

LES PROCÉDÉS DE SOUDAGE ET DE COUPAGE

COMPLÉMENTS AU PRÉCIS DE CONSTRUCTION MÉCANIQUE

TOME II

LES PROCÉDÉS DE SOUDAGE

HISTORIQUE

- L'origine du soudage remonte à l'âge des métaux.
À l'âge de bronze, on faisait du soudage à la poche.
À l'âge de fer, on soudait à la forge.
- Jusqu'au milieu du 19e siècle, ce procédé n'a pas subi beaucoup d'évolution. À cette époque, on a commencé à se servir du gaz pour chauffer.
- Vers 1880-1900, on a mis en oeuvre de nouveaux procédés :
Le soudage oxyacétylénique
Le soudage aluminothermique
Le soudage à l'arc
Le soudage par résistance
Ces procédés connaîtront leur essor industriel vers 1920.
- Ensuite on n'a fait qu'améliorer ces procédés.
- On a industrialisé des principes physiques :
Le bombardement électronique
Le soudage au laser
Le soudage aux ultra-sons
- On a également fait des découvertes involontaires :
Le soudage par explosion
Le soudage par diffusion

À l'heure actuelle les procédés industriels de soudage peuvent atteindre une puissance de 100 kW/cm².

LISTE DES PRINCIPAUX PROCÉDÉS DE SOUDAGE (P.94 du précis, paragraphe 4)

1- Procédés nécessitant un effort extérieur :

Soudage réalisé en phase solide

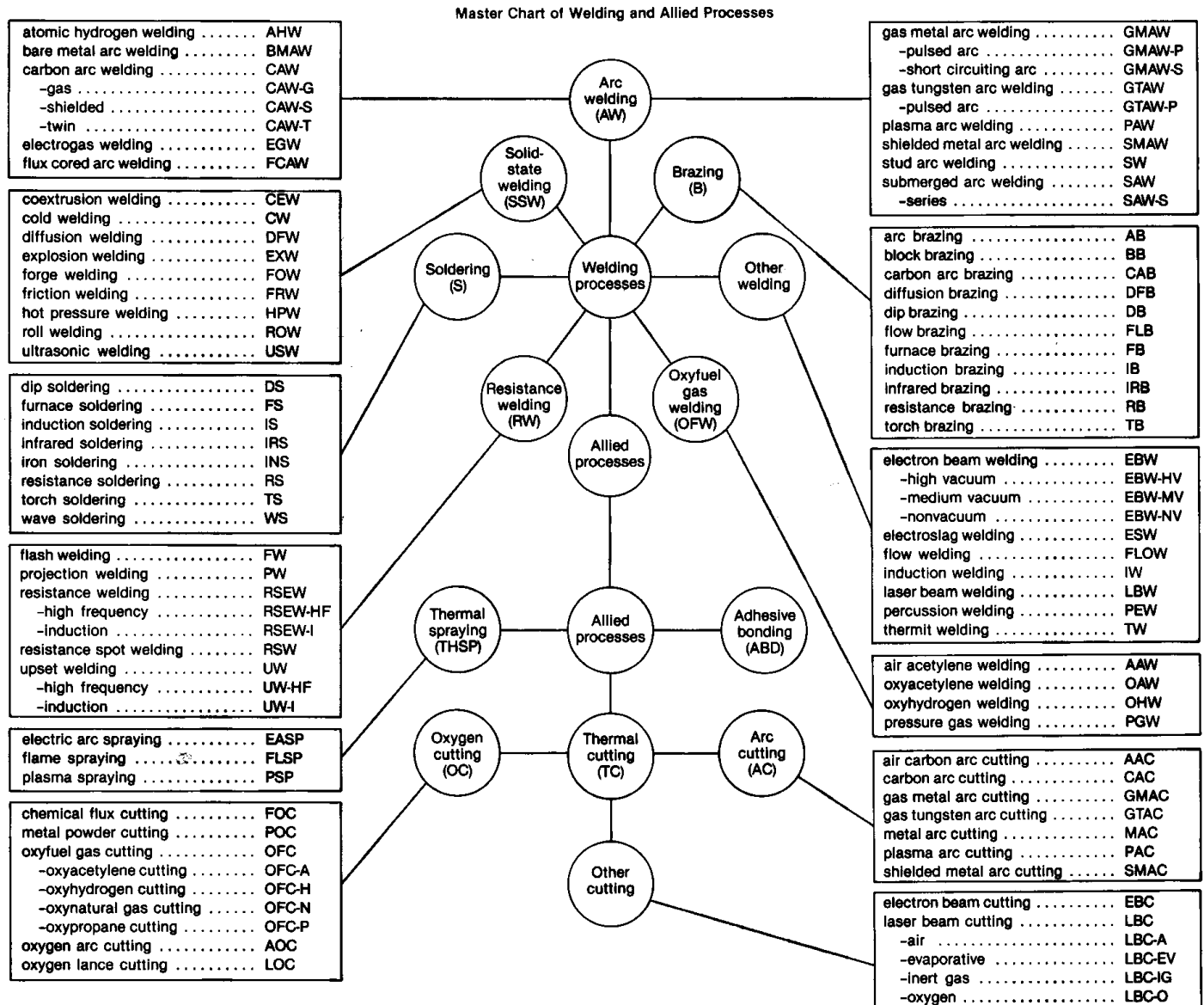
<u>Énergie</u>	<u>Type de soudage</u>	<u>Application</u>
Foyer extérieur de chaleur	-Soudage à la forge -Diffusion	-A la presse -Colaminage -Coextrusion
Echauffement mécanique	-Friction -Ultrasons -Explosion	
Résistance électrique	-En bout -Recouvrement	-Étincelle -Points -Molette -Bossages

2- Procédés sans effort extérieur :

Soudage réalisé en phase liquide

<u>Principe</u>	<u>Énergie</u>		<u>Procédé</u>
Coulée du métal d'apport	-Foyer extérieur de chaleur		-Soudage à la poche -Placage par coulée -Aluminothermie
Fusion de proche en proche du cordon	-Combustion		-Oxyacétylénique
	-Arc électrique	Électrode réfractaire	-T.I.G
		Électrode fusible	-Électrode enrobée -Fil fourré -M.I.G -M.A.G -Sous flux poudreux -Sous laitier
	-Plasma -Faisceau d'électrons -Laser		

DÉSIGNATION NORMALISÉE DES PROCÉDÉS DE SOUDAGE ET DE COUPAGE D'APRÈS LA NOEME DE L'AMERICAN WELDING SOCIETY : A.W.S.



AJOUTS AUX PROCÉDÉS DE SOUDAGE PAR PRESSION

Dans ces types de procédés, l'effort presseur joue un rôle fondamental.

La température de soudage doit être supérieure à 0.6 fois la température de fusion du matériaux.

Soudage à la forge:

Principe :

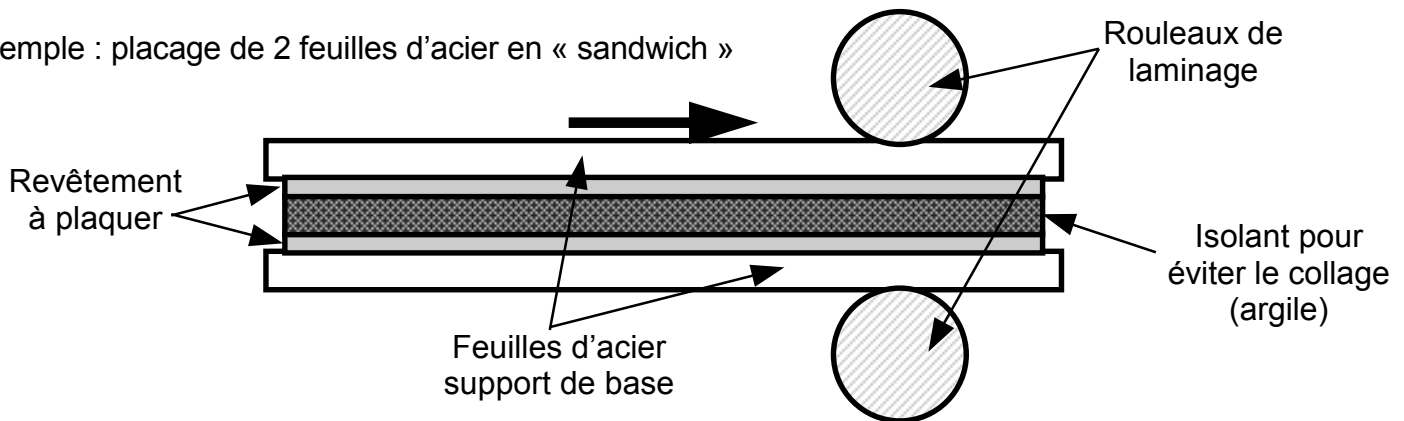
S'obtient par le martelage vigoureux l'une sur l'autre des 2 pièces à souder, chauffées au feu de forge, à une température de 1200 à 1300°C.

On utilise ce procédé depuis l'apparition du "fer", mais de nos jours il tend à disparaître à cause de l'interposition inévitable d'oxyde.

Il ne s'applique qu'au soudage des aciers doux.

Application industrielle : fabrication d'acier plaqué (colaminage, coextrusion).

