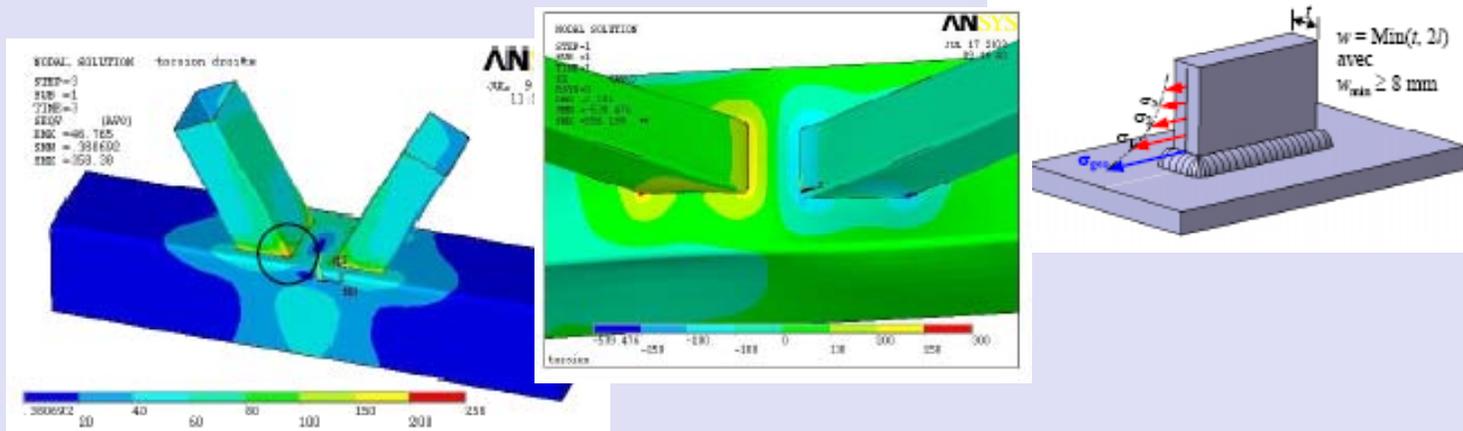
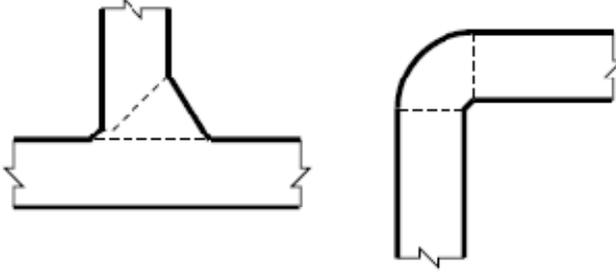
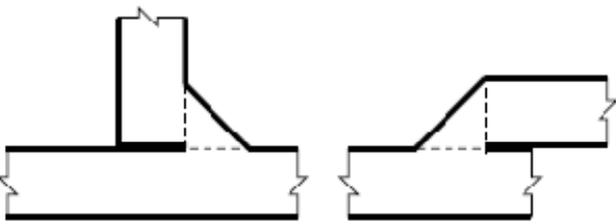
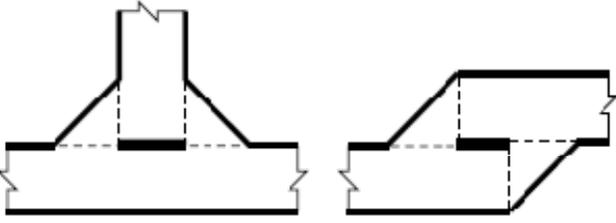


# CALCUL DES SOUDURES EN STATIQUE



## SOMMAIRE

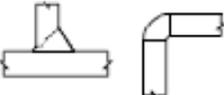
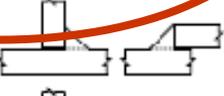
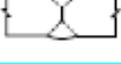
- **Cordons à pleine pénétration**
- **Cordons à pénétration partielle**

	bout à bout	d'angle
pleine épaisseur		
simple cordon		
double cordon		

## SOMMAIRE

- **Cordons à pleine pénétration**
- **Cordons à pénétration partielle**

Tableau 4- Terminologie et forme des assemblages soudés par cordons

	dout à bout	angle
pleine épaisseur		
simple cordon		
double cordon		

**On distingue 2 cas :**

- ✓ **Matériaux non dégradables par le cycle thermique de soudage**
- ✓ **Matériaux dégradables par le cycle thermique de soudage**

## ✓ Matériaux non dégradables par le cycle thermique de soudage

**Il s'agit des métaux et alliages de base pour lesquels le cycle thermique de soudage n'est pas de nature à faire apparaître localement (en ZAT : zone affectée thermiquement) un abaissement significatif des caractéristiques mécaniques de résistance (limite d'élasticité et charge de rupture).**

Les aciers relevant de la catégorie définie par ce paragraphe, sont les suivants :

- groupe 1 : nuances 1-1 à 1-3 sauf états écrouis ;
- groupe 2 : nuances 2-1 à 2-3 (sous réserve d'épaisseur suffisante dans le cas des nuances 2-3) ;
- groupe 3 : nuances 3-1 et 3-2 ;
- groupe 5 : nuances 5-1 à 5-3 ;
- groupe 7 : nuances 7-1 et 7-2 ;
- groupe 8 : nuances 8-1 ;
- groupes 9, 10 : nuances 9-1, 9-2, 9-4 et 10 sauf états écrouis ;
- groupe 11 : nuances 11-1 et 11-2 sauf états écrouis.

Les alliages d'aluminium qui relèvent de cette même catégorie sont les suivants :

- groupe 1 : nuances 1-1 à 1-4 utilisées à l'état non écroui (O ou H111 par exemple) ;
- groupe 2 : nuances 2-1 utilisées à l'état adouci (O) ;
- groupe 3 : nuances 3-1 et 3-2 utilisées à l'état adouci (Yx0).

## ✓ Matériaux non dégradables par le cycle thermique de soudage

Dans ces conditions, **les assemblages bout à bout et en angle réalisés à pleine épaisseur n'ont pas à faire l'objet d'une justification dimensionnelle statique** si les conditions supplémentaires suivantes sont respectées :

- **les caractéristiques mécaniques du joint** (ZF en particulier), vérifiées à l'aide de QMOS, **sont au moins égales à celles minimales garanties pour le matériau de base**. Pour un grand nombre de nuances courantes, et dans le cas de modes opératoires de soudage classiques, cette condition est satisfaite et la QMOS s'avère inutile ;
- l'absence de défauts de compacité (défauts plans en particulier) est vérifiée à l'aide d'un contrôle non destructif dans le joint soudé et ses abords.

**On distingue 2 cas :**

- ✓ **Matériaux non dégradables par le cycle thermique de soudage**
- ✓ **Matériaux dégradables par le cycle thermique de soudage**

## ✓ Matériaux dégradables par le cycle thermique de soudage

### Matériaux concernés :

- aciers préalablement durcis par écrouissage ou par traitement thermique (trempe martensitique + revenu ou mise en solution + hypertrempe + précipitation) ;
- alliages d'aluminium préalablement durcis par écrouissage ou par traitement thermique (mise en solution + hypertrempe + précipitation).
- alliages soudables seulement de façon hétérogène à l'aide d'un produit d'apport conduisant à une zone fondue (ZF) possédant des caractéristiques mécaniques de résistance plus faibles que celles du métal de base éventuellement adouci (cas des aciers à 3,5 % et 9 % de Ni et cas général des alliages d'aluminium durcis par traitement thermique).

## ✓ Matériaux dégradables par le cycle thermique de soudage

En terme de calcul, les trois catégories précédentes conduisent à tenir compte d'un **coefficient de joint**.

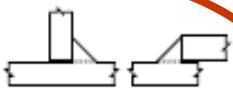
Il est déterminé **expérimentalement** sur la base d'essais de traction effectués sur maquettes ou échantillons de QMOS.

Dans le cas des constructions en alliages d'aluminium, des documents spécifiques indiquent la valeur des coefficients à considérer dans le cas des procédés de soudage à l'arc utilisés sur les nuances courantes avec leurs traitements habituels.

