,
t variable temps.

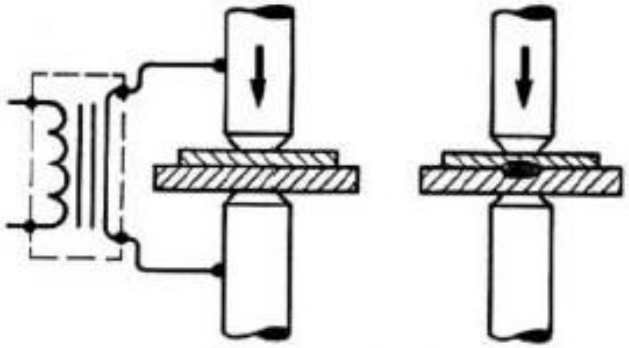
Si la puissance électrique fournie est suffisante pour compenser les pertes thermiques diverses, la chaleur produite conduit à la fusion des matériaux métalliques usuels.
Le soudage par résistance consiste à faire en sorte que cette fusion se développe dans le plan de joint des deux pièces mises en contact.

Soudage automatique et semi-automatique

▪ Soudage par résistance (2/2)

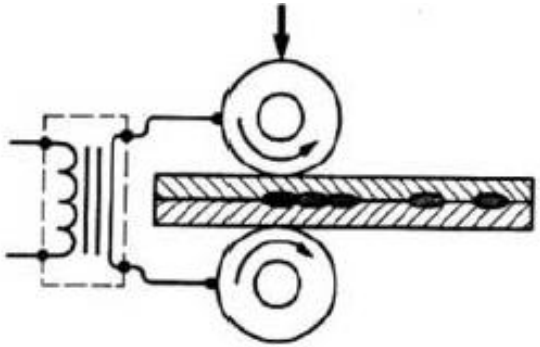
Les procédés de soudage par résistance sont les suivants**:**

❑ le **soudage par points** donnant lieu à une <u>soudure par recouvrement discontinue</u>;



ⓐ par points

❑ le **soudage à la molette** donnant lieu à une <u>soudure par recouvrement continue et étanche</u>;

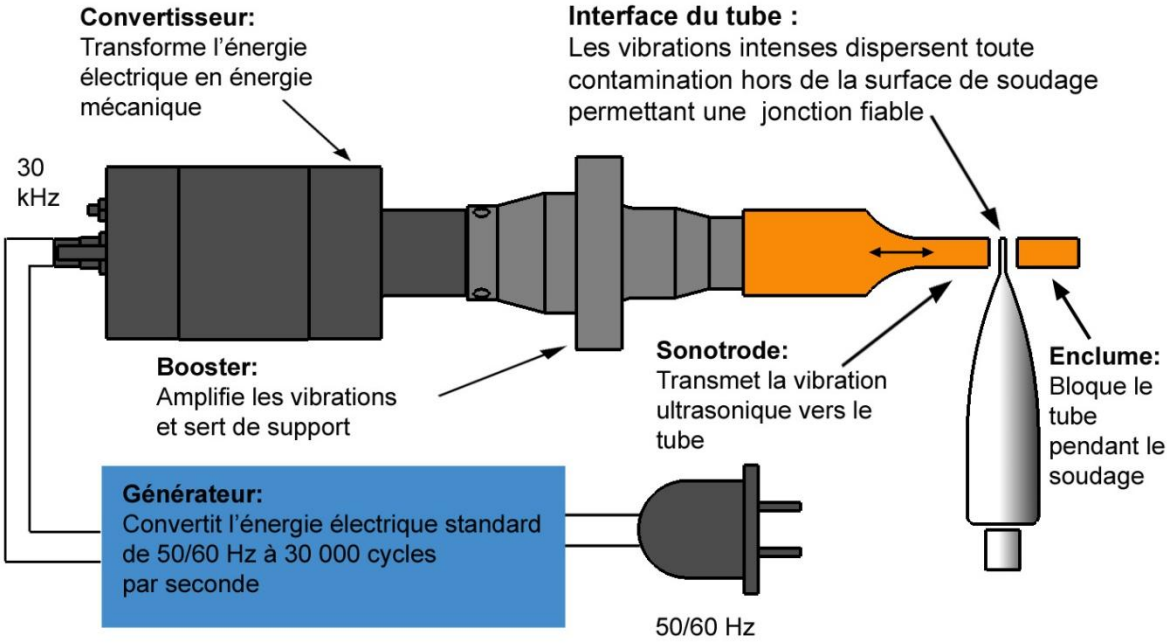


ⓑ à la molette

Soudage automatique et semi-automatique

▪ Soudage par Ultrason (1/2)

Le soudage par ultrasons est l'un des procédés les plus utilisés dans l'industrie pour **l'assemblage de pièces thermo fusibles**. Ses principales caractéristiques sont la propreté de la soudure et sa rapidité d'exécution.



