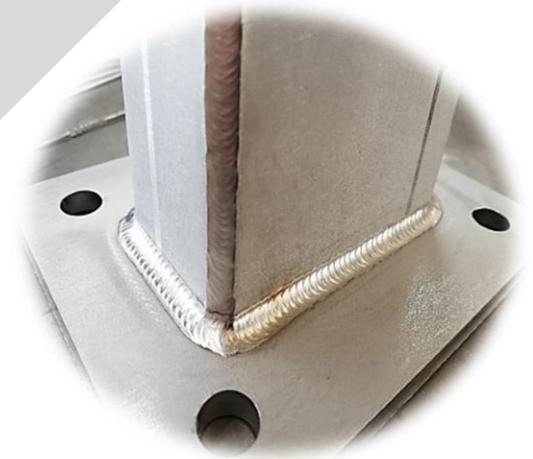


Les Assemblages Soudés



*Support de cours
Master 1 / CMM*

*Département de génie civil
Université de Batna 2*

LES ASSEMBLAGES SOUDES

Les soudures constituent la deuxième famille d'assembleurs utilisés en construction métallique. Leur mise en œuvre est obtenue par fusion localisée de métal, ce qui constitue une opération très délicate, notamment sur chantier. La qualification des opérateurs, la nature du matériel utilisé et les conditions atmosphériques de mise en œuvre sont des facteurs prépondérants, surtout que la totalité de l'effort à transmettre d'une pièce à l'autre passe par la soudure. Un défaut de mise en œuvre est évidemment préjudiciable au fonctionnement de la structure.

Il est impératif, pour tous les acteurs de la construction, d'avoir à l'esprit que la phase de réalisation est déterminante pour la résistance de la structure. Elle doit donc faire non seulement l'objet d'un soin particulier, mais aussi d'un contrôle de qualité strict.

Le principe du soudage consiste à créer une continuité de la matière entre deux pièces différentes. Dans le domaine de la construction métallique, la continuité est obtenue par la création d'un cordon de soudure provenant de la fusion d'une partie des pièces à assembler (métal de base) et d'un métal d'apport sous forme d'électrode. La fusion est provoquée par le passage d'un courant électrique de forte intensité entre l'électrode et le métal de base au travers d'un arc électrique ainsi créé.

Le soudage présente, par rapport au boulonnage, plusieurs avantages:

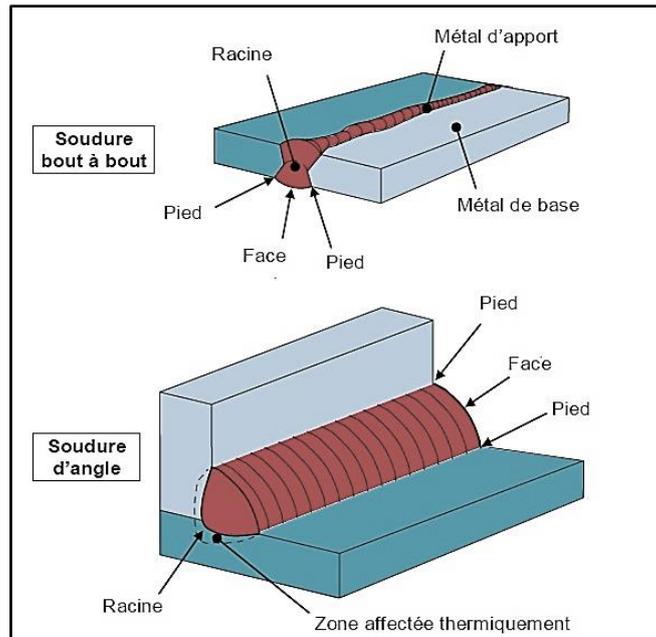
- Il assure la continuité de matière, et de ce fait garantit une étanchéité et une bonne transmission des sollicitations.
- Il dispense de pièces secondaire (goussets, attaches, etc.)
- Il est moins encombrant et plus esthétique que le boulonnage.

En revanche, il présente divers inconvénients:

- Le métal de base doit être soudable.
- Le contrôle des soudures est nécessaire.
- Le soudage exige une main d'œuvre qualifiée et un matériel spécifique.

Terminologie :

Les termes employés pour caractériser les soudures sont les suivants :



- *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 repérée sur la face de la soudure, entre le métal de base et le métal d'apport ;

Procédés de soudage en construction métallique :

En plus des fonctions essentielles que sont la fusion et l'apport de métal nécessaire à la création du cordon de soudure, les procédés doivent protéger chimiquement le cordon en fusion. En effet, l'hydrogène existant par la décomposition de la vapeur d'eau à très haute température est très préjudiciable à la résistance mécanique de la soudure car il favorise la création d'inclusion susceptible d'amorcer des microfissures.

L'hydrogène est présent dans l'environnement général du poste de soudage (vapeur d'eau) mais aussi dans les graisses ou dans l'oxydation du métal de base. Dans ces derniers cas, un nettoyage peut diminuer sa présence. En ce qui concerne les conditions atmosphériques, c'est le procédé lui-même qui devra protéger le cordon de l'hydrogène, soit par une protection solide, soit par une protection gazeuse.

