

## Chapitre 10

**ASSEMBLAGES****I. GÉNÉRALITÉS**

En construction métallique, la conception, le calcul et la réalisation des assemblages revêtent une importance équivalente à ceux des composants structuraux pour la sécurité finale de l'ouvrage. En effet, les assemblages constituent des points de passage obligé pour les sollicitations qui s'exercent dans les différents composants structuraux. En cas de défaillance d'un assemblage, le fonctionnement global de la structure se trouve remis en cause.

La conception des assemblages est aussi l'étape au cours de laquelle doivent être concrétisées, avec autant de fidélité que possible, les hypothèses de liaison entre composants de la structure telles qu'elles ont été adoptées au stade de l'analyse globale.

**II. ROLES DES ASSEMBLAGES**

Un assemblage est un dispositif ayant pour but d'assurer la continuité mécanique de plusieurs pièces en assurant la transmission et la répartition des diverses sollicitations entre elles en générant un minimum de sollicitations parasites.

On distingue :

- les assemblages articulés ;
- les assemblages rigides.

Cette classification est faite par simplification afin de pouvoir mener des calculs relativement simples et abordables car dans la réalité le comportement réel est en général intermédiaire (semi-rigide). Des règlements récents tel que l'EC3 traite de façon détaillée ce type d'assemblage.

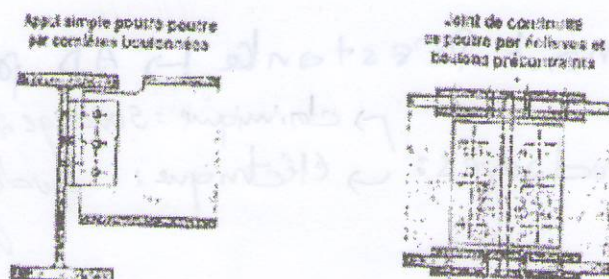
**III. ASSEMBLAGES DE CONSTRUCTION MÉTALLIQUE**

Dans la construction métallique, les assemblages sont des ensembles constitués de plusieurs composants (figure 1) :

- les abouts des éléments structuraux liaisonnés : la section courante de ces éléments doit généralement être aménagée pour permettre l'assemblage ; elle peut être déformée (par exemple aplatissement d'une section tubulaire), affaiblie par découpe locale (grugeage) ou par la réalisation de perçages, complétée ou renforcée localement ;
- les pièces accessoires de liaison : il s'agit généralement de plats, de cornières, de chutes de profilé utilisés comme platines, tasseaux, échantignoles, équerres d'attache...
- les organes de fixation proprement dits assurant la solidarisation effective entre les composants en présence : on utilise, essentiellement, des boulons précontraints ou non et des cordons de soudures.

Conception }  
Réalisation }  $\Rightarrow$  bon assemblage.  
Calcul





- Figure 1 : Exemples d'assemblages de construction métallique -

## IV. MOYENS D'ASSEMBLAGE EN CONSTRUCTION MÉTALLIQUE

Les moyens d'assemblage utilisés en construction métallique sont essentiellement le boulonnage et le soudage.

### 41. Boulonnage

Le boulonnage constitue le moyen d'assemblage la plus utilisé en construction métallique du fait de sa facilité de mise en œuvre et des possibilités de réglage qu'il ménage sur site.

Un boulon est un ensemble constitué d'une vis, d'un écrou et, le cas échéant, d'une ou deux rondelles.

Il convient de distinguer deux familles de boulons, en fonction du mode de mise en œuvre qu'on leur assigne.

- Les boulons normaux.
- Les boulons à serrage contrôlé.

#### 4.1.1. Boulons ordinaires

Les boulons ordinaires, sont mis en œuvre avec un serrage simple, non contrôlé; ils ne sont pas prévus pour subir une précontrainte, leur aptitude au serrage ne faisant l'objet d'aucun contrôle en fabrication. La reprise des efforts perpendiculaires à l'axe des vis s'effectue par cisaillement direct de celles-ci et pression diamétrale sur l'épaisseur des pièces. L'existence d'un jeu, indispensable au montage, entre le diamètre du trou et celui du boulon autorise un glissement de l'assemblage au cours de sa mise en charge en cisaillement.