Exemple : placage de 2 feuilles d'acier en « sandwich »

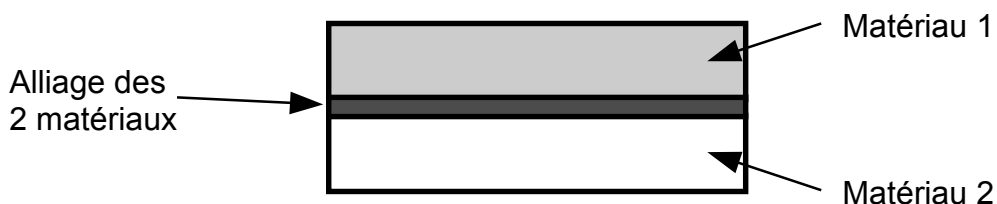


Soudage par diffusion:

Principe :

À une certaine température, à l'interface de 2 pièces métalliques en contact étroit, les atomes migrent d'un site à l'autre.

En agissant sous vide ou sous atmosphère protectrice contrôlée, l'action combinée de la température et de la pression accélère le phénomène de diffusion.



Les pièces doivent être désoxydées et dégraissées; leur état de surface doit être de faible rugosité ($< 1\mu\text{m}$).

Avec ce système on peut réaliser la liaison de matériaux non soudables, en faisant un dépôt électrolytique de matériau soudable sur la surface du joint.

Exemples d'applications :

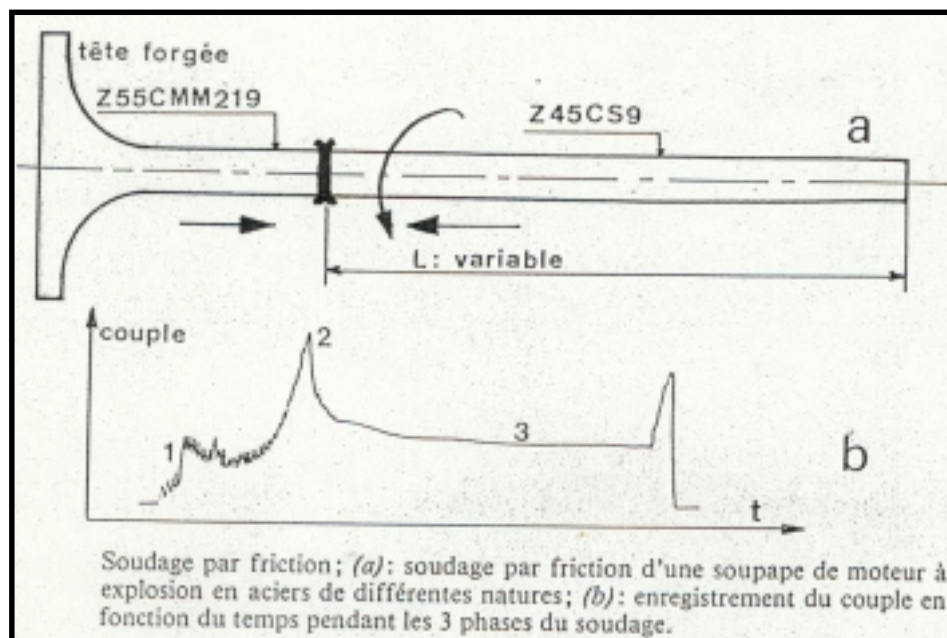
- Réalisation de rotor d'hélicoptère en alliage de titane
La pièce forgée pesait 455 kg.
Avec le soudage par diffusion : - on a économisé 57% de matière
- on a accru les performances de 30%.
- Réalisation de liaisons difficiles :
Métal - graphite
Métal - céramique
Métal - verre

Soudage par friction :

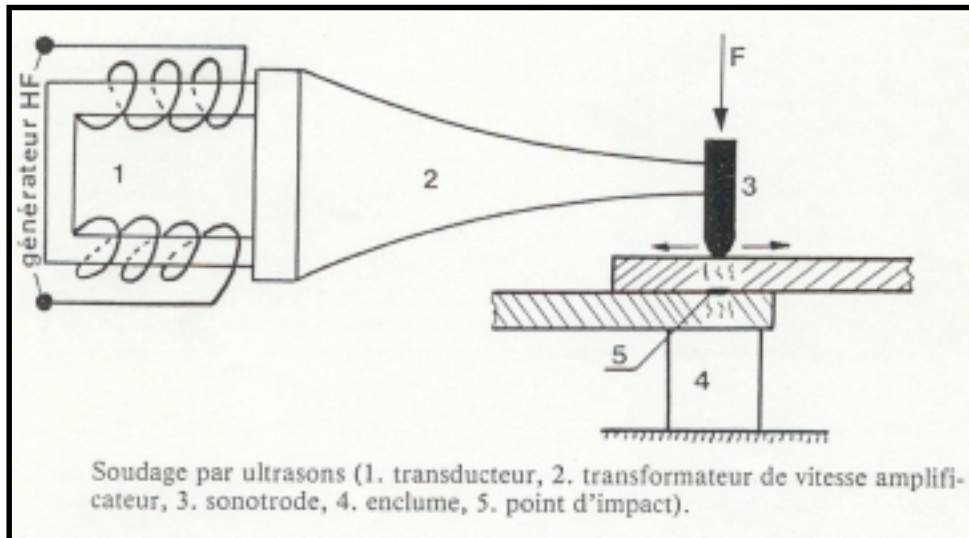
Exemples de temps de soudage :

Matériaux	Soudage $\varnothing 20$ plein deux sections identiques		Pression unitaire (en daN/mm ²)	
	Temps de soudage (s)	Effort axial (daN)	Friction	Forgeage
Aciers alliés	4-10	7 500	8-16	10-25
Aciers au carbone	3-4	3 800	3,5-6	6-10
Aciers inoxydables	4-8	4 400	8-12	10-14
Alliages d'aluminium	3-4	1 900	0,5-3	3-6
Cuivre ou Ni	10-12	1 900	2-4	2-6

Exemple d'application : soupape de moteur à explosion



Soudage par ultrasons:



Principe:

Les pièces à souder, serrées entre elles, sont soumises à des vibrations ultrasonores qui provoquent des frictions locales. Les pellicules superficielles des zones de contact sont rompues par les déformations plastiques localisées; l'interpénétration des surfaces de contact s'ensuit. Sous l'effet du frottement à l'interface, la température s'élève, la zone de déformation s'étend et le soudage se produit. Il y a de nombreux points communs entre ce procédé et le soudage par friction.

Description : La sonotrode vibre suivant un train d'ondes stationnaires (le ventre des ondes est au niveau du contact).

La fréquence est de 20 à 60 Hz.

Domaine d'application :

Ce procédé est surtout utilisé pour le soudage des matières plastiques.

Pour les métaux, le procédé est limité par l'épaisseur maximale de la pièce côté sonotrode :

3 mm pour l'aluminium

0.5 mm pour l'acier inoxydable

Donc utilisation principale pour les feuilles métalliques.

Côté enclume il n'y a pas de limitation d'épaisseur.

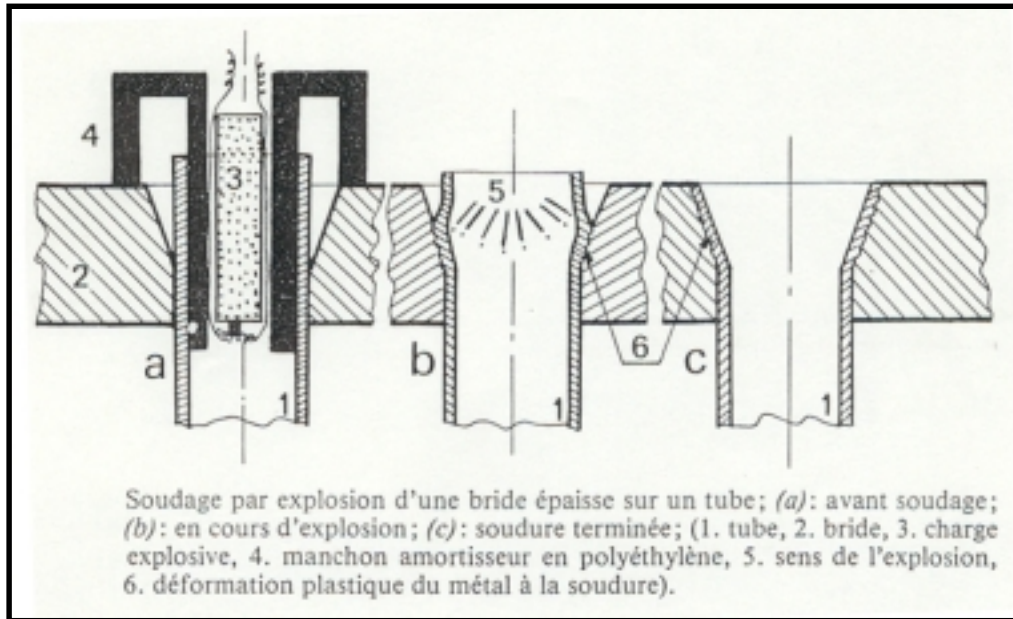
Application aux métaux :

- soudage de petites pièces
- soudage d'emballages (tubes de produits pateux)
- fils de cuivre isolés
- thermocouples
- horlogerie

Vocabulaire : **Soudage proche** : la zone à souder est proche de la sonotrode.

Soudage lointain : la zone à souder est éloignée de la sonotrode (nécessite un matériau qui transmet les vibrations)

Soudage par explosion :



Principe:

La détonation d'une charge explosive provoque une onde de choc. L'une des pièces est projetée sur l'autre par l'explosion. Une déformation plastique considérable se produit alors dans la région située près de l'interface qui prend toujours une forme ondulée.

Les vagues sont de 0.1 à 5 mm et les longueurs d'onde de 0.25 à 6 mm.

