

# **ASSEMBLAGE SOUDES**

# ASSEMBLAGES SOUDES

(soudage des métaux)

## 1- Généralités

# 1- Généralités

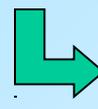
- Définition du soudage :

Réalisation d'une liaison encastrement non démontable entre deux éléments initialement distincts, par chauffe locale, avec ou sans apport complémentaire de matière.

Le matériau constituant les éléments à assembler est appelé :

 Métal de base

Le complément éventuel est :

 Le métal d'apport

- Soudabilité :

La *soudabilité physique* est liée à la nature des matériaux.

A l'heure actuelle, tous les matériaux peuvent être assemblés et présenter une continuité physique après assemblage, avec disparition de leur interface de contact initiale.

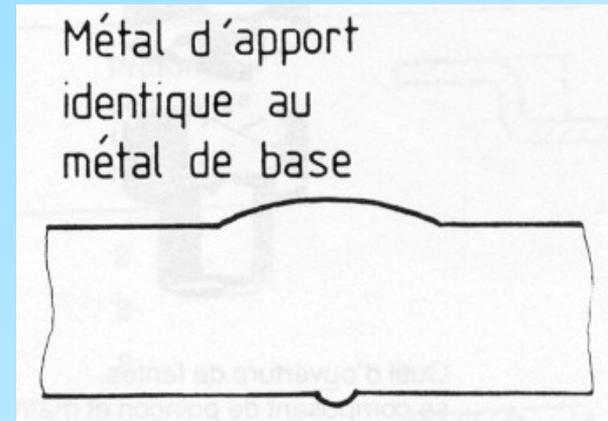
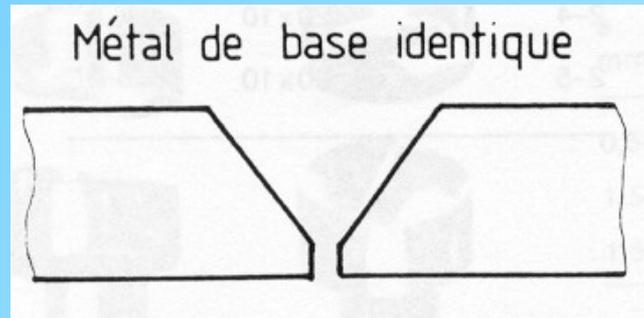
Il suffit de prendre les précautions nécessaires.

Par exemple, le couple **produit** (*matériau, dimensions*)/**procédé** est important.

L'apparition de procédés nouveaux de soudage permet la réalisation de pièces très spécifiques en acier ou métaux réputés insoudables par les procédés plus classiques.

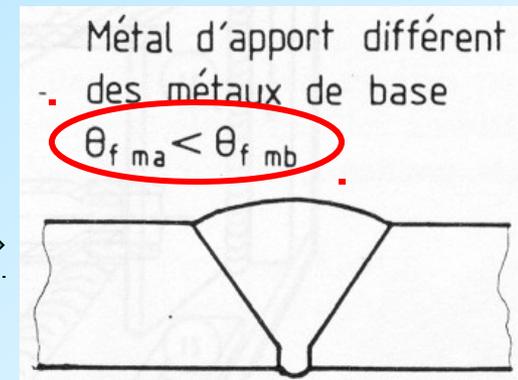
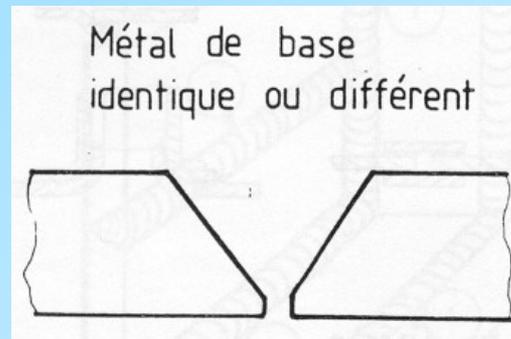
- différents types de soudage :

### Soudage homogène :

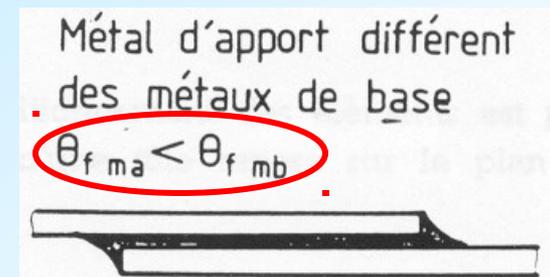
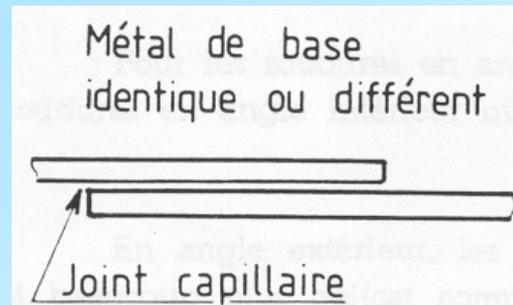


### Soudage hétérogène :

soudo-brasage



brasage



## Soudage homogène:

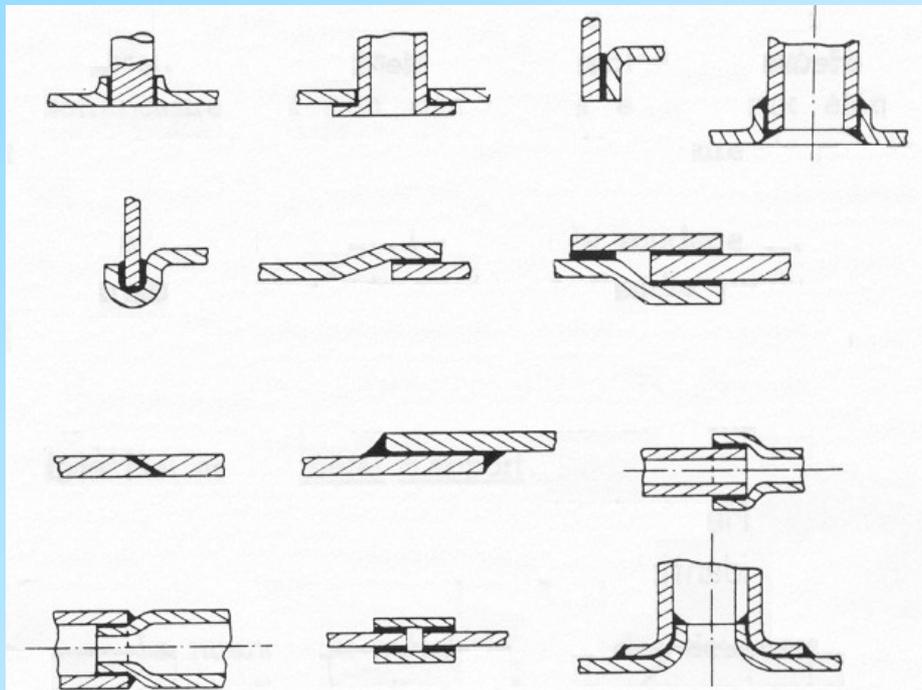


En prenant un certain nombre de précautions, on obtient une continuité des propriétés physiques et chimiques.

## Soudage hétérogène:



La chauffe est moins importante, donc les déformations sont moins grandes.