Les boulons ordinaires sont disponibles en 8 classes de résistance : 4.6, 4.8, 5.6, 5.8, 6.6, 6.8, 8.8 et 10.9. La codification des classes de boulons reflète les contraintes limites caractéristiques utilisées dans les calculs : le premier nombre du code est le dixième de la limite de rupture et le produit des deux nombres du code correspond à la limite d'élasticité (contraintes exprimées en  $\text{daN/mm}^2$ ).

Les valeurs nominales de la résistance limite d'élasticité  $f_{yb}$  ( $=e_b$ ) ainsi que celles de la résistance à la traction (limite de rupture)  $f_{ub}$  des différentes classes de boulons sont indiquées dans le tableau ci-dessous

Classe	4.6	4.8	5.6	5.8	6.6	6.8	8.8	10.9
$f_{yb}$ ( $\text{N/mm}^2$ )	240	320	300	400	360	480	640	900
$f_{ub}$ ( $\text{N/mm}^2$ )	400	400	500	500	600	600	800	1000

- Valeurs nominales de  $f_{yb}$  et  $f_{ub}$  des boulons -



① boulons ORDINAIRES :  $\rightarrow$  AB Non précontraints

② boulons à haut Résistance  $\rightarrow$  AB précontraints.

providé de soudures :  $\rightarrow$  chimique : soudage au chalumeau.  
 $\rightarrow$  électrique : soudage à l'arc.

Position de soudures :

préparation des joints :

\* les 5 types de soudage plus utilisés sont :

- Soudure bout à bout.
- Soudure d'angle.

Courbans frontale  
" latérale  
" oblique

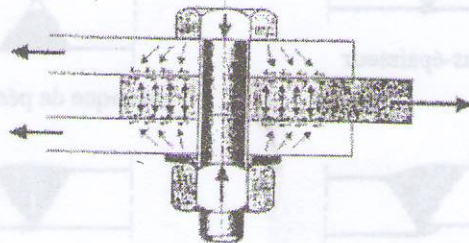
Classe	$f_{yk}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{tk}$ (N/mm <sup>2</sup> )
4.6	240	400
4.8	320	500
5.6	300	500
5.8	400	600
6.6	360	600
6.8	480	600
8.8	640	800
10.9	900	1000



#### 4.1.2. Boulons à haute résistance

Les boulons à serrage contrôlé, dits aussi boulons précontraints, sont fabriqués spécifiquement pour garantir une aptitude au serrage. Ils sont en principe mis en œuvre avec introduction d'un effort de précontrainte obtenu généralement par contrôle du couple de serrage appliqué ou de la rotation imposée. La précontrainte permet notamment de mobiliser des forces de frottement à l'interface des pièces assemblées (figure 2) et d'obtenir un fonctionnement sans glissement des assemblages, sous des efforts perpendiculaires à l'axe des vis.

Les boulons à serrage contrôlé sont disponibles en deux classes de qualité : 8.8 et 10.9 (avec la même convention de codification que pour les boulons normaux)



- Figure 2 : Assemblage précontraint travaillant en frottement -

## 42. Soudage

Le soudage en construction métallique fait systématiquement appel à un apport extérieur de métal, fondu en même temps que le bord des pièces à assembler ; cette fusion est toujours obtenue par l'intermédiaire d'un arc électrique établi entre les pièces à assembler et le métal d'apport encore solide. Ce métal constituant l'essentiel du joint est apporté sous forme d'un fil-électrode dans les procédés automatiques et semi-automatiques et sous forme d'une baguette-électrode enrobée pour les procédés manuels. Dans le choix des produits d'apport, on s'attache essentiellement, pour ce qui concerne l'aspect résistance, à sélectionner un métal déposé au moins équivalent en nuance au métal de base et présentant les meilleures caractéristiques possibles en matière de ductilité.

#### 4.2.1. Procédés de soudage

Les divers procédés permettant de réaliser l'opération de soudage se différencient d'une part par la source de chaleur (flamme, arc électrique, ...) et d'autre part par le type de protection (laitier, flux, gaz, ...) du bain de fusion par rapport à l'air ambiant.

