CHANGER L'ÉNERGIE ENSEMBLE

Introduction

Fissuration à froid

Arrachement lamellaire

Fissuration en relaxation

Fissuration à chaud

Fissuration et soudage

☞ En soudage, l'apport localisé et rapide de chaleur et son écoulement conduisent à des cycles thermiques qui modifient l'état mécanique et métallurgique du matériau.

⇒ Ces modifications peuvent introduire, en fonction de la nature du matériau, des fissures préjudiciables pour la tenue en service des structures.

☞ Cette contribution analysera plus précisément:

- la fissuration à froid (FAF),
- l'arrachement lamellaire,
- la fissuration au réchauffage,
- la fissuration à chaud (FAC).

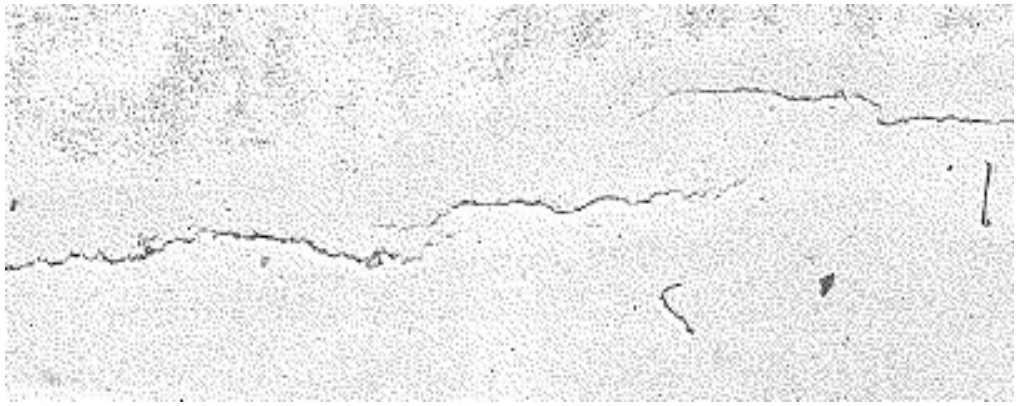
☞ Aciers et Bases Nickel

Fissuration à froid

Généralités
Martensite
hydrogène
Mécanisme
Moyens d'essais
Limitation de la FAF

☞ Température apparition < à 200°C.

☞ Fissures fines



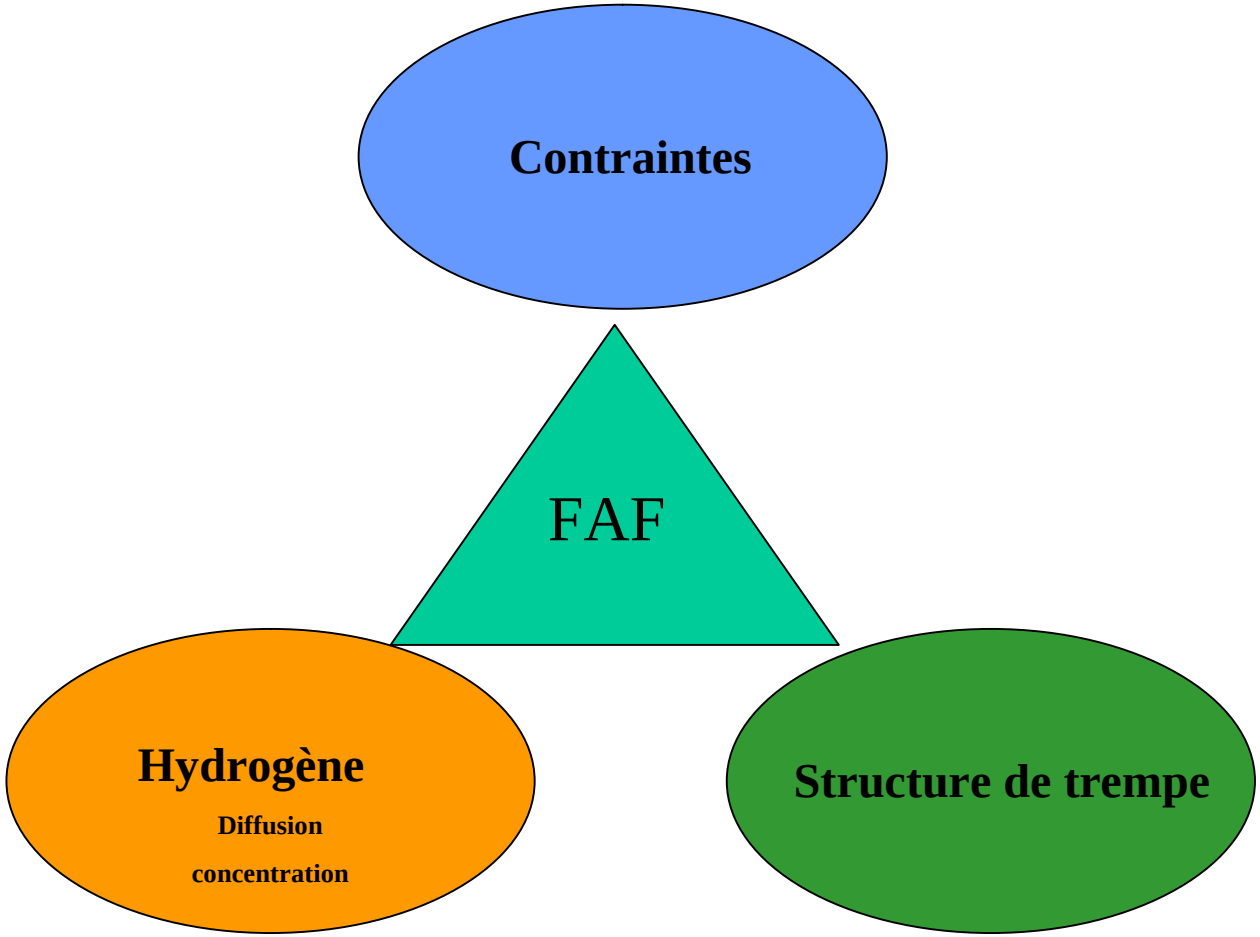
X10

☞Les fissures sont intergranulaire et le plus souvent de type longitudinal en zone affectée thermiquement (ZAT) proche de la zone de liaison où la structure de trempe est plus marquée (hydrogène facteur déterminant).
Si facteur déterminant σ ⇒ fissures perpendiculaires et de caractère transgranulaire

Fissuration à froid

Généralités
Martensite
hydrogène
Mécanisme
Moyens d'essais
Limitation de la FAF

La FAF résulte de la combinaison de trois facteurs :



Fissuration à froid

Généralités
Martensite
hydrogène
Mécanisme
Moyens d'essais
Limitation de la FAF

La présence d'une structure de trempe dépend de la vitesse de refroidissement et de la nature de l'alliage.