# • Genre des soudures

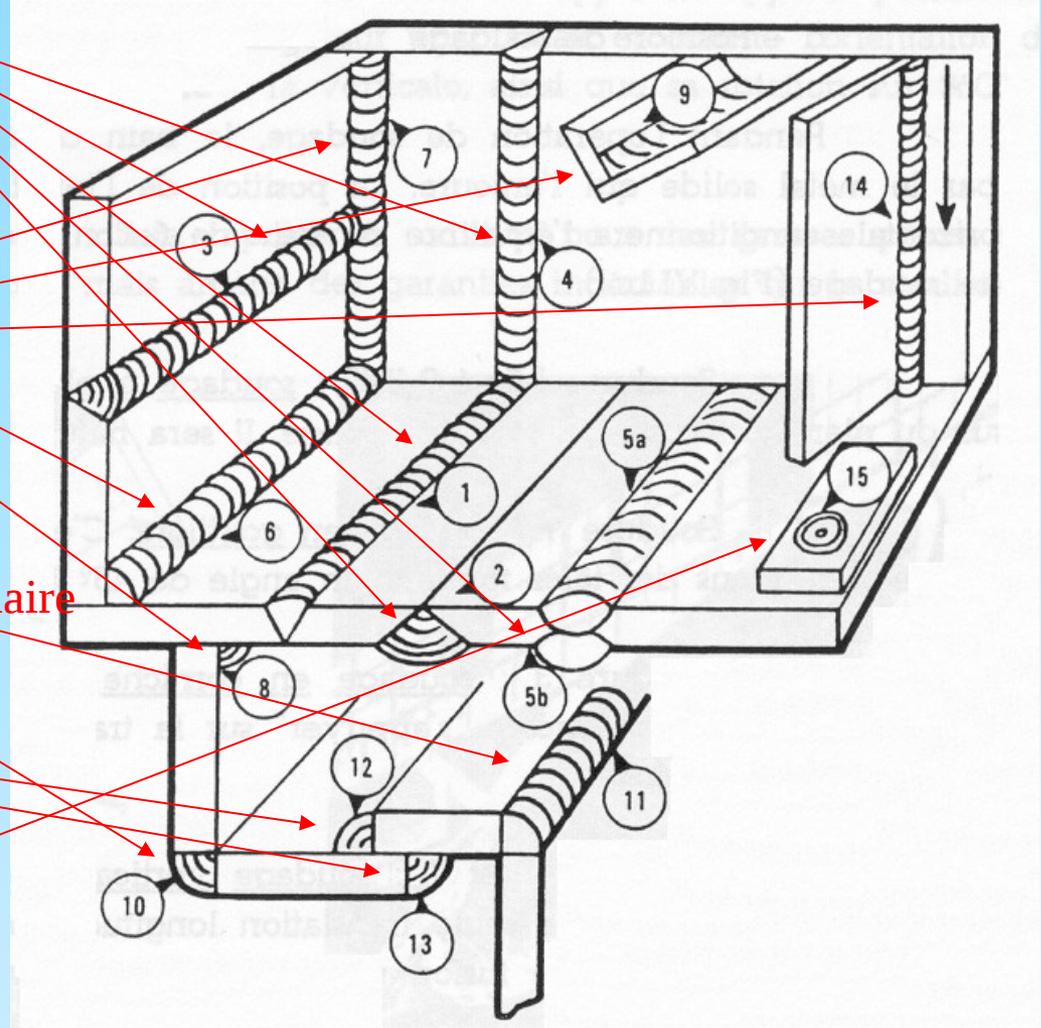
Soudures bord à bord  
(1-2-3-4-5)

Soudures à angle intérieur  
(6-7-8-9-14)  
bon positionnement

Soudures à angle extérieur  
(10-11)  
plus délicat, pas d'arrachement lamellaire

Soudures à clin  
(12-13)  
moment de flexion défavorable

Soudure en bouchon  
(15)  
accès unilatéral

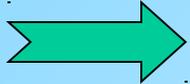


## •Position de soudage

Maintenir le bain de fusion en équilibre (pas de mouvement)



Position à plat ou gouttière assure une meilleure qualité de la soudure



Utiliser des positionneurs de soudage

# ASSEMBLAGES SOUDES

(soudage des métaux)

1- Généralités

2- Calcul des soudures

2-1 Généralités sur le calcul des soudures

## 2-1 Généralités sur les soudures

### • Type de calcul

La norme E 83-100 classe les assemblages soudés en fonction du type de sollicitation auquel il est soumis:

Assemblages soumis à un calcul en fatigue

Les charges cycliques sont déterminantes

Assemblages non calculés

Conçus et réalisés par expérience et par comparaison

Assemblages non soumis à un calcul en fatigue

Les charges statiques sont déterminantes

Le nombre de cycle doit respecter

$$N \leq \frac{7 \cdot 10^{10}}{\Delta \sigma^3}$$

$$\Delta \sigma = \sigma_{\max i} - \sigma_{\min i}$$

Etendue des contraintes appliquée en MPa

• Classe c

Grades de risques	Entrée l'a imm
R1	
R2	
R3	

Sollicitations en service des joints soudés			Classes de qualité de soudure en fonction des grades de risques		
			R1	R2	R3
Assemblages calculés non soumis à un calcul en fatigue (1) (charges statiques déterminantes)	Contraintes statiques	$0,8 \leq \frac{\sigma_c}{\sigma_e} \leq 1$	A	A	B
		$0,4 \leq \frac{\sigma_c}{\sigma_e} < 0,8$	A	B	C
		$\frac{\sigma_c}{\sigma_e} < 0,4$	B	C	C
Assemblages calculés soumis à un calcul en fatigue (1) (charges cycliques déterminantes)	Contraintes cycliques	$0,7 \leq \frac{\Delta\sigma}{\Delta\sigma_a} \leq 1$	A	A	B
		$0,3 \leq \frac{\Delta\sigma}{\Delta\sigma_a} \leq 0,7$	A	B	C
		$\frac{\Delta\sigma}{\Delta\sigma_a} < 0,3$	B	C	C
Assemblages non calculés		sollicités	A	A	B
		peu sollicités	A	B	C

nage site
Facile
X

$\sigma_c$  = Contrainte pondérée calculée.  
 $\sigma_e$  = Contrainte à la limite élastique conventionnelle ( $R_{p0,2}$ ).  
 $\Delta\sigma$  = Étendue des contraintes appliquées.  
 $\Delta\sigma_a$  = Étendue des contraintes admissibles à  $2 \times 10^6$  cycles (voir l'annexe A).  
 (1) Le calcul en fatigue n'exclut pas la vérification en statique ; retenir le résultat le plus défavorable.

Note:  
 importants)

- sévérité de sollicitation définie par un coefficient  $\frac{\sigma_c}{\sigma_e}$  en statique



Classe de qualité de soudure	Degré d'aptitude des soudeurs et opérateurs	Étendue des contrôles		
		Visuel	Radiographie ou ultrasons	Magnétoscopie ou ressuage
A	I	100 %	> 50 % (1) (2) (3)	> 50 % (1)
B	II	100 %	—	> 10 % (4)
C	III	100 %	—	—

(1) Par accord entre le constructeur et l'acheteur, le contrôle par radiographie ou par ultrasons peut être remplacé par un contrôle par magnétoscopie ou par ressuage et vice-versa.

(2) Pour les aciers dont la limite d'élasticité est inférieure ou égale à 10 mm.

(3) Les points de concentration des contraintes (nœuds, croisements, extrémités des soudures...) sont contrôlés à 100 % sur au moins 50 mm de part et d'autre de l'axe de concentration ou du bord du joint soudé.

(4) Le contrôle par magnétoscopie ou par ressuage est supprimé pour les aciers dont la limite d'élasticité est inférieure à 355 MPa et égale à 20 mm.

Remarques : Les contrôles effectués doivent être répartis aussi régulièrement que possible sur l'ensemble de chaque joint soudé relevant de la même classe de qualité de soudure.

La longueur contrôlée ne doit pas être inférieure à 400 mm.

Tout joint soudé de longueur inférieure à 400 mm, est contrôlé sur la totalité de sa longueur.

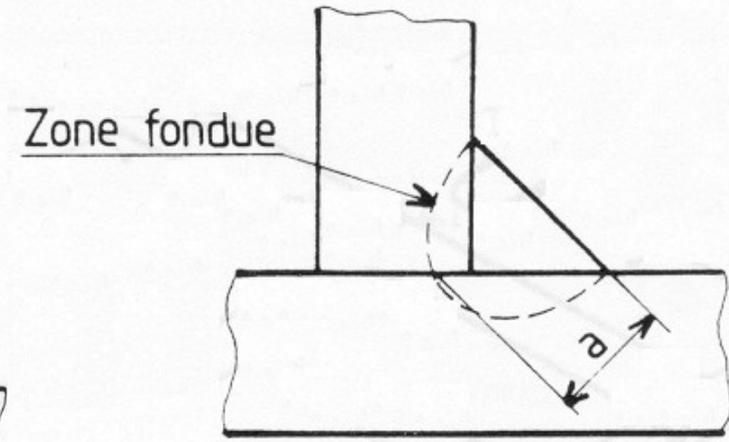
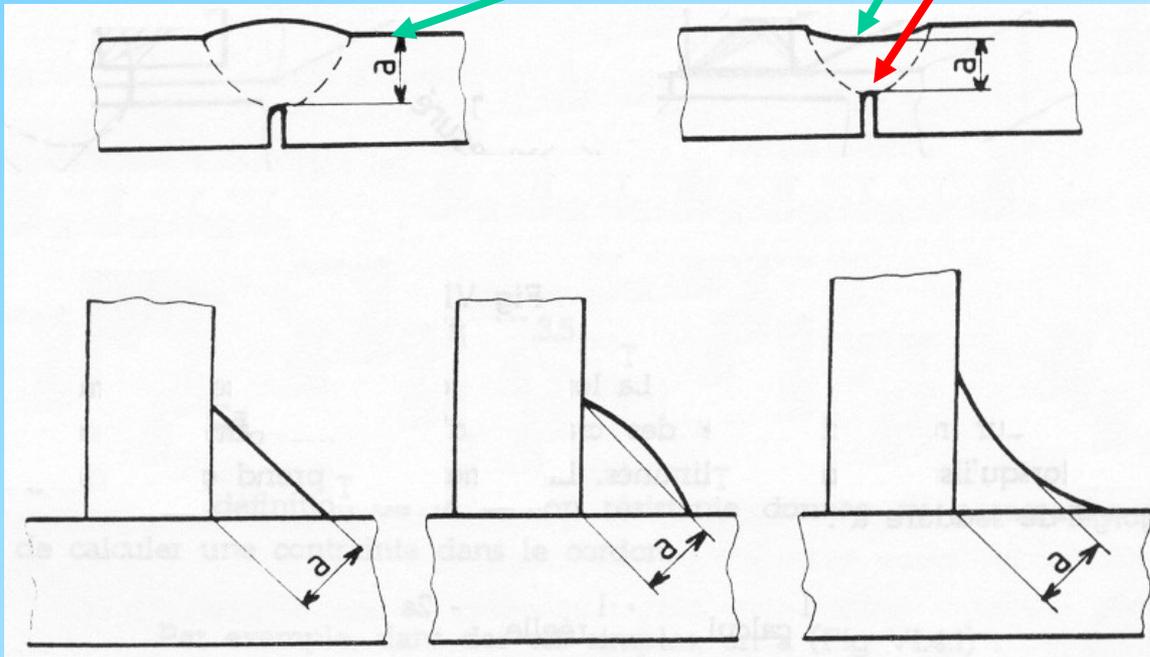
Pour les joints soudés de longueur supérieure à 400 mm, toutes les extrémités doivent être contrôlées sur une longueur au moins égale à 50 mm.