Domaine d'application:

Ce procédé est très utilisé pour le plaquage de métaux très minces sur des tôles épaisses de nature différente.

Il permet le soudage de surfaces planes de plusieurs mètres carrés, pour des épaisseurs de 0.5 à 15 mm, et celui de tubes jusqu'à 1 m de diamètre par recouvrement ou sur des brides épaisses.

Soudage en bout par résistance pure et par étincelage :

Soudabilité des matériaux :

SOUDABILITÉ PAR RÉSISTANCE	Aluminium	5754X-5086 (A-G3) (A-G4)	2017 A (A-U4 G)	Cuivre	Laiton	Bronze	Zinc	Acier non allié (C < 0,2 %)	Acier plombé	Acier galvanisé	Acier étamé	Acier inoxydable
Aluminium	■	■	■				●					
5754 X - 5086 (A-G 3) (A-G 4)	■	■	■				●					
2017 A (A-U4 G)	■	■	■				●					
Cuivre				■	●	●						
Laiton				●	■	■	●	■		■		■
Bronze				●	■	■		●				■
Zinc	●	●	●		●		●		●	●	●	
Acier non allié (C < 0,2%)					■	●		■	■	■	■	■
Acier plombé							●	■	■	■	●	■
Acier galvanisé					■		●	■	■	■	■	■
Acier étamé							●	■	●	■	■	■
Acier inoxydable					■	■		■	■	■	■	■
<div> <div>■</div> Excellente soudabilité <div>▤</div> Soudable <div>◐</div> Soudage difficile <div>□</div> Soudage impossible ou mauvaise soudure </div>												

AJOUTS AUX PROCÉDÉS DE SOUDAGE PAR FUSION

Soudage électrique à l'arc à l'électrode enrobée :

Désignation normalisée des électrodes selon l'A.W.S. :

NORMALISATION DES ÉLECTRODES

- 4 FACTEURS À SPÉCIFIER :
 - RÉSISTANCE MINIMALE À LA TRACTION DU MÉTAL DÉPOSÉ
 - POSITION DE SOUDAGE DE L'ÉLECTRODE
 - TYPE D'ENROBAGE
 - COURANT À UTILISER
- EXEMPLES :
 - E48010 :
 - E=ÉLECTRODE
 - 480=RÉSISTANCE : 480 mPa
 - 1=SOUDAGE EN TOUTES POSITIONS
 - 0=ENROBAGE CELLULOSIQUE+COURANT CONTINU
 - E7014 :
 - E=ÉLECTRODE
 - 70=RÉSISTANCE : 70000 lbs/po²
 - 1=SOUDAGE EN TOUTES POSITIONS
 - 4=POUDRE DE FER+COURANT CONTINU
- POSITIONS :
 - 1=TOUTES POSITIONS
 - 2=À PLAT ET À L'HORIZONTALE
 - 3=À PLAT SEULEMENT
 - 4=VERTICAL DESCENDANT
- ENROBAGE ET COURANT :
 - 0=CELLULOSIQUE+COURANT CONTINU
 - 1=CELLULOSIQUE+COURANT CONTINU OU ALTERNATIF
 - 2=RUTILE +COURANT CONTINU
 - 3=RUTILE + COURANT ALTERNATIF OU CONTINU
 - 4=POUDRE DE FER + COURANT CONTINU
 - 8=POUDRE DE FER + COURANT ALTERNATIF OU CONTINU

Soudage électrique à l'arc sous atmosphère gazeuse M.I.G-M.A.G. :

Exemples de sections de fils fourrés :

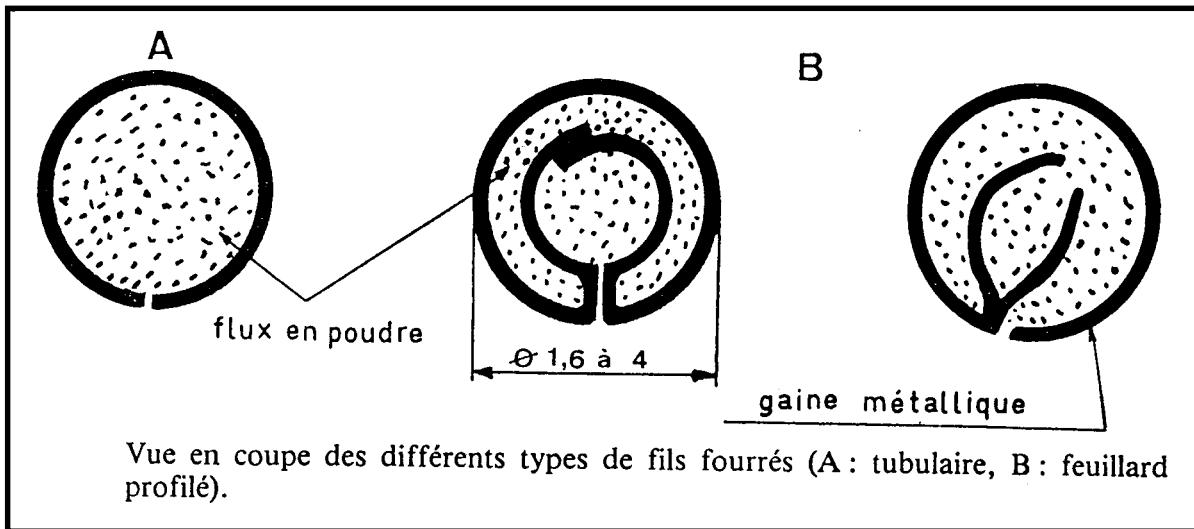
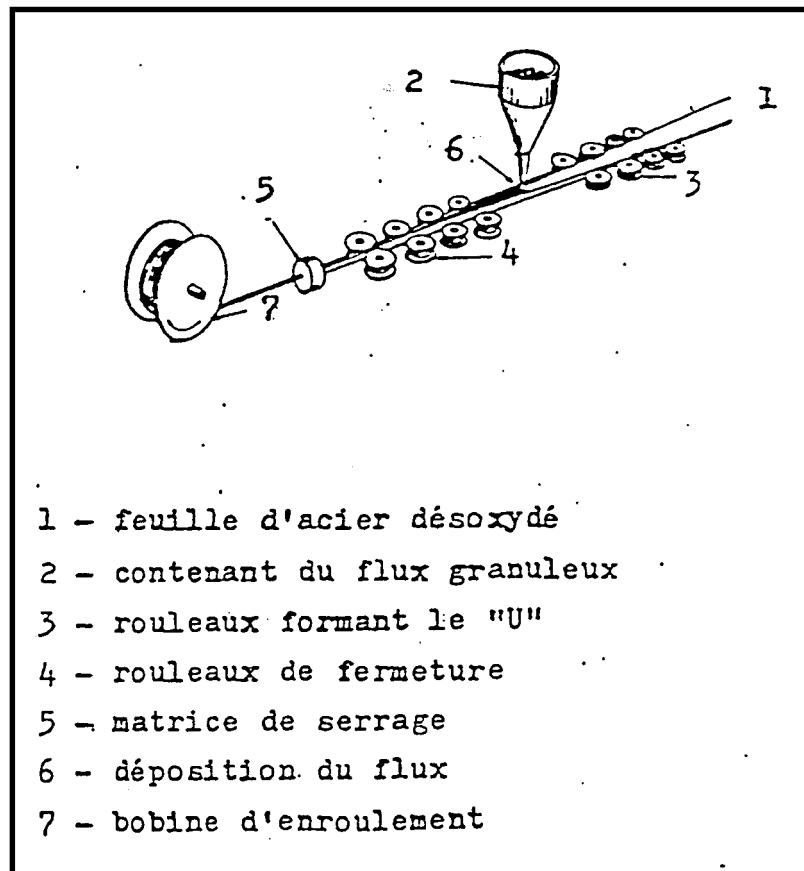


Schéma de fabrication du fil fourré en continu :



CONCEPTION DES ENSEMBLES SOUDÉS

1- Généralités:

Quand on conçoit un ensemble soudé, on doit vérifier que l'assemblage remplit les conditions de service imposées, pour un coût de réalisation faible, et le respect des calculs qui ont permis son dimensionnement.

Les coûts dépendent de la préparation des pièces et de la quantité de métal déposé (temps de soudage).

Les hypothèses de calcul pour un assemblage soudé ne sont bonnes que si on respecte les conditions suivantes:

- pas de défauts importants, ni de contraintes résiduelles élevées dans le joint (contrôle, géométrie, séquence de soudage).
- pas de risque de rupture fragile en service (fatigue, temps froid).
- le métal déposé et le métal de base affectés thermiquement doivent avoir des caractéristiques proches de celles du métal de base non affecté.
- respect, dans la forme et les dimensions, des hypothèses de calcul.

