

## Module IV : Fabrications soudées

<b>I- Hygiène et Sécurité.....</b>	<b>2</b>
1) <i>Rôles du Comité d'Hygiène Sécurité et Conditions de Travail.....</i>	2
2) <i>Risques dus au soudage.....</i>	2
<b>II- Moyens de production – Montages .....</b>	<b>3</b>
1) <i>L'atelier.....</i>	3
2) <i>Gabarits et montages.....</i>	4
3) <i>Les positionneurs.....</i>	4
4) <i>Les câbles.....</i>	4
5) <i>Raccordements.....</i>	4
6) <i>Aspiration des fumées.....</i>	4
7) <i>Ajustage des joints / pointage des bords.....</i>	4
8) <i>Conditionnement des métaux d'apport.....</i>	4
<b>III- Qualité en soudage .....</b>	<b>5</b>
1) <i>La qualité.....</i>	5
2) <i>La norme NF EN ISO 3834.....</i>	6
3) <i>Le cahier de soudage.....</i>	8
4) <i>La Qualification des soudeurs (QS).....</i>	9
5) <i>Le QMOS.....</i>	10
<b>IV- Aspects thermomécaniques du soudage .....</b>	<b>12</b>
1) <i>Rappels.....</i>	12
2) <i>Contraintes thermiques.....</i>	13
3) <i>Evolutions des contraintes thermiques.....</i>	13
4) <i>Formes élémentaires de retrait en soudage par fusion.....</i>	15
5) <i>Répartition des contraintes en bout à bout.....</i>	16
6) <i>Prévisions de déformation.....</i>	16
7) <i>Compensation de déformation.....</i>	16
<b>V- Traitement thermique et mécanique des soudures.....</b>	<b>17</b>
1) <i>Transformation en ZAT.....</i>	17
2) <i>Hydrogène.....</i>	17
3) <i>Relaxation de contraintes.....</i>	17
4) <i>Conséquences métallurgiques des TTh.....</i>	18
<b>VI- Contrôle non destructifs .....</b>	<b>18</b>
1) <i>Le ressuage.....</i>	18
2) <i>Magnétoscopie.....</i>	19
3) <i>Radiographie.....</i>	21
4) <i>Ultra sons.....</i>	22
5) <i>Comparaisons des procédés.....</i>	23

## I- Hygiène et Sécurité

### 1) Rôles du Comité d'Hygiène Sécurité et Conditions de Travail.

Assure la protection, l'analyse, promotion et inspection.

Protection individuelle et collective.

Obligatoire dès que > 49 salariés

Constitué par :

- Le chef d'établissement
- Des salariés (secrétaire et membres)
- Un expert extérieur dans le cas d'une étude d'un nouveau dispositif par exemple

### 2) Risques dus au soudage

Risques	Causes	Préventions
<b>Gaz et fumées</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fumées toxiques: mélange d'éléments de produits d'apport volatilisés (Zn, Mn, Cr), gaz de protection, solvants (trichloréthylène), graisses ou revêtement sur toles, laitier ou flux en brasage.</li> <li>- <b>Risque d'inhalation</b> --&gt; atteinte des poumons, allergies, cancers.</li> </ul> <p>Exemples:  <u>Vapeur nitreuse</u> (enrobages O A et R): oedème du poumon.  <u>Oxydes de cadmium</u> (troubles pulmonaires, rénaux), oxydes de Zn (fièvre), fumées issues de la fusion des flux (fluorures --&gt; irritation aiguë des muqueuses et voies respiratoires).  <b>CO<sub>2</sub> est toxique.</b>  <b>Risques liés au dégraissage</b> des pièces: effets narcotiques ou empoisonnement chronique lié à l'utilisation de solvants (dérivés chlorés organiques, trichlo pe). Protection des yeux vis à vis des solutions alcalines.  <b>Risques liés à la manutention</b> des produits chimiques et des flux (gants, lunettes).  <b>Risque d'explosion:</b> acétylène, hydrogène (explosifs avec l'air). Manipulation des bouteilles avec précaution.  <b>Risque d'inflammation</b> ou de combustion accélérée par enrichissement de l'air en O<sub>2</sub> (en SOA pe).  <b>Risque lié à l'arc:</b> émission d'ozone --&gt; piqure du nez et des yeux, irritation des muqueuses.  <b>Risques liés aux gaz de protection:</b> caractère asphyxiant.            Ar , He et CO<sub>2</sub> n'entretiennent pas la vie. Ar + lourd que l'air, He + léger que l'air.            En dessous de 18% O<sub>2</sub> anoxie/ asphyxie --&gt; malaises, troubles respiratoires</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ventilation individuelle et collective. Aération forcée si naturelle et insuffisante.</li> <li>- Aspiration à la source (<b>captation fumées : valeur moyenne 7 à 11 m<sup>3</sup>/min</b>).</li> <li>- Eviter le travail en des endroits confinés ou port d'1 masque respiratoire.</li> </ul>
<b>Rayonnements</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Infra-rouge:</b> larmes, maux de tête, cataracte si répété (phéno lent et cumulatif).</li> <li>- <b>Ultra violets:</b> coup d'arc (conjonctivite), coup de soleil (brûlure).</li> <li>- <b>Lumière visible:</b> éblouissement. Risques de lésions de la rétine.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- EPI: masque avec filtre (<b>classé en échelon en fonction de l'intensité du soudage</b>, du procédé).</li> <li>- Filtre automatiques réglables (à cristaux liquides).</li> <li>- Ecrans, rideaux ou paravents pour rayonnements autres que UV.</li> <li>- Peintures des murs réfléchissant peu les UV (mates).</li> </ul>

<b>Brulûres</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Risques de brûlures: par contact avec pièces chaudes, par projections (en cours de soudage ou en cours de décrassage), par flamme (SOA), par rayonnement UV.</li> <li>Inflammations accidentelles: sciures grasses, vêtement gras en contact avec O<sub>2</sub>.</li> <li>- Explosions: mélange air/hydrocarbure, vidange de réservoir.</li> <li>- Déshydratation: réflexe, hypotension</li> </ul>	<b>EPI:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- vêtements incombustibles (en coton)</li> <li>- manches longues, col fermé</li> <li>- Gants en cuir.</li> <li>- Tablier</li> <li>- guêtres</li> <li>- manchette</li> <li>- cagoule</li> <li>- Lunettes pour meulage</li> </ul>
<b>Electricité</b>	<p>Le courant continu "repousse" → risques de brûlures, choc voire chute si travail en hauteur. 0,1 A est mortel.</p> <p>Le courant alternatif "attire" → paralyse la victime (agit sur le système nerveux), troubles cardiaques. Intensité mortelle &lt;&lt; 0,1 A</p> <p><b>Danger</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 25mA en alternatif</li> <li>- 50 mA en continu</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Eviter les contacts directs ou indirects.</li> <li>- Augmenter la résistance de l'interface entre conducteur et soudeur.</li> <li>- Mettre 1 disjoncteur différentiel.</li> <li>- Masses métalliques et conductrices doivent être à la terre.</li> <li>- Vérifier l'isolation des conducteurs.</li> <li>- Mettre le porte-électrode ou torche dans 1 boîte isolante.</li> <li>- Gants isolants, chaussures en élastomère.</li> </ul>
<b>Bruit</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- risque de surdité à la longue. &gt; 85 dBA.</li> <li>- Fatigue anormale, irritabilité, stress, maux de tête.</li> </ul> <p>Ex: découpe plasma hors table à eau, procédé arc-air</p>	<b>EPI :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- bouchons anti bruit, casque</li> <li>- surveillance auditive</li> </ul>
<b>Ergonomie</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Si mal adapté risques accrus (fatigue en fin de journée --&gt; accident du travail).</li> <li>- Eclairage, manutention, rangement, propreté.</li> <li>- Vérif et entretien du matériel.</li> </ul>	Eclairage, viser <b>environ 300-350 Lux</b>