☞ Nature de l'alliage

La composition chimique va influencer la trempabilité de l'acier.

Plus la vitesse de formation de la ferrite et de la cémentite à partir de l'austénite est faible ⇒ ↗ avoir de la Martensite

Les éléments d'addition en solution dans austénite retarde la germination croissance de la cémentite ⇒ ↗ avoir de la Martensite.

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Cu + Ni}{15}$$

Plus le CE sera grand plus le risque de FAF sera grand ⇒
Premier indicateur :

- ☞ **Si CE ≤ 0,42 ⇒ pas de problème,**
- ☞ **Si CE> 0,5 (C< 0,3%) ⇒ à éviter**

Fissuration à froid

Généralités

Martensite

hydrogène

Mécanisme

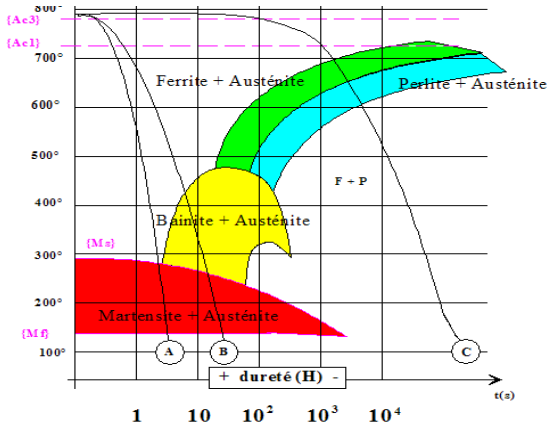
Moyens d'essais

Limitation de la FAF

☞ vitesse de refroidissement

☞ Si Vr ↗ ⇒ ↗ avoir de la Martensite

Vr = fonction(température initiale de la pièce, épaisseur et de l'énergie de soudage)



☞ Si T0 ↘ ⇒ Vr ↗ ⇒ ↗ avoir de la Martensite

☞ Si e ↗ ⇒ Vr ↗ ⇒ ↗ avoir de la Martensite

☞ Si Es ↘ ⇒ Vr ↗ ⇒ ↗ avoir de la Martensite

Plus la « réserve thermique » sera faible et plus le risque de FAF sera grand ($\Delta t_{800/300}$).

Fissuration à froid

Généralités

Martensite

hydrogène

Mécanisme

Moyens d'essais

Limitation de la FAF

Deuxième indicateur qui combine les effets de composition et de vitesse de refroidissement ⇒ dureté sous cordon (< 350 à 400 HV)

Deux méthodes

1-Expérimentalement (cordon de soudure en conditions de fabrication)

2- Application d'une formule, (formules complexes, permettant de calculer la dureté sous cordon à partir de la vitesse de refroidissement et de la composition chimique)

$$HV = 2019\,[C(1 - 0{,}5 \log t_{8/5}) + 0{,}3\,CE_B + 66\,(1 - 0{,}8 \log t_{8/5})]$$

où $CE_B = C + \frac{Si}{11} + \frac{Mn}{8} + \frac{Cu}{9} + \frac{Cr}{5} + \frac{Ni}{17} + \frac{Mo}{6} + \frac{V}{3}$

et $HV_M \geq HV \geq HV_B$

si $HV \geq HV_M$, $HV = HV_M = 802\,CE_B + 305$ (100 % martensite).

si $HV \leq HV_B$, $HV = HV_B = 305\,Ce_B + 301$ (0 % martensite).

Fissuration à froid

Généralités
Martensite
hydrogène
Mécanisme
Moyens d'essais
Limitation de la FAF

D'où vient l'hydrogène?

Décomposition de la vapeur d'eau dans l'arc.

La vapeur d'eau est issue de :

- ☞ l'environnement,
- ☞ les produits d'apport.

Le teneur hydrogène dépend du procédé

- ☞ Arc (Ar ou He) < flux
- ☞ Basique(3ml/100g) <Cellulosique (25ml/100g

Fissuration à froid

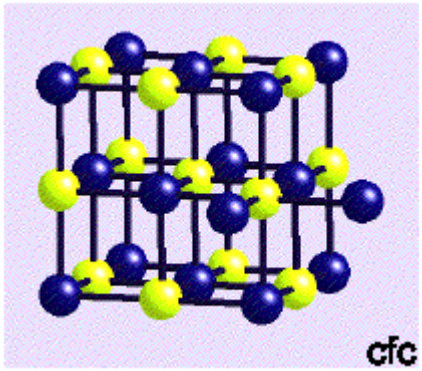
Généralités
Martensite
hydrogène
Mécanisme
Moyens d'essais
Limitation de la FAF

Rôle particulier de l'hydrogène

Ra faible (rayon $5{,}3.10^{-2}$ nm) $\Rightarrow$ insertion

sites tétraédriques pour CC
(n=12 ,rayon $3{,}7.10^{-2}$ nm)

sites octaédriques pour CFC
(n =6, rayon $5{,}2\ .10^{-2}$ nm).



☞Ra hydrogène> rayon des sites

$\Rightarrow$ hydrogène va déformer le réseau et conduire à une répartition hétérogène de l'hydrogène.

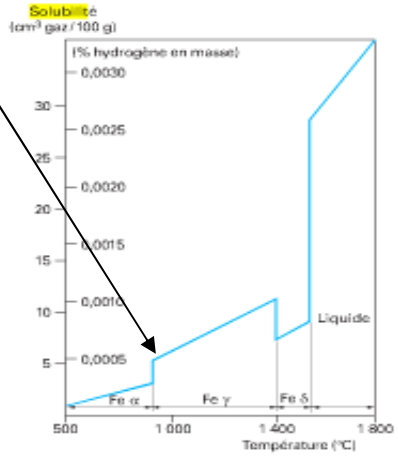
Ceci permet de comprendre pourquoi l'hydrogène va se placer de manière préférentielle dans les zones en traction.

