

**ECOLE NATIONALE SUPERIEURE  
DES MINES DE RABAT**

**TECHNIQUES ET METALLURGIE  
DE SOUDAGE**

**Présentation préparée par:  
Bennaceur OUKI, Professeur (ENSMR)**

# Assemblages soudés

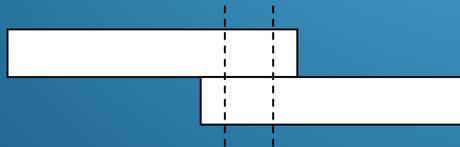
## ☛ Définitions:

➔ Le soudage = Procédé d'assemblage dans lequel les métaux des pièces assemblées participent directement à la formation du joint

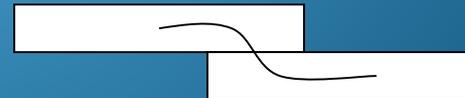
➔ Autres procédés limités:

- Vissage
- Rivetage
- Serrage
- Collage...etc

Exemples: Risque de corrosion galvanique

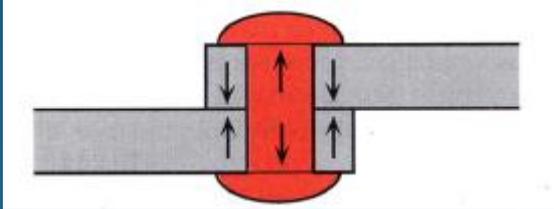


Discontinuité de chargement

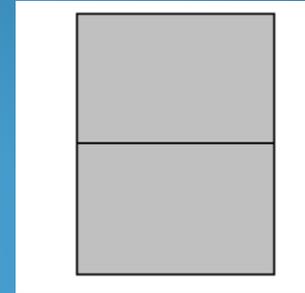


# Assemblages soudés

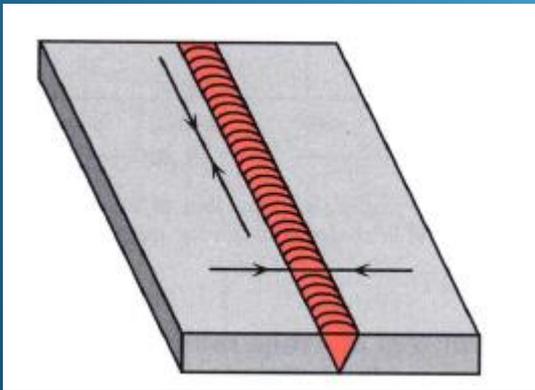
## Assemblage mécanique



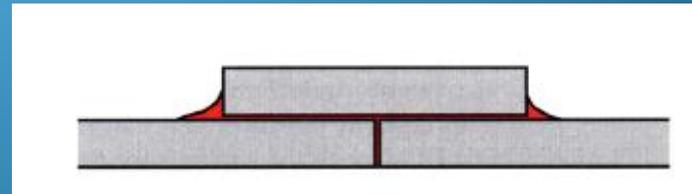
## Assemblage par diffusion



## Assemblage par soudage



## Assemblage par brasage



# Assemblages soudés

## ☛ Positions de soudage:

### ➔ Positions à plat ( ou horizontale):

Bout à bout



En angle intérieur



En angle extérieur



En gouttière



# Assemblages soudés

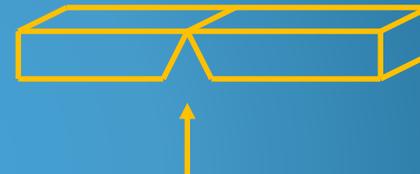
## ← Positions de soudage:

### → Positions verticales:

Verticale montante  
ou descendante



### → Position au plafond:



### → Position en corniche



→ On distingue également

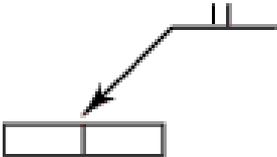
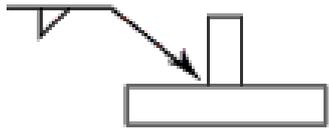
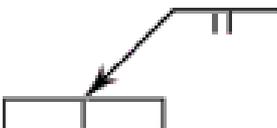
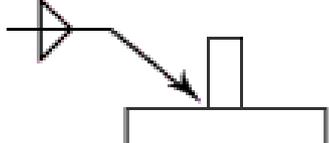
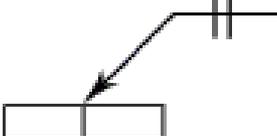
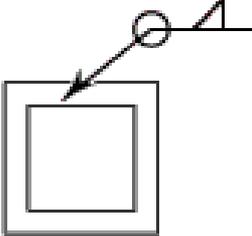
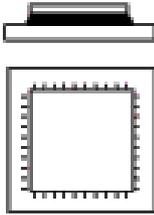
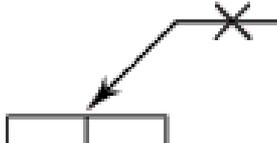
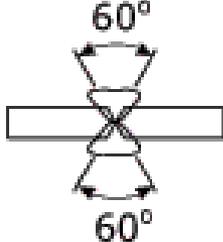
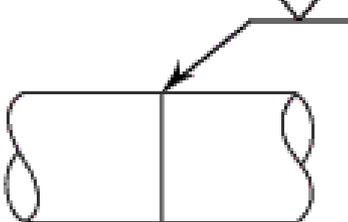
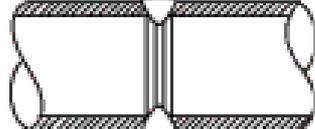
➤ Demi-montante

➤ Corniche inclinée

...etc

# Assemblages soudés

## ☛ Symboles de soudage de base:

| Symbole                                                                             | Soudure désirée                                                                    | Symbole                                                                               | Soudure désirée                                                                       |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|    |   |    |    |
|    |   |    |    |
|    |   |   |   |
|  |  |  |  |

# Classification générale des procédés de soudage

- ➔ Les différents procédés d'assemblage par soudage peuvent être classés en fonction de l'énergie mise en œuvre
  - Énergie thermo-chimique
  - Énergie électro-thermique
  - Énergie mécanique
  - Énergie focalisée

# Classification générale des procédés de soudage

## ➤ Énergie thermo-chimique:

- Soudage aux gaz
- Soudage aluminothermique

## ➤ Énergie électro-thermique:

### A- Soudage par résistance:

- Par points
- A la molette
- Sur bossage
- En bout par résistance pure
- Par étincelage
- Vertical sous laitier
- Par induction

# Classification générale des procédés de soudage

## ➤ Énergie électro-thermique:

### B- Soudage A l'arc électrique:

- Manuel avec électrodes enrobées
- Sous protection gazeuse ( TIG, MIG et MAG)
- A l'arc sous flux
- Autres:
  - ✓ Au plasma d'arc
  - ✓ A H<sub>2</sub> atomique
  - ✓ En moule sous gaz
  - ✓ A l'arc tournant

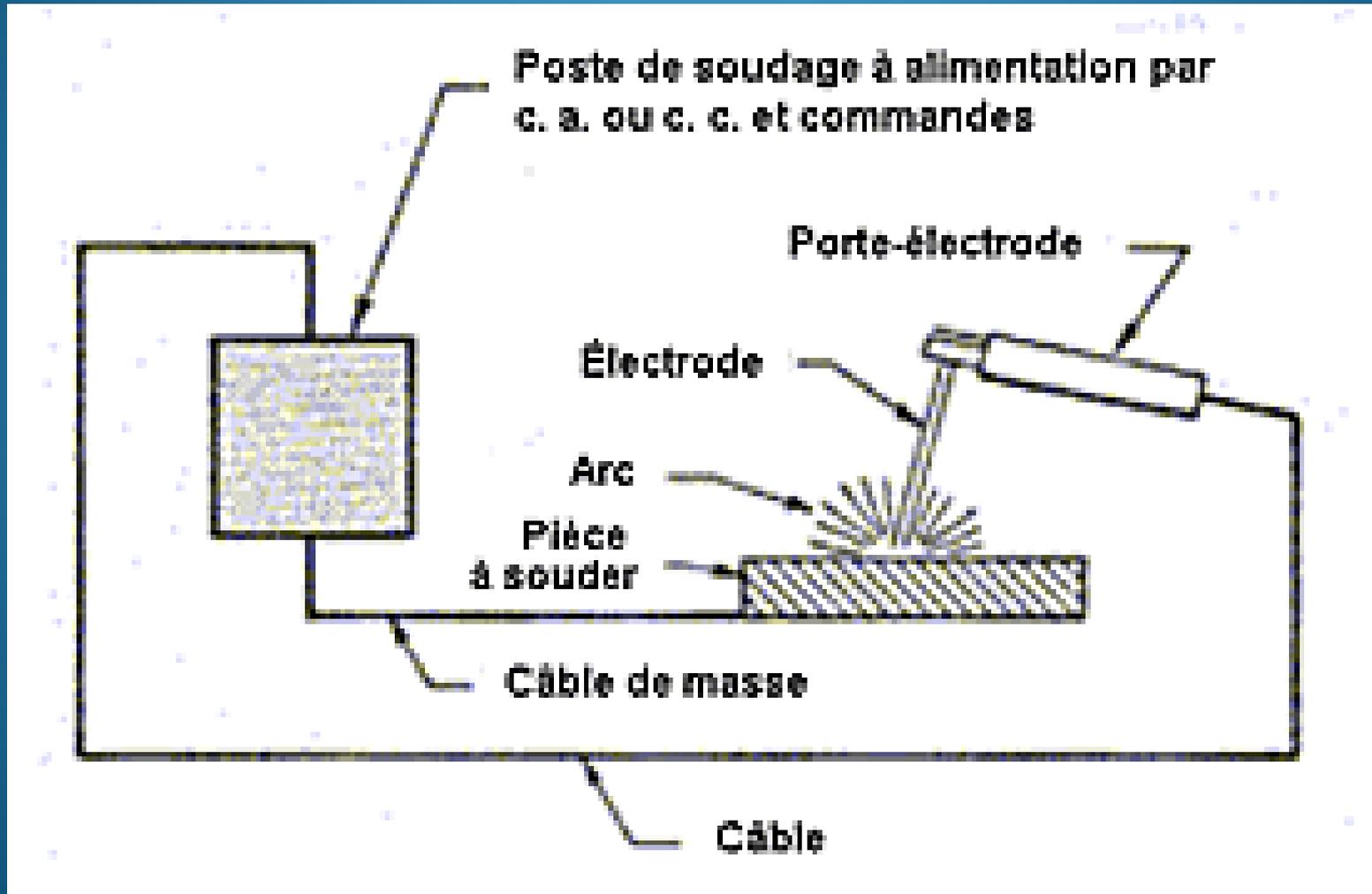
## ➤ Énergie mécanique:

- Par friction
- Par explosion
- Aux ultra-sons
- A froid

## ➤ Énergie focalisée: Par bombardement électronique

# Description des phénomènes d'arc électrique

➔ Exemple de génération d'un arc électrique:



# Description des phénomènes d'arc électrique

## → Principe

### → L'arc électrique dépend :

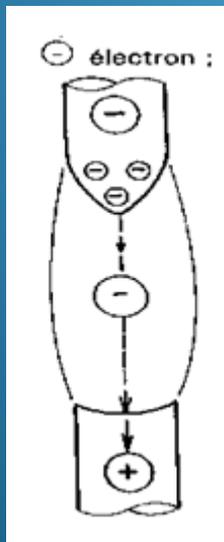
- Différence de potentiel entre deux électrodes
- L'émissivité du matériau
- La forme de la cathode
- Le potentiel ionisant des gaz

# Description des phénomènes d'arc électrique

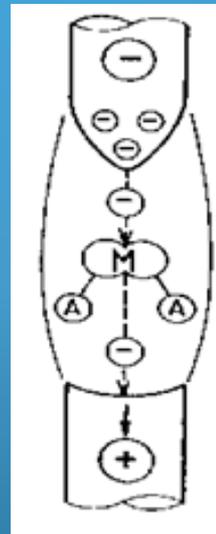
→ L'arc électrique est la matérialisation du passage du courant dans les gaz

→ Dans l'atmosphère de l'arc on distingue:

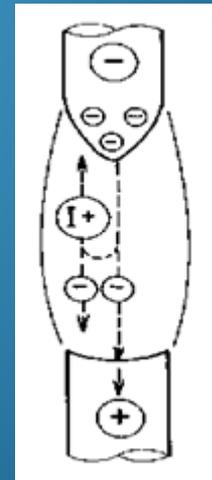
- Des électrons libres
- Des atomes
- Des ions positifs et négatifs
- Des molécules



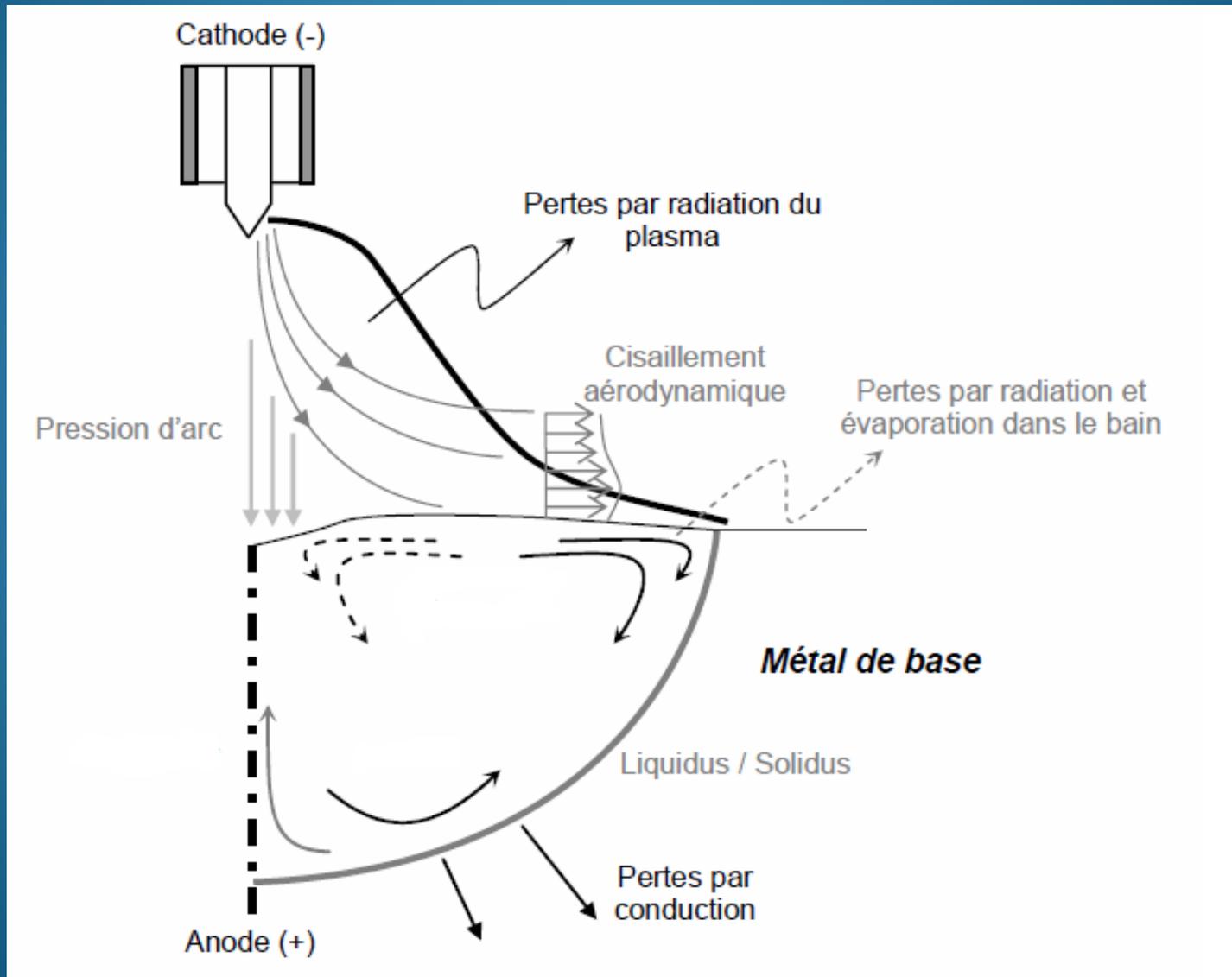
Bombardement de l'anode par les e-



Dissociation des molécules

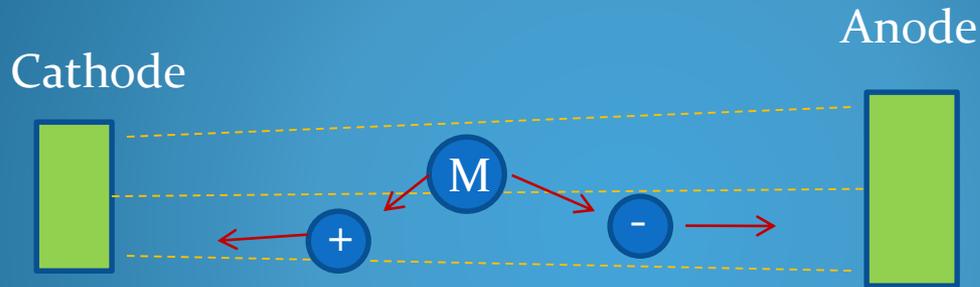


# Description des phénomènes d'arc électrique



# Description des phénomènes d'arc électrique

Entre les extrémités de deux électrodes, un arc électrique peut être amorcé et persister



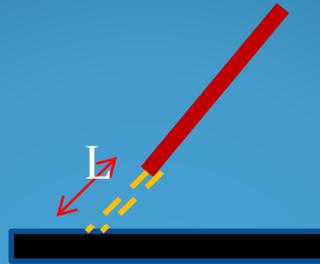
Observation de l'arc:

- Tâche brillante au niveau de la cathode
- Tâche d'un plus grand éclat au niveau de l'anode
- Colonne gazeuse à haute température dans la colonne d'arc