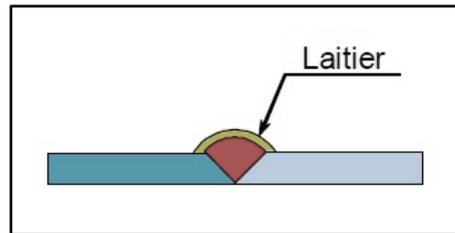
Les procédés de soudage utilisés en construction métallique peuvent être classés en trois catégories :

- *Le soudage manuel* : qui reste le seul moyen possible pour réaliser des soudures d'accès difficile ou des soudures de petite longueur ;
- *Le soudage semi-automatique* : qui procède par avancement automatique de l'électrode avec une torche tenue à la main. Ce procédé de soudage est le plus couramment utilisé ;
- *Le soudage automatique* : pour lequel la tête de soudage est montée, soit sur un chariot dont l'avancement est automatique, soit sur un robot de soudage. Il permet notamment de réaliser des soudures continues d'une certaine longueur : assemblage âme - semelles des profilés reconstitués soudés (PRS) par exemple.

❖ Soudage manuel à l'arc avec électrodes enrobées :



Le soudage avec électrode enrobée constitue l'un des modes opératoires de soudage à l'arc le plus répandu. Il nécessite un personnel très qualifié pour que les soudures ainsi réalisées soient de bonne qualité. L'électrode est constituée d'un cœur en acier d'un diamètre de 3 à 8 mm et d'un flux d'enrobage périphérique contenant des éléments alliés (manganèse et silice par exemple). La source de chaleur provient d'un arc électrique de faible voltage (15 à 35 V) mais d'intensité élevée (jusqu'à 500 A). L'arc fait fondre à la fois le métal de base (très localement) et l'électrode. Au fur et à mesure que le métal est transféré de l'extrémité de l'électrode vers le bain de fusion, le soudeur déplace l'électrode de manière à maintenir la longueur de l'arc sensiblement constante car celle-ci conditionne la largeur du cordon. Le flux, également fondu, se dépose à la surface du bain de fusion pour former un laitier qui doit être enlevé après la solidification de la soudure.



Cette technique présente les avantages suivants :

- Faibles investissements,
- Liberté de mouvement (on peut l'utiliser jusqu'à une distance de 20 m depuis l'alimentation électrique, ce qui est intéressant sur chantier),
- Possibilité de mise en œuvre quelle que soit la position de soudage.

Son principal inconvénient est un faible cycle de travail, c'est-à-dire qu'il n'y a qu'un petit volume de métal déposé avant que le soudeur n'interrompe son travail pour insérer une nouvelle électrode. Ceci ne constitue pas une réelle difficulté pour des soudures courtes, mais devient un problème pour des soudures longues, en particulier lorsque les coûts de main d'œuvre sont élevés. En outre, ce travail par étapes successives crée des reprises au sein du cordon de soudure, reprises qui peuvent conduire à des défauts géométriques et des inclusions de laitier par exemple.

❖ *Soudage à l'arc sous flux en poudre :*

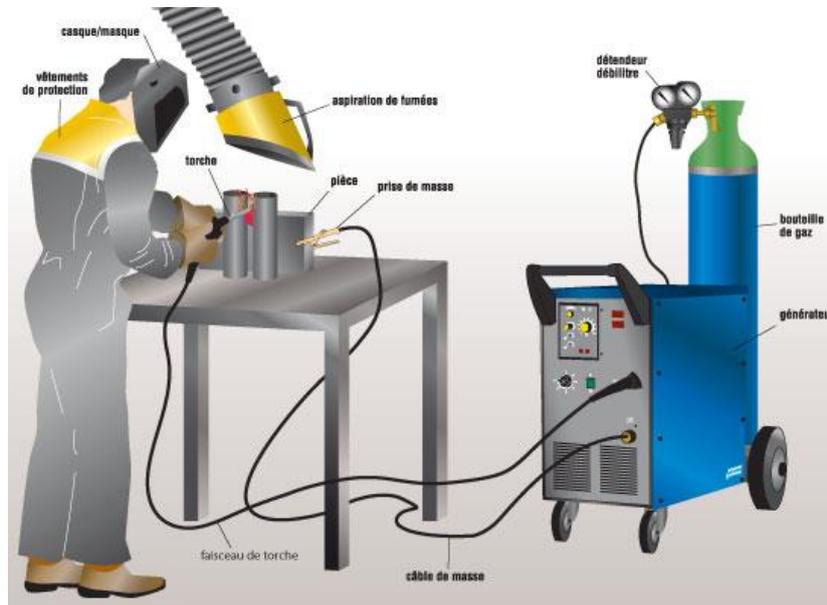
L'électrode est constituée d'un fil nu, disponible en bobine, dont l'avancement est commandé par un moteur asservi. Le flux, qui se présente sous forme de fines particules, est déposé en continu à la surface du joint, juste en avant de la torche de soudage. L'arc électrique est immergé sous la surface du flux dont il fond une partie pour former un laitier qui se solidifie immédiatement après, assurant ainsi la protection de la soudure vis-à-vis de l'air ambiant. Le flux non fondu est récupéré dans le but d'être réutilisé.