2- Conception des assemblages soudés:

Les règles pratiques de conception peuvent se résumer ainsi:

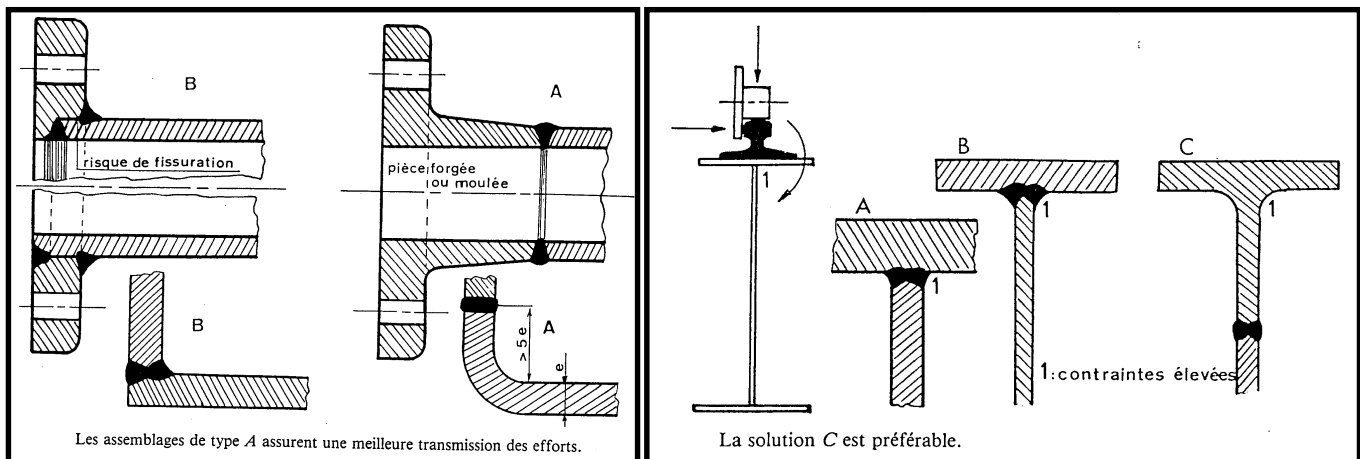
Dans une structure soudée, la transmission des efforts doit se faire naturellement.

Ceci entraîne la prise en compte de la géométrie du joint (discontinuités), le niveau et la direction principale des contraintes de service.

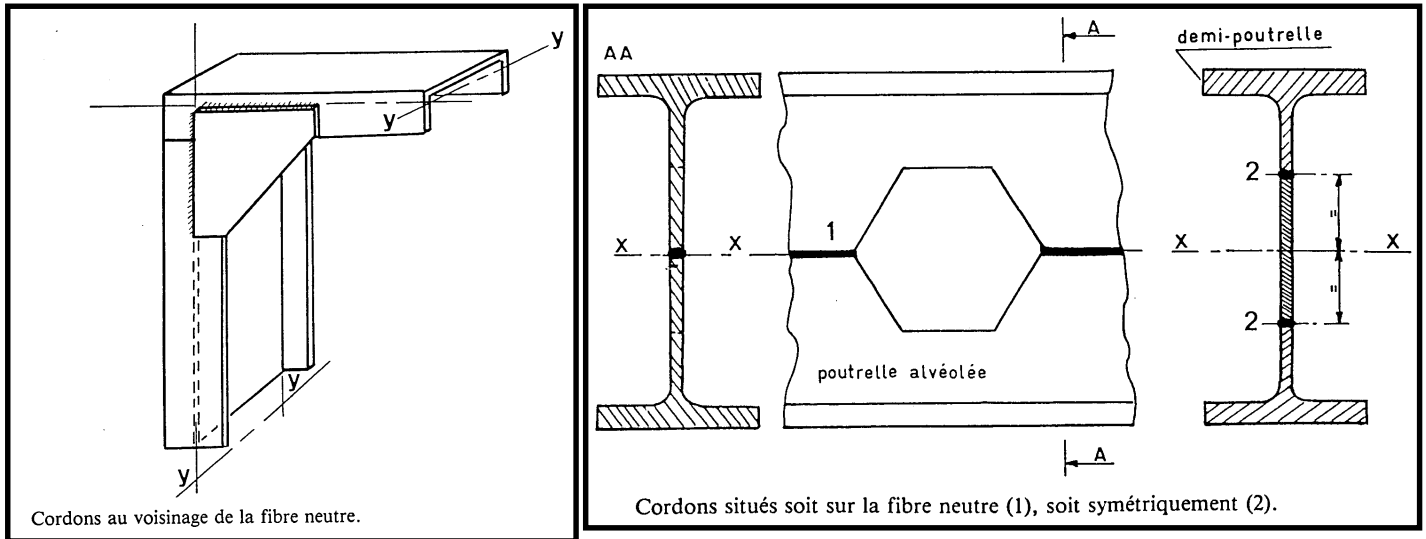
La transmission des efforts peut provoquer un risque de fissuration.

D'où les règles suivantes:

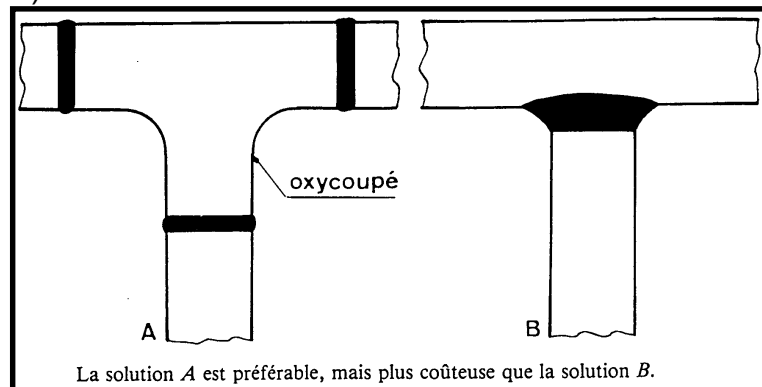
- éviter les zones à forte concentration de contrainte



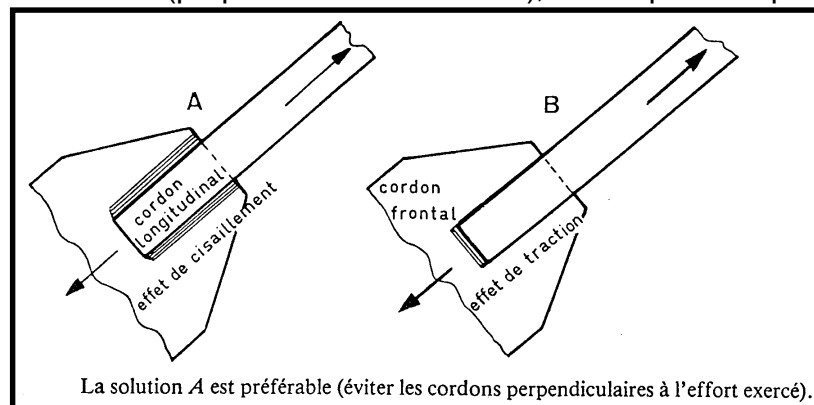
- situer le joint, autant que possible, dans les zones les moins sollicitées (voisinage de la fibre neutre)



- limiter les déformations par la symétrie des assemblages et la position des cordons
- préférer les soudures bout à bout aux cordons d'angle, pour les pièces fortement sollicitées (contrainte triaxiale)

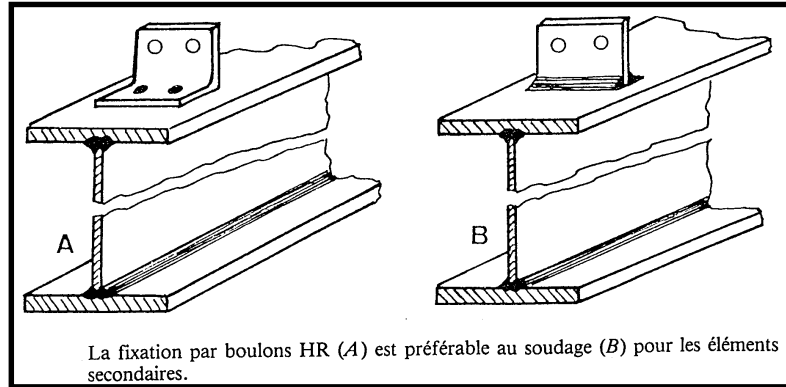


- éviter les cordons frontaux (perpendiculaires à l'effort), car risque de rupture fragile par traction

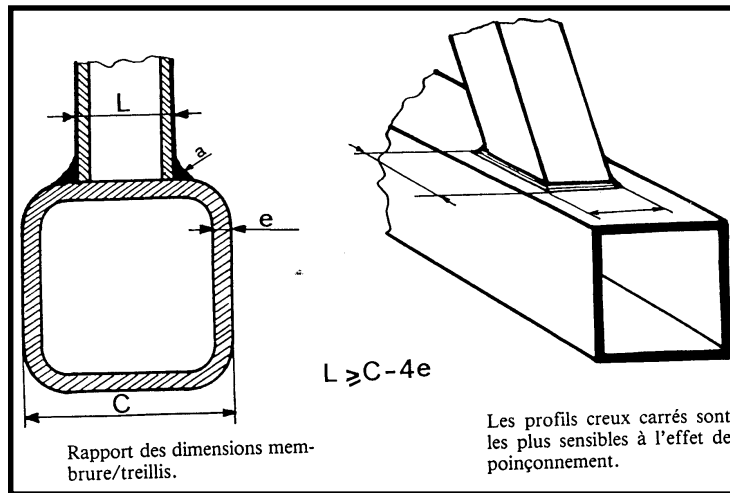


- préférer les cordons longitudinaux (effort parallèle à l'axe de la soudure)

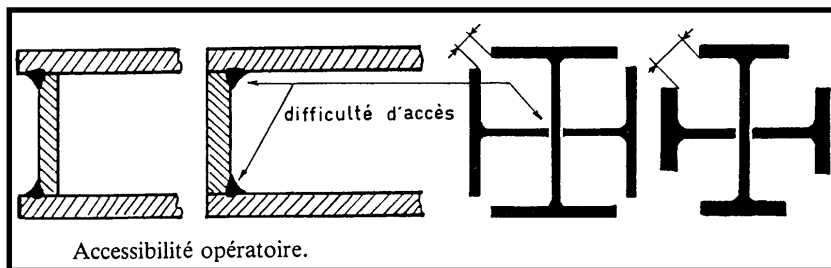
- pour des ensembles soumis à la fatigue, éviter le soudage d'éléments secondaires, et préférer un assemblage boulonné haute résistance