# Description des phénomènes d'arc électrique

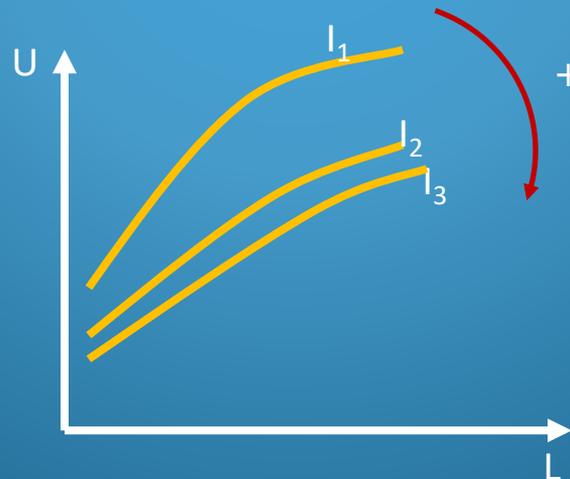
➡ Évolution de la tension à l'arc en fonction de la longueur d'arc:

➡ Arc électrique:



➡ Paramètres: **L, I et U**

➡  $U = f(L)$

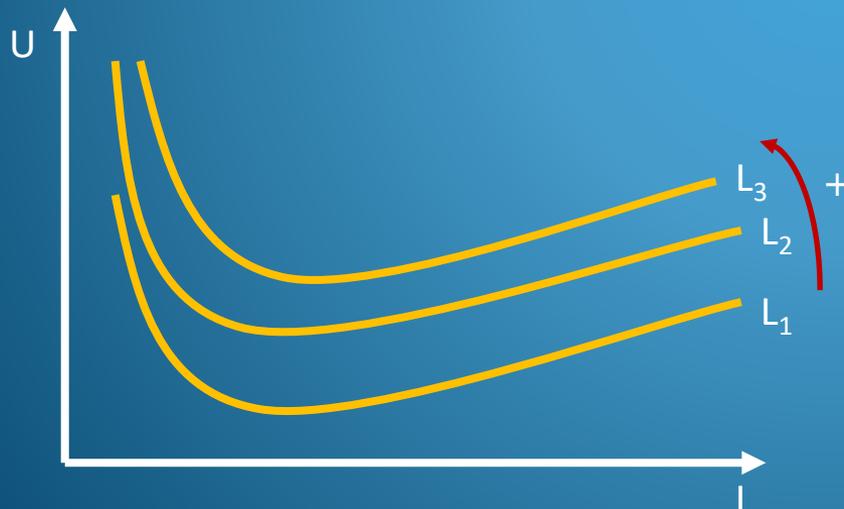


# Description des phénomènes d'arc électrique

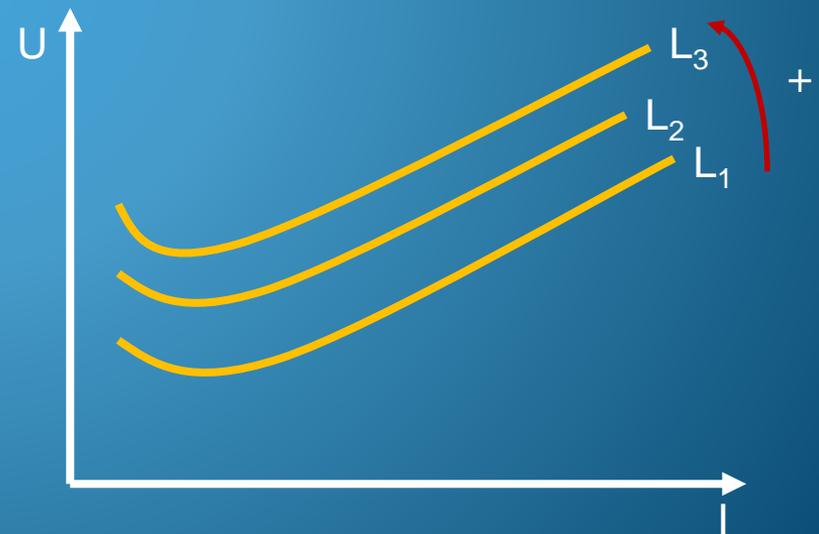
➡ Évolution de la tension à l'arc en fonction de l'intensité de courant:

➔ On envisage en général deux cas:

Cas des densités de courant faibles  
(10-20A/mm<sup>2</sup>)



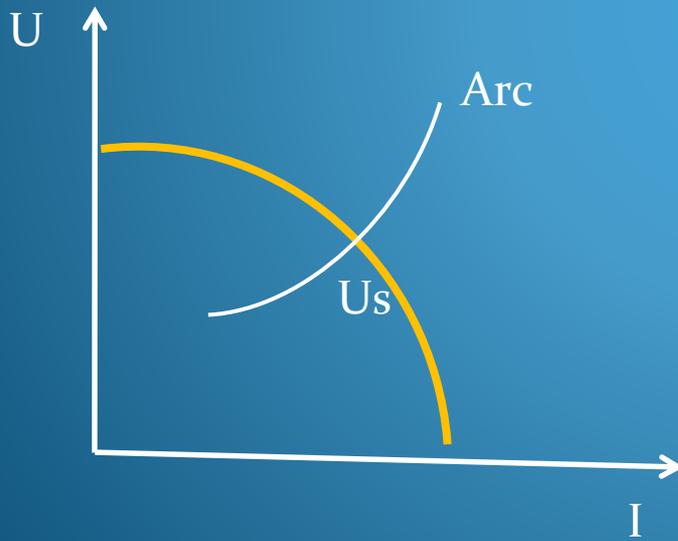
Cas des densités de courant élevées  
(50-200A/mm<sup>2</sup>)



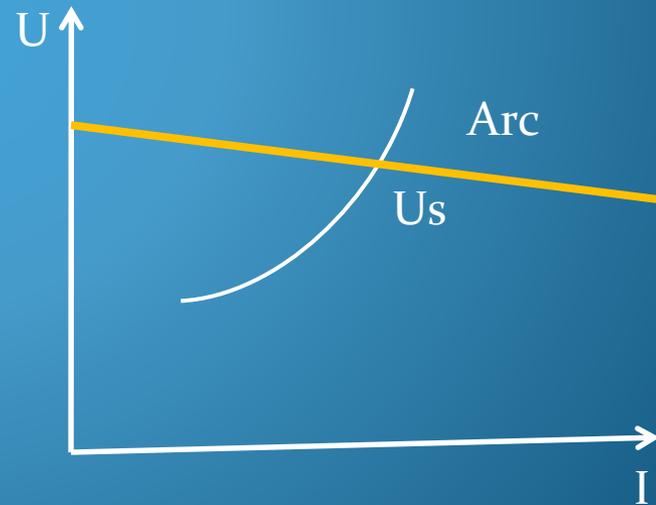
# Générateurs de courant

- ➡ Deux types de caractéristiques sont en général utilisées:

## Caractéristique plongeante



## Caractéristique horizontale



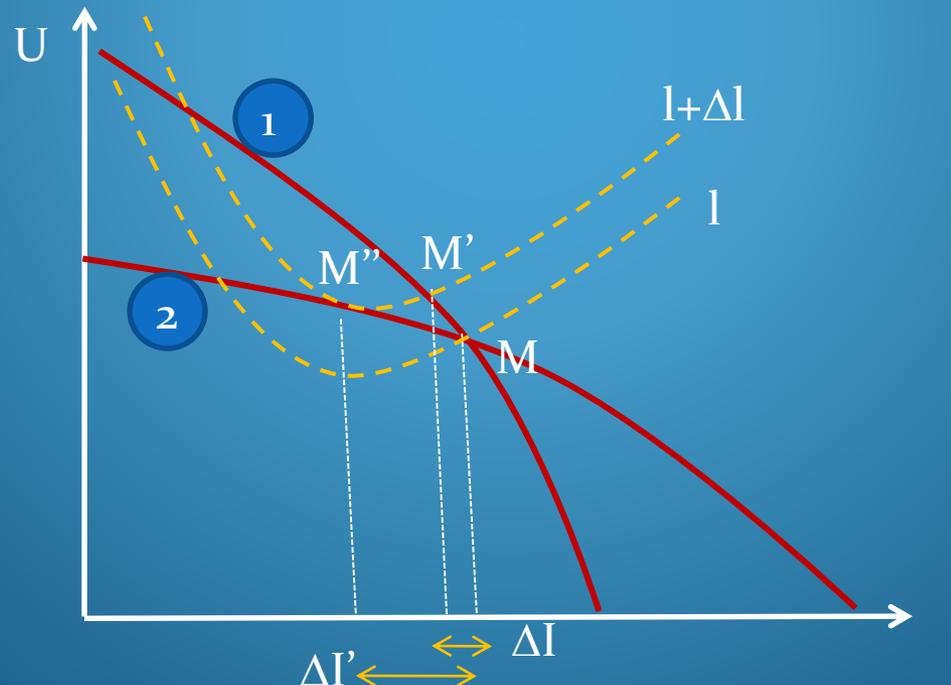
➡ Courant: Continu ou alternatif

# Générateurs de courant

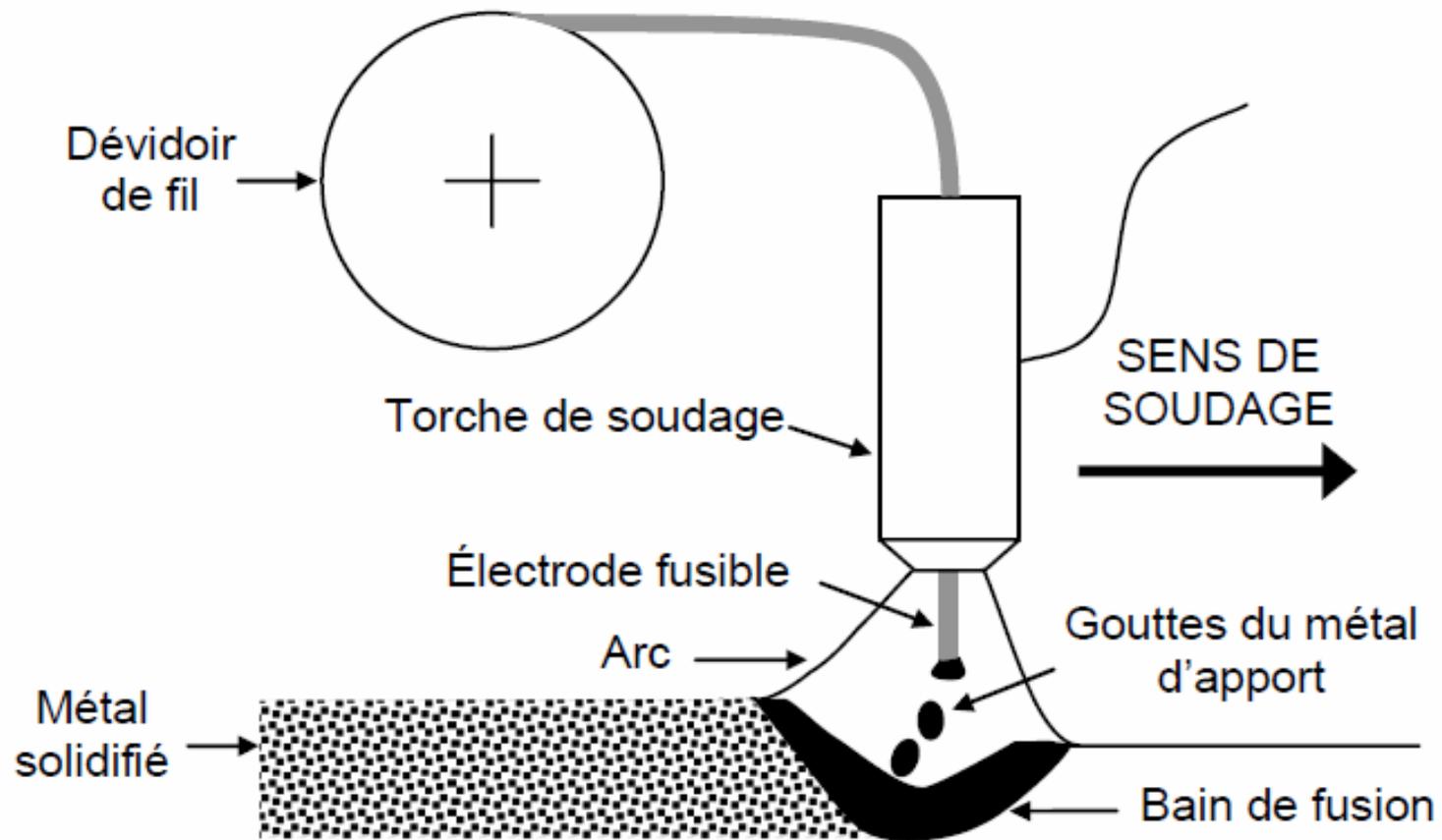
➡ En soudage automatique ou semi-automatique:

⇒ Choix de la caractéristique pour l'autorégulation

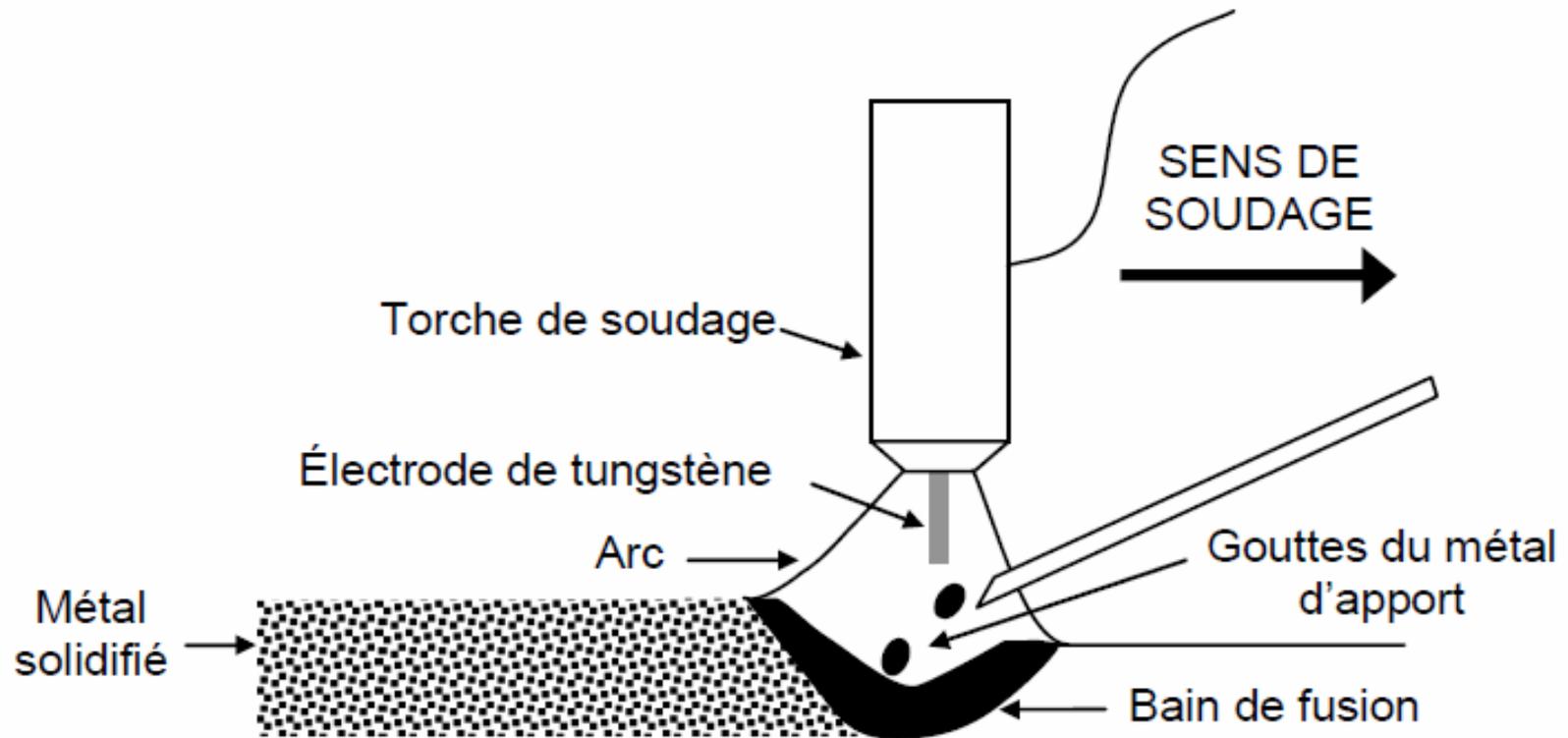
➡ Exemple:



# Procédé semi-automatique MIG et MAG



# Procédé TIG



# Les gaz de protection

## ☛ Gaz pour TIG:

### ➔ Ar pur:

- Pureté: 99.995% pour le soudage de qualité supérieure de l'AL et ses alliages
- Pureté: 99.99% pour le soudage des aciers inox, du Cu et des alliages légers

### ➔ Ar+He:

- Contribue à une meilleure stabilité de l'arc
- Améliore la pénétration pour le soudage des aciers inox
- Permet une grande vitesse en soudage automatique

### ➔ Ar+He+H<sub>2</sub>:

- Le mélange augmente la tension de l'arc
- Permet une grande vitesse de soudage

# Les gaz de protection

## ☛ Gaz pour MIG et MAG

➔ L'Argon pur ou mélangé avec l'He est souvent utilisé  
Pour le soudage de l'Aluminium, du cuivre et alliages.