Garantie sur l'exécution

Garantie des défauts admissibles

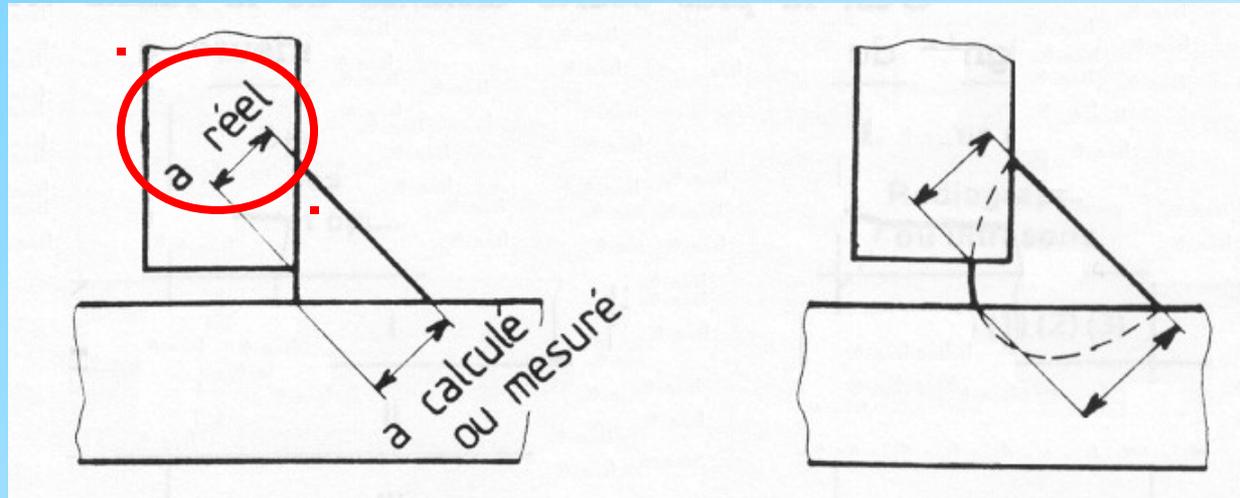
- Section efficace d'une soudure

Gorge (a): plus courte distance de la racine (région de la première passe) à la surface extérieure (sans les surépaisseurs)



si la pénétration est contrôlée, on peut en tenir compte

En cas de défaut d'accostage, la gorge effective est réduite par rapport à celle mesurée ou calculée.



Si aucun contrôle non destructif, le défaut peut passer inaperçu.

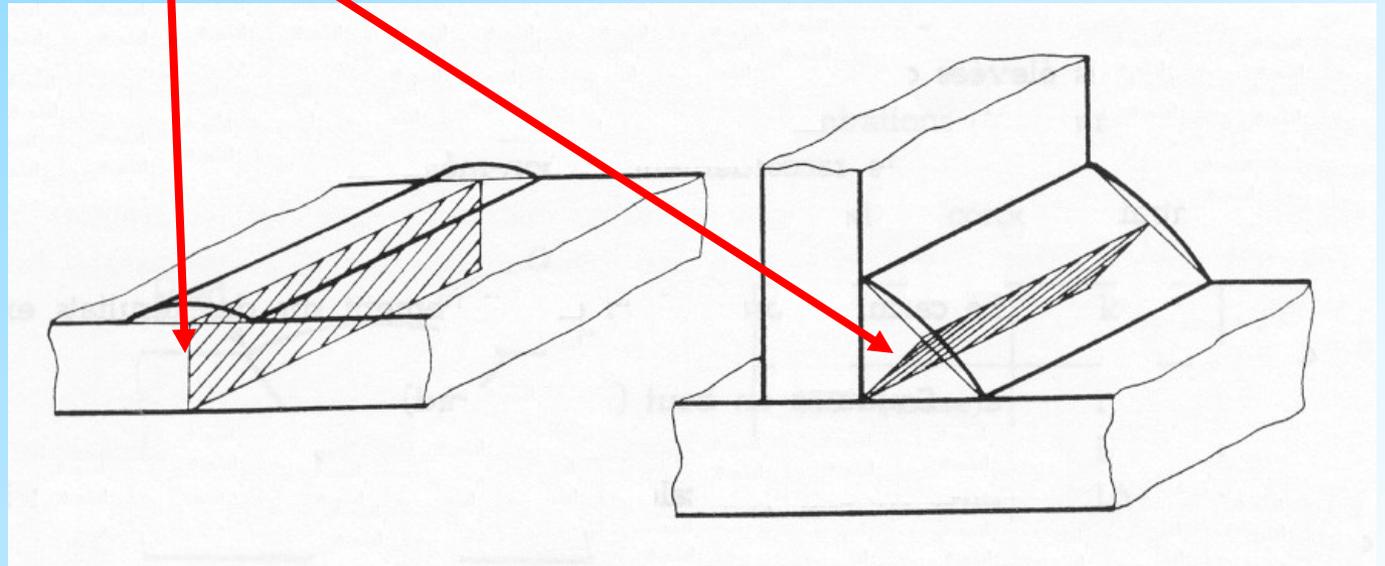
➡ Rectifier le défaut avant l'exécution

Longueur du cordon (l) :

$$l_{\text{calcul}} = l_{\text{réelle}} - \underbrace{2a}$$

↳ longueur des cratères d 'extrémité

Section efficace :



# ASSEMBLAGES SOUDES

(soudage des métaux)

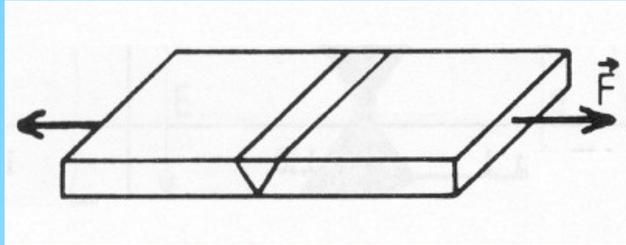
1- Généralités

2- Calcul des soudures

2-1 Généralités sur le calcul des soudures

2-2 Calcul statique

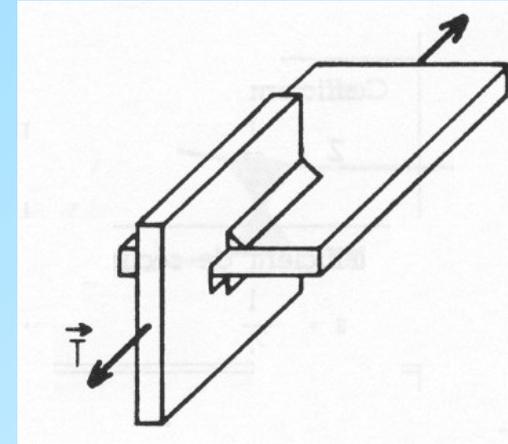
## 2-2 Calcul statique



$$\sigma = \frac{F}{a.l}$$

La contrainte effective dans le cordon a une valeur très différente :

- contraintes résiduelles élevées (cycle thermique)
- concentrations de contraintes dans le raccordement cordon-métal de base



$$\tau = \frac{T}{\sum a.l}$$



Calcul reposera donc sur résultats expérimentaux

- soudures en bout (bord à bord)