## SOMMAIRE

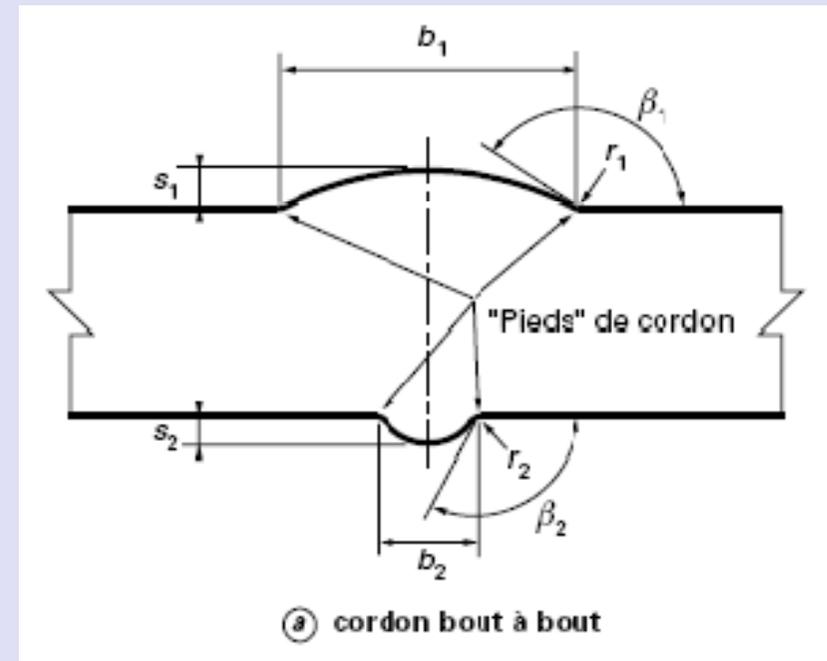
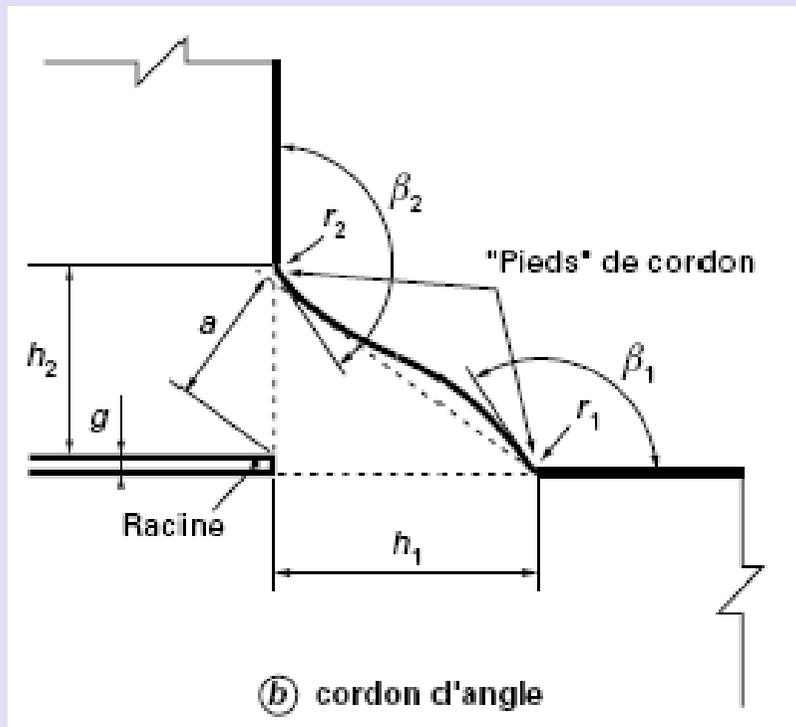
- Cordon à pleine pénétration
- Cordon à pénétration partielle

Tableau 4- Terminologie et forme des assemblages soudés par cordons

	bout à bout	d'angle
pleine épaisseur		
simple cordon		
double cordon		

## ✓ Forme des cordons

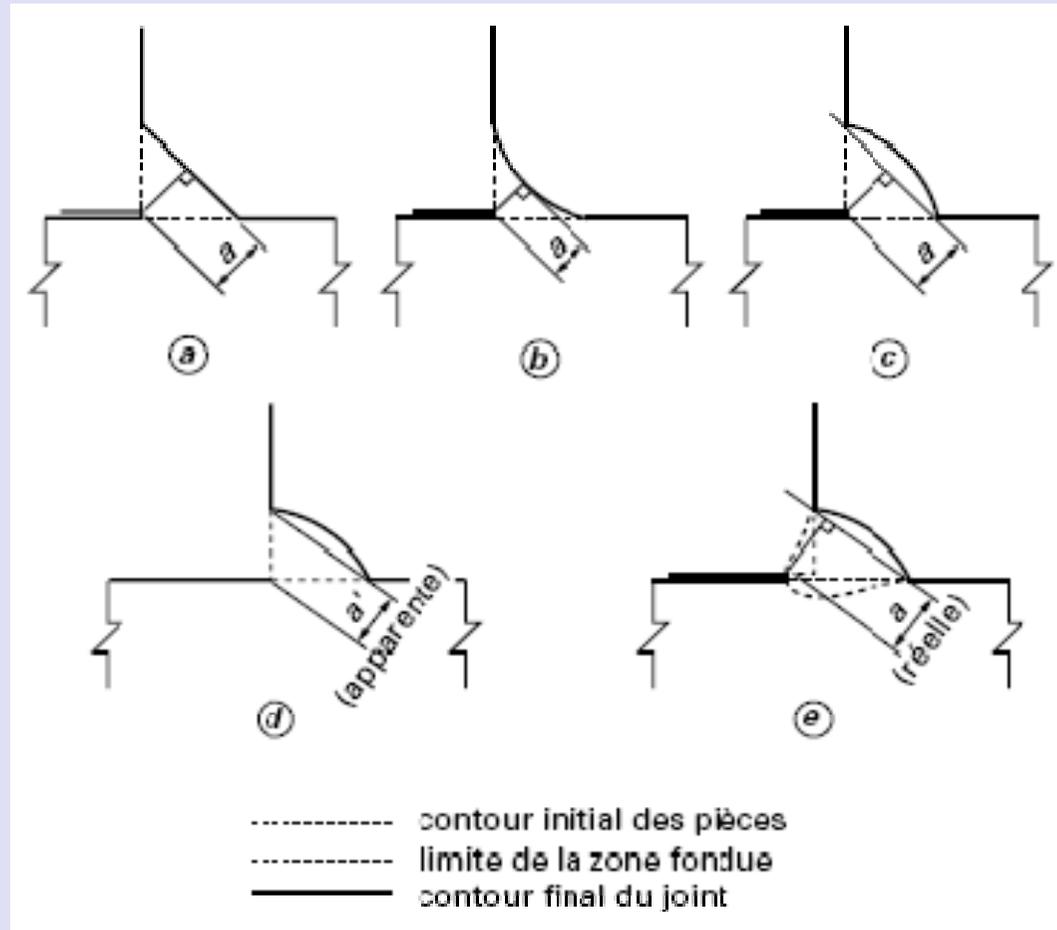
- la surépaisseur ( $s$ )
- la largeur ( $b$ )
- l'angle de raccordement ( $\beta$ )
- le congé de raccordement ( $r$ )
- l'épaisseur de gorge ( $a$ )
- la longueur réelle ( $L$ )