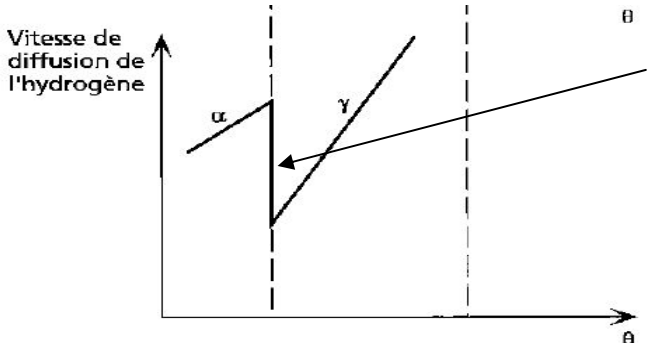
Fissuration à froid

Rôle particulier de l'hydrogène

Solubilité de l'hydrogène dans la phase $\gamma >$ la phase α

rayons des sites octaédriques (5,2 .10-2 nm) proches du rayon de l'hydrogène (5,3.10-2 nm).





L'hydrogène est plus diffusible dans la ferrite que dans l'austénite

12 sites tétraédriques CC pour 6 sites octaédriques CFC.

Fissuration à froid

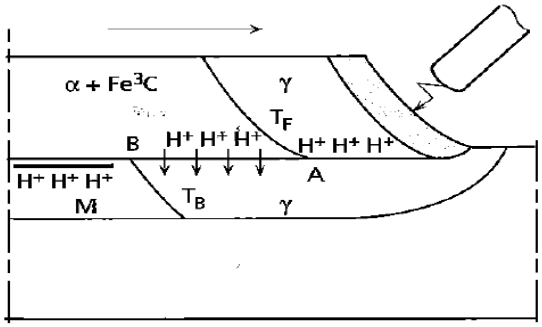
Généralités
Martensite
hydrogène
Mécanisme
Moyens d'essais
Limitation de la FAF

Le mécanisme de fissuration est interprétable à l'aide d'un modèle basé sur les vitesses de diffusion et de solubilité de l'hydrogène (concentration hydrogène) associé un modèle d'ouverture de fissure .

☞concentration hydrogène

Hypothèse MB plus trempant que le métal fondu

⇒ soudure (γ) ferrito-perlitique alors que le métal de base est toujours austénitique.



⇒ H va diffuser vers le métal de base (solubilité sup γ) mais restera porche zone de liaison (diffusion faible γ)

⇒ Ms, la martensite qui se forme est fortement chargée en hydrogène, donc sensibilisé FAF

Les fissures seront localisées sous cordon. Si le métal de base est moins trempant que la soudure (rare) les fissures sont localisées dans le joint soudée

Fissuration à froid

Généralités
Martensite
hydrogène
Mécanisme
Moyens d'essais
Limitation de la FAF

☞ **ouverture de la fissure**

Deux mécanismes peuvent expliquer l'apparition d'une fissures:

* mécanisme de décohésions

basé sur la recombinaison de l'hydrogène atomique en hydrogène moléculaire qui par effet de pression interne va conduire à l'apparition d'une fissure.

* interaction de l'hydrogène avec les dislocations.

basé sur une diminution de l'énergie de surface par adsorption d'hydrogène ce qui diminue la contrainte à la rupture.

Fissuration à froid

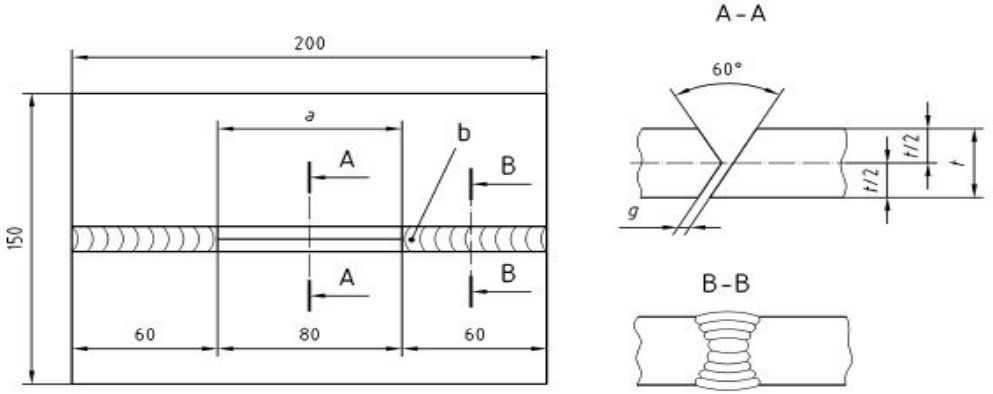
Généralités
Martensite
hydrogène
Mécanisme
Moyens d'essais
Limitation de la FAF

☞ Deux types d'essais sont normalisés (NF EN 17642) :

* Les essais sur éprouvettes soumises à un chargement extérieur
(essai d'implant, cf. Présentation AREVA)

* les essais sur éprouvettes auto-bridées (chargement obtenus par les contraintes de retrait).

*essais CTS (controlled thermal serverity)
*essais sur chanfrein Y (TEKKEN) et les essais sur chanfrein en U (Lehigh).



a) Essai sur chanfrein en Y

Fissuration à froid

Généralités
Martensite
hydrogène
Mécanisme
Moyens d'essais
Limitation de la FAF

Les moyens pour limiter la FAF

☞ Préchauffage < 200°C pour ralentir le cycle thermique et minimiser la trempe.

