

CHAPITRE 6

Les assemblages soudés

6.1 Généralités sur les assemblages soudés

Le soudage est un procédé d'assemblage qui permet d'assembler de façon permanente deux éléments métalliques provoquant la fusion des pièces adjacentes. En comparant les assemblages soudés aux assemblages boulonnés, cloués ou rivetés, il apparaît que les premiers sont monolithiques par nature et sont en même temps plus rigides et moins complexes, laissant plus de liberté au concepteur. Ces avantages sont contrebalancés par la nécessité d'exigences supplémentaires en matière de détails et de fabrication, notamment en ce qui concerne l'assurance et la vérification de la qualité des assemblages soudés, afin d'éviter toute perte partielle potentielle de résistance ou de rigidité, voire des ruptures fragiles. C'est la raison pour laquelle le processus de soudage doit toujours être effectué par des soudeurs qualifiés. En fait, la zone de soudure, en raison des concentrations de contraintes provoquées à la fois par les effets thermiques et les effets du chemin de charge, est un endroit critique pour la formation et la propagation des fissures.

Dans les assemblages soudés, les éléments assemblés sont identifiés en tant que matériau de base, tandis que le matériau de soudage, le cas échéant, désigne le matériau ajouté au joint à l'état liquide pendant le processus de soudage.

6.2 Classification des procédés de soudage

Une classification des procédés de soudage peut être réalisée à partir de:

- **Procédés autogènes :** le métal de base participe à la formation du joint par fusion ou cristallisation avec le métal de soudure, s'il est présent. Le procédé de soudage autogène le plus ancien, utilisé depuis plusieurs millénaires, est le soudage à la forge. À l'âge du bronze, les gens chauffaient le matériau de base à une couleur rouge cerise et le martelaient ensemble jusqu'à ce que la liaison se produise. Les procédés autogènes modernes se caractérisent généralement par la fusion combinée d'un matériau de base et d'un matériau de soudure. Ces processus sont classés en fonction de la technique spécifique utilisée pour obtenir un apport de chaleur suffisant, ainsi que sur la base de la protection du bain de soudage, qui est la combinaison de matériaux fondus dans la région de soudure pendant le processus de soudage. Les procédés les plus courants sont : le soudage oxyacétylénique (oxycombustible), soudage à l'arc avec des électrodes consommables ou non consommables, soudage à l'arc submergé [Submerged Arc Welding (SAW)], soudage à l'arc avec électrode enrobée [Shielded Metal Arc Welding (SMAW)], soudage à l'arc sous atmosphère

gazeuse métallique [Gas Metal Arc Welding (GMAW)], également connu sous le nom de soudage au gaz inerte métallique [Metal Inert Gas (MIG)], soudage au gaz actif sur métal [Metal Active Gas (MAG)], soudage à l'arc tungstène-gaz [Gas Tungsten Arc Welding (GTAW)], également connu sous le nom de soudage au gaz inerte de tungstène [Tungsten Inert Gas (TIG)] et le soudage sous laitier [ElectroSlag Welding (ESW)], utilisés principalement pour les applications automatiques pour les grandes soudures.

- **Processus hétérogènes** : dans ces processus, seul le matériau de base est le matériau de soudure utilisé à une température inférieure à la température de fusion du matériau de base. On peut citer l'exemple classique des procédés de brasage.

6.3 Défauts dans les assemblages soudés

Comme conséquence des phénomènes métallurgiques (création de la soudure, solidification du bain de soudage et effets thermiques dans le matériau de base entourant la zone de soudure, appelée zone affectée par la chaleur : ZAC), il peut y avoir des défauts dans les assemblages soudés. Ceux-ci sont classés en défauts métallurgiques et géométriques.

Ces défauts affectent la performance de résistance des soudures ; leur présence potentielle doit être vérifiée afin d'éviter des conditions potentiellement dangereuses en service.

