

# COURS STRUCTURES EN MÉTAL

TGC 10, chapitres 7 et 9:

Soudage

Résistance des assemblages soudés

# Intro, Fig 9.1: Assemblages dans un cadre métallique

Assemblages traités  
dans ce chapitre :

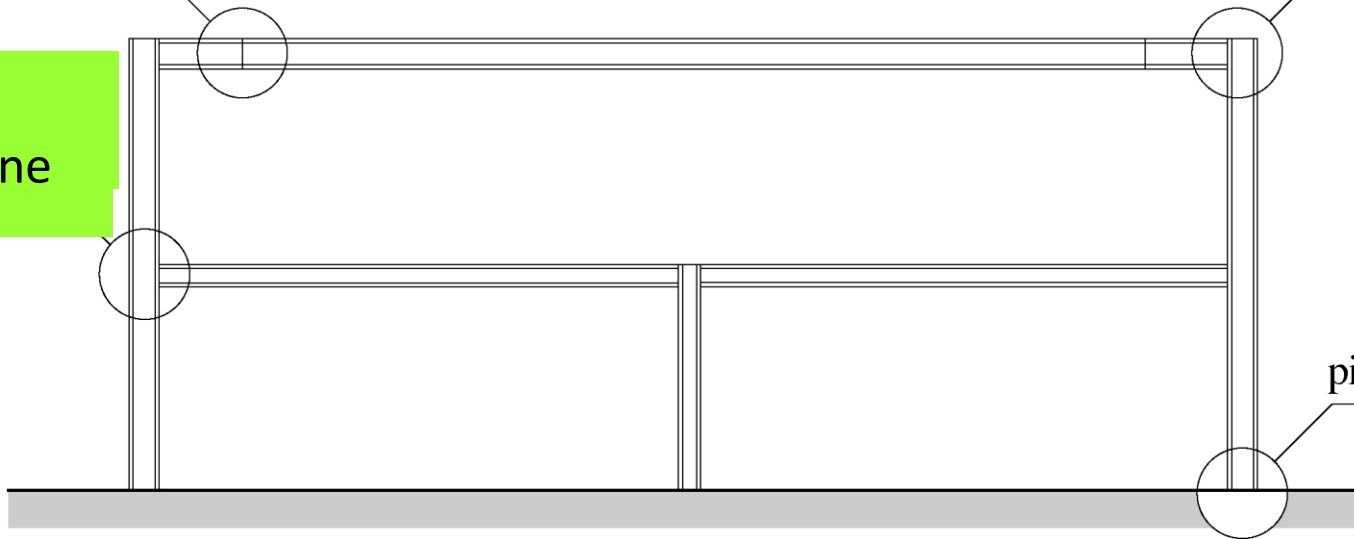
Joint de poutres

Liaison  
Poutre-colonne

Assemblages traités  
dans le volume 11 :

angle de cadre

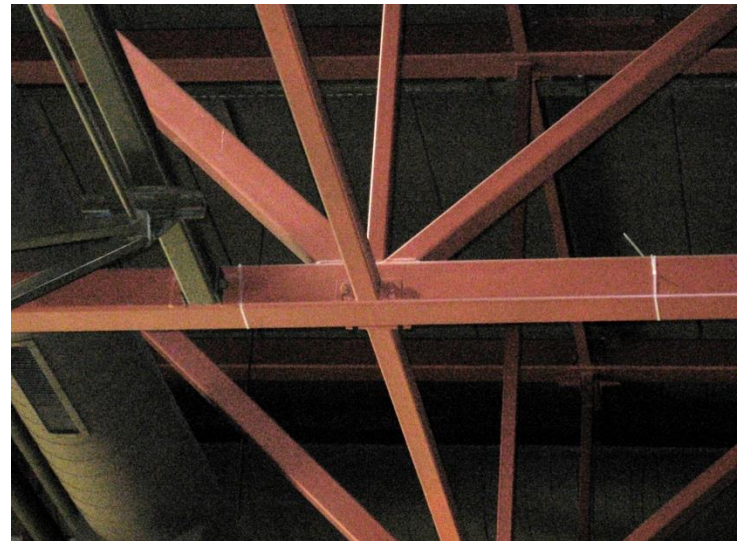
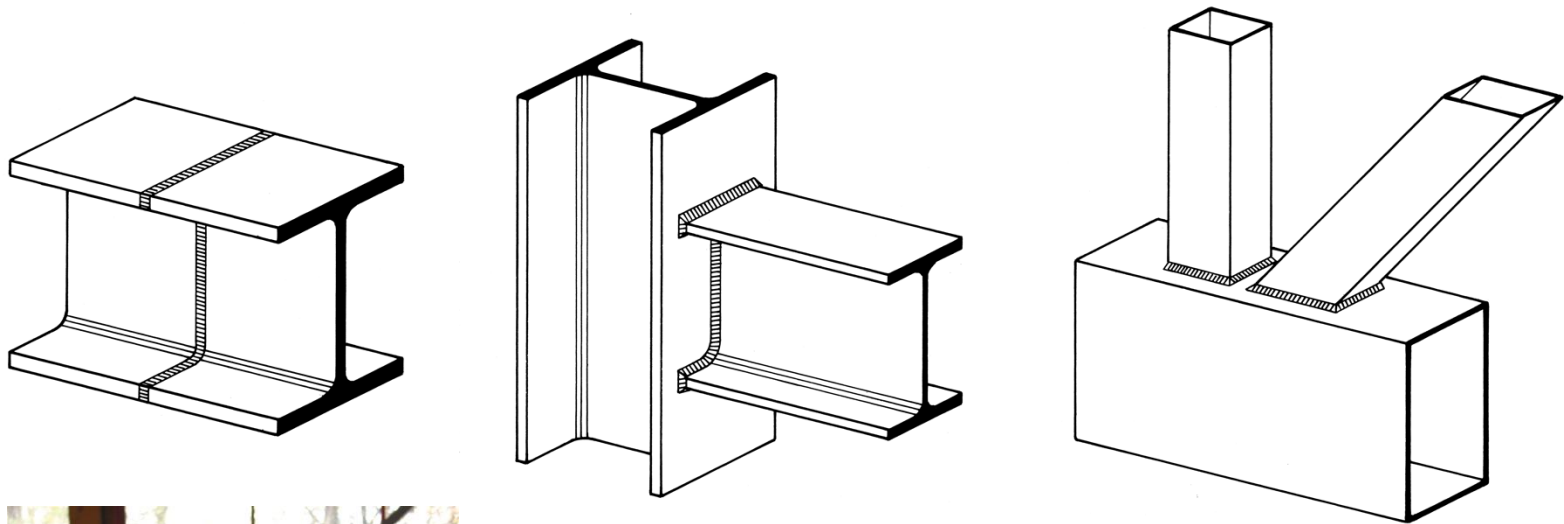
pied de colonne



Caractéristiques définissant un assemblage:

1. Rigidité
2. Résistance
3. Capacité de rotation

# Fig 7.1: Assemblages soudés



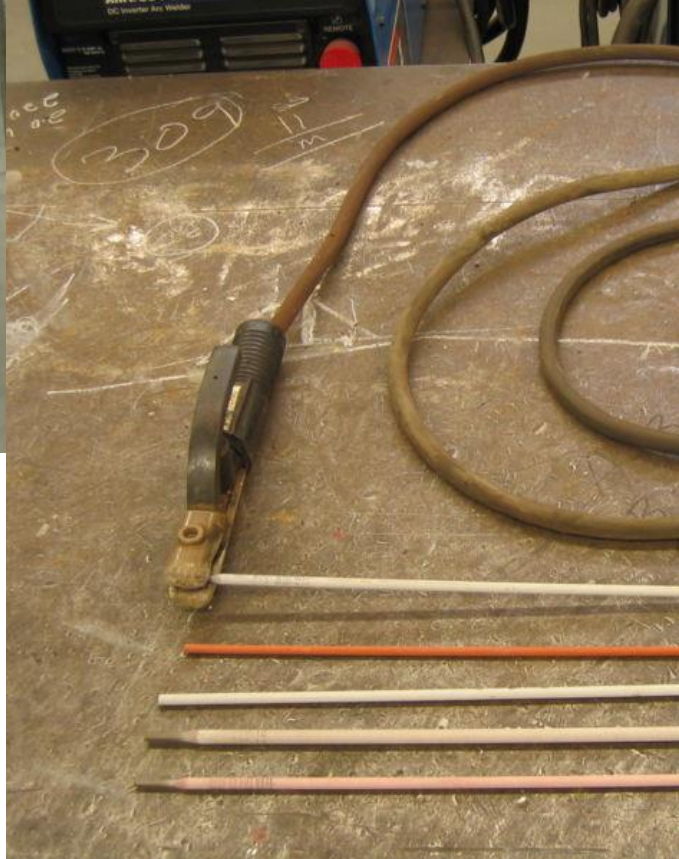
# Tab. 7.2: Procédés de soudage courants