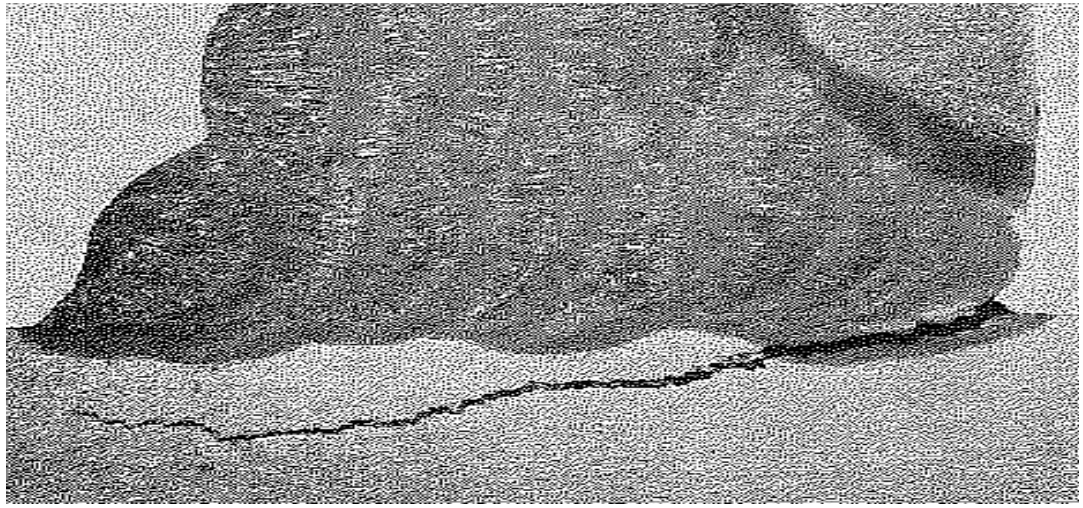
Toutefois, le préchauffage présente l'inconvénient de provoquer un élargissement la ZAT associé à un effet de grossissement des grains.

☞ Post-chauffage <150°C permet une diffusion plus efficace de l'hydrogène.

Arrachement lamellaire

Généralités
Mécanisme
Inclusions
Contraintes

☞ Fissuration dans le sens travers-court (parallèle à la surface).



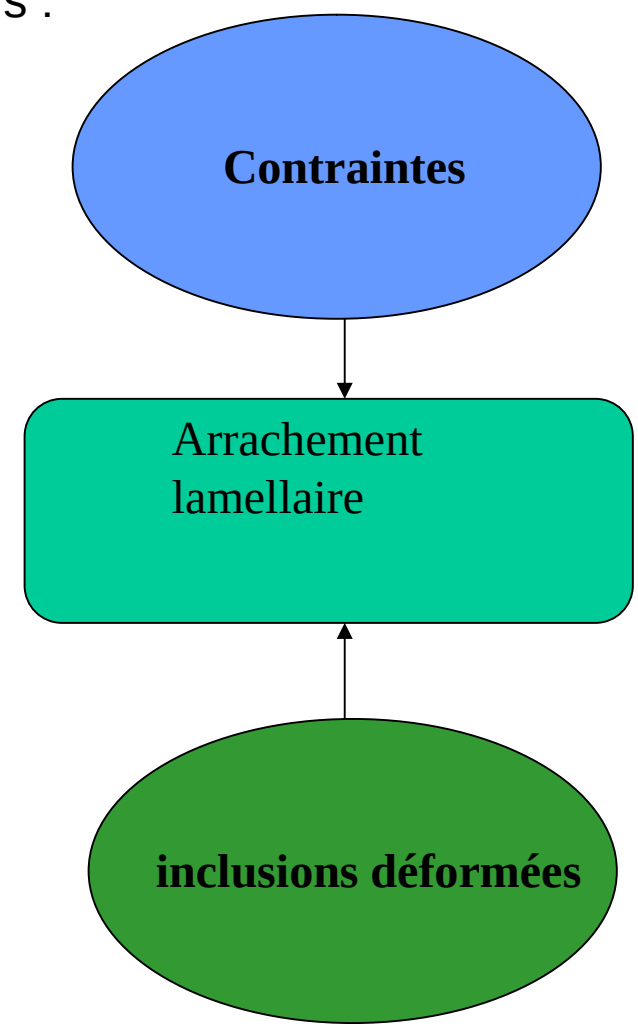
☞Dans le métal de base ou dans la ZAT.

☞ C'est un défaut d'origine «mécanique » situé dans une zone de faible ductilité.

Arrachement lamellaire

Généralités
Mécanisme
Inclusions
Contraintes

L'arrachement lamellaire résulte de la combinaison de deux facteurs :

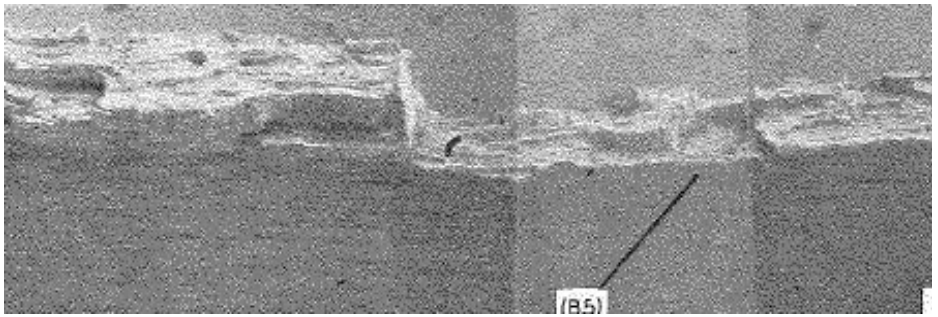


Arrachement lamellaire

☞ Déformation à proximité des inclusions sous l'effet des contraintes de retrait du le métal de base ⇒ création d'une cavité.

☞ Rupture ductile par cisaillement des ponts métalliques qui relient les cavités.

Le faciès de la fissure est de type gradin avec des longues plages horizontales



X18

Arrachement lamellaire

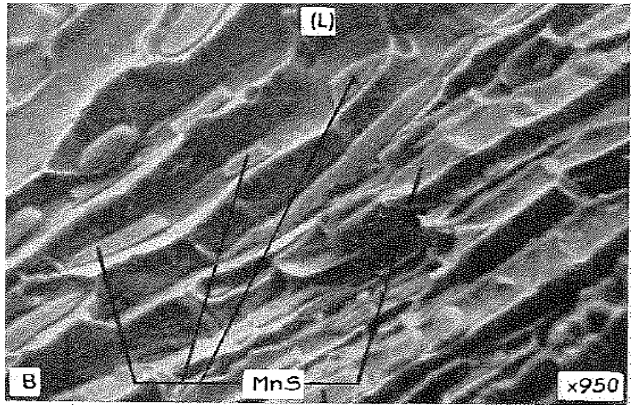
☞ La sensibilité va dépendre :

*de la répartition des inclusions non métalliques
* de la forme des inclusions (allongée ou non),
*du type d'inclusion(sulfures, oxydes, silicates).