6.3.1 Défauts métallurgiques

Parmi les défauts métallurgiques les plus importants, il y a :

- **Fissures**: il s'agit des discontinuités typiques générées par la déchirure du matériau (Figure 6.1), qui peuvent être classées en fissures chaudes ou froides. Durant le processus de soudage, dans le bain de soudage, il y a des impuretés qui se séparent dans des zones préférentielles, puis se solidifient à des températures inférieures par rapport au métal de base. Cela provoque une perte de cohésion du matériau, due aux contraintes de retrait (qui surviennent pendant le processus de refroidissement), ce qui entraîne la formation de fissures. Celles-ci sont définies comme des fissures chaudes et sont influencées par la teneur en carbone, la présence d'impuretés dans le métal et par les effets de retrait de la soudure. Les fissures froides apparaissent près ou même après la fin du processus de refroidissement (même dans les 48 heures suivant la fin du processus de soudage), et sont dues à l'absorption d'hydrogène pendant la formation du bain de soudure par les matériaux de base et de soudure ;

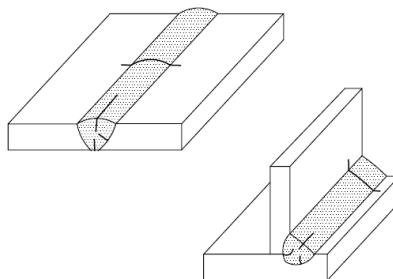


Figure 6.1 Fissures dans les soudures

- **Déchirure lamellaire (Figure 6.2):** une famille particulière de fissures provenant de contraintes de traction peut être trouvée dans le matériau de base, perpendiculairement à la direction de laminage du matériau. La cause principale de la déchirure lamellaire peut être identifiée dans les fortes contraintes de retrait qui se développent pendant le processus de refroidissement, en particulier lorsque le matériau de base est caractérisé par une grande épaisseur et empêche la déformation ;

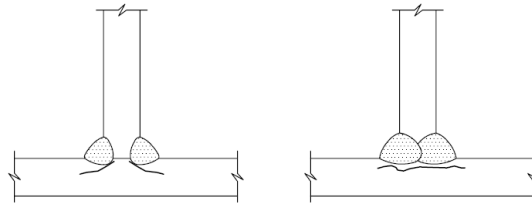


Figure 6.2 Cas typiques de déchirure lamellaire

- **Inclusions :** il s'agit de régions anormales dans la soudure en raison de la présence dans le bain de soudage de matériaux autres que le métal de base et le métal de soudure. Il peut y avoir des inclusions solides (par exemple des scories ou du tungstène) ou des inclusions gazeuses (des poches de gaz créées par des gaz emprisonnés dans le cordon de soudure).

6.3.2 Défauts géométriques

Les défauts géométriques les plus importants peuvent être énumérés comme suit :

- **excès de métal de soudure :** ce défaut se produit lorsqu'une quantité excessive de métal de soudure est déposée dans la soudure. Cela peut avoir des effets néfastes en raison des discontinuités potentielles qui peuvent se produire, lesquels peuvent à leur tour être dangereux pour certaines conditions de service (p. ex. fatigue, charges d'impact, basses températures) ;
- **manque de pénétration (manque de fusion) :** ce défaut survient lorsqu'il y a des régions dans la zone du joint où le cordon de soudure n'a pas atteint la profondeur souhaitée, créant ainsi des discontinuités dans l'assemblage soudé (figure 6.3a) ;
- **défaut d'alignement :** ce défaut est dû à un mauvais alignement des éléments assemblés ; cela peut entraîner une modification non négligeable de la géométrie des pièces assemblées (figure 6.3b), créant ainsi une excentricité qui n'est pas prise en compte lors du calcul.

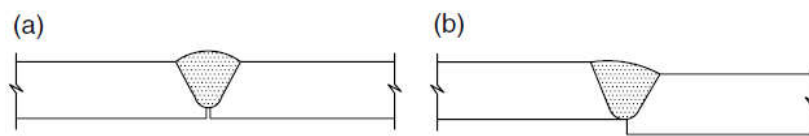


Figure 6.3 Défauts de soudure : **a)** le manque de pénétration et **b)** le manque d'alignement

Dans la plupart des cas, les assemblages soudés doivent être inspectés afin de détecter la présence de défauts. Dans la plupart des cas, des essais non destructifs (END) sont effectués, qui n'affectent pas le bon fonctionnement du joint en service. Parmi ces techniques de test, on peut citer : les inspections visuelles, les tests au pénétrant de colorant, les tests aux particules magnétiques, les tests ultrasoniques, les tests avec des systèmes d'imagerie par rayonnement, les tests radiographiques et les tests par courants de Foucault.

6.4 Classification des assemblages soudés

Les éléments résistants à la charge d'un assemblage soudé sont les soudures. Selon la position relative des éléments à assembler, il peut y avoir (Figure 6.4) : joints bout à bout, joints de bord, joints d'angle, joints en T, joints en L, joints à recouvrement.