Nomenclature

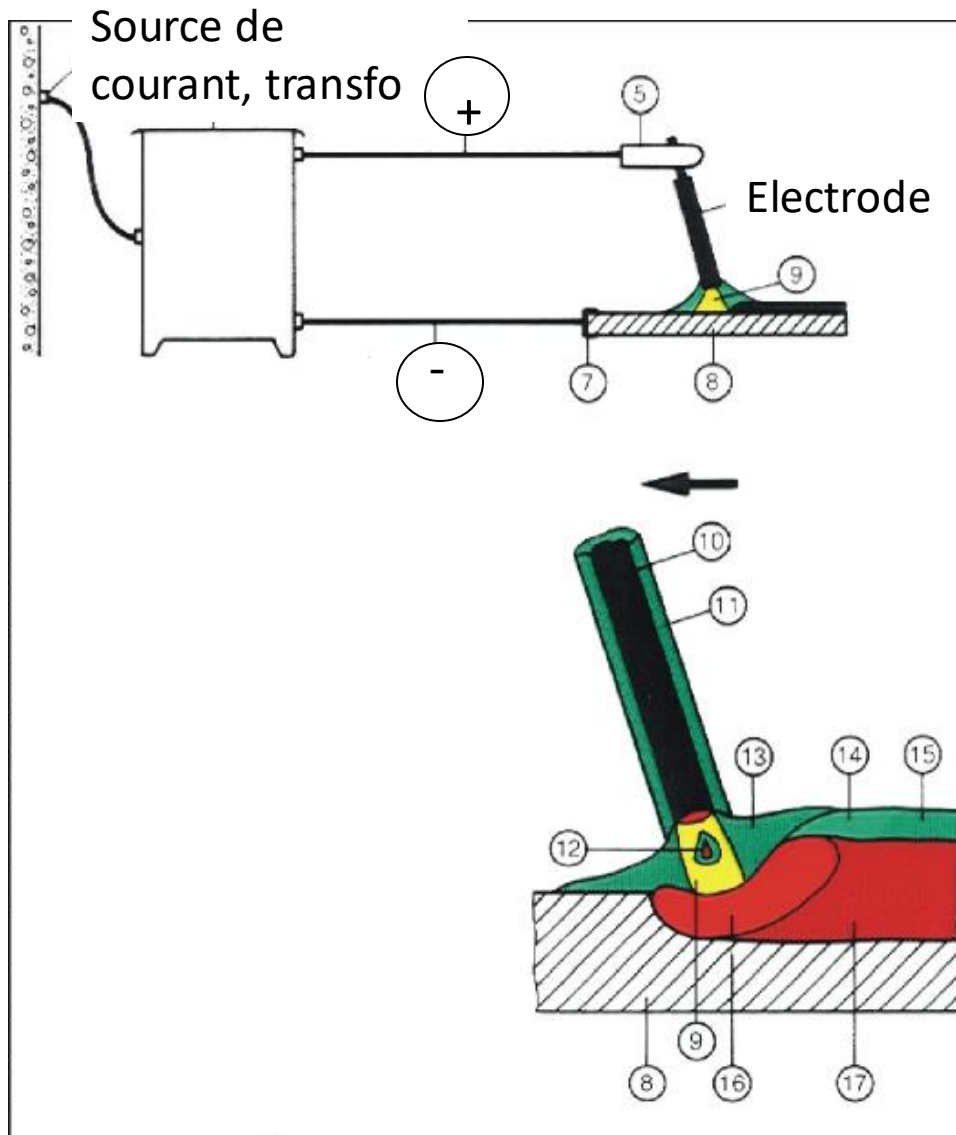
ISO, procédé

	Français	Allemand	Anglais
111	<ul style="list-style-type: none"> <li>Soudage manuel à l'arc avec électrode enrobée</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Lichtbogenhandschweissen mit Schutzelektroden</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Metal arc welding with covered electrodes</li> </ul>
131	<ul style="list-style-type: none"> <li>Soudage à l'arc sous protection de gaz inerte avec fil-électrode fusible (MIG)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Metall-Inertgasschweissen (MIG)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Metal-arc inert gas welding (MIG-welding)</li> </ul>
135	<ul style="list-style-type: none"> <li>Soudage à l'arc sous protection de gaz actif avec fil-électrode fusible (MAG)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Metall-Aktivgasschweissen (MAG)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Metal-arc active gas welding (MAG-welding)</li> </ul>
141	<ul style="list-style-type: none"> <li>Soudage à l'arc en atmosphère inerte avec électrode de tungstène (TIG)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Wolfram-Inertgasschweissen (WIG)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tungsten inert-gas arc welding (TIG)</li> </ul>
121	<ul style="list-style-type: none"> <li>Soudage à l'arc sous flux en poudre avec fil-électrode</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Unterpulverschweissen mit Drahtelektroden</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Submerged arc welding with wire electrode</li> </ul>
114	<ul style="list-style-type: none"> <li>Soudage à l'arc avec fil fourré</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Metalllichtbogenschweissen mit Fülldrahtelektrode</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Flux cored metal-arc welding</li> </ul>
136	<ul style="list-style-type: none"> <li>Soudage à l'arc sous protection de gaz actif avec fil-électrode fourré (semi-automatique)</li> </ul>		

# Soudage manuel à l'électrode enrobée (procédé 111)



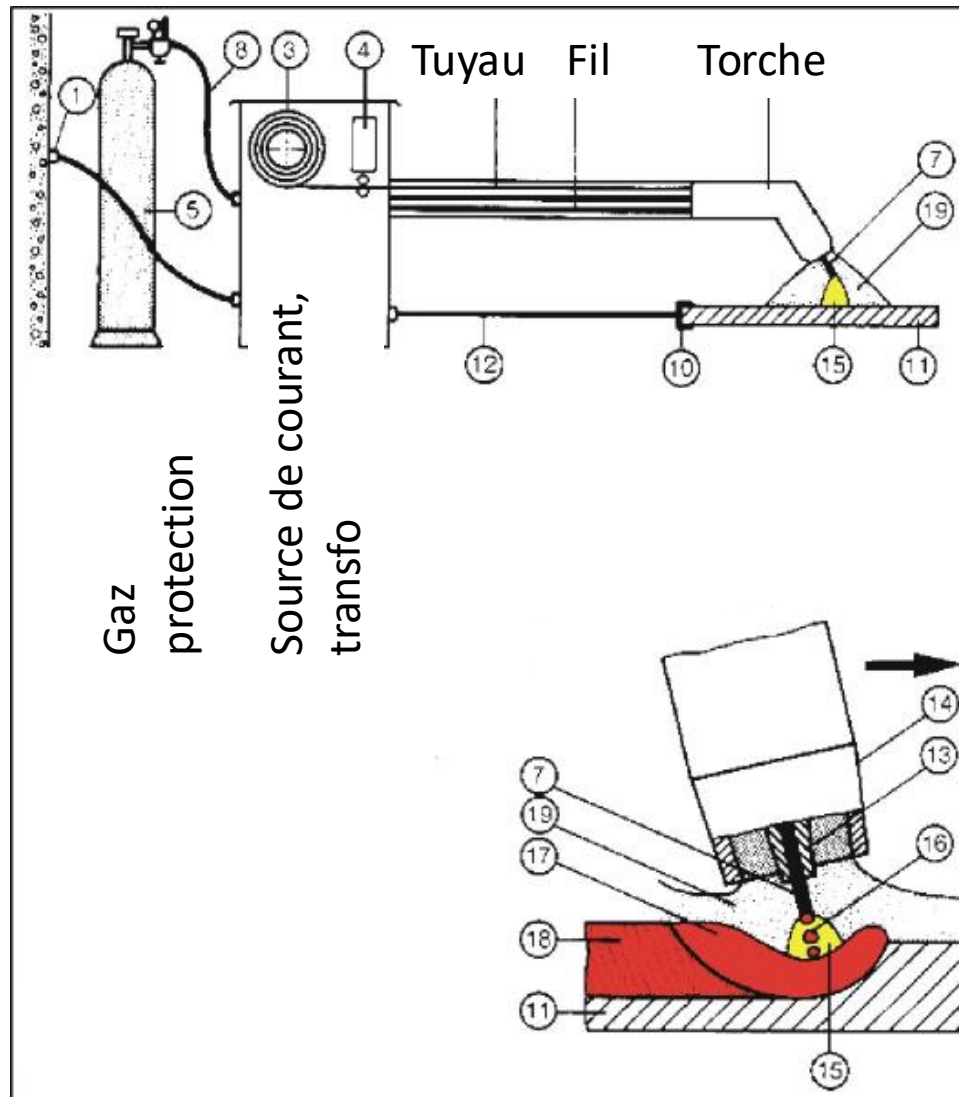
# Soudage manuel à l'électrode enrobée (procédé 111)



# Soudage semi-automatique (MIG procédé 131, MAG 135)



# Soudage semi-automatique (MIG procédé 131, MAG 135)



# Soudage semi-automatique

Soudure entre 2 tubes, procédé MAG 136



# Soudage automatique sous flux en poudre (procédé 121)



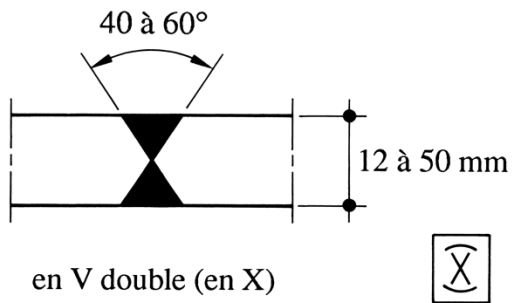
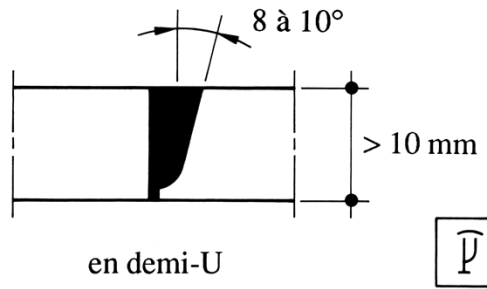
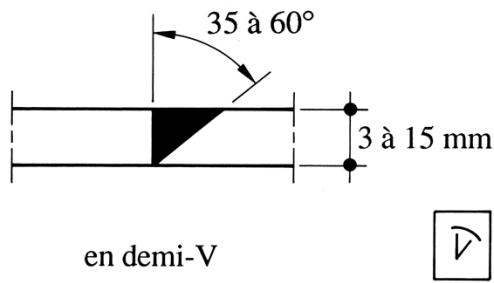
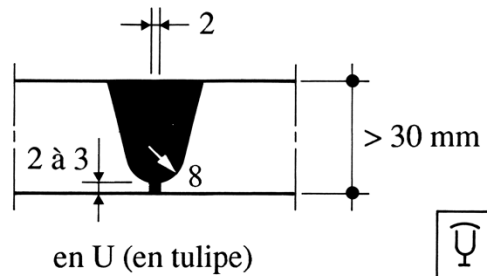
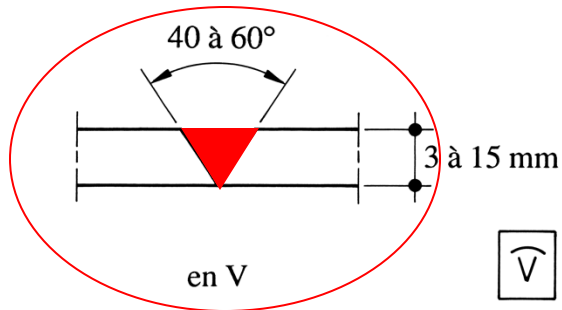
# Soudage automatique sous flux en poudre (procédé 121)



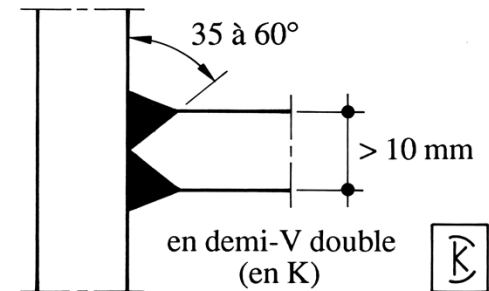
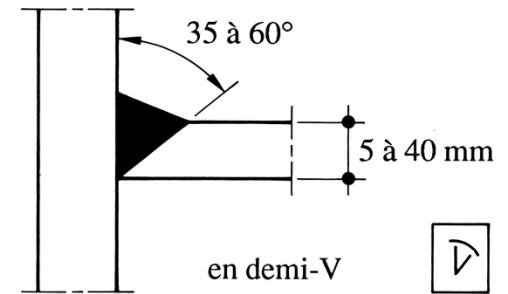
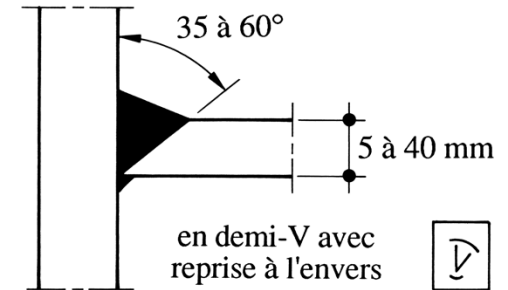
# Tab. 7.4: Classification selon la forme du joint