➔ Les mélanges les plus souvent utilisés sont:

➤ Ar+O<sub>2</sub> à 1 à 2%

➤ Ar+CO<sub>2</sub> à 25%

➤ Ar+O<sub>2</sub> +CO<sub>2</sub> ( Ar+5%O<sub>2</sub>+15%CO<sub>2</sub>)

# Transfert du métal dans l'arc électrique

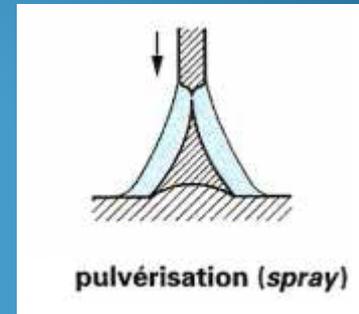
- ☛ Dans la plupart des procédés de soudage à l'arc
  - ⇒ Le métal d'apport est fourni par une électrode fusible
- ➔ Les gouttes du métal transitent de l'électrode vers le bain en fusion
- ➔ Les gouttes sont soumises à plusieurs forces dues à:
  - Tension superficielle
  - Pesanteur
  - Pincement électromagnétique
  - Jet de plasma
  - Eruption gazeuses

# Transfert du métal dans l'arc électrique

☛ Les différents modes de transfert:

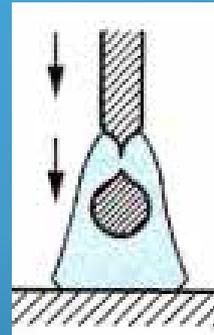
➔ On distingue:

➤ Transfert par pulvérisation

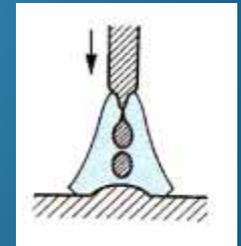


➤ Transfert par pulvérisation axiale

➤ Transfert globulaire



Ou gouttelettes fines



➤ Transfert par court-circuit

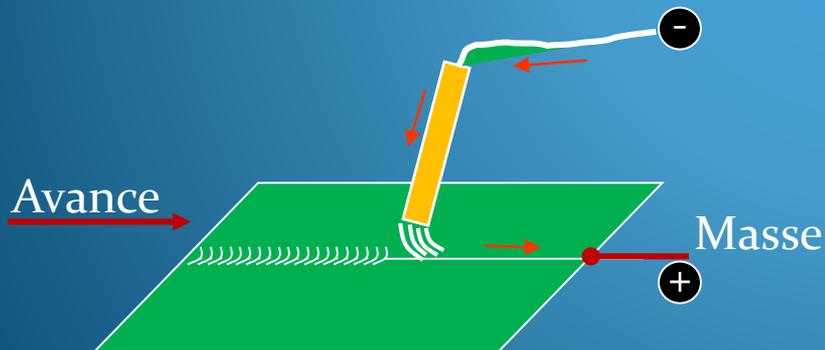
# Soufflage magnétique

➔ Phénomène dû au passage du courant dans l'électrode, l'arc, la pièce et la masse.

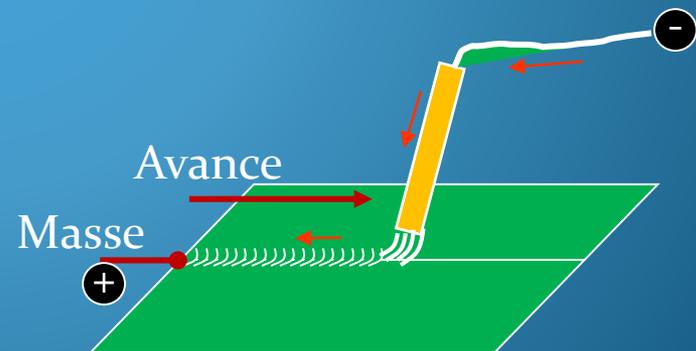
➔ Sa présence :

- Gène le soudeur,
- Compromet la régularité du cordon
- Nuit à la qualité.

➔ Exemples:



Courant de sens contraire : l'arc est repoussé



Courant de même sens : l'arc est attiré

# Energie de soudage

## ☛ Énergie nominale :

➔ C'est l'énergie fournie au niveau du bain de fusion donnée par:

$$E_n = \frac{60 \cdot U \cdot I}{1000 \cdot v}$$

$E_n$  (K J/cm)

Où:

U: Tension de soudage (V)

I: Intensité de soudage (A)

V: La vitesse d'avance (cm/mn)

## ☛ Énergie Equivalente : $E_q = E_n \cdot \eta \cdot k$

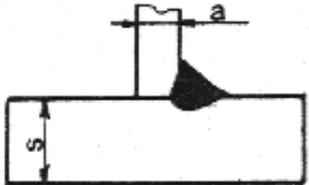
➔ C'est l'énergie réellement absorbée par la pièce

➔ Elle est obtenue par correction de  $E_n$  en fonction de :

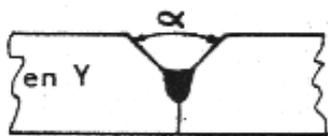
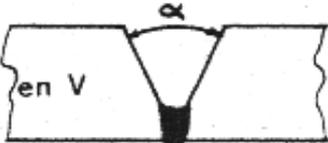
➤ Du procédé de soudage : facteur  $\eta$

➤ De la forme et du type de joint : facteur  $k$

# Coefficients de correction du chanfreinage

|                                                                                   |               |   |      |      |      |      |
|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------|---|------|------|------|------|
|  |               |   |      |      |      |      |
|  | $\frac{a}{s}$ | 0 | 0,25 | 0,5  | 0,75 | 1    |
|                                                                                   | k             | 1 | 0,97 | 0,89 | 0,78 | 0,67 |

avec chanfrein

| forme                                                                                    | $\alpha$ | 60°  | 75°  | 90°  | 105° |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----------|------|------|------|------|
|  en Y  | k        | 0,60 | 0,63 | 0,67 | 0,70 |
|  en V | k        | 1,50 | 1,72 | 2    | 2,38 |
|  en X | k        | 0,75 | 0,85 | 1    | 1,20 |

# Influence des paramètres de soudage

## ☛ Énergie: $E$

- Paramètres:  $U$ ,  $I$  et  $v_s$

- Influent sur les propriétés mécaniques ( ductilité, résilience, ...etc)
- $E$  ne doit pas être trop élevée ni trop faible
- Pour les aciers:  $20 \leq E \leq 35 \text{KJ/cm}$

## ➔ Tension à l'arc:

- Influence sur la largeur du dépôt ( Si  $U \nearrow \Rightarrow$  largeur  $\nearrow$ )
- Influence sur le régime de transfert du métal pour un gaz de protection donné

# Influence des paramètres de soudage

## → Intensité du courant:

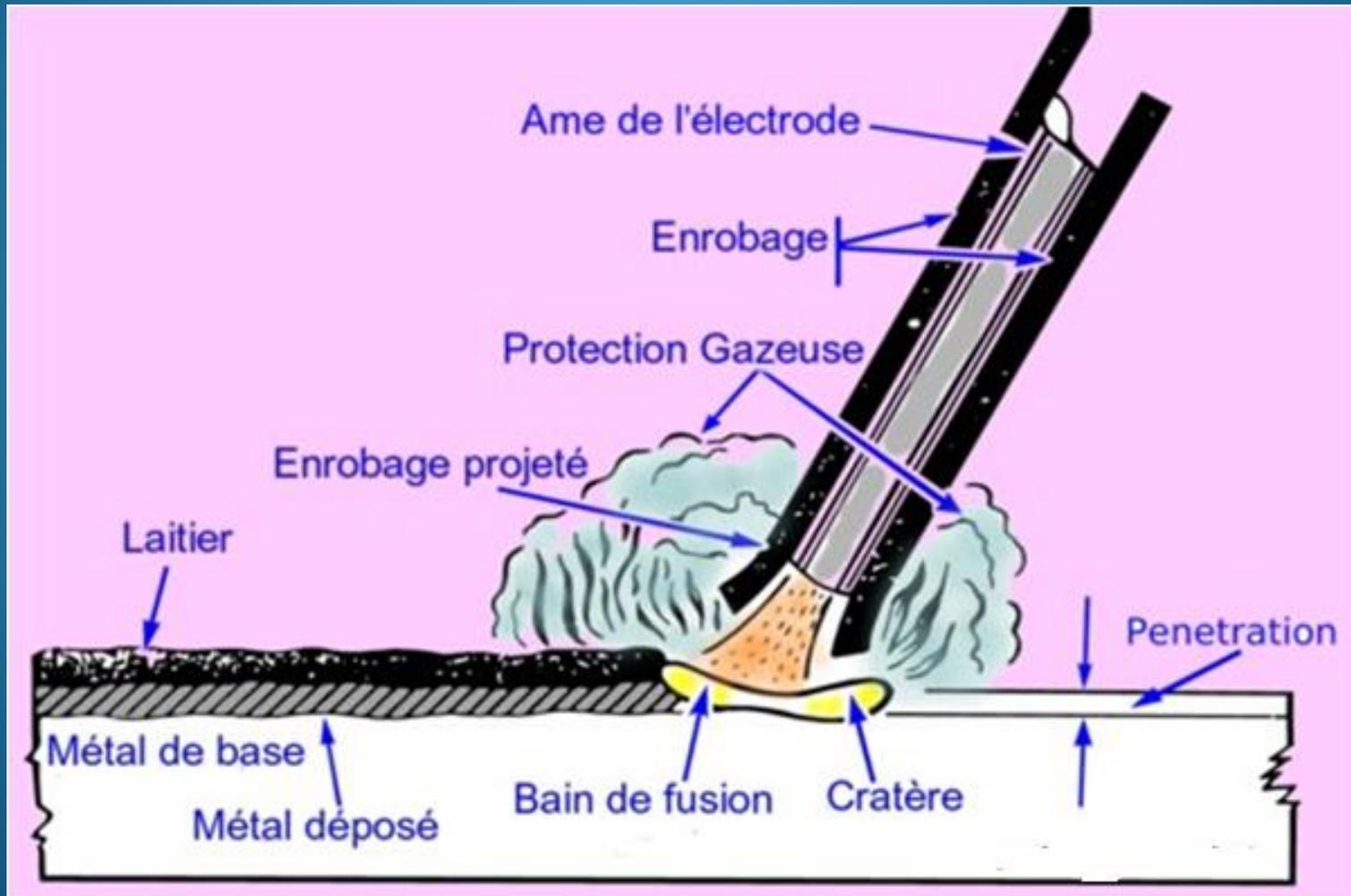
- La pénétration est proportionnelle au courant de soudage et est liée à la vitesse de fusion du fil-électrode
- L'intensité présente peu d'influence sur la largeur du cordon

## → Fil électrode:

- Influence sur la pénétration en soudage automatique ou semi-automatique
- Pour  $U$ ,  $I$  et  $v_s$  constants:  
Si  $\phi$  diminue  $\Rightarrow$  pénétration augmente

# Soudage à l'arc avec électrodes enrobées

→ Principe:



# Soudage à l'arc avec électrodes enrobées

➔ L'électrode enrobée est constituée de:

- ▶ Âme métallique
- ▶ Enrobage

☞ Âme métallique:

- Sert de conducteur électrique et constitue principalement le métal d'apport
- Sa nature est fonction des matériaux à souder

☞ Enrobage:

- Protège le bain de fusion et est composé de:
  - Produits de support: Rutile, carbonates de chaux, ...etc
  - Produits actifs: Ferro-alliages
  - Liants: Silicates en général

# Electrodes enrobées

## ☛ Rôles de l'enrobage:

⇒ 3 rôles: électrique, métallurgique et mécanique

## ➔ Rôle électrique:

### ➤ La présence des silicates

⇒ facilite l'amorçage ( action ionisante)

### ➤ Chaque type d'électrode possède un potentiel d'ionisation donné

### ➤ Sous faibles tensions à vide, l'enrobage permet d'assurer la continuité de l'arc

# Electrodes enrobées

## → Rôle métallurgique:

- Protection du bain de fusion par la formation d'un laitier  
( Protection contre l'oxydation et la nitruration)
- Isolation thermique du métal fondu:
  - Le laitier évite le joint de se refroidir rapidement
  - Le laitier permet aux gaz emprisonnés de se libérer sans créer de soufflures
- Compensation des pertes d'éléments

## → Rôle mécanique:

Comme  $T_f$  de l'âme est  $< T_f$  de l'enrobage  $\Rightarrow$  création d'un cratère

$\Rightarrow$  Stabilité mécanique de l'arc

# Enrobages enrobées

☛ On distingue différents types d'enrobages:

➔ Enrobage rutile:

- Produit de support:  $\text{TiO}_2$  avec faible proportion de cellulose
- Electrode d'emploi général (CC ou CA)

➔ Enrobage volatil ou cellulosique:

- Il est de type rutile mais fortement chargé en cellulose
- La présence de cellulose
  - ⇒ Atmosphère réductrice par combustion dans l'arc

# Enrobages des électrodes

## → Enrobage acide et oxydant:

- Formé à base de silicates de K (A) et de l'oxyde de fer (O)
- Augmentation de la stabilité de l'arc

## → Enrobage basique:

- A base de carbonate de chaux et de fluorure de calcium
- La laitier calcaire ⇒ excellent désulfurant
- Meilleures caractéristiques mécaniques (Résilience)

## → Enrobages spéciaux:

- Ils sont souvent du type basique
- Chaque type correspond à une nuance particulière

# Désignation des électrodes

| Symb | Charge de rupture<br>R mini en MPa | Limite élastique<br>Re mini en MPa |
|------|------------------------------------|------------------------------------|
| E 43 | 430-510                            | 320                                |
| E 51 | 510-610                            | 360                                |

| Symbole | Type d'enrobage                 |
|---------|---------------------------------|
| A       | Acide (oxyde de fer)            |
| AR      | Acide (rutile)                  |
| B       | Basique                         |
| C       | Cellulosique                    |
| O       | Oxydant                         |
| R       | Rutile<br>(enrobage semi-épais) |
| RR      | Rutile (très épais)             |
| S       | Autres types                    |

Rendement  
(si > 105 %) arrondi  
aux 10 % les plus  
proches

Teneur en hydrogène diffusible  
H si 5 < teneur en ml/100 g < 10  
BH si teneur en ml/100 g ≤ 5

**E**      **51**      **3 / 3**      **B**      **190**      **3**      **6**      **H**

↓

Symbole général

| Symb | Allongement<br>mini % |     | Énergie d'impact<br>Temp °C pour 28 J mini<br>Valeur mini. ≥ 16 J |
|------|-----------------------|-----|-------------------------------------------------------------------|
|      | E43                   | E51 |                                                                   |
| 0    |                       |     |                                                                   |
| 1    | 20                    | 18  | + 20                                                              |
| 2    | 22                    | 20  | 0                                                                 |
| 3    | 24                    | 22  | - 20                                                              |
| 4    | 24                    | 22  | - 30                                                              |
| 5    | 24                    | 22  | - 40                                                              |

| Symb | Position de soudage                          |
|------|----------------------------------------------|
| 1    | Toutes positions                             |
| 2    | Toutes positions, sauf verticale descendante |
| 3    | À plat, en gouttière, en angle à plat        |
| 4    | À plat, en gouttière                         |
| 5    | Verticale descendante                        |

| Symb | Énergie d'impact<br>Temp °C pour 28 J mini<br>Valeur mini. ≥ 16 J |
|------|-------------------------------------------------------------------|
| 0    |                                                                   |
| 1    | + 20                                                              |
| 2    | 0                                                                 |
| 3    | - 20                                                              |
| 4    | - 30                                                              |
| 5    | - 40                                                              |

| Polarité à l'électrode | Courant de soudage |                                       |    |    |
|------------------------|--------------------|---------------------------------------|----|----|
|                        | CC uniquement      | CC et CA tension à vide minimale (CA) |    |    |
|                        |                    | 50                                    | 70 | 90 |
| + ou -                 | -                  | 1                                     | 4  | 7  |
| -                      | -                  | 2                                     | 5  | 8  |
| +                      | 0                  | 3                                     | 6  | 9  |

Les électrodes sont repérées de 0 à 9.  
CC = Courant Continu      CA = Courant Alternatif.

# Influence des éléments

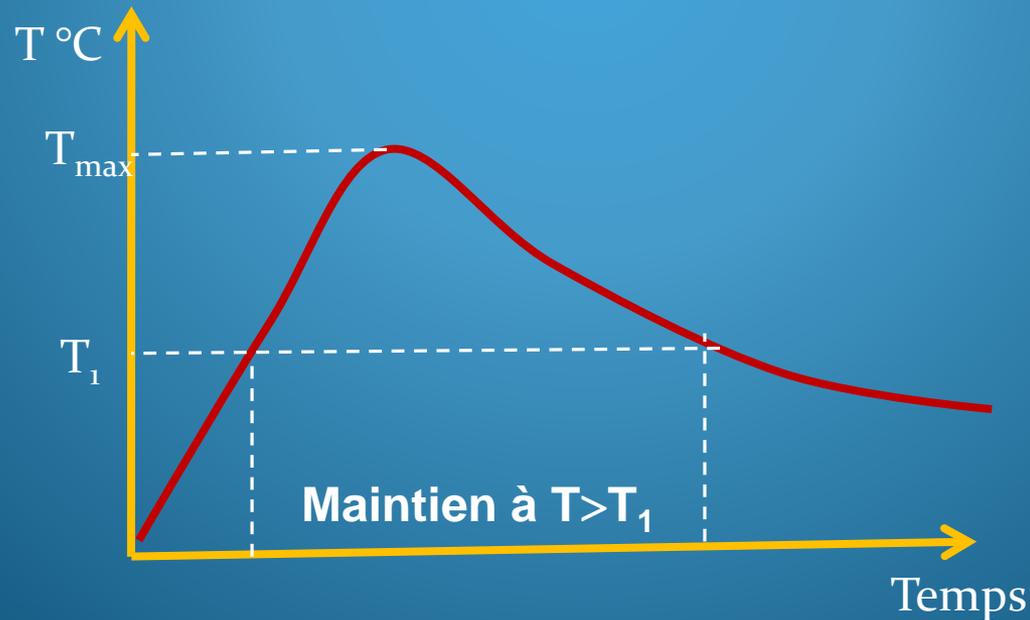
- **Carbone**: Accroît la résistance à la rupture et à la dureté mais favorise la trempe de l'acier dans la zone de la soudure
- **Manganèse**: Donne à l'acier une forte résistance à l'usure et aux chocs
- **Chrome**: Élément trempant très actif. Augmente la résistance à la rupture. A des teneurs supérieures à 1% et associé au carbone, le soudage devient très délicat par formation des carbures de chrome au niveau des joints
- **Nickel**: Améliore les propriétés de l'acier, il est utilisé dans les aciers travaillant à basse température et dans les aciers inoxydables
- **Molybdène**: Diminue la fragilité, accroît la résistance à chaud, améliore la résistance à la corrosion dans les aciers inoxydables
- **Cuivre**: Améliore la résistance à la corrosion surtout dans le milieu marin, on le trouve dans certains aciers inoxydables ou des aciers à haute limite élastique

# Cycles thermiques de soudage

☛ **Définition:** Loi selon laquelle la température varie en un point de la pièce en fonction du temps