—> pas calculées, si garanties d'exécution et de contrôle

—> coefficient de sécurité sur les soudures dans le cas contraire

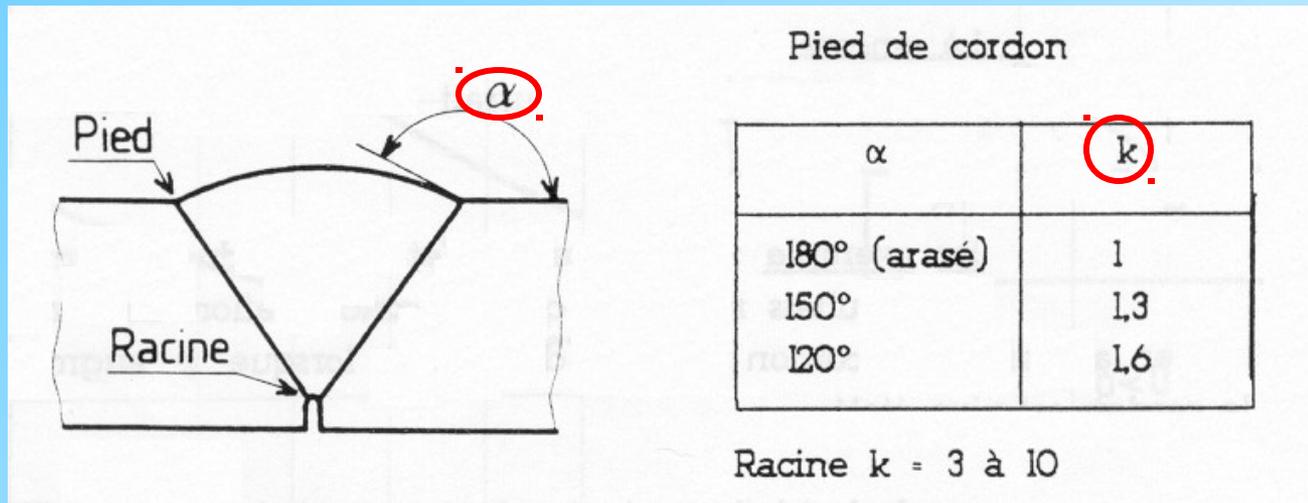
### Exemple du CODAP:

Catégorie	A	B	C	D
Coefficient de soudure $Z = \frac{1}{s}$	1	0,85 ou 1	0,85	0,7
Coefficient de sécurité $s = \frac{1}{Z}$	1	1,18 ou 1	1,18	1,43
Conséquences imposées				
Contrôle radio	100 %			10 % + nœuds
Réception matériaux	Contrôle spécifique			certificat matière

on oublie la soudure en prenant des garanties

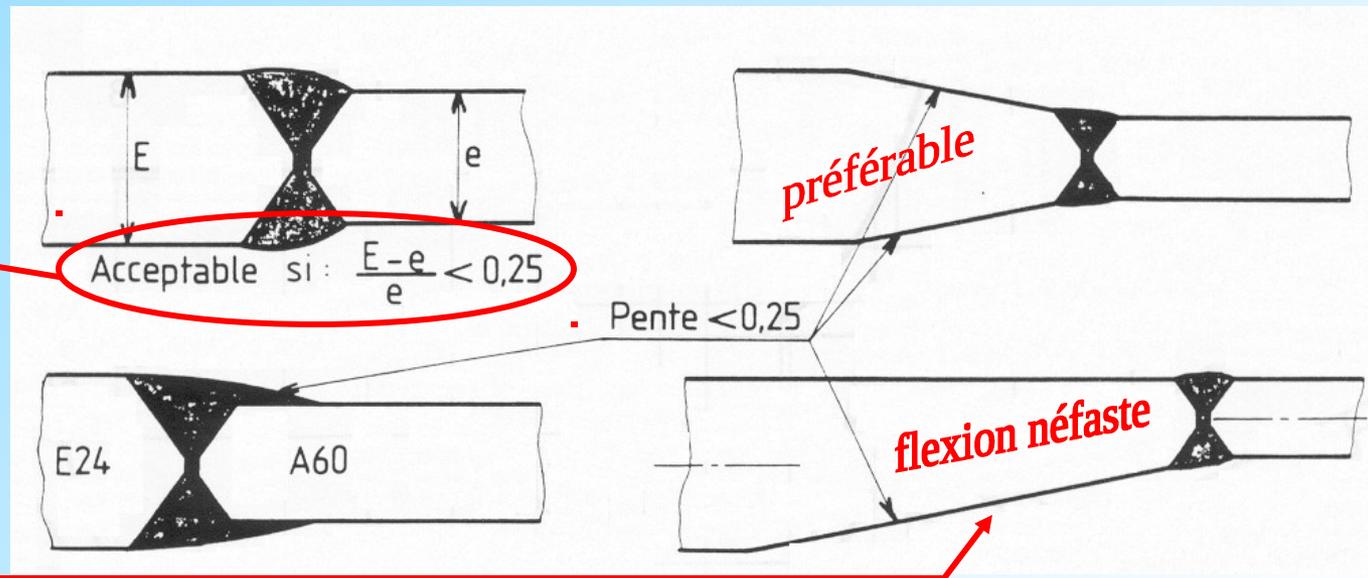
majoration de 43% des épaisseurs de soudures

# Ordre de grandeur des concentrations de contraintes:



## ➔ Assemblages d'épaisseurs différentes

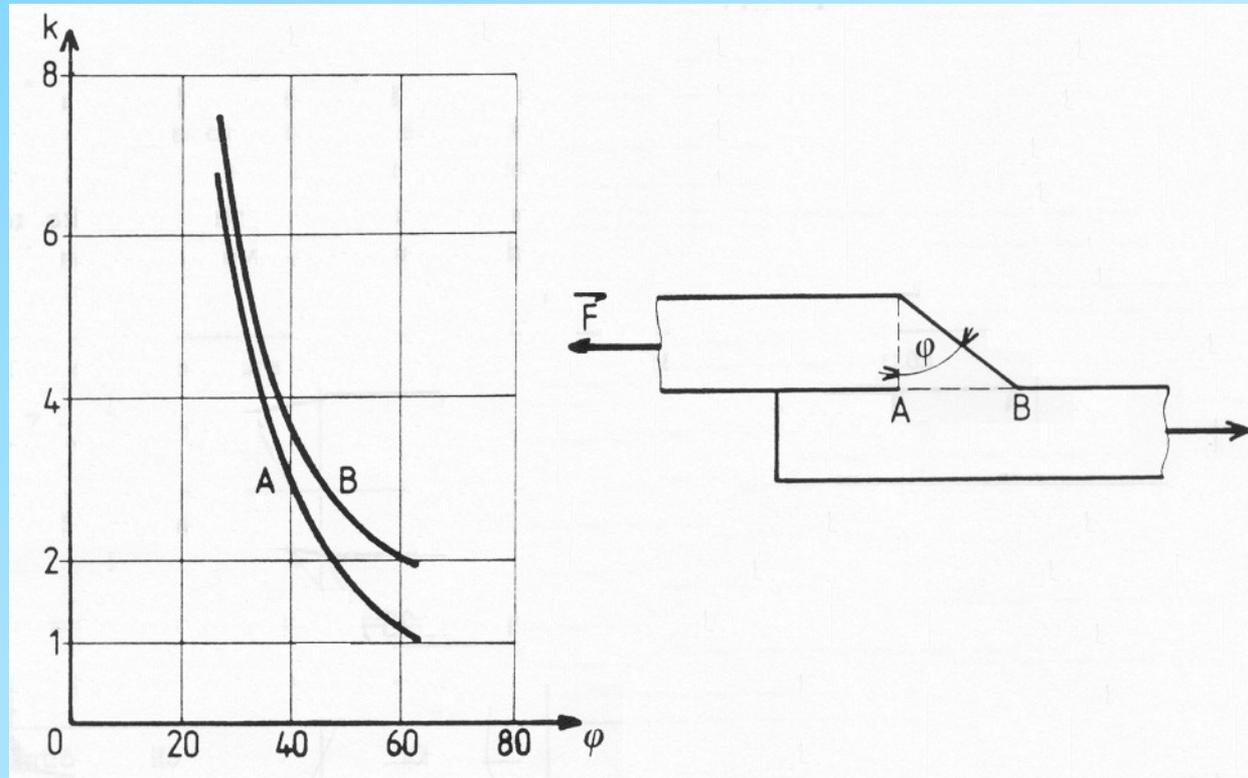
L'étalement du cordon assure le raccordement



