

amorçé puis se déplace entre les bords relevés des 2 pièces à assembler d'une part et une électrode auxiliaire non consommable d'autre part. L'amorçage de l'arc se fait soit par un dispositif haute fréquence, soit par l'établissement d'un contact entre les bords relevés et l'électrode auxiliaire.

## **1.24.2 Mise en œuvre du procédé**

De principe, le soudage par arc tournant s'applique à tous les profilés fermés.

### **1.24.2.1.1 Etat initial :**

- Serrage des extrémités pièces dans les mors assurant la position relative des pièces.
- Mise en place de la bobine de déflexion magnétique
- Mise en contact des 2 extrémités sous un faible effort.

### **1.24.2.1.2 Début soudage :**

- Courant de soudage (tension d'arc), l'alimentation électrique de la bobine magnétique et le débit de gaz interviennent simultanément.
- Les extrémités des pièces qui se touchaient sont écartées l'une de l'autre d'une distance prédéterminée : l'arc s'amorce.

### **1.24.2.1.3 Soudage :**

- L'arc tourne
- Les bords des pièces entrent en fusion pâteuse.

### **1.24.2.1.4 Fin du soudage :**

- Un effort de refoulement par vérin ramène les pièces en contact l'une de l'autre et les maintient en pression.
- Le courant de soudage, le champ magnétique et l'arrivée de gaz inerte sont coupés

## **1.24.3 Matériel (éléments constitutif d'une machine)**

2 machines standards en 2 catégories : Machines verticales et horizontales.

- Chariot mobile sur lequel est bridée et prend appui une des pièces à assembler
- Chariot inférieur fixe sur lequel est bridée la seconde pièce à souder

- Butée d'appui de la pièce fixe
- Bobine magnétique
- Cylindre commandant les déplacements rectilignes du chariot mobile et exerçant en particulier l'effort de refoulement
- Groupe hydraulique
- Source des courant de soudage et d'alimentation de la bobine magnétique
- Alimentation du gaz de protection (CO<sub>2</sub>)
- Pupitre de commande, de réglage et de contrôle des paramètres

#### 1.24.3.1 Tous les mouvements sont hydrauliques

L'écartement des pièces ou «distance d'arc» est réalisé par dosage d'une fuite temporaire du vérin à partir du contact entre pièces. 20 N/mm<sup>2</sup>.

#### 1.24.3.2 Courant de soudage

Amené par les dispositifs de serrage, la gamme des intensités va de 50 à 1000 A. La tension étant de 30 Volts.

Le générateur de courant continu a une tension à vide élevée et de forte pente.

#### 1.24.3.3 Bobine magnétique

Aucun contact avec les pièces. Plusieurs dispositifs : bobines extérieures ou inférieures aux pièces.

#### 1.24.3.4 Gaz de protection

Fonction de la capacité de déformation à chaud des métaux à souder. Le forgeage favorise l'interpénétration cristalline des joints de grain pour assurer une continuité métallique.

#### 1.24.3.5 Gaz de protection

Généralement utilisé dans les applications pratiques, en dehors des aciers austénitiques, est du CO<sub>2</sub>. L'alimentation du gaz se fait en regard de l'extrémité des pièces à assembler : soit au travers de la bobine magnétique, soit au travers des pièces en fonction de la conception de ces dernières.

### 1.24.4 Paramètres de soudage

#### 1.24.4.1 Position de départ

Pression de départ 20 N/mm<sup>2</sup>, longueur des pièces brute, durée 0.2 s.

#### 1.24.4.2 Courant de soudage

Soudage courant continu 50 à 1000 A. La tension étant de 30 Volts. Bobine 5 et 15A.

#### 1.24.4.3 Gaz de protection

CO<sub>2</sub> avec 20l/min.

#### 1.24.4.4 Ecartement

Fonction de l'épaisseur et du diamètre du tube = 1.5 mm à 2.5 mm.

#### 1.24.4.5 Temps de chauffage

Temporisé et fonction de l'épaisseur du tube.

#### 1.24.4.6 Efforts et temps de refoulement

Réglage identique à la phase de forgeage en friction.

#### 1.24.4.7 Raccourcissement des pièces

Contrôlé en fin d'opération par capteur de déplacement.

## **1.25 SOUDAGE PAR FRICTION MALAXER**

<b>AVANTAGES</b>	<b>INCONVENIENTS</b>
Grande productivité	Industrie automobile
Aucune préparation de joint (dégraissage uniquement)	Industrie aéronautique
Aucun consommable de soudage utilisé (pas de gaz, pas de métal d'apport)	Industrie ferroviaire
Soudage monopasse bord à bord sans préparation jusqu'à 15 mm	Chantiers navals (Bateaux à grande vitesse)
Soudage d'assemblage hétérogène (Cu/Al, Mg/Cu)	
Déformations et contraintes très faibles	
Complètement automatisé et informatisé	
Excellentes qualités de joint	
Bonnes caractéristiques mécaniques	
Aucune nuisance environnementale (pas de fumée, pas d'arc, pas de projections)	

### **1.25.1 GENERALITE**

#### 1.25.1.1 Désignation normalisée

Française : Soudage par Friction malaxage.

Américaine : Friction Stir welding System

Désignation numérique Internationale : 42 (doit être confirmé, car nouveau procédé)

### 1.25.1.2 Domaine d'utilisation / Définition

Le soudage «Friction Stir Welding System» ou Soudage par friction malaxage (brevet [TWI](#)) ou soudage tixotropique est un procédé relativement nouveau, développé depuis 1992 par TWI et ESAB. Ce procédé particulièrement adapté pour le raboutage de tôles et profilés en alliage d'aluminium. Il permet l'assemblage d'alliages d'aluminium réputés difficiles à souder (séries 2xxx et 7xxx). Il est aussi utilisé pour les jonctions hétérogènes Aluminium/Cuivre, Aluminium/Acier, Magnésium/Cuivre et Cuivre/Acier. Ce procédé assure des soudures de très haute qualité avec un minimum de déformations.

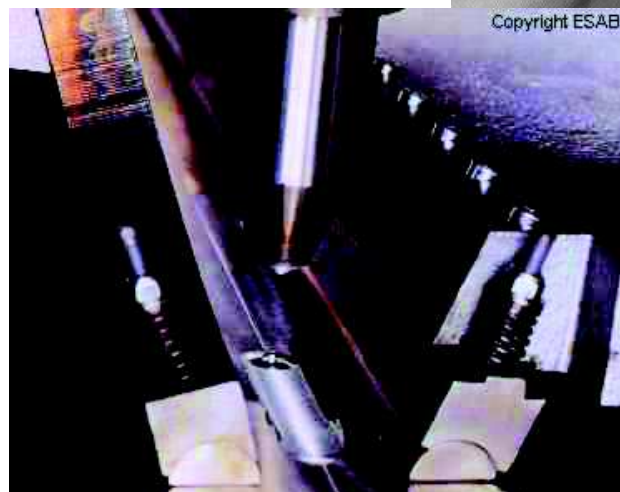
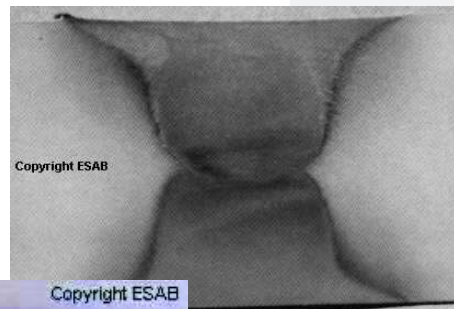
### 1.25.1.3 Principe

Les pièces à assembler en bout à bout sont solidement maintenues sur un bâti rigide. Un outil rotatif ou fraise avec un profil spécial est positionné au droit du joint. Une certaine vitesse de rotation de la fraise et une force de pression très élevée sont imprimées à l'outil à la surface de la pièce à assembler. La chaleur dégagée par le frottement de la fraise associée à la pression d'appui assure la mise à l'état plastique des matériaux à assembler et assure leur jonction. L'outil rotatif mélange le métal des pièces. La soudure est réalisée par un mouvement linéaire de l'outil en rotation à une certaine vitesse d'avance. Il autorise l'assemblage de pièces d'épaisseurs comprises entre 1,5 mm et 30 mm.



Photographie d'une soudure Friction Malaxage

Coupe macrographique réalisée sur une soudure de tôles d'aluminium 7050-T7451 de 25 mm d'épaisseur



## 1.26 SOUDAGE PAR EXPLOSION

AVANTAGES	INCONVENIENTS
Permet d'assembler des matériaux très dissemblables	Procédé très coûteux
Aluminium et acier	Mise en œuvre très difficile et dangereuse
Titane et Acier	Autorisation ministérielle de mise en œuvre
Zirconium et tantale et acier inoxydable	
Cuivre et acier	
Plaquage de surface planes ou cylindriques	
Plaquage plaque tubulaire	

### 1.26.1 GENERALITE

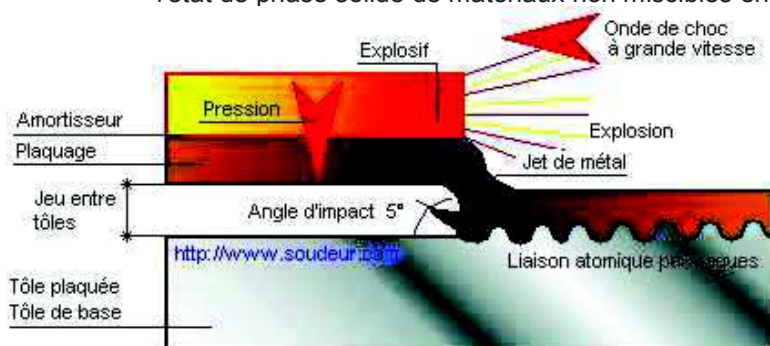
- Découvert fortuitement en **1957** au cours d'opérations de formage par explosion.

#### 1.26.1.1 Désignation normalisée

- Française : **Soudage par Explosion**
- Anglaise / Américaine : **Explosive Welding / Explosion Welding**
- Numérique internationale : **441**

#### 1.26.1.2 Définition

La liaison entre les deux pièces est obtenue par la projection d'une pièce sur l'autre par pression et vitesse élevées. L'onde de choc de l'explosion par détonation contrôlée est utilisée pour assembler les matériaux avec une vitesse de déformation très élevée, à très grande vitesse de déplacement (de l'ordre de 3500 à 5000 mètres / seconde) et sous une très forte pression (> 20 000 MPa). Le soudage par explosion (EXW) est un procédé d'assemblage à haute énergie à l'état de phase solide de matériaux non miscibles entre eux.