Le soudage à l'arc sous flux en poudre nécessite généralement des intensités de courant électrique comprises entre 400 et 1000 A. Ce procédé est particulièrement intéressant pour réaliser des joints soudés longs (supérieurs à 1 m de longueur). Les vitesses de soudage élevées et l'opération en continu autorisent une productivité élevée.

❖ *Soudage à l'arc sous flux gazeux :*

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 au fil d'électrode. Si le gaz utilisé est inerte, c'est-à-dire une atmosphère protectrice chimiquement inerte (généralement de l'argon ou de l'hélium), il s'agit du procédé **MIG** (abréviation de Metal Inert Gas). Si le

gaz est actif (du dioxyde de carbone ou un mélange argon/dioxyde de carbone), il s'agit du procédé **MAG** (Metal Active Gas).



Il existe d'autres procédés de soudage qu'on peut utiliser mais dans des domaines bien spécifiques tels que :

- ❖ Procédé par résistance électrique : Les pièces sont superposées et placées entre deux électrodes-presse, qui réalisent des soudures par points. Procédé utilisable pour les tôles minces seulement.
- ❖ Procédé au laser : Dans ce procédé, le laser émet un faisceau de photons et une lentille focalise l'effet thermique du rayonnement sur un point très concentré (quelques microns). Il existe deux types de lasers : le laser de puissance, qui extrait ses photons d'un mélange gazeux (gaz carbonique, azote, hélium) et le laser à impulsion d'un mélange solide. D'une très grande précision, ce procédé est surtout utilisé en mécanique de précision.

Contrôle des soudures :

La qualité des soudures peut être contrôlée par différentes méthodes qui sont :

- Le contrôle visuel ;
- Le contrôle par ressuage ;
- Le contrôle par magnétoscopie ;
- Le contrôle par radiographie ;
- Le contrôle par ultrasons ;

Toutes ces méthodes correspondent à des contrôles non destructifs et elles sont généralement effectuées quelques heures après réalisation de la soudure. Ce délai dépend de l'épaisseur du cordon, de l'énergie de soudage et de la nuance d'acier des pièces assemblées.

Les contrôles par radiographie ou par ultrasons s'appliquent en général aux soudures bout à bout. Les premiers permettent de détecter des défauts volumiques (inclusions ou petites cavités) mais ils sont peu efficaces pour les fissures (surtout celles qui sont parallèles à la direction des rayons X). De plus, ils nécessitent un appareillage relativement complexe. Les seconds sont plus efficaces en ce qui concerne la détection des fissures et les défauts de collage mais ils doivent être effectués par un personnel très qualifié car l'interprétation des clichés est assez délicate.

Les contrôles par ressuage ou par magnétoscopie sont utilisés pour les cordons d'angle. Ils sont faciles à exécuter et ne nécessitent pas de matériel important. Ils permettent de détecter des fissures superficielles ou celles débouchant à la surface des cordons. Ces deux méthodes sont assez fiables.

Toutes les soudures doivent subir un contrôle visuel sur toute leur longueur. Si des défauts sont constatés, un contrôle par ressuage ou par magnétoscopie est systématiquement effectué. La norme EN 1090-2, explicite les exigences à respecter dans ce domaine.

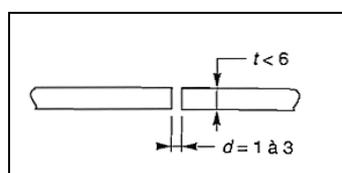
Types de soudures :

On peut distinguer deux grandes familles d'assemblage soudé : ceux pour lesquels les joints sont conçus de sorte à reconstituer directement la continuité de la matière « *soudures bout à bout* », et ceux pour lesquels la transmission des efforts s'effectue par le biais de cordons d'angle « *soudures d'angle* »

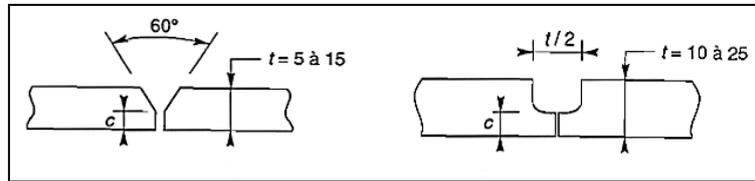
-Soudures bout à bout : pour les soudures bout à bout, une distinction est faite entre :

- La soudure bout à bout à pleine pénétration pour laquelle la pénétration et 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 pour laquelle la pénétration de la soudure ne s'étend pas sur l'épaisseur totale de l'assemblage.