Le principe du soudage consiste à **associer** une **pression d'appui** à la **vibration ultrasonore**. L'énergie ultrasons, produit un **échauffement** intense dans la matière. Elle **fusionne à l'interface** de l'assemblage.

Soudage automatique et semi-automatique

- **Soudage par Ultrason (2/2)**

Avantages

- Propreté de la soudure;
- Rapidité d'exécution;
- Pas d'agents de soudage;
- Automatisable;
- Répétitif.

Inconvénients

- Cette technique n'est possible uniquement avec des matériaux thermo fusibles;
- La mise en œuvre oblige le port du casque en raison des hautes fréquences utilisées.

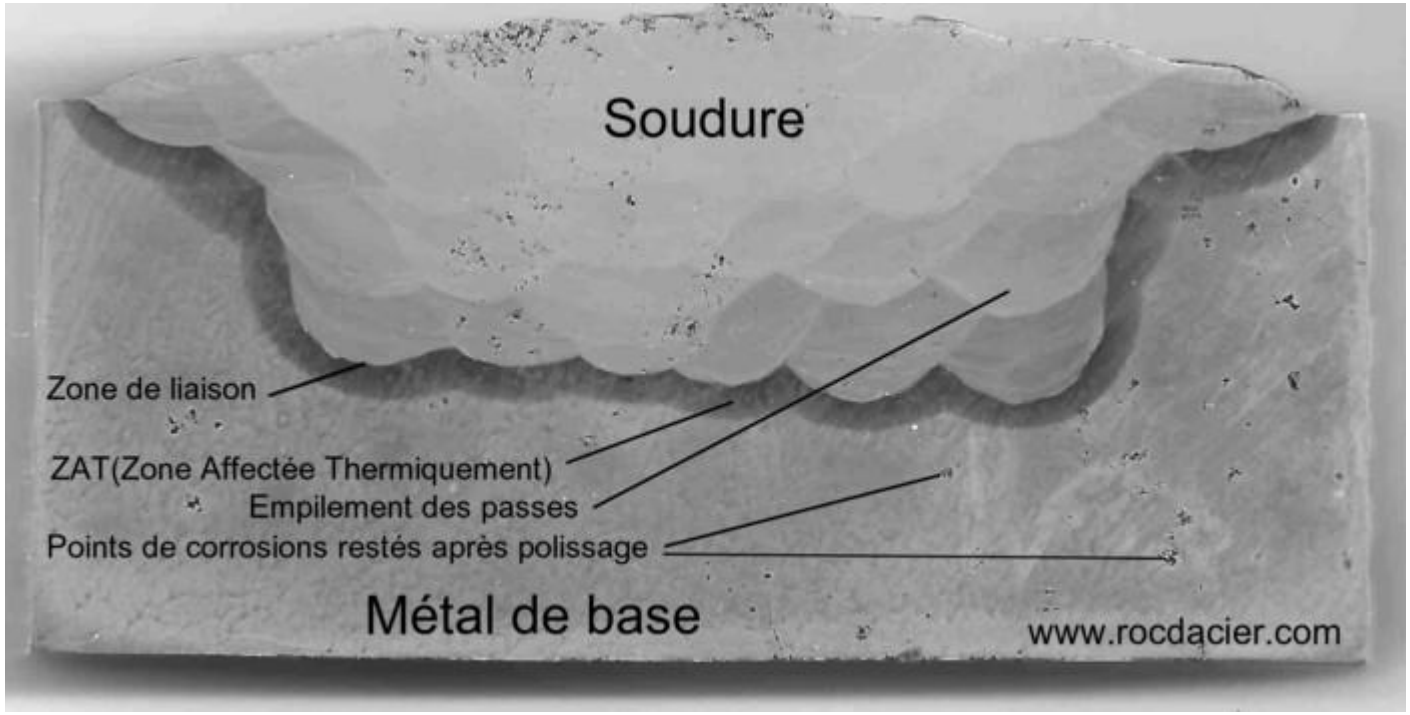
Domaines d'applications

- Dans l'automobile ;
- Dans le secteur électrique ;
- L'industrie des plastiques pour assemblage.