Les procédés de soudage à l'arc employés fréquemment dans la construction métallique sont :

- Soudage manuel à l'arc avec électrode enrobée.
- Soudage à l'arc sous protection de gaz inerte avec fil-électrode fusible (MIG).
- Soudage à l'arc sous protection de gaz actif avec fil-électrode fusible (MAG).
- Soudage à l'arc en atmosphère inerte avec électrode de tungstène (TIG).
- Soudage à l'arc sous flux en poudre avec fil-électrode.

L'acier ne peut pas être soudé à l'air libre sans protection du bain de fusion sinon, de multiples inconvénients s'en suivraient tels que :

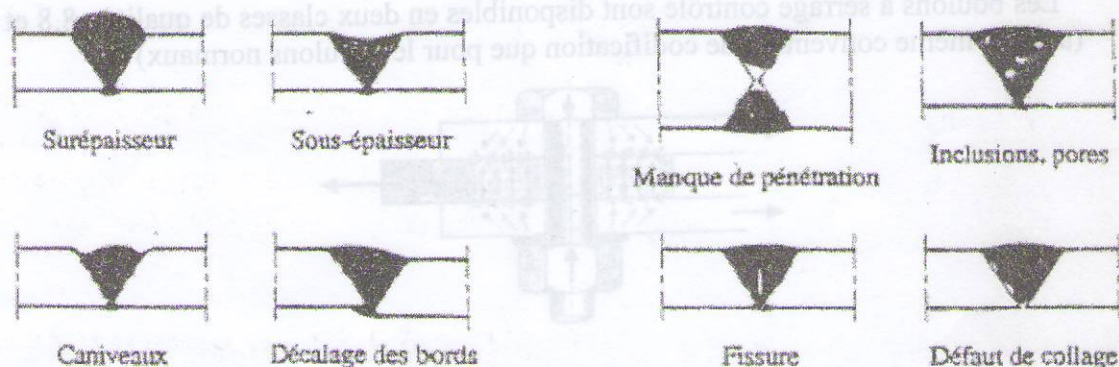
- l'oxydation du métal déposé ;
- le brûlage du carbone de l'acier ;
- l'emprisonnement dans le bain de métal déposé de l'azote de l'air ;
- le refroidissement trop rapide.



Ces deux premiers inconvénients provoquent une diminution de la résistance de l'acier. Quant aux deux derniers inconvénients, ils entraînent une fragilisation de l'acier.

#### 4.2.2. Anomalies dans les soudures

Les principales anomalies qui peuvent être présentes dans les soudures sont représentées à la figure 3 ci-dessous. On distingue celles relatives à une configuration externe ou interne de la soudure.



- Figure 3 : Anomalies dans les soudures -

Du point de vue du comportement de l'assemblage vis-à-vis de la fatigue et de la rupture fragile, les anomalies les plus dangereuses sont, par ordre décroissant :

- les fissures,
- les défauts de collage,
- les défauts de pénétration,
- les inclusions,
- les porosités.

Les différents contrôles possibles pour détecter le nombre et la taille de ces anomalies sont présentés dans le paragraphe suivant.

#### 4.2.3. Contrôle des soudures

Le contrôle des joints soudés est indispensable pour garantir la qualité requise. On peut classer les différentes méthodes de contrôle en deux catégories : **les contrôles destructifs**, qui s'appliquent essentiellement à des éprouvettes servant au contrôle des procédés de soudage, comprenant principalement :

- les macrographies (examen à l'œil nu ou à la lampe binoculaire avec polissage moyen),
- les micrographies (examen au microscope avec polissage poussé),
- les essais de traction,
- les essais de pliage,
- les essais de dureté,
- les essais de résilience,

et **les contrôles non destructifs**, dont les plus courants sont :

- l'examen visuel,
- l'examen par ressuage
- l'examen par magnétoscopie,
- l'examen par radiographie,



- l'examen par ultrasons.

Les examens par ressuage et par magnétoscopie permettent de détecter uniquement les fissures superficielles ou celles débouchant en surface des joints soudés. Ces examens sont faciles à exécuter, ils ne demandent que très peu de matériel et sont relativement fiables.

Les examens par radiographie sont très utilisés pour révéler des anomalies volumiques, telles que les pores ou les inclusions de laitier à l'intérieur de la soudure ; par contre, les fissures (surtout celles qui sont parallèles à la direction des rayons) sont très difficiles à détecter.