☞densité d'inclusion ↗ ⇒ ↗ risque arrachement lamellaire

☞ inclusion aplaties ↗ ⇒ ↗ risque arrachement lamellaire

Inclusion qui se déforme plastiquement au cours de l'opération de laminage ⇒ **inclusions de sulfures de manganèse,** de silicate et silico-aluminate



Arrachement lamellaire

☞ quantification de la sensibilité du matériau

⇒ striction Z, meilleur estimation de la ductilité

$$Z = 100 * \frac{S0 - Su}{S0}$$

S0 = section initiale de l'éprouvette et Su = section à la striction

☞ Plus Z ↗ ⇒ ductile ↗ ⇒ ↘ risque arrachement lamellaire

Z ≤15% ⇒risque est fort

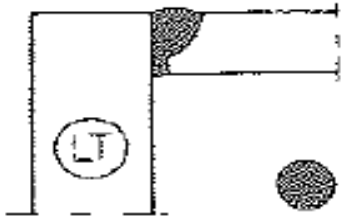
Z ≥ 30% ⇒ risque faible

Arrachement lamellaire

Généralités
Mécanisme
Inclusions
Contraintes

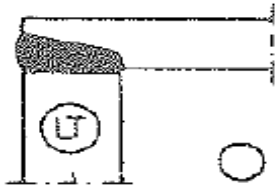
☞ limiter les contraintes perpendiculaire au sens de laminage par conception avec un choix judicieux de forme de joint et à optimiser la stratégie de soudage estimation de la ductilité

Sens de laminage



Contrainte de retrait suite au soudage perpendiculaire au sens de laminage

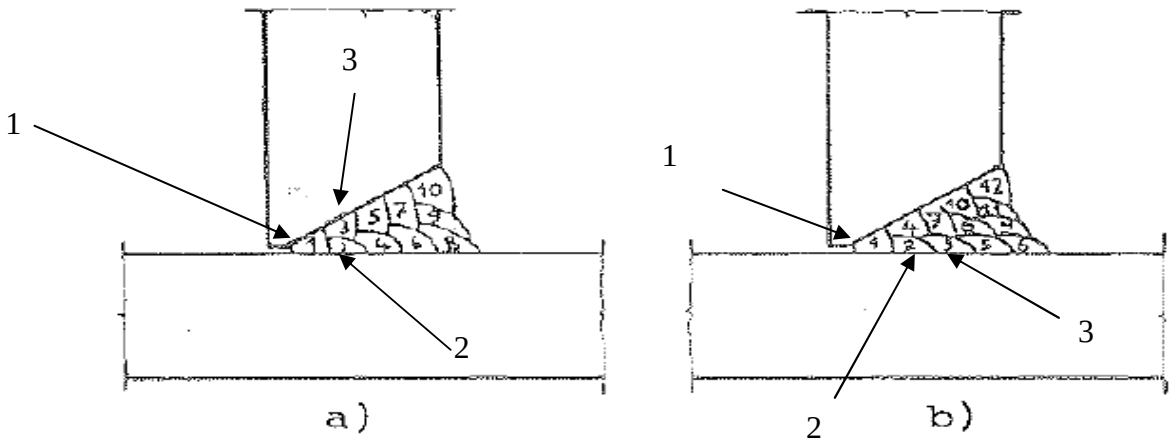
Sens de laminage



Contrainte de retrait suite au soudage parallèle au sens de laminage

Arrachement lamellaire

☞ Stratégie d'enchaînement des passes



☞ technique de beurrage qui consiste à déposer sur la nuance sensible à l'arrachement lamellaire une couche de 5 à 10 mm de matériau avec une limite d'élasticité plus basse et une ductilité plus grande afin de localiser une partie des déformation dans le beurrage permet de limiter le risque à l'arrachement lamellaire.

Arrachement lamellaire

☞Le chargement mécanique peut être évaluée à l'aide du facteur RAL (risque arrachement lamellaire) qui intègre:

* forme de la gorge de la soudure,
* configuration du joint,
* bridage de l'assemblage
*'influence du préchauffage.

Pour chacun des paramètres des tableaux attribuent une valeur au coefficient d'influence. Le RAL est la somme des contributions élémentaires

valeur moyenne minimale	valeur individuelle minimale	Classe de qualité	RAL
15%	10%	Z15	10 à 20
25%	15%	Z25	20 à 30
35%	25%	Z35	> 30

Fissuration au réchauffage ou en relaxation

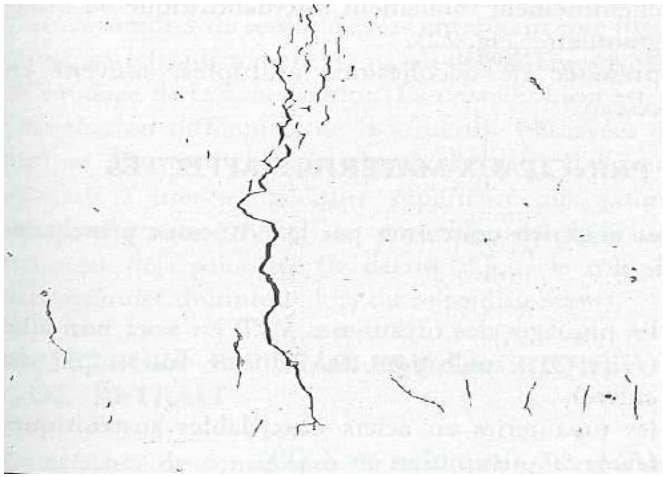
☞ manque de ductilité pour relâcher les contraintes résiduelles lors d'un maintien à des températures de l'ordre de 450°C à 700°C (traitement thermique ou en service)

Problème ⇒ mécanisme à l'origine de la perte de ductilité

☞Mécanisme illustrée sur deux exemples:

* 321-347

*DIDR



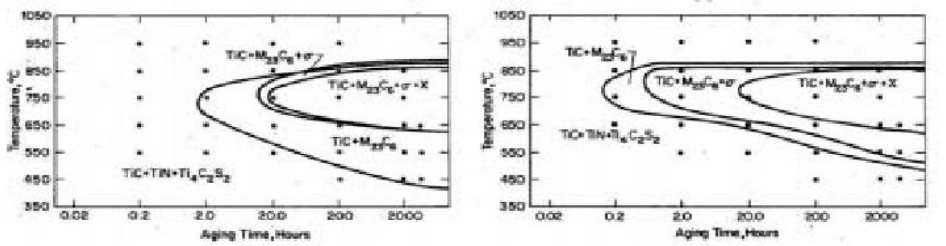
Fissuration au réchauffage ou en relaxation

☞ aciers inoxydables austénitiques stabilisées contenant du Ti et du Nb.