Phénomènes mécaniques et thermiques associés au soudage

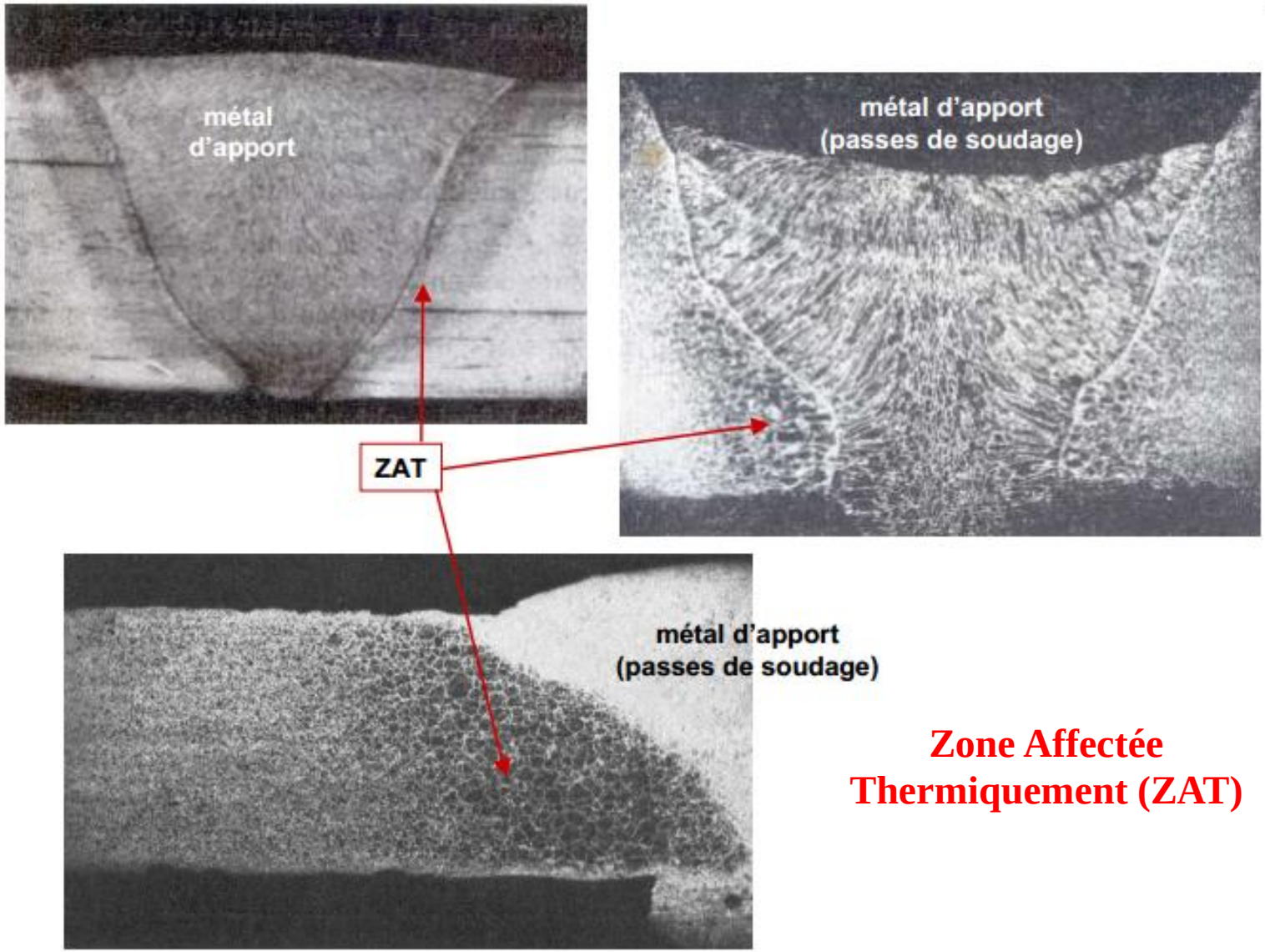
▪ Structure et propriétés des soudures

Quand le bain de fusion se refroidit et se solidifie, la plus grande partie de la chaleur **s'écoule** à travers le métal de base le long du joint. L'acier est alors soumis à des cycles d'élévation de température et de refroidissement analogues à ceux conférés par un **traitement thermique**. Dans cette **Zone Affectée Thermiquement (ZAT)**, la structure de l'acier est modifiée.