Les examens par ultrasons permettent de localiser les anomalies telles que les fissures et les défauts de collage avec une bonne précision en grandeur et en direction ; par contre, ce procédé nécessite un manipulateur très expérimenté du fait des multiples échos parasites que l'on peut observer sur l'écran et qui pourraient conduire à une interprétation erronée des résultats.

## V. RÉSISTANCE DES MOYENS D'ASSEMBLAGE ET DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES

Les règles de calcul traitent essentiellement du calcul des organes de fixation, supposant connus les efforts qui les sollicitent, en précisant également quelques dispositions constructives à respecter.

### 5.1. Assemblages boulonnés

#### 5.1.1. Dispositions constructives

##### 1. Conditions de distance des boulons

Le diamètre des trous de boulons étant notés «  $d$  », la distance / entre axes de boulons doit vérifier les conditions suivantes pour les files extérieures :

$$3d \leq / \leq 7d$$

Pour les pièces soumises aux intempéries ou situées dans des conditions favorisant l'oxydation, et :

$$3d \leq / \leq 10d$$

Pour les pièces non soumises aux influences précédentes.

Pour les files intérieures, on vérifie que :  $/ \leq 30 e_{\min}$

Où  $e_{\min}$  est l'épaisseur de la plus mince des pièces assemblées.

La pince longitudinale  $/_l$  doit être supérieure à la plus grande des valeurs  $1,5d$  et  $\frac{0,8T}{e \cdot \sigma_e}$  où  $T$  est l'effort total pondéré de cisaillement exercé sur un boulon par une pièce

d'épaisseur  $e$ , et  $\sigma_e$  est la limite d'élasticité du métal constituant les pièces assemblées. Elle doit cependant, pour éviter l'oxydation, rester inférieure à  $4d$  pour les goussets pincés entre deux pièces assemblées et à  $2,5d$  dans les autres cas.

La pince longitudinale  $/_l$  doit vérifier la condition :

$$1,5d \leq /_l \leq 2,5d$$



## 2. Conditions d'épaisseur des pièces assemblées

Les pièces assemblées étant classées par ordre d'épaisseurs décroissantes, en appelant  $e_2$  l'épaisseur de la deuxième, on doit vérifier les conditions suivantes :

$$\begin{array}{lll} d \geq e_2 + 2 \text{ mm} & \text{si on a} & e_2 \leq 20 \text{ mm} \\ d \geq 22 \text{ mm} & \text{si on a} & e_2 \geq 20 \text{ mm} \end{array}$$

Si une ou des fourrures sont interposées entre les pièces transmettant des efforts dans un assemblage par boulons ordinaires, l'épaisseur totale assemblée doit rester inférieure à  $4d$ .

On doit également vérifier la condition de pression diamétrale en respectant les conditions suivantes :

- $\frac{T}{d \cdot e} \leq 2\sigma_e$  dans le cas où des déformations appréciables apporteraient une gêne à l'exploitation (support de pièces mécaniques, par exemple) ;
- $\frac{T}{d \cdot e} \leq 3\sigma_e$  dans le cas des assemblages boulonnés courants ;
- $\frac{T}{d \cdot e} \leq 4\sigma_e$  en cas d'emploi de boulons à haute résistance et à serrage contrôlé.

### 5.1.2. Vérification des boulons ordinaires

Suivant la nature des sollicitations auxquelles est soumis l'assemblage, les vérifications de la résistance du boulon font intervenir soit la section A de la tige lisse, soit la section résistante  $A_r$  de la partie filetée.

Les assemblages par boulons ordinaires permettent de reprendre des efforts d'orientation quelconque par rapport à l'axe des vis. Il est d'usage d'envisager séparément les efforts parallèles (traction) et les efforts perpendiculaires (cisaillement) à l'axe des vis, qui correspondent à des modes de fonctionnement différents et requièrent donc des vérifications propres.