Éléments de métallurgie

☞Les carbure de titane et vanadium ne sont pas remis en solution à 900°C alors que les carbures de carbures de chrome sont en solutions.

☞La présence d'une déformation préalable accélère la cinétique de la précipitation.



a) sans pré-écrouissage b) avec 20% de pré-écrouissage

Figure 251 : Cinétiques de précipitation dans un acier 316 stabilisé au titane à 0.06% de carbone, d'après Grot et Spruiell (1975)

Fissuration au réchauffage ou en relaxation

☞ Mécanisme

1- Soudage: remis en solution des carbures de titane et de niobium prés de la ligne de fusion dans une zone où il y a un écrouissage suite aux contraintes de bridage.

2- Maintien en température : durcissement intergranulaire est provoqué par une précipitation fine de carbure

* écrouissage conduit à une augmentation des sites de germination.
* augmentation de la cinétique suite au déplacement du nez de précipitation.

Autre mécanisme proposé : interaction entre les dislocations et solutés qui limiterai la restauration de l'écrouissage consécutif au soudage et donc limiterai la relaxation des contraintes résiduelles

Fissuration au réchauffage ou en relaxation

☞Observés lors du TTD (500°C) après dépose d'un revêtement en acier inoxydable austénitique sur des aciers carbone faiblement alliés

⇒ décohésions intergranulaires suite au réchauffage ou DIDR

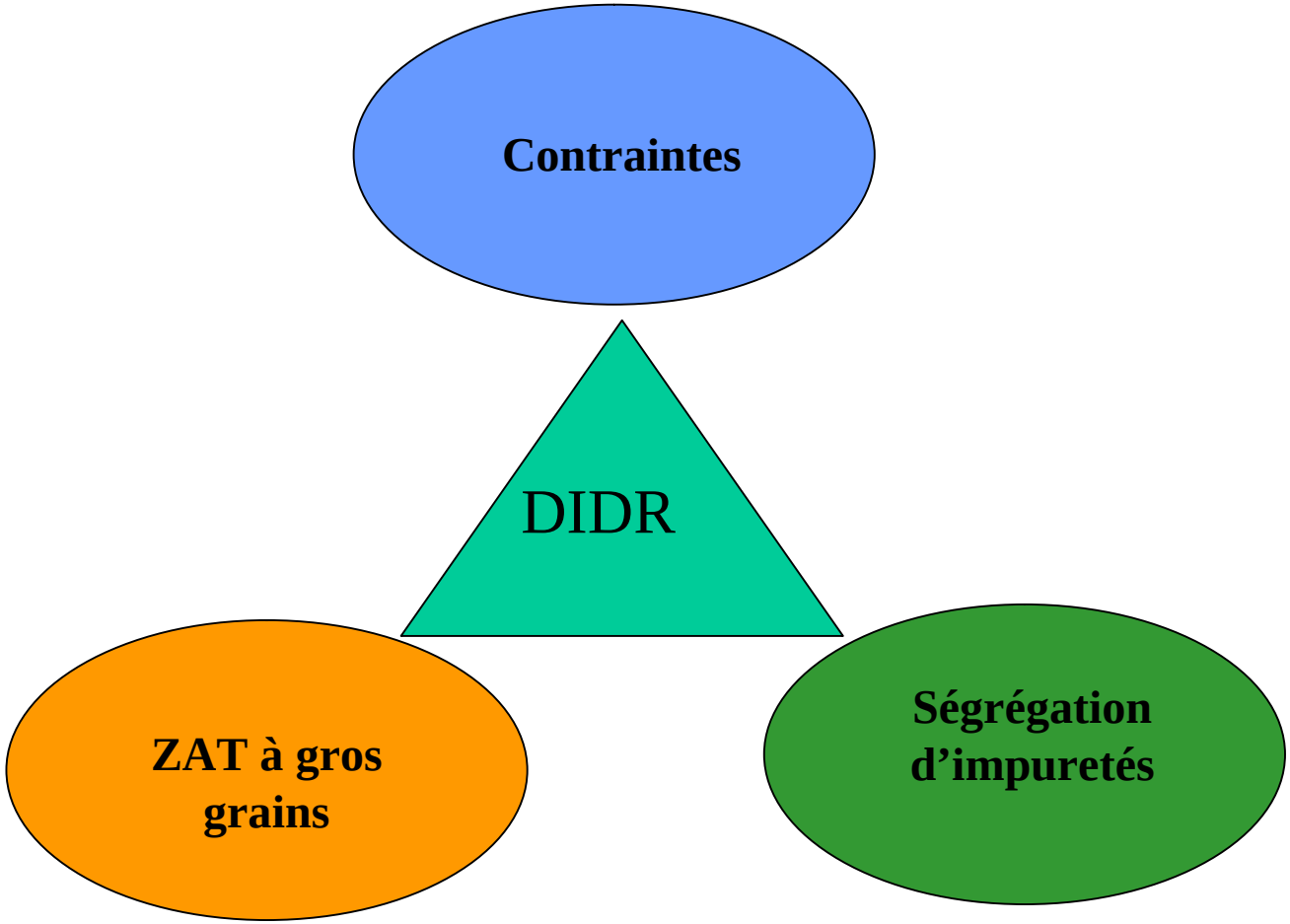
☞ Les fissures sont :

*perpendiculaire à la surface du dépôt

*situées dans la ZAT à gros grains situés sous la zone de recouvrement de deux cordons.