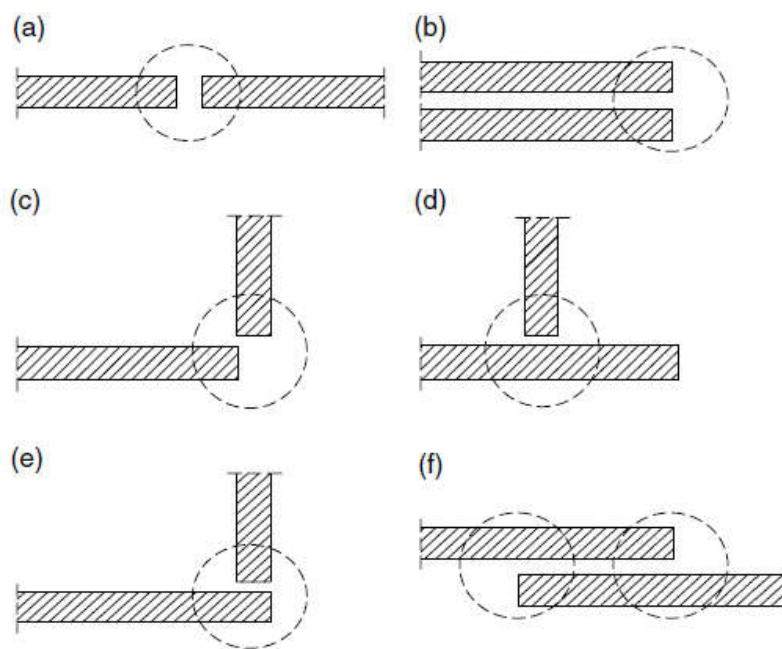


Figure 6.4 Classification basée sur la position relative des éléments à assembler : (a) joint bout à bout, (b) joint de bord, (c) joint d'angle, (d) joint en T, (e) joint en L et (f) joint à recouvrement

En fonction de la position de la soudure et de la direction de la force à transférer (figure 6.5), il peut y avoir : soudures longitudinales, soudures transversales et soudures inclinées.

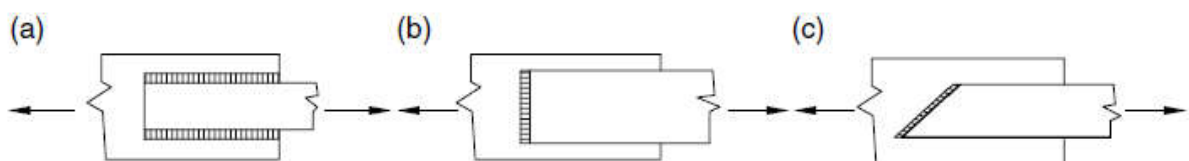


Figure 6.5 Classification basée sur l'emplacement de la soudure par rapport à la force à transférer : a) longitudinales, b) transversales et c) inclinées

Enfin, en fonction du type de soudure, il peut y avoir : des soudures bout à bout, des soudures d'angle, des soudures de fentes et des soudures en bouchon. Chaque type de soudure se caractérise par ses avantages et ses inconvénients. La grande majorité des soudures sont des soudures d'angle, en raison de leur économie et de leur facilité de fabrication, à la fois sur le terrain et dans un atelier, suivies des soudures à gorge. Les soudures des bouchons et des fentes ont une applicabilité limitée.

6.5 Défauts et problèmes potentiels dans les soudures

Plusieurs facteurs contribuent à la qualité globale d'une soudure, tels que le type d'électrode utilisé pour le soudage à l'arc, le diamètre de l'électrode, la quantité de courant utilisée, la configuration de la soudure (horizontale, verticale, aérienne), la préparation des bords, les détails de la soudure, la déformation des éléments assemblés, la chaleur des éléments assemblés et, surtout, la compétence de l'opérateur. Parmi les défauts les plus courants, on compte : l'absence de fusion, l'absence de pénétration dans les joints, le décollement, l'inclusion de scories, la porosité et la fissuration.

6.6 Contraintes dans les assemblages soudés

Pour calculer les contraintes dans les joints soudés, il est utile d'introduire le concept d'une zone efficace, qui est également appelée la zone effective de la gorge. La surface effective est calculée en multipliant la dimension effective de la gorge par la longueur de la soudure. Pour les soudures bout à bout CJP (Complete Joint Penetration), en supposant qu'il n'y a pas de défauts, la dimension effective de la gorge peut être prise comme l'épaisseur du plus mince des éléments assemblés. Par exemple, dans un assemblage bout à bout avec une soudure CJP, en présence d'une force de traction parallèle à l'axe longitudinal des éléments assemblés (Figure 6.6), l'état de contrainte peut être considéré comme équivalent à celui d'un élément continu dont la section transversale est calculée en multipliant l'épaisseur la plus faible des deux éléments assemblés par la longueur du cordon de soudure.