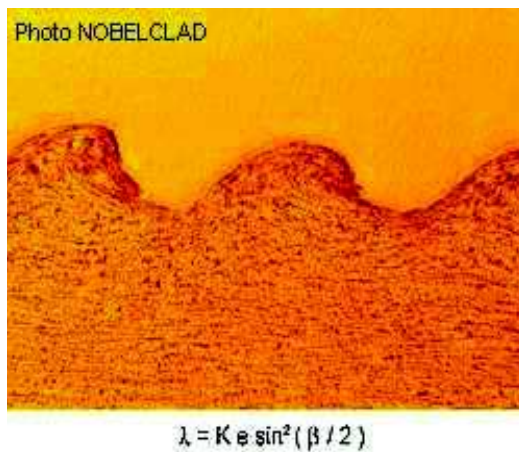


### 1.26.1.3 Principe

Le soudage par explosion est un procédé de soudage par recouvrement de deux ou plusieurs matériaux. L'explosif utilisé est à base de nitrate d'ammonium. Il est uniformément réparti sur la partie supérieure de l'élément à plaquer. Il est conçu pour que le front de détonation se déplace de façon tangentielle le long de la pièce à plaquer. Le soudage par explosion est utilisé pour assembler de larges surfaces de tôles de nuances très différentes. La tôle de revêtement est très souvent d'épaisseur inférieure à la tôle à plaquer. L'ensemble du dispositif est placé sur un ensemble massif très dense nommé cible.

Un amortisseur constitué d'une plaque de chlorure de polyvinyle ou de caoutchouc est interposé entre l'explosif et le matériau à plaquer afin de contrôler la force explosive.

La liaison intermétallique ou coalescence des deux matériaux est effectuée par la déformation plastique avec la formation de vagues ou ondulations. (voir photo ci-dessous)

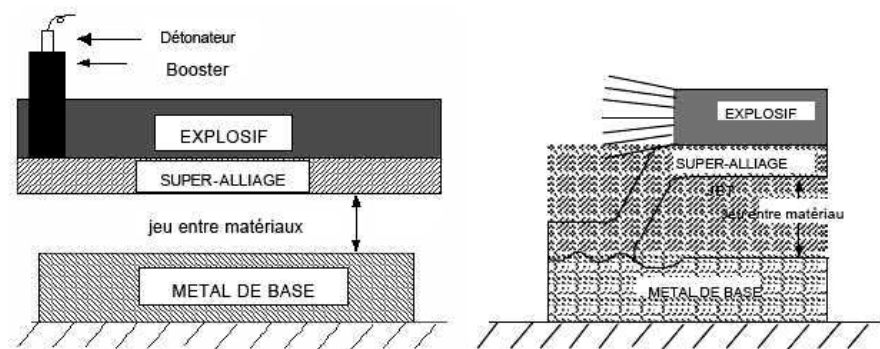


#### 1.26.1.4 Paramètres opératoires

- Les propriétés de l'explosif utilisé
- La disposition de la charge explosive
- La vitesse d'impact
- L'angle d'impact (tir en parallèle ou tir incliné/tir en dièdre)
- 

#### 1.26.1.5 Hygiène et sécurité

- Risques avec la manutention des explosifs



### 1.27 Procédés d'assemblage des plastiques procédés d'assemblages des matériaux avancés

## 2 Les matériaux et leur comportement lors du soudage

### 2.1 Phénomènes de fissuration des aciers

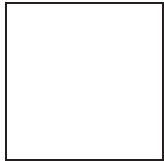
#### 2.1.1 La fissuration a froid

##### 2.1.1.1 Caractères

Fissure inter granulaire ou trans granulaire en ZAT (zone sous cordon) ou en ZF, apparaissant au-dessous de 150 °C environ, de préférence dans des zones présentant des coefficients de contraintes.

##### 2.1.1.2 Facteurs

= combinaison minimale de 3 facteurs :  
Intensité des contraintes résiduelles de soudage  
Teneur en hydrogène dans la soudure.  
Présence d'une microstructure fragile (martensite ou bainite)



##### 2.1.1.3 Intensité des contraintes résiduelles de soudage élevée lorsque :

Module d'élasticité du matériau élevé  
Epaisseur du matériau augmente  
Encastrement proche de la soudure  
Retrait élevé (coefficient de dilatation du matériau élevé)  
Hauteur de gorge du cordon faible

##### 2.1.1.4 Présence d'hydrogène

Humidité dans les enrobages ou les flux  
Humidité de l'air  
Présence de H<sub>2</sub> dans le matériau (souvent négligeable)  
Humidité ou pollution à la surface du matériau à souder. (ex tuyauterie transportant de l'hydrogène, ou fuite d'eau provenant de la torche de soudure)  
L'hydrogène sursaturé dans un acier peut s'échapper librement de la pièce à 20 °C mais si fait un post chauffage à 300°C le coefficient de perméabilité de l'hydrogène est 1000fois moins important



#### 2.1.1.5 Classement des procédés dans l'ordre décroissant de leur apport hydrogène

SAEE cellulosique > SAEE rutile > SAEE basique étuvée > SA flux en poudre > MIG MAG > TIG

#### 2.1.1.6 Présence d'une micro structure fragile

Dépend de

*Cycle thermique* qui agit sur la vitesse de refroidissement Plus cette vitesse est élevée, plus la structure obtenue sera fragile. Cette vitesse dépend

L'énergie de soudage

La température initiale de la pièce

La forme de l'assemblage

*Sa composition* : Plus la teneur en carbone et autres éléments d'addition est élevée, plus l'acier est trempant. En pratique, on calcule le C équivalent.

#### 2.1.1.7 Essais

1/ Tekken pour assemblage en bout à bout

2/ CTS pour les assemblages en angle

Ces deux essais sont réalisés avec le matériau et les paramètres de soudage identiques à l'assemblage que l'on veut souder, mais dans des conditions de bridage extrême.

3/ Implant :

A l'aide d'un implant, et pour un procédé de soudage donné ; on fait varier le TR800-500 et la contrainte. On obtient des courbes de fissuration en fonction du Tr8700-500 et de la contrainte.

#### 2.1.1.8 Remède et prévention :

##### 2.1.1.9 D'une manière générale

- Limiter les situations de bridages
- Bridage libre
- Optimisation des séquences de soudage
- Métal d'apport à faible Re
- Réduire la quantité d'hydrogène
- Choix du procédé
- Consigne de soudage (pas d'arc long, étuvage)
- Dégourdisage (80°C) pour éliminer la condensation sur les pièces.

#### 2.1.1.10 Calcul du Carbone équivalent :

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + Cr + \frac{Mo}{5} + V + \frac{Cu}{5} + Ni$$

C équi > 0.45 :

- Soudure sans hydrogène
- Pré et post chauffage si présence d'hydrogène et de contraintes.
- 

0.35 < C équi < 0.45

Soudage en augmentant l'énergie pour accroître le temps de refroidissement. L'énergie minimale à mettre en œuvre peut être définie à l'aide des courbes de fissuration.

- Si cela est insuffisant, il faut préchauffer
- Si cela est insuffisant, il faut post chauffer pour laisser dégazer l'hydrogène.

Ceq > 0.45 martensite :

#### 2.1.1.11 Solution joker :

Il est possible d'éviter la [fissuration à froid](#) en utilisant un métal d'apport de type austénitique :

- Inox type 20% cr ; 10%ni ; 3% Mo ; ou 24% cr ; 12%ni
- Inconel type 75% ni, 15%cr ; 10%fe.( Base nickel )

Ces derniers sont insensibles à la rupture fragile et captent l'hydrogène avant qu'il ne se diffuse dans la ZAT.

Inconvénient

- Réparation du même type
- Coefficient de dilatation de l'inox plus important
- Contrôle us plus difficile
- Ne marche pas à 100%
- Caractéristique mécanique en ZF et MB différentes.
- Sensibilisation à la fatigue thermique car risque de création de phase sigma.

## 2.1.2 Fissuration au réchauffage

### 2.1.2.1 Définition :

Apparaît sur les aciers faiblement alliés résistant à chaud, sous forme de fissure inter granulaire en ZAT voir en ZF.

La fissuration se produit entre 300°C et 700°C au cours d'un réchauffage, généralement TTAS ou soudage multipasses.

### 2.1.2.2 Causes :

Manque de ductilité ZAT à haute température apparition de fissure en ZAT ou ZF  
Déformation du métal au cours du réchauffage.

### 2.1.2.3 Facteur :

Contraintes résiduelles

Composition chimique :

- Impuretés (P,S,Sn,Sb,As)
- Élément d'alliages : Cr, Mo, V, Nb, B, Al, Cu

Structures :

- Gros grains
- Durcissement, précipitation de carbures
- Ségrégation d'impuretés (P )

### 2.1.2.4 Prévention

Choisir acier adapté ( $p < 0.4\%$ ) et présence d'impureté faible

éviter les éléments d'addition durcissent

Limiter les contraintes de soudage

## 2.1.3 Vieillessement :

### 2.1.3.1 Définition :

Perte de ductilité pour les aciers de structure ferritique ou ferrito-perlitique. Rupture fragile par clivage.

Le vieillissement est réversible, mais il se reproduit dans le temps.

### 2.1.3.2 Cause :

Précipitation de nitrure de fer ( $Fe_4N$ ) dans la ferrite.

### 2.1.3.3 Facteur :

Composition chimique :

- N>0.01%
- Manque de Al, Si, B qui peuvent former des nitrures non fragile.
- Mise en sursaturation l'azote dans l'acier à l'ambient.
- TT vers 200°C précipitation des nitrures de fer.

Ecrouissage

### 2.1.3.4 Prévention :

Limite l'introduction d'azote (arc long, courant d'air)

Metaux non sensible N<0.01% et Al>0.02%

## 2.2 Introduction à la corrosion

la corrosion est la réaction d'un métal dans un milieu par l'intermédiaire d'une interface

### 2.2.1 notions fondamentales

#### 2.2.1.1 La thermodynamique

C'est l'étude qui nous renseigne sur la possibilité d'une réaction entre un métal et un milieu corrosif

Pas de réaction => pas de corrosion

Mais la réaction du métal peut être protectrice (passivation)  
corrosive

#### 2.2.1.2 la cinétique

c'est l'étude de l'évolution de la réaction dans le temps  
rapide en un temps très court puis n'évoluant plus (passivation)  
lente en permanence (↑ épaisseur)  
rapide en permanence (protection particulière)

#### 2.2.1.3 Oxydation = corrosion

C'est une perte d'électrons

#### 2.2.1.4 Reduction = protection

C'est le gain d'électrons

#### 2.2.1.5 Différents types de corrosion

- Corrosion généralisée uniforme ou non

- Corrosion localisé
- Plaques
- Crevasses et piqûres
- Fissurante
- trans. granulaire ( pollution ferritique des inox)
- Inter granulaire sur inox austénitique suite à la création des carbure de chrome , la corrosion des joint de grains dans des zones dé chromisé
- Corrosion par aération différentielle

ex une canalisation qui traverse des sol sablonneux et argileux les 2 milieux ont une différence de potentiel qui conduit à la corrosion dans un de ses milieux

- Corrosion caverneuse souvent du au milieu
- Corrosion par piqûre souvent du métal (ex soudure inox non re passivée)
- Corrosion sous contrainte de traction rupture du film passif au niveau du plan de glissement => corrosion par piqûre => action de l'hydrogène => fissuration => rupture purement mécanique
- Corrosion par érosion dans un milieu non corrosif
- dé passivation par érosion + re passivation du métal a son propre détriment
- formation de turbulence par un excès de pénétration

### 2.2.2 influence du soudage sur la corrosion

- modifications métallurgique en zat
- contraintes résiduelles
- destructions de la couche protectrice
- nature différente du métal apport et le métal de base ( en brasage)
- alliage biphasé ex le laiton = Zn + Cu

attention au soudage des aciers inox stabilisés (titane et niobium)

- corrosion inter granulaire en zat
- corrosion incisive en pénétration
- fissuration dans le cordon
-

### **2.2.3 les remedes en soudage**

- choix des métaux de base et apport
- choix du mode d'assemblage=> éviter la corrosion localisé
- respecter les règles d'assemblage et les codes de construction
- éviter les défauts (manque ou excès de pénétration ,rochage ..)
- propreté après soudage
- élimination des oxydes
- reconstitution de la couche protectrice (compacte, adhérente continue)
- diminuer le temps de maintien entre 600 et 900°C => utilisation de procédés à forte densité énergie surtout sur les inox austénitiques

## **2.3 Introduction a la soudabilité et a la METALLURGIE**

### **2.3.1 Critères de soudabilité**

#### **2.3.1.1 Soudabilité opératoire**

C'est la possibilité pratique de réaliser une soudure dans les conditions réelles de fabrication (géométrie de la pièce, procédé, position de soudage ...).