Procédés utilisés et domaines d'emploi

Phénomènes mécaniques et thermiques associés au soudage



Zone Affectée Thermiquement (ZAT)

Phénomènes mécaniques et thermiques associés au soudage

Le contrôle de la ZAT se fait par :

- **la composition de l'acier (carbone équivalent) ;**
- **la vitesse de refroidissement qui elle-même dépend :**

  - de **l'énergie de l'arc**, c'est-à-dire l'énergie linéaire de soudage sur le joint,
  - du **type de joint**,
  - de **l'épaisseur de l'acier**,
  - de **la température** du plat ou du profilé avant le soudage.

En plus de son effet sur la vitesse de refroidissement, on utilise le **préchauffage** pour :

- **disperser l'hydrogène du bain de fusion et de la ZAT**: La présence d'hydrogène dans la **ZAT** augmente le risque de fissure s'il y a trempe. L'hydrogène provient principalement du flux. Une électrode appropriée, stockée correctement, peut réduire le risque d'absorption de l'hydrogène ;
- **enlever l'humidité de surface dans des conditions d'hygrométrie élevée ou sur le chantier ;**
- **amener l'acier à des conditions ambiantes normales (20 °C).**

Phénomènes mécaniques et thermiques associés au soudage

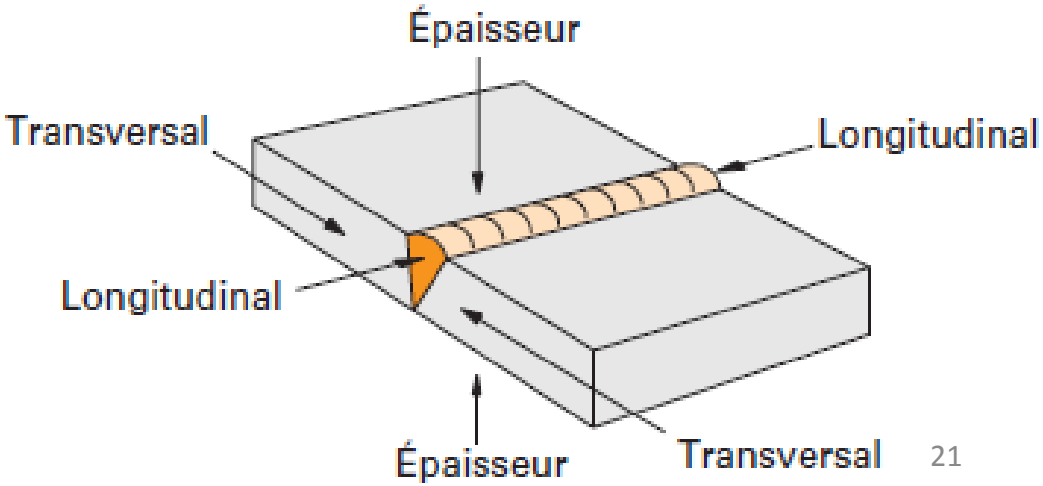
Le soudage étant associé à la fusion de l'acier puis à son refroidissement, il s'accompagne nécessairement de **phénomènes mécaniques** (développement de retrait et introduction de contraintes résiduelles dans les pièces). Un **risque de trempe** est également présent.

Retrait thermique

Pendant son refroidissement, le métal chaud de la zone de soudage se contracte, conduisant au développement de retrait dans le joint. La contraction étant gênée par le métal froid qui entoure le joint, les contraintes qui se développent, supérieures à la limite d'élasticité, créent des déformations plastiques.

Trois types de retrait sont présents :

- **longitudinal**,
- **transversal,**
- **le retrait dans l'épaisseur.**



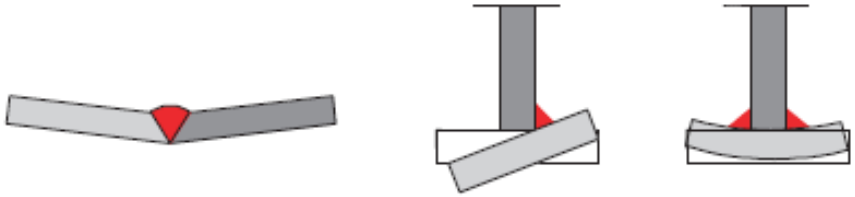
Phénomènes mécaniques et thermiques associés au soudage

❑ Retrait longitudinal

Le retrait longitudinal peut conduire à une flexion des pièces.