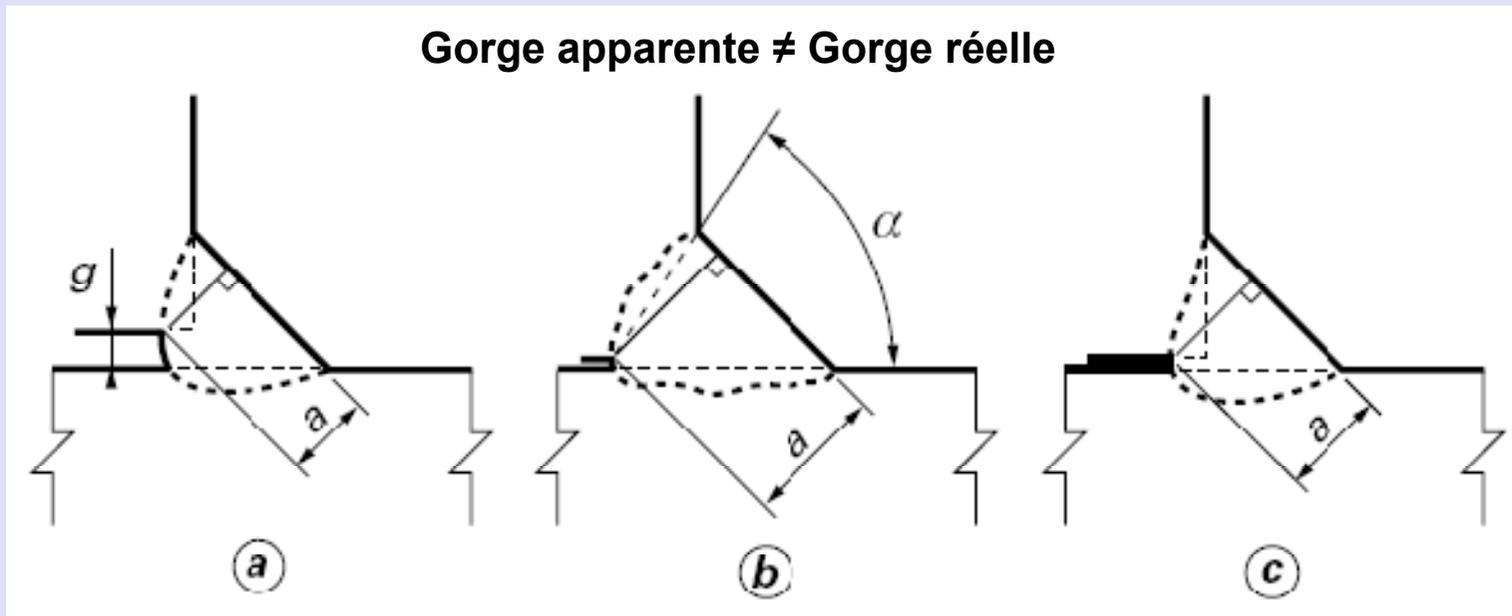
Paramètres influant sur la forme du cordon :

- la nature du matériau et celle du milieu extérieur ;
- la puissance spécifique ainsi que la vitesse de déplacement de la source calorifique ;
- la position du bain de fusion par rapport aux faces à assembler ;
- l'état des surfaces en contact avec le bain de fusion.

## ✓ Gorge d'un cordon



## ✓ Modification de la valeur de gorge (procédés automatisés)



**Après vérification expérimentale**, généralement effectuée au travers de la qualification du mode opératoire de soudage (QMOS)], **possibilité de majorer la gorge apparente pour tenir compte de la pénétration spécifique.**

## ✓ Longueur efficace du cordon

Deux catégories :

- Assemblages soudés comportant des cordons isolés

Par présence quasi systématique de défauts aux extrémités des cordons, on retranche à la longueur réelle une longueur égale à la gorge à chaque extrémité soit :

$$\ell = L - 2a$$

- Assemblages soudés à cordons continus (lignes de joint bouclées)

Dans cette situation, la longueur efficace de chacun des cordons est égale à leur longueur réelle.

Il convient toutefois de noter que dans l'une ou l'autre des catégories précédentes, les cordons très courts ( $L \leq 5a$  par exemple) ne doivent pas être pris en compte dans la résistance de l'assemblage soudé.

## ✓ Section efficace du cordon

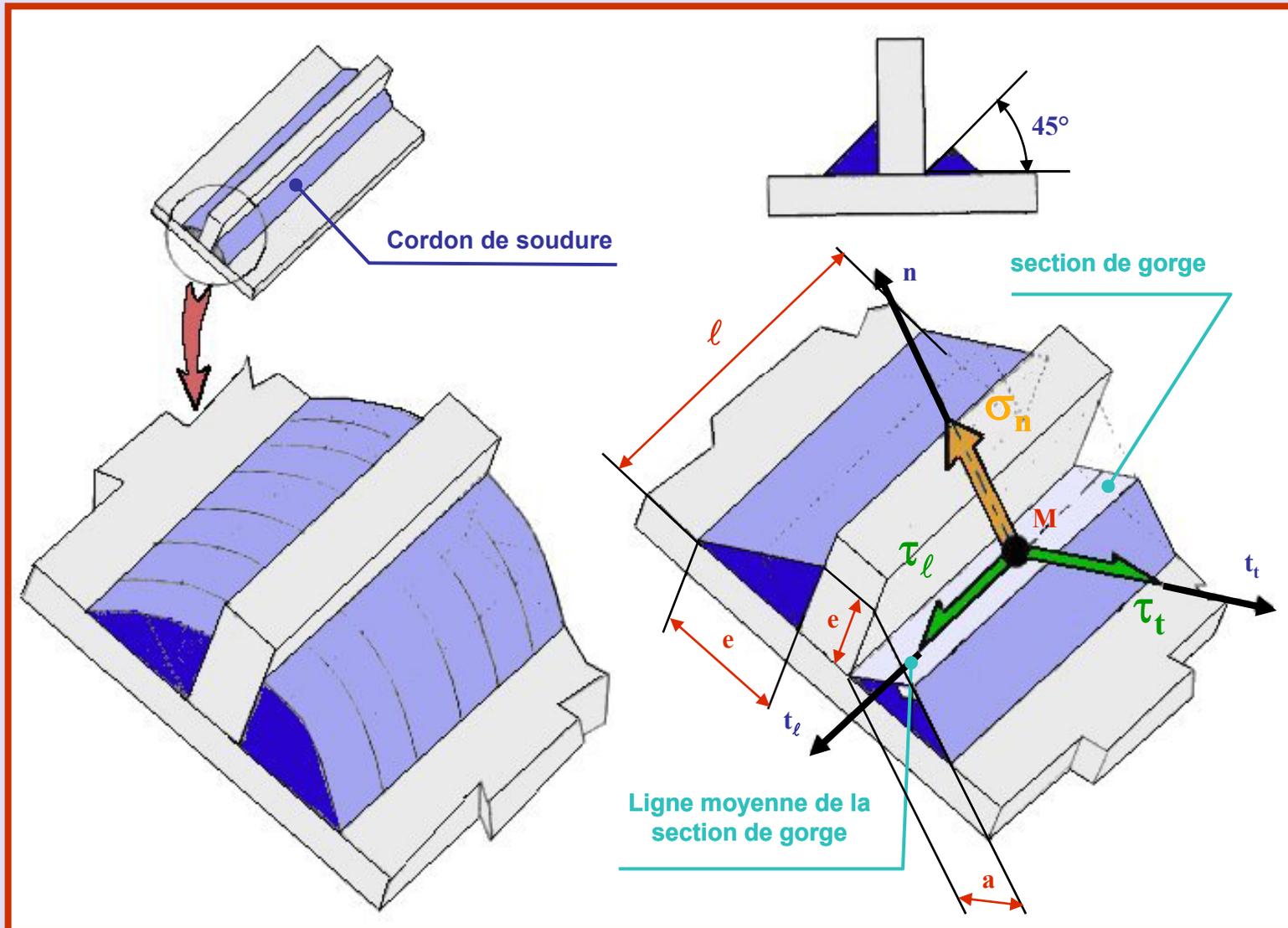
Les calculs de résistance des cordons de soudure s'effectuent sur la base d'une section efficace qui est, selon la forme du cordon, la suivante :