## II- Moyens de production – Montages

### 1) L'atelier

#### a. Contraintes et caractéristiques d'un atelier

Pour le choix d'un atelier, il faut tenir compte :

- Dimension et géométrie
- Portée maximum et minimum
- Etude de l'environnement
- Massif de supportage (hauteur sous crochet)
- Fosses
- Ouvrants
- Accès des locaux (ferroviaire, fluvial)
- Situation géographique
- MO régionale
- Zone franche
- Tissu industriel local
- Analyse des sols

#### b. Phases de fabrication d'un atelier

Il faut prévoir plusieurs espaces pour :

- Traçage
- Mise à dimension (coupage, débit,...)
- Grenailage, décapage,   bavurage
- Dressage, redressage
- Mise en forme (formage, pliage, cintrage,...)
- Soudage
- Redressage, calibrage
- Contrôle de soudage
- TTh, passivation, décapage
- Finition, parachèvement

c. Activités connexes

Point de vue administratif, formation, stockage

**2) Gabarits et montages**

Ils doivent répondre :

- Exigences économiques
- Evacuation, mise en position
- Respect dimensionnel
- Accessibilité des joints
- Ergonomie, sécurité (fumées)
- Inertage
- Pollution (contact nuance)
- Maintenance (étalonnage, suivi d'indice)

**3) Les positionneurs**

Servent à mettre la pièce en position

**4) Les câbles**

Electrique, si > 50 m augmenter la section fil

**5) Raccordements**

- Eau
- Gaz
- Electrique
- Air comprimé

**6) Aspiration des fumées**

Type de dispositifs :

- Lié à l'outil → torche ventilée
- Masque ventilé
- Cabine de soudage
- Table aspirante
- Aspiration localisée mais mobile

**7) Ajustage des joints / pointage des bords**

2 types :

- Les « faits maisons »
  - o Serre-tôles
  - o Serre-joints
  - o Serre-tubes
  - o Pincés de serrage
  - o Clames soudées (Chicago bridge)
  - o Vérins
  - o Brides
  - o Coins
  - o Etaux
- Les commerciaux  
Vendus tout fait

**8) Conditionnement des métaux d'apport**

Prévoir un espace de stockage des matériaux d'apport en fonction de leur matière

- Etiquetage
  - o Composition chimique
  - o Diamètre, largeur, quantité
  - o Normalisation (ENS, BS, DIN, NF, ISO, AWS (la plus utilisée car plus courte → peu de chiffres)
  - o Propriétés mécaniques
  - o Position de soudage
  - o N° coulée, de lot
  - o  $U_2, I_2$
  - o  $U_0$

### III- Qualité en soudage

#### 1) La qualité

a. Qu'est que la qualité

C'est l'aptitude du produit à satisfaire le client

Elle est indispensable

C'est l'affaire de tous

Pour obtenir la satisfaction du client :

- Respect des délais
- Respect des prix
- Respect de la qualité
- Amélioration de la qualité

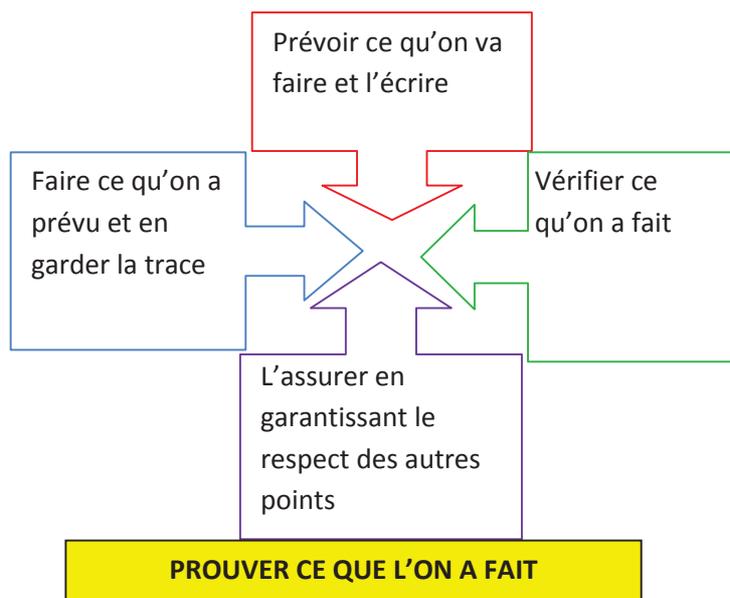
b. L'entreprise doit :

- Avoir une politique qualité
- Gérer sa qualité
- Pratiquer l'assurance qualité

c. Le Plan d'Action Qualité (PAQ)

- Gestion de la qualité
  - o Instruction de travail
  - o Procédures de fonctionnement
- Management de la qualité
  - o Maitrise Qualité (MQ)

d. Règle de base d'élaboration d'un système qualité



e. Historique

Apparue dès 1940, et depuis 1988, un organisme extérieur (bureau de contrôle) indépendant (tierce partie) **certifie l'entreprise à partir de référentiels AQ (normes NF/EN/ISO)**

f. La certification

**C'est le moyen d'attester l'aptitude d'un service, d'un produit ou d'un système à être conforme aux exigences d'un client.**

Les systèmes connus :

- ISO 9000 → terminologie et définition
- ISO 9001 → Exigences
- ISO 9004 → Lignes directrices

Les organismes :

Les organismes sont propres à chaque pays, mais il n'est pas obligatoire de choisir l'organisme national. On trouve :

- AFAQ (France)
- DQS (Allemagne)
- BS (GB)
- AGA (USA)
- ...

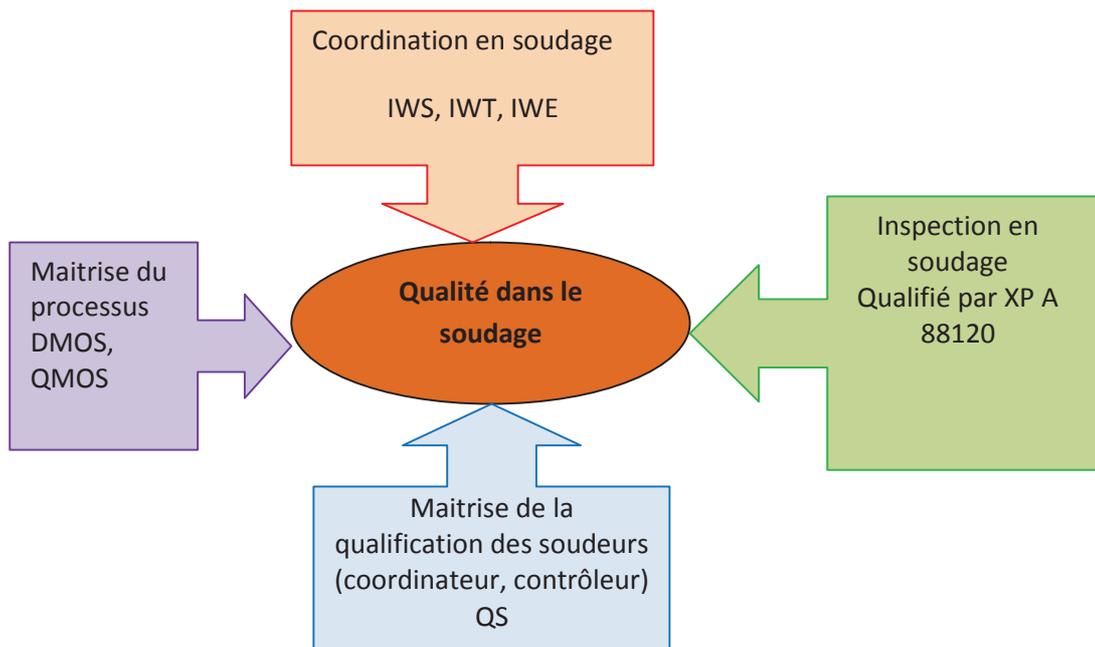
g. Qu'apporte l'AQ ?