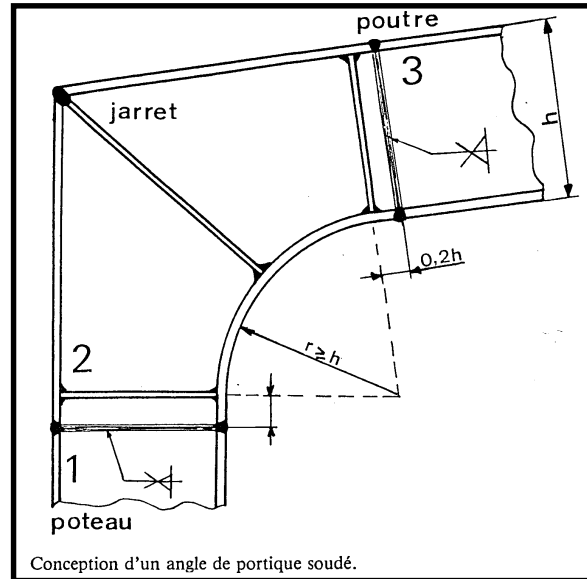
- faire un cordon tout le tour dans le cas d'un profil creux soudé en bout (résistance du joint liée à hauteur "a" de la gorge)



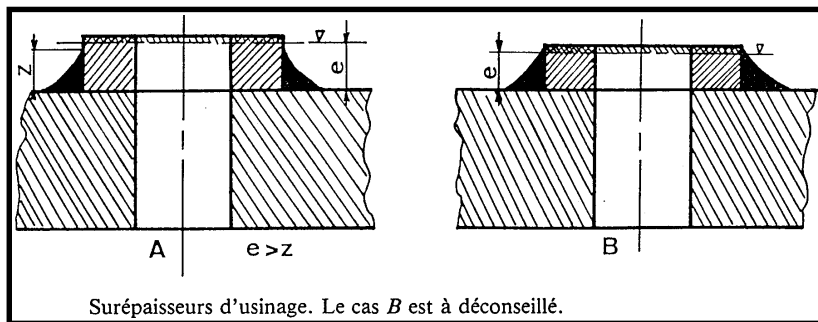
- toujours pour les profils creux, respecter le rapport $L \geq C - 4e$ pour éviter l'effet de poinçonnement et le surdimensionnement inutile
- l'opération de soudage doit être aisée. L'assemblage doit faciliter l'accès pour exécuter les soudures



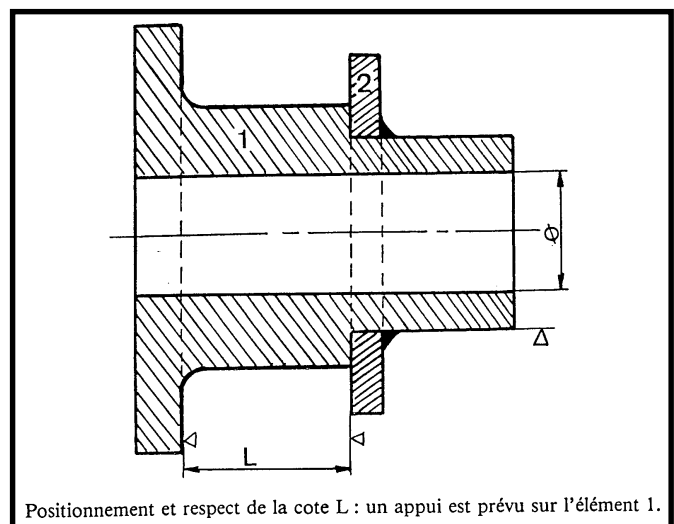
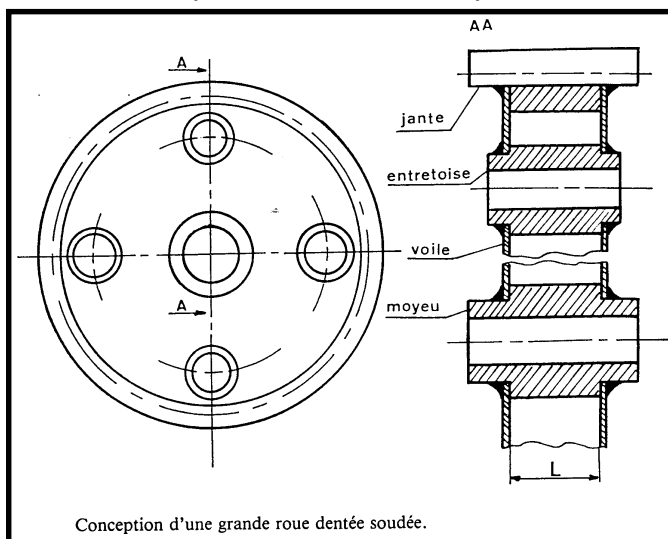
- limiter au maximum les soudures sur chantiers en positions et conditions difficiles. Pour cela, prévoir des sous-ensembles simples, qui pourront être reformer, puis soudés entre eux



- pour les pièces usinées après soudage:
 - prévoir une surépaisseur tenant compte du retrait
 - veiller à ce que le cordon conserve la totalité de ses dimensions après usinage



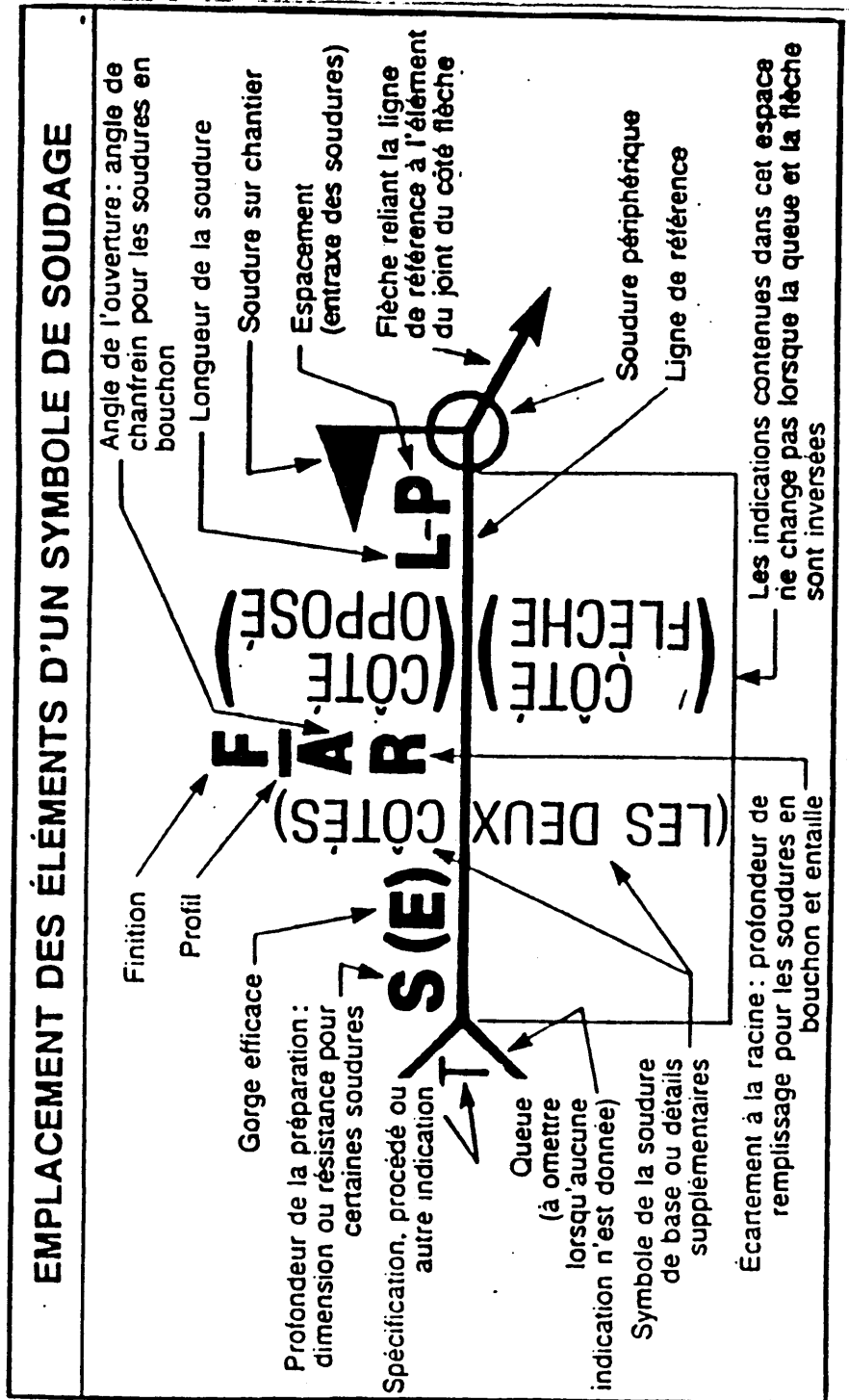
- faciliter le positionnement des pièces, et le respect de certaines côtes fonctionnelles



REPRÉSENTATION NORMALISÉE DES SOUDURES

Différentes normalisations existent , mais nous étudierons celle de l'AMÉRICAN WELDING SOCIETY, qui a cours au Québec.