#### **2.3.1.2 Soudabilité métallurgique**

C'est la possibilité de réaliser une soudure en maîtrisant la formation de défauts de compacité ou de structure qui résulteraient du comportement des matériaux lors du soudage.

#### **2.3.1.3 Soudabilité**

C'est l'aptitude de l'assemblage soudé à satisfaire aux conditions de service qui lui sont imposées.

### **2.3.2 Facteurs influents sur les critères de soudabilité**

#### **2.3.2.1 Facteurs de la soudabilité opératoire**

Ce sont les facteurs qui influent sur la soudabilité opératoire, ils proviennent soit des pièces soit du procédé de soudage.

Les facteurs provenant de la pièce sont : la conductibilité thermique, la température de fusion, la fluidité du métal liquide, l'état de surface, la résistivité électrique, la perméabilité magnétique.

Les facteurs associés au procédé de soudage sont souvent les contraintes techniques spécifiques qui limitent le domaine d'application du procédé : dimension et maniabilité de la source de chaleur, enceinte sous vide, position de soudage à plat uniquement, soudage sur chantier en plein vent ...

#### 2.3.2.2 Facteurs de la soudabilité métallurgique

La soudabilité métallurgique est liée à des phénomènes de fissuration consécutifs au soudage ainsi qu'à des évolutions locales de structure qui dégradent les caractéristiques des matériaux.

Les principaux problèmes de fissuration en soudage sont :

- La fissuration à froid
- La fissuration à chaud
- L'arrachement lamellaire
- La fissuration au réchauffage
- Les principales évolutions de structure à redouter en soudage sont :
  - L'effet de trempe ou de revenu selon les cas
  - Le grossissement des grains
  - La précipitation de carbures de chrome
  - La formation de phases sigma
  - Le vieillissement

#### 2.3.2.3 Facteurs de la soudabilité globale

C'est ce qui permet de garantir la qualité de la pièce soudée vis-à-vis des caractéristiques fonctionnelles exigées :

- Résistance mécanique
- Tenue à la corrosion
- Conformité dimensionnelle
- Etanchéité
- Aspect esthétique

## 2.4 Rappels élémentaires de métallurgie du fer

### 2.4.1 Transformations du fer

Le fer présente plusieurs variétés de structure en fonction de la température :

- Structure cubique centrée jusqu'à 912°C (point **A3**) :  $fer_{\alpha}$
- Structure cubique face centrée de 912°C à 1394°C (point A4) :  $fer_{\gamma}$
- Structure cubique centrée de 1394°C à 1538°C ( $\theta_f$ ) :  $fer_{\delta}$

### 2.4.2 Diagramme fer-carbone

L'état d'équilibre d'un matériau dépend de la composition chimique, de la température et de la pression. Il s'obtient pour des variations très lentes de température afin que la diffusion permette la libre organisation des atomes dans le matériau. C'est ce qui est décrit par le diagramme d'équilibre.

L'association du fer et du carbone conduit à la formation de solutions solides (ferrite, austénite) et d'un composé défini le carbure de fer ( $Fe_3C$ ) qui est un constituant dur et fragile.

- La ferrite  $\alpha$  est une solution solide d'insertion à base de  $fer_{\alpha}$  (Cubique Centré) dans laquelle le carbone est très peu soluble (0,02% au maximum).
- L'austénite  $\gamma$  est une solution solide d'insertion à base de  $fer_{\gamma}$  (Cubique Face Centrée  $\Rightarrow \curvearrowright$  ductilité soit A% et K) dans laquelle le carbone est très soluble.
- La ferrite  $\delta$  est une solution solide d'insertion à base de  $fer_{\delta}$  (Cubique Centré) dans laquelle le carbone est relativement peu soluble.

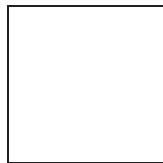
A 727°C (point **A1**), nous sommes en présence d'une transformation dite eutectoïde. L'alliage contient une proportion donnée d'austénite à 0,77% de C qui se transforme en ferrite+cémentite sous la forme d'un agrégat lamellaire appelé perlite.

La structure des aciers varie en fonction de la teneur en carbone :

- Si  $\%C < 0,001$  la structure est uniquement composée de grains de ferrite.
- Si  $0,001 < \%C < 0,022$  la structure est composée de grains de ferrite avec de la cémentite aux joints de grain.
- Si  $0,022 < \%C < 0,77$  la structure est composée de grains de ferrite et de grains de perlite (acier hypoeutectoïde).



- Si %C=0,77 la structure est uniquement composée de perlite (acier eutectoïde).
- Si  $0,77 < \%C < 2,1$  la structure est composée de perlite avec de la cémentite aux joints de grains (acier hypereutectoïde).
- 



### **2.4.3 Traitements thermiques des aciers**

Ils se décomposent en 3 phases :

- Chauffage
- Maintien en température
- Refroidissement

Chacune de ces étapes a un effet métallurgique particulier.

#### **2.4.3.1 Effets du chauffage**

##### **2.4.3.1.1 Austénitisation**

Elle intervient à une température au-delà de  $A_{c3}$  et correspond à la transformation de la structure de base de l'acier en austénite. Elle s'accompagne d'un affinement des grains qui améliore les propriétés mécaniques de l'acier ( $\nearrow R_e$  et  $R_m$ ,  $\searrow A\%$  et  $K$ ).

##### **2.4.3.1.2 Surchauffe**

Elle intervient à partir d'une température d'environ 1100°C et entraîne un grossissement des grains proportionnel à la température et au temps de maintien ( $\propto R_e$  et  $R_m$ ,  $\propto A\%$  et  $K$ ).

#### 2.4.3.2 Effet du refroidissement après austénitisation

##### 2.4.3.2.1 Refroidissement lent

C'est le cas du recuit. Le carbone a le temps de diffuser et de se transformer en cémentite. On est proche des conditions du diagramme d'équilibre.

##### 2.4.3.2.2 Refroidissement rapide

C'est le cas de la trempe. Le carbone n'a pas le temps de diffuser et de former de la cémentite. L'austénite se transforme en une solution solide désordonnée la martensite. C'est un constituant hors équilibre donc instable qui est dur et fragile. Les contraintes internes sont élevées du fait de la cohabitation forcée du fer et du carbone.

##### 2.4.3.2.3 Refroidissement intermédiaire

La diffusion du carbone se produit partiellement. L'austénite peut se transformer en bainite qui est constituée de ferrite sursaturée en carbone et de cémentite. L'austénite peut également se transformer en un mélange de plusieurs constituants (ferrite, perlite, bainite, martensite) en fonction de la composition de l'acier et des conditions de traitement.

#### 2.4.3.3 Réchauffage après trempe

C'est le revenu après une trempe martensitique. Cela permet d'adoucir la structure fragile de la martensite. La diffusion du carbone se met en marche et la martensite se transforme en ferrite et en cémentite tout en conservant cette forme aiguilletée.

#### 2.4.3.4 Les différents traitement thermiques

Ils sont intéressants à partir de 0,2% de carbone.

##### 2.4.3.4.1 Le recuit

On chauffe dans le domaine d'austénitisation ( $\theta_\gamma+50^\circ\text{C}$ ) et on refroidit très lentement (dans le four). Il permet d'atteindre complètement l'état d'équilibre. Si le matériau présente un point de transformation, il peut y avoir régénération. En effet, pratiqué après soudage, il permet d'éliminer les structures grossières de certains procédés (Vertical Sous Laitier).

##### 2.4.3.4.2 La normalisation

On chauffe dans le domaine d'austénitisation ( $\theta_\gamma+50^\circ\text{C}$ ) et on refroidit à l'air libre (en dehors du four). Cela permet de se rapprocher de l'état d'équilibre. C'est presque un trempé à l'air (attention au carbone équivalent). Par rapport au recuit, on obtient une taille de grains plus petite et moins de cémentite.

#### 2.4.3.4.3 La trempe

On chauffe dans le domaine d'austénitisation et on trempe le métal dans un bain à basse température. On place le métal dans un état hors équilibre.

#### 2.4.3.4.4 Le revenu

La température de revenu est inférieure à A1 (727°C) et situe généralement vers 500°C. Il permet au métal de revenir partiellement vers une structure d'équilibre.

#### 2.4.3.4.5 Le détensionnement

C'est un revenu qui a pour but de détensionner le matériau. Il se pratique entre 550°C et 650°C.

### 2.4.4 Les traitements thermomécaniques

#### 2.4.4.1 L'érouissage

C'est une déformation plastique à froid qui multiplie les dislocations dans le réseau et allonge la forme des grains. C'est un état hors équilibre. En ce qui concerne les propriétés mécaniques, il entraîne ↗  $R_e$  et  $R_m$ , ↘ A% et K.

#### 2.4.4.2 La recristallisation

Elle intervient lors du chauffage d'un métal éroui. La diffusion permet aux atomes de retrouver des positions d'équilibre ce qui entraîne la formation de nouveaux grains non érouis plus petits et la disparition des dislocations. Il faut satisfaire à 2 conditions :

- Il faut un taux d'érouissage critique ( $\approx 5\%$ )
- Il faut une température de traitement de l'ordre de  $\frac{1}{2}\theta_f$ .

Ce processus entraîne ↘  $R_e$  et  $R_m$ , ↗ A% et K par rapport aux propriétés du matériau brut d'érouissage.