Délardage sur la tôle la plus épaisse

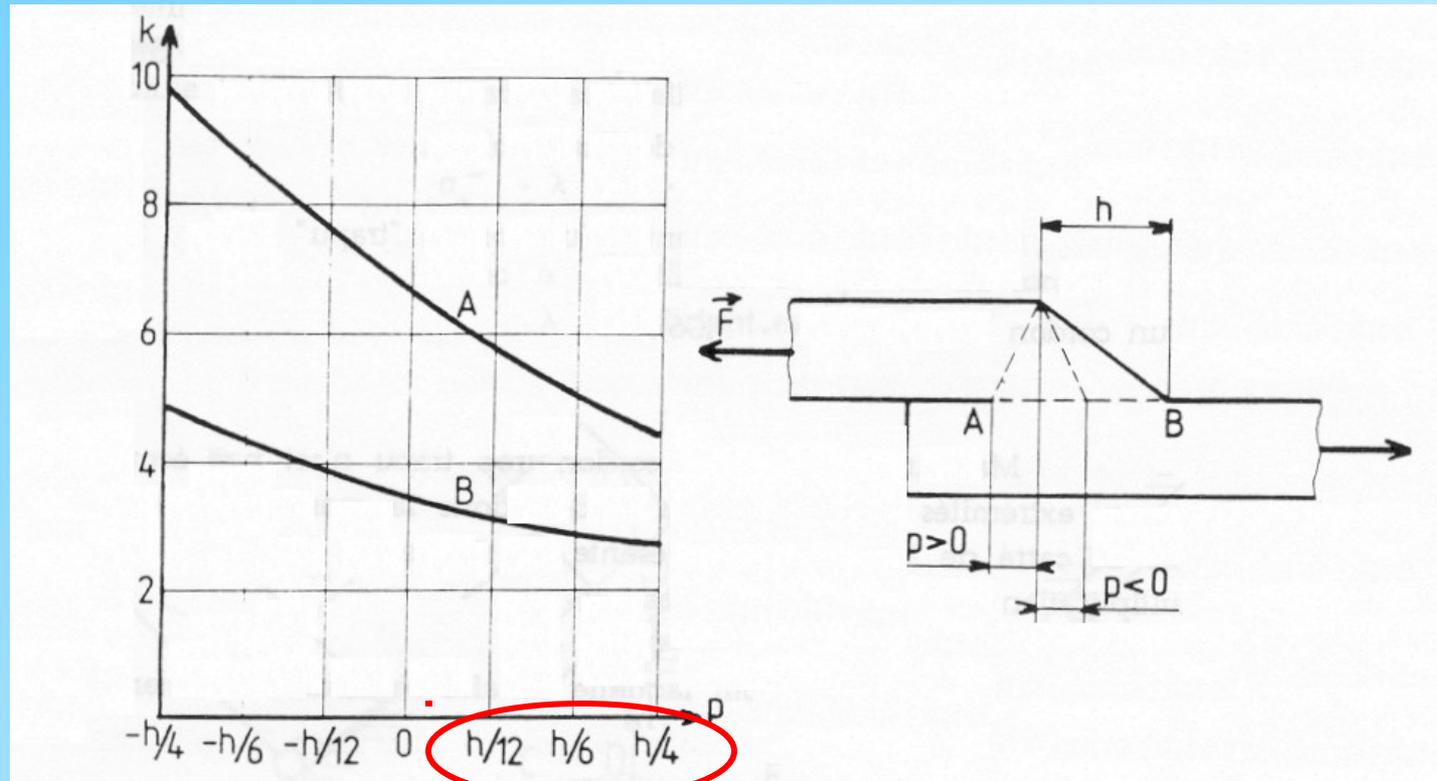
- Soudure d'angle

- influence de l'étalement du cordon



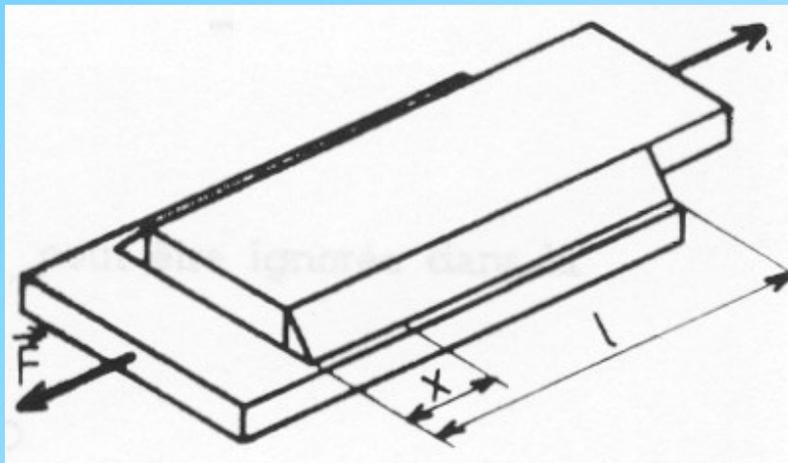
En général, on adopte en statique  $\varphi \geq 45^\circ$   
en fatigue  $\varphi \geq 56^\circ$

## - influence de la pénétration



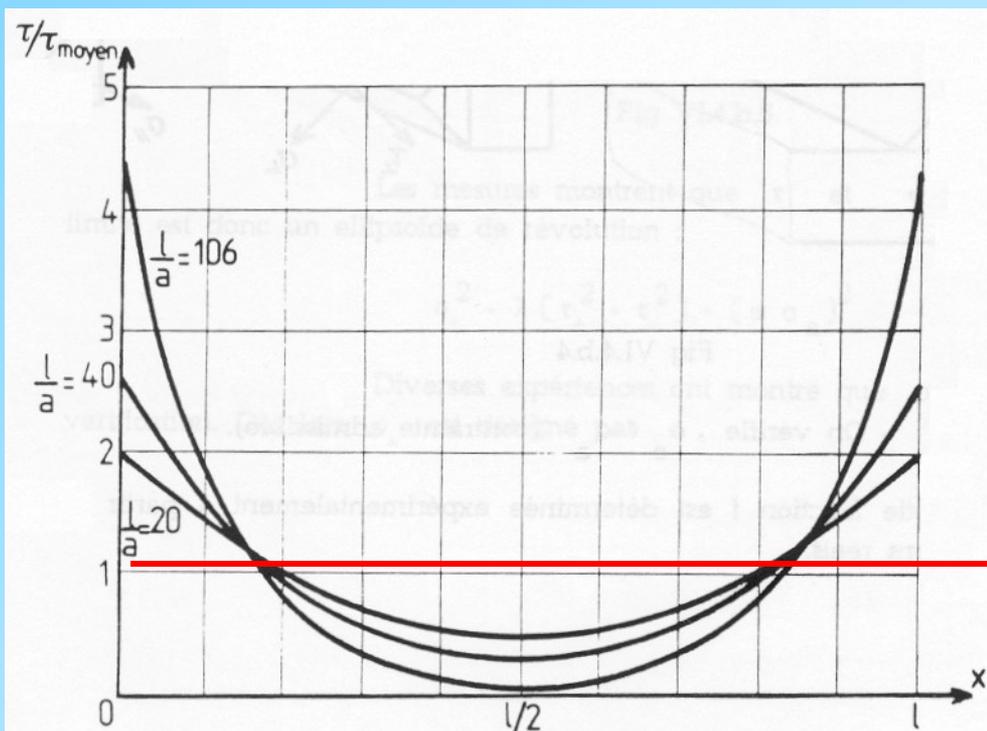
La pénétration dépend des conditions d'exécution, et n'est donc pas connue au stade du BE.