➔ Lorsque la source de chaleur se déplace le long des bords à souder

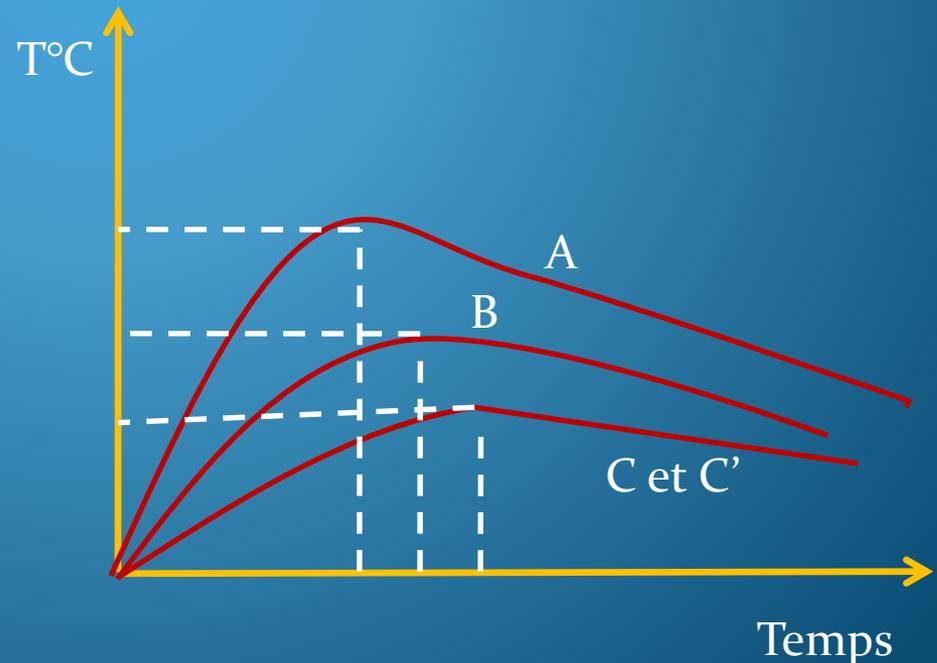
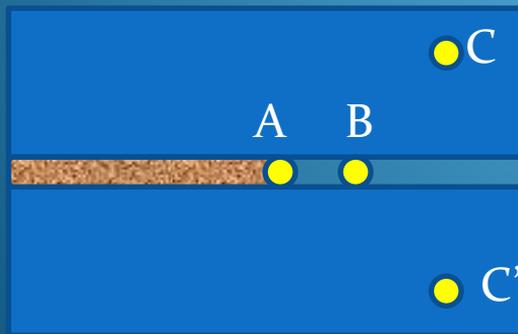
⇒ Le matériau environnant s'échauffe, atteint une température maximale puis se refroidit



# Cycles thermiques de soudage

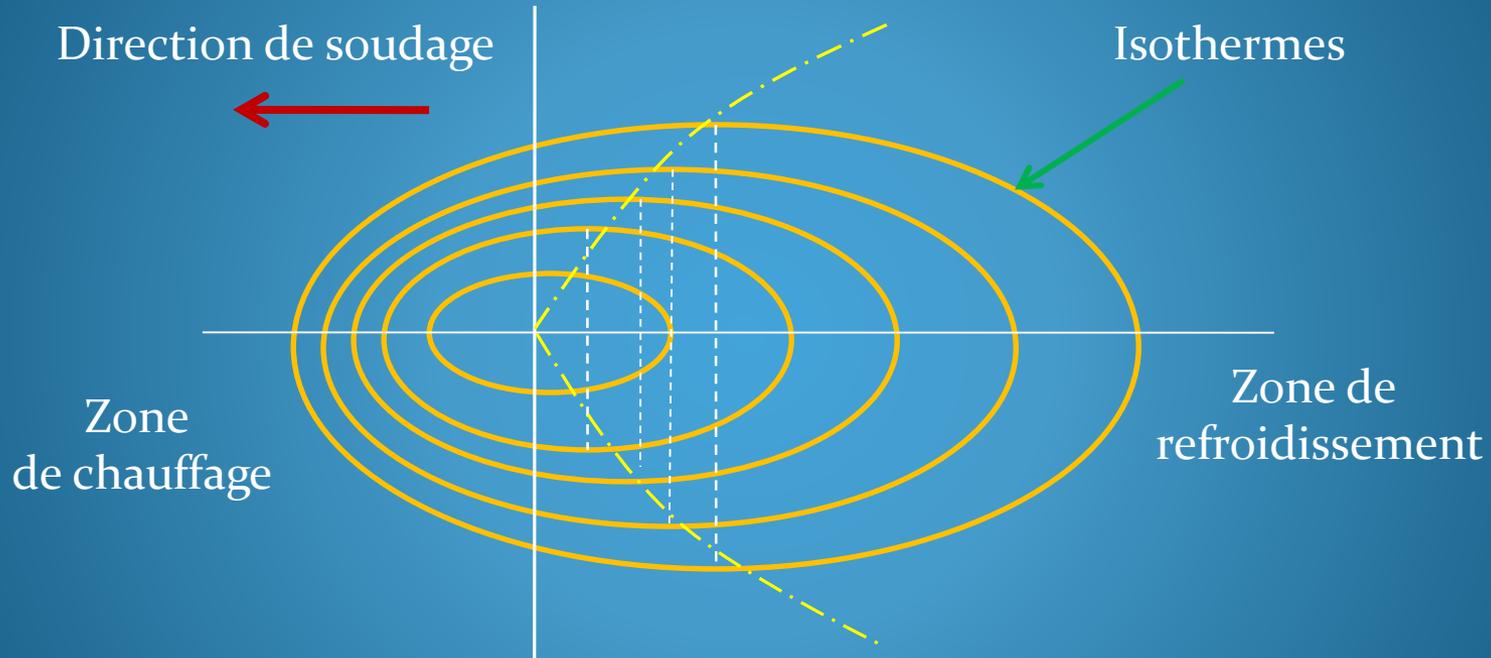
- ➡ Les cycles thermiques dépendent de:
  - Position et distance du point considéré par rapport à la ligne de soudure
  - Procédé utilisé
  - Epaisseur des pièces
  - Température initiale des pièces

## 1- Influence de la position du point:



# Cycles thermiques de soudage

- ➡ En 2D, la distribution de la température à un instant donné est définie par des isothermes telles que:



- ➡ Chaque isotherme = ellipse dont le petit axe est d'autant plus déplacé vers l'arrière que la température est plus faible
- ➡ En 3D, on définit un « Solide thermique »

# Cycles thermiques de soudage

## 2- Influence du procédé:

→ Paramètre: Apport thermique

→ Exemple: Procédé à l'arc  $Q=UI/v_s$

→ Plus Q est élevée ⇒ Plus le refroidissement est plus lent  
( La quantité de chaleur que le joint doit évacuer est plus importante)

## 3- Influence de l'épaisseur:

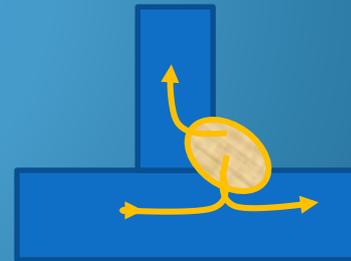
→ La chaleur introduite s'élimine principalement par conduction

→ Plus l'épaisseur est plus forte  
⇒ plus le cycle thermique est plus sévère

# Cycles thermiques de soudage

## 3- Influence de l'épaisseur: (suite)

→ Exemple: Doubler l'épaisseur c'est doubler la vitesse de refroidissement



# Cycles thermiques de soudage

## 4- Influence du matériau:

- Paramètres: Conductivités thermique et chaleur spécifique
- Pour toutes autres conditions égales, la vitesse de refroidissement est proportionnelle à ces deux paramètres

## 5- Influence de la température des pièces:

- Paramètres: Température initiale
- Plus la température initiale ( $T_i$ ) des pièces est élevée  
⇒ Plus le refroidissement est lent

# Cycles thermiques de soudage

## 5- Influence de la température des pièces: (suite)

### → Exemples:

☛ Si  $T_i$  passe de 20°C à 150°C

⇒ La vitesse de refroidissement  $V_r$  diminue de 1/2

☛ Si  $T_i$  passe de 20°C à 200°C

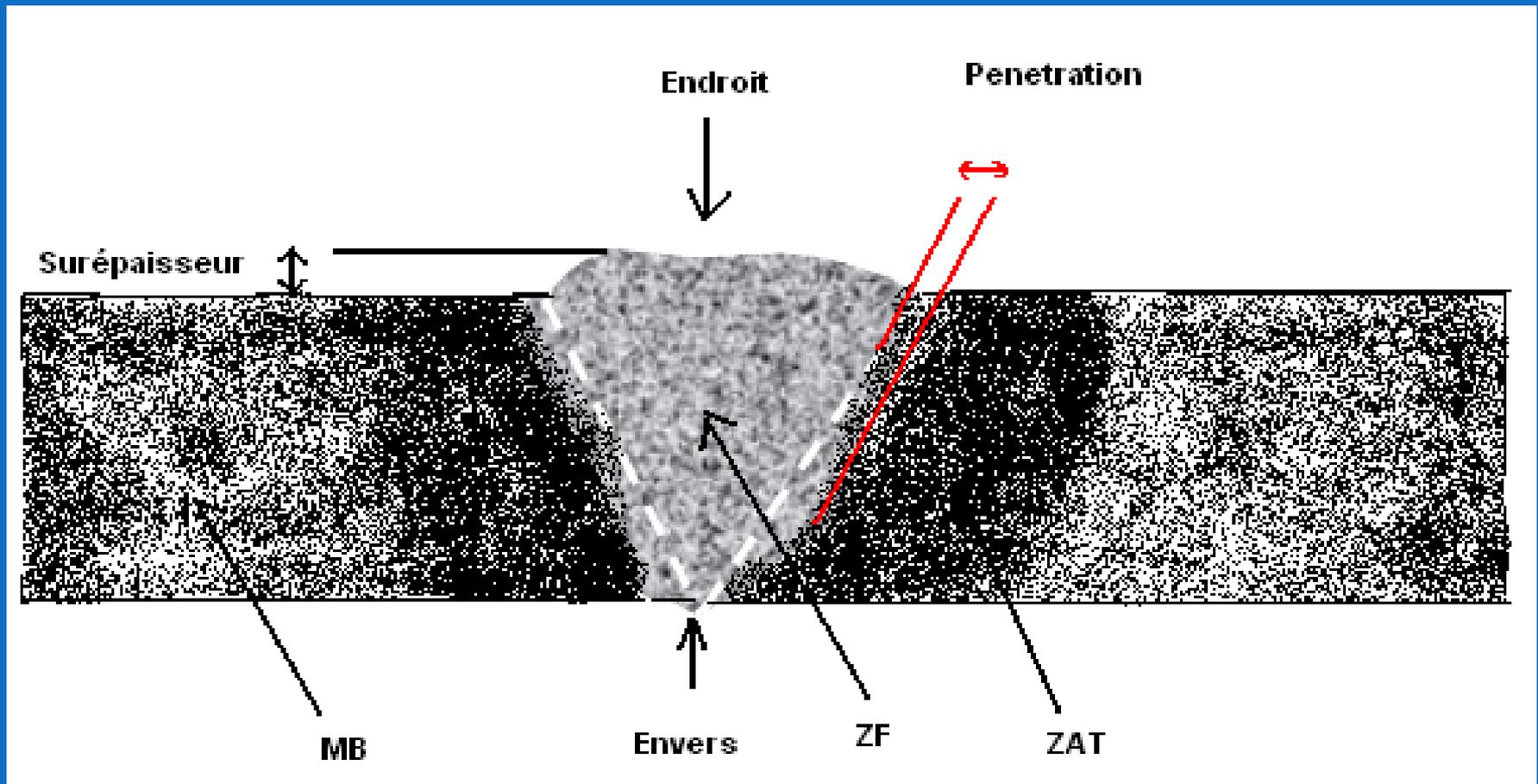
⇒ La vitesse de refroidissement  $V_r$  diminue de 1/3

⇒ Intérêt de faire des préchauffages pour atténuer la sévérité des cycles thermiques

→ Exemple: Hiver ⇒ Cycles plus sévères qu'en été

# Aspects métallurgiques

- Examen métallographique d'une section polie et attaquée:



# Aspects métallurgiques

☛ L'examen de la transversale du joint soudé permet de distinguer 3 zones:

→ Zone fondue: **ZF**

C'est la zone où tous les points ont dépassé la température  $T_f$  de fusion.

→ Zone affectée thermiquement : **ZAT**

C'est la zone du métal ayant subi sous l'action de la chaleur des transformations à l'état solide avec changement de microstructure

→ Métal de base: **MB**

C'est la zone suffisamment éloignée de ZF où la température atteinte n'a pas provoqué de modifications

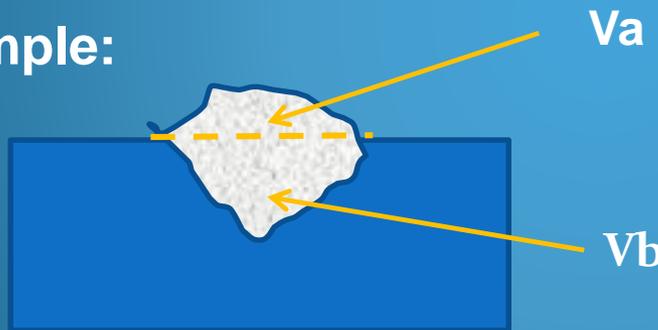
# Aspects métallurgiques

## ➤ Zone fondue:

➔ Elle se forme en vertu du rapport de dilution « d » défini par:

$$d\% = \frac{V_{MB \text{ fondu}}}{V_{ZF}} \cdot 100$$

➔ Exemple:



$$d\% = \frac{V_b}{V_a + V_b} \cdot 100$$

➔ Application: MB: 5%Cr, MA: 25%Cr, d%=30

➔ Le %Cr dans ZF est tel que:  $\%Cr = \frac{5.30 + 25.70}{100} = 19\%$

# Aspects métallurgiques

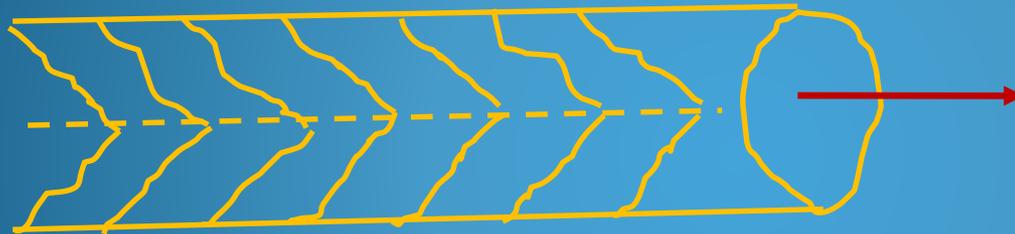
## ➤ Structure de solidification de ZF:

- ➔ La solidification du bain est analogue à celle d'un lingot en fonderie
- ➔ Elle débute par des grains ( Austénitique) qui se développent progressivement en s'allongeant vers le centre
  - ⇒ Formation d'une structure dendritique
- ➔ L'orientation des dendrites suit la direction de refroidissement

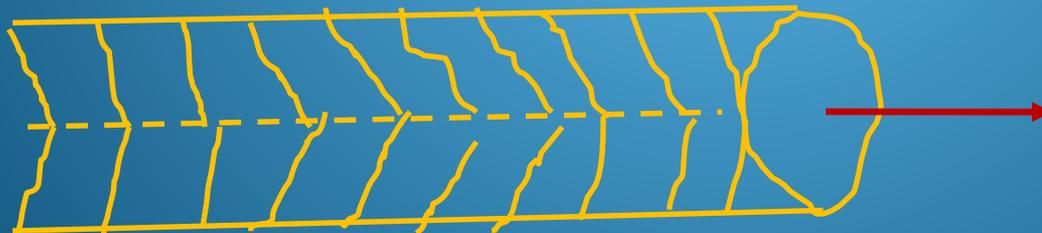
# Aspects métallurgiques

## ➤ Structure de solidification de ZF:

## ➔ Influence de la vitesse de soudage:



**Vr faible**

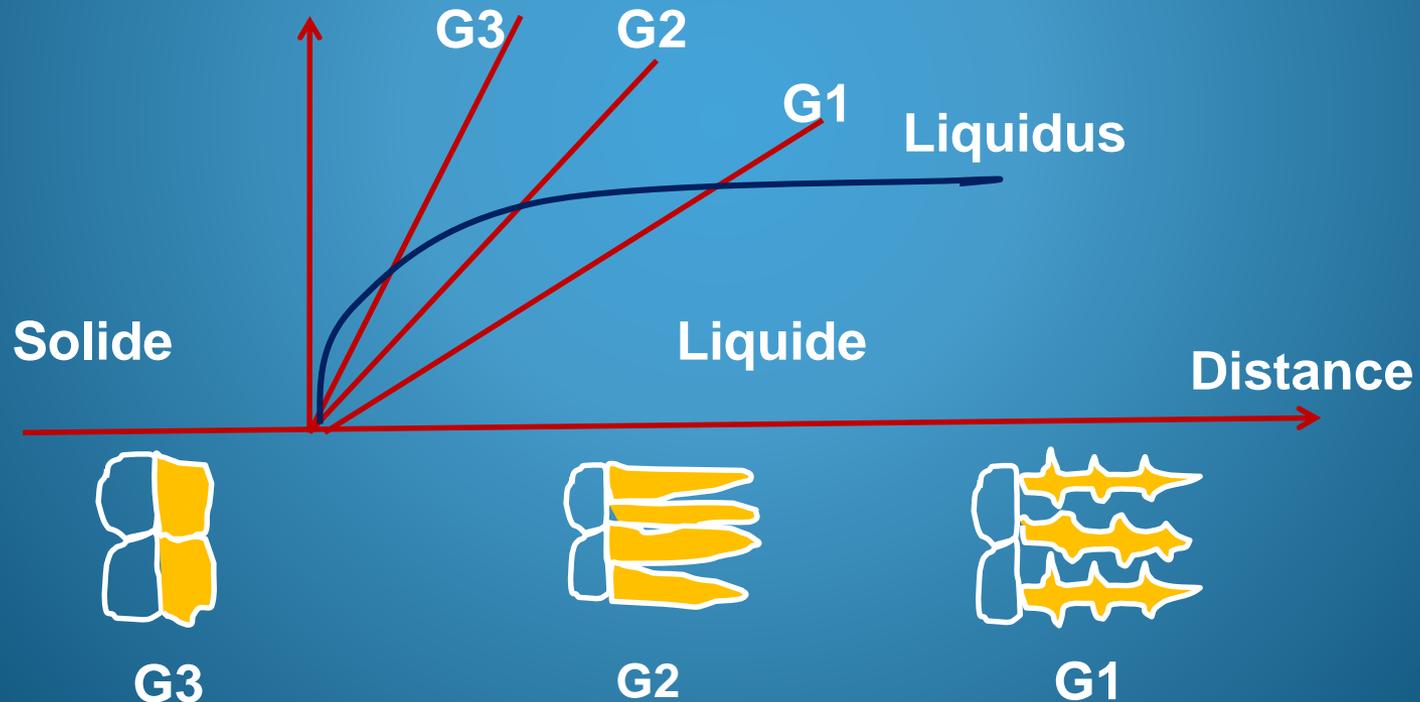


**Vr élevée**

# Aspects métallurgiques

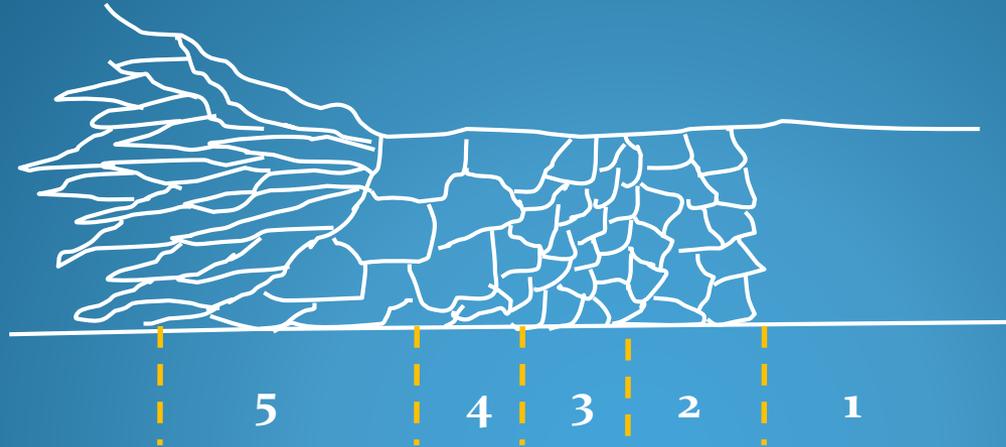
## ➤ Structure de solidification de ZF:

➔ En fonction du gradient de température, les grains formés prennent différentes configurations:



# Aspects métallurgiques

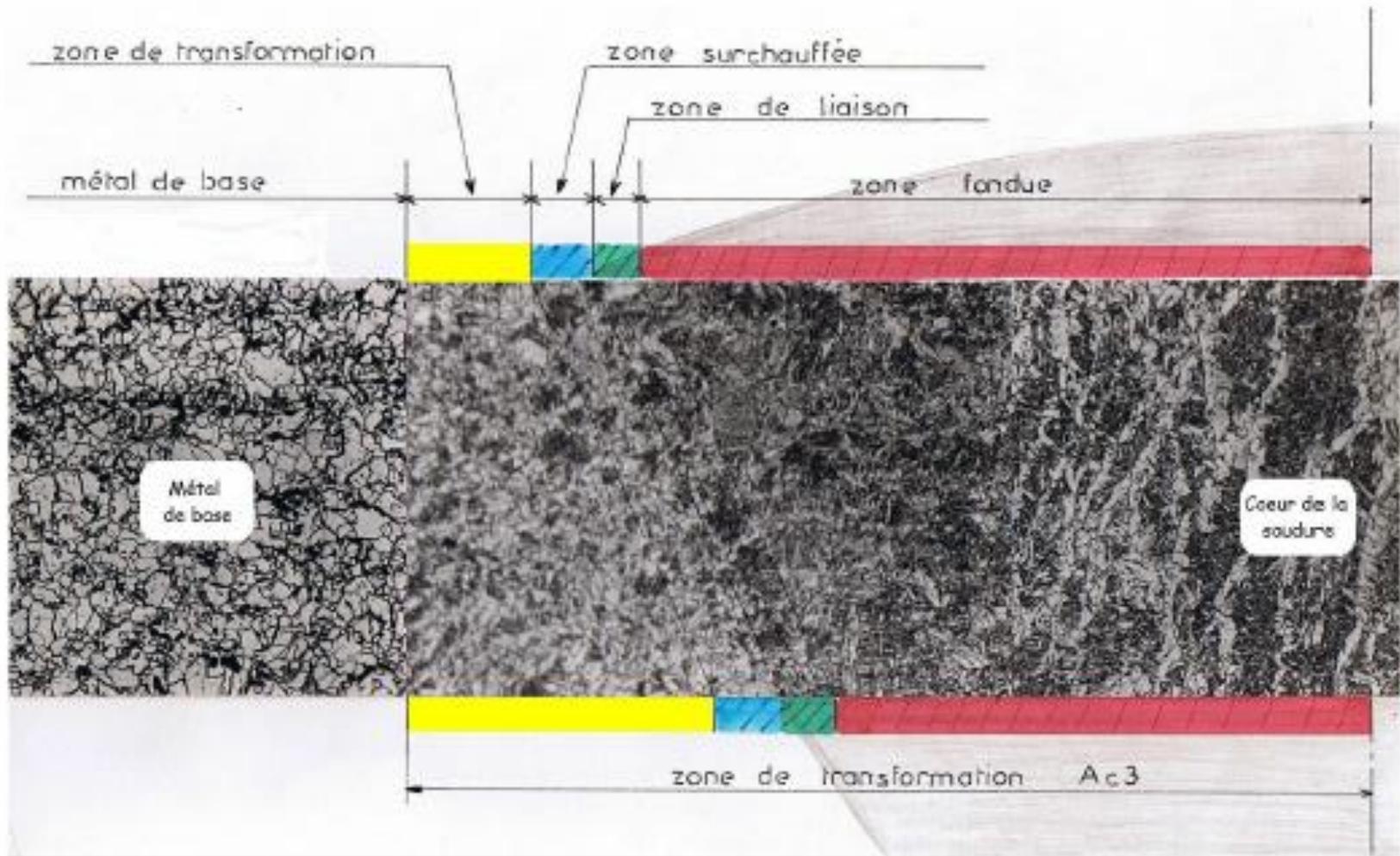
## ➤ Zone affectée thermiquement ZAT:



- ➔ Zone1: Région où le métal n'a pas atteint une température d'environ 600°C
- ➔ Zone2: Entre 600°C et  $AC_1$ : Quelques modifications apparaissent
- ➔ Zone3: Entre  $AC_1$  et  $AC_3$ : L'austénisation partielle génère une structure à grains fins
- ➔ Zone4: Entre  $AC_3$  et 1200°C: Structure à grains grossiers
- ➔ Zone5: Au-delà de 1200°C: Structure aciculaire grossière ou structure de trempe ( Zone de forte trempabilité)

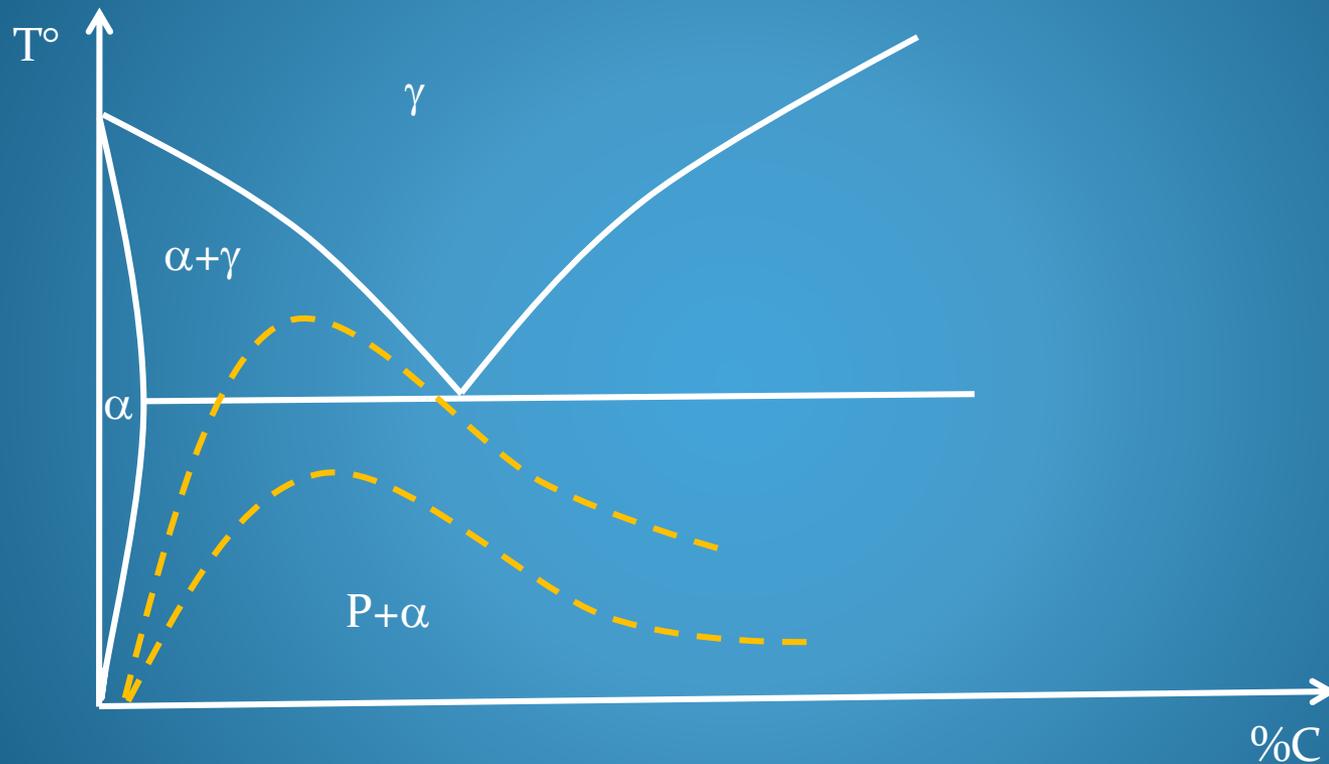
# Aspects métallurgiques

Micrographie transversale  
d'un cordon de soudure



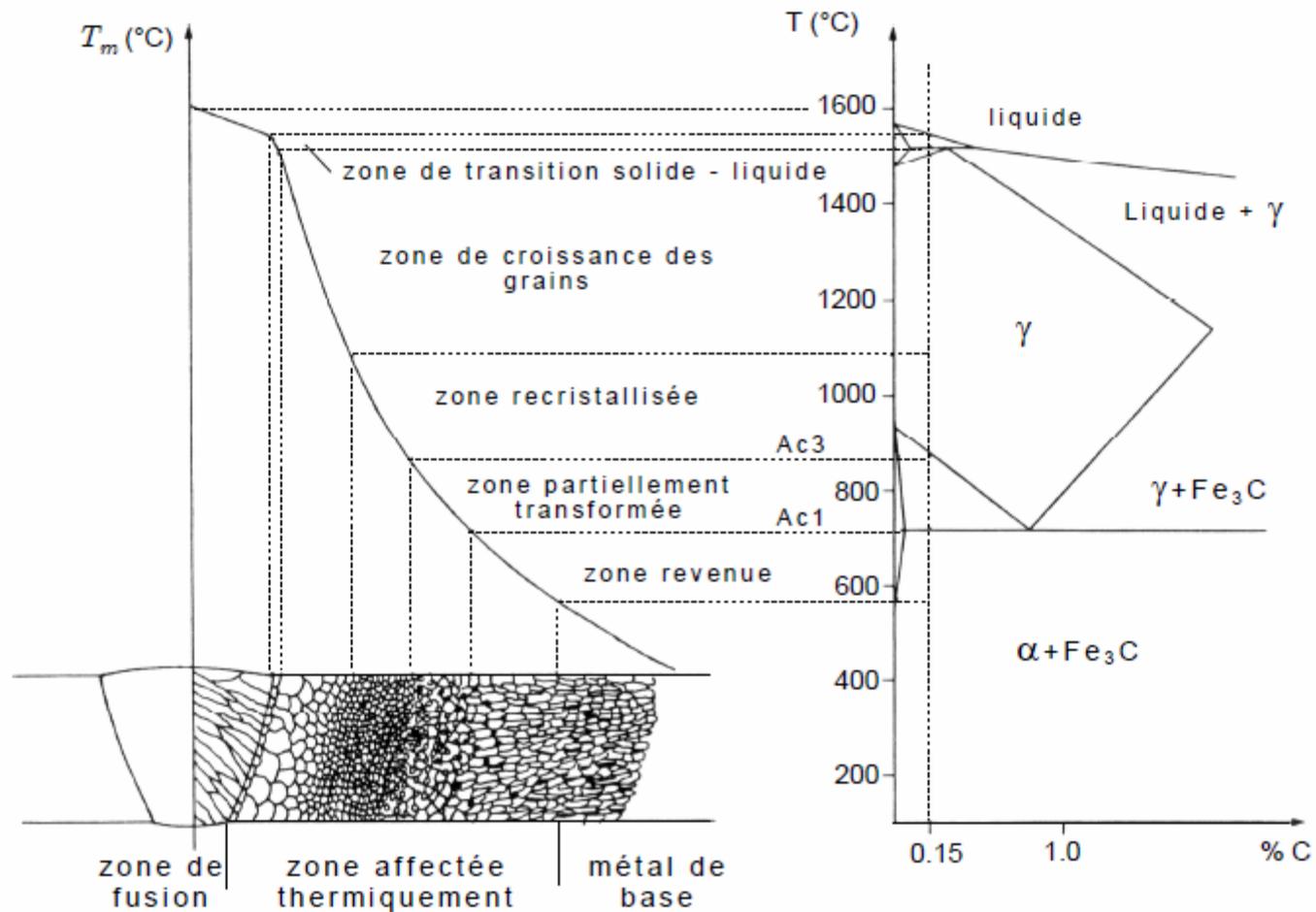
# Aspects métallurgiques

## ➤ Structure de ZAT:

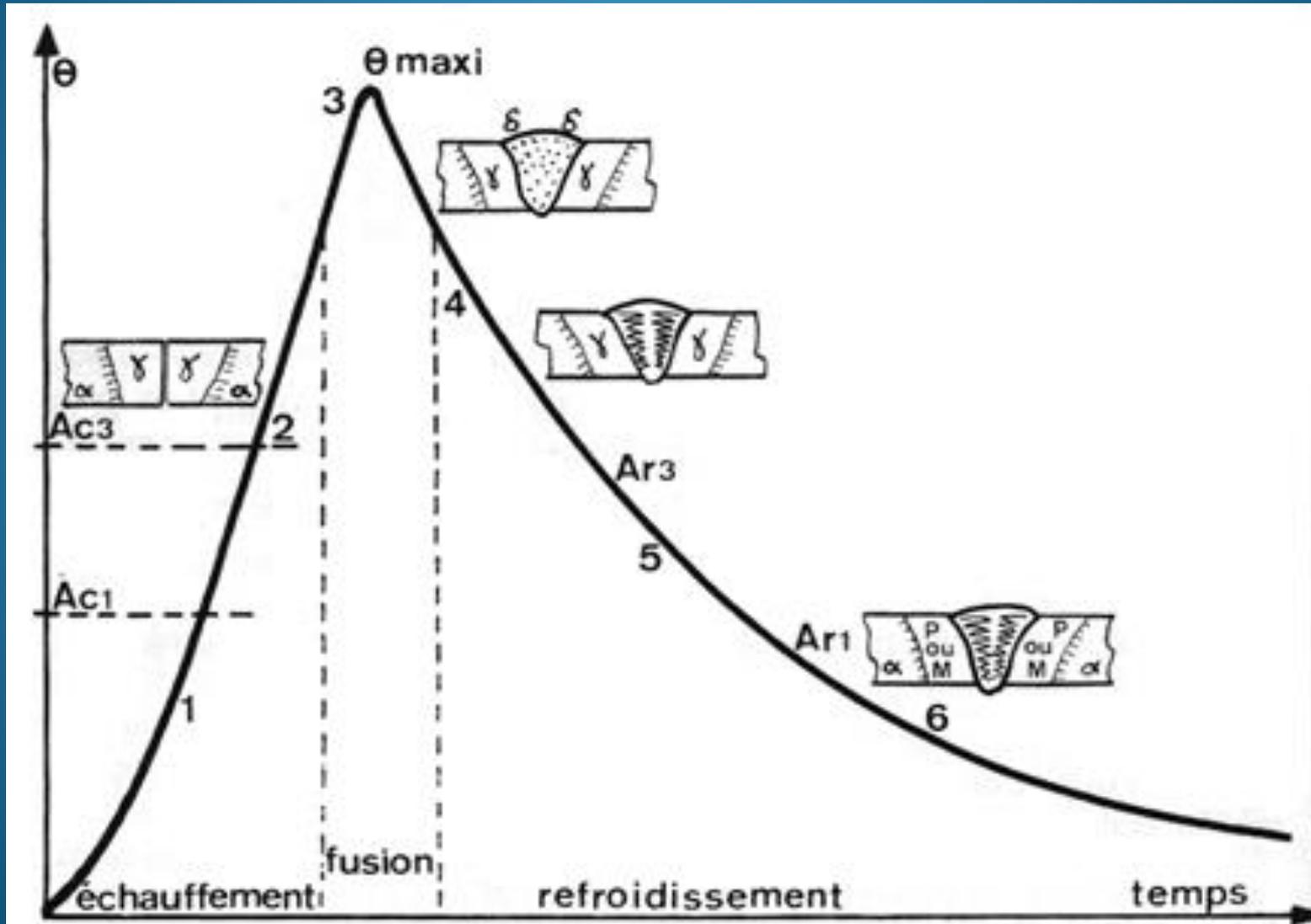


➔ Les structures finales dépendent du cycle thermique du point considéré ( $T_{\max}$  et vitesse de refroidissement)