- cordons rectilignes :  $A = \ell a$

- cordons circulaires :  $A = 2 \pi R_m a$

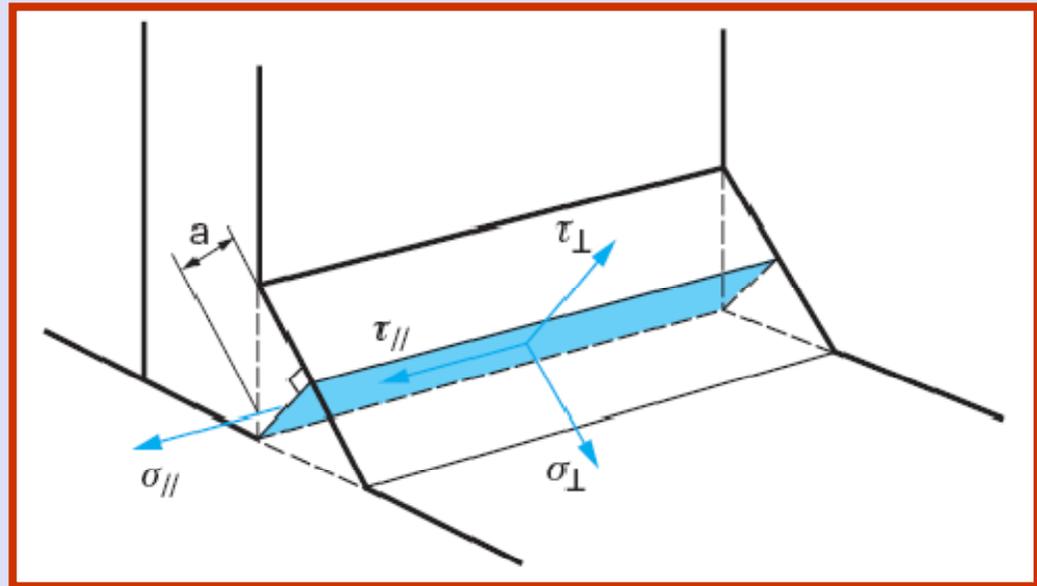
$R_m$  représente le rayon mesuré à mi-épaisseur de la gorge du cordon.

## ✓ Contraintes dans le cordon



## ✓ Contraintes dans le cordon

recommandation ISO/TC 44 :



- **contrainte normale perpendiculaire** à la direction du cordon :  $\sigma_{\perp}$
- **contrainte tangentielle perpendiculaire** à la direction du cordon :  $\tau_{\perp}$
- **contrainte tangentielle parallèle** à la direction du cordon :  $\tau_{//}$

La contrainte normale parallèle à la direction du cordon  $\sigma_{//}$  ne sera jamais prise en compte dans le calcul des soudures en état de ductilité, en raison des critères retenus qui reposent sur la ruine plastique du cordon.

## ✓ Calcul :

On distingue 3 cas :

- aciers doux
- aciers à haute limite d'élasticité (HLE)
- alliages d'aluminium

## ✓ Cas des aciers doux ( $f_u < 500$ MPa) : Calcul Eurocode (3)

partie 6 et annexe M - AFNOR

Double vérification :

$$\beta_w^2 [\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{//}^2)] \leq (f_u / \gamma_{Mw})^2$$

Critère corrigé de  
Von Mises

$$\sigma_{\perp} \leq f_u / \gamma_{Mw}$$

Tenue au cisaillement  
perpendiculaire du joint

- $f_u$  : charge de rupture du métal d'apport (doit être garantie par un document normatif)
- $\gamma_{Mw}$  : coefficient partiel sur la charge de rupture (dépendant de la nuance de l'acier de base)
- $\beta_w$  : en relation avec la nuance de l'acier de base, représente le fait que, en matière de soudage d'aciers doux, non alliés ou faiblement alliés, les produits d'apport de soudage à l'arc par procédés classiques confèrent aux zones fondues des caractéristiques mécaniques très supérieures à celles de la nuance de base.

## ✓ Cas des aciers doux ( $f_u < 500$ MPa) : Calcul Eurocode (3)

partie 6 et annexe M - AFNOR

Tableau 1 – Coefficients  $\beta_w$  et  $\gamma_{Mw}$  [5]

Nuance	$f_y$ (MPa)	$f_y/f_u$	$f_u$ (MPa)	$\beta_w$	$\gamma_{Mw}$
S235	235	0,65	360	0,80	1,25
S275	275	0,67	410	0,85	1,30
S355	355	0,70	510	0,90	1,35

•  $f_u$  : charge de rupture du métal d'apport

•  $f_y$  : charge de rupture du métal de base

## ✓ Cas des aciers HLE : Extension formulation Eurocode (3)

- Si  $500 \text{ MPa} < f_u < 700 \text{ MPa}$

Le métal d'apport va avoir des caractéristiques mécaniques supérieures après soudage  
( $f_{uw} > f_u$ )

Vérifier :  $f_{yw} / f_{uw} \leq 0,8$  et  $A_{5d} \geq 20 \%$

et dans ces conditions :

- $\beta_w = 1$
- $\gamma_{Mw} = 1,5$

- Si  $f_u > 700 \text{ MPa}$

Détermination expérimentale des coefficients  $\beta_w$  et  $\gamma_{Mw}$  à l'aide d'essais mécaniques réalisés sur échantillons soudés conformes à la liaison à réaliser (géométrie, métallurgie et thermique)

## ✓ Cas des alliages d'aluminium : Règles AL71\*

$$\sigma_{\perp}^2 + 2,7 (\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2) \leq (\alpha \beta \gamma f_y)^2$$

- $\alpha$  : coefficient de qualité d'exécution (compris entre 0,8 et 1)
- $\beta$  et  $\gamma$  : coefficients minorateurs caractérisant l'abaissement éventuel de la résistance mécanique du joint soudé (dépendent de la nuance et de l'état de l'alliage de base ainsi que de la nuance du produit d'apport)

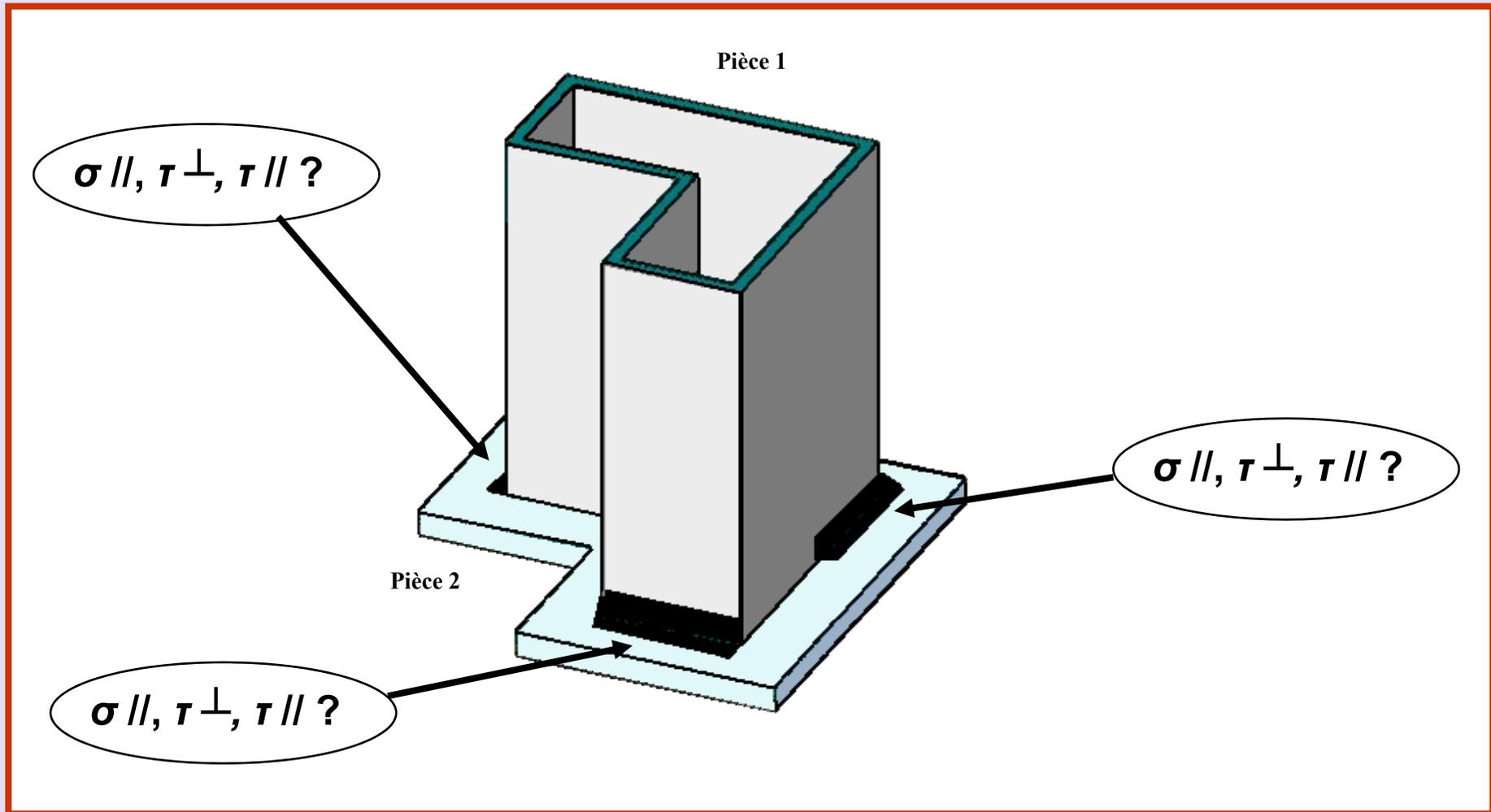
\* Règles de calcul des constructions en alliages d'aluminium (règles AL71 ou DTU P22 702)