# - influence de l'élancement du cordon



$$\tau_{\text{moy}} = \frac{F}{2al}$$

Valeur réelle très différente

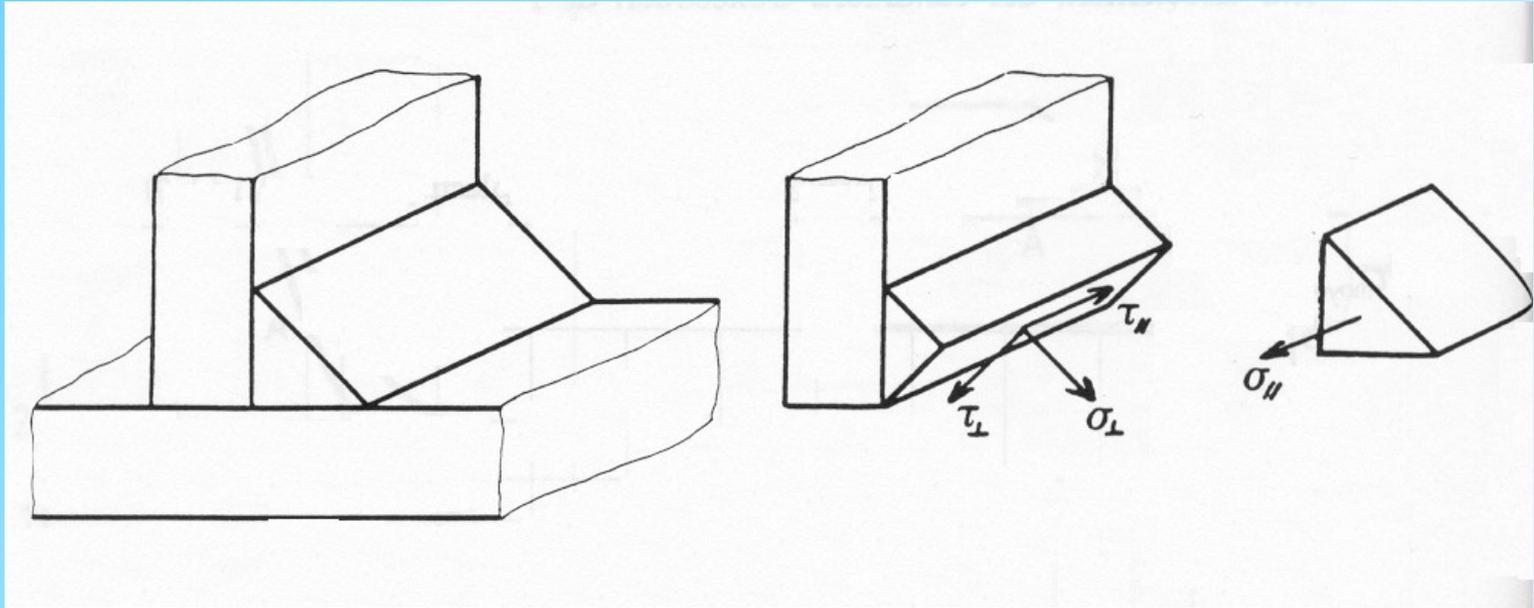


➡ Cordon trapu plus favorable

**mais** • pas économique  
• plus de risques de défauts

➡  **$20a \leq l \leq 40a$**

- Principe de vérification des cordons d'angle

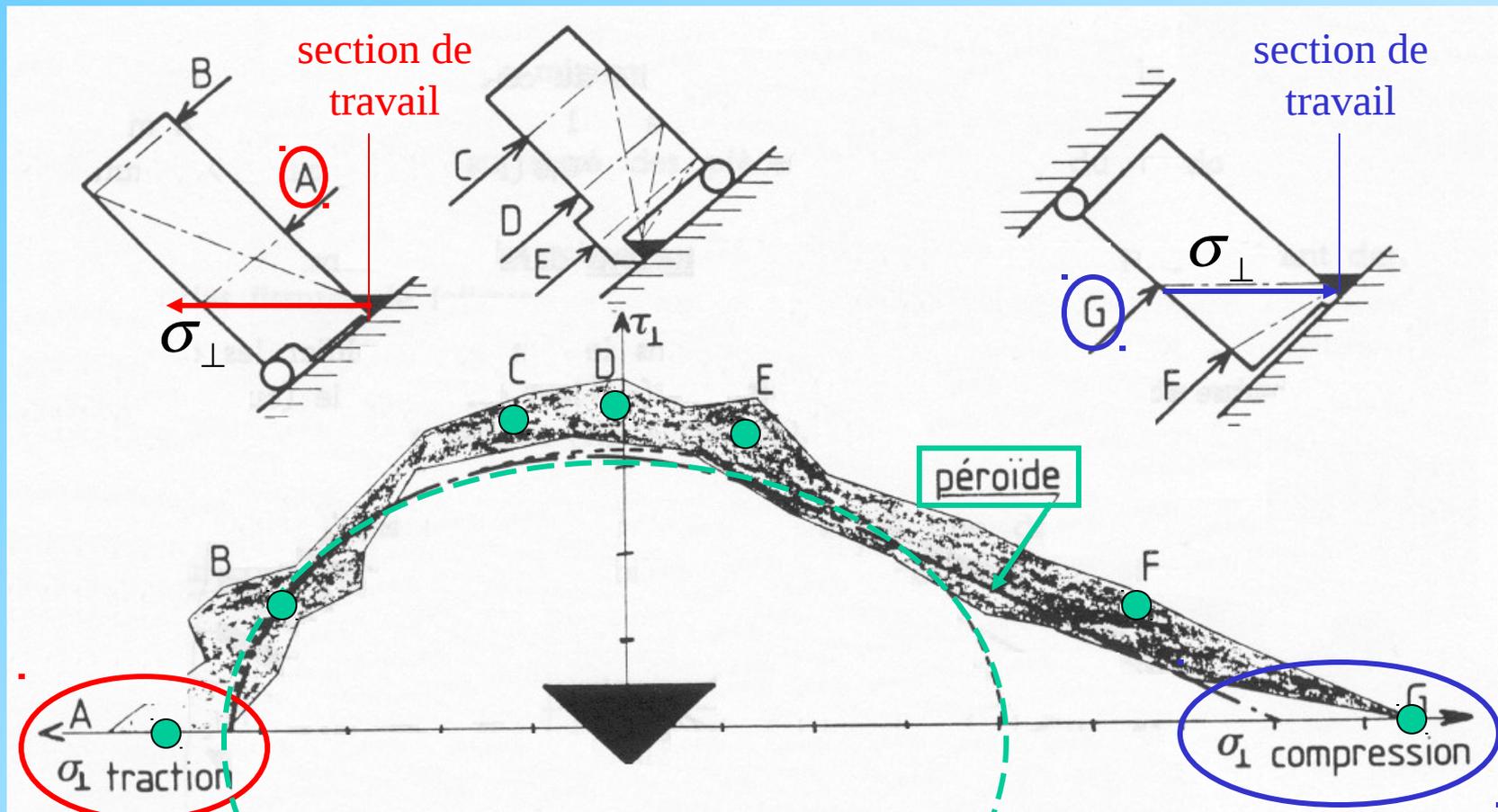


On définit une contrainte de comparaison:

$$\sigma_c = f(\sigma_{\perp}, \sigma_{\parallel}, \tau_{\perp}, \tau_{\parallel}) \longrightarrow \text{fonction } f \text{ déterminée expérimentalement à partir d'essai de rupture sur des cordons réels}$$

On vérifie  $\sigma_c \leq \sigma_a$

# Exemple: résultats d'essais en état plan de contrainte $\sigma_{\perp}$ et $\tau_{\perp}$



$$\sigma_{\perp}^2 + \lambda \tau_{\perp}^2 = (\alpha \sigma_a)^2$$

$\lambda$  : coefficient expérimental  
 $\alpha$  : coefficient de qualité du cordon

Les mesurent montrent que  $\tau_{//}$  et  $\tau_{\perp}$  ont la même influence.

L'état limite est donc un ellipsoïde de révolution:

$$\sigma_{\perp}^2 + \lambda(\tau_{\perp}^2 + \tau_{//}^2) = (\alpha\sigma_a)^2$$

L'expérience montre également que  $\sigma_{//}$  peut être ignorée dans la vérification.

En construction métallique, on prend:  $\lambda = 1,8$

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

↓  
Contraintes moyennes pondérées (calculées à partir de sollicitations réelles et multipliées par un coefficient de sécurité)

$\sigma_e$  Limite d'élasticité du métal de base

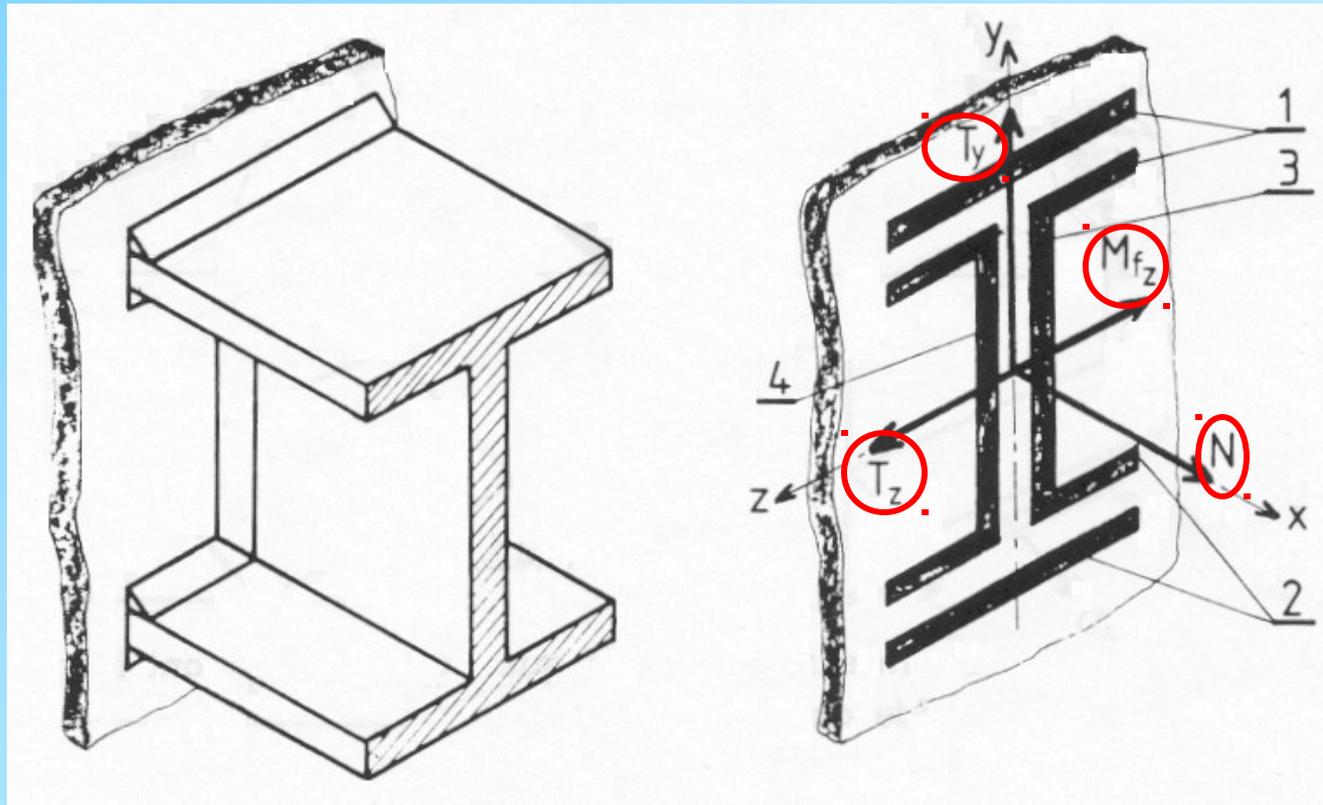
$\alpha$  Coefficient de qualité du cordon

1 pour  $a \leq 4mm$

$0,8 \left( 1 + \frac{l}{a} \right)$  pour  $a > 4mm$

- répartition des sollicitations dans les cordons

Par convention et dans le but de simplifier les calculs, on admet que chaque sollicitation est transmise par le (ou les) cordon(s), le (ou les) mieux disposé(s) pour le faire.