# Aspects métallurgiques



# Aspects métallurgiques

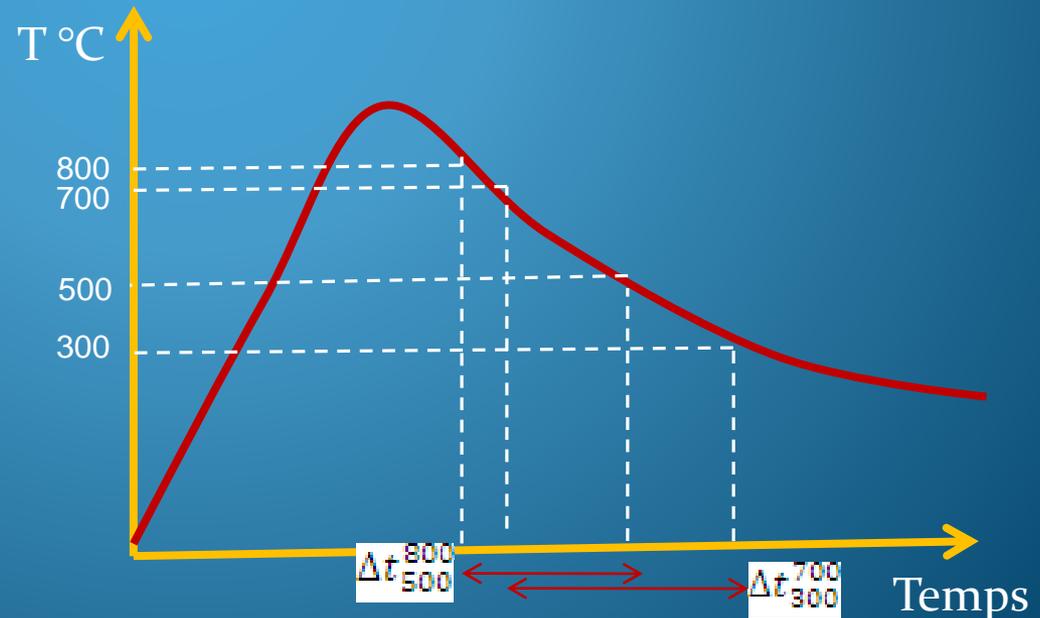


# Notes sur les diagrammes de transformations au refroidissement

- ↳ Lors des cycles thermiques de soudage, la durée d'austénisation  $\Delta t \approx 0$  (Très faible)
  - ⇒ Les diagrammes TRC établis pour les traitements thermique ne sont plus valables
  - ⇒ Etablissement des diagrammes équivalents en conditions de soudage (**TRCS**)
- ➔ Diagrammes établis en fonction des paramètres de refroidissement
- ➔ On distingue:

➤  $\Delta t_{500}^{800}$  ( IS et IRSID)

➤  $\Delta t_{300}^{700}$  ( IRSID)



# Note sur les diagrammes de transformations au refroidissement

## ☛ Détermination de $\Delta(500-800)$

➔ La détermination du paramètre  $\Delta(500-800)$  peut se faire selon:

- Modèles théoriques tenant compte du procédé et des caractéristiques spécifiques du matériau
- Abaques expérimentaux:
  - Abaques établis en fonction de:
    - ✓ La température initiale
    - ✓ L'épaisseur
    - ✓ Le procédé
  - Par le suivi de  $\Delta(500-800)$ , on peut alors établir pour un matériau donné:
    - ✓ Un diagramme TRCS (  $T^\circ=f(\Delta(500-800))$  )
    - ✓ Un diagramme Dureté (  $Hv=f(\Delta(500-800))$  )

➔ But: Déterminer la composition structurale et les propriétés mécaniques du matériau après soudage

# Note sur les diagrammes de transformations au refroidissement

## ☛ Détermination de $\Delta(500-800)$

### ➔ Méthode utilisant un modèle mathématique

➤ Tôles épaisses (  $e > 25\text{mm}$  ) :

$$\Delta t_{500}^{800} = E_d \frac{1}{2\pi a} \left( \frac{1}{(P_c)_f (500 - \theta_0)} - \frac{1}{(P_c)_d (800 - \theta_0)} \right)$$

➤ Tôles minces (  $e \leq 20\text{mm}$  ) :

$$\Delta t_{500}^{300} = \left( \frac{E_d}{e'} \right)^2 \frac{1}{4\pi a} \left( \left( \frac{1}{(P_c)_f (500 - \theta_0)} \right)^2 - \left( \frac{1}{(P_c)_d (300 - \theta_0)} \right)^2 \right)$$

$a$  = Coefficient de diffusivité thermique ( pour les aciers courants  $a \sim 0.054$  )

$(Pc)_d$  = capacité calorifique en début de transformation à  $800^\circ\text{C}$

$(Pc)_f$  = capacité calorifique en fin de transformation (à  $500^\circ\text{C}$ ).

$\theta_0$  = Température initiale

$E_d$  = Energie dissipée telle que:  $E_d = \frac{UV}{v} \eta$

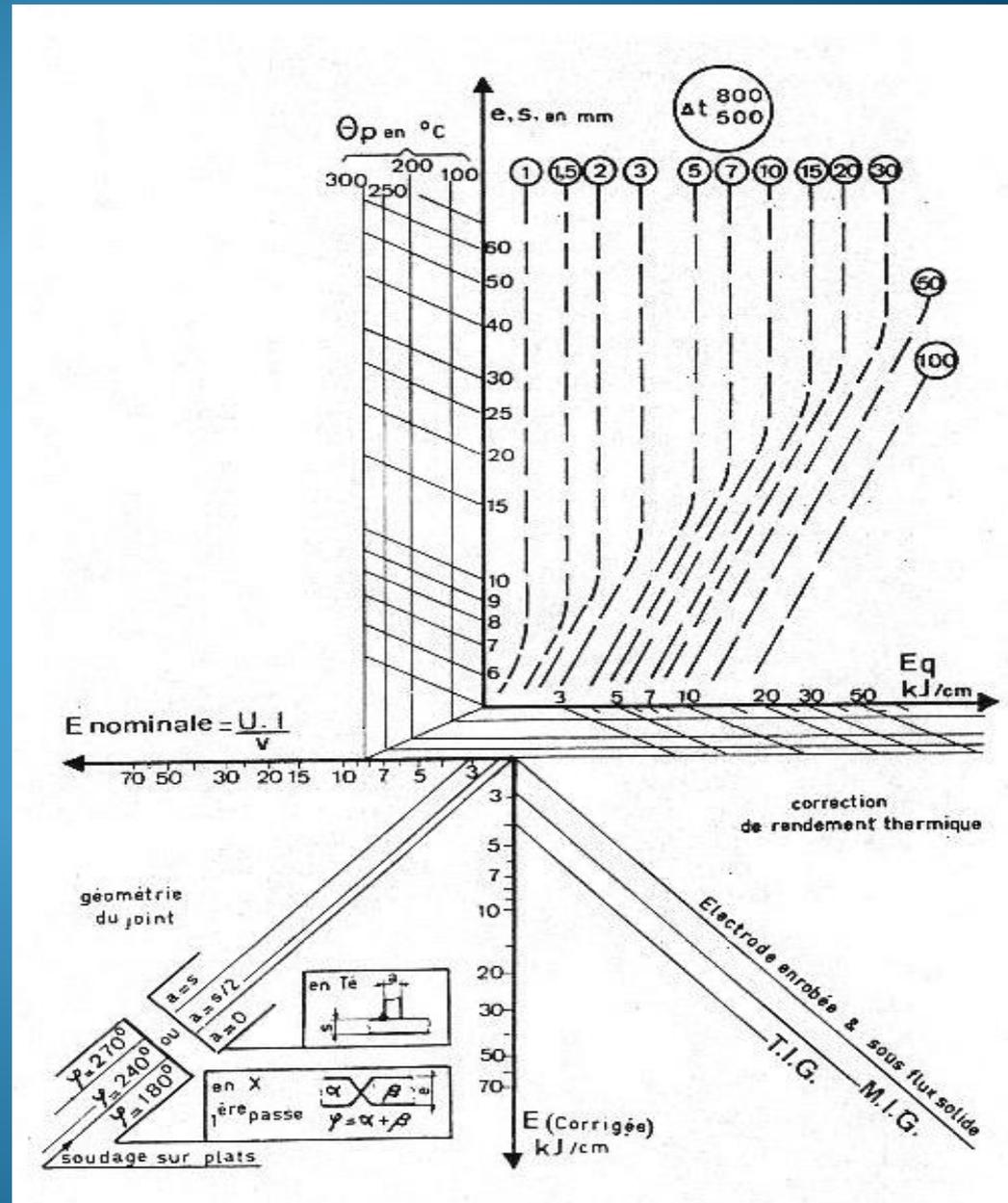
$e$  = épaisseur combinée

# Note sur les diagrammes de transformations au refroidissement

➡ Détermination de  $\Delta(500-800)$

➡ Méthodes utilisant des abaques expérimentaux:

➡ Exemples:



# Soudabilité métallurgique

## ☛ Méthode BWRA ( Bristich Welding Ressearch Association)

➔ Elle tient compte de:

- Indice de soudabilité défini par le carbone équivalent, la nature et le diamètre de l'électrode
- Indice de sévérité thermique (Thermal Severity Number) défini par l'épaisseur des pièces et la forme de l'assemblage suivant leur disposition

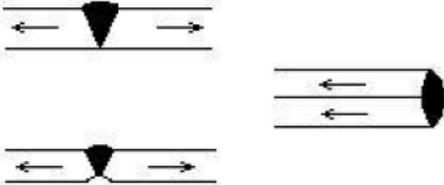
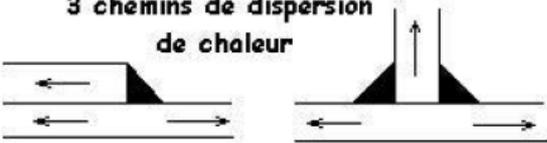
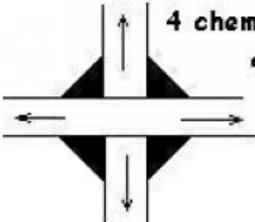
➔ L'indice TSN est donné par:

$$\text{TSN} = \frac{\text{Épaisseur moyenne des tôles} \times \text{le nombre de voies de dispersion}}{6}$$

➔ 6 étant pris comme unité d'épaisseur

# Soudabilité métallurgique

## ➤ Détermination de l'indice de sévérité thermique (TSN):

| Type de joint                                                                                                                 | Epaisseur des tôles en mm | TSN |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|-----|
|  <p>2 chemins de dispersion de chaleur</p>   | 6 et 6                    | 2   |
|                                                                                                                               | 6 et 12                   | 3   |
|                                                                                                                               | 6 et 18                   | 4   |
|                                                                                                                               | 12 et 12                  | 4   |
|                                                                                                                               | 24 et 24                  | 8   |
|                                                                                                                               | 24 et 48                  | 12  |
|  <p>3 chemins de dispersion de chaleur</p>  | 6 et 6                    | 3   |
|                                                                                                                               | 12 et 12                  | 6   |
|                                                                                                                               | 24 et 24                  | 12  |
|  <p>4 chemins de dispersion de chaleur</p> | 6 et 6                    | 4   |
|                                                                                                                               | 12 et 12                  | 8   |
|                                                                                                                               | 24 et 24                  | 16  |
|                                                                                                                               | 6 - 12 - 12 - 12          | 7   |

# Soudabilité métallurgique

→ Avec un carbone équivalent donné par:

$$[C] = C + \frac{Mn}{20} + \frac{Ni}{15} + \frac{Cr + Mo + V}{10}$$

→ L'indice de soudabilité des aciers est donnée sur le tableau suivant:

| Carbone équivalent        |                            | Lettres définissant l'indice de soudabilité |
|---------------------------|----------------------------|---------------------------------------------|
| Avec une électrode rutile | Avec une électrode basique |                                             |
| 0,20                      | 0,25                       | A                                           |
| 0,21 à 0,23               | 0,26 à 0,30                | B                                           |
| 0,24 à 0,27               | 0,31 à 0,35                | C                                           |
| 0,28 à 0,32               | 0,36 à 0,40                | D                                           |
| 0,33 à 0,38               | 0,41 à 0,45                | E                                           |
| 0,39 à 0,45               | 0,46 à 0,50                | F                                           |
| > à 0,45                  | > à 0,50                   | G                                           |

# Soudabilité métallurgique des aciers

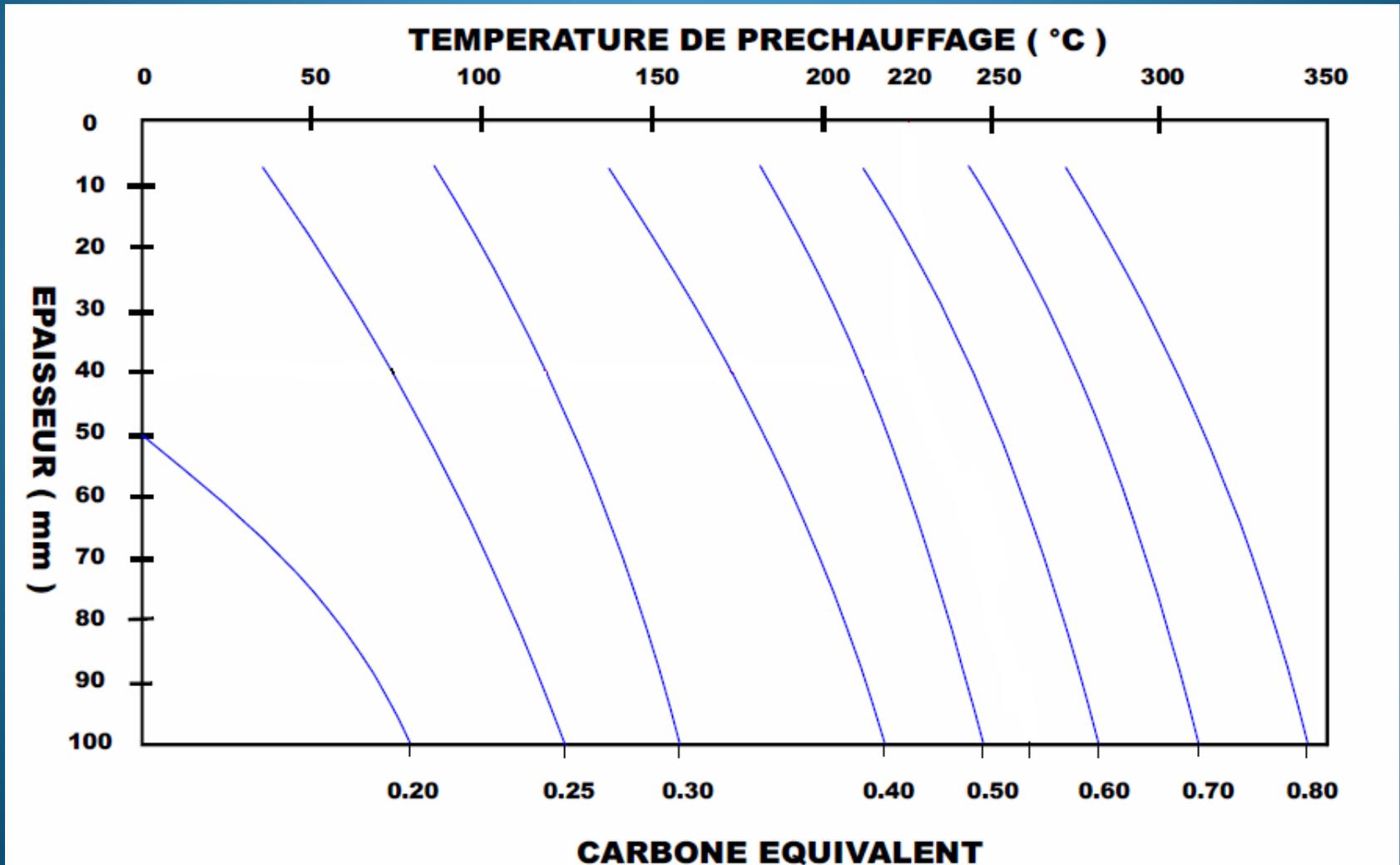
👉 Tableau des préchauffages:

| Chiffre de sévérité thermique<br>TSN | Indice de soudabilité | Température minimale à laquelle doit être exécuter la soudure |     |     |     |     |
|--------------------------------------|-----------------------|---------------------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|
|                                      |                       | Diamètre de l'électrode                                       |     |     |     |     |
|                                      |                       | 3,2                                                           | 4   | 5   | 6   | 8   |
| TSN 2                                | D                     |                                                               |     |     |     |     |
|                                      | E                     | 50                                                            |     |     |     |     |
|                                      | F                     | 125                                                           | 25  |     |     |     |
| TSN 3                                | C                     | 0                                                             |     |     |     |     |
|                                      | D                     | 75                                                            |     |     |     |     |
|                                      | E                     | 100                                                           | 25  |     |     |     |
|                                      | F                     | 150                                                           | 100 | 25  |     |     |
| TSN 4                                | B                     | 25                                                            |     |     |     |     |
|                                      | C                     | 50                                                            |     |     |     |     |
|                                      | D                     | 100                                                           | 25  |     |     |     |
|                                      | E                     | 125                                                           | 75  |     |     |     |
| TSN 6                                | F                     | 175                                                           | 125 | 75  |     |     |
|                                      | A                     | 25                                                            |     |     |     |     |
|                                      | B                     | 50                                                            |     |     |     |     |
|                                      | C                     | 100                                                           | 25  |     |     |     |
|                                      | D                     | 150                                                           | 100 | 25  |     |     |
|                                      | E                     | 175                                                           | 125 | 75  | 25  |     |
| TSN 8                                | F                     | 225                                                           | 175 | 125 | 75  |     |
|                                      | A                     | 25                                                            |     |     |     |     |
|                                      | B                     | 75                                                            |     |     |     |     |
|                                      | C                     | 125                                                           | 75  | 25  |     |     |
|                                      | D                     | 175                                                           | 125 | 75  |     |     |
|                                      | E                     | 200                                                           | 150 | 125 | 50  | 25  |
| TSN 12                               | F                     | 225                                                           | 200 | 175 | 125 | 50  |
|                                      | A                     | 75                                                            | 25  |     |     |     |
|                                      | B                     | 125                                                           | 75  | 25  |     |     |
|                                      | C                     | 150                                                           | 125 | 75  |     |     |
|                                      | D                     | 200                                                           | 175 | 125 | 75  |     |
|                                      | E                     | 225                                                           | 200 | 175 | 100 | 50  |
| TSN 16                               | F                     | 250                                                           | 225 | 200 | 150 | 125 |
|                                      | A                     | 75                                                            | 25  | 25  |     |     |
|                                      | B                     | 125                                                           | 75  | 50  | 25  |     |
|                                      | C                     | 175                                                           | 150 | 125 | 50  |     |
|                                      | D                     | 200                                                           | 175 | 175 | 125 | 50  |
|                                      | E                     | 225                                                           | 200 | 200 | 150 | 100 |
| TSN 24                               | F                     | 250                                                           | 250 | 225 | 200 | 150 |
|                                      | A                     | 75                                                            | 25  | 25  |     |     |
|                                      | B                     | 125                                                           | 75  | 50  | 25  |     |
|                                      | C                     | 175                                                           | 150 | 125 | 75  |     |
|                                      | D                     | 200                                                           | 175 | 175 | 125 |     |
|                                      | E                     | 225                                                           | 200 | 200 | 175 |     |

# Soudabilité métallurgique des aciers

→ Diagramme de SEFERIAN

→ Diagramme de détermination des températures de préchauffage des aciers au carbone et faiblement alliés



# Soudabilité métallurgique

→ Si **S** représente le coefficient de soudabilité, on a :

pour les aciers au carbone et faiblement alliés.