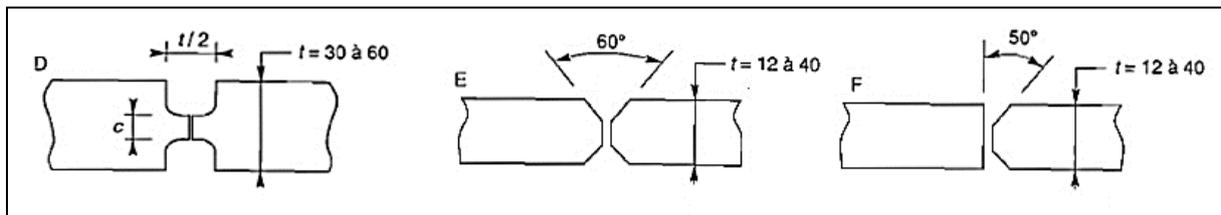
Pour les pièces ne dépassant pas 6mm d'épaisseur, les soudures peuvent être effectuées sur des pièces non chanfreinées.



Au-delà de 6 mm, il faut réaliser des chanfreins sur les rives des pièces. Les chanfreins en V et en U permettent de souder sans retourner la pièce, mais donnent lieu, lors du refroidissement, à de fortes déformations angulaires. Le chanfrein en U est plus onéreux, du fait de l'usinage.



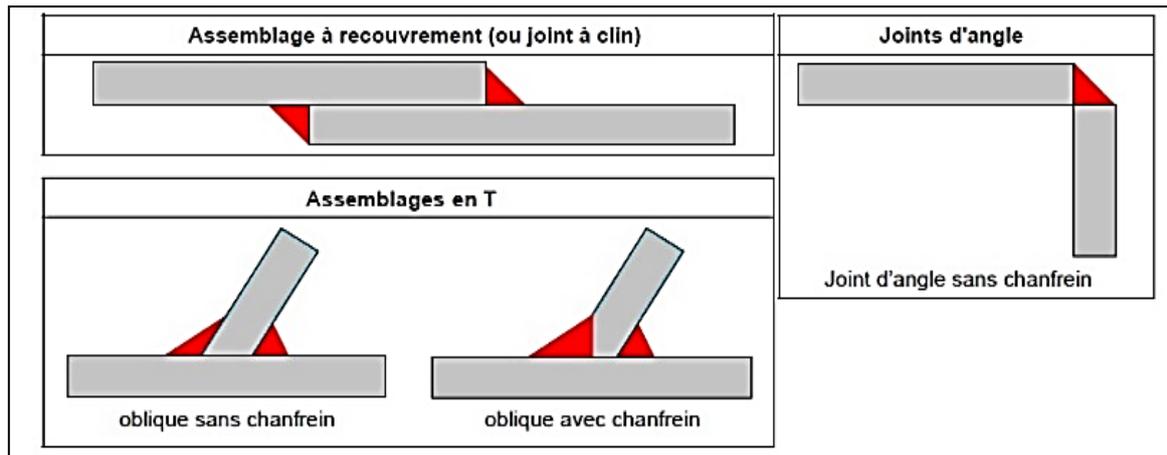
Les chanfreins en double U ou en double V , symétriques, éliminent les phénomènes de déformations ou de contraintes internes, si les cordons sont exécutés simultanément sur les deux faces, par tronçons alternés. En outre, ils permettent une économie sur le métal d'apport et sur le temps de main d'œuvre (nombre de passes).



-Soudures 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. Selon la position relative des pièces à assembler, on peut envisager deux types de disposition de soudure :

- Assemblage à recouvrement (ou à clin) dans lequel les pièces à souder se trouvent dans des plans parallèles.
- Assemblage en T dans lequel les pièces à souder sont plus ou moins perpendiculaires l'une par rapport à l'autre.
- Joint d'angle dans lequel, là encore, les pièces sont plus ou moins perpendiculaires l'une par rapport à l'autre mais où aucune pièce ne déborde de chaque côté de l'autre pièce.

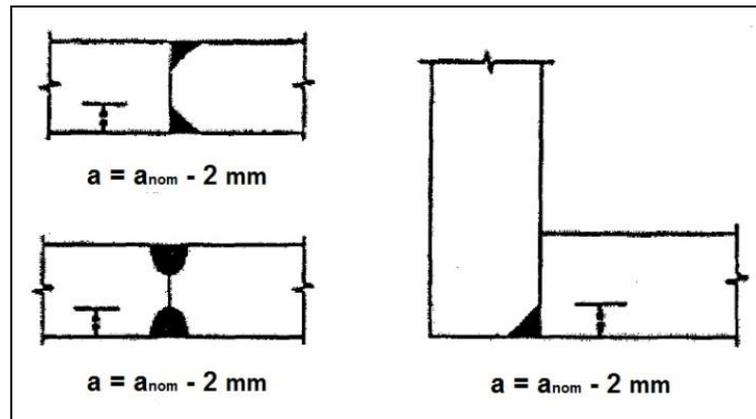


Calcul des cordons de soudure:

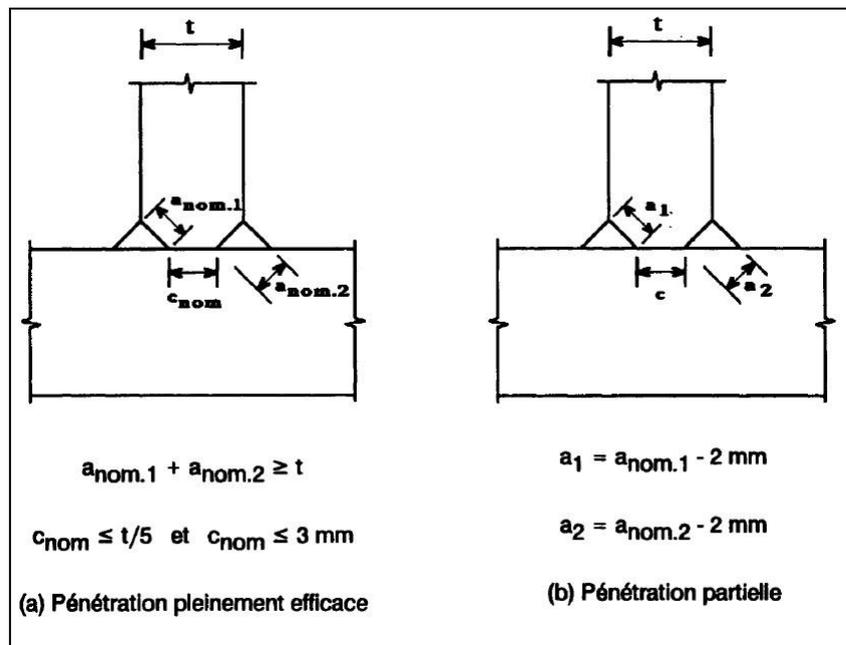
- Calcul des soudures bout à bout: si la procédure de soudage est correctement suivie, le métal d'apport des soudures bout à bout peut être assimilé au métal de base. Pour la détermination de la résistance de l'assemblage, le calcul est donc fondé sur l'aire de la section de gorge, c'est-à-dire de la zone de pénétration.

En fonction de la pénétration, deux types de soudures bout à bout sont définies : soudures à pénétration complète ou partielle.

- Dans le cas d'une soudure bout à bout à *pénétration complète*, aucun calcul n'est nécessaire dans la mesure où la résistance du métal d'apport est au moins équivalente à celle du matériau de base de l'élément assemblé le plus faible. Dès lors que la pénétration concerne toute l'épaisseur des plats à assembler, on restaure en quelque sorte la continuité et la section résistante n'est donc pas diminuée. On peut simplement considérer que la soudure bout à bout se substitue au matériau de base.
- Dans le cas d'une soudure bout à bout à *pénétration partielle*, l'épaisseur de cordon de soudure à considérer est la profondeur de pénétration, légèrement réduite. Selon l'EN 1993 1-8, l'épaisseur de cordon doit être prise égale à la profondeur de pénétration minorée de 2mm ; dans cette définition, la profondeur de pénétration s'identifie à la profondeur du chanfrein.

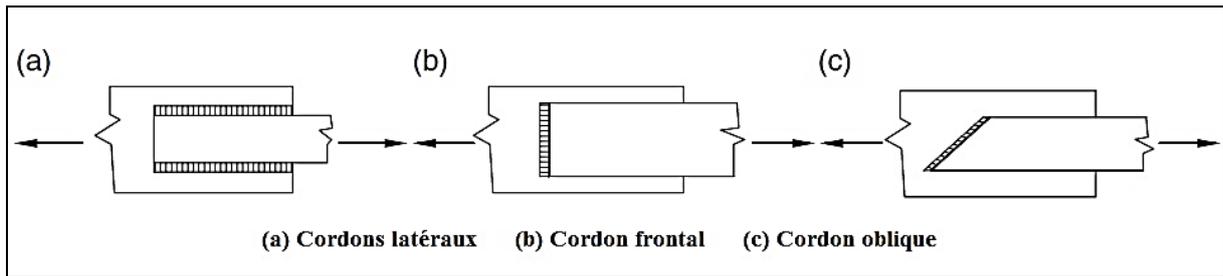


Un assemblage en T réalisé à l'aide d'une soudure bout à bout à pénétration partielle à laquelle viennent se superposer des soudures d'angle, peut être considéré au même titre qu'une soudure bout à bout à pénétration complète si l'épaisseur totale de cordon est supérieure à l'épaisseur du matériau à assembler et si le talon « C » est inférieur à la plus petite des deux valeurs (3mm ou $t/5$)



➤ Calcul des soudures d'angle :