Préparation des pièces,  
accostage

## JOINT BOUT A BOUT



## JOINT EN T

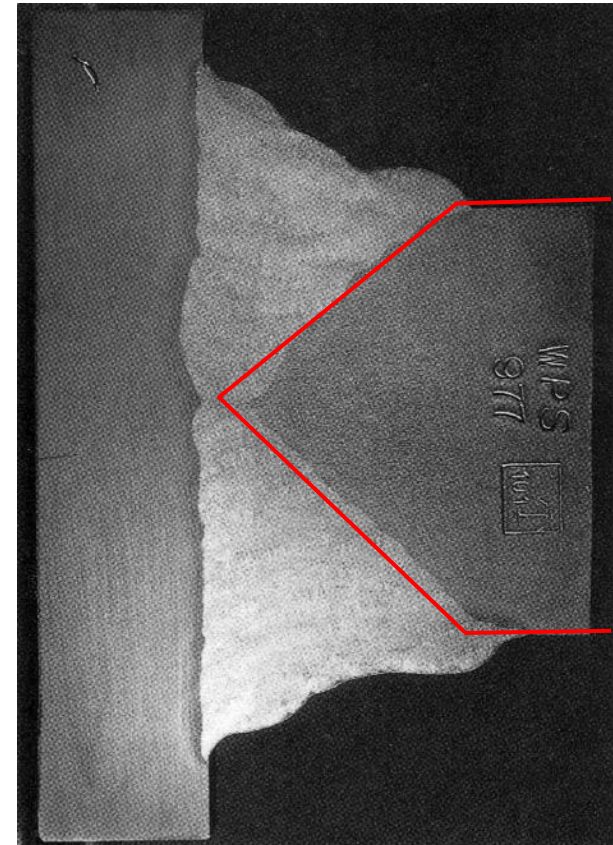


# Résistance des soudures à pleine pénétration

Assemblage bout-à-bout, soudure en tulipe avec appendices de soudage









Assemblage en T:  
macrographie soudure en K

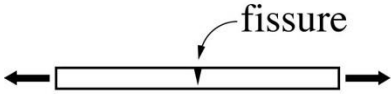
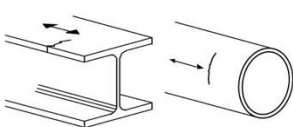
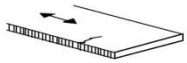
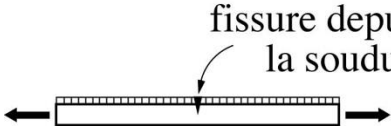
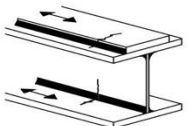
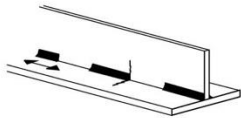
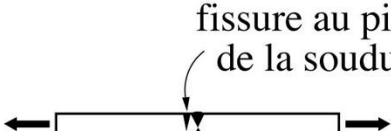
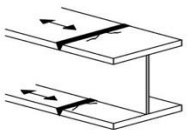

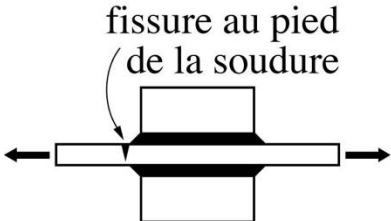
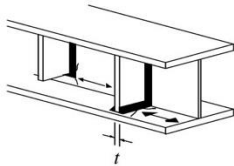
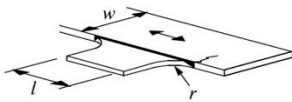
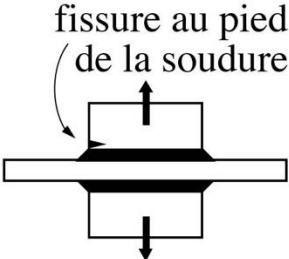
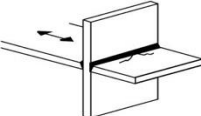
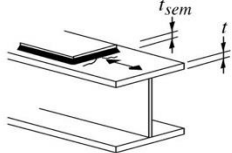


Préparation des bords des tôles

# Tab. 7.3: Classification selon dimensionnement statique

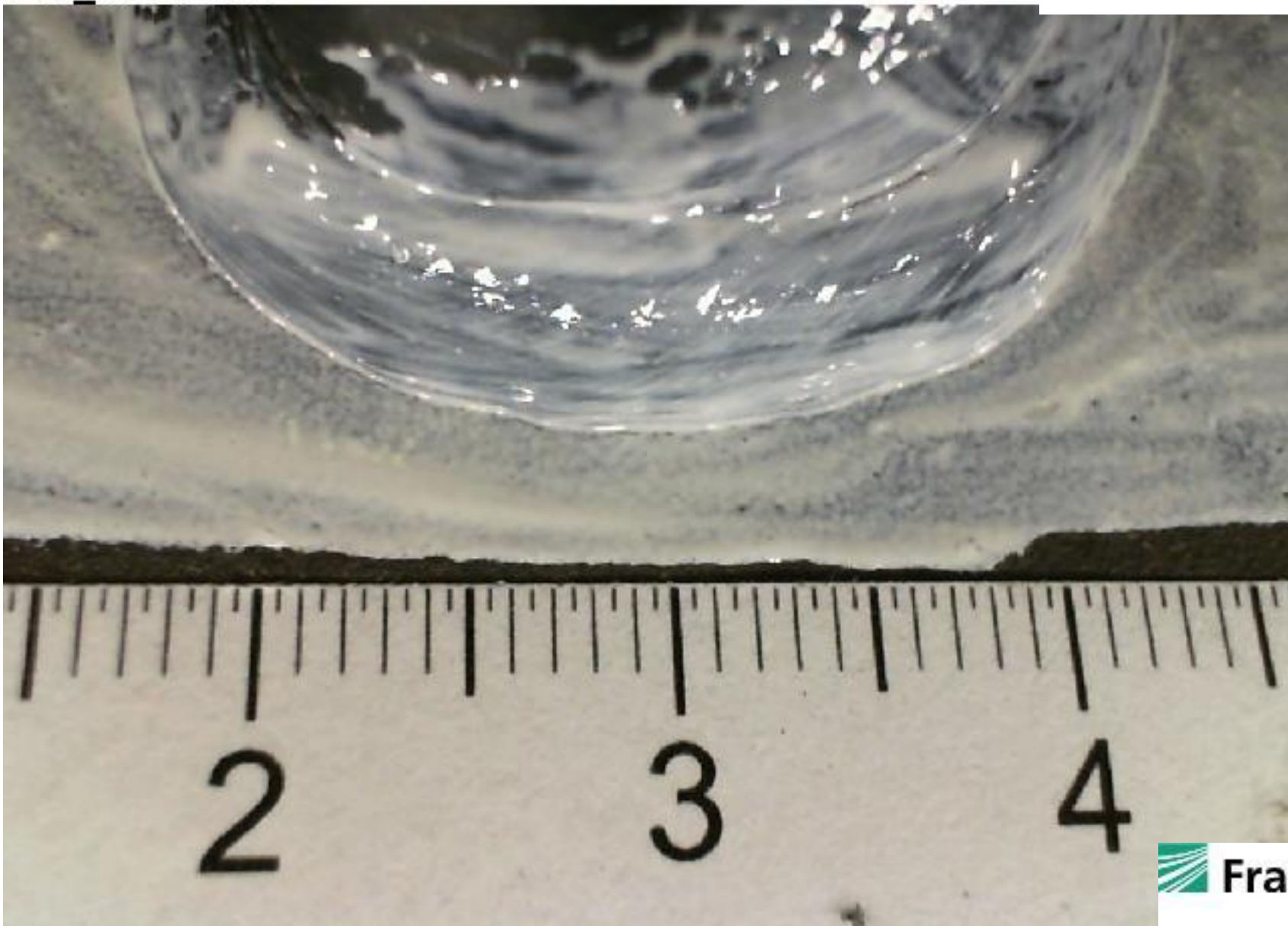
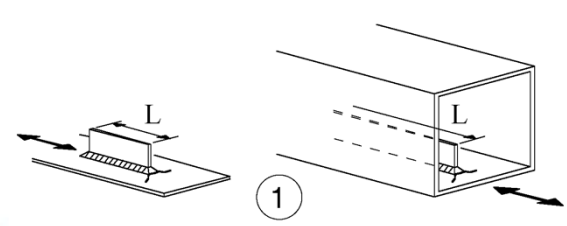
Joint	Soudure		
	complètement pénétrée	à pénétration partielle	cordon d'angle
bout à bout			—
en T			
par recouvrement	—	—	
	Par principe, même résistance que matériau de base <ul style="list-style-type: none"> <li>- Aucun calcul</li> <li>- Condition : contrôles NDE</li> </ul>	Calculs de la résistance TGC 10 et SIA 263 § 6.3 (aussi contrôles NDE)	

# Tab. 13.30: classification selon dimensionnement à la fatigue

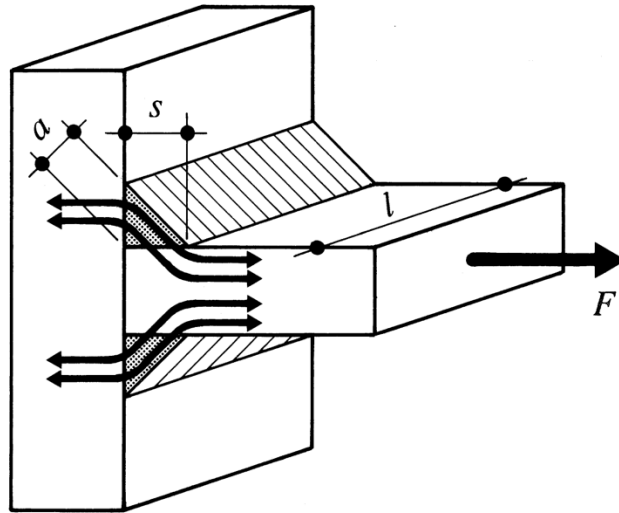
<b>CAT 160-125</b>			
<b>CAT 125-100</b>			
<b>CAT 100-80</b>			
<b>CAT 63-50</b>			
<b>CAT 71-36</b>			