## PARFAITEMENT SOUDABLE

C = 0 à 0,25 %

S 9 à 10

## MOYENNEMENT SOUDABLE

C = 0,25 à 0,45 %

S 7 à 9

## SOUDABLE AVEC PRECHAUFFAGE

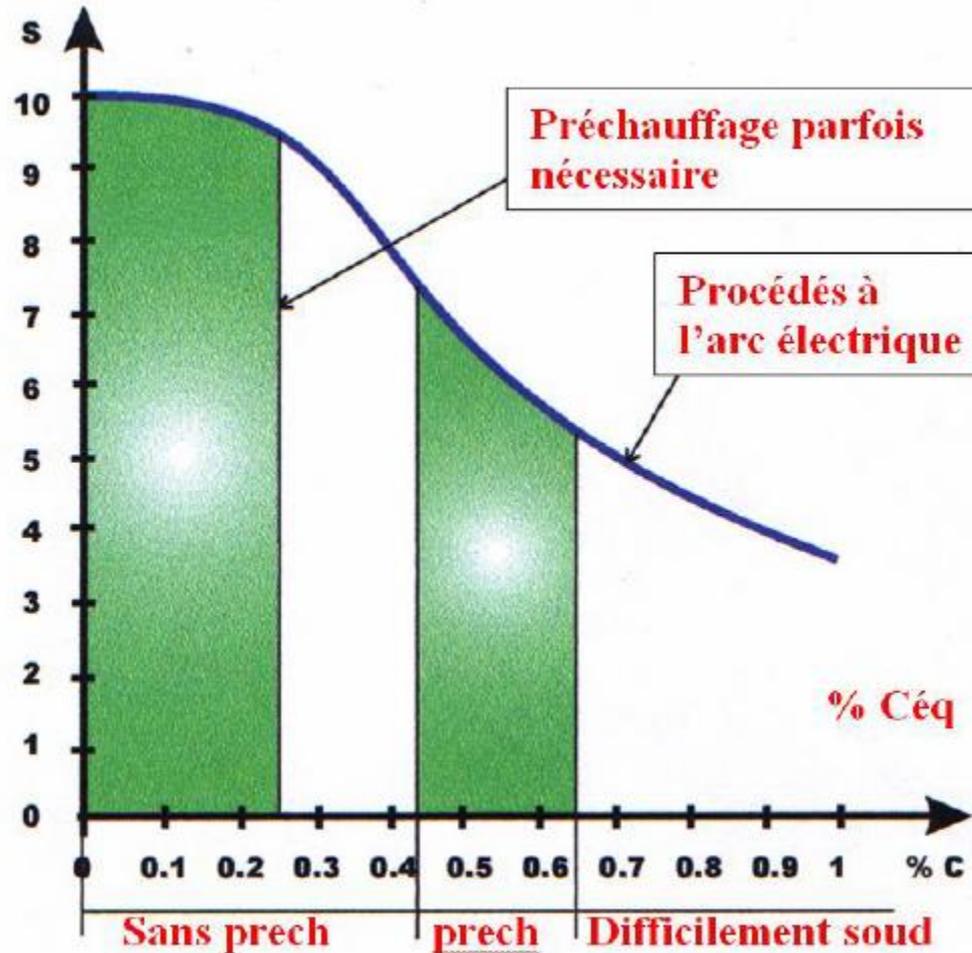
C = 0,45 à 0,65 %

S 5 à 7

## SOUDAGE DIFFICILE

Soudage sous conditions (préchauffage) indispensable

S < 5



# Soudabilité métallurgique des aciers

Exemple de calcul : soit à assembler 2 tôles d'acier ( 35 Cr Mo 4 ) épaisseur 10mm bout à bout avec une électrode basique de  $\varnothing$  3,2.

rappel de la formule : 
$$CE = C + \frac{Mn}{20} + \frac{Ni}{15} + \frac{Cr + Mo + V}{10}$$

1) Détermination du CE : 35 Cr Mo 4

Carbone ( C ) : 0,35%

Chrome ( Cr ) : 1%

Molybdène ( Mo ) : 0,30%

$$\text{Carbone équivalent ( CE )} = 0,35 + \left( \frac{1 + 0,30}{10} \right) = 0,48\%$$

2) Détermination de l'indice de soudabilité

Electrode :  $\varnothing$  3,2

Lettre : F

3) Détermination du chiffre de sévérité thermique :

Type d'assemblage : bout à bout 2 chemins de dispersion de chaleur

Epaisseur des tôles : 10mm

TSN = 3,33 donc : 3

4) Détermination de la température de préchauffage :

TSN = 3

Indice : F

Température de préchauffage = 150°

# Phénomènes de fissuration dans les assemblages soudés

→ En général, on distingue deux types de fissures:

- Fissures à chaud
- Fissures à froid

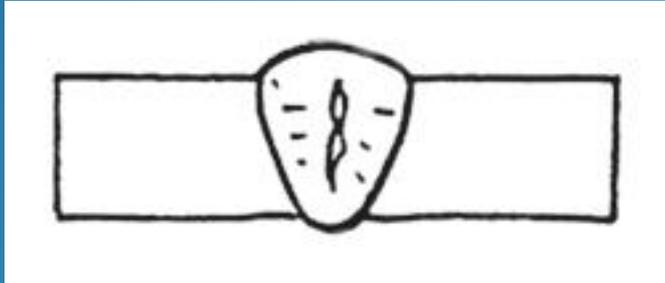
## ◆ Fissures à chaud:

- Elles se forment sous l'effet du retrait lors du refroidissement
- Elles sont dues en général à l'association de plusieurs facteurs tels que:
  - Ségrégations
  - Présence de S et P ( Affaiblissement des propriétés mécaniques
  - Sévérité des cycles thermiques
  - Propriétés mécaniques du métal d'apport
  - Degré de bridage
  - Contraintes résiduelles dans ZAT
  - Volume du bain de fusion

# Phénomènes de fissuration dans les assemblages soudés

## ◆ Fissures à chaud:

➔ Exemple:



➔ Trois causes principales peuvent être distinguées:

- Composition chimique
- Forme du cordon.
- Contraintes appliquées lors de la solidification

# Phénomènes de fissuration dans les assemblages soudés

## ◆ Fissures à chaud:

### ➤ Composition chimique:

### ➔ Formules empiriques:

### ➔ **UCS**: Unit of Crack Susceptibility

$$\text{UCS} = 230.C^* + 190\%.S + 75\%.P + 45\%.Nb - 12.3\%.Si - 5.4\%.Mn - 1$$

Si %C < 0.08%, Prendre C\* = 0.08%

### ➔ Sensibilité à chaud si:

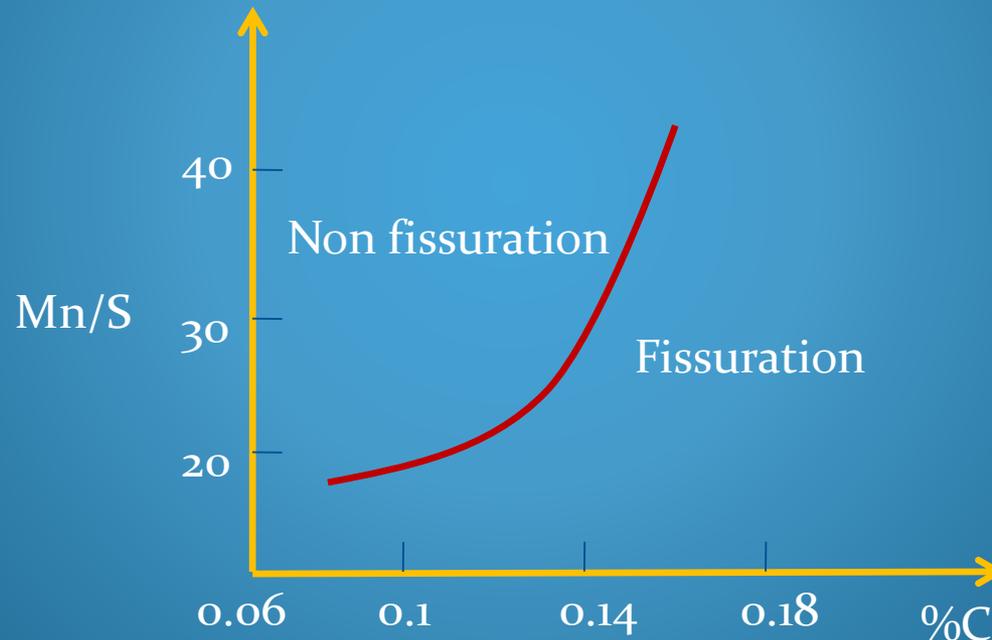
- **UCS > 19** pour les joints en T

- **UCS > 25** pour les joints bout à bout

# Phénomènes de fissuration dans les assemblages soudés

→ La cause souvent rencontrée : Ségrégation des sulfures

→ En général, on peut éviter de telles fissures par l'ajout du Mn:



→ Prévention: - Mn/S adéquat  
- Réduction de S, P, C et Nb au minimum

# Phénomènes de fissuration dans les assemblages soudés

- ➔ Plus le %C est élevé  $\Rightarrow$  Mn/S élevé
- ➔ Phénomènes de fissuration complexes:
  - Les fissures à chaud causées par les films d'impuretés dans le liquide ( $T_f$  faible)
  - Lors du soudage des aciers faiblement alliés
    - $\Rightarrow$  %C doit être  $<0.1\%$
  - Si l'alliage se solidifie sous forme de «  $\delta$  »  $\Rightarrow$  Réaction péritectique
    - ▶ Comme les sulfures sont dissouts dans «  $\delta$  » et non dans «  $\gamma$  »
      - $\Rightarrow$   $\gamma$  rejette les sulfures formés dans les joints
      - $\Rightarrow$  D'où formation d'un film intergranulaire de  $T_f$  faible
      - $\Rightarrow$  Fissuration à chaud

# Phénomènes de fissuration dans les assemblages soudés

## ➤ Forme du cordon:

- Maintenir un rapport de largeur du cordon sur sa hauteur tel que:  
$$l / h \geq 0.7$$
- Cordon de forme convexe plutôt que concave.
- Chanfreinage adéquat

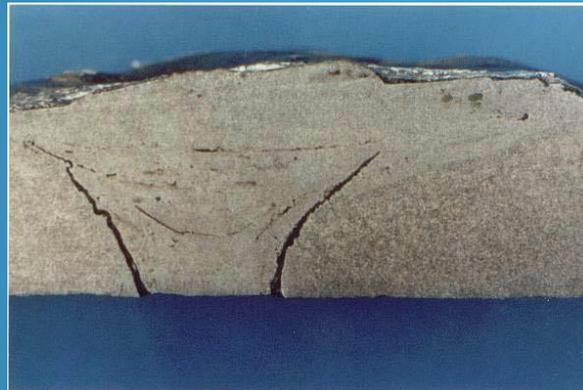
## ➤ Contraintes appliquées lors de la solidification:

- L'augmentation de l'épaisseur de la tôle et une limite élastique trop élevée favorisent les contraintes.
- Des pièces bridées par géométrie de l'assemblage ou maintien en position trop rigide durant le soudage.

# Phénomènes de fissuration dans les assemblages soudés

## ◆ Fissures à froid:

- Défauts les plus redoutés dans les joints soudés
- Apparaissent généralement dans ZAT



## → 3 causes principales:

- Structure fragile dans ZAT
- Présence de  $H_2$  dans ZF et la ZAT
- État de contraintes

# Phénomènes de fissuration dans les assemblages soudés

- Structure fragile dans ZAT:

- Si le cycle thermique sévère  $\Rightarrow$  apparition de la martensite  
 $\Rightarrow$  Contraintes résiduelles  
d'où: **Fissuration**

- Prévention:

Contraintes résiduelles très faible (TT) ou  $\Delta t(500-800)$  suffisante pour l'obtention d'une structure favorable

- Exemple: Courbe HV-  $\Delta t(500-800)$

$$HV_c = 240 + (790 \cdot \%C)$$

- $\Rightarrow$  Utilisation du diagramme pour déterminer  $\Delta t(500-800)$  limite

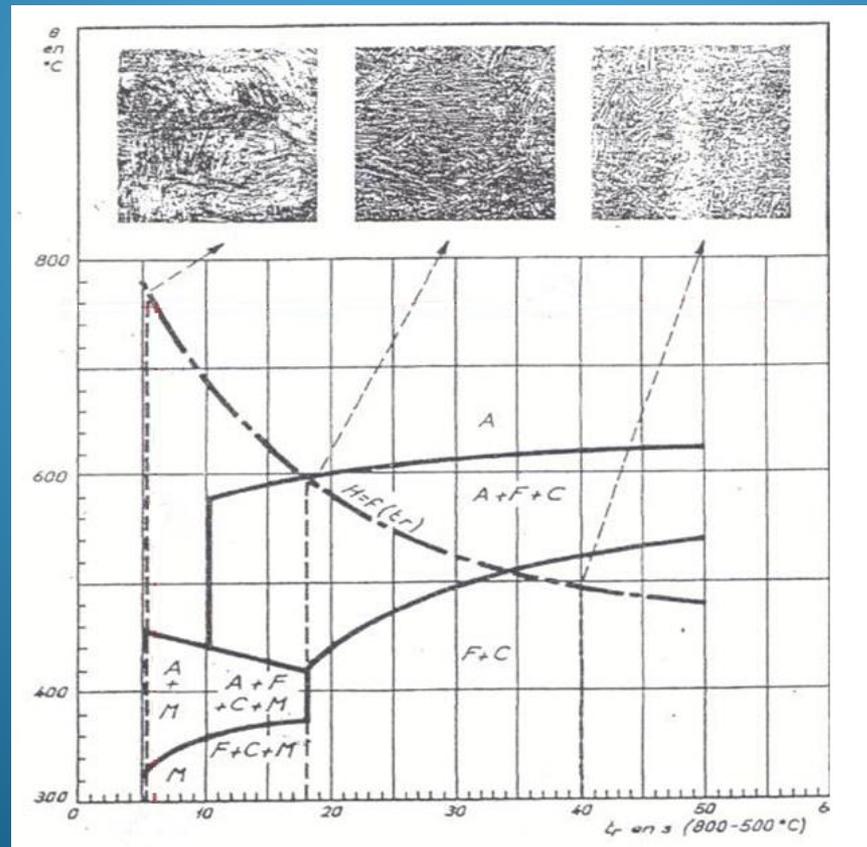
- Pour E36:  $\%C \approx 0.2$   $\Rightarrow HV_c < 398$   $\Rightarrow \Delta t(500-800) > 6.5 \text{sec}$

# Phénomènes de fissuration dans les assemblages soudés

- Structure fragile dans ZAT:

➔ Exemple de diagramme TRCS d'un acier de composition:

| C    | Mn   | Si   | Cr   | Ni   | Mo   | Cu | V    |
|------|------|------|------|------|------|----|------|
| 0.14 | 1.41 | 0.36 | 0.06 | 0.15 | 0.05 |    | 0.08 |

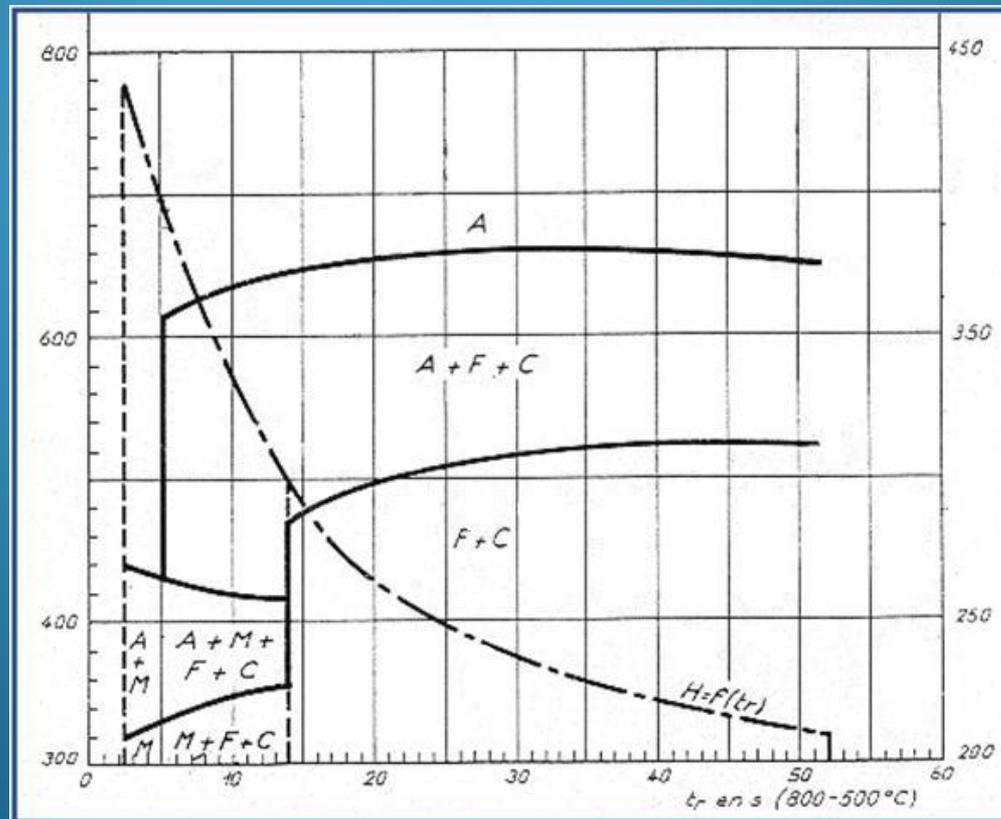


# Phénomènes de fissuration dans les assemblages soudés

- Structure fragile dans ZAT:

➔ Exemple de diagramme TRCS d'un acier de composition:

|         | C    | Mn  | Si   | Al    | S     | P     |
|---------|------|-----|------|-------|-------|-------|
| S355 JO | 0.17 | 1.4 | 0.45 | 0.063 | 0.026 | 0.027 |