#### a) Résistance du boulon à la traction

Si N est l'effort pondéré de traction exercé sur chaque boulon, on vérifie :

$$1,25 \frac{N}{A_r} \leq \sigma_e$$

#### b) Résistance du boulon au cisaillement

Si T est l'effort pondéré de cisaillement exercé sur chaque section cisailée du boulon, on vérifie :

- si aucune précaution spéciale n'est exigée pour l'exécution

$$1,54 \frac{T}{A_r} \leq \sigma_e$$

- si des dispositions spéciales sont prises pour que la partie lisse du boulon règne au droit de toutes les sections cisailées

$$1,54 \frac{N}{A} \leq \sigma_e$$

#### c) Résistance du boulon à un effort incliné

Si le boulon est soumis à une composante normale pondérée N suivant l'axe du boulon et une composante pondérée T dans le plan de joint :



- dans le cas où la section cisailée se trouve dans la partie lisse, on vérifie simultanément :

$$1,25 \frac{N}{A_r} \leq \sigma_e \quad \text{et} \quad \frac{\sqrt{N^2 + 2,36T^2}}{A} \leq \sigma_e$$

- dans le cas où la section cisailée se trouve dans la partie filetée, on vérifie simultanément :

$$1,25 \frac{N}{A_r} \leq \sigma_e \quad \text{et} \quad \frac{\sqrt{N^2 + 2,36T^2}}{A_r} \leq \sigma_e$$

#### d) Remarque

Dans les formules de vérification de la résistance du boulon données ci-dessus,  $\sigma_e$  représente la limite d'élasticité de l'acier constituant la vis du boulon ( $\sigma_{eb}$ ). Dans la norme NF P22-430 « Assemblages par boulons non précontraints – Dispositions constructives et calculs des boulons », et par souci d'assurer une sécurité à la rupture aussi homogène que possible, quelle que soit la classe de qualité des boulons, on doit considérer comme limites d'élasticité  $\sigma_e$  des formules de vérification de la résistance du boulon, les valeurs suivantes :

Classe de qualité des boulons	4.6	4.8	5.6	5.8	6.6	6.8	8.8	10.9
$\sigma_e$ (N/mm <sup>2</sup> )	240	280	300	340	350	410	550	670

#### 5.1.3. Vérification des boulons à haute résistance et à serrage contrôlé

L'effort de précontrainte  $N_0$  est l'effort qui agit axialement dans la tige du boulon. Il est généralement réalisé par un serrage de l'écrou ou de la tête du boulon et a pratiquement une valeur :

$$N_0 = 0,8 \cdot \sigma_{eb} \cdot A_r$$

L'effort de glissement par boulon est obtenu en multipliant l'effort de précontrainte par le coefficient de frottement  $\phi$  entre les surfaces de contact.

À défaut de résultats d'essais particuliers et à condition d'avoir effectué une préparation convenable des surfaces de contact, soit par grenaillage ou sablage, soit au chalumeau, on peut se baser dans les calculs sur le coefficient de frottement  $\phi = 0,45$  pour l'assemblage des pièces en acier doux.

Si aucune préparation des surfaces de contact autre qu'un brossage n'est effectuée, on peut admettre dans les calculs, pour tous les aciers de construction, le coefficient de frottement  $\phi = 0,30$ .

#### a) Effort admissible dans les assemblages sollicités perpendiculairement à l'axe des boulons

Lorsque l'assemblage est sollicité par un effort perpendiculaire à l'axe des boulons, la valeur admissible  $T_a$  de cet effort pondéré, par boulon et par plan de glissement, est donnée par :

$$T_a = 1,1 \cdot N_0 \cdot \phi$$



**b) Effort admissible dans les assemblages sollicités en traction dans la direction de l'axe du boulon**

L'effort pondéré admissible  $N_a$  par boulon dans un assemblage sollicité en traction dans la direction de l'axe du boulon est exprimé par la formule :

$$N_a = N_0$$

**c) Efforts admissibles dans les assemblages sollicités à la fois perpendiculairement à l'axe du boulon et dans la direction de celui-ci**

Lorsque la sollicitation engendre par boulon à la fois un effort  $T$  perpendiculaire à son axe et un effort de traction  $N$  dans la direction de celui-ci, ces efforts pondérés ne doivent pas dépasser les valeurs :