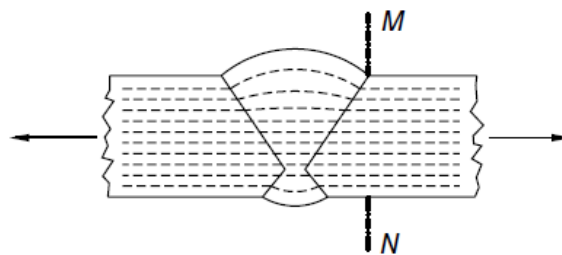


Figure 6.6 Assemblage bout à bout montrant la répartition des contraintes de traction à travers la section transversale

Dans les soudures d'angle, la surface effective est calculée en multipliant la longueur de l'angle par une dimension effective de gorge qui est normalement prise comme la hauteur d'un triangle inscrit à l'intérieur du cordon lui-même (Figure 6.7). Dans la pratique actuelle, la dimension effective de la gorge peut être prise comme la hauteur du plus grand triangle isocèle qui peut être inscrit dans le cordon.

Pour les soudures en bouchon et en fente, la surface effective (généralement résistante aux actions extérieures par des contraintes de cisaillement) est donnée par leur surface nominale contenue dans le plan de cisaillement, et correspond généralement au diamètre effectif du trou ou aux dimensions de la fente remplie par la soudure.

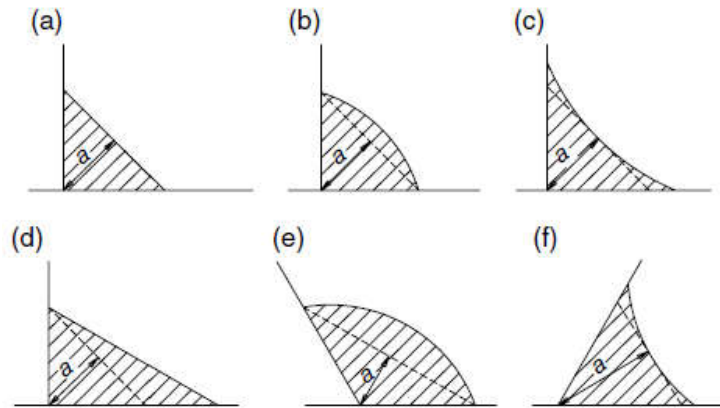


Figure 6.7 Dimension efficace de la gorge pour différentes formes de cordon

Les contraintes agissant sur la surface effective peuvent être indiquées de manière conventionnelle à l'aide des symboles suivants (Figure 6.8) :

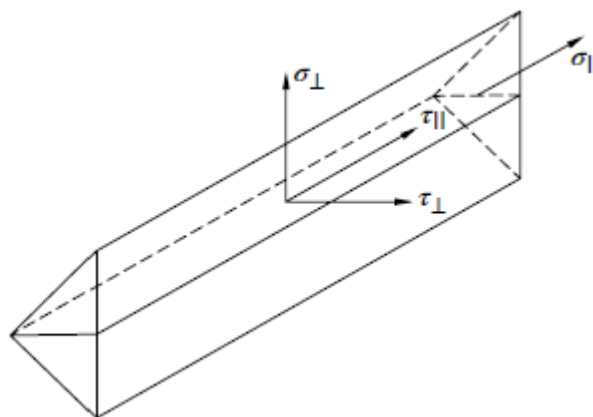


Figure 6.8 État de contrainte dans la région efficace de la gorge

- σ_{\perp} , qui représente la contrainte normale, agissant perpendiculairement à la surface effective ;
- τ_{\perp} , qui représente la contrainte de cisaillement dans le plan de la surface effective, perpendiculaire à l'axe longitudinal du cordon ;
- $\tau_{//}$, qui représente la contrainte de cisaillement dans le plan de la surface effective, parallèle à l'axe longitudinal du cordon ;
- $\sigma_{//}$, qui représente la contrainte normale perpendiculaire à la section transversale du cordon. Cette valeur de contrainte est généralement négligée, à l'exception notable du cas des contrôles de fatigue.