# Phénomènes de fissuration dans les assemblages soudés

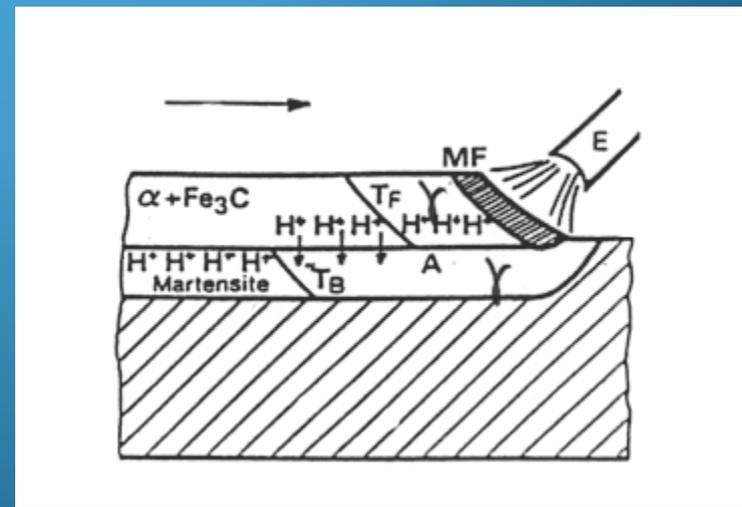
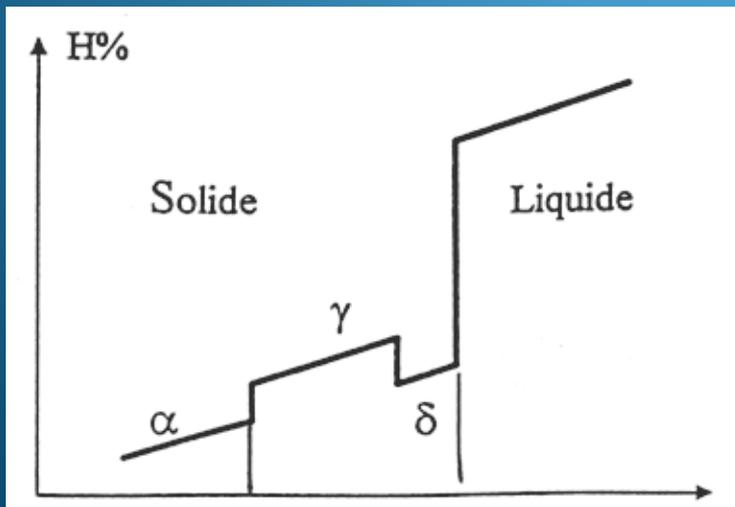
## ● Présence de $H_2$ dans la ZF et la ZAT:

➔  $H_2$  peut provenir de:

- Humidité
- $H_2O$  dans l'enrobage
- Huile, graisse, peinture,...etc

➔ Dans les réseaux cristallins du Fer  $\gamma$  et  $\alpha$ , les atomes de  $H_2$  forment des solutions solides d'insertion.

➔ La solubilité de  $H_2$  varie en fonction de la température



# Phénomènes de fissuration dans les assemblages soudés

- Présence de H<sub>2</sub> dans la ZF et la ZAT:

- La différence de solubilité de H<sub>2</sub> dans  $\gamma$  et  $\alpha$ 
  - ⇒ Migration de H<sub>2</sub> vers les zones qui restent austénitiques
    - ⇒ Concentration de H dans les réseaux
      - D'où risque de fissuration

- État de contraintes:

- Sous l'effet des contraintes en service et des contraintes résiduelles dans ZAT
  - ⇒ Microfissuration par décohésion du métal

# PREVENTION DES DEFORMATIONS ET DE FISSURATION

## ☛ Exemples de préventions:

### ◆ Déformation préalable:

➔ **Exemples:** Avant



Après

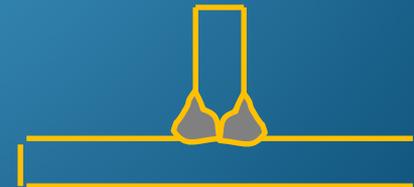
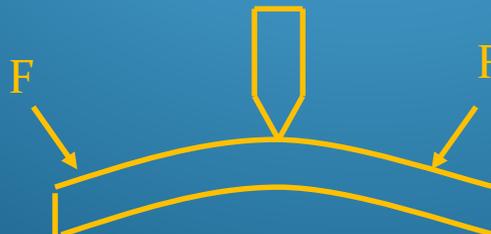


## ➔ **Solutions:**

- **Contre position avant soudage:**

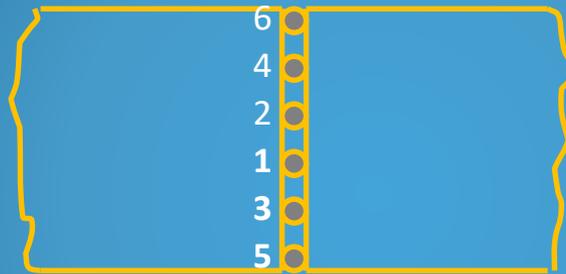


- **Pré-déformation:**



# PREVENTION DES DEFORMATIONS ET DE FISSURATION

## ◆ Pointage:



→ Espacement des points :  $20.e$  si  $e > 5\text{mm}$

$30.e$  si  $e \leq 5\text{mm}$

$e$  = épaisseur de la pièce

# PREVENTION DES DEFORMATIONS ET DE FISSURATION

## ◆ Utilisation d'un talon:



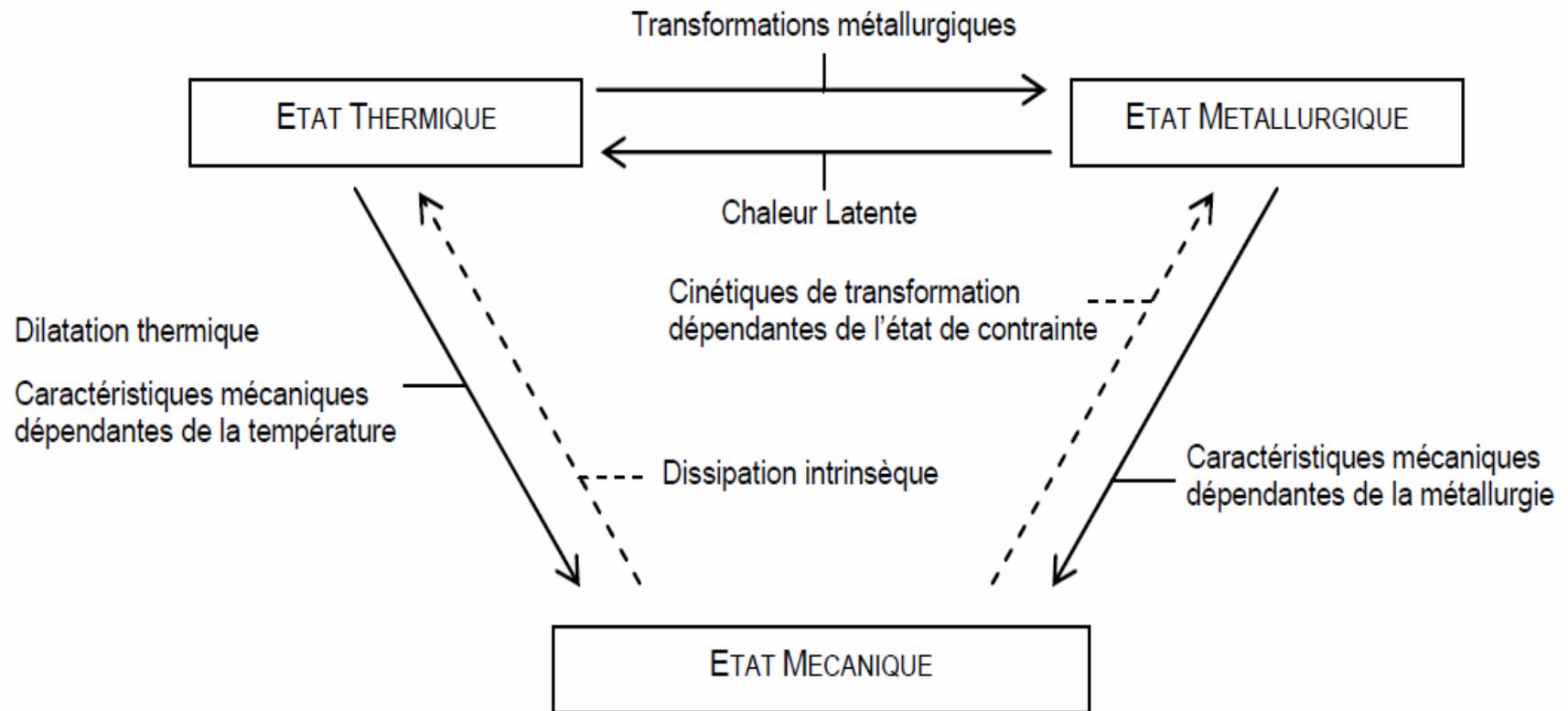
## ◆ Préchauffage:

Le préchauffage est appliqué localement ou sur l'ensemble de la pièce

# PREVENTION DES DEFORMATIONS ET DE FISSURATION

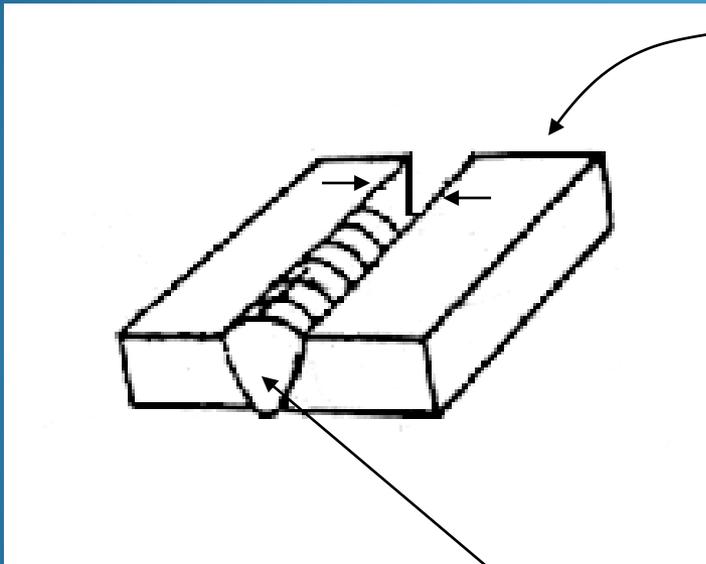
- ◆ Choix du procédé: Choix de l'apport thermique et de la vitesse d'avancement de la source de chaleur
- ◆ Chauffage antagoniste: Chauffage local appliqué sur une portion de la pièce opposée à celle que l'on assemble  
But : annuler les retraits du soudage
- ◆ Choix de l'ordre d'exécution des soudures

# Interactions entre les états thermiques, métallurgiques et mécaniques



**MERCI DE VOTRE  
ATTENTION**

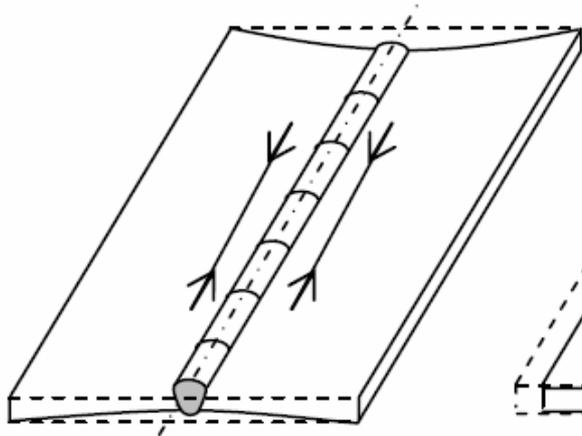
# PREVENTION DES DEFORMATIONS ET DE FISSURATION



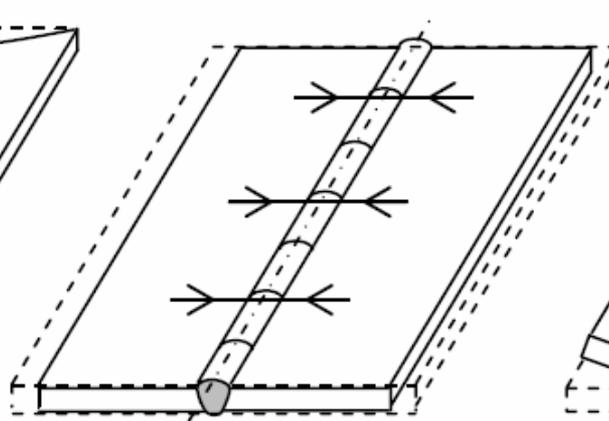
Rapprochement  
provoqué au cours du  
soudage

Contraction du métal lors  
de la solidification

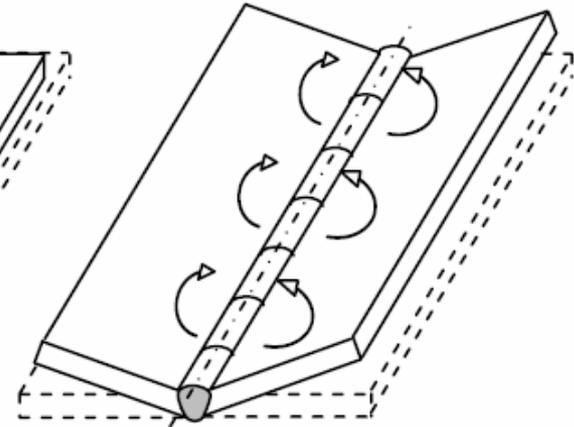
# PREVENTION DES DEFORMATIONS ET DE FISSURATION



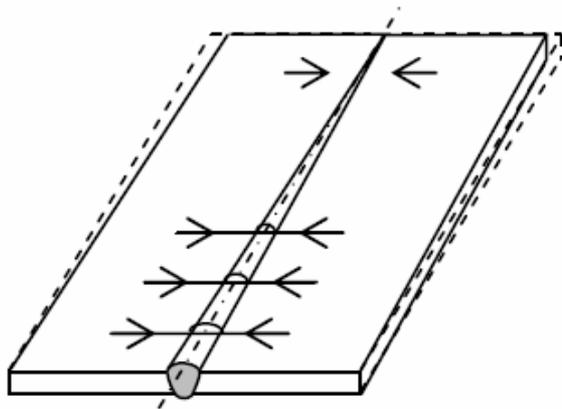
(a) retrait longitudinal



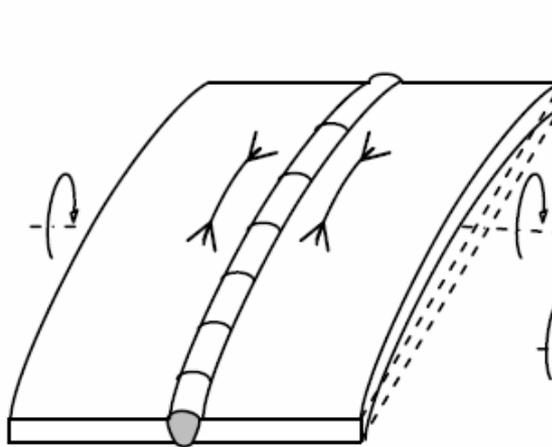
(b) retrait transversal



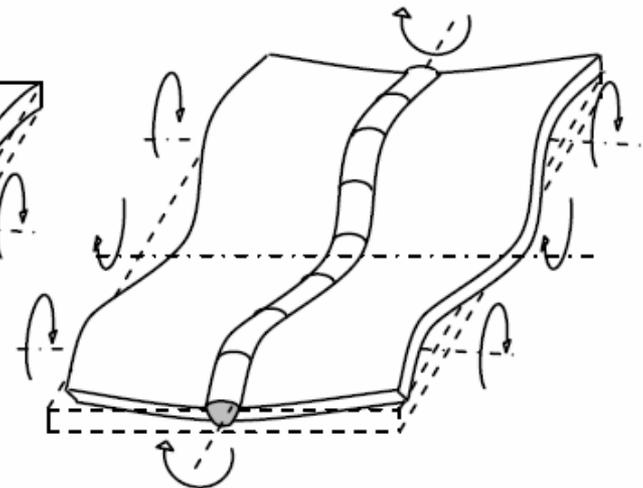
(c) effet de pliage



(d) effet de serrage



(e) effet de cintrage



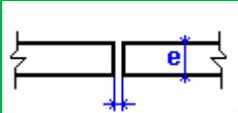
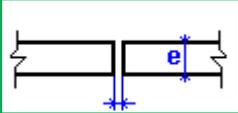
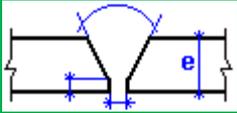
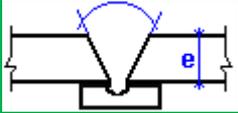
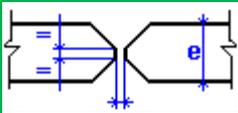
(f) flambage

# Exemples de choix des intensités de soudage

Intensité moyenne de soudage pour la position à plat

| Epaisseur | Ø 1,6 mm | Ø 2,0 mm | Ø 2,5 mm | Ø 3,2 mm | Ø 4,0 mm | Ø 5,0 mm |
|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 3 mm      |          | 60 A     | 70 A     | 90 A     |          |          |
| 4 mm      |          |          | 80 A     | 100 A    | 120 A    |          |
| 5 mm      |          |          | 90 A     | 110 A    | 130 A    | 160 A    |
| 6 mm      |          |          | 90 A     | 120 A    | 140 A    | 160 A    |
| 8 mm      |          |          | 90 A     | 125 A    | 150 A    | 170 A    |
| 10 mm     |          |          |          | 130 A    | 160 A    | 190 A    |

# Exemples de choix des intensités de soudage

| QUELQUES PRÉPARATIONS DE JOINTS |                        |                |                                                                                       |
|---------------------------------|------------------------|----------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Epaisseur en mm                 | Fourchette d'intensité | Ø électrode    | Préparation                                                                           |
| De 1,0 à 2,5 mm                 | 30 à 60 ampères        | Ø 1,6 mm       |    |
| De 2,0 à 4,0 mm                 | 50 à 90 ampères        | Ø 2,0 à 3,2 mm |    |
| De 4,0 à 20 mm                  | 60 à 200 ampères       | Ø 2,5 à 5,0 mm |   |
| De 4,0 à 20 mm                  | 70 à 200 ampères       | Ø 2,5 à 5,0 mm |  |
| De 8,0 à 30 mm                  | 80 à 200 ampères       | Ø 3,2 à 5,0 mm |  |