- La rigueur
- La garantie d'organisation
- Des documents, traçabilité
- Transparence et communication
- Discipline
- Amélioration de la compétence du personnel
- La **SATISFACTION** du **CLIENT**

h. Devoir du chef d'entreprise

- Définir les moyens à mettre en œuvre pour satisfaire les besoins du client
- Former le personnel à l'AQ
- Obtenir et entretenir la collaboration du personnel
- Savoir définir les indicateurs, gérer les non conformités et avoir le souci permanent d'amélioration de la qualité

i. Intégration de la qualité dans le soudage



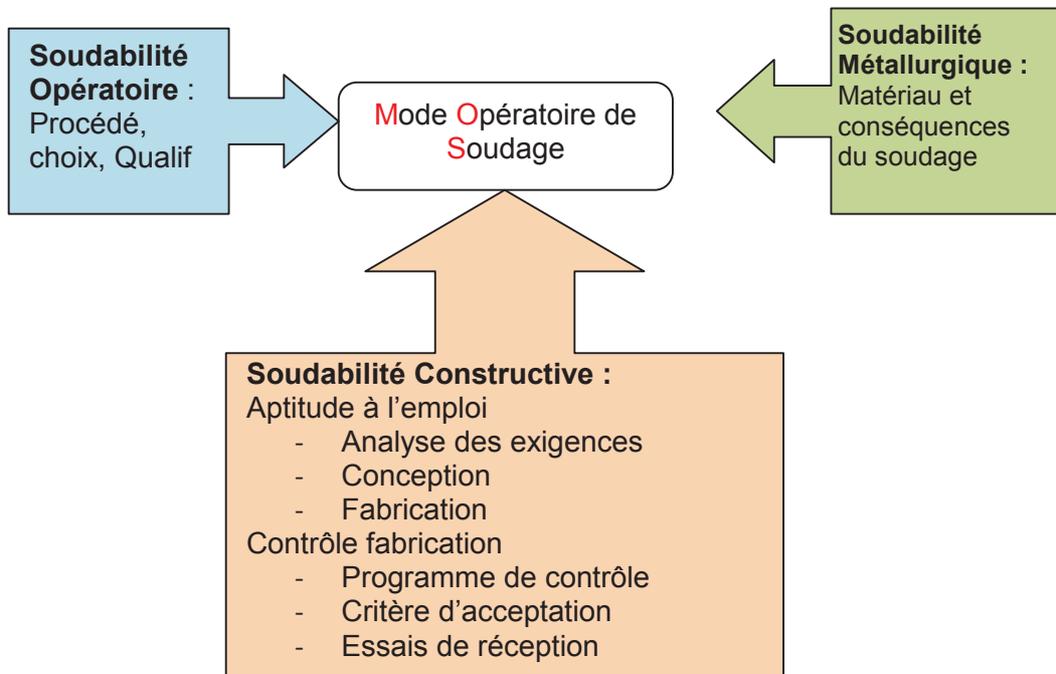
**PROUVER CE QUE L'ON A FAIT → CAHIER DE SOUDAGE**

## 2) La norme NF EN ISO 3834

L'ISO 9000 est fondée sur l'amélioration d'un processus, le **soudage est considéré comme un procédé spécial**, d'où le rattachement à l'ISO 3834.

a. Situation du Mode Opérateur de Soudage

Le mode Opérateur de soudage peut être situé suivant le schéma ci-dessous :



b. Le Système de Management de la Qualité

Il n'est pas nécessaire d'être ISO 9001 pour obtenir la certification ISO 3834

La norme ISO 3834 est applicable aux entreprises ne possédant de système de management de la qualité.

c. ISO 3834

i. 6 parties

- 3834-1 → Généralités
- 3834-2 → Qualité complète
- 3834-3 → Qualité normale
- 3834-4 → Qualité élémentaire
- 3834-5 Référentiel documentaire
- FD ISO CR 3834-6 → lignes directrices pour la mise en application

Les différentes parties se différencient suivant le niveau de qualité, la complexité de l'assemblage et du produit et de la qualité que l'on en souhaite. Par exemple, si le produit ne présente pas de risques en sécurité ou contre l'environnement la partie 4 suffira.

ii. 22 critères

Suivant la partie de la norme utilisée (2, 3 ou 4) l'exigence des critères diminue.

Les critères :

- Revue des exigences → exigée dans tous les cas – documents exigés en 2
- Revue technique → exigée dans tous les cas – documents exigés en 2
- Sous-traitance
- Soudeur et opérateur en soudage → qualification exigée
- Personnel de coordination soudage → exigé en 2 et 3
- Personnel chargé des contrôles et essais → qualification exigée dans tous les cas
- Equipement de fabrication et essais → accent important sur la sécurité
- Maintenance de l'équipement → nécessaire pour la conformité du produit en 2 et 3
- Liste du matériel → exigée en 2 et 3
- DMOS → exigés en 2 et 3
- QMOS → exigés en 2 et 3
- Contrôle par lot des consommables
- Stockage et manipulation des consommables
- Stockage du matériau de base
- TTh après soudage
- Contrôle et essais avant, pendant et après le soudage
- Non-conformité et actions correctives
- Etalonnage et validation du matériel de mesure, contrôle et d'essai
- Identification durant le processus
- Traçabilité
- Enregistrement qualité

d. Le coordinateur de soudage

**Définition relative à ISO 14731 : tâches et responsabilité du coordinateur de soudage**

Le coordinateur de soudage a pour fonction de suivre et faire appliquer les 22 critères de la norme ISO 3834.

3 groupes de connaissances :

Connaissances complètes → IWE

Connaissances spécifiques → IWT

Connaissances de base → IWS

Le diplôme d'IW n'est pas obligatoire, mais le coordinateur de soudage doit répondre aux exigences selon **DOC IAB 252**.

S'il n'existe pas de diplôme au coordinateur → interview professionnel reposant sur :

- Les connaissances
- L'expérience
- Les compétences du coordinateur

Si l'interview est positif → reconnaissance du coordinateur

L'annexe B de la norme ISO 14731 décrit en détail et explique les tâches du coordinateur.

### 3) Le cahier de soudage

Le cahier de soudage est un document d'AQ qui :

- Prouve la compétence de l'entreprise au travers de son savoir faire
- Montre que l'entreprise a respecté le cahier des charges.

a. Qui en détermine le contenu

- Le code de construction : CODAP, RCC-M section s
- Le donneur d'ordre
- Par les règles de l'art

b. Le contenu

Le contenu découle des ERQ de la norme NF EN ISO 3834, et contient :

- PV de revue de contrat
- Certificats matière
- QS et qualification opérateur
- Qualification personnel pour les CND
- Enregistrement TTh
- Procédures rapport des essais destructifs et END
- Rapports de contrôle dimensionnels
- PV des réparations et rapport de conformité

c. Dans les règles de l'art

Le cahier des charges doit contenir :

- Identification
  - Avec coordonnées du fabricant
  - La désignation (n° de nomenclature) du ou des composants relatifs au cahier des charges
  - Le n° de commande
  - Un cartouche de révisions
  - L'approbation du client
- Signatures, rédacteur, vérificateur, approbateur
- Contenu minimum
  - o Plan détaillé de toutes les soudures
  - o Les DMOS
  - o Liste des END réalisés
  - o Les QMOS
  - o Liste des soudeurs
  - o Liste des produits d'apport
  - o Etat et résultats des contrôles et essais

On peut trouver également :

- o PV des matériaux
- o Compte rendu des END
- o TTh
- o Compte rendus essais destructifs

#### 4) La Qualification des soudeurs (QS)

##### a. Le soudeur

On regardera ses qualités physiques, morales, techniques, son mode de vie et son habilité

##### b. Documents applicables

- Pour les aciers : EN 287-1/A2
- Pour les alu : EN ISO 9606 partie 1
- Pour les cuivre : EN ISO 9606 partie 2
- Pour les nickel : EN ISO 9606 partie 3
- Pour les Ti et Zr : EN ISO 9606 partie 5