### 2.4.5 Les éléments d'addition

Rôle des éléments d'addition et d'alliage :

- Combattre les impuretés en les fixant chimiquement (limiter les effets néfastes des impuretés)
- Améliorer les caractéristiques mécaniques ou apporter des caractéristiques particulières

Trois effets métallurgiques principaux :

- Effet de soluté : Carbone, Silicium, Cuivre, Manganèse, Molybdène, Nickel

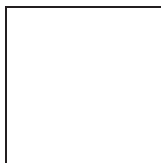
- Effet carburigène : Niobium, Titane, Vanadium, Tungstène, Molybdène, Chrome, Manganèse, Fer, ces éléments durcissent l'acier et améliorent la résistance à chaud
- Effet trempant : Carbone, Manganèse, Molybdène, Chrome, Silicium, Nickel

Exemples :

- Manganèse : désulfurant
- Silicium : calmant, désoxydant, combat les effets négatifs de l'oxygène
- Aluminium : anti-vieillessement (dénitrurant), calmant, désoxydant
- Chrome, Molybdène : tenue au fluage
- Nickel : tenue à froid, augmente la ductilité
- Titane, Vanadium, Niobium : désoxydant, dénitrurant, dispersoïde (carbures, nitrures)
- Carbone : durcissement des aciers.
- Chrome, Silicium, Molybdène, Titane : éléments alphagènes, ils tendent à augmenter le domaine de la ferrite et à supprimer les points de transformation.
- Nickel, Azote, Carbone, Manganèse : éléments gammagènes, ils tendent à augmenter le domaine de l'austénite et à abaisser les points de transformation.

#### 2.4.6 L'effervescence

C'est un dégagement gazeux qui peut se produire lors de l'opération de soudage avec des aciers mal élaborés. En effet, on observe un dégagement de CO dans le bain de fusion :



Il faut surveiller la quantité d'oxygène présente dans l'acier. Ces aciers sont dits non soudables. Cela se produit sur les aciers non alliés et les aciers au CrMn. Lors de l'élaboration de l'acier, on ajoute de l'Al et du Si qui vont piéger l'O<sub>2</sub> présent dans la coulée en formant Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et SiO<sub>2</sub>. C'est le calmage de l'acier.

Les silicates surnagent et sont éliminés avec les crasses. En revanche, l'alumine va former de fins précipités dans la matrice lors de la solidification ce qui va bloquer la croissance des grains et éviter la formation de trop gros grains.

### 2.4.7 Les ségrégations

Lors de la solidification d'un acier, on peut observer 2 phénomènes de ségrégation : la majeure et la mineure.

#### 2.4.7.1 Ségrégation majeure

C'est la concentration dans la partie liquide lors de la solidification de composés à bas point de fusion. Ce sont en général les impuretés (S, P, B, N, O). C'est une ségrégation à l'échelle macroscopique.

#### 2.4.7.2 Ségrégation mineure

C'est la concentration de composés à bas point de fusion dans les espaces interdendritiques. C'est une ségrégation à l'échelle microscopique.

#### 2.4.7.3 Facteurs de ségrégation

Les facteurs favorisant la ségrégation sont les suivants :

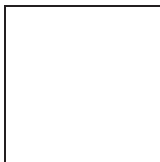
- Teneur en impuretés (S, P, B)
- Augmentation de l'intervalle de solidification (certains éléments d'alliage augmentent cet intervalle, c'est aussi le cas des impuretés)
- Vitesse de solidification (vitesse de soudage aussi)
- Volume de la partie liquide (volume du bain de fusion, si le volume augmente, la concentration en impuretés augmente)

## 2.5 Aspect thermique du soudage

### 2.5.1 Principe

Le soudage se caractérise par :

- une chauffe rapide  $\Rightarrow$  des traitements thermiques proches de la trempe
- une chauffe locale et concentrée  $\Rightarrow$  des traitements thermiques locaux
- un refroidissement rapide  $\Rightarrow$  accentuation des phénomènes de trempe en fonction de la géométrie de la pièce

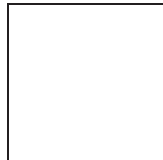


-

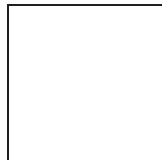
## 2.5.2 Les facteurs essentiels du cycle thermique

Les facteurs sont les suivants :

- Facteurs liés à la source :
  - o La puissance spécifique maximale de la source de chaleur en  $W/mm^2$  :

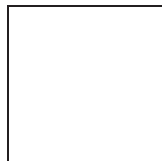


- o L'énergie linéaire de soudage en  $J/cm$  :



avec  $V$  la vitesse de soudage en  $cm/min$

- o Le rendement donc l'énergie équivalente en  $J/cm$  :



avec  $\mu$  rendement du procédé et  $k$  rendement du type de joint

- Facteurs liés à la pièce :
  - Epaisseur
  - Préparation des bords
  - Type de joint
- Facteurs liés aux cycles thermiques :
  - Vitesse de chauffage
  - Température maximale atteinte ( $\theta_m$ )
  - Temps de séjour au-delà d'une température donnée ( $T_s$ )
  - Vitesse de refroidissement ( $TR_{8/5}$ )
  - Température initiale ( $\theta_0$ )

- Facteurs liés à la matière :
  - o Conductivité thermique (quantité de chaleur que peut transporter un matériau par seconde)
  - o Capacité thermique (quantité d'énergie nécessaire pour augmenter de 1°C un volume de 1cm<sup>3</sup> de matière)

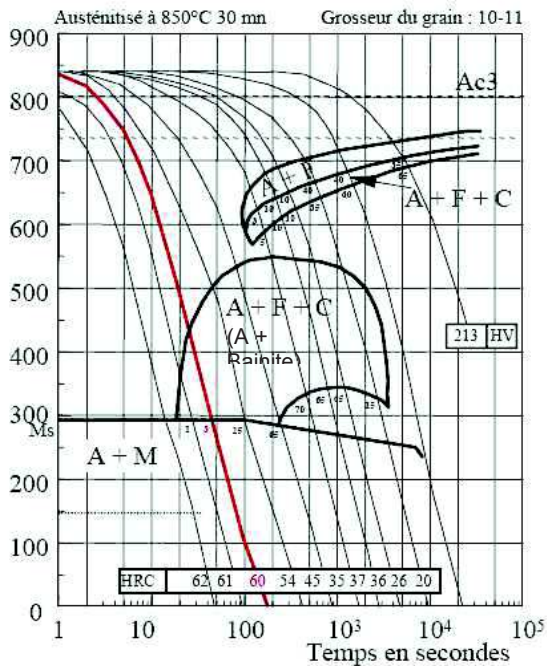
### 2.5.3 Diagramme TRC et TRCS

Par exemple dans le cas des aciers, on utilise les diagrammes TRC et TRCS. Le diagramme TRC résume les résultats d'un refroidissement en continu tel qu'il a lieu lors d'une trempe dans les différents milieux tels que l'eau, l'huile, l'air. Ils sont établis pour une austénitisation pendant ½ heure. Ces diagrammes, permettent de trouver :

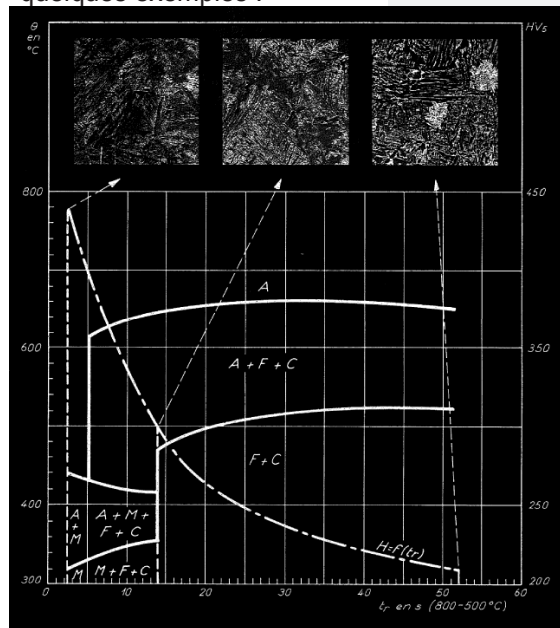
- La microstructure qui s'établi à une vitesse de refroidissement donnée,
- Le temps après lequel la transformation commence et se termine
- La dureté qui en résulte pour le matériau

Le diagramme TRCS (S pour soudage) à été élaboré pour tenir compte des températures spécifiques au soudage (température élevée pendant un laps de temps plus court) et il permet d'apprécier la structure sous cordon dans la ZL qui va apparaître lors du refroidissement. Il est fonction du temps de refroidissement entre 800°C et 500°C TR<sub>8/5</sub>.

C	Mn	Si	S	P	Ni	Cr	Mo	Cu
0,52	0,60	0,40	0,011	0,013	0,17	1,00	0,22	0,38



Il existe un diagramme par nuance d'acier dont voici quelques exemples :



TRCS

Diagramme

Diagramme TRC

Récapitulatif :

	Larg. ZAT	$\theta_m$	$T_s$	$TR_{8/5}$
E soudage ↗	↗	↗	↗	↗
$P_{sm}$ ↗	↘	↗	↘	↘
Epaisseur ↗	↘	↘	↘	↘
Nb passes ↗	↘	↘	↘	↘
$\theta_0$ pièce ↗	↗	↗	↗	↗
Dispersion ↗	↘	↘	↘	↘

## 2.6 les différentes zones d'une soudure

### 2.6.1 La ZF

C'est la zone fondue. Sa composition chimique du métal fondu évolue en fonction de :

- Réactions au sein du métal liquide (volatilisation, réactions chimiques)
- Réactions entre le métal liquide et le milieu environnant (gaz de protection ...)
- Dilution.

Lors de la solidification plusieurs phénomènes entrent en ligne de compte pour la formation des grains :

- La diffusion qui entraîne une ségrégation (le liquide s'enrichit en impuretés lors de l'avance du cordon)
- La surfusion constitutionnelle qui entraîne une solidification dendritique avec des cristaux équiaxés et une ségrégation interdendritique.



Le soudage en plusieurs passes conduit aux observations suivantes :

- C'est au voisinage de la 1ère passe que l'on observe les cycles thermiques les plus sévères.
- Suivant la disposition des passes une même température  $\theta$  peut être dépassée deux ou plusieurs fois. La structure finalement observée dans cette région est le résultat de la succession des cycles thermiques correspondants (revenu, surchauffe ...).
- Les soufflures apparaissent dans la zone fondue lors de la présence d'une bulle de gaz dans le métal liquide et si la vitesse de solidification > la vitesse de dégazage ( $H_2$ , acier effervescent, volatilisation d'éléments ...)

### 2.6.2 La ZAT

C'est la zone affectée thermiquement. C'est une région où la température a été inférieure à la température de fusion et supérieure à la plus basse température de transformation métallurgique.

Les effets du chauffage peuvent entraîner ce type de transformation :

- T°C de mise en solution de précipités (durcissement structural)
- T°C de recristallisation pour un métal écroui
- T°C de transformation allotropique
- T°C d'austénitisation d'un métal de base normalisé ou recuit
- T°C de revenu d'un métal trempé
- T°C de sur-revenu d'un métal trempé-revenu
- T°C de surchauffe pour un métal de base sans transformations (Inox ferritiques et austénitiques, alu, cuivre ...)

Les effets du refroidissement entraînent généralement un risque de trempe plus particulièrement dans la zone de liaison entre la ZAT et la ZF car les grains sont plus gros et la vitesse de refroidissement est grande.

C'est pourquoi on utilise les courbes TRCS (TRC Soudage) avec les duretés sous cordon afin d'évaluer les structures métallurgiques en présence.