❑ Retrait transversal

Le retrait transversal provoque des déformations angulaires. Pour limiter ses effets, il convient de choisir judicieusement l'ordre des opérations de soudage ainsi que la dimension des cordons.

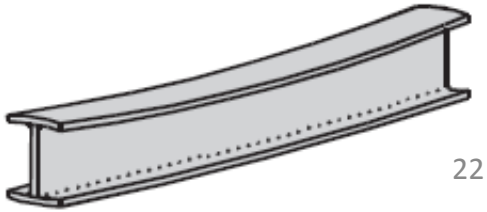


❑ Retrait dans l'épaisseur: négligeable devant le retrait longitudinal et le retrait transversal.

❑ Combinaison des types de retrait

Les effets des retraits longitudinal et transversal combinés peuvent apparaître dans le cas d'un profilé reconstitué par soudage de deux semelles sur une âme. Le retrait longitudinal est responsable du défaut de rectitude de la poutre alors que le retrait transversal provoque la courbure des semelles dans le sens transversal.

Les déformations de retrait peuvent être considérablement réduites par le choix d'une préparation des bords et d'un mode opératoire de soudages adéquats.

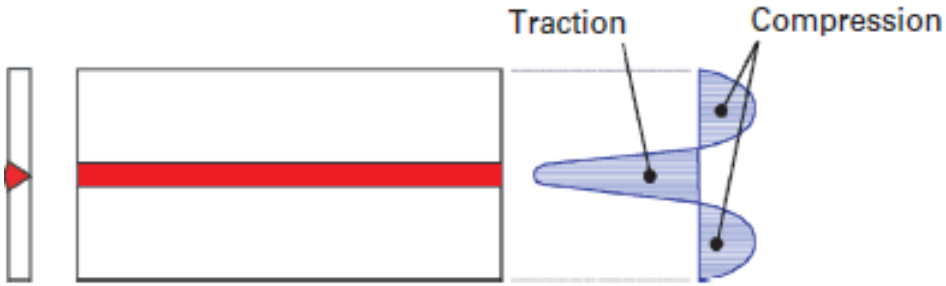


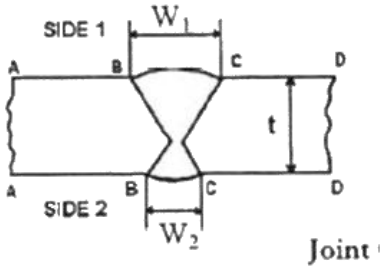
Procédés utilisés et domaines d'emploi

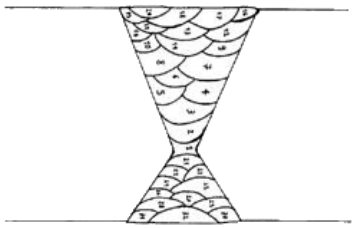
Présence de contraintes résiduelles

Quand la déformation plastique cesse, le joint est soumis à un **gradient de contraintes résiduelles** avec de la traction dans le métal fondu dans la ZAT et de la compression dans l'acier tout autour.

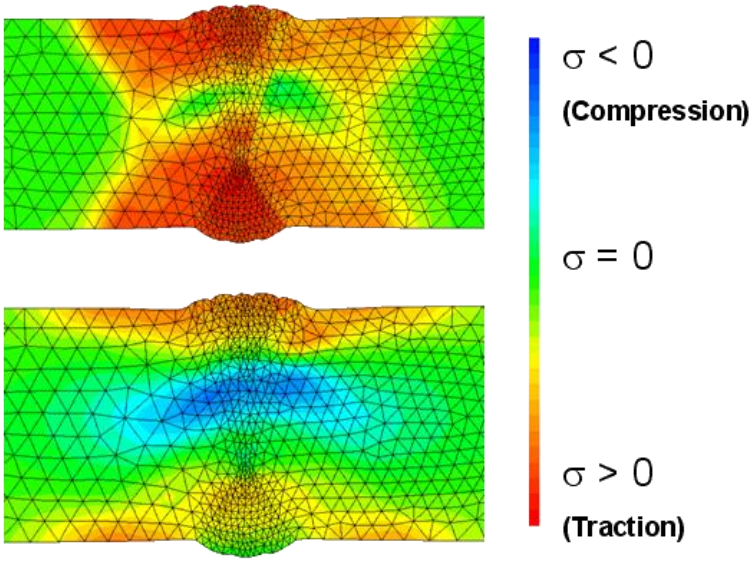
soudure bout à bout à pleine pénétration