##### c. Variables essentielles

Procédé de soudage	1 épreuve = 1 procédé	Sauf 135 et 136
Type de produit	T= tube P = tôles	Si $\Phi > 25$ mm → tôle Tube à $\Phi \geq 150$ mm en PA, PB, PC Tube à $\Phi \geq 500$ mm en PF
Type de soudure	BW → bout à bout FW → angle	Groupe de matériau selon 15608 1 type de matériau peut en couvrir plusieurs autres (ex 7 → 1.1 à 7 + 9.1 et 11)
Produit consommable	QS avec métal d'apport → QS sans métal	
Dimensions	Règle d'épaisseur en fonction BW ou FW Diamètre du tube	
Positions de soudage	Verticale bas : PA = à plat 45° bas : PB = corniche PC = horizontale 45° plafond : PD = Horizontale plafond Verticale plafond : PE = Plafond PF = montante PG = descendante HL-045 JL-045	En fonction d'un joint, si un joint est plus facile alors → QS sur ce joint
Détail sur le soudage	BW pleine pénétration : ss nb : 1 côté sans latte support ss mb : 1 côté avec support bs : 2 côtés	Si ssnb → toutes conditions
	FW sl : 1 couche ml : plusieurs couches	Si ml → toutes conditions Gorge a entre 0,5 et 0,7 épaisseur

##### Remarque :

Les qualifications en épaisseurs, procédés et positions peuvent être jumelées par 2. Ce n'est pas le cas des matériaux

##### d. Contrôles, examens et essais

- Fait en présence d'un examinateur
- Forme et dimensions des pièces → gorge entre 0,5 et 0,7 fois épaisseur

##### e. Méthode de contrôles

Les contrôles diffèrent selon le type de joint réalisés FW ou BW en tube ou tôle

	P BW – T BW	P FW – T FW - P
Visuel (EN 970)	Obligatoire	Obligatoire
Radiographique (EN 1435)	Obligatoire	Non obligatoire
Pliage (EN 910)	Obligatoire	Non obligatoire
Texture (EN 1320)	Obligatoire	Obligatoire

##### f. Durée de validité

**Validité 2 ans**, à partir de la date de soudage (si contrôle acceptable)

Confirmation à faire tous les 6 mois par le coordinateur de soudage

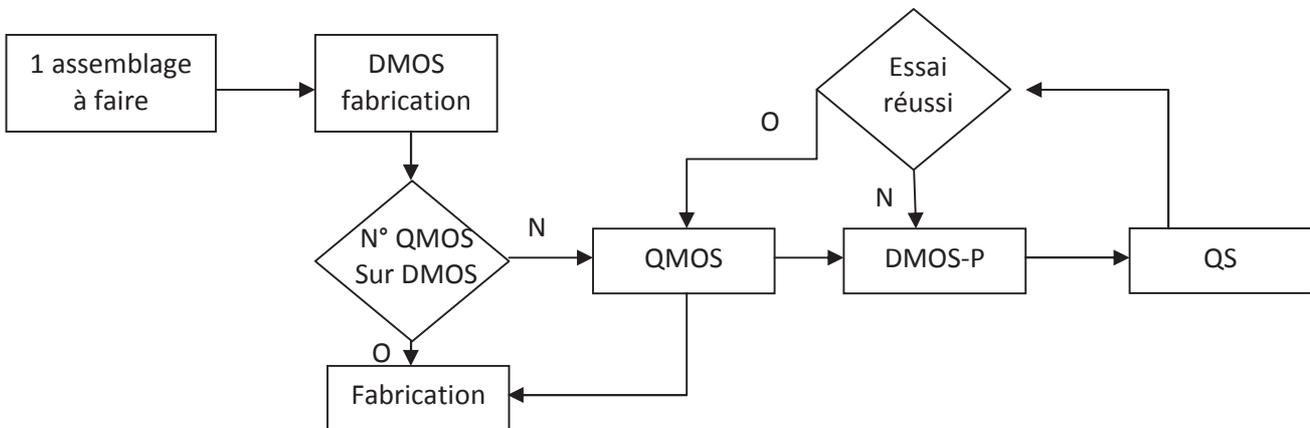
Prolongation tous les 2 ans au vu des preuves et enregistrement du soudeur

g. Autres alliages

- Alu :  
Idem que acier mais,  
Procédés 141, 131 et 15  
Groupe matériaux : 21 alu pur ; 22 alu sans TTh ; 23 alu avec TTh  
Règles épaisseurs différente en BW
- Cuivre  
Idem acier mais,  
Procédé 111, 131, 141, 15, 311  
Matériaux : (selon CR 1237) W31 Cu pur ; jusqu'à W36 Cu-Ni-Zn  
Règles épaisseur différentes en BW
- Nickel  
Idem acier mais,  
Groupe matériaux : (selon CR 1237) W41 Ni pur jusqu'à W47 Ni-Fe-Cr-Cu
- Titane et Zirconium  
Idem acier mais,  
Procédés 131, 141, 15  
Matériaux, en Ti 51, 52, 53, 54 – en Zr 61, 62  
Qualif sur P et T en BW et FW

5) Le QMOS

a. Quand a-t-on besoin d'un QMOS



b. Normalisation

Le QMOS repose sur une série des normes NF EN ISO :

- 15607 → Grandes lignes
- 15608 → Classification matériaux
- 15609 → Ecriture DMOS
- 15610 → Utilisation de consommable
- 15611 → Basée sur l'expérience
- 15612 → basé sur un QMOS standard
- 15613 → basé sur un assemblage soudé
- **15614 → QMOS / épreuves**

c. Règles générales DMOS (selon NF EN ISO 15607)

Ils sont indispensables pour avoir une base et obtenir une qualité de soudage

On crée d'abord un DMOS-P et les qualifications servent à vérifier qu'il n'y a pas d'altérations métallurgiques et on contrôle les imperfections (CND)

Remarque : 90% des DMOS sont fait en 15614, 8% en 15613 et le reste pour les autres normes

d. Le DMOS (selon 15609)

- 1 DMOS → 1 soudure
- 1 DMOS → 1 type d'assemblage
  - o Contenu d'un DMOS
    - Cartouche d'identification du soudeur, du procédé,...
    - Schéma de préparation et plan de passe
    - Tout ce qui concerne la soudure, métal d'apport, référence, ...
    - Cartouche de signatures

Il peut être réalisé :

- Par rapport au fabricant
- Par rapport au matériau de base
- Commun à tous les modes opératoires
- Autres spécificités

e. Le QMOS (selon NF EN ISO 15614)

NF EN ISO 15614 : Epreuve de qualification d'un **mode opératoire de soudage à l'arc et aux gaz des aciers** et soudage à **l'arc des Nickel** et alliages de nickel

- Concerne tous les procédés à l'arc et soudage oxyacétylénique (311)
- DMOS réalisé selon 15609
- Epreuves représentatives de la fabrication et QS selon 287-1
  - a. Type d'assemblage
- Formes et dimensions
  - o Taille suffisante pour bon écoulement chaleur
  - o Dimension selon norme et cas de figure : BW, FW, T ou P
  - o Epaisseur et diamètres selon norme 15614  
Attention valeur diamètres changent par rapport à 287-1 (D au lieu de 0,5 D)
- b. Soudage de l'assemblage

Il est réalisé selon DMOS-P

Si pointage dans l'assemblage final → il fait partie de l'essai

c. Contrôle et essai

Ils sont réalisés sous la surveillance d'un examinateur.

Suivant le type d'assemblage (FW, BW, P ou T), la norme impose les essais à réaliser. Dans tous les cas, le contrôle visuel à 100 % est obligatoire.