Lors de la réalisation de soudures multipasses, on peut constater les phénomènes suivants :

- Les passes sont de moins en moins trempantes car la pièce est préchauffée par les passes successives
- Les passes qui peuvent présenter une structure de trempe sont adoucies par revenu par les passes suivantes

Donc la dureté est plus importante dans la ZL de la première passe et elle diminue en allant vers la surface de la pièce.

## 2.6.3 La dilution

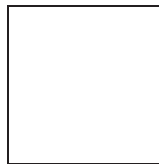
### 2.6.3.1 Définition

### 2.6.3.2 Principe de la dilution

Lors de l'opération de soudage, une partie du métal ou des métaux de bases est fusionnée par la source de chaleur et se mélange au métal déposé pour former la zone fondue de la soudure.

### 2.6.3.3 Mesure de la dilution

Le **taux de dilution** donné en pourcentage est le rapport entre la somme des volumes des métaux de bases fondus et celui de la somme de l'ensemble de la zone fondue, du métal d'apport fondu A et des métaux de bases fondus B et C. Le pourcentage est déterminé à partir d'une **coupe macrographique**.



Le taux de dilution varie suivant plusieurs facteurs dont le procédé de soudage utilisé :

- |                                |                       |
|--------------------------------|-----------------------|
| - Procédé TIG (141)            | dilution de 15 à 30 % |
| - Procédé ARC E.E. (111)       | dilution de 10 à 35 % |
| - Procédé MAG fil nu (135)     | dilution de 20 à 40 % |
| - Procédé MAG fil fourré (136) | dilution de 20 à 40 % |
| - Procédé A.S.F. (121)         | dilution de 60 à 80 % |

Le taux de dilution d'un soudage sans métal d'apport est de 100 % (le métal fondu n'est constitué qu'avec le métal de base) et celui d'un brasage ou d'un soudo-brasage est de 0 % (il n'y a pas fusion des bords). La dilution varie suivant la géométrie des bords à souder et le type de préparation. Elle varie aussi suivant l'énergie de soudage appliquée (intensité, tension et vitesse de soudage).

#### 2.6.3.4 Application de la dilution à travers quelques exemples

##### 2.6.3.4.1 Importance du taux de dilution

Le taux de dilution a une importance non négligeable sur la soudabilité d'un matériau par un apport plus ou moins important d'impuretés contenues dans le métal de base et diluées dans le métal fondu. La détermination du pourcentage de dilution est primordiale lors de l'assemblage par soudage de matériaux dissemblables (hétérogènes ou mixtes) et d'aciers plaqués afin de connaître les structures métallurgiques des zones fondues. Elle permet de sélectionner le type de métal d'apport à utiliser pour optimiser la soudabilité métallurgique du joint à partir du diagramme de Schaeffler ou du diagramme de De Long. Le taux de dilution d'un assemblage hétérogène acier au carbone et acier inox doit être parfaitement adapté afin que le métal fondu contienne suffisamment de ferrite pour limiter le risque de fissuration à chaud mais aussi suffisamment d'austénite pour limiter le risque de fissuration à froid.

##### 2.6.3.4.2 Dilution et soudures hétérogènes

Un assemblage soudé est dit hétérogène lorsqu'il met en jeu des métaux de base et des métaux d'apport dont les compositions chimiques sont assez différentes. Dans le cas contraire, il est dit homogène. L'assemblage peut être hétérogène, soit par nature, c'est-à-dire par conception, en fonction des conditions de service, comme c'est le cas des rechargements, soit aussi en raison de la nécessité de choisir un métal d'apport différent de l'un ou des deux métaux de base pour obtenir, malgré ou grâce à la dilution, un assemblage soudé possédant une bonne soudabilité et les propriétés recherchées. Ceci, dans le cas où ces propriétés ne pourraient pas être obtenues avec un métal d'apport constituant un assemblage homogène. **Avec un métal d'apport austénitique et une dilution appropriée, le métal fondu n'est pas sujet à la trempe.**

Un premier exemple de soudure hétérogène est celui mettant en œuvre un métal de base en acier trempant soudé avec un métal d'apport en acier inoxydable austénitique au chrome-nickel. Le choix de ce métal d'apport en acier inoxydable au lieu d'un métal d'apport en acier voisin de celui du métal de base permet de se dispenser du préchauffage tout en évitant les risques de fissuration à froid (fissuration par l'hydrogène) pouvant être causé par la présence conjuguée d'une structure de trempe (structure fragile), de contraintes et d'hydrogène. En effet, avec un métal d'apport austénitique et une dilution appropriée, le métal fondu n'est pas sujet à la trempe, il est assez ductile pour diminuer les contraintes et il permet de garder l'hydrogène dans la zone fondue afin qu'il ne diffuse pas en dehors de celle-ci et en particulier dans la zone thermiquement affectée (ZAT) du métal de base. Ce faisant, les trois facteurs associés à la fissuration à froid sont donc contrôlés. Un autre cas de soudure hétérogène peut concerner le soudage bout à bout d'un tuyau en acier au carbone ou faiblement allié et d'un tuyau ou d'une bride en acier inoxydable (exemple : inox 304 ou 316). Dans les cas de soudage hétérogène acier au carbone-acier inox, il faut que le taux de dilution soit bien choisi afin que le

métal fondu contienne suffisamment d'austénite pour éviter la fissuration à froid, mais aussi suffisamment de ferrite pour éviter la fissuration à chaud. Pour une valeur de dilution et un métal de base donnée, la plage de composition chimique répondant à ces critères permet de déterminer la composition chimique du métal déposé qui doit résulter de la fusion du métal de base et du métal d'apport. Avec les aciers inoxydables au chrome-nickel, cette détermination peut être faite en se servant des diagrammes de Schaeffler ou de De Long qui utilisent les notions de chrome-équivalent et de nickel-équivalent et qui permettent de calculer à l'aide d'une représentation graphique simple la composition chimique du métal fondu résultant de la fusion d'un métal de base et d'un métal d'apport donnés et d'une valeur choisie du taux de dilution.

C'est aussi le cas de la soudure d'un inox 316L qui est complètement austénitique avec un taux d'impuretés en S et P supérieur à 0.015%. En effet, on essaye d'obtenir une ZF avec 5 à 10% de ferrite (c'est ce qui va constituer l'hétérogénéité). On va employer un métal d'apport qui va permettre d'amener cette ferrite. La dilution sera utilisée pour placer la composition de la ZF sur le diagramme de Schaeffler et vérifier qu'elle comportera 5 à 10% de ferrite (au-delà on risque de dégrader certaines propriétés, notamment la tenue cryogénique). On utilisera la règle des segments inverses pour positionner la composition de la ZF en fonction de la composition du MB, du MA et de la dilution.

## 2.7 Acier non et faiblement alliés

### 2.7.1.1 Groupe 1

**Acier non allié** = fer + carbone < 2% et avec Mn < 1.36% et autre > 0.2%

- 1<sup>er</sup> lettre
  - o S pour acier de construction
  - o E pour acier usinable
  - o P pour pression
- Chiffre = Re N/mm<sup>2</sup>
- 2<sup>eme</sup> lettre
  - o N normalisé
  - o Q trempé revenu
  - o G autre
  - o J pour énergie rupture j 27j, K 40j, L 60j
    - R 0,2, 3,, 4, 5, 6 pour 0°, -20°...Ex KR2 ( 40j à -20°)
  - o H emploie à température ambiante
  - o X emploie à température basse et élevée

- W résistant à corrosion atmosphérique
- Z striction garantie sens épaisseur ex +Z25 = striction de 25% garantie

## Groupe 2

### a) Acier non allier avec Mn < 1%

- C carbone
- Chiffre 100 x % carbone ex C38 = 0.38 % carbone

### b) Acier non allier (faiblement) de décolletage avec Mn >= 1% et autre < 5% (?)

- Chiffre 100 x % carbone
- Lettre :
  - o 4 x Cr Co Mn Ni Si W
  - o 10 x Al Be Cu Mo Nb Pb Ta Ti V Zr
  - o 100 x Ce P S
  - o 1000 x B
- Ex 25 Cr Mo4 0.25 C, 1% Cr et un peu de Mo

### c) Acier non allier (faiblement) de décolletage avec Mn >= 1% et autre > 5% (?)

- X suivie
- Chiffre 100 x % carbone
- Lettre et % réel ex X3CrNi18-10 0.03% C , 18% Cr et 10% ni

#### 2.7.1.2 Application

S355 N et S355 M

S= acier de construction

355 = Re= 355 N/mm<sup>2</sup>

N = normalisé, laminage donc léger écrouissage

M = laminage thermomécanique donc à grain fin

Ceq environ 0.4

#### 2.7.2 Définition

Ce sont les aciers dont le carbone est inférieur à 2% et dont chaque élément d'alliage n'est pas supérieur à 5%. Pour les aciers fortement alliés, un ou plusieurs des éléments d'alliage est supérieur à 5%. Les risques encourus lors du soudage d'aciers non ou faiblement alliés sont les fissures. Elles peuvent avoir plusieurs origines :

- Fissuration à froid
- Vieillessement

- Arrachement lamellaire
- Fissuration au réchauffage
- Fissuration à chaud

### 2.7.3 Fissuration à froid

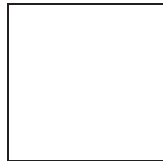
Les risques encourus lors de soudage d'aciers faiblement alliés sont les fissures transgranulaires ou inter-granulaires en ZAT ou ZF, elles apparaissent en dessous de 150 °C et provoquent des ruptures fragiles. Elles peuvent être longitudinales ou transversales au cordon et elles s'initient préférentiellement dans les régions présentant un effet d'entaille géométrique (zones de concentration de contraintes).

#### 2.7.3.1 Les facteurs de la fissuration à froid

Ce sont les effets conjugués de 3 facteurs qui génèrent la fissuration à froid :

- L'intensité des contraintes résiduelles de soudage
- La teneur en hydrogène dans la soudure
- La présence d'une microstructure fragile (ex. : martensite)

Il faut une combinaison de ces 3 facteurs avec un niveau minimal pour générer cette fissuration. Donc il suffit d'éliminer un facteur pour se préserver de ce risque.



#### 2.7.3.1.1 Les contraintes résiduelles de soudage

Elles ont pour origine l'effet du chauffage localisé par l'opération de soudage et le bridage de la pièce. La dilatation et le retrait dans la zone localisée de soudage sont gênés par la masse importante de la pièce non chauffée. Cela génère l'apparition de contraintes dites contraintes résiduelles de soudage. Elles sont d'autant plus importantes que le taux de bridage de la pièce est élevé (rigidité, fortes épaisseurs, soudure encastrée, forte limite élastique).

Elles sont au plus égales à la limite élastique du matériau (au-delà plastification localisée pour accompagner le retrait lors du refroidissement). Elles sont maximales en fin de refroidissement car à ce moment là le retrait et la limite élastique sont au maximum (en effet  $R_e \approx 0$  à 650°C).

Ce sont surtout les contraintes transversales qui sont à l'origine des fissures car elles sont accentuées par les effets d'entaille.