Ci-dessous sont illustrés quelques exemples de situations typiques pour lesquelles les valeurs de contrainte pertinentes sont calculées. Par souci de simplicité, on a supposé que les contraintes exercées sur la région effective de la gorge sont uniformément réparties.

La dimension effective de la gorge est indiquée par a , tandis que L , h ou b sont utilisés, comme il convient, pour indiquer la longueur du cordon. Afin de simplifier le calcul des contraintes à utiliser pour le design, la surface effective de la gorge peut être pivotée sur le plan horizontal ou vertical, selon ce qui est le plus pratique.

6.7 Calcul des assemblages soudés

L'approche de base utilisée dans le processus de calcul consiste à transformer l'état multidimensionnel de contrainte trouvé dans une soudure en un état de contrainte uni-axiale équivalent, qui peut ensuite être comparé à une valeur de référence de conception du matériau et qui peut être réduite de manière appropriée pour tenir compte de la présence de défauts ou autres considérations.

Les méthodes utilisées dans les différentes spécifications ont surtout une origine empirique et remontent aux essais expérimentaux qui ont été effectués dans le but de définir le domaine spatial de la résistance des soudures d'angle en fonction des contributions de contrainte σ_{\perp} , τ_{\perp} et $\tau_{//}$.

Pour les soudures d'angle, conformément à l'Eurocode 3, la résistance nominale par unité de longueur peut être calculée par exemple par la méthode directionnelle qui sera exposée dans ce chapitre :

Cette méthode directionnelle exige la détermination de l'état de contrainte dans la zone effective de la gorge sans rotation, et donc les contraintes σ et τ sont les contraintes normales et de cisaillement dans le plan de la zone effective de la gorge, respectivement.

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{//}^2)} \leq \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{Mw}} \quad (6.1)$$

Où f_u est la résistance à la traction nominale de l'élément le plus faible du joint, γ_{Mw} est le facteur de sécurité partiel et β_w est un coefficient de corrélation approprié comme indiqué au tableau 6.1.

Nuance d'acier	f_u (MPa)	γ_{Mw}	β_w	$\gamma_{Mw} \cdot \beta_w$
S 235	360	1.25	0.80	1.000
S 275	430	1.30	0.85	1,105
S 355	510	1.35	0.90	1,215

Tableau 6.1 Valeurs de f_u et β_w en fonction des nuances d'acier

Dans ce chapitre on se limite uniquement aux assemblages soudés sollicités à la traction.

Dans le cas d'un assemblage soudé censé transmettre une force de traction égale à F , les cordons de soudure peuvent être parallèles à la direction de la force (cordons longitudinaux), perpendiculaires à la force (cordons transversaux) ou inclinés par un angle générique (cordons inclinés).

6.7.1 Soudures par cordons longitudinaux

En se référant à la figure 6.9, si les cordons sont parallèles à la force (il y a un total de quatre cordons dans la figure), les contraintes résultantes peuvent être calculées directement en fonction de la surface effective de la gorge de chaque cordon dans sa position réelle, ou en le faisant tourner sur le plan horizontal ou vertical. Les contraintes de cisaillement sont du type $\tau_{//}$, dont la quantité est donnée par l'expression suivante:

$$\tau_{//} = \frac{F}{4.a.L} = \frac{F}{a.\Sigma L} \quad (6.2a)$$

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = 0 \quad (6.2b)$$

D'où, la condition à vérifier est la suivante :

$$a.\Sigma L \geq \beta_w \cdot \gamma_{Mw} \frac{F\sqrt{3}}{f_u} \quad (6.3)$$

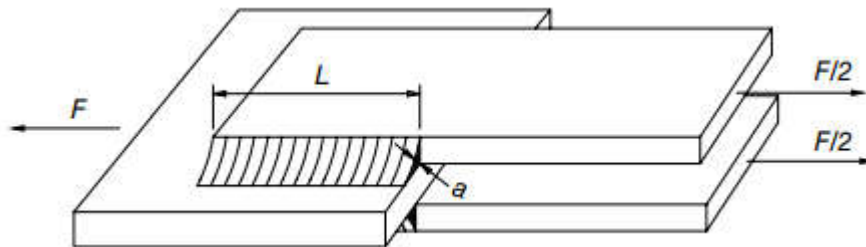


Figure 6.9 Plaques assemblées par cordons de soudure longitudinaux

Où a est la dimension effective de la gorge (qui, comme mentionné précédemment, est la hauteur du triangle générique inscrit, comme illustré dans la figure 6.10)