Le positionnement des éprouvettes d'essais est défini par la norme

4 CND :

- Ressuage
- Magnétoscopie
- Radiographie
- US

d. Essais destructifs

- Essai de traction (selon NF EN 895)
  - o  $R_m > R_m$  métal de base – si hétérogène > au plus faible
- Essai de pliage (selon NF EN 910)
  - o Pliage à 180° - mandrin 4. Epaisseur – pas de défaut > 3 mm
- Essai de flexion par choc (selon NF EN 875)
  - o Epaisseur entre 12 et 50 mm
  - o En ZAT, mdb et ZF
  - o Si épaisseur plus faible KV dans tous les produits
- Essai de dureté (selon NF EN 1043-1)
  - o 3 empreintes dans chaque zones Mdb, 2 ZAT et ZF
- Examen macrographique (selon NF EN 1321)
  - o Visualisation des différentes zones avec au moins une photo
- Contre essais
  - o Si 1 des essais pas bon → contre essais ; si toujours pas bon → modification DMOS-P

e. Domaine de validité

- Chaque entreprise dispose de ses propres QMOS / DMOS
- Une qualification par type de matériaux (suivant tableau des QS 287-1)
- La norme 15614 définit les épaisseurs des matériaux et propres diamètres (attention petit changement)

Le QMOS est lié par le QS et DMOS-P : le procédé (ou multi procédé), position soudage, type d'assemblage, indications des métaux d'apport (gaz).

- Type de courant
  - o Le CA qualifie le CC en 111

Le QMOS est étroitement lié au DMOS

- f. Variante des procédés
- 12 :
  - o Chaque variante doit être qualifiée
- 131, 135, 136, 137
  - o Même gaz que l'essai
  - o Même système de fil
  - o Transfert par CC qualifie CC
  - o Qualification PA ou GG qualifie le procédé
- 141 :
  - o Même type de gaz endroit et envers que pendant essai
  - o Sans gaz envers qualifie avec gaz envers
  - o Soudage avec métal d'apport ne qualifie pas sans
- 15 :
  - o Soudage avec métal d'apport ne qualifie pas sans
  - o Pas de changement de gaz plasmagène autorisé
- 311 :
  - o Soudage avec métal d'apport ne qualifie pas sans
  
- f. Autres normes
- Arc sur alu 15614-2
  - o Basés sur 15614-1
  - o Procédé 131, 141 et 15
- EN ISO 15610 : en fonction des produit consommables
  - o Acier groupe 1.1 et 8.1
  - o Alu 21, 22.1 et 22.2
  - o Epaisseur de 3 à 40 mm
  - o Gorge  $\geq 3$  mm
  - o Diamètre  $\geq 25$  mm
  - o Procédés 111, 114, 131, 135, 136, 137, 141, 15, 3
  - o Pas d'exigence de KV, HV, d'apport de chaleur, T° passes, TTh
  - o Le fabricant limite les positions de soudage, type de courant, polarité, gaz
  - o MOS Limité dans le temps d'agrément des produits
- EN ISO 15611 : sur l'expérience
  - o Expérience soudage doit être montrée
    - Par essais de soudage
    - Sommaire de fabrication sur 1 an
    - Aptitude en service des soudures (5 ans)
  - o Validité suivant 15614
  - o Durée tant que production du soudage dans le domaine validé
- EN ISO 15612 : par rapport à MOS standard
  - o Tous procédés
  - o Acier groupe 1.1, 1.11 et 8
  - o Examens et essais conforme à 15614
  - o Supervision par personnel compétent
  - o Qualité selon 3834
  - o QS 287-1
- EN ISO 15613 : assemblage soudé de préproduction
  - o Tous procédés
  - o Validité selon 15614

#### IV- Aspects thermomécaniques du soudage

##### 1) Rappels

En courbe de traction, la limite Re (ou Rp 0,2%) délimite la déformation élastique de la déformation plastique. En déformation plastique, on parle de consolidation par écrouissage.

Le Re et le module de Young E diminuent avec la température. Ils deviennent négligeables à partir de 600°C.

En traction pure, dans le domaine élastique, les déformations transverses sont :

$$\varepsilon_y = \varepsilon_z = -\nu \varepsilon_x$$

##### a. Déformations thermiques

Au cours d'un chauffage, le matériau se déforme et on a  $\Delta L = \alpha \Delta T$

Où  $\alpha$  est le coefficient de dilatation.

On parle, alors, de plasticité de dilatation (sans changement de phase) et de plasticité de transformation (si allotropique).

## 2) Contraintes thermiques

a. Bridage uni axial

$$\epsilon_{\text{mécanique}} + \epsilon_{\text{thermique}} = 0 \text{ et on a } \sigma_x = E \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

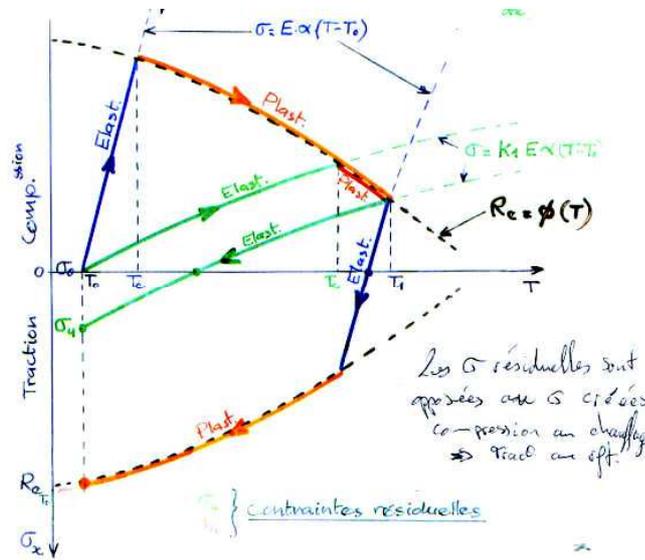
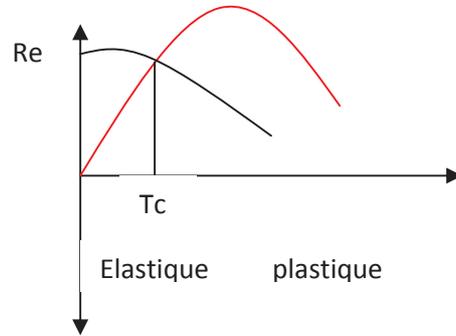
b. Bridage bi axial

$$\sigma_r = \sigma_\theta = E \cdot \alpha \cdot \Delta T / (1 - \nu)$$

## 3) Evolutions des contraintes thermiques

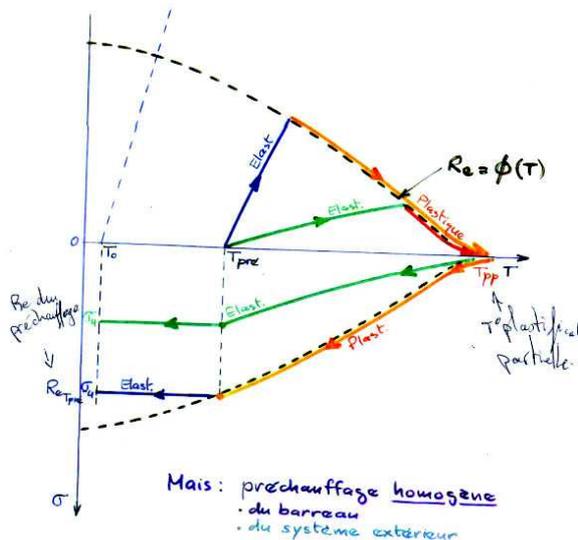
A partir d'une certaine température, le métal atteint  $R_e$  et subit une déformation plastique.

Dans le cas d'un acier (type S235), une élévation de  $100^\circ\text{C}$  conduit à atteindre cette limite. En bi axial, la température est de  $70^\circ\text{C}$ . calcul suivant les formules de 2).