## ✓ Cas des alliages d'aluminium : Règles AL71\*

Tableau 2 – Quelques valeurs de $\beta$ et $\gamma$ , pour diverses liaisons obtenues par soudage à l'arc (131, 141)					
Alliage 1/État	Alliage 2/État	Épaisseur (mm)	Nuance apport	$\beta$	$\gamma$
AW 5754/H111	AW 5754/H111	≤ 20	AW 5154	1	1
AW 5086/H111	AW 5086/H111	≤ 20	AW 5356	1	1
AW 6060/T5	AW 6060/T5	≤ 8	AW 4043 A	0,6	0,9
AW 6060/T5	AW 6060/T5	≤ 8	AW 5356	0,65	1
AW 6081/T6	AW 6081/T6	≤ 20	AW 4043 A	0,45	0,8
AW 6081/T6	AW 6081/T6	≤ 20	AW 5356	0,45	1
AW 7020/T6	AW 7020/T6	≤ 8	AW 4043 A	0,6	0,7
AW 7020/T6	AW 7020/T6	≤ 12	AW 5356	0,8	0,65
AW 5086/H111	A-S7G0,6/Y33	≤ 8	AW 4043 A	0,4	0,8
AW 6060/T5	A-S7G0,3/Y23	≤ 8	AW 4043 A	0,6	0,8

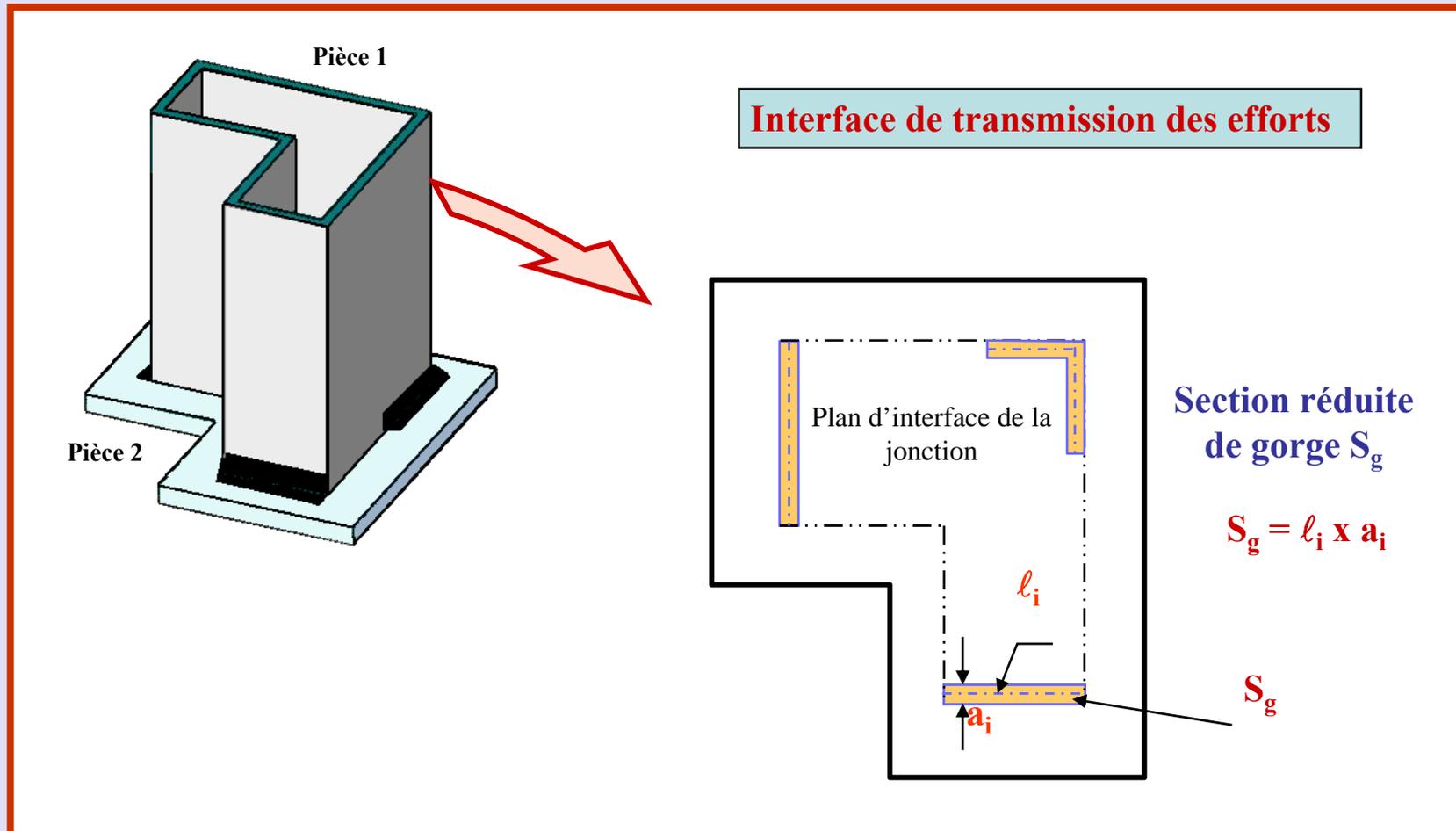
\* Règles de calcul des constructions en alliages d'aluminium (règles AL71 ou DTU P22 702)

## ✓ Calcul des contraintes dans le cordon



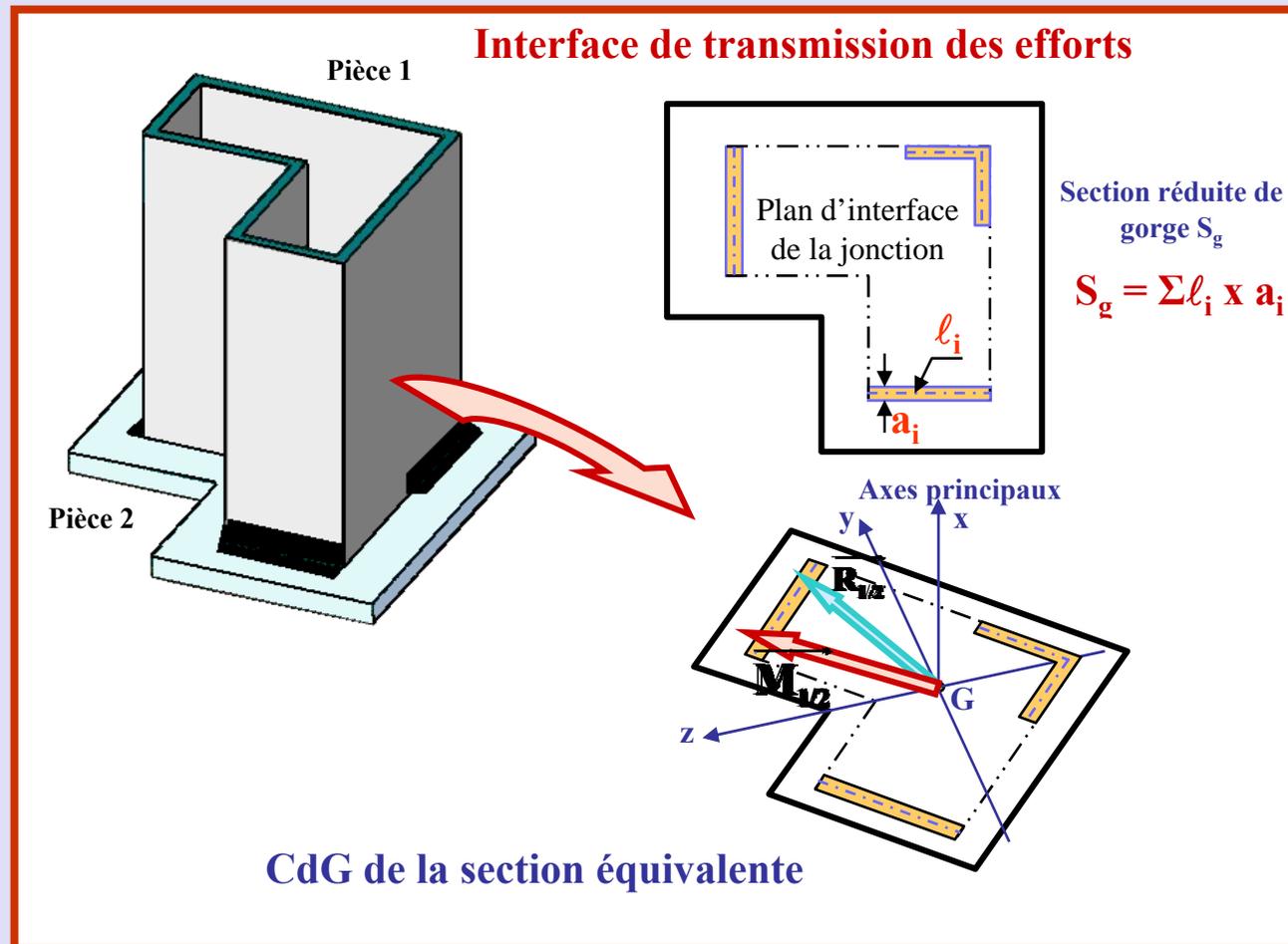
## ✓ Calcul des contraintes dans le cordon