# Développement d'une fissure au pied de soudure d'une attache longitudinale

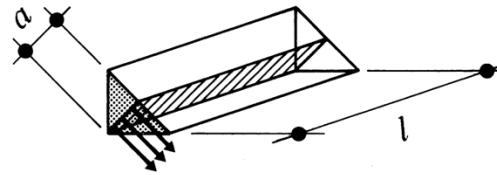
P17\_00000000



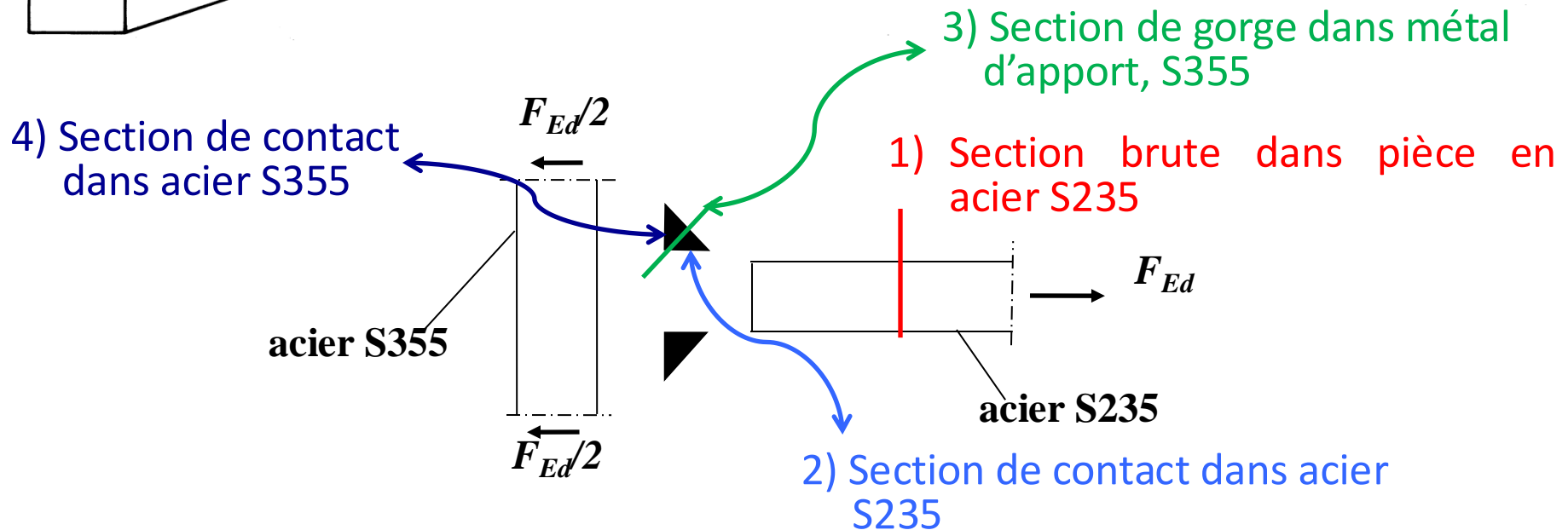
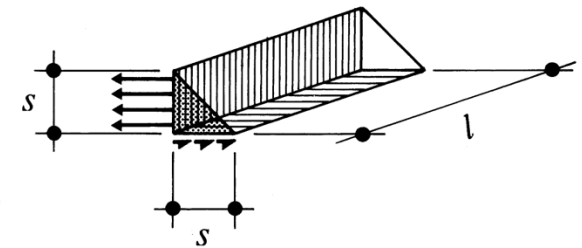
# Transmission d'un effort par cordons d'angles, sections à vérifier dans assemblage



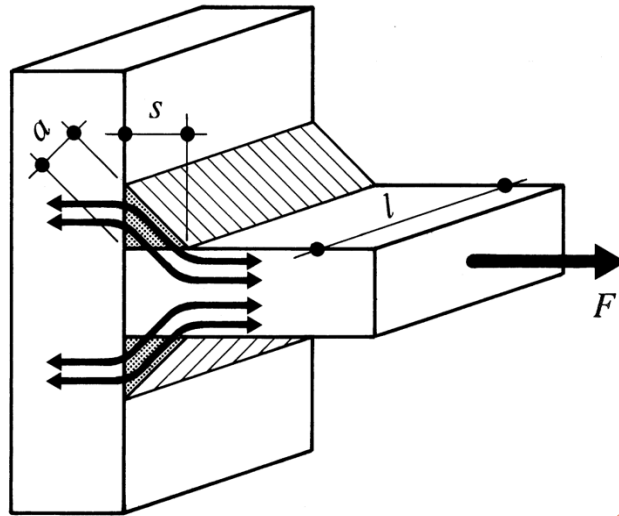
Section de gorge



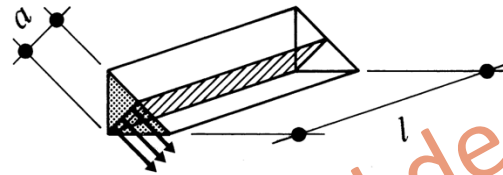
Sections de contact



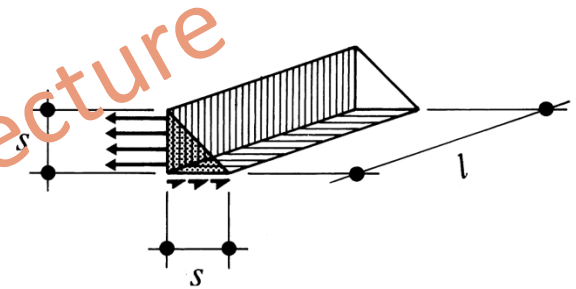
# Rappel: Fig 7.11: transmission d'un effort et résistance des cordons d'angle



Section de gorge



Sections de contact



Section de gorge

$$F_{w,Rd} = a l 0.6 \frac{f_{uE}}{\gamma_{M2}} \quad (7.4a)$$

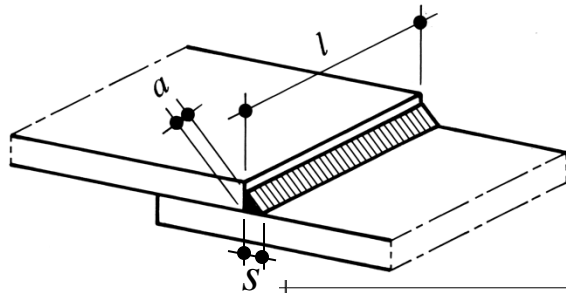
Section de contact

$$F_{s,Rd} = s_{min} l 0.8 \frac{f_y}{\gamma_{M2}} \quad (7.4b)$$

Vérification

$$F_{Ed} \leq \min(F_{w,Rd}; F_{s,Rd}) \quad (7.5)$$

Fig. 7.14: Résistance des cordons de soudure, section de contact (d'après SIA 263, chap. 6)



**S 235**

Matériau pièces assemblées (section de contact tjs déterminante)

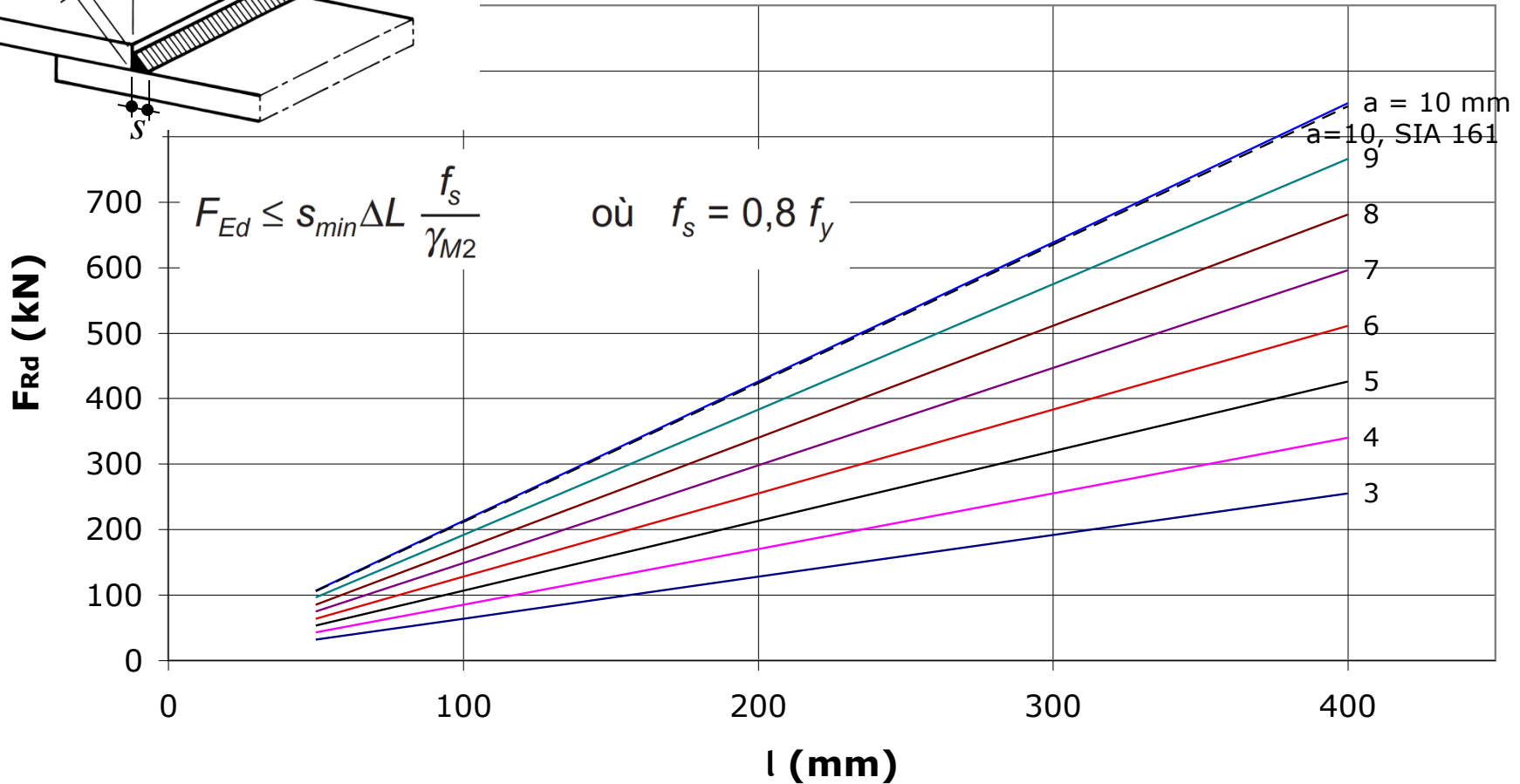
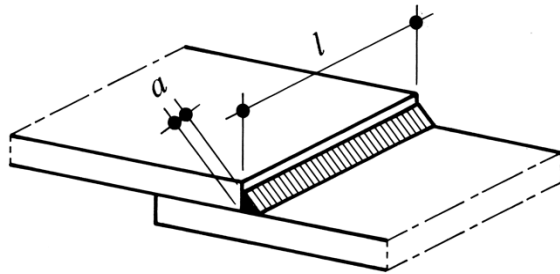
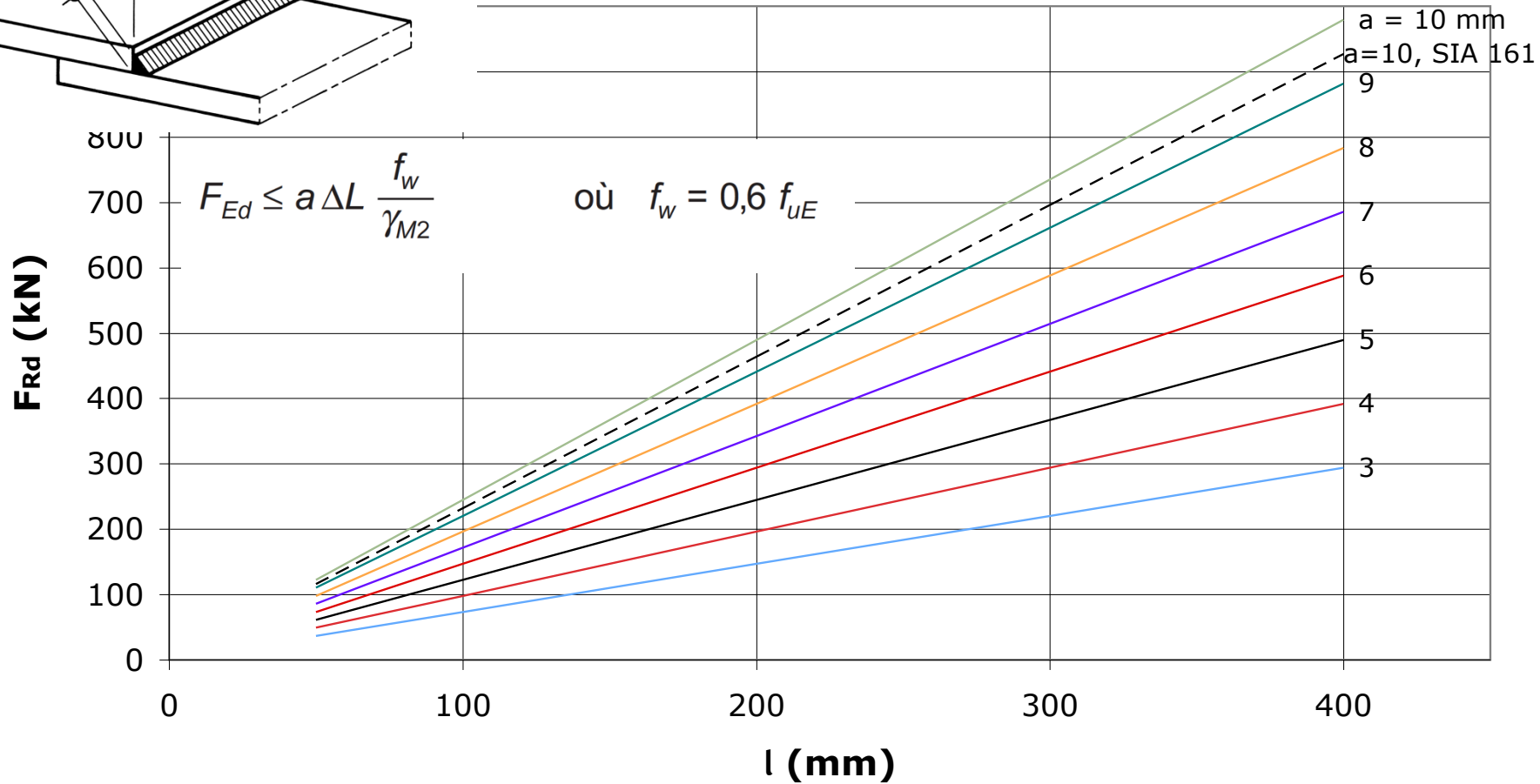