Les contraintes résiduelles sont toujours opposées aux contraintes qui les ont créées : Une contrainte en compression implique une contrainte résiduelle en traction et inversement

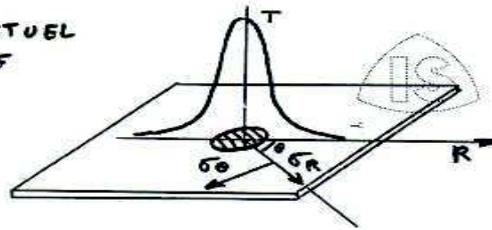
a. Influence du préchauffage



Le préchauffage permet de diminuer les contraintes résiduelles (-10 à 20%)

b. Chauffage hétérogène

CHAUFFAGE PONCTUEL  
D'UNE PLAQUE

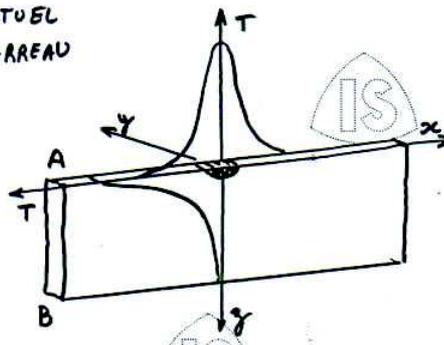


Au chauffage	Au refroidissement
<p>Chauffage</p>	<p>Refroidissement</p>
<p>La zone centrale se trouve en compression jusque <math>R_e</math>, bridée par la périphérie froide La zone périphérique en compression et traction</p>	<p>Effet inverse au refroidissement, car zone centrale bridée par la périphérie</p>

Si la plaque est trop mince, phénomène de voilement (flambage)

c. Chauffage d'un barreau

CHAUFFAGE PONCTUEL  
DU CHANT D'UN BARREAU



- Le champ A est en compression (bridé par B)
- La zone centrale se trouve en traction
- Le champ B en compression (équilibre du système)
- La cambrure se trouve vers A (∩)
- Au refroidissement, inversion des contraintes et de la cambrure (∪)

d. Répartition thermique sans contrainte

Règle fondamentale :

Le chauffage en respectant un gradient de température constant selon 3 directions principales n'introduit aucune contrainte thermique dans un matériau isotrope : **anamorphose**

#### 4) Formes élémentaires de retrait en soudage par fusion

##### a. Forme élémentaire de retrait

L'importance de la zone plastifiée dépend :

- De la puissance spécifique de la source
- De la diffusité thermique
- De la rigidité de la pièce

Au refroidissement, la contraction de la zone plastifiée est différente dans la direction longitudinale et transversale.

##### b. Dans la direction longitudinale

En l'absence de préchauffage, l'entrave à la contraction est fort et systématique, il en résulte :

- Un niveau de contrainte élevé
- Une déformation faible ( $R_L$ )

##### c. Dans la direction transversale

L'entrave à la contraction transversale dépend :

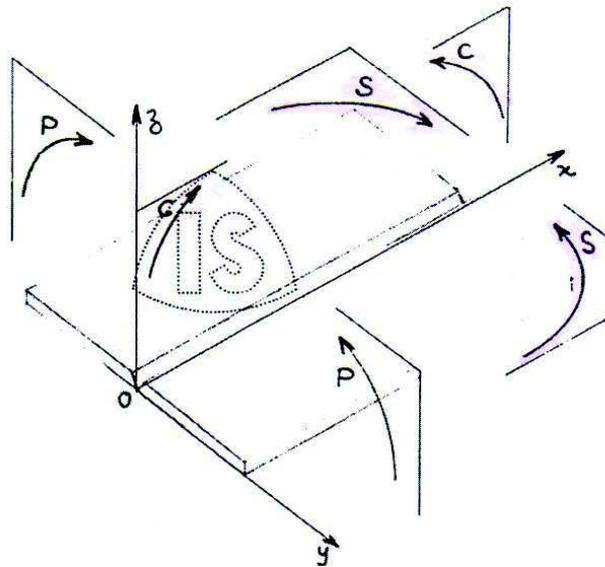
- De l'épaisseur :
  - o Minces, peu diffusant  $\rightarrow$  autobridage faible  $\rightarrow$  contraintes faibles  $\rightarrow R_T$  faible
  - o Epais, grande dimension, plusieurs passes  $\rightarrow$  autobridage fort  $\rightarrow$  contraintes élevées  $\rightarrow R_T$  élevé (par le fait du cumul des passes)
- De la vitesse de déplacement
- Raideur des éléments

##### d. Dans l'épaisseur

Important pour les fortes épaisseurs à haute puissance spécifique (type FE)

Autobridage élevé  $\rightarrow$  contraintes maxi à cœur  $\rightarrow R_E$  faible

Déformations élémentaires bout à bout :



3 rotations :

- Effet de pliage P

C'est une rotation autour de l'axe longitudinal

Il dépend d'une mauvaise préparation des bords, de la forme de la ZF et de la cinétique du refroidissement

Il est visible en multipasse avec chanfrein en V. Peu visible en monopasse

- Effet de serrage S

Rotation // au cordon

Il est positif (le plus courant) en resserrage des bords et négatif en écartement des bords

- Effet de cintrage

Flexion le long du cordon

Cet effet est généralement masqué par le flambement

## 5) Répartition des contraintes en bout à bout

### a. Soudures rectilignes

-  $\sigma_L$

L'axe du cordon est tendu, les zones autour en compression

Si la soudure n'est pas symétrique, apparition d'une zone tendue après la compression → risque de voilement

-  $\sigma_T$

- Dans l'épaisseur, le cœur est en compression et les peaux en traction
- Dans la longueur, les extrémités sont en traction si liberté de bridage

### b. Soudures circulaires

- Tube très épais : racine en compression
- Tube moyennement épais :
  - Chanfrein extérieur, racine transversalement comprimée ou tendue selon  $e/R_{moyen}$
  - Chanfrein intérieur, racine extérieure en compression

### c. Rechargement de surface

Couche cylindrique extérieure → compression radiale sous cordon

Couche cylindrique intérieure → traction radiale

**SEUL LE PRECHAUFFAGE A LA TEMPERATURE DE PLASTICITE PERMET D'EVITER LES CONTRAINTES RESIDUELLES**

## 6) Prévisions de déformation

### a. Retrait longitudinal

La flèche se crée toujours dans le sens de l'axe neutre (concavité vers l'axe), si la soudure est réalisée hors axe.

Le soudage sur fibres tendues crée moins de contraintes résiduelles.

**En connaissant les valeurs de déformation, on peut prédéformer la pièce à souder pour appréhender la déformation au débridage.**

Le bridage permet :

- D'abaisser la contrainte de traction dans la zone plastifiée
- De diminuer la valeur de la flèche

### b. Retrait transversal et pliage

- Le remplissage en passes étroites est plus déformant (mais passes étroites mieux métallurgiquement)
- Longueur des pièces : si  $L \nearrow R_T \searrow$  et  $R_T$  plus important aux extrémités

L'effet de pliage est visible sur assemblage en T. Le calcul s'effectue à partir d'abaques. (chantier de Brest)

## 7) Compensation de déformation

### a. Retrait longitudinal

Les soudures réalisées hors axe principaux d'inertie à éviter → fortes flexions

#### i. Mesures préventives

Les soudures longitudinales doivent être :

- Sur le centre de gravité
- Sur 1 axe d'inertie
- Symétriquement par rapport au centre de gravité
- Symétriquement par rapport à l'axe d'inertie

Pour éviter :

- Mise de cale sous l'élément
- Soudage de 2 poutres inversées avec cales
- Réaliser une pré déformation
- Réaliser les soudures symétrique (l'une au dessus des autres)
- Soudage sur pièce pré contrainte

#### ii. Mesures correctives

- Chaudes de retrait

Chauffage localisé →  $\sigma$  thermique → inversion de contrainte → traction radiale

**Les chaudes de retrait sont plus faciles sur état comprimé que tendu.**

- Martelage

Bon pour bout à bout  
Moins bon en angle  
- Etirage au banc

b. Retrait transversal

Donner, dans la mesure du possible, la préférence au chanfrein en X ou K

Un chanfrein en X dissymétrique (2e/5 endroit ; 3e/5) peut être réalisé selon les règles :