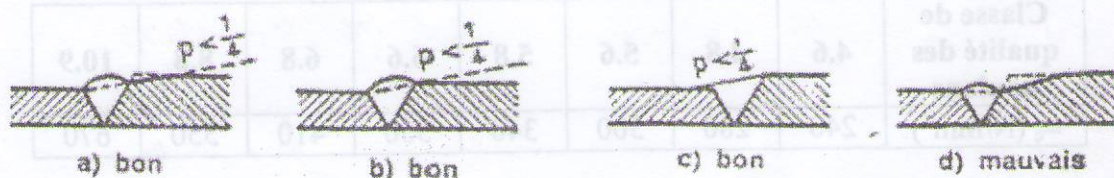
$$T_a = 1,1 \cdot \varphi \cdot (N_0 - N) \quad \text{et} \quad N_a = N_0$$

## 5.2. Assemblages soudés

### 5.2.1. Dispositions constructives

On distingue essentiellement les soudures bout à bout et les soudures d'angle.

**a) Soudures bout à bout**

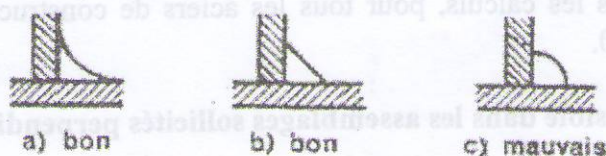


- Figure 4 : Exécution des soudures bout à bout -

Dans le cas d'assemblage de pièces d'épaisseurs différentes, la variation de section doit s'effectuer graduellement, avec une pente ne dépassant pas 1/4, au besoin en amincissant la pièce la plus épaisse (figure 4-a) ou en rechargeant la plus mince (figure 4-c).

**b) Soudures d'angle**

Les cordons concaves (figure 5-a) ou plats (figure 5-b) doivent être préférés, en général, aux cordons bombés (figure 5-c).



- Figure 5 : Exécution des soudures d'angle -

### 5.2.2. Vérification de la résistance

**a) Soudures bout à bout**

Du fait que la soudure conserve sa section complète sur toute la largeur de la pièce (sans création d'encoches sur les bords), aucun calcul n'est exigé, à condition que



$$\sigma^2 + 1,8(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2) \leq \alpha^2 \sigma_e^2$$

où, est un coefficient de réduction, fonction de l'épaisseur «  $a$  » (en mm) du cordon, et qui prend les valeurs :

$$\alpha = 1 \quad \text{pour } a \leq 4 \text{ mm}$$

$$\alpha = 0,8 \left( 1 + \frac{1}{a} \right) \quad \text{pour } a > 4 \text{ mm}$$

On peut se dispenser de toute investigation plus poussée dès qu'on vérifie pour chaque cordon, quels que soient la direction de l'effort pondéré  $F$  et l'angle formé par les faces assemblées, que :

$$\frac{F}{0,75 \cdot l \cdot a \cdot \alpha} \leq \sigma_e$$

En cas d'assemblage symétrique par rapport à la ligne d'action de l'effort global pondéré  $\sum F$  exercé sur l'assemblage, il suffit de vérifier :

$$\frac{\sum F}{0,75 \cdot \sum l \cdot a \cdot \alpha} \leq \sigma_e$$

## VI. CRITÈRES DE CHOIX DES MOYENS D'ASSEMBLAGES

D'une manière générale, le choix entre les divers moyens disponibles pour assembler les éléments d'une ossature métallique est le résultat de la prise en compte de critères multiples :

- critères structurels : résistance, comportement...
- critères de fabrication : faisabilité, maîtrise des tolérances...
- critères propres au montage sur site : faisabilité, possibilités de réglage...
- critères économiques.

Le recours à une solution entièrement soudée est assez exceptionnel dans la mesure où l'on cherche en principe à éviter le soudage sur site en raison des protections contre les intempéries (vent, pluie, froid...) que cette opération nécessite. Le plus souvent, on fabrique donc en atelier des composants de taille transportable, qui sont ensuite assemblés sur chantier par des joints boulonnés.

Ces composants peuvent eux-mêmes comporter des assemblages : l'utilisation du soudage peut alors être retenue sans difficulté particulière, généralement en fonction de simples critères de productivité.

Il est important de noter que, dans tous les cas, le soudage constitue la seule technique d'assemblage qui permette de reconstituer parfaitement le monolithisme structural entre éléments solidarisés tel qu'il est escompté par les calculs.