Extraction des **sections efficaces** des divers cordons contenus dans le plan d'assemblage



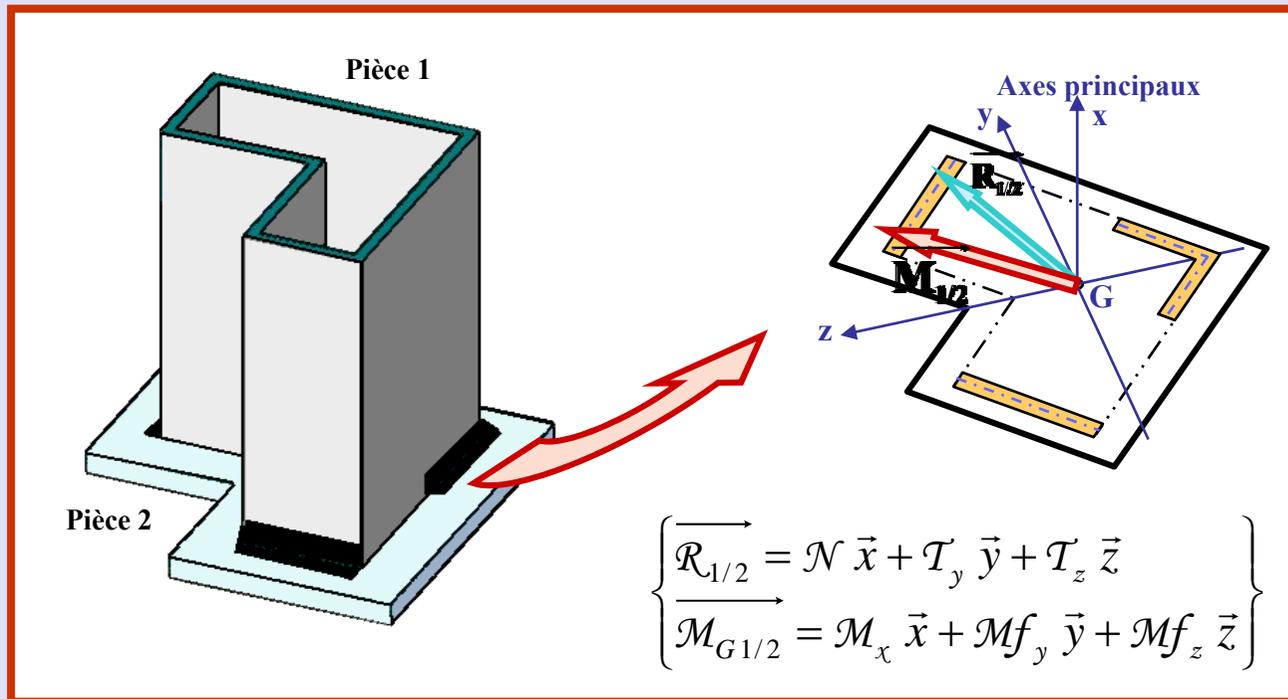
## ✓ Calcul des contraintes dans le cordon

Calcul du **centre de gravité G** des sections efficaces



## ✓ Calcul des contraintes dans le cordon

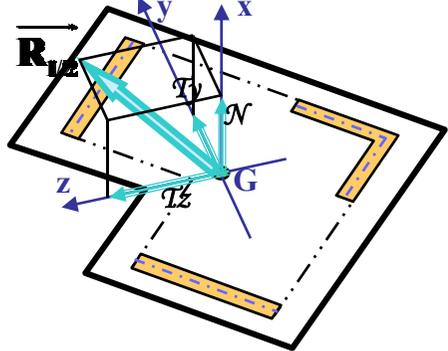
Calcul du **torseur de section en G**



- On retrouve
- effort normal (au plan d'assemblage) :  $N$
  - deux efforts tranchants (ou rasants) :  $T_y$  et  $T_z$
  - moment de torsion :  $M_x$
  - deux moments de flexion :  $Mf_y$  et  $Mf_z$

## ✓ Calcul des contraintes dans le cordon

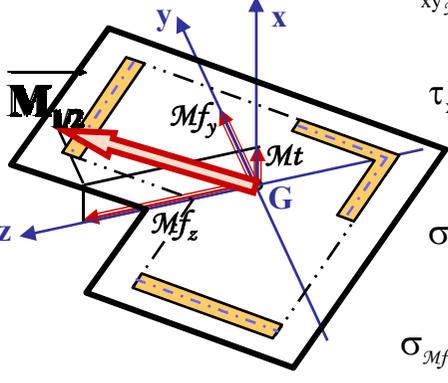
Calcul des **contraintes** de section dans le **repère principale**



$\sigma_N = \frac{N}{S_g}$   
 $\tau_{xy} = \frac{T_y}{S_g}$   
 $\tau_{xz} = \frac{T_z}{S_g}$

**Contrainte normale**

$\sigma_x = \sigma_N + \sigma_{Mf_y} + \sigma_{Mf_z}$



$\tau_{xyM_x} = -\frac{M_x}{I_0} \cdot z$   
 $\tau_{xzM_x} = \frac{M_x}{I_0} \cdot y$   
 $\sigma_{Mf_y} = \frac{Mf_y}{I_y} \cdot z$   
 $\sigma_{Mf_z} = -\frac{Mf_z}{I_z} \cdot y$

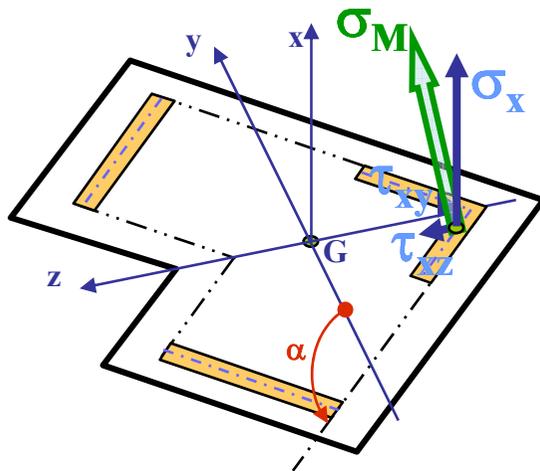
**Contraintes tangentielles**

$\tau_{xy} = \tau_{xy} + \tau_{xyM_x}$       $\tau_{xz} = \tau_{xz} + \tau_{xzM_x}$   
 $\tau_{M_x} = \sqrt{\tau_{xyM_x}^2 + \tau_{xzM_x}^2}$