Il faut que la représentation soit simple, claire et donne toutes les indications sur le cordon, pour que l'ouvrier soudeur puisse le réaliser sans erreur possible



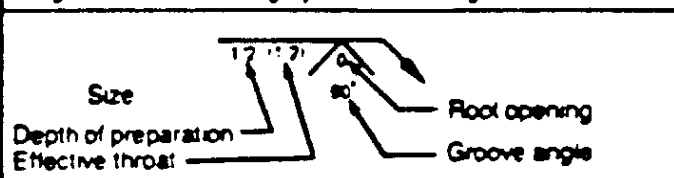
De plus il ne faut pas qu'elle encombre le dessin inutilement.

Se référer à l'extrait de la norme sur les symboles standards ci-dessous :

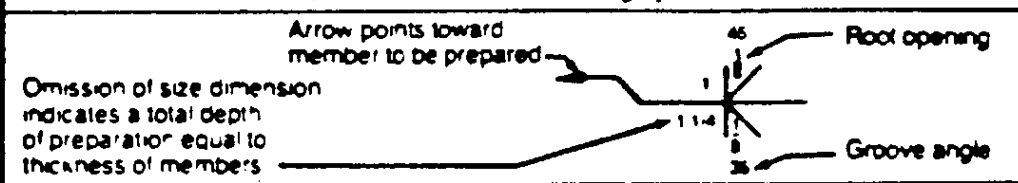
Basic Welding Symbols and Their Location Significance								
Location Significance	Fillet	Plug or Slot	Spot or Projection	Seam	Back or Backing	Surfacing	Scarf for Brazed Joint	Flange Edge
Arrow Side								
Other Side						Not used		
Both Sides		Not used	Not used	Not used	Not used	Not used		Not used
No Arrow Side or Other Side Significance	Not used	Not used			Not used	Not used	Not used	Not used

Basic Welding Symbols and Their Location Significance								
Flange Corner	Square	V	Bevel	Groove				Location Significance
				U	J	Flare-V	Flare-Bevel	
								Arrow Side
								Other Side
Not used								Both Sides
Not used		Not used	Not used	Not used	Not used	Not used	Not used	No Arrow Side or Other Side Significance

Single-V Groove Welding Symbol Indicating Root Penetration



Double-Bevel-Groove Welding Symbol



Les points les plus importants à retenir sont:

- la position de la soudure par rapport à la position du symbole sur la flèche
- la symbolisation de la forme du joint
- la forme de la surface du joint
- les caractéristiques chiffrées du cordon.

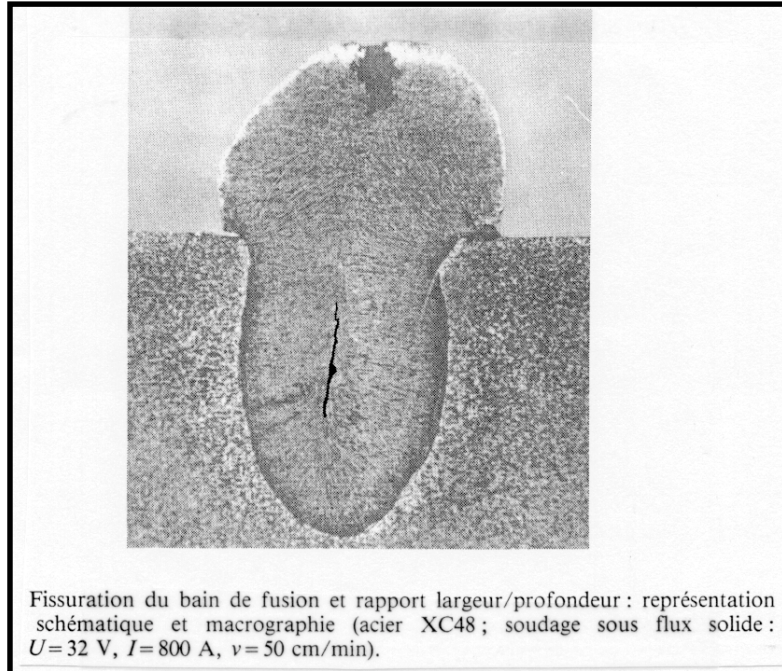
DÉFAUTS ET CONTRÔLE DES SOUDURES

1- Défauts des cordons de soudure :

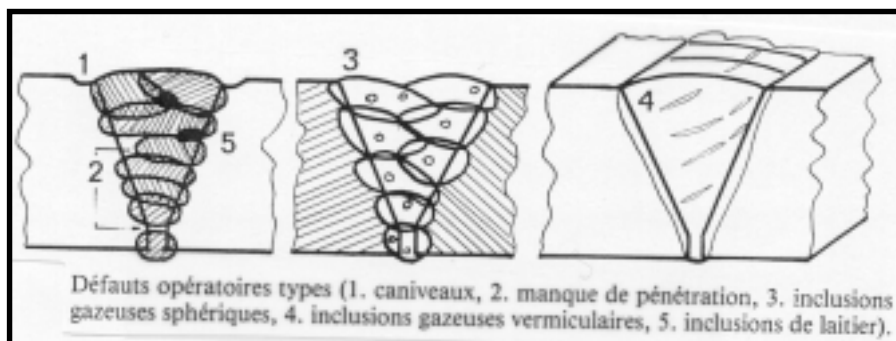
Plusieurs types de défauts peuvent apparaître lors du soudage.

Les principaux sont énumérés ci-après:

- Fissures: dûes à un mauvais choix des conditions de soudage et à un retrait excessif du matériau sous bridage



- Manque de pénétration: dû au non respect ou mauvais choix des conditions de soudage (paramètres I , U , v , ϕ du fil ou de l'électrode), à une mauvaise préparation des bords (angle des chanfreins, écartement).
- Morsures en surface, caniveaux: dûs à une énergie de soudage trop importante ou à une mauvaise position du fil de l'électrode.
- Soufflures: inclusions gazeuses dûes aux réactions chimiques dans le bain de fusion ou à l'humidité des pièces, du flux ou des enrobages. Elles sont de forme sphérique ou vermiculaire.
- Inclusions de laitier: entre les différentes passes ou les croisement de soudures. Dûes à un mauvais nettoyage entre chaque passe ou à une mauvaise technique opératoire (superposition des cordons).



2- Contrôle des soudures :

A- Essais mécaniques :

Ils permettent de vérifier la résistance et les caractéristiques mécaniques de l'ensemble soudé.

Différents essais sont pratiqués: - traction
- dureté
- pliage
- résilience

Ces essais sont destructifs et pratiqués sur des éprouvettes du matériau.

B- Contrôles externe du joint :

a- Contrôle dimensionnel :

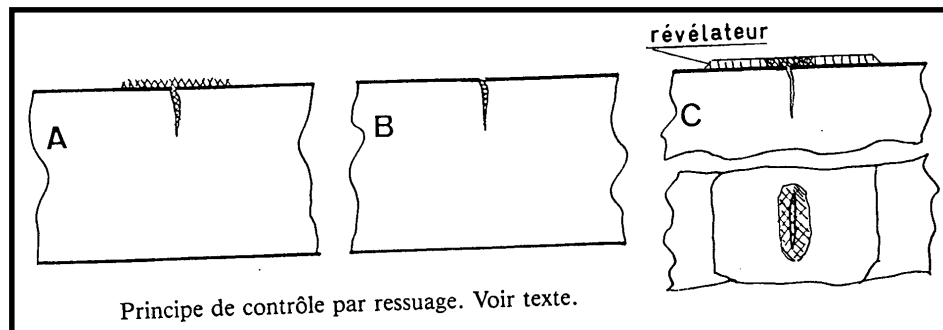
- permet de vérifier la surépaisseur ou la gorge du cordon de soudure à l'aide d'un calibre approprié.
- permet de vérifier les dimensions des cordons discontinus.

b- Contrôle visuel :

- à l'oeil nu ou avec une loupe, on voit les criques débouchant en surface, les manques ou les excès de métal d'apport, le manque de pénétration, les canivaux et la forme du cordon (concave ou convexe).

c- Contrôle par ressuage :

- permet de détecter les fissures de surface.



La technique est la suivante:

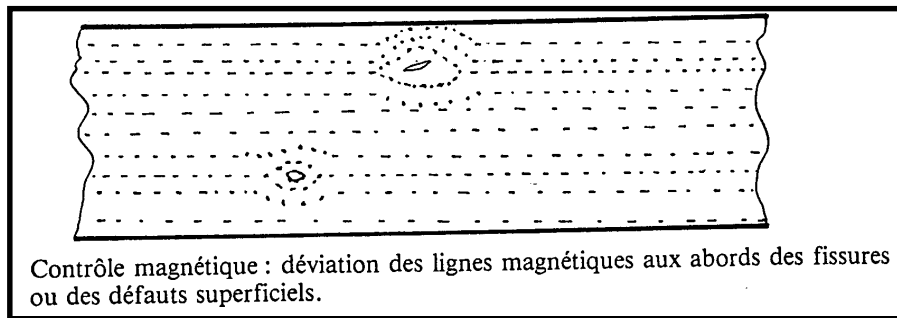
- arrosage de la surface de la pièce avec un liquide très fluide à fort pouvoir pénétrant (souvent teinté en rouge)
- nettoyage avec un solvant; seul le liquide au fond des fissures reste
- projection sur la surface de la pièce d'un révélateur (poudre ou aérosol), qui absorbe le liquide restant et indique ainsi l'endroit du défaut

Certains liquides sont fluorescents et nécessitent une lampe à ultraviolets.