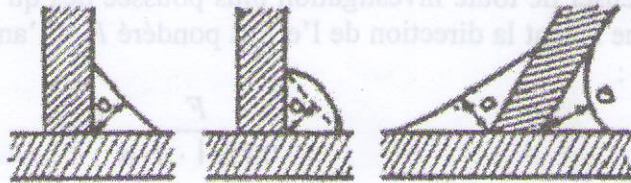
En matière d'assemblages boulonnés, les boulons normaux non précontraints permettent, dans le domaine du bâtiment, de satisfaire sans difficulté aux exigences techniques courantes. Différentes situations peuvent néanmoins être rencontrées où ces produits ne sont plus adaptés ; on peut citer à titre d'exemple le cas des structures nécessitant une justification de tenue en fatigue : le choix d'une précontrainte des assemblages boulonnés s'impose généralement dans la mesure où elle permet :



l'épaisseur de la soudure soit au moins égale à l'épaisseur de la plus faible des pièces assemblées et que le métal déposé ait au moins les caractéristiques mécaniques du métal de base.

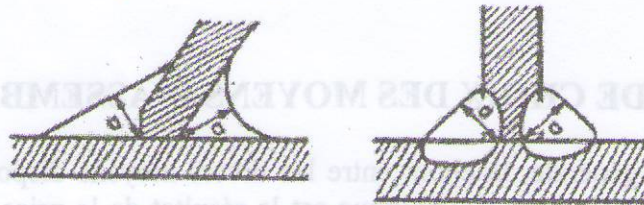
### b) Soudures d'angle

L'épaisseur utile «  $a$  » d'une soudure d'angle est définie comme étant la distance minimale de la racine à la surface du cordon (ou à la corde en cas de cordon bombé).



- Figure 6-a : Epaisseur utile «  $a$  » -

Si la pièce rapportée comporte un chanfrein ou si on effectue des soudures à forte pénétration, on considère que la racine du cordon se trouve sur la face de contact des pièces assemblées en un point où on peut être assuré de la fusion du métal (figure 6-b).

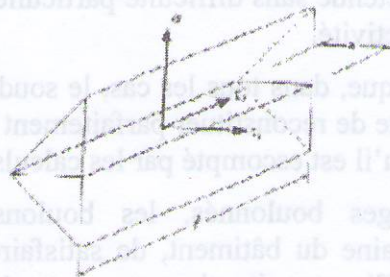


- Figure 6-b : Epaisseur utile «  $a$  » -

La section de gorge du cordon est la section minimale, de surface «  $a \times l$  », déterminée par un plan passant par l'intersection des faces assemblées ; «  $l$  » étant la longueur utile du cordon, égale à sa longueur réelle diminuée de la longueur des cratères d'extrémité (évaluée forfaitairement à «  $a$  » pour chaque cratère), lorsque aucune disposition n'est prise pour les éliminer.

Tout état de contrainte pondérée «  $C$  », au niveau de la section de gorge du cordon doit être décomposé en trois contraintes (figure 7) :

- $\sigma$  = composante perpendiculaire à la section ;
- $\tau_{\perp}$  composante dans le plan de la section, perpendiculaire à l'axe longitudinal du cordon ;
- $\tau_{\parallel}$  composante dans le plan de la section, parallèle à l'axe longitudinal du cordon ;



- Figure 8 : Réduction des efforts au niveau de la section de gorge -

Les dimensions du cordon doivent satisfaire à la condition :



- de réduire dans des proportions très importantes l'amplitude de variation des contraintes de traction dans les boulons des assemblages en extension,
- d'éliminer tout contact entre les vis et les pièces par pression diamétrale et donc toute variation de contrainte pour les boulons des assemblages résistant par frottement aux efforts perpendiculaires à l'axe des vis.

Dans le cas où le cumul des déformations d'assemblages risque d'être préjudiciable à la sécurité structurale ou à l'aptitude au service, on peut réduire ces déformations en adoptant les moyens suivants :

- les boulons « plein trou » ou calibrés cisailés sur tige lisse (réduction du jeu à quelques dixièmes),
- les boulons précontraints avec travail en frottement des assemblages.