Fissuration au réchauffage ou en relaxation

Les DIDR résultent de la combinaison de trois facteurs :



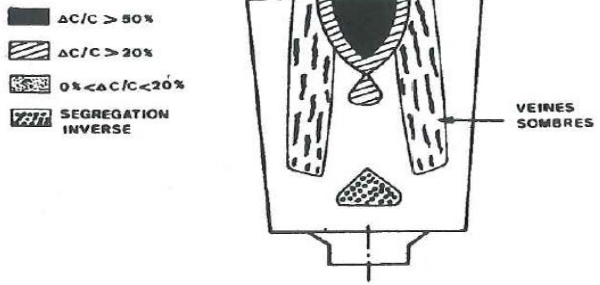
Fissuration au réchauffage ou en relaxation

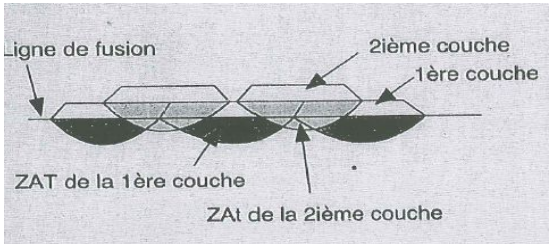
☞Contraintes de soudage

dilatation différentiel entre le métal de base et le revêtement.

☞Ségrégation

présence de veine sombre (grosse pièce de forge)





☞Gros grains

☞Solutions

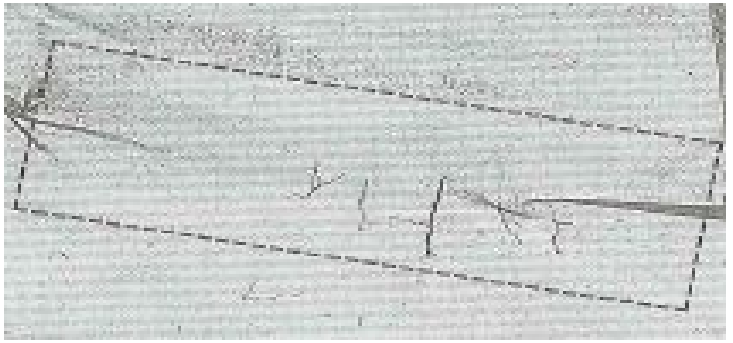
chevauchement entre passe a été augmenté et le décalage des passes a été optimisé afin d'assureur un revenu de la première passe sans provoquer de grossissement de grain

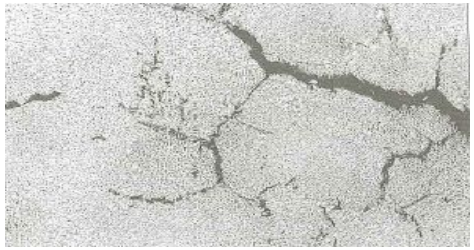
Fissuration à chaud

Généralités
Solidification
Liquation
Chute de ductilité
Moyens d'essais

☞apparaissent à hautes températures lors de la solidification ou lors d'une ré-affectation thermique

☞localisées dans la soudure (solidification) ou dans la ZAT (fissuration de liquation et fissuration par chute de ductilité).





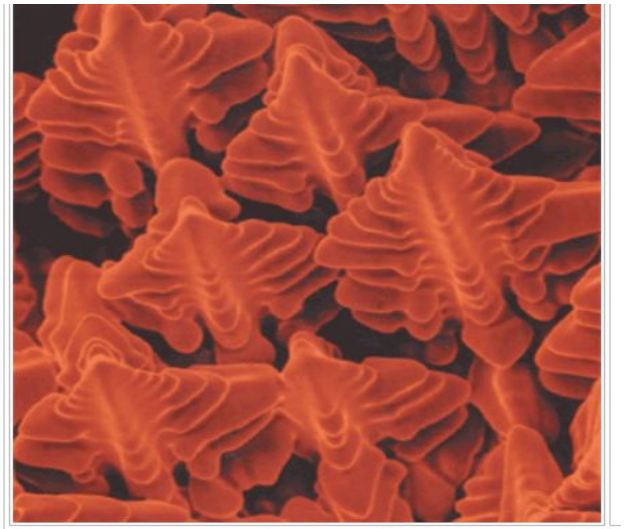
☞Trois types de fissuration
- fissuration de solidification
- fissuration de liquation
- fissuration par chute de ductilité

Fissuration à chaud

☞hautes températures (vers 1400°C) à la fin de la solidification du bain de fusion (fraction solide est élevée).

☞Mécanisme

- Solidification dendritique avec liquide enrichi en éléments à bas point de fusion.