Fig. 7.14: Résistance des cordons de soudure, section de gorge (d'après SIA 263, chap. 6)

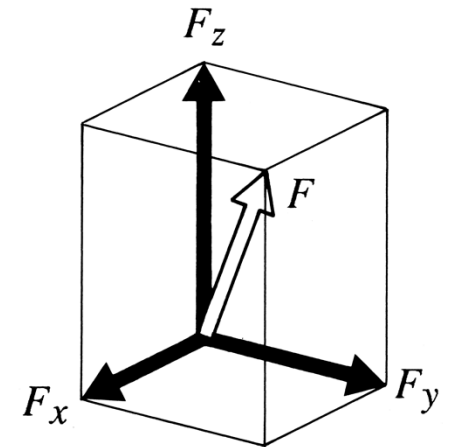
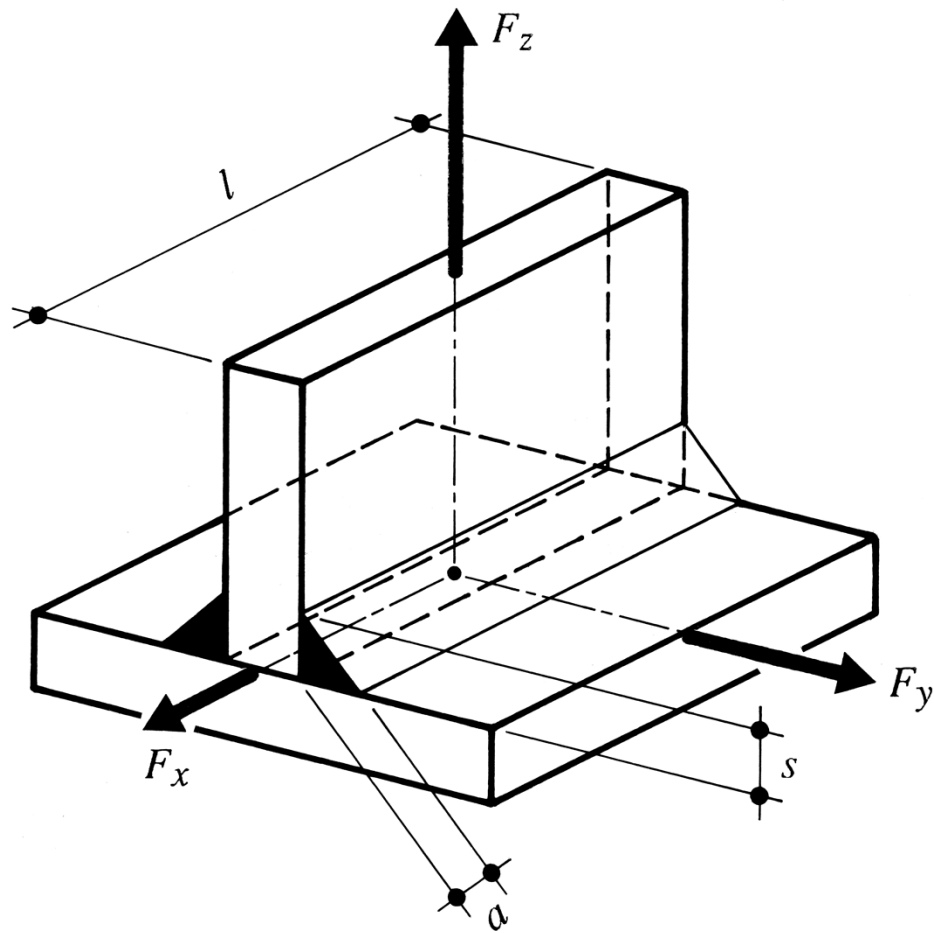


**S 355**

Matériau pièces et soudure, alors  
Alors section de gorge tjs détermin.

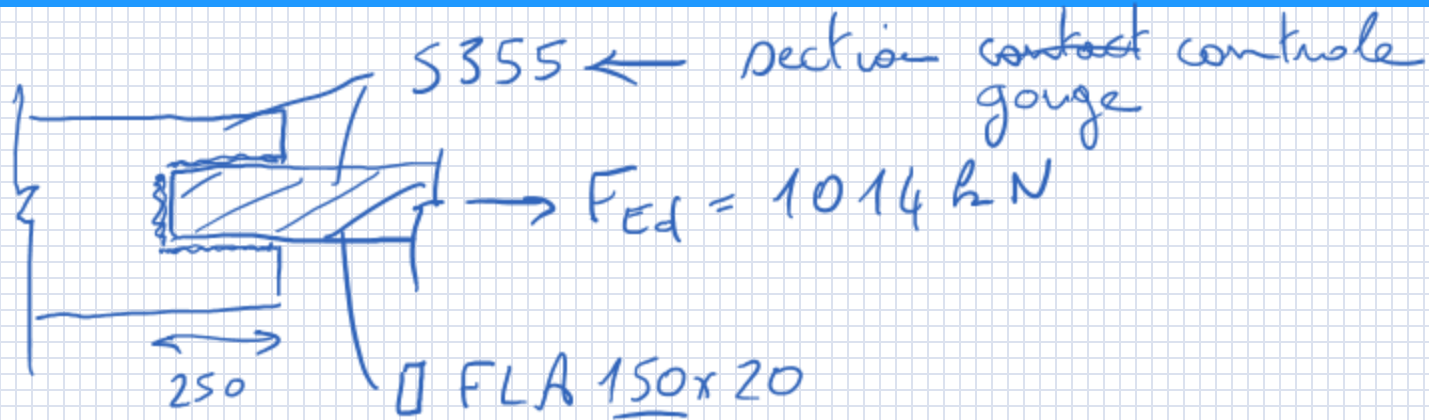


# Fig 7.17: vérification sous efforts composés



$$E_d = F = \sqrt{F_{xd}^2 + F_{yd}^2 + F_{zd}^2} \leq R_d = \min[F_{w,Rd}; F_{s,Rd}]$$