Ordre des passes



Isovaleurs de contraintes résiduelles sur déformée × 5

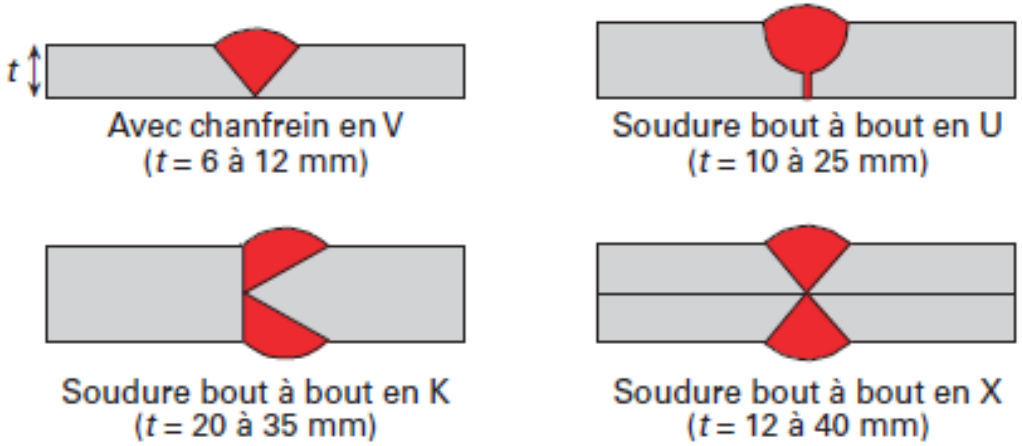
soudure bout à bout à pénétration partielle (plusieurs passes)

Types de soudures

Soudure bout à bout

Pour les soudures bout à bout, une distinction est faite entre :

- **la soudure bout à bout à pleine pénétration** (la fusion de la soudure et du métal de base sont complètes sur l'épaisseur de l'assemblage);
- **la soudure bout à bout à pénétration partielle** (la pénétration de la soudure ne s'étend pas à l'épaisseur totale de l'assemblage.



Une **soudure bout à bout** est <u>réalisée</u> sur **l'épaisseur des plats aboutés** dans un <u>assemblage bout-à-bout ou en T</u>. En règle générale, les <u>bords des plats doivent être préparés avant soudage</u>. Dans certains cas, lorsque l'épaisseur des plats est inférieure à 5 mm, on peut se dispenser de cette préparation.

Soudure d'angle

Une soudure d'angle est une soudure dont la **section transversale** est approximativement **triangulaire** et qui est déposée à la surface des plats assemblés. Aucune préparation des bords n'est requise. Selon la position relative des pièces à assembler, trois types de dispositions des soudures d'angle peuvent être envisagés:

- **assemblage à recouvrement** dans lequel les pièces à souder se trouvent dans des plans parallèles;

- **assemblage cruciforme ou en T** dans lequel les pièces à souder sont plus ou moins perpendiculaires l'une par rapport à l'autre;

- **assemblage d'angle** dans lequel les pièces sont plus ou moins perpendiculaires l'une par rapport à l'autre.