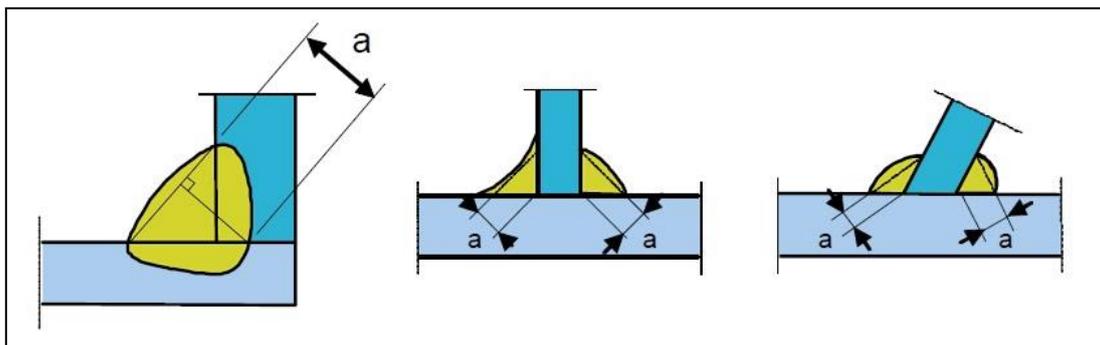
C'est la direction de l'effort à transmettre qui permet de distinguer le type de cordon à retenir pour le calcul. Les cordons frontaux sont perpendiculaires à la direction de l'effort, les cordons latéraux y sont parallèles et les cordons obliques sont orientés d'un angle quelconque.



Gorge utile

La gorge utile d'une soudure d'angle « a », encore appelée rayon de gorge, est prise égale à la hauteur du plus grand triangle pouvant s'inscrire à l'intérieur des faces à souder et de la surface libre de la soudure. Elle est mesurée perpendiculairement au côté extérieur de ce triangle.

La gorge utile « a » représente donc la distance minimale entre la racine du cordon et la corde de la surface libre de la soudure. La figure ci-dessous définit la gorge utile pour une soudure bout à bout et une soudure d'angle.



Il convient que la gorge utile d'une soudure d'angle ne soit pas inférieure à 3mm . L'abaque de la figure ci-dessous permet de déterminer la gorge utile minimale d'un cordon en fonction de l'épaisseur des tôles à assembler.

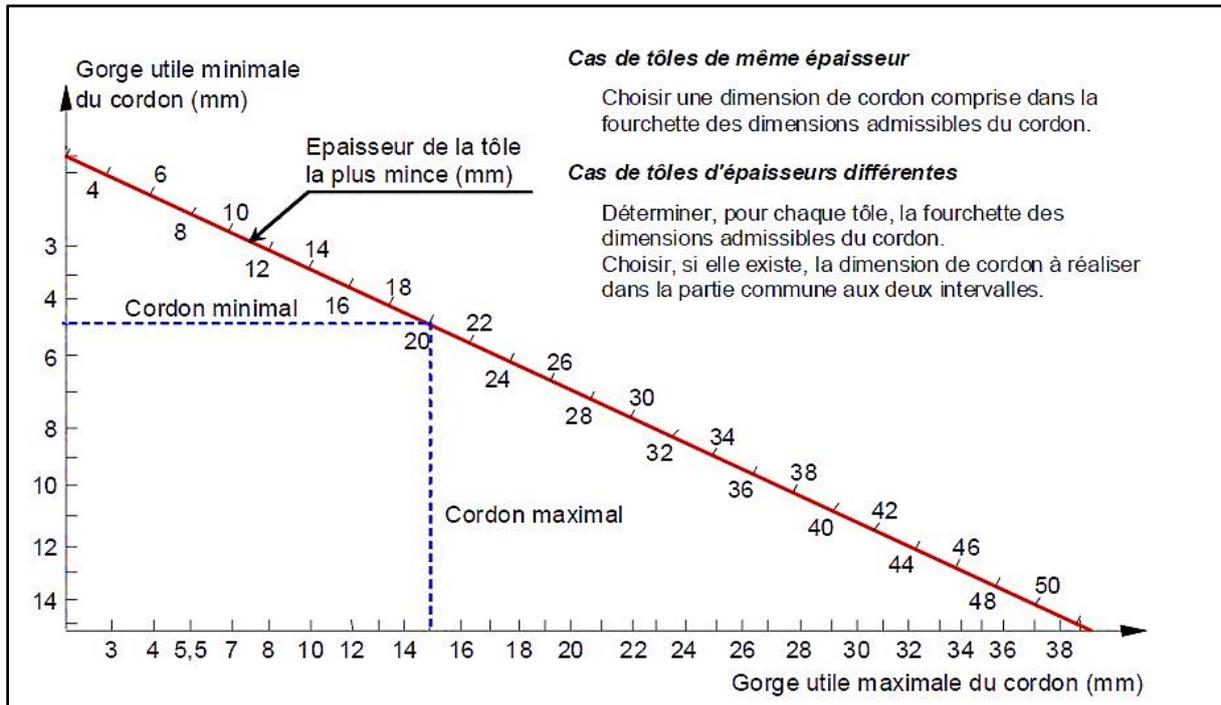
Longueur utile d'une soudure d'angle

La longueur utile d'une soudure d'angle doit être prise égale à sa longueur totale avec pleine épaisseur, incluant les retours à ses extrémités, à condition que la soudure garde son épaisseur entière sur toute la longueur. Une réduction de la longueur utile n'est pas nécessaire, ni au début ni à la fin de la soudure.