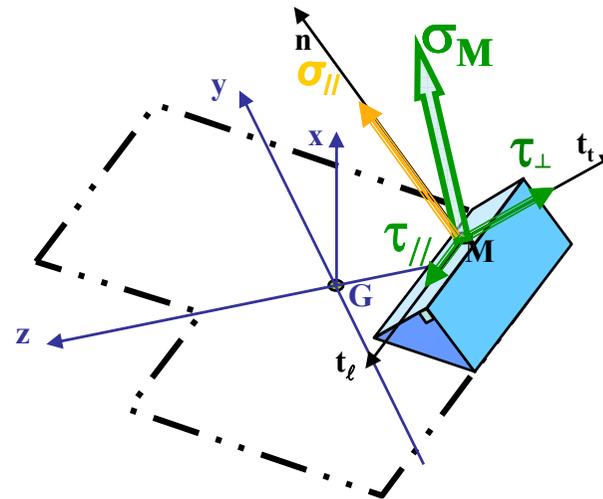
## ✓ Calcul des contraintes dans le cordon

Calcul des **contraintes** de section dans le **repère local** (repère cordon)

$$\begin{Bmatrix} \vec{\sigma}_\perp \\ \vec{\tau}_{//} \\ \vec{\tau}_\perp \end{Bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{Bmatrix} 1 & \sin \alpha & -\cos \alpha \\ 0 & \sqrt{2} \cos \alpha & \sqrt{2} \sin \alpha \\ 1 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{Bmatrix} \bullet \begin{Bmatrix} \vec{\sigma}_x \\ \vec{\tau}_{xy} \\ \vec{\tau}_{xz} \end{Bmatrix}$$



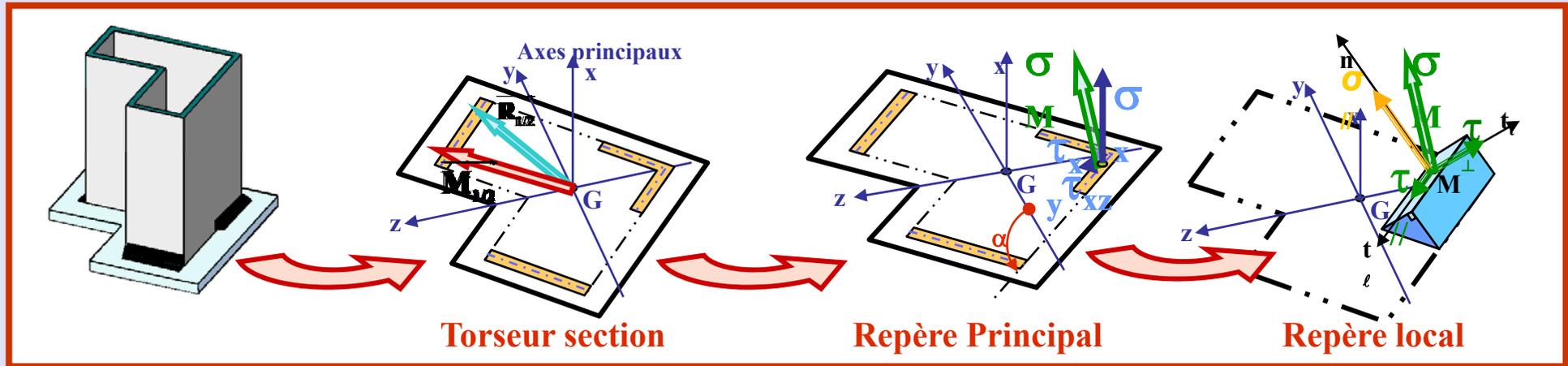
**Repère Principal**



**Repère local**

## ✓ Méthode de calcul des cordons (synthèse)

### Recherche du point critique



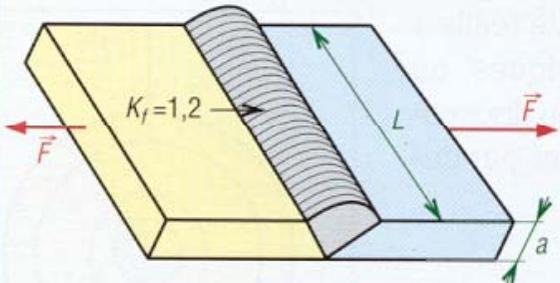
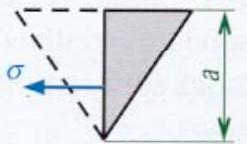
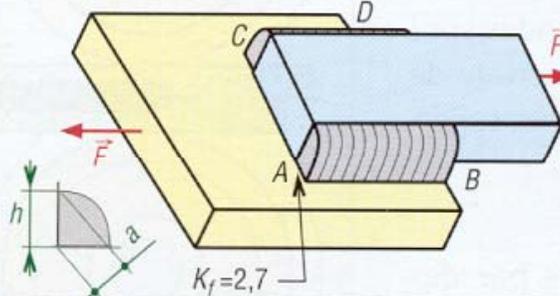
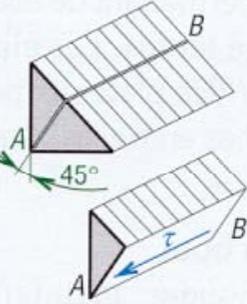
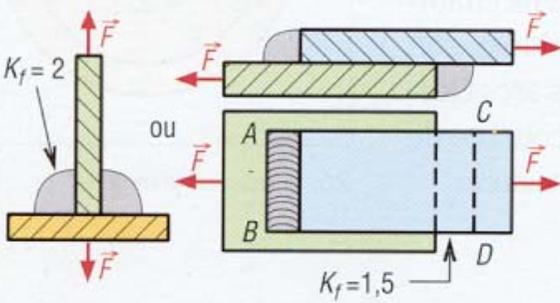
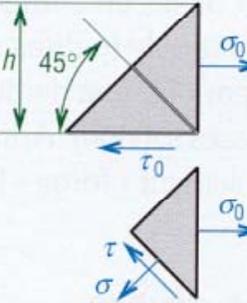
Il est alors possible de rechercher soit analytiquement, soit à l'aide d'un ordinateur programmable, le point en coordonnées y et z pour lequel le critère de contrainte exposé précédemment conduit à la valeur maximale.



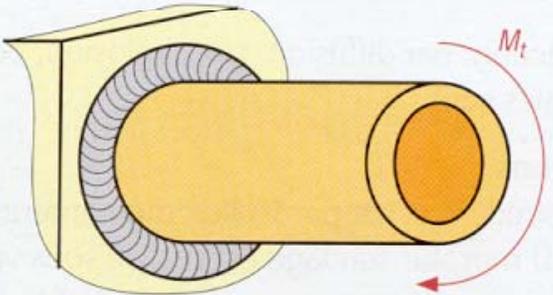
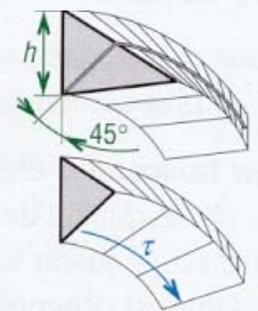
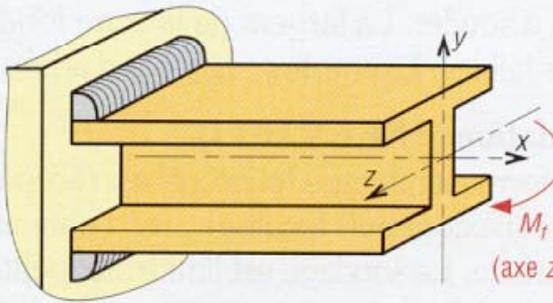
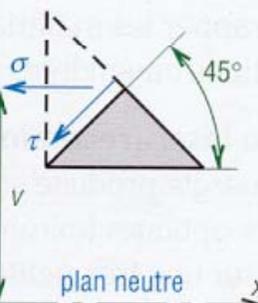
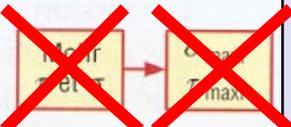
**Méthode considérant les pièces soudées entre elles comme indéformables**