# Exemple de dimensionnement de cordons de soudure

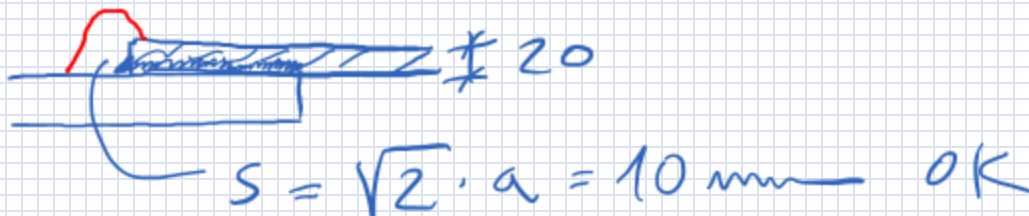


Soudure ? Cordons d'angle

$$l_{tot} = 150 + 2 \cdot 250 = 650 \text{ mm}$$

$$a = ? = 6 \text{ mm} \quad F_{w,Rd} \cong 950 \text{ kN} \quad KO$$

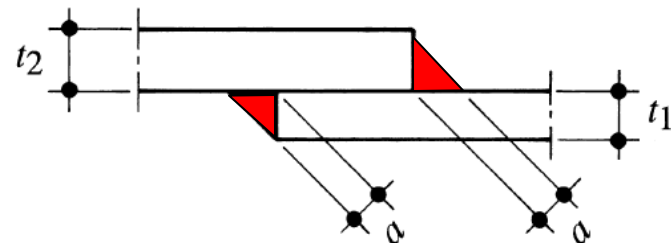
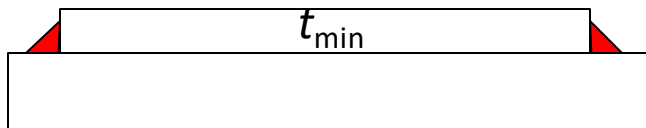
$$a = 7 \text{ mm} \quad F_{w,Rd} = 7 \cdot 650 \cdot \frac{0,6 \cdot 510}{1,25} = 1113 \text{ kN} \geq F_{Ed} \quad OK$$



# Dispositions constructives (TGC10 § 7.3.6, SIA 263 chap. 6)

- Longueur minimale cordon porteur :  $l_{\min} = 40 \text{ mm}$  (§ 6.3.6)
- Epaisseur max. cordon réalisé en une seule passe:  $a = 4 \text{ à } 6 \text{ mm}$  (selon procédé)
- Epaisseur min. cordon est fonction:
  - épaisseurs des tôles à assembler
  - procédé de soudage et modes opératoires de l'entreprise
  - nuance d'acier
  - type d'assemblage.
- Dans tous les cas :  $a_{\min} = 4 \text{ mm}$  (apport suffisant de chaleur)

Condition géométrique pour l'épaisseur maximale d'un cordon d'une soudure par recouvrement :  $a_{\max} = 0.7 \cdot t_{\min}$

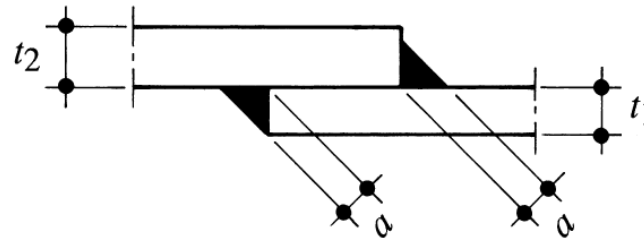


- Si cordons soudure trop gros, tôle épaisses ( $t > 30 \text{ mm}$ ) tenir compte du risque d'arrachement lamellaire => Aciers avec exigences spéciales: qualité Z (propriétés garanties dans le sens de l'épaisseur)

## Errata TGC10 § 7.3.6 : dimension de gorge

Suite à retour des entreprises, l'article 6.3.6.4 de la SIA 263 n'est pas respecté (n'est qu'une recommandation) car inutile

L'épaisseur  $a$  d'un cordon d'angle (fig. 7.9) est appelée **gorge** de la soudure. La notation  $a$  utilisée ici ne l'est pas de façon uniforme dans les différents pays; il faut donc prêter une attention particulière à cette notation, afin d'éviter des confusions dont les conséquences pourraient être parfois assez graves. La valeur minimale  $a_{min}$  de la gorge d'un cordon d'angle transmettant un effort est fixée, par l'entreprise, en fonction de plusieurs paramètres dont : l'épaisseur  $t_{max}$  de la plus grande des pièces à assembler, le procédé de soudage, la nuance d'acier, le type d'assemblage. Bien que la norme SIA 263 indique des valeurs recommandées en fonction uniquement de  $t_{max}$ , la seule exigence est qu'une gorge de 4 mm constitue une valeur minimale dictée essentiellement par une question pratique de réalisation garantissant un apport suffisant de chaleur.



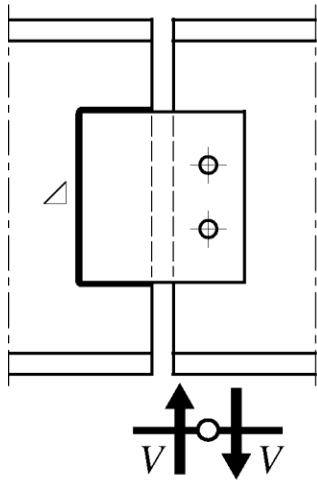
$$t_{max} = \max(t_1, t_2)$$

$$t_{min} = \min(t_1, t_2)$$

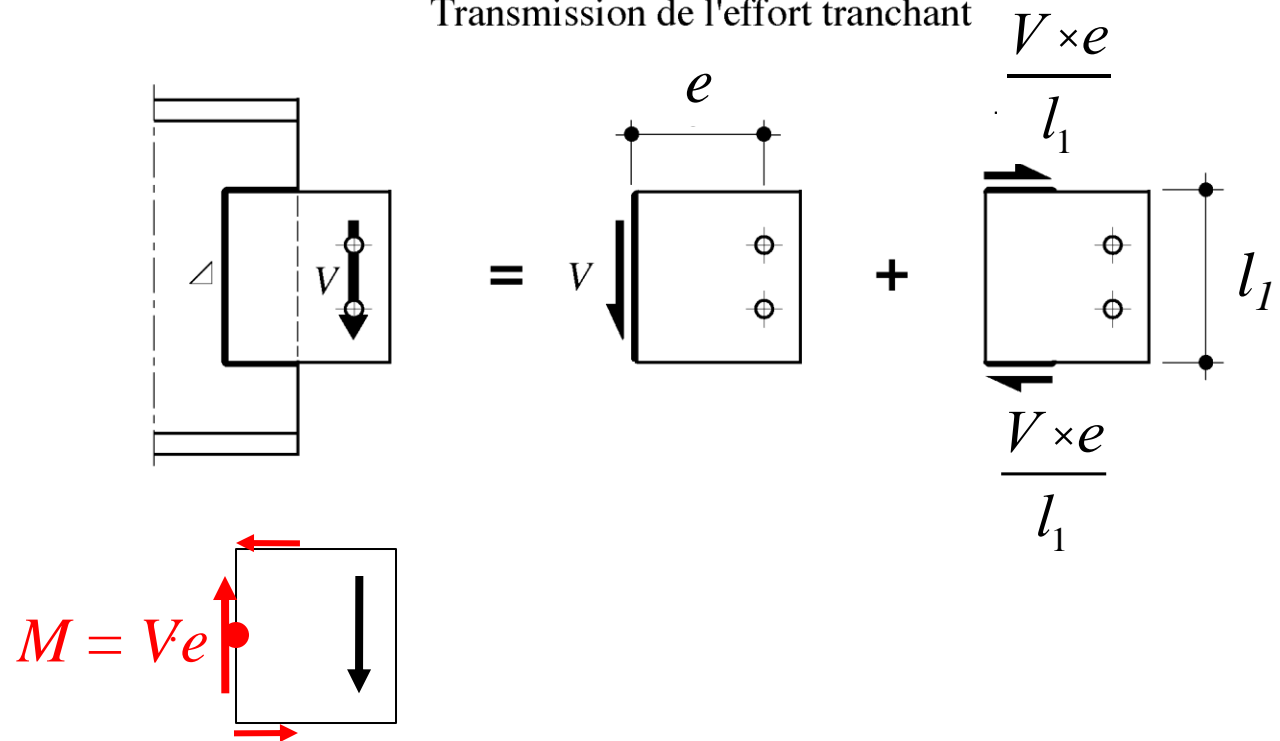
**Fig. 7.9** Géométrie des pièces assemblées limitant l'épaisseur maximale de la gorge d'un cordon d'angle

# Exemple de calcul, Fig. 9.5: Couver-joint d'âme soudé

Conception



Transmission de l'effort tranchant



# SIA 263, chapitre 7: Exécution

## et SIA 263/1, chap. 11 et 12: Contrôle, essais et qualification

### 7.5.2 Classification et qualité des soudures

7.5.2.1 La qualité d'exécution des assemblages soudés est conditionnée par la qualification du fabricant, le choix d'un mode opératoire de soudage qualifié, ainsi que par le recours à des spécialistes certifiés du soudage.

7.5.2.2 Lors de leur dimensionnement, les assemblages soudés doivent être classés dans l'une des classes de qualité suivantes, en vue de fixer les exigences de qualité à leur égard (voir SIA 263/1, chiffre 11.1.3):

classe B<sup>+</sup>: classe B avec des exigences supplémentaires EN 1090-2, pour cas particuliers **EN 1090-2, EXC4**

classe B: la soudure est équivalente à la matière des pièces assemblées, convient aux sollicitations importantes (si entailles éliminées, convient également aux sollicitations à la fatigue importantes) **EN 1090-2, EXC3**

classe C: pour sollicitations moyennes (qualité standard des cordons d'acier) **EN 1090-2, EXC2**

classe D: pour sollicitations faibles (par exemple des soudures constructives) **EN 1090-2, EXC1**

7.5.2.3 Lors de l'affectation des cordons de soudure à une classe de qualité, on tiendra aussi compte des exigences relatives à la ténacité. Les chocs, les basses températures et les contraintes résiduelles élevées nécessitent des cordons de soudure avec le moins de défauts possible

# Tab. 7.8: Méthodes de contrôle non-destructives

Français	Allemand	Anglais	Abbrev.
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Examen visuel</li> <li>• Examen par ressuage</li> <li>• Examen par magnétoscopie</li> <li>• Examen par radiographie</li> <li>• Examen par ultrasons</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sichtprüfung</li> <li>• Eindringprüfung</li> <li>• Magnetpulverprüfung</li> <li>• Durchstrahlungsprüfung</li> <li>• Ultraschallprüfung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Visual testing</li> <li>• Penetration testing</li> <li>• Magnetic particles testing</li> <li>• Radiation testing</li> <li>• Ultrasound testing</li> </ul>	VT PT MT RT UT