Les facteurs qui augmentent les contraintes sont :

- Un module d'élasticité élevé (forte raideur  $\Rightarrow$  bridage)
- Une forte épaisseur (épaisseur élevée  $\Rightarrow$  bridage)

- Un encastrement proche de la soudure ( $\Rightarrow$  bridage)
- Coefficient de dilatation élevé ( $\Rightarrow$  retrait)
- Une hauteur de gorge faible ( $\Rightarrow$  contrainte car  $\sigma=F/S$ )

### 2.7.3.1.2 L'hydrogène

L'hydrogène est plus soluble dans le métal liquide que dans la phase solide. De plus, il est un peu plus soluble dans la phase  $\gamma$  que dans la phase  $\alpha$ . Lors de la solidification, la solubilité de l'hydrogène diminue brutalement lors de la transformation en phase  $\alpha$ . Cet hydrogène atomique  $H^+$  va diffuser vers l'austénite de la ZAT et provoquer la fragilisation.

En effet, l'hydrogène atomique  $H^+$  chemine facilement dans le réseau atomique par sa petite taille.  $H^+$  ségrège dans les lacunes et les dislocations et se transforme en  $H_2$  ce qui entraîne des pressions élevées qui viennent s'ajouter aux contraintes existantes.

Cet hydrogène provient de la décomposition de l'eau et a plusieurs sources :

- L'humidité des enrobages
- L'humidité de l'air
- L'hydrogène contenu dans le métal de base et le métal d'apport (faible)
- L'humidité ou les traces d'hydrogène en surface des pièces (humidité, graisses ...)

L'hydrogène actif pour la fissuration à froid est de 2 types :

- Hydrogène diffusible (c'est l'hydrogène qui pourra dégazer)
- Hydrogène résiduel

En fonction des procédés de soudage, on apporte des taux d'hydrogène diffusibles différents :

- SAEE électrode cellulosique >20 ml/100g
- SAEE électrode rutile 15 ml/100g
- SAEE électrode basique 5 ml/100g
- MAG Fil fourré rutile 13 ml/100g
- MAG fil fourré basique 4 ml/100g
- MAG fil nu sous  $CO_2$  2 ml/100g
- TIG négligeable

### 2.7.3.1.3 Microstructure fragile

C'est essentiellement la présence d'une structure de trempe (martensite ou bainite). Dans de très rares cas la fissuration à froid se développe dans la ferrite fragilisée par une taille de grain très importante.

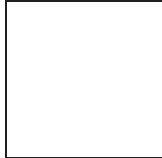
Les structures obtenues dans la zone soudée dépendent de :

- Le cycle thermique du soudage et notamment la vitesse de refroidissement (pour la trempe)
- La composition chimique de l'acier

En ce qui concerne la vitesse de refroidissement et la trempabilité, on utilise des courbes TRCS afin de déterminer la structure métallurgique de la zone de liaison en fonction du  $TR_{8/5}$ .

Pour apprécier la trempabilité d'un acier on calcule le carbone équivalent. Plus  $C_{\text{éq}}$  est plus la trempabilité est élevée.

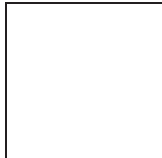
Sa formule est :



Cette formulation est valable pour un  $C_{\text{éq}}$  compris entre 0.3 et 0.7. De plus il faut des compositions chimiques selon ces pourcentages :  $0.05 < \%C < 0.25$ ,  $\%Si < 0.8$ ,  $\%Mn < 1.7$ ,  $\%Cr < 0.9$ ,  $\%Cu < 1$ ,  $\%Ni < 2.5$ ,  $\%Mo < 0.75$ ,  $\%V < 0.2$ .

Il existe d'autres formulations pour le  $C_{\text{éq}}$  et notamment le CET qui provient des essais de fissuration à froid réalisés.

Sa formulation est la suivante :



Ses limitations sont les suivantes :  $0.05 < \%C < 0.32$ ,  $\%Si < 0.8$ ,  $0.5 < \%Mn < 1.9$ ,  $\%Cr < 1.5$ ,  $\%Cu < 0.7$ ,  $\%Ni < 2.5$ ,  $\%Mo < 0.75$ ,  $\%V < 0.18$ ,  $\%Nb < 0.006$ ,  $\%Ti < 0.12$ ,  $\%B < 0.005$ . Il sert à déterminer la température de préchauffage. Les autres formulations servent par exemple à estimer la dureté en ZL en fonction du  $TR_{8/5}$ .

#### **2.7.4 Mécanisme de la fissuration à froid**

La fissuration en ZAT est plus fréquente qu'en ZF et elle suit le mécanisme suivant :

- Introduction d' $H_2$  dans le bain de soudage
- Solidification de la ZF en phase  $\gamma$  avec hydrogène dissous important



- Transformation de la ZF en phase  $\alpha$  et cémentite et diminution de la solubilité de l'hydrogène
- Diffusion de l'hydrogène de la ZF vers la ZAT dont la limite de solubilité n'est pas atteinte
- Transformation martensitique dans la ZAT enrichie en hydrogène
- Fissuration en ZAT dès que la martensite, les contraintes et l'hydrogène sont réunis en quantité suffisante.

Ce phénomène peut se produire jusqu' à 48 heures après le soudage. Donc si on veut effectuer des contrôles (magnétoscopie + ultrasons pour tout déceler), il faut attendre ce laps de temps avant de les effectuer.

De nombreux essais ont été créés afin de vérifier si les conditions de soudage envisagées entraînent une fissuration à froid. Ce sont les essais TEKKEN, CTS et IMPLANT.

#### 2.7.4.1 Prévention

##### 2.7.4.1.1 Remarques générales

Il faut limiter le bridage pour éviter l'apparition de contraintes résiduelles de soudage importantes :

Bridage libre

- Optimisation des séquences de soudage
- Métal d'apport à faible limite élastique, donc forte ductilité

On réduit au maximum la quantité d'hydrogène dissous :

- Choix d'un procédé de soudage type TIG ou MAG ou SAEE électrodes basiques
- Consignes de soudage (arc court, éviter les courants d'air, étuvage si nécessaire ...)
- Dégourdissage à 80°C des pièces pour éliminer l'humidité
- Post-chauffage à 150°C au moins pour favoriser et accélérer le dégazage de l'hydrogène

Il est possible de réduire les risques de formation d'une structure fragile en diminuant la vitesse de refroidissement :

- Modifier la géométrie de la pièce (réduire les dispersions de chaleur)

- Augmenter l'énergie de soudage
- Préchauffer la pièce

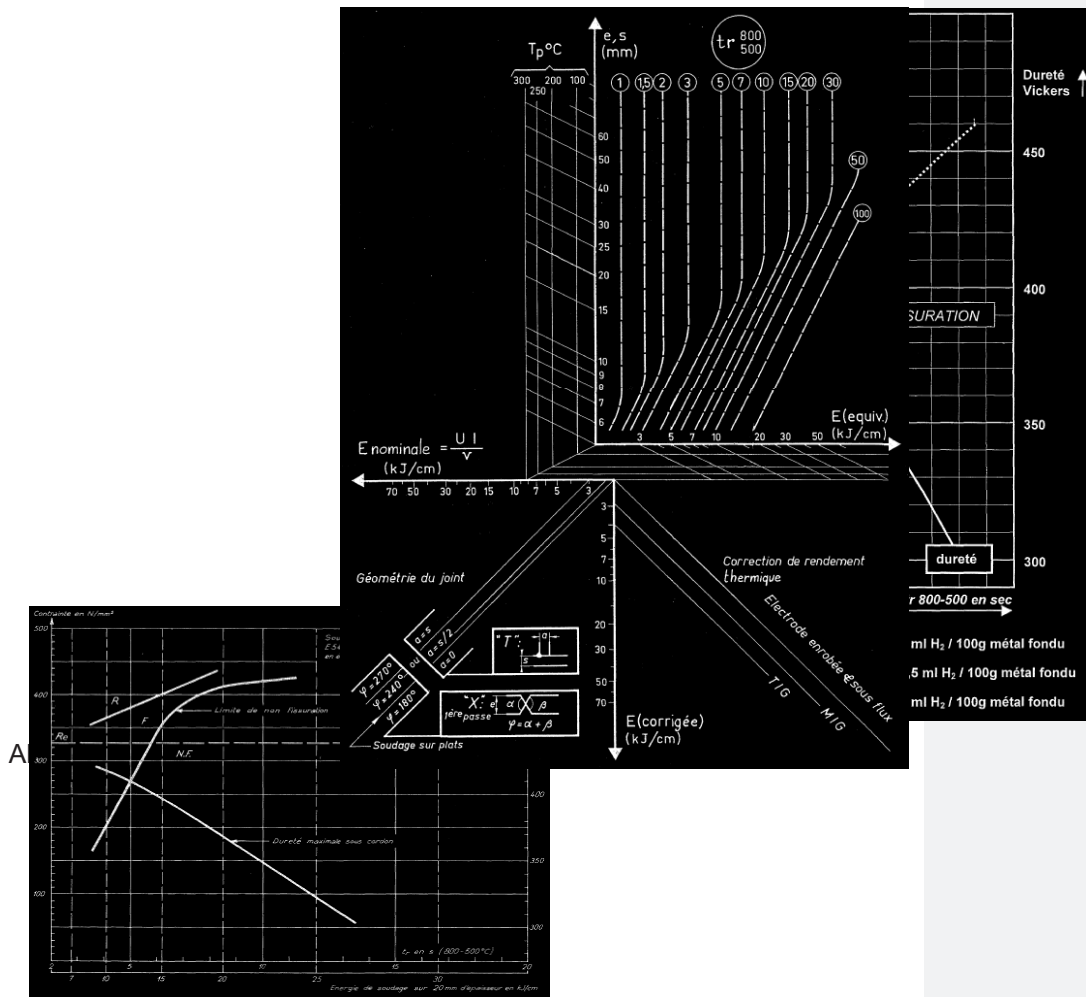
#### 2.7.4.1.2 Calcul du C<sub>éq</sub>

Etant donné que l'on ne peut pas agir sur le bridage, on va essayer de réduire la fragilisation par hydrogène et par la structure fragile. En calculant le carbone équivalent et en utilisant les courbes TRCS, on peut évaluer les solutions à mettre en œuvre.

Si  $C_{éq} < 0.35$ , il n'y a pas de risques de formation de martensite, donc **pas de fissuration à froid**.