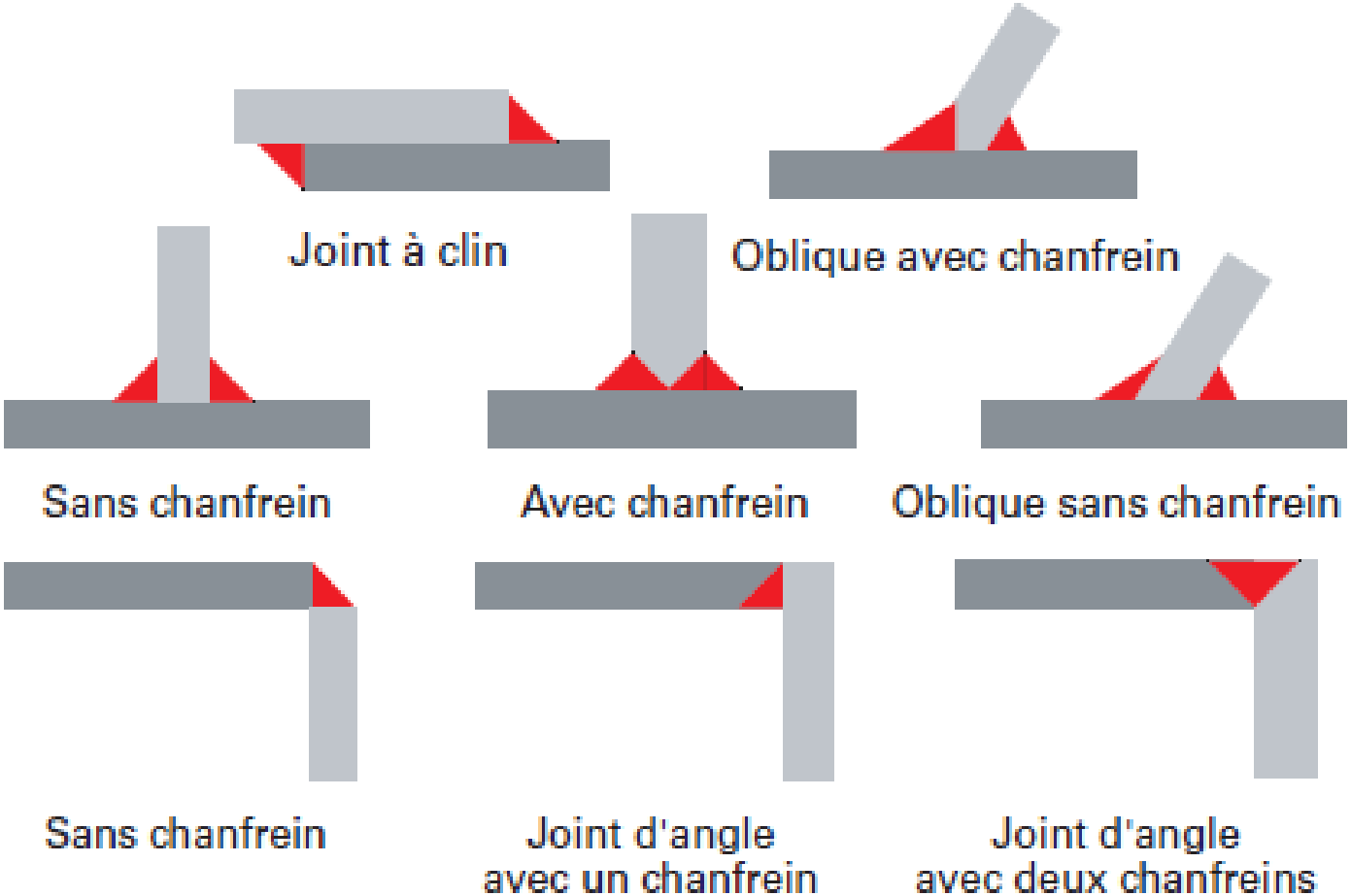
Afin d'améliorer la résistance et la rigidité de l'assemblage, des soudures bout à bout sont généralement préférées.

Types de soudures

Soudure d'angle

Les soudures d'angle qui peuvent être déposées en un seul passage sont particulièrement économiques.

En atelier, cela signifie que l'épaisseur de la soudure ne doit pas excéder 8 mm.



Normalisation des soudures

Il existe deux principaux groupes qui interviennent en matière de normalisation :

AWS: "**American Welding Society**", une organisation américaine dédiée à l'avancement de la science et des technologies reliées au soudage et à la coupe des métaux;

ASME " **American Society of Mechanical Engineering** " (notamment de la ***Section XI*** du code ASME qui traite du soudage des cuves sous pression).

Les normes élaborées par ces organismes rejoignent un large éventail de préoccupations reliées au soudage, notamment :

- La qualification des inspecteurs en soudure;
- La qualification des organismes d'inspection;
- Les métaux d'apport;
- Les règles de sécurité;
- Les codes de soudage des structures;
- etc.

Merci pour votre attention