La soudure ne peut garder son épaisseur entière que dans le cas où des précautions particulières sont respectées dans l'exécution du soudage. Dans le cas général, la longueur réelle de la soudure

sera diminuée de la longueur de la zone d'amorçage et du cratère d'extrémité. Cette réduction étant prise forfaitairement égale à deux fois la gorge utile « a ».

Pour supporter un effort, il convient de ne pas prévoir de soudure d'angle d'une longueur utile inférieure à 40 mm ou à 6 fois son épaisseur de gorge. En outre, les soudures dont la longueur utile est inférieure à la plus grande des deux valeurs suivantes (40 mm ou 6 fois l'épaisseur de la gorge) devraient être ignorées pour la reprise des efforts.



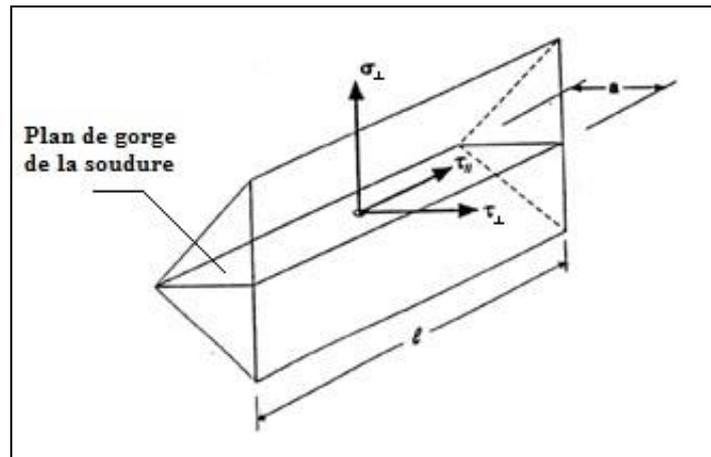
Résistance d'un cordon d'angle :

La résistance de calcul d'une soudure d'angle peut être déterminée soit par *la méthode directionnelle* soit par *la méthode simplifiée*.

- Méthode directionnelle :

Le calcul des soudures d'angle dépend de ses caractéristiques mécaniques et géométriques à condition que les propriétés mécaniques du métal d'apport soient compatibles avec celles du matériau de base.

La section résistante à considérer, appelée section de gorge, est représentée sur la figure ci-dessous. Cette aire s'exprime comme étant le produit du rayon de gorge « a » par la longueur utile de la soudure.



L'état de contraintes qui réside dans le plan de gorge s'exprime en fonction de la contrainte normale σ_{\perp} et de la contrainte tangentielle τ qui peut se décomposer en τ_{\perp} et $\tau_{//}$.

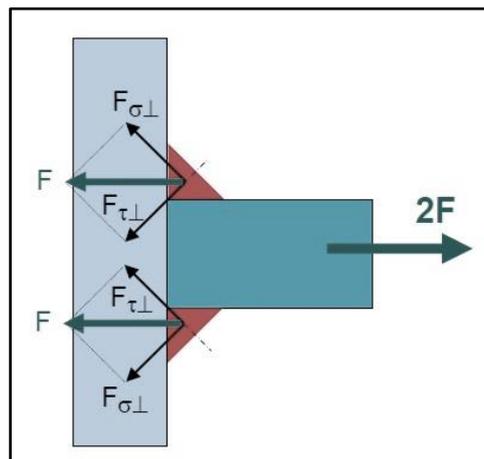
σ_{\perp} : contrainte normale perpendiculaire à la gorge ;

τ_{\perp} : contrainte de cisaillement (dans le plan de la gorge) perpendiculaire à l'axe de la soudure ;

$\tau_{//}$: contrainte de cisaillement (dans le plan de la gorge) parallèle à l'axe de la soudure ;

On suppose que la distribution des contraintes est uniforme dans le plan de la gorge de la soudure, ce qui conduit aux contraintes normales et tangentielles suivantes :

$$\sigma_{\perp} = \frac{F_{\sigma_{\perp}}}{aL} ; \tau_{\perp} = \frac{F_{\tau_{\perp}}}{aL} ; \tau_{//} = \frac{F_{\tau_{//}}}{aL}$$



L'application du critère de Von Mises fournit la valeur de la contrainte équivalente σ_{eq} dans la section de gorge de la soudure :

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3.(\tau_{\perp}^2 + \tau_{//}^2)}$$

La soudure d'angle est adéquate si les conditions suivantes sont satisfaites :

$$\sigma_{eq} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} \quad \text{et} \quad \sigma_{\perp} \leq \frac{0,9 f_u}{\gamma_{M2}}$$

Où :

f_u : résistance nominale ultime à la traction de la pièce assemblée la plus faible.

γ_{M2} : Coefficient partiel de sécurité.