Si  $0.35 < C_{éq} < 0.45$ , le plus simple est d'éviter la formation de la structure fragile en augmentant le TR<sub>8/5</sub>. On augmente d'abord **l'énergie de soudage**. Si cela ne suffit pas ou si ce n'est pas réalisable, on effectue un **préchauffage** entre 100 et 300°C en général. On utilise les courbes de fissuration à froid (si on les a) pour déterminer un TR<sub>8/5</sub> qui se situe dans une zone de non fissuration avec une dureté sous cordon acceptable (inférieure à 350 Hv). Puis à l'aide de l'abaque IRSID on détermine l'énergie de soudage en fonction du procédé et du type de joint pour obtenir ce TR<sub>8/5</sub>. Cela nous permet aussi de déterminer la température de préchauffage si nécessaire

Si  $C_{éq} > 0.45$ , il y a forcément formation d'une structure fragile. Donc on va essayer de réduire au maximum l'hydrogène afin de ne pas fissurer. On utilise un procédé à bas hydrogène diffusible (TIG). Si ce n'est pas possible, on réalise un **post-chauffage** qui permet de dégazer l'hydrogène au refroidissement. Cela s'effectue à une température de 150 à 300°C en général pendant un temps défini dans les abaques. Cela implique la réalisation d'un préchauffage. Ensuite on peut effectuer un revenu de la pièce afin d'adoucir la martensite. Si on veut s'affranchir de ces pré-post-chauffage, on peut utiliser un **métal d'apport austénitique** (inox austénitique, inconel ...) qui capte l'hydrogène avant sa diffusion dans la ZAT (solubilité relativement importante). De plus la ZF sera plus ductile que le MB, ce qui permet d'absorber les déformations et de moins solliciter la martensite sous cordon. Les inconvénients sont des propriétés mécaniques différentes ( $R_e \curvearrowright$ , dilatation différente  $\Rightarrow$  fatigue thermique, fragilisation thermique par phases  $\sigma$ ). Etant donné la diminution de  $R_e$ , on sera amené à augmenter la section des cordons de soudure en angle et à augmenter les épaisseurs des pièces pour les soudures en bout à bout à plat.



2 types de diagrammes de fissuration en fonction du  $TR_{8/5}$

## 2.7.5 Vieillessement

### 2.7.5.1 Définition

C'est une perte de ductilité pour les aciers de structure ferritique ou ferrito-perlitique ce qui entraîne une rupture fragile par clivage. Le vieillissement est réversible, mais il se reproduit dans le temps.

### 2.7.5.2 Cause

C'est la précipitation de nitrures de fer  $Fe_4N$  dans la ferrite.

### 2.7.5.3 Facteurs

Il y a plusieurs facteurs :

La composition chimique :

- $N > 0.01\%$
- Manque de composés tels que Al, Si ou B pour former préférentiellement d'autres nitrures non fragilisants.

Mise en solution d'azote lors du soudage au-delà de sa solubilité à température ambiante

- Traitement thermique vers  $200^{\circ}\text{C}$
- Métal écroui.

### 2.7.5.4 Moyens de prévention

Il faut limiter l'introduction d'azote dans le bain de fusion en évitant les arcs longs et les courants d'air.

Il vaut mieux utiliser des métaux de base avec  $N < 0.01\%$  et  $Al > 0.02\%$ .

## 2.7.6 Arrachement lamellaire

### 2.7.6.1 Définition

Ce sont des fissures qui affectent les soudures en angle des aciers non alliés sur des produits épais. Les fissures suivent le fibrage de l'acier.

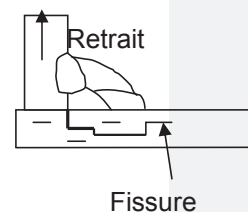
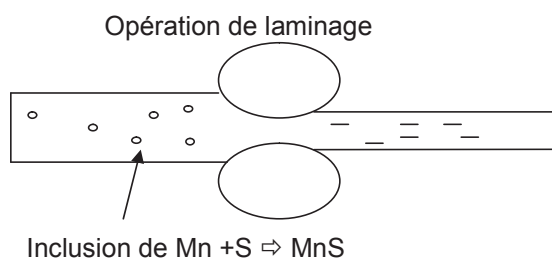
### 2.7.6.2 Cause

C'est la faible résistance de l'acier à la traction dans le sens travers court et sa teneur en impureté (S).

### 2.7.6.3 Facteurs

Il y a deux facteurs :

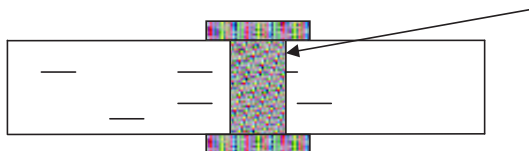
- L'état inclusionnaire du métal de base
- Les contraintes résiduelles du soudage dans le sens travers court.



#### 2.7.6.4 Moyens de prévention

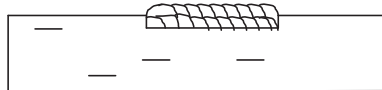
Il y a principalement trois solutions :

- Utiliser un métal de base non sensible à l'arrachement lamellaire :
  - o Acier de qualité Z15, Z25 ou Z35 ce qui garantit 15, 25 ou 35% d'allongement dans le sens travers court



Eprouvette de traction dans le sens travers court. Les têtes de l'éprouvette sont rapportées.

- Contrôle des tôles par ultra-sons pour vérifier l'état inclusionnaire
- On réalise un beurrage avant soudure ce qui permet de répartir les contraintes sur une surface plus importante



- On diminue les contraintes de soudage dans le sens travers court :
- Conception de la pièce en évitant l'assemblage en angle
- Réduire le taux de bridage
- Optimisation de la séquence de soudage
- Soudage en passes larges (moins de contraintes) en essayant d'orienter la pénétration vers le centre du métal de base afin que les contraintes ne soient pas  $\perp$  aux inclusions.
- Métal d'apport de faible résistance.

### 2.7.7 Fissuration au réchauffage

#### 2.7.7.1 Définition

C'est un phénomène qui intéresse les aciers faiblement alliés résistants à chaud. Elle se produit entre 350°C et 700°C sous la forme de fissures intergranulaires en ZAT ou en ZF. Cela se produit généralement lors d'un traitement thermique ou lors de soudures multipasses.

#### 2.7.7.2 Cause

Elles sont de deux natures :

- Manque de ductilité en ZAT ou en ZF à haute température

- Déformation du métal consécutive au détensionnement.

#### 2.7.7.3 Facteurs

Il y a trois facteurs :

- Contraintes résiduelles de soudage élevées
- Composition chimique de l'acier :
  - o Présence d'impuretés (P, S, Sn, Sb, As)
  - o Présence de certains éléments d'addition (Cr, Mo, V, Nb, B, Al, Cu)
- Structure de l'acier :
  - Gros grains
  - Durcissement dans les grains par précipitation de carbures
  - Ségrégation d'impuretés aux joints de grain.

#### 2.7.7.4 Moyens de prévention

Il n'y a que 4 types de recommandations :

- Acier à faible teneur en impuretés
- Eviter des nuance type Cr+Mo+V
- Limiter les contraintes de soudage :
- Conception de l'assemblage
- Optimisation de la séquence de soudage
- Métal d'apport avec un  $R_e$  inférieur au  $R_e$  de la ZAT
- Parachever les soudures pour éviter les effets d'entaille
- Effectuer localement un traitement de précontrainte par martelage ou grenailage pour annuler localement les contraintes de traction.
- Atténuer les effets de structure en effectuant un recouvrement optimum des ZAT en soudure multipasses.

### 2.7.8 Fissuration à chaud

#### 2.7.8.1 Définition

Elle affecte principalement les inox austénitiques. Mais parfois elle se produit sur des aciers non ou faiblement alliés. Ce sont des fissures interdendritiques qui se forment lors de la solidification en ZF.

#### 2.7.8.2 Cause

Elles proviennent des contraintes durant la solidification et d'un intervalle de solidification important.

#### 2.7.8.3 Facteurs

Ils sont de deux natures :

- Contraintes durant la solidification :
- Coefficient de dilation du MB
- Taux de bridage
- Volume et forme de la ZF
- Caractéristiques mécaniques du métal.
- Ségrégation  $\Rightarrow$   $\nabla$  de l'intervalle de solidification
- Vitesse de soudage  $\nabla \Rightarrow$  une ségrégation  $\nabla$
- Diffusivité des éléments chimiques

#### 2.7.8.4 Moyens de prévention

Ils sont de 2 types :

- Diminuer les contraintes :
- Modifier la conception de l'assemblage
- Optimiser la séquence de soudage
- Réduire le volume du bain de fusion (réduire l'énergie de soudage)
- Modifier le profil des cordons
- Diminuer l'intervalle de solidification :
- Réduire la vitesse de soudage
- Métal de base à faible intervalle de solidification (ex. : alliages eutectiques)

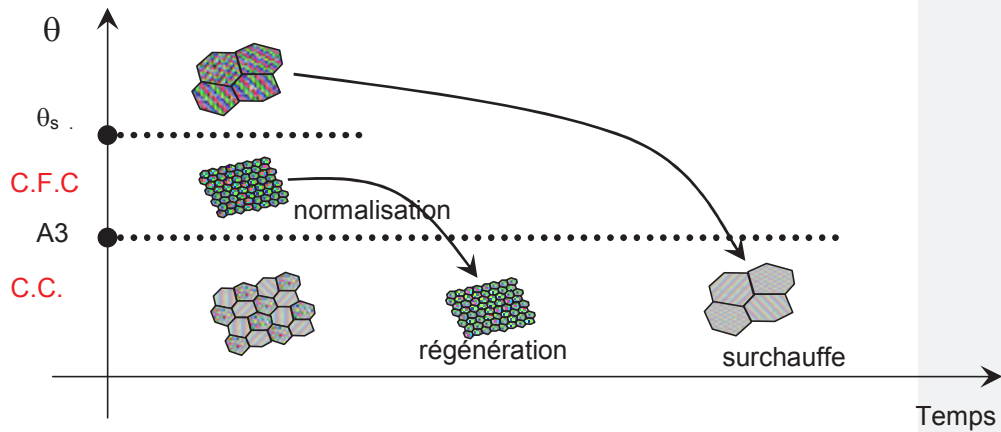
### 2.7.9 Grossissement du grain et surchauffe des aciers :

#### 2.7.9.1 Structure et transformation

Les aciers non alliés et faiblement alliés sont transformables, c'est-à-dire qu'ils changent de structure cristalline avec la température. En dessous d'une température appelée A3 ils sont C.C., au-dessus ils sont C.F.C.

Cette particularité cristalline s'accompagne d'une particularité granulaire : la structure granulaire s'affine. On parle de régénération au alentour de 900°C pour les aciers transformables.

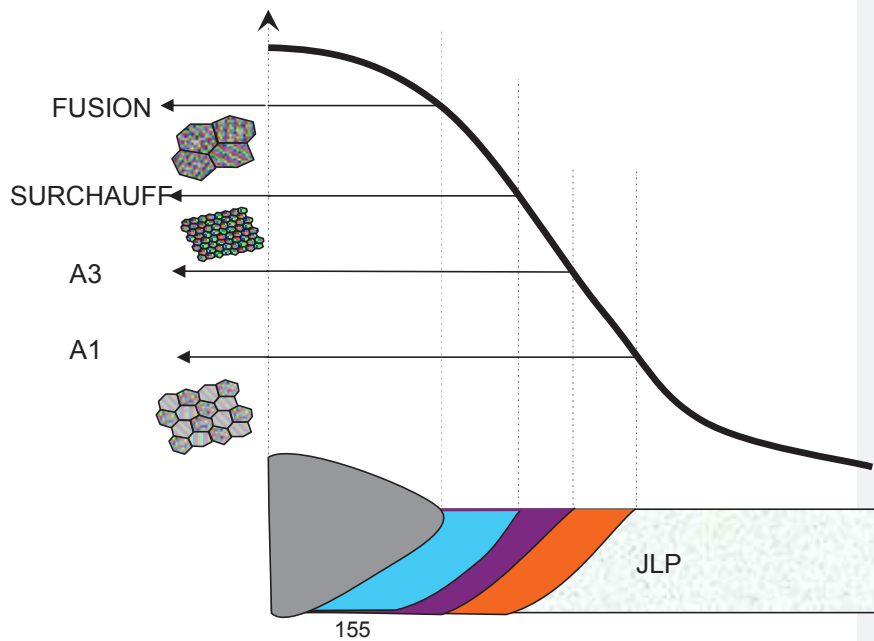
Par contre comme tous les aciers, les aciers transformables sont sensibles à la surchauffe cette température  $\theta_s$  se situe au environ de  $1100^\circ\text{C}$  ( $0.8 \times \theta_f$ ) pour les aciers transformables.