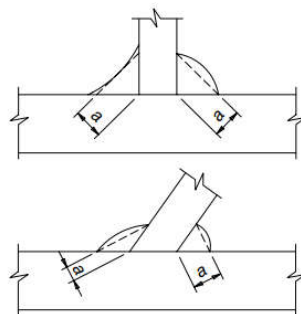


Figure 6.10 Définition de la dimension effective de la gorge

6.7.2 Soudures par cordons transversaux

En ce qui concerne la figure 6.11, si les (deux) cordons sont perpendiculaires à la force, afin de calculer les contraintes directement sur la surface effective de la gorge, inclinée de 45° par rapport à l'horizontale (plan x-z), les composantes des contraintes résultantes sont :

$$\tau_{//} = 0 \quad (6.4a)$$

$$\sigma_{\perp} = \frac{F}{a \cdot \Sigma L} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \quad (6.4b)$$

$$\tau_{\perp} = \frac{F}{a \cdot \Sigma L} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \quad (6.4c)$$

La condition à vérifier est la suivante :

$$a \cdot \Sigma L \geq \beta_w \cdot \gamma_{Mw} \frac{F \sqrt{2}}{f_u} \quad (6.5)$$

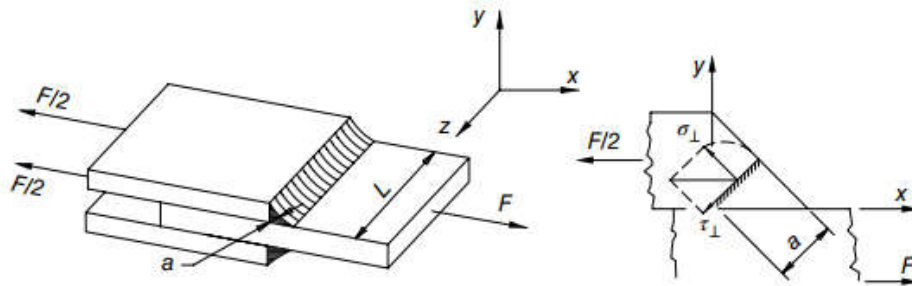


Figure 6.11 Plaques assemblées par des cordons de soudure transversaux

6.7.3 Cordons inclinés

Dans le cas de deux cordons placés obliquement par rapport à la direction de la force, dans la région effective de la gorge, il y aura deux composantes de la force ; une tangente à l'axe longitudinal de la soudure ($V = F \cos \theta$) et une perpendiculaire à celle-ci ($N = F \sin \theta$), créant ainsi un état de contrainte plus complexe par rapport aux deux cas précédents.

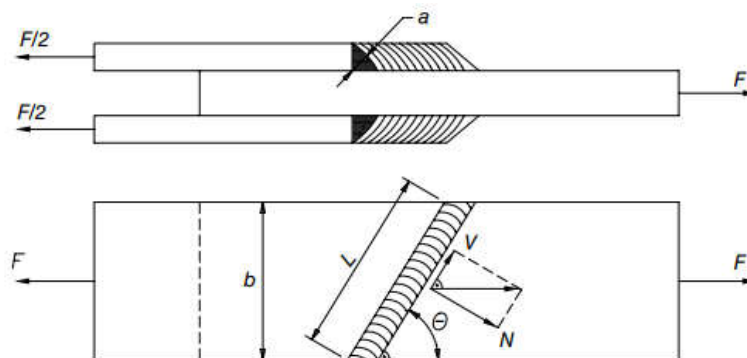


Figure 6.12 Assemblage soudé avec cordons inclinés

En référence à la Figure 6.12, en faisant pivoter la surface effective de la gorge sur le plan horizontal, toutes les contraintes associées sont contenues dans ce plan. En particulier, on a :

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{N}{a.\Sigma L} \frac{\sqrt{2}}{2} = \frac{F \sin \theta}{a.\Sigma L} \frac{\sqrt{2}}{2} \quad (6.6a)$$

$$\tau_{//} = \frac{N}{a.\Sigma L} = \frac{F \cos \theta}{a.\Sigma L} \quad (6.6b)$$

La condition à vérifier est la suivante :

$$a.\Sigma L \geq \beta_w \cdot \gamma_{Mw} \frac{F \sqrt{3 - \sin^2 \theta}}{f_u} \quad (6.7)$$