β_w : facteur de corrélation fonction de la nuance d'acier utilisé.

nuances d'acier		β_w
f_y	f_u	
235 MPa	360 MPa	0,80
275 MPa	430 MPa	0,85
355 MPa	510 MPa	0,90

-Pour les cordons frontaux : les différentes contraintes s'écrivent :

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{F}{A_w} \cos(45^\circ) = \frac{F}{a \sum L \sqrt{2}} ; \quad \tau_{//} = 0$$

En introduisant ces contraintes dans l'expression du critère de *Von Mises* :

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot (\tau_{\perp}^2 + \tau_{//}^2)}$$

On obtient finalement :

$$\frac{F}{a \sum L} \leq \frac{f_u}{\sqrt{2} \beta_w \gamma_{M2}}$$

-Pour les cordons latéraux : les différentes contraintes s'écrivent :

$$\tau_{//} = \frac{F}{A_w} = \frac{F}{a \sum L} ; \quad \sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = 0$$

Introduites dans l'expression du critère de *Von Mises*, nous obtenons :

$$\frac{F}{a \sum L} \leq \frac{f_u}{\sqrt{3} \beta_w \gamma_{M2}}$$

-Pour les cordons obliques : la même procédure peut être suivie en décomposant la charge en composantes parallèle et perpendiculaire à l'axe longitudinale de la soudure. Les composantes des contraintes normale et tangentielle seront évaluées à leur tour et seront introduites dans l'expression de la contrainte équivalente qui doit satisfaire la condition de résistance.

$$\frac{F}{a \sum L} \leq \frac{f_u}{\sqrt{3 - \sin^2(\alpha)} \beta_W \gamma_{M2}}$$

▪ Méthode simplifiée :

Comme alternative à la méthode directionnelle, la résistance d'une soudure d'angle peut être supposée appropriée si, en chaque point de sa longueur, la résultante de tous les efforts par unité de longueur transmis par la soudure satisfait le critère suivant :

$$F_{w.Ed} \leq F_{w.Rd} = F_{vw.d} \cdot a$$

Où:

$F_{w.Ed}$: valeur de calcul de l'effort exercé dans la soudure par unité de longueur ;

$F_{w.Rd}$: résistance de calcul de la soudure par unité de longueur.

$F_{vw.d}$: résistance de calcul en cisaillement de la soudure qui se détermine par l'expression :

$$F_{vw.d} = \frac{f_u}{\sqrt{3} \beta_W \gamma_{M2}}$$

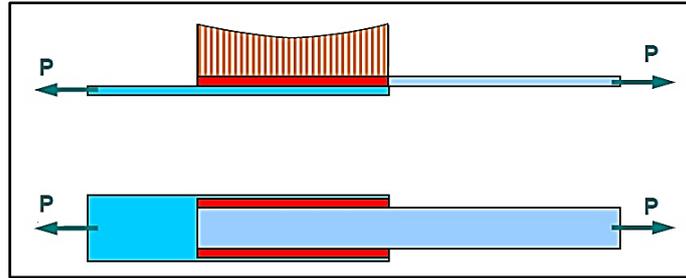
Dans cette méthode, on assimile la résistance de la soudure à la résistance en cisaillement et ce, indépendamment de la direction de l'effort appliqué. Comme la résistance la plus faible de la soudure est obtenue en cisaillement pur, la méthode simplifiée se révèle toujours sécuritaire.

Soudures longues :

La figure ci-dessous illustre la distribution élastique des contraintes dans les soudures longues d'assemblage à recouvrement. La distribution est analogue à celle observée dans les joints boulonnés d'une certaine longueur.

Des contraintes plus importantes apparaissent aux extrémités de la soudure. Sous sollicitation croissante, celles-ci sont les premières à se plastifier et la plastification progresse ensuite le long de la soudure, contribuant ainsi à une certaine uniformisation de la distribution des contraintes dans la soudure. Toutefois, si l'assemblage soudé est suffisamment long, on ne peut atteindre la distribution

uniforme parce que les extrémités atteignent préalablement leur capacité de déformation à la rupture.



L'EN 1993-1-8 préconise de réduire la résistance de calcul d'une soudure longue d'un assemblage à recouvrement par un facteur β_{Lw} qui traduit les effets de la distribution non uniforme des contraintes lorsque l'assemblage à recouvrement une longueur de $150 a$.

$$\beta_{Lw} = 1,2 - \frac{0,2 L_j}{150 a} \leq 1$$

L_j : est la longueur totale du recouvrement dans le sens de l'effort.

Cas de charge courants dans les soudures et leur contrainte correspondante :

$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{F_{Ed}\sqrt{2}}{4a l_{eff}} ; \tau_{\parallel} = 0$	$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{F_{Ed}\sqrt{2}}{4a l_{eff}} ; \tau_{\parallel} = 0$	$\tau_{\parallel} = \frac{F_{Ed}}{2a l_{eff}} \text{ Pour } l_{eff} \leq 150a ; \sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = 0$
$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{M_{Ed}}{\sqrt{2} a l_{eff} b} ; \tau_{\parallel} = 0$	<p>En A et B : $\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{3 M_{Ed}}{\sqrt{2} a l_{eff}^2} ; \tau_{\parallel} = 0$</p> <p>En C : $\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = 0 ; \tau_{\parallel} = 0$</p>	