Ce contrôle s'applique à tous les matériaux.

d- Contrôle magnétique :

on fait parcourir la pièce préalablement recouverte de poudre magnétique (ou en suspension dans un liquide) par un champ magnétique.

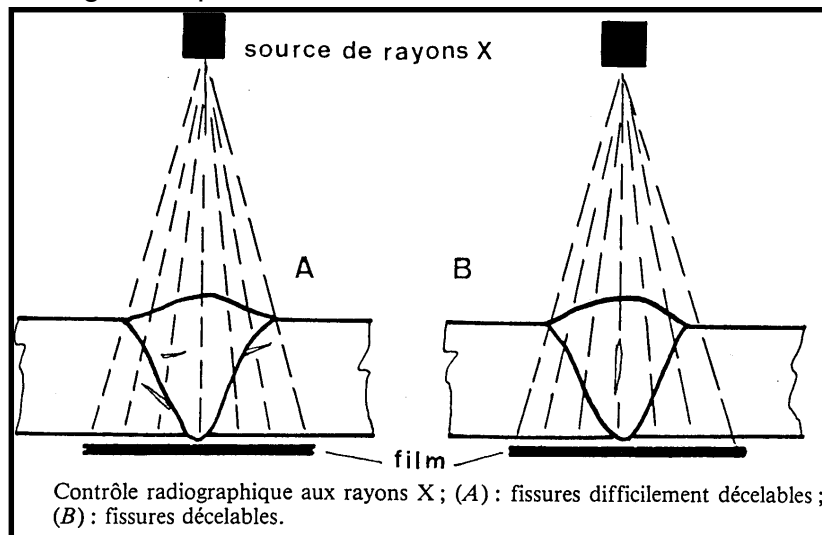


La répartition non uniforme de la poudre révèle les défauts.
Ce contrôle ne s'applique qu'aux matériaux magnétiques.

C- Contrôle interne du joint :

a- Contrôle radiographique :

utilisation de rayons X ou gamma pour visualiser les défauts sur un film.



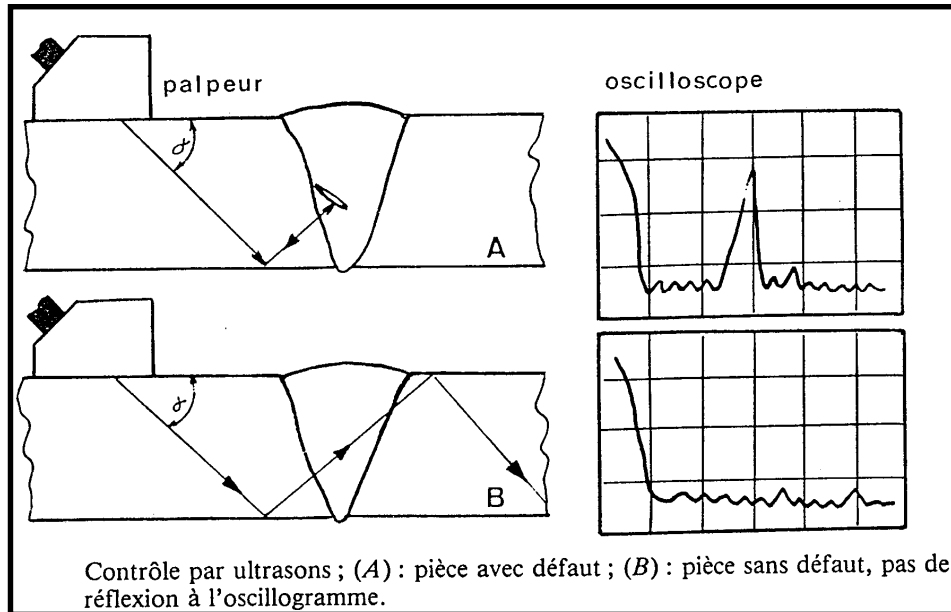
Les défauts apparaîtront sous forme de tâches claires sur fond noir, car les rayons n'auront pas été totalement absorbés par le matériau.

Si des inclusions planes et des discontinuités de faible épaisseur à direction orthogonale aux rayons sont présentes, elles sont difficilement décelables.

Le rayon gamma est moins coûteux à produire, mais l'image est de moins bonne qualité.

b- Contrôle par ultrasons :

Les ondes ultrasoniques sont envoyées dans la pièce par une sonde. Elles sont réfléchies par la surface de fond et renvoyées à la sonde qui les convertit en impulsions électriques visualisées sur un oscilloscope.



Si sur leur trajet elles rencontrent un défaut, celui-ci produira une réflexion et un écho qui parviendra à la sonde avant celui de fond.

Cette technique requiert un opérateur très expérimenté pour interpréter les résultats.

On choisira le type de contrôle en fonction de la qualité voulue pour le joint et du coût de la pièce.

3- Prévion et compensation des déformations :

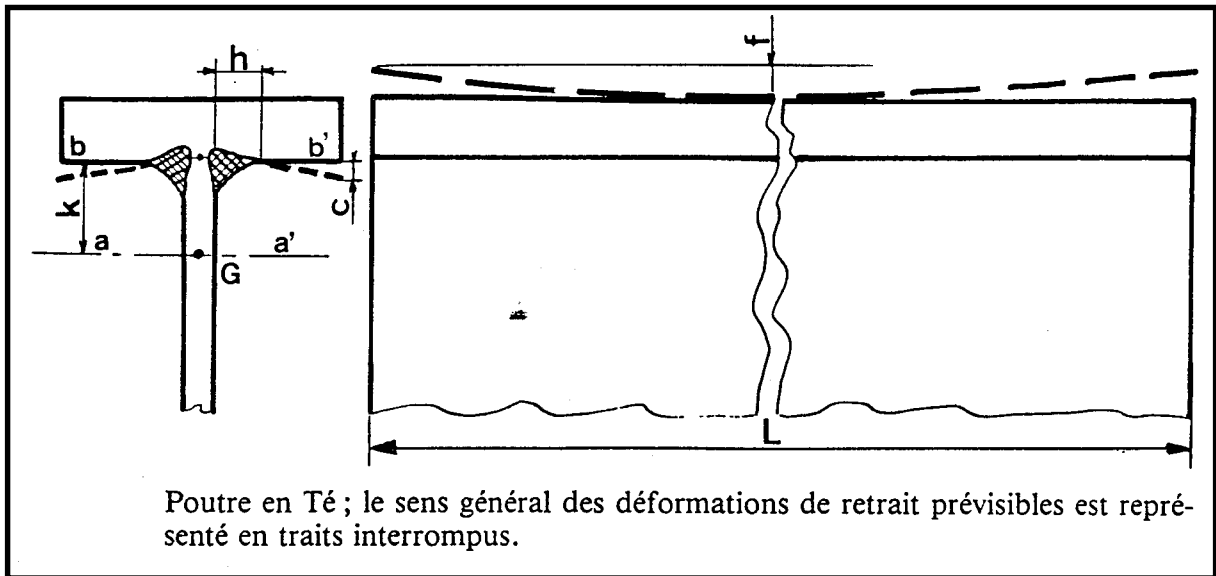
A- Prévion :

On peut prévoir le type et le sens général des déformations dans un ensemble soudé, grâce à des études des phénomènes de retrait.

Par exemple l'effet de pliage, de raccourcissement et de flèche.

Par contre, prévoir leur valeur est plus délicat, car elles dépend de nombreux paramètres: type de joint, énergie de soudage, etc...

Par exemple pour une poutre en T :



D'après A. PLUMIER, on peut définir l'effort longitudinal F_r en N.

$$F_r = 200 \cdot \eta \cdot \frac{U \cdot I}{V}$$

η : rendement de l'arc

V : vitesse de soudage en mm/min

U : tension en volts

I : intensité en ampères

A partir de cela on peut tirer la courbure longitudinale f en mm.

$$f = \frac{F_r \cdot K \cdot L^2}{8 \cdot E \cdot J}$$

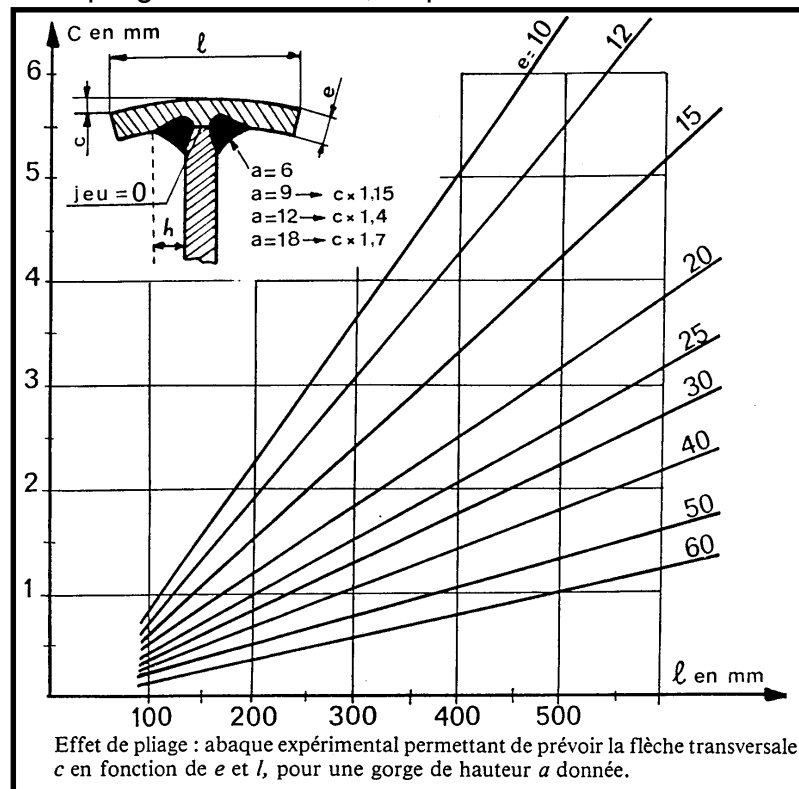
K : distance $aa'-bb'$ en mm

L : longueur du cordon en mm

E : module d'élasticité d'Young du matériau en N/mm^2

J : moment d'inertie de la section de la poutre en mm^4

Pour déterminer l'effet de pliage de la semelle, on peut utiliser la formule de BLODGETT.