- $N$  transmis par les cordons 1-2-3-4 au prorata de la section
- $T_y$  est transmis par 3 et 4

- $T_z$  est transmis par 1 et 2
- $M_{fz}$  est transmis par 1 et 2

# ASSEMBLAGES SOUDES

(soudage des métaux)

1- Généralités

2- Calcul des soudures

2-1 Généralités sur le calcul des soudures

2-2 Calcul statique

2-3 Calcul en fatigue

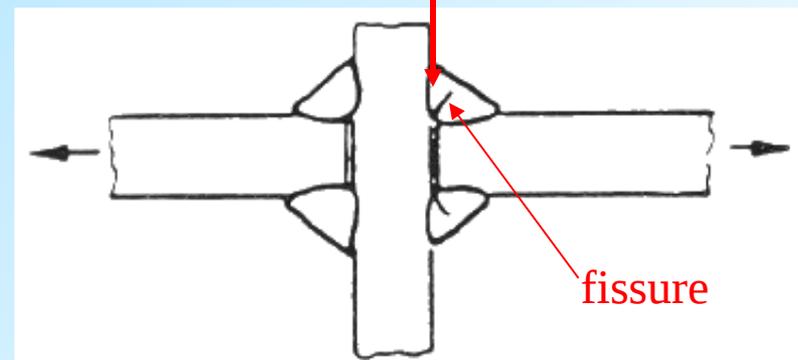
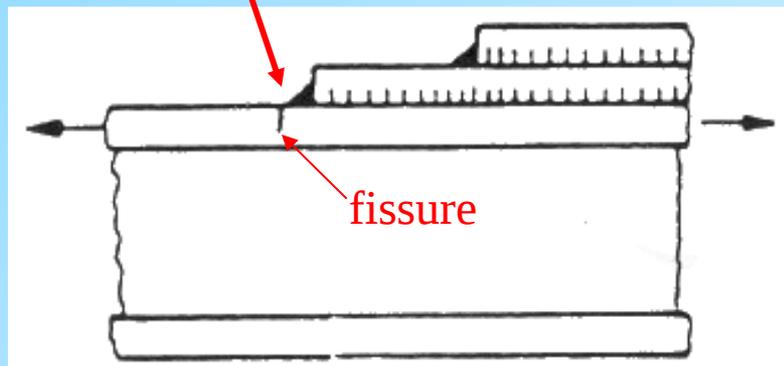
## 2-3 Calcul en fatigue

Comme tout calcul en fatigue, on s'appuie sur des résultats expérimentaux.

Les concentrations de contrainte d'un assemblage soudé sont dues:

- à l'allure générale du cordon (cordon bombé à éviter)
- à la microgéométrie locale du pied et de la racine du cordon
- au tracé des pièces au voisinage du cordon

Prépondérant dans la localisation des fissures de fatigue



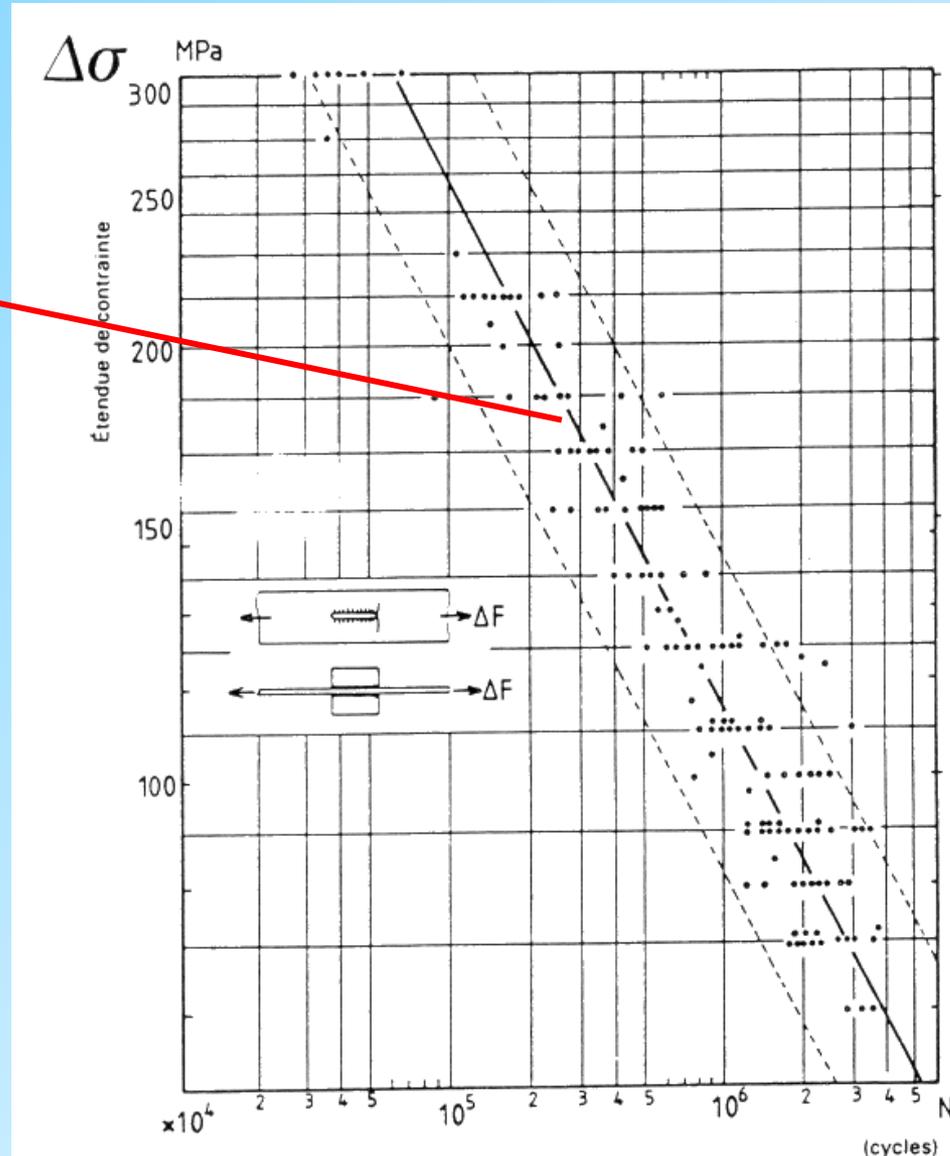
Les essais de fatigue sont conduits selon le principe de la norme NF A 03-400.

## Résultats:

Droite moyenne d'équation

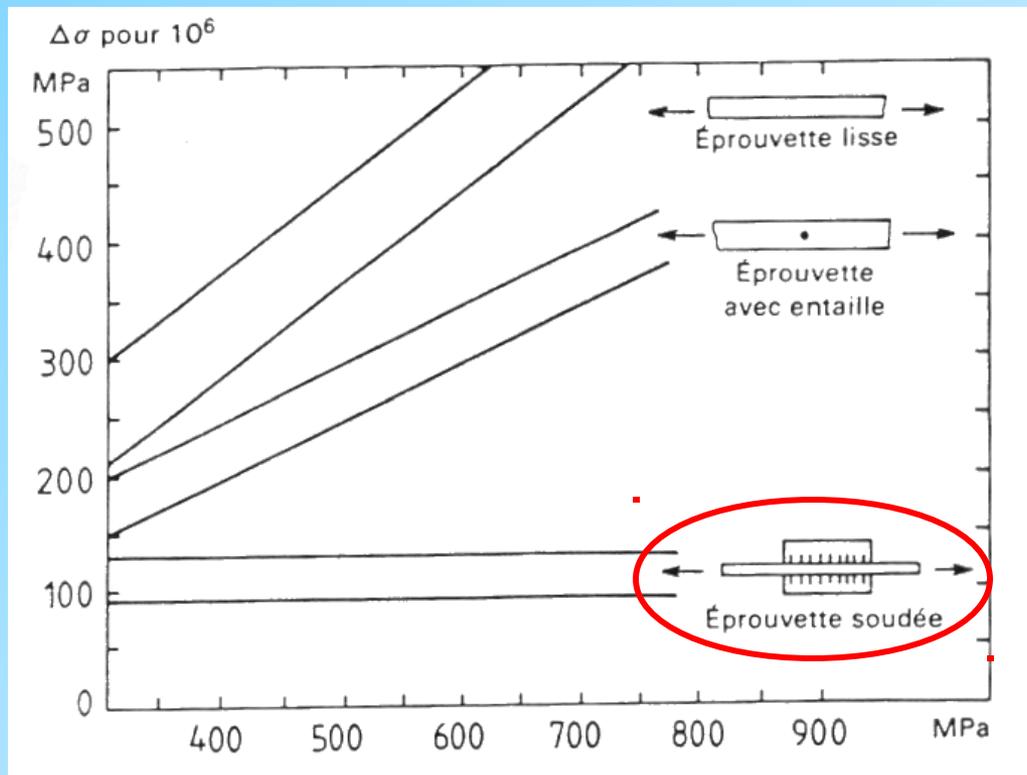
$$N = \frac{C}{\Delta\sigma^m}$$

avec une probabilité de rupture de 50%



Les essais mettent en évidence un certain nombre de points importants :