- $Ep < 15 \text{ mm} \rightarrow$  X symétrique : endroit – gougeage – envers
- $15 < ep < 30 \text{ mm} \rightarrow$  X 2e/5 – endroit – gougeage envers – envers
- $30 < ep < 80 \text{ mm} \rightarrow$  X symétrique – e/4 endroit – gougeage envers – envers – finition endroit

Assemblage en T :

La gorge doit faire 0,7 x épaisseur ; si gorge ↗ contrainte ↗

Le soudage en pas de pèlerin (3 soudures) : 1 en extrémité, 1 autre à l'autre extrémité, et rejoindre les 2

## V- Traitement thermique et mécanique des soudures

Le soudage entraîne :

Aspect mécanique

- Contraintes résiduelles

Aspect métallurgique

- Transformation du métal en ZAT

Aspect physico-chimique

- Introduction de gaz dissout

Risques :

- Rupture fragile
- Corrosion sous tension
- Ruptures de fatigue
- Manque de stabilité dimensionnelle

### 1) Transformation en ZAT

- De constitution
  - o Trempe
  - o Précipitation
- Irréversibles
  - o Coalescence de précipités
  - o Surchauffe
  - o Recristallisation

### 2) Hydrogène

La mobilité de l'H<sub>2</sub> est faible dans l'austénite et élevé dans la ferrite

Rappelons que H<sub>2</sub> + Martensite + Contraintes → fissuration à froid

Remèdes :

Post chauffage 200°C : Interrompre le refroidissement et maintien en température → diffusion H<sub>2</sub>

### 3) Relaxation de contraintes

La plastification des zones chauffées (bridées par parties froides) entraîne des contraintes.

Il faut, annuler les plastifications locales par des plastifications équivalentes en elongation

- Traitement mécaniques :
  - o Etirage mécanique
  - o Thermomécanique LINDE (chauffage de par et d'autre du cordon puis refroidissement)
  - o Martelage entre passe → en multipasse, martelage entre chaque passe
  - o Grenailage ou galetage
  - o Traitement par vibration basse fréquence
- Traitement thermique
  - o Provoquant une baisse de Re
  - o Provoquant un fluage : Température jusqu'à 650°C
    - Une ↗ T° ↗ la relaxation
    - Idem pour le temps : Hollomon et Jaffé :  $P \text{ (ou H)} = T (20 + \log \text{ tps})$

#### 4) Conséquences métallurgiques des TTh

- Revenu des structures de trempe
- Restauration des aciers écrouis
- Restauration des zones fragilisées (coalescence Fe<sub>4</sub>N)
- Diffusion H<sub>2</sub>

Mais

- Surchauffe
- Précipitation (↘ KCV)
- Fissuration au réchauffage

- Type de TTh :

- Etat normalisé / revenu, trempé/revenu
  - → TTh à T° revenu – 30°C → RAS → pour aciers Mo, Mn Mo, Cr Mo, HLE traités
- Etat normalisé → chute Re, Rm, KCV → pour aciers C, C Mn, C Mn Ni, HLE

- Choix du TTh :

- Dépend des codes et normes
- Si pas de codes → voir aciéristes – relaxation 80 à 85% si T° < T° revenu

Attention à l'hétérogénéité des constructions (dilatation différentielle)

- Cas des inox :

- 13 à 17 Cr → 720°C en homogène ; pas de TTh en hétérogène
- 18-8 →
  - 850°C si risque corrosion sous contrainte
  - Eviter 450/700°C → carbures
  - Limiter % ferrite (fragilisation au dessus de 700°C)

- Traitements locaux : cas des tubes

Pas de TTh en coupe droite isotherme, il faut chauffer sur mini  $5 \sqrt{R.e}$  avec R=rayon

a. Démarche

- Choisir le traitement en fonction du but recherché (fatigue, pas de rupture,...)
- Tenir compte du traitement à la conception
- Qualifier le traitement au préalable
- Vérifier la bonne exécution (coupon, appendice témoin)
- Conserver toutes les données de traitement

#### VI- Contrôle non destructifs

Ils sont utilisés pour détecter les défauts de groupe 1 à 4

##### 1) Le ressuage

a. Généralités

Penetrant Testing (PT)

- Utilisables pour tous les défauts visibles (débouchant)
- Défauts bouchés par corrosion, oxydes, graisses, peinture
- Défauts matés par martelage, grenailage, meulage,...

b. Principes de base

Il repose sur 3 principes physiques :

- Capillarité
  - Contrarié lors de la mise du pénétrant, plus défaut petit, plus le temps est long
  - Favorisé par l'application du révélateur
- Mouillabilité
- Viscosité → la mise en contact avec l'eau lors du rinçage augmente la viscosité du pénétrant

c. Couleur des produits

- Rouge, bon contraste sur fond blanc du révélateur
- Jaune vert, fluorescent sous lampe UV

La lumière doit avoir (selon ISO 1359)

- $\geq 500$  Lux en lumière blanche
- $\leq 20$  Lux en lumière noire

Densité énergétique de la lampe 10W/m<sup>2</sup>

d. Principe de l'essai selon EN 571-1

- Dégraissage des pièces
- Application du pénétrant

Pré émulsionné	A Post émulsionné	Spéciaux
Colorant + liq porteur + tensio actif + émulsionnant	Colorant + liq porteur + tensio actif et émulsionnant à part	Haute et basse température
Directement lavable à l'eau	Lavable à l'eau après émulsionnant	
Rouge pour larg 50µm et prof 2 µm Mixte (rouge ou orangé (en UV)) Jaune vert pour larg 30µm et prof 1 µm	Jaune vert larg 0,5 µm et prof 5 µm	

Conditionnement

- En vrac pour une utilisation pinceau, pulvérisation et immersion
- Aérosol pour pulvérisation
- Thixotropique pour pinceau

Temps entre 5 et 60 minutes

- Essuyage et rinçage par pulvérisation  
Température entre 15 et 30°C
- Application du révélateur

Sec	Humide	Pelable
Poudre sèche	A base d'eau → aqueux plus utilisés	Plus utilisé
Pulvérisateur en poudre	A base de solvant → non aqueux	Mise d'une résine pour garder une trace
Compartiment à brouillard		
Meilleur si forte rugosité	Sur surface lisse	

- Observations des indications

De 0 à 10 min	De 10 à 30 min	PV
Linéaire	Linéaire de longueur D	Linéaire avec D
linéaire	Circulaire de longueur D et largeur d	Linéaire D x d
Non Linéaire	Non linéaire	Non linéaire D x d
Non linéaire	linéaire	Linéaire D

Un défaut non linéaire avant 10 minutes mais qui devient linéaire sera noté linéaire.

Un défaut linéaire avant 10 minutes qui devient non linéaire sera noté linéaire

e. Hygiène et sécurité

Dans locaux bien ventilés

Port de masque et gants pour l'opérateur

Révélateur est le plus nocif

## 2) Magnétoscopie

a. Généralités

Magnétic Testing (MT)

Utilisable pour les défauts se trouvant ou émergeant dans une épaisseur sous jacente de 1,5 mm

b. Principes

On crée un champ magnétique avec un aimant entre 2 pôles N et S :

- S'il n'y a pas de défaut → pas de perturbation des lignes de champ
- Si défaut → déformation des lignes de champ

On obtient des images fallacieuses, en fonction :

- De la géométrie de la pièce
- Etat de surface du matériau (graisse, projection,...)
- Champ magnétique trop important

c. Principes généraux de contrôle en magnétoscopie (selon NF EN ISO 99.34-1)

a. Matériaux

Pas bon pour :

- Diamagnétique, Or, Cu
- Paramagnétique, platine

Bon sur Ferro magnétique

b. Champ magnétique

H Entre 2000 et 4000 A/m, qui dépend de l'écartement entre 75 et 200 mm. Si écartement augmente H ↘