Effet de pliage de la semelle (voir dessin de la poutre ci-dessus):

$$c = \frac{0,1915 \cdot l \cdot h^{1,3}}{e^2}$$

l : largeur de la semelle en mm

e : épaisseur de la semelle en mm

h : côté du cordon en mm

On peut aussi utiliser des abacques (voir courbes ci-dessus).

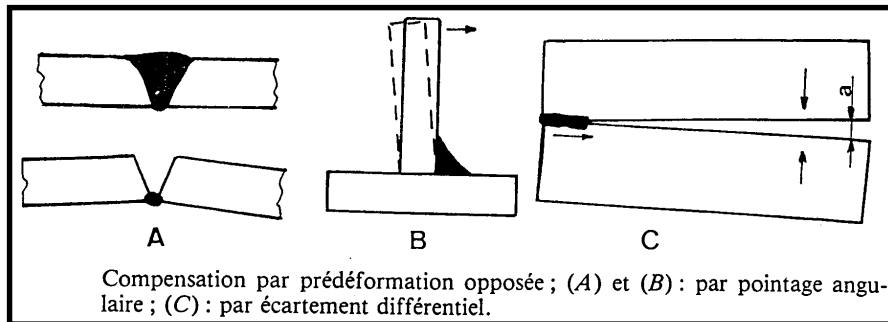
B- Compensation des déformations :

A chaque fois que c'est possible, il faut prévoir un dépôt simultané des différents cordons de soudure, pour équilibrer les déformations et parfois les annuler.

a- Avant le soudage :

Compensation par prédéformation opposée :

- pointage ou mise en position des pièces pour compenser rotation angulaire (1° par passe)
- écartement différentiel, pour obtenir parallélisme acceptable ($a = 0.5$ à 2% de la longueur à souder)

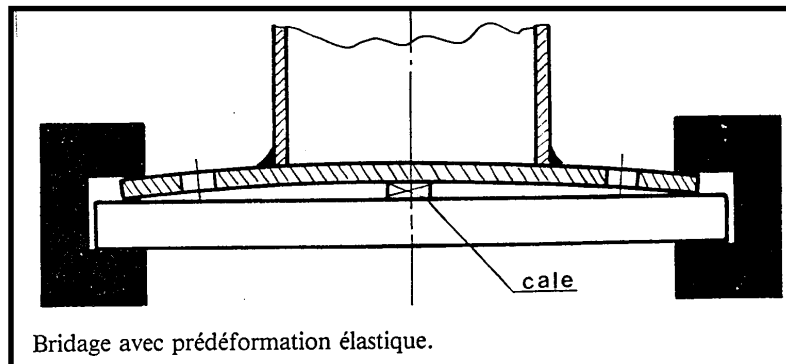


Compensation par bridage :

- maintenir solidement les pièces dans la position recherchée
- cela entraîne des contraintes résiduelles importantes, qui peuvent être nuisibles.

Compensation avec prédéformation élastique :

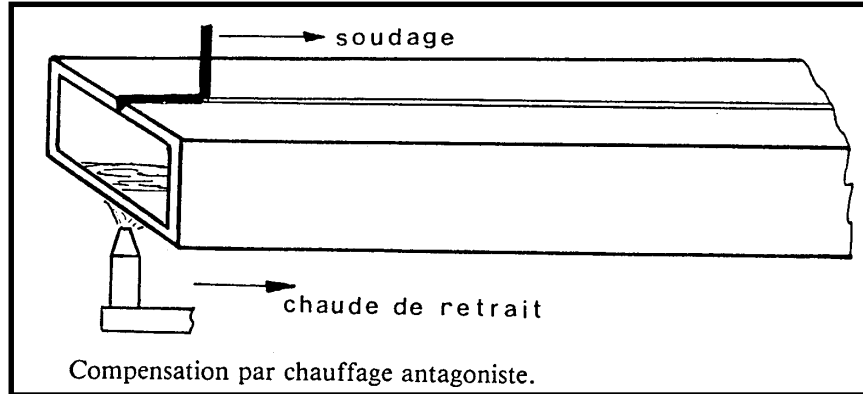
- la pièce subit une déformation élastique un peu inférieure à celle prévue après soudage
- les contraintes résiduelles sont moins importantes
- c'est une bonne solution.



b- Pendant le soudage :

Si les soudures sont symétriquement opposées, elles doivent être exécutées en même temps, pour équilibrer les déformations, si c'est possible.

Si ce n'est pas le cas, on pourra déplacer un chalumeau qui effectuera une **compensation par chauffe antagoniste**.



Sinon un choix judicieux de l'ordre dans lequel les soudures sont exécutées, permettra de limiter au maximum les déformations.

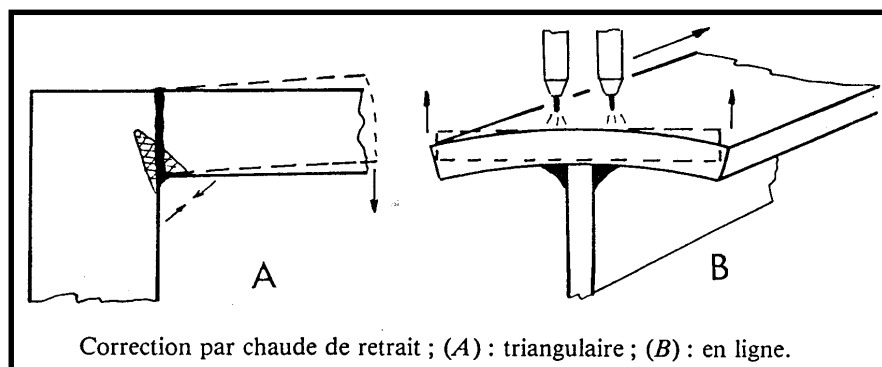
c- Après le soudage :

Correction par une action mécanique à froid:

- réalisée à la presse ou au marteau, on crée une déformation permanente qui compense celle due au soudage
- mais cela provoque un écrouissage des soudures et des zones proches, qui peuvent nuire à des soudures de qualité ou fortement sollicitées.

Correction par chauffe de retrait:

- c'est une chauffe rapide et localisée, qui permet d'obtenir un retrait du matériau aux endroits chauffés, après refroidissement
- mais cela entraîne de nouvelles contraintes résiduelles nuisibles.



4- Élimination des contraintes résiduelles :

Pour combattre les contraintes résiduelles, on fait subir à la pièce, après soudage, un traitement thermique.

A- Relaxation thermique :

Appelée aussi recuit d'égalisation ou revenu.

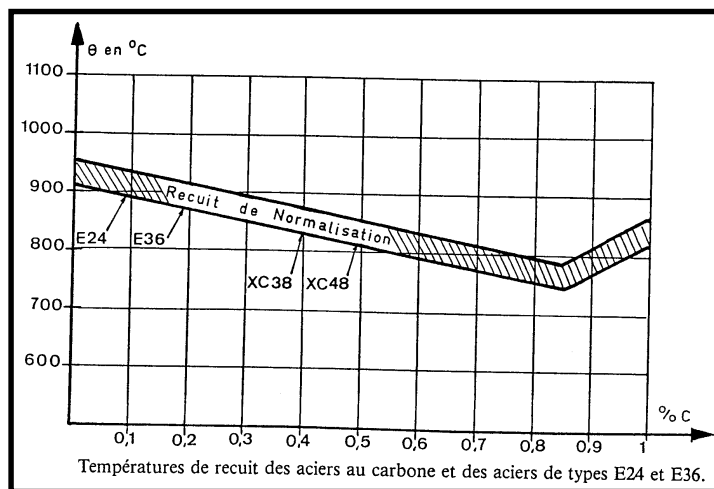
Il s'agit de chauffer la pièce dans un four, au-delà de 400°C, et au-dessous du point A_{c1} (limite inférieure d'épuisement élastique du métal à chaud).

On obtient la libération des contraintes résiduelles.

On fait un revenu des zones qui avaient subi une trempe .

B- Recuit de normalisation :

Réalisé avec une température supérieure ($\theta \geq A_{c3}$), on modifie la structure du joint soudé et du métal de base, grâce à un maintien dans la zone austénitique du matériau et à un refroidissement lent.



CONCLUSION

En résumé, on peut dire que le soudage est un procédé d'obtention de pièces brutes applicable à tous les matériaux, faisant appel à différentes sortes d'énergie, pouvant être exécuté en tout lieu pour certaines techniques, d'un prix de revient peu élevé.

Il est très répandu dans l'industrie sous toutes ses formes.

L'automatisation est simple et très utilisée, surtout pour les productions de masse (automobile, aviation).

Par contre il demande des ouvriers spécialisés, des protections spéciales et provoque des déformations importantes et des contraintes internes.