- durée de vie d'un assemblage soudé dépend de  $\Delta\sigma$  et pas de  $\sigma_{\text{moy}}$
- rupture s'amorce sur une entaille aiguë au pied du cordon (ou à la racine)
- la limite d'élasticité  $R_e$  n'a pas d'influence sur la tenue en fatigue (car les contraintes résiduelles sont proches de la limite d'élasticité  $R_e$  du métal de base)



un acier plus résistant  
ne changera rien



modifier la géométrie

Pour le calcul:

Il faut déterminer un  $\Delta\sigma$  admissible.

Les assemblages donnant des résultats comparables sont regroupés dans une même classe

Cette classe représente l'étendue de contrainte admissible en Mpa pour une probabilité de survie de 97,7% à 2 millions de cycles.

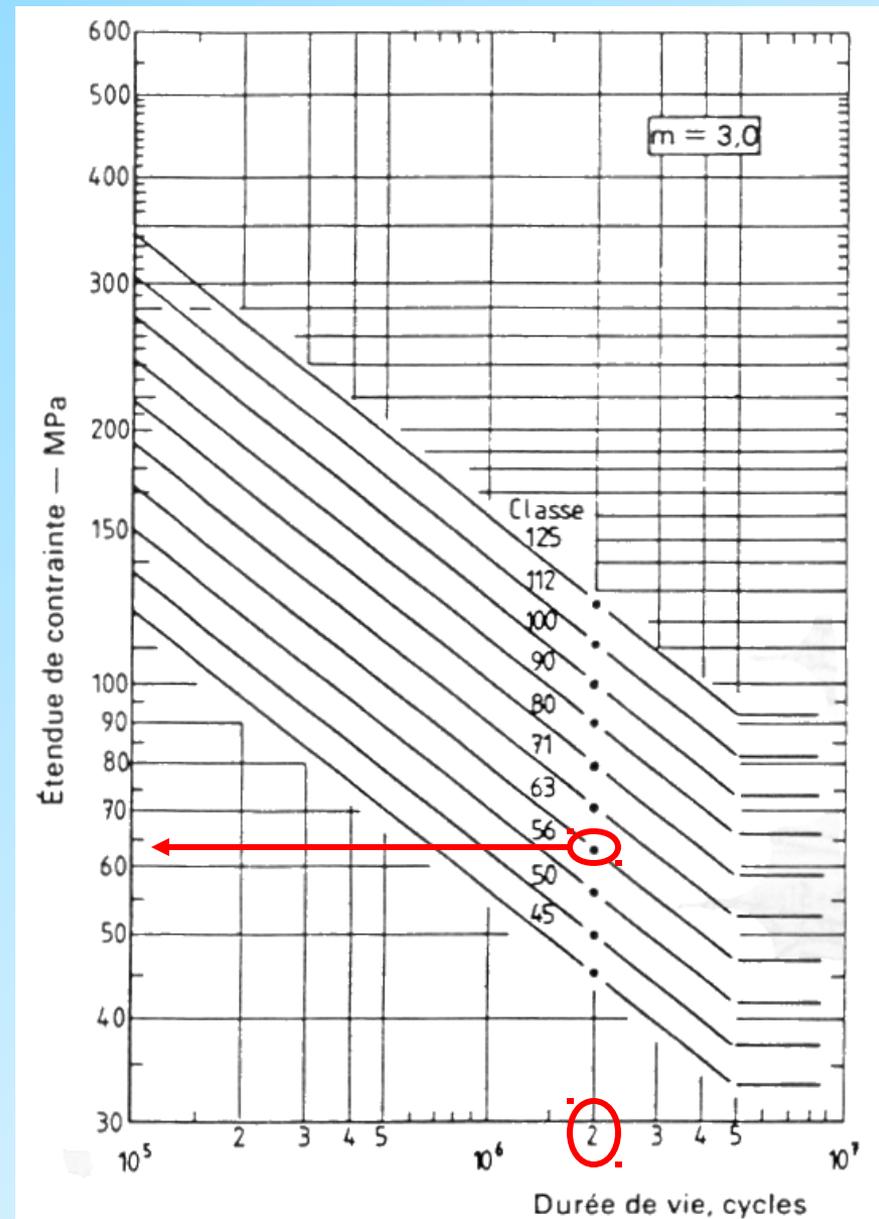


Table 1. Classification of joints/Tableau 1. Classification d'assemblages

Type/No	Joint configuration showing mode of fatigue cracking and stress considered/Schéma de l'assemblage indiquant le mode de fissuration	Description of joint/Description de l'assemblage	Class/Classe
1		transverse butt weld ground flush to plate 100% NDT/ soudure transversale bout à bout arasée CND à 100%	125
2		transverse butt welds made in the shop in the flat position by any method except submerged arc welding NDT/ soudure d'atelier transversale bout à bout exécutée à plat par tout procédé exception faite au soudage sous flux CND	100
3		transverse butt welds not satisfying conditions for joint no. 2 NDT/ soudure transversale bout à bout exécutée dans des conditions différentes de la soudure no. 2 CND	80
4		transverse butt weld on backing bar (based on stress range in parent plate excluding effect of backing bar)/soudure transversale bout à bout avec support à l'envers (étendue de contrainte dans la tôle principale exclusion faite de l'effet du support)	71
5		continuous automatic longitudinal butt weld without stop/start positions (based on stress range in flange adjacent to weld)/ soudure longitudinale bout à bout. Soudage automatique continu (étendue de contrainte dans la semelle adjacente au cordon)	125
6		continuous automatic longitudinal fillet weld without stop/start positions (based on stress range in flange adjacent to weld)/ soudure d'angle ou bout à bout continue; soudure longitudinale automatique (étendue de contrainte dans la semelle adjacente au cordon)	112
7		continuous manual longitudinal fillet or butt weld (based on stress range in flange adjacent to weld)/soudure d'angle ou bout à bout continue. Soudure longitudinale manuelle (étendue de contrainte dans la semelle adjacente au cordon)	100
8		intermittent longitudinal fillet weld (based on stress range in flange at weld ends)/ soudure d'angle longitudinale intermittente (étendue de contrainte dans la semelle aux extrémités de cordons)	80

Table 1 continued/Tableau 1 suite

Type/No	Joint configuration showing mode of fatigue cracking and stress considered/Schéma de l'assemblage indiquant le mode de fissuration	Description of joint/Description de l'assemblage	Class/Classe
9		longitudinal butt weld, fillet weld or intermittent fillet weld with cope holes (based on stress range in flange at weld ends)/soudure longitudinale bout à bout, soudure d'angle continue, ou soudure d'angle intermittente avec échancrures (étendue de contrainte dans la semelle aux extrémités de cordons)	71
10		longitudinal fillet welded gusset /soudure d'angle longitudinale d'un gousset: shorter than 150mm/longueur < 150 mm longer than 150mm/longueur > 150 mm near the edge/près du bord	71 63 50
11		transverse fillet welded gusset/soudure d'angle transversale d'un gousset	80
12		gusset welded on plate edge/gousset soudé sur la rive d'une tôle	50
13		non-load-carrying shear connector/goujons-connecteurs non sollicités	80
14		stiffener welded to girder web (based on principal stress range in web at end of stiffener)/raideuse soudé à l'âme d'une poutre (étendue de la contrainte principale dans l'âme à l'extrémité du raidisseur)	80
15		stiffener welded to girder flange (based on stress range in flange at weld toe)/raideuse soudé à la semelle d'une poutre (étendue de contrainte dans la semelle, au niveau du pied de cordon)	80
16		cruciform joint K-butt weld with fillet welded ends - Z (see 4.3). Misalignment less than 15% plate thickness/assemblage en croix. Préparation en K avec extrémités soudées en angle travers-court (Z) (voir 4.3.) - défaut d'alignement inférieur à 15% de l'épaisseur de la tôle	71

$\Delta\sigma$