### 2.7.9.2 Transformations au soudage

Les transformations au chauffage du métal de base en ZAT tendent vers l'état d'équilibre, elles dépendent :

- Du comportement métallurgique du métal de base
- Des températures max. localement atteintes
- Des temps de séjour en températures.





Pour un acier non allié recuit avec un refroidissement normal :

- Les régions qui n'ont pas dépassé A1  $\Rightarrow$  structure ferrite + carbure.
- Entre A1 et A3  $\Rightarrow$  ferrite + austénite régénérée (austénitisation partielle au chauffage et régénération partielle au refroidissement).
- Juste au-dessus de A3  $\Rightarrow$  austénite régénérée (austénitisation complète au chauffage et régénération complète au refroidissement).
- Dans les régions sous cordon  $\Rightarrow$  structures austénitiques surchauffées, donc avec un grossissement du grain non négligeable.
- Dans la ZF on a une structure surchauffée avec de gros grains qui proviennent de la surchauffe et de la croissance épitaxiale et héréditaire des grains de la ZL.

Il est possible en augmentant le nombre de passes de terminer avec des passes de soudure dite de régénération afin de limiter la surchauffe en ZL.

Pour un acier non allié recuit avec un refroidissement rapide (trempant) :

- Les régions qui n'ont pas dépassé A1  $\Rightarrow$  structure ferrite + carbure.
- Entre A1 et A3  $\Rightarrow$  Martensite + ferrite + perlite (austénitisation partielle au chauffage et trempe partielle au refroidissement).
- Juste au-dessus de A3  $\Rightarrow$  Martensite (austénitisation complète au chauffage et trempe complète au refroidissement).
- Dans les régions sous cordon  $\Rightarrow$  structures martensitiques grossières en fonction du temps de séjour au-dessus de la température de surchauffe.
- Dans la ZF on a une structure surchauffée avec de gros grains qui proviennent de la surchauffe si le temps de séjour est suffisant.

		ZAT	T° de soudage	T° de refroid	Equilibre métallurg.	Effet de surchauffe	Risques
--	--	-----	---------------	---------------	----------------------	---------------------	---------

Ep. matériaux	↗	↘	↘	↘	↘	↘	Attention acier trempant
	↘	↗	↗	↗	↗	↗	Grossement grain
E. soudage	↗	↗	↗	↗	↗	↗	Grossement grain
	↘	↘	↘	↘	↘	↘	Attention acier trempant
T° préchauffage	↗	↗	↗	↗	↗	↗	Grossement grain
	↘	↘	↘	↘	↘	↘	Att. acier trempant

## 2.8 Les aciers inoxydables

### 2.8.1 Introduction :

Les aciers fortement alliés contiennent au moins un élément > à 1%. Pour qu'un acier soit dit inoxydable, il doit contenir au minimum 10,5% de Cr et maximum 1,2% de C. Le chrome forme une couche passivante avec l'oxygène :  $2Cr + 3/2 O_2 \Rightarrow Cr_2O_3$ .

Le taux de Cr augmente l'inoxidabilité, le Ni renforce cette protection en milieu réducteur, tandis que le Mo et l'N augmentent la résistance à la corrosion par piqures.

### 2.8.2 Les inox martensitiques et ferritiques

#### 2.8.2.1 Influence de la teneur en chrome :

	Inox Martensitique	Inox semi ferritique	Inox ferritique
Cr %	10.5% < Cr < 11.8%	11.8% < Cr < 12.7%	Cr > 12.7%

#### 2.8.2.2 Phase sigma

Elle apparaît entre 800°C et 500°C si Cr > 12%. Cette phase  $\sigma$  fragilise l'inox.

#### 2.8.2.3 Phase alpha prime

Cette phase  $\alpha'$  précipite entre 550°C et 350°C si Cr > 8%. Elle fragilise l'inox c'est pourquoi on parle de fragilité à 475°C.

### 2.8.2.4 Effets métallurgiques des éléments d'alliage

Alphagène $\alpha$	Gammagène $\gamma$	Trempant	Carburigène	Phase $\sigma$
Al				
	C			
	Cu			
Cr		↗↗↗	Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub> ↗↗↗	↗
			Fe Carbure ↗	
P				
Mo		↗↗↗↗	↗↗↗↗	↗
	Mn	↗↗↗↗↗	↗↗	
	N			
Nb			NbC ou NbN ↗↗↗↗↗↗↗↗	
	Ni	↗		
Si		↗↗		↗
V			↗↗↗↗↗↗	
			W ↗↗↗↗↗↗	
Ti			TiC ou TiN ↗↗↗↗↗↗↗↗	

### 2.8.2.5 Classement des alliages :

Martensitiques : totalement austenitisables.

Semi ferritiques ou semi martensitiques : partiellement austenitisables.

Ferritiques : ne sont pas austenitisables. Structure ferritique à toute température.

### 2.8.2.6 Inoxy martensitique

Au-delà de 0.2% de carbone, la dureté augmente. Parfois on ajoute 0.2% d'Al pour affiner les grains.

#### 2.8.2.6.1 Etat de livraison

Ils sont généralement livrés dans 3 états :

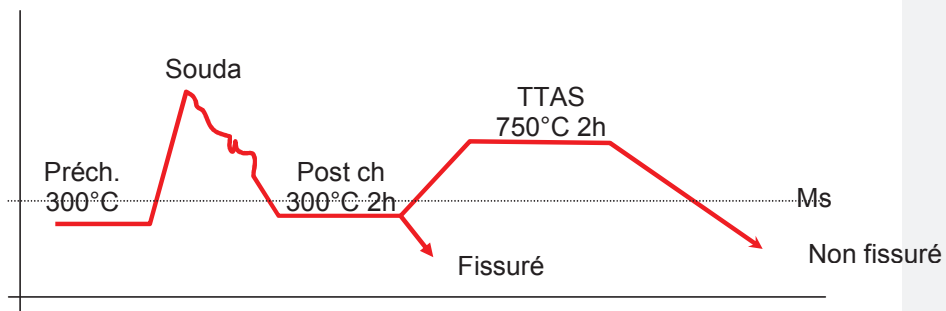
- Trempé à 900°C ⇒ Re ↗ Hv ↗ Kv ↘ (martensite pure)
- Trempé revenu à 650°C ⇒ Re → Hv → Kv ↗ (grâce à l'apparition de ferrite plus plastique que la martensite)
- Recuit à 900°C plusieurs heures refroidissement lent ⇒ Re ↘ Hv ↘ Kv ↗

Attention aux phases fragiles entre 600°C et 300°C. Donc il est conseillé de ne pas faire de revenu dans ces températures et de les refroidir rapidement à l'air calme. Ils sont régénérables 2 fois par traitement d'austénitisation en phase  $\gamma$  et en phase  $\delta$ . Ils se surchauffent aussi 2 fois.

### 2.8.2.6.2 Conditions de soudage

Les inox martensitiques sont sensibles à la fissuration à froid. Dans ce cas précis avec la présence de martensite, on ne peut que jouer sur l'hydrogène : préchauffage, soudage avec forte énergie et procédé à bas hydrogène, post chauffage, traitement thermique (adoucissement de la martensite).

- La dureté n'évoluera pratiquement pas avec la vitesse de refroidissement car la martensite est toujours présente.
- Des abaques permettent de déterminer la température et le temps de maintien du post-chauffage afin d'éviter la fissuration.
- Pour des nuances spéciales, si la température de pré et de post chauffage est de 300°C (ce qui est proche de la  $T^{\circ}$  de transformation martensitique), il faut immédiatement enchaîner le TTAS afin d'éviter la fissuration.



Dans le cas d'une nuance à carbone élevé un TTAS (voir croquis ci dessus) permet de décomposer toute l'austénite en ferrite + carbure afin d'éviter toute présence de martensite ( X2CrMoWV12-1).

Il est aussi possible de réaliser une soudure hétérogène avec un métal d'apport de type inox austénitique ou en alliage de nickel.

### 2.8.2.7 Inox semi-ferritique

#### 2.8.2.7.1 Etat de livraison

Ils sont généralement livrés dans 3 états :

- Trempé à 900°C  $\Rightarrow$  Re  $\nearrow$  Hv  $\nearrow$  Kv  $\searrow$  (martensite pure)

- Trempé revenu à 650°C ⇒ Re → Hv → Kv ↗ (grâce à l'apparition de ferrite plus plastique que la martensite)
- Recuit à 900°C plusieurs heures refroidissement lent ⇒ Re ↘ Hv ↘ Kv ↗

Attention aux phases fragiles entre 600°C et 300°C. Donc il est conseillé de ne pas faire de revenu dans ces températures et de les refroidir rapidement à l'air calme. Ils sont régénérables 1 fois par traitement d'austénitisation et ils se surchauffent une fois en phase δ.

#### 2.8.2.7.2 Conditions de soudage

Ils sont sensibles à la fissuration à froid mais dans une moindre mesure que les inox martensitiques.

Dans le cas d'une soudure homogène :

- Si  $e < 10$  mm pas de préchauffage
- Si  $e > 10$  mm pré et post chauffage avec TTAS

Il est aussi possible de réaliser une soudure hétérogène avec un métal d'apport de type inox austénitique ou en alliage de nickel.

#### 2.8.2.8 Inox ferritique

Ils sont souvent dans des formats de fine épaisseur et ils sont magnétiques.

##### 2.8.2.8.1 Etat de livraison

Ils sont livrés à l'état recuit à 900°C pendant plusieurs heures afin de les recristalliser et d'homogénéiser le taux de Cr et d'éviter la formation de phases  $\sigma$  et  $\alpha'$  qui sont fragilisantes.

Ils ne présentent pas de point de transformation allotropique donc ils ne sont pas régénérables. De plus, ils sont sensibles à la surchauffe qui les fragilise.

Il est possible de les affiner par écrouissage-recristallisation (attention à leur fragilité à froid).

Ils sont insensibles à la corrosion sous tension (corrosion fissurante)

##### 2.8.2.8.2 Condition de soudage

Ils présentent une importante sensibilité à la surchauffe ce qui entraîne la présence de gros grains dans la région sous cordon (⇒ ↗ de la fragilité à froid). Donc on les soude avec de faibles énergies et des passes étroites afin de limiter les séjours à haute température. On peut éventuellement affiner les grains par un martèlement entre passes (attention à la fragilité de la ferrite).

On utilise généralement des métaux d'apport austénitiques qui présentent des grains plus fins et plus ductiles en ZF (↗ risque de corrosion galvanique).