**Méthodes CND**

**ZfP**

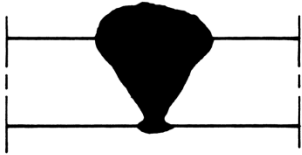
**NDE**

Zerstörungsfreie Prüfung

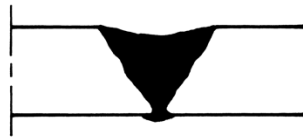
Non-destructive Examination

# Fig 7.7: défauts types

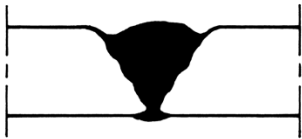
## CONFIGURATION EXTERNE



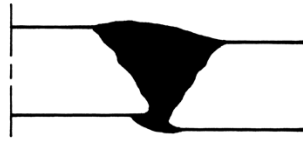
Surépaisseur



Sous-épaisseur

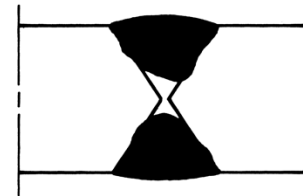


Caniveaux

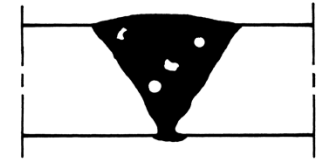


Décalage des bords

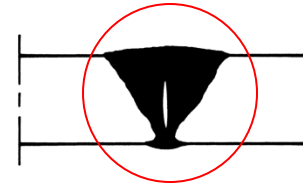
## CONFIGURATION INTERNE



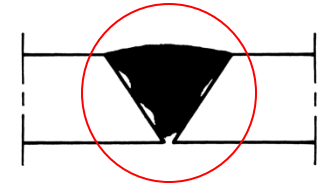
Manque de pénétration



Inclusions, pores

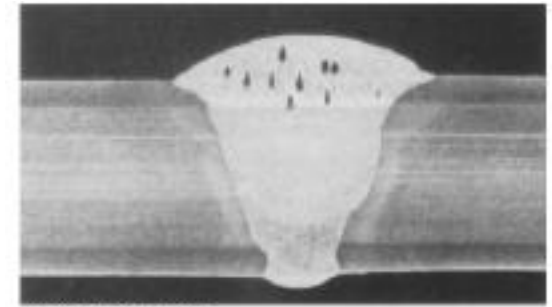


Fissure



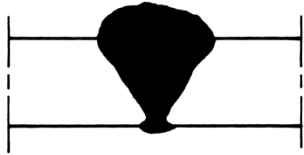
Défaut de collage

Rendent les soudures très fragiles

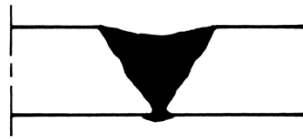


# Fig 7.7: défauts types

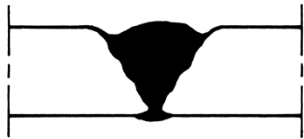
## CONFIGURATION EXTERNE



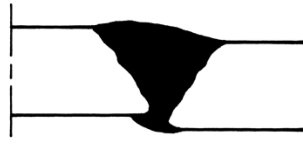
Surépaisseur



Sous-épaisseur

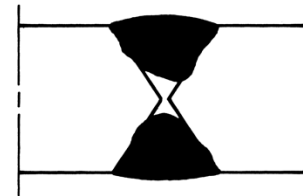


Caniveaux

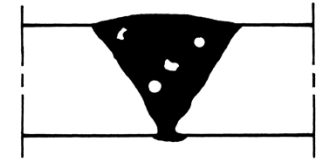


Décalage des bords

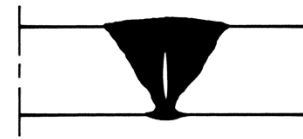
## CONFIGURATION INTERNE



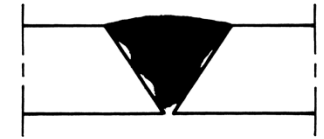
Manque de pénétration



Inclusions, pores



Fissure



Défaut de collage

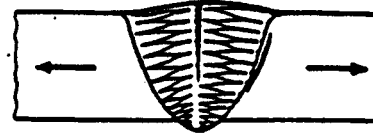


Quels types de défauts ?

- Surépaisseur
- Caniveau
- Décalage des bords
- Manque de pénétration
- Collage
- Pores

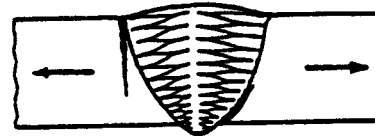
# Possible défauts: fissuration dans la soudure

Fissuration à chaud



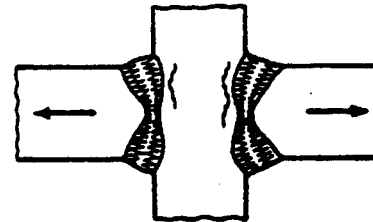
solidification  
+  
contraintes

Fissuration à froid par l'hydrogène



trempe  
+  
contraintes  
+  
hydrogène

Arrachement lamellaire



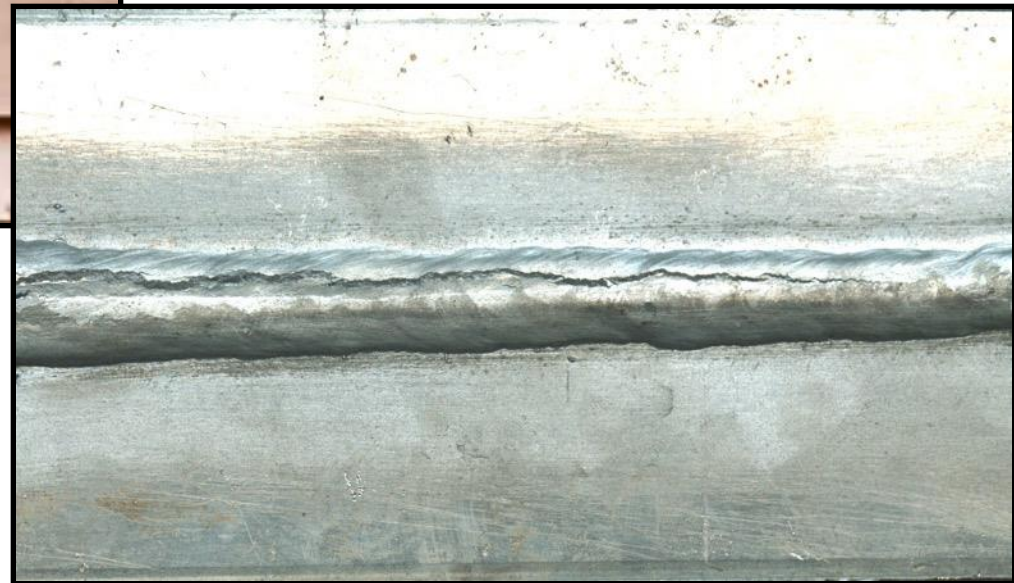
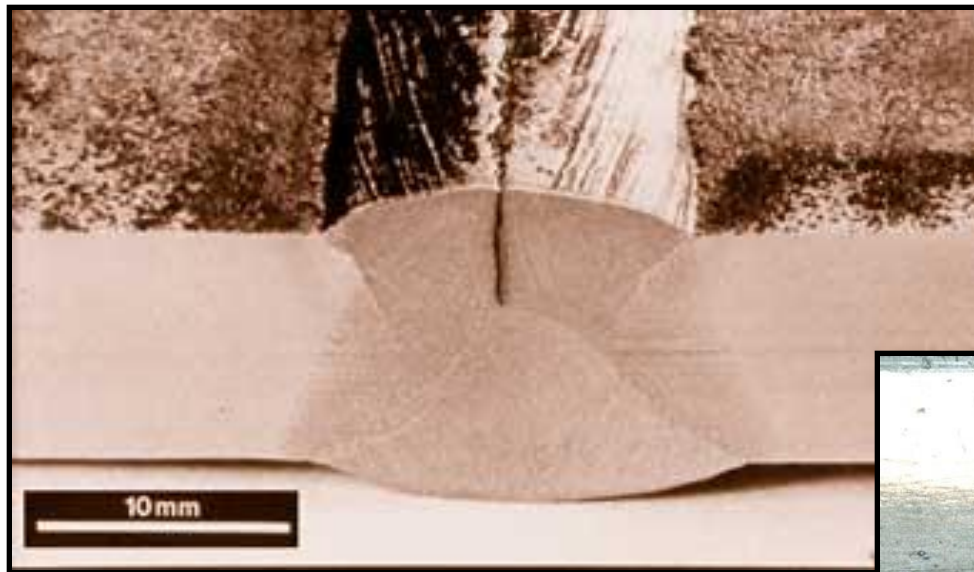
Plans de ségrégation  
+  
contraintes

Sont évités grâce à:

- Choix des matériaux, caractéristiques garanties
- Procédure de soudage, préchauffage, postchauffage, etc.
- Mode opératoire de soudage, métal d'apport, adaptés

## Localisation

- Fissures de solidification toujours en plein centre du cordon de soudure.



## 3.2.1 Aciers de construction normalisés et leurs propriétés

3.2.1.1 Les propriétés mécaniques des aciers et leur composition chimique sont définies dans les normes de produits.

3.2.1.2 Les propriétés mécaniques des produits d'une épaisseur nominale de plus de 250 mm (ou de 100 mm dans le cas des aciers à grains fins), ainsi que la résilience dans le cas de profilés d'une épaisseur nominale de plus de 100 mm, doivent être spécifiées dans chaque cas particulier.

3.2.1.3 Des exigences spéciales dans le sens de l'épaisseur des produits plats (voir la norme SN EN 10 164), c'est à dire dans un sens perpendiculaire à la surface, doivent être précisées lors de la commande de matériau.

3.2.1.4 Les produits de plus de 30 mm d'épaisseur sollicités en traction dans le sens de l'épaisseur (par exemple des plaques frontales résistant à la flexion) doivent si possible être commandés avec des **exigences** **Qualité Z** ⇔ **spéciales**. Ils doivent pour le moins faire l'objet d'un contrôle (de qualification) par ultrasons pour détecter la présence éventuelle de doublures et d'inclusions grossières.