**Attention donc aux profilés minces**

## ✓ Calcul simplifié des cas classiques (méthode Fanchon)

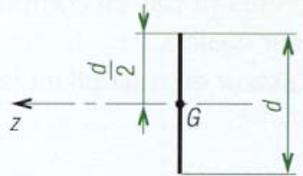
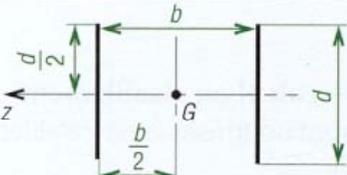
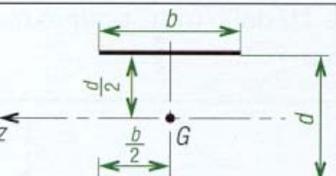
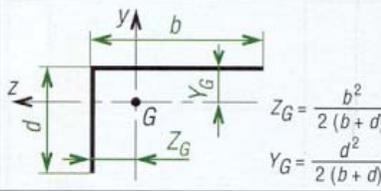
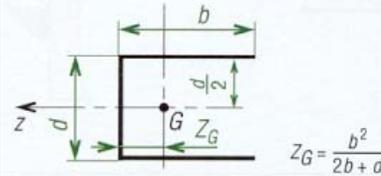
Cas	Exemples	Contraintes	
		Représentation	Formules
traction			$\sigma = \frac{F}{S} = \frac{F}{a.L}$
cisaillement			$\tau = \frac{F}{S} = \frac{F}{a.L}$ $= \frac{F}{0,707.h.L}$ $L = AB + CD$
cisaillement avec traction			$\tau = \sigma = \tau_0 = \sigma_0$ $\tau = \frac{F}{h.L} \quad (L = AB + CD)$ <p><b>Mohr</b></p> <del> <math display="block">\tau_{\max} = \frac{1,12 F}{h.L}</math> </del> <p><b>approximation usuelle</b></p> <del> <math display="block">\tau_{\max} = \frac{1,414 F}{h.L} = \frac{F}{0,707.h.L}</math> </del>

## ✓ Calcul simplifié des cas classiques (méthode Fanchon)

Cas	Exemples	Contraintes	
		Représentation	Formules
torsion			$\tau = \frac{M_t}{I_{UG} \cdot 0,707 h} V$
flexion			$\tau = \sigma = \frac{M_f}{I_{Uz} \cdot 0,707 h} V$ <div style="text-align: center;">  </div>

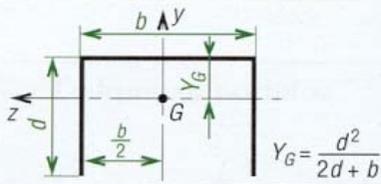
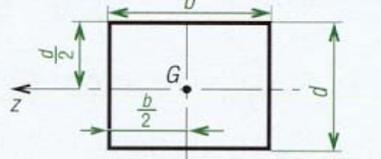
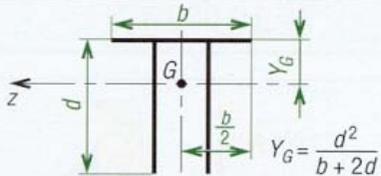
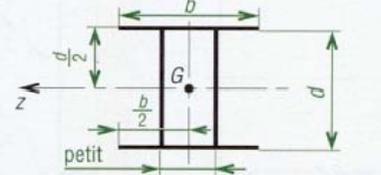
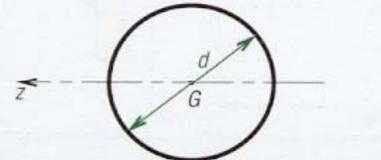
## ✓ Calcul simplifié des cas classiques (méthode Fanchon)

Valeurs de  $I_{uG}$  et  $I_{uZ}$

Caractéristiques des cordons de soudures assimilés à une ligne		
soudures	torsion	flexion
	$I_{uG} = \frac{d^3}{12}$	$I_{uZ} = \frac{d^3}{12}$
	$I_{uG} = \frac{d(3b^2 + d^2)}{6}$	$I_{uZ} = \frac{d^3}{6}$
	$I_{uG} = \frac{b(3d^2 + b^2)}{6}$	$I_{uZ} = \frac{bd^2}{2}$
	$I_{uG} = \frac{(b+d)^4 - 6b^2d^2}{12(b+d)}$	$\frac{I_{uZ}}{v} = \frac{4bd + d^2}{6} ; \frac{I_{uZ}}{v} = \frac{d^2(4b+d)}{6(2b+d)}$ (sommet) (bas)
	$I_{uG} = \frac{(2b+d)^3}{12} - \frac{b^2(b+d)^2}{(2b+d)}$	$I_{uZ} = \frac{d^2}{12} (6b+d)$

## ✓ Calcul simplifié des cas classiques (méthode Fanchon)

Valeurs de  $I_{uG}$  et  $I_{uz}$   
(suite)

Caractéristiques des cordons de soudures assimilés à une ligne		
soudures	torsion	flexion
	$I_{uG} = \frac{(b + 2d)^3}{12} - \frac{d^2(b + d)^2}{(b + 2d)}$	$I_{uz} = \frac{2d^3}{3} - 2d^2y_G + (b + 2d)y_G^2$
	$I_{uG} = \frac{(b + d)^3}{6}$	$I_{uz} = \frac{d^2}{6} (3b + d)$
	$I_{uG} = \frac{(b + 2d)^3}{12} - \frac{d^2(b + d)^2}{(b + 2d)}$	$I_{uz} = \frac{2d^3}{3} - 2d^2y_G + (b + 2d)y_G^2$
	$I_{uG} = \frac{b^3 + 3bd^2 + d^3}{6}$	$I_{uz} = \frac{d^2}{6} (3b + d)$
	$I_{uG} = \frac{\pi d^3}{4}$	$I_{uz} = \frac{\pi d^3}{8}$

## ✓ Cas restrictifs

- **Longueur minimale des cordons :**

Les cordons de longueur unitaire **inférieure à 5 fois l'épaisseur** de leur gorge (avec minimum absolu de 30 mm) ne doivent pas être pris en compte pour la transmission des efforts.

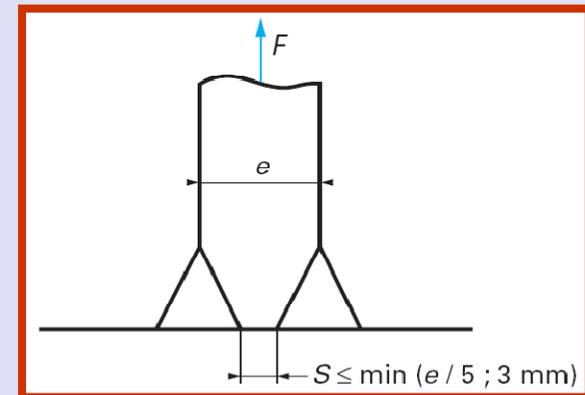
- **Longueur maximale des cordons longitudinaux :**

Afin de tenir compte de l'effet géométrique affectant les cordons longitudinaux de grande longueur, un **coefficient minorant  $\beta_{Lw}$**  est à introduire sur l'effort admissible ; la valeur du coefficient est donnée par :

$$\beta_{Lw} = 1,2 - 0,2\ell / (150a)$$

- **Cordons sur double chanfreinage partiel :**

Aucun calcul justificatif si la discontinuité  $S$  (épaisseur du talon) n'excède pas la plus faible des deux valeurs :  $e/5$  et 3 mm.



## ✓ Calcul des pièces soudées en alliages d'aluminium

Les soudures réalisées sur les pièces en aluminium peuvent abaisser la résistance des éléments de base lorsque le coefficient  $\beta$  est inférieur à 1.

Dans le cas de pièces tendues, un calcul de section équivalente est à établir pour la vérification du corps des pièces.

L'abaissement de résistance s'observe sur une largeur affectée thermiquement située de part et d'autre de l'axe des soudures.

La section équivalente s'exprime alors sous la forme :

$$A_{eb} = e \left\{ b - (1 - \beta) \sum \ell_j \right\}$$

Remarque :

Précédente considération négligeable si la section affectée n'excède pas 10 % de la section transversale.