- Type d'aimant
  - o Permanent, utilisé dans les capacités, citernes, où l'électricité est interdite
  - o Electro aimant, en 220 ou 380 V
  - o Electricité en 24 ou 48 V

d. Type de défaut

- Défaut de compacité de surface à < 1,5 mm de la surface
- Défaut perpendiculaire aux lignes de champ
- Applicable sur pièce rouillée
- Applicable sur pièce peinte en peinture ferromagnétique et épaisseur < 50 µm

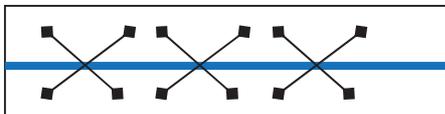
e. Condition d'éclairage

Selon NF EN ISO 3059

≥ 500 Lux en lumière blanche et > 10 W/m<sup>2</sup> en lumière noire

f. Principe de l'essai

- **Dégraissage**
- **Application de la laque blanche (pour contraste)**
- **Mise du témoin d'aimantation**
  - o Laque sur le témoin
  - o Placé sur la soudure
  - o Type de témoin :
    - AFNOR 1 et 2 : cercle
    - Croix de Berthold
    - ASME
  - o Si témoin OK, mesure possible
- **Mise en place de l'aimant (électroaimant)**
  - o Placer les limailles de fer (produits indicateurs selon NF EN ISO 9934-2)
    - soit par pulvérisateur (plus efficace) → liquide + limaille
    - soit poudre sèche
  - o Faire des mesures croisées :



- o Regarder les défauts obtenus qui apparaissent en gris

g. Critères d'acceptation

Ils sont donnés par le code utilisé, CODAP, RCCM,...

### 3) Radiographie

a. Généralités

Radiographic Testing (RT)

Elle repose sur l'absorption différentielle d'un rayonnement électro magnétique ionisant

Bombardement de rayons X ou  $\gamma$

Sur tous les matériaux et toutes épaisseurs

Permet les prises de vue dans toutes positions (même plafond)

Une augmentation d'épaisseur nécessitera une augmentation des sources mais risque humain de résistance aux rayons

b. Défauts décelables

Défauts de compacités volumiques situés // aux rayonnements

c. Hygiène et sécurité

Il faut :

- PCR : **Personne compétente en Radiographie**
- **Personnel CAMARI : Certificat d'Aptitude à Manipuler des Appareils de Radio Industriel**
- Avertir ASN et IRSN

d. Principe de l'essai

- **Mise en place de l'échantillon sous la source**
  - o Source à RX ou  $R\gamma$ - radioactive (Iridium ou Cobalt)
- **Pose du film sous l'échantillon**
  - o Type de film (choix selon NF EN 584-1 ou NF EN 444)
    - Soit lents, bonne qualité d'image, bonne définition, grains fins mais peu sensible aux rayonnements
    - Soit rapides
    - Le film est composé d'un support plastique, de substratum (adhérence émulsion), d'émulsion (Halogénure d'Ag) et gélatine (protection émulsion)

Remarque : On peut améliorer la qualité par la superposition de 2 films qui enlève le doute de « défaut film » et permet d'obtenir les défauts fins.

- Le choix du film va dépendre du code utilisé mais également de la précision → qd le film n'est pas disponible, on choisit le plus sensible

- **Pose du témoin**

- o Qualité du film (3 points)
  - Flou géométrique DSF :=  $a + dxa/fg$  où a = épaisseur, d distance de la source à la surface, f flou le DSF est donné par le code utilisé.
  - Indicateur Qualité d'Image (IQI)  
**posé sur la soudure en chevauchement sur métal de base**
    - A fil, et en fonction de la matière Fe, Al, Ti, Cu. Suivant code on doit pouvoir voir le fil précédent et suivant
    - A gradins
  - La densité
- o Prise de vue
  - Suivant normalisation et code utilisé
    - Tôle plane
    - Plan plan
    - Elliptique
    - Au contact

#### 4) Ultra sons

##### a. Généralités

Ultrasonor Testing (UT) selon NF EN ISO 583-1

C'est la seconde méthode de contrôle volumique.

Les ultra sons reposent sur le principe de vibrations mécaniques de la matière.

##### - Principes physiques

La vibration de l'onde a une forme sinusoïdale qui permet de définir une fréquence, une période assimilable à la longueur d'ondes  $\lambda$ .

On obtient la relation :  $\lambda = v/f$  avec  $v$  = vitesse de propagation

Le défaut observable doit être supérieur à une demi longueur d'onde :  $L_{\text{mini}} = \lambda/2$

Dans le cas des aciers,  $v=6000$  m/s et avec  $f = 2\text{MHz}$  défaut mini 1,5 mm

On remarque que quand  $f \nearrow \lambda \searrow$

On utilisera alors Basse fréquence pour forte épaisseur et gros grains

##### b. Principe du contrôle

- Fréquence entre 0,5 et 15 MHz

- Tous les matériaux ferritiques ou à structure fine. Les alu, Cu, fontes, inox alliés sont plus difficiles à cause de leur structure grossière.

- Epaisseur > 8 mm

##### a. Type d'onde

- Ondes longitudinales (OL)

Si contact matière/air  $\rightarrow$  réflexion de l'onde  $\rightarrow$  mesure épaisseur au retour

Ceci est dû à la différence de vitesse de propagation dans les matériaux  $\rightarrow$  + le matériau est dense, + c'est rapide

Si défaut  $\rightarrow$  retour plus rapide de l'onde

En longitudinale, les ondes sont émises et récupérées verticalement

Vitesse 5920 m/s

- Ondes transversales (OT)

On applique un angle aux ondes, si pas de défaut l'onde s'échappe, si défaut retour de l'angle (en ayant choisit l'angle complémentaire au chanfrein : chanfrein  $30^\circ \rightarrow$  angle  $60^\circ$  pour atteindre  $90^\circ$ )

Vitesse 3250 m/s

- Ondes de surface

Peu utilisé – permet de contrôler la peau d'un échantillon (faible  $\lambda$ )

##### b. Le faisceau

Il ne s'agit pas d'une onde mais d'un faisceau. En début d'émission, il y a une perturbation de l'onde que l'on élimine en prenant des capteurs spéciaux avec élément piézo électrique (éméteur) surélevé.

De même, on peut s'affranchir du spectre d'allumage en prenant des capteurs en 2 parties, traducteur/récepteur

##### c. Déroulement de l'essai

Le contact pièce/capteur est protégé par un gel ou milieu liquide (colle à tapisser peut faire l'affaire)

- Etalonnage

Grosse partie de l'essai :

○ Réglage de la vitesse

○ Retard d'onde ( $\searrow$  zone morte)

○ Angle capteur

L'étalonnage s'effectue avec des cales de référence

- Dessin d'une courbe de référence
- Mesures
  - Sur métal de base
  - Sur la soudure
  - Les pics dépassant la ligne de référence sont notés.
- Besoin d'être certifié COFREN 2

### 5) Comparaisons des procédés

		UT	RT	MT	PT
Avant soudage		+++	++	++	++
Pdt Soudage		-	++	+	+
Après soudage		+++	++	++	++
Acier faible alliés		+++	+++	+++	+++
ferritiques		+	+++	++	+++
austénitiques		+	++	-	+++
Alliages légers		+++	+++	-	+++
Cuivre		-	+	-	+++
titane		++	+++	-	+++
Défauts volumique		+	+++	+	+++
Défauts plans		++	+++	+++	+++
Orientation / émissions //		++	+++	++	++
☐		+	-	-	-
Épaisseur	BW <8 mm	+	+++	++	+
	BW < 80 mm	+++	++	+	+
	FW e,a <8	-	+	++	++
	FW e,a >8	+	+	+	+
	e <8	++	+	++	+
	e >8	+++	-	+	+
	Piquage e <8	+	+	++	+
	Piquage e >8	++	-	+	+
	clin e <8	+	+	++	+
	clin e >8	++	+	+	+

+++ très bon ; ++ bon ; + moyen / médiocre ; - nul