### Exigences spéciales

(pour le groupe d'aciers S)

C gros grains

F grains fins

H trempabilité

Z15 propriétés garanties dans le sens de l'épaisseur (striction minimale 15%)

Z25 " (striction minimale 25%)

Z35 " (striction minimale 35%)

**Groupe d'acier**

S aciers de construction métallique  
P aciers pour appareils à pression  
L aciers pour appareils à pression  
E aciers de construction mécanique  
B aciers d'armature pour béton armé  
Y aciers pour béton précontraint  
R aciers pour rails  
S aciers au carbone

**Propriétés physiques**  
(pour le groupe d'aciers S)

C formage à froid spécial  
D galvanisation  
E émaillage  
F forçage  
L basse température de service  
M formage thermomécanique  
N normalisé ou laminage normalisant  
P pour palplanches  
Q trempé et revenu  
S construction navale  
T pour tubes  
W résistant à la corrosion atmosphérique  
an symbole chimique de l'élément d'alliage spécifié

**Propriétés mécaniques**

S... valeur min. de la limite d'élasticité N/mm²  
R... valeur min. de la limite d'élasticité N/mm²  
L... valeur min. de la limite d'élasticité N/mm²  
E... valeur min. de la limite d'élasticité N/mm²  
B... valeur min. de la limite d'élasticité N/mm²  
Y... valeur min. de la limite d'élasticité N/mm²  
R... valeur min. de la limite d'élasticité N/mm²  
C... valeur min. de la limite d'élasticité N/mm²

**Qualités d'acier**

27J	40J	60J	°C
JR	KR	LR	+20
J0	K0	L0	0
J2	K2	L2	-20
J3	K3	L3	-30
J4	K4	L4	-40
J5	K5	L5	-50
J6	K6	L6	-60

**Exigences spéciales**  
(pour le groupe d'aciers S)

C gros grains  
F grains fins  
H trempabilité  
Z15 propriétés garanties dans le sens de l'épaisseur (striction minimale 15%)  
Z25 " (striction minimale 25%)  
Z35 " (striction minimale 25%)

**Type de revêtement (sélection)**  
(pour le groupe d'aciers S)

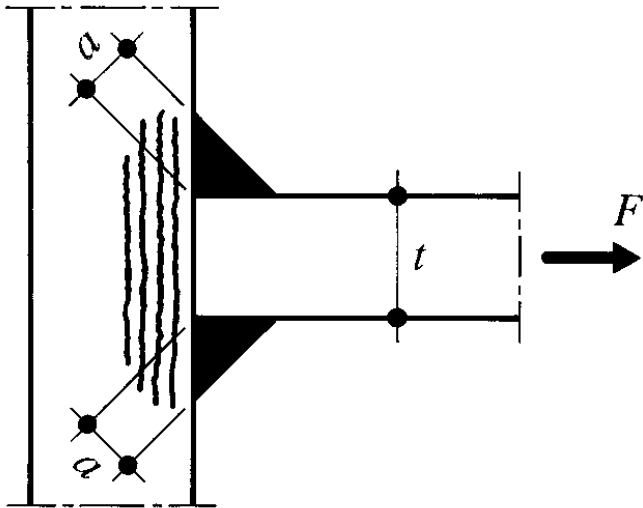
A revêtement d'aluminium par immersion à chaud  
CU revêtement de cuivre  
IC revêtement inorganique  
OC revêtement organique  
S étamé  
SE revêtement électrolytique d'étain  
ZE galvanisation  
ZE revêtement électrolytique de zinc  
ZN revêtement électrolytique ZnNi

**Traitement (sélection)**  
(pour le groupe d'aciers S)

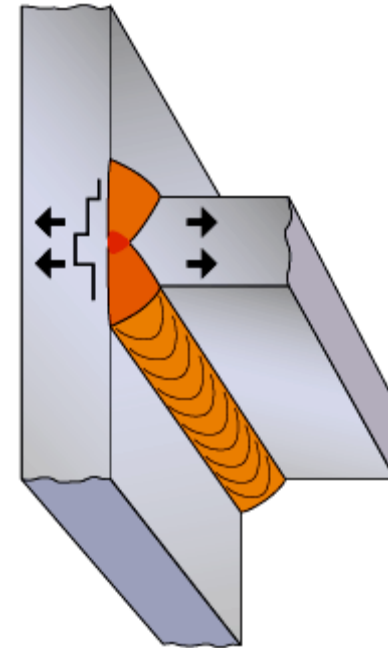
A recuit d'adoucissement  
C écroui à froid  
CR laminé à froid  
U non traité

S 355 JR + N W Z15 IC U

# Fig 7.10: Arrachement lamellaire, sollicitation perpendiculaire dans le sens travers court (Z)



$$a \leq \frac{t}{2}$$



Capacité de déformation faible du matériau dans le sens travers court due aux inclusions laminaires sulfureux lors du laminage. Pour l'éviter:

- Choix acier qualité Z, par ex. S 235 J2 **Z15**
- Aires de contact plus grandes
- Procédure de soudage adaptée



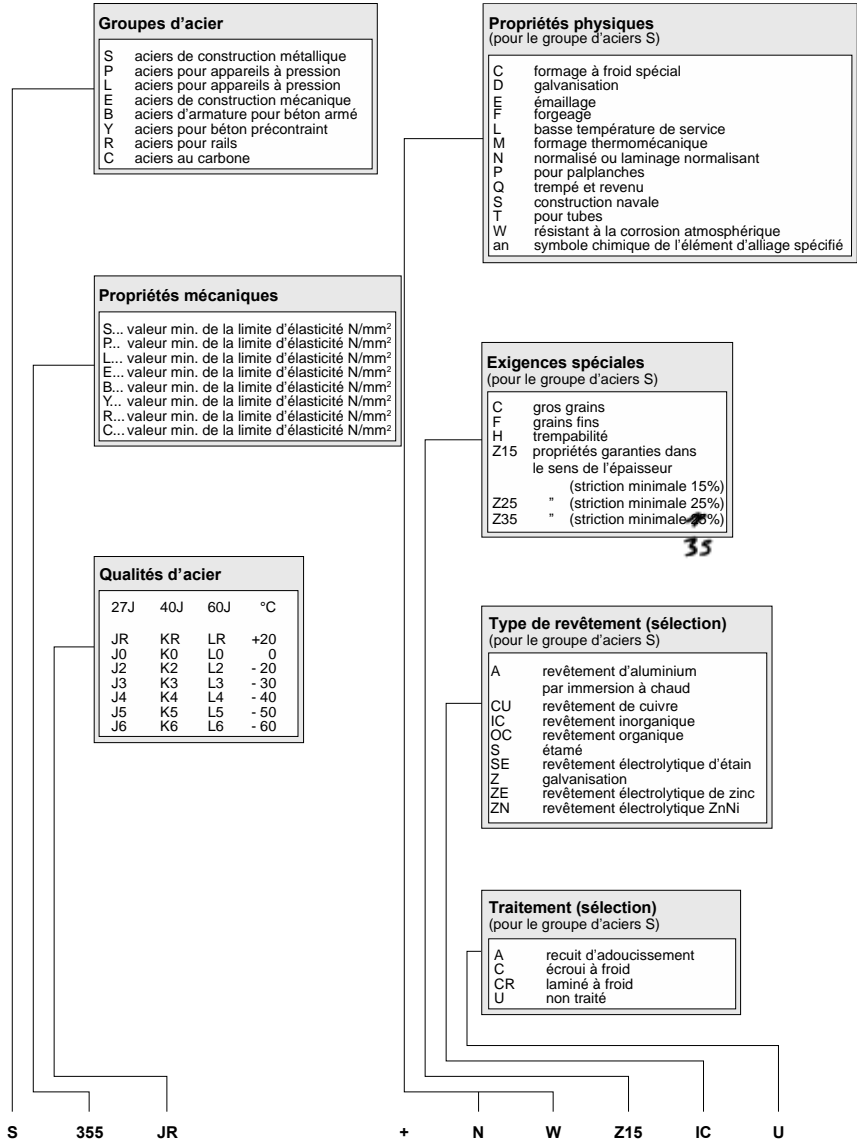
**Dias APK**

# Rappel: SIA 263 § 1.2.7

## désignation des aciers

1.2.7

Structure du système de désignation des aciers (selon SN EN 10027)



La valeur minimale de la limite d'élasticité, ou limite d'écoulement, correspond à la contrainte provoquant la première diminution significative de la charge, selon le diagramme contrainte-déformation. Dans le cas de matériaux n'ayant pas une limite d'élasticité nette, elle est remplacée par la limite de déformation  $R_{p0.2}$ . En général, l'indication des trois premières propriétés suffit.

Table 1 (continued)

EN 1090-2:

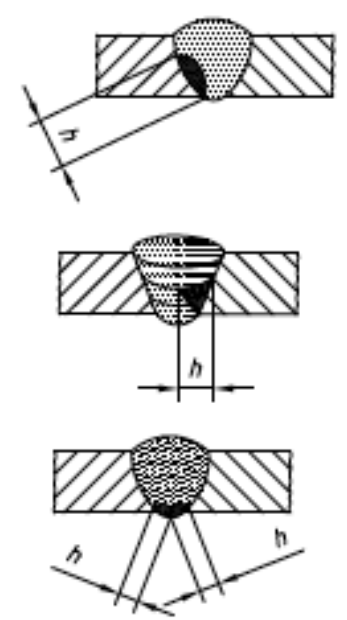
EXC1

EXC2

EXC3

No.	ISO 6520-1 reference	Imperfection designation	Remarks	t mm	Limits for imperfections for quality levels		
					D	C	B
2 Internal imperfections							
2.1	100	Cracks	All types of crack except microcracks and crater cracks	≥ 0,5	Not permitted	Not permitted	Not permitted
2.2	1001	Microcracks	A crack usually only visible under the microscope (50 ×)	≥ 0,5	Permitted	Acceptance depends on type of parent metal with particular reference to crack sensitivity	
2.3	2011 2012	Gas pore Uniformly distributed porosity	The following conditions and limits for imperfections shall be fulfilled. See also Annex A for information.				
			a1) Maximum dimension of the area of the imperfections (inclusive of systematic imperfection) related to the projected area  NOTE The porosity in the project area depends on the numbers of layers (volume of the weld).	≥ 0,5	for single layer: ≤ 2,5 % for multi-layer: ≤ 5 %	for single layer: ≤ 1,5 % for multi-layer: ≤ 3 %	for single layer: ≤ 1 % for multi-layer: ≤ 2 %
			a2) Maximum dimension of the cross section area of the imperfections (inclusive of systematic imperfection) related to the fracture area (only applicable to production, welder or procedure tests)	≥ 0,5	≤ 2,5 %	≤ 1,5 %	≤ 1 %
			b) Maximum dimension for a single pore for — butt welds — fillet welds	≥ 0,5	$d \leq 0,4 s$ , but max. 5 mm $d \leq 0,4 a$ , but max. 5 mm	$d \leq 0,3 s$ , but max. 4 mm $d \leq 0,3 a$ , but max. 4 mm	$d \leq 0,2 s$ , but max. 3 mm $d \leq 0,2 a$ , but max. 3 mm

Table 1 (continued)

No.	ISO 6520-1 reference	Imperfection designation	Remarks	t mm	Limits for imperfections for quality levels		
					D	C	B
2.10	304	Metallic inclusions other than copper	— butt welds	$\geq 0,5$	$h \leq 0,4 s$ , but max. 4 mm	$h \leq 0,3 s$ , but max. 3 mm	$h \leq 0,2 s$ , but max. 2 mm
			— fillet welds	$\geq 0,5$	$h \leq 0,4 a$ , but max. 4 mm	$h \leq 0,3 a$ , but max. 3 mm	$h \leq 0,2 a$ , but max. 2 mm
2.11	3042	Copper inclusions	—	$\geq 0,5$	Not permitted	Not permitted	Not permitted
2.12	401	Lack of fusion (incomplete fusion)		$\geq 0,5$	Short imperfections permitted, but not breaking of the surfaces  — butt welds: $h \leq 0,4 s$ , but max. 4 mm  — fillet welds: $h \leq 0,4 a$ , but max. 4 mm	Not permitted	Not permitted
	4011	Lack of side wall fusion					
	4012	Lack of inter-run fusion					
	4013	Lack of root fusion					