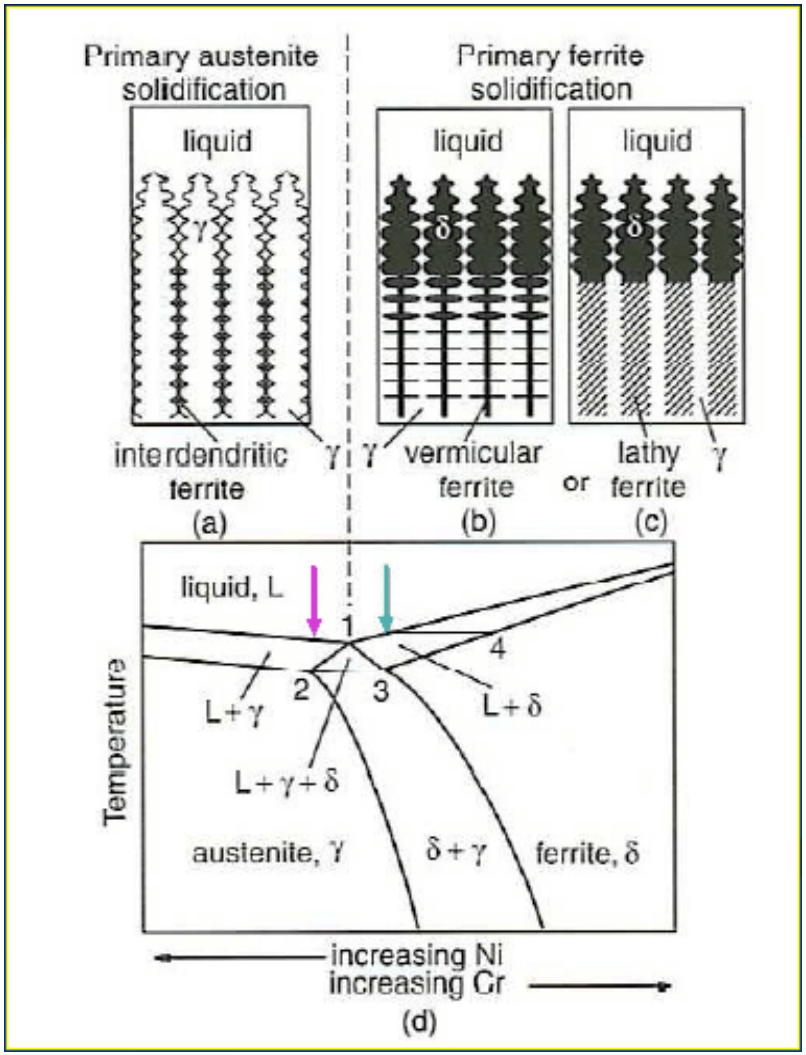


- Si le liquide ne circule plus dans l'espace interdendritique et que les ponts de matière entre les dendrites ne sont pas assez fort pour adapter les contraintes

$\Rightarrow$ risque de FAC

cf. Présentation Jean-Marie Drezet modèle de fissuration à chaud

Fissuration à chaud



☞ Il est à noter que la présence de 5% à 10 % de ferrite conduit à une résistance à la fissuration à chaud accrue.

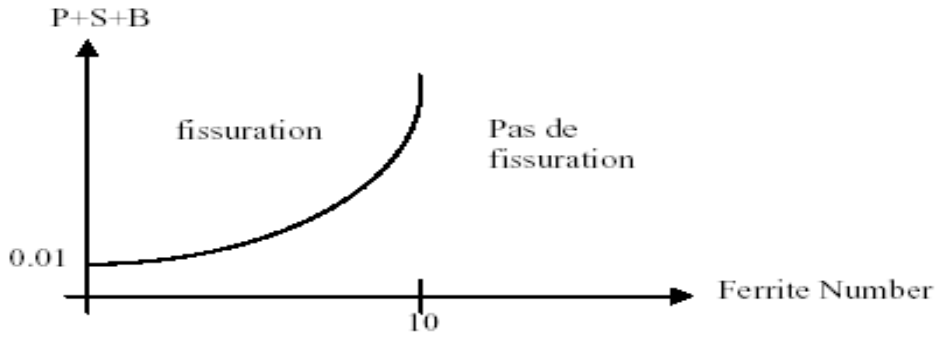
* plus grande capacité de déformation à chaud permet une plus grande relaxation des contraintes
* plus grande solubilité du soufre dans la ferrite.

ferrite delta ⇒ phase signa (450°C et 900°C).

Fissuration à chaud

☞ Tout élément chimique qui accroît l'intervalle de solidification favorise la fissuration à chaud.

☞Le diagramme de Suutala permet de classer les effets de la somme des teneurs en phosphore, soufre et bore (P+S+B) sur la sensibilité à la fissuration par rapport au ferrite number des aciers considérés



cf. Présentations de cette après midi

Fissuration à chaud

Généralités
Solidification
Liquation
Chute de ductilité
Moyens d'essais

☞ **La liquation** est une refusion locale en ZAT (proche de la zone de liaison) lors du soudage.

☞La liquation apparaît pour des températures comprises entre 900°C et 1300°C.

☞Les liquations sont observées sur un acier inoxydables austénitiques de type 321 347 et les Inconels 718.

☞Elle est reliée à la présence aux joints de grains d'un film liquide.

☞Les mécanismes proposées dans la littérature sont soit :

*basés sur de la fusion de composés à bas point de fusion ségrégés aux joints de grains

*une migration des joints de grains qui balayent les phases sujettes à la liquation.

Fissuration à chaud

Généralités
Solidification
Liquation
Chute de ductilité
Moyens d'essais

☞**La fissuration par chute de ductilité** est observée sur les bases nickel (Inconel 690, 30%Cr).

☞Elle apparaît pour des températures comprises 800°C et 900°C.

☞Deux mécanismes basés :

augmentation dureté des grains

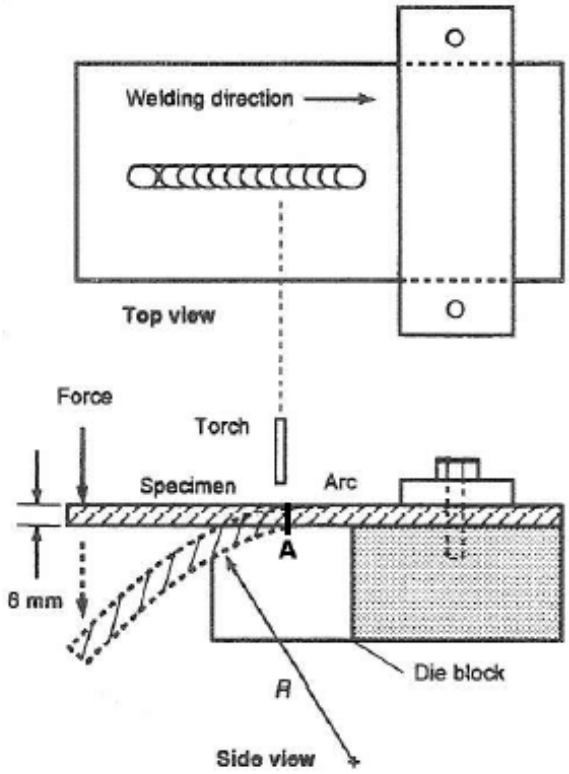
affaiblissement de la cohésion intergranulaire (précipitation de carbure)

Le niveau de déformation que peut support l'Inconel 52 est faible de l'ordre de 1 % soit une valeur d'environ cinq fois plus faible que pour l'Inconel 82

Fissuration à chaud

Généralités
Solidification
Liquation
Chute de ductilité
Moyens d'essais

* E*ssais Varestraint* EN 17641, éprouvettes soumises à un chargement extérieur



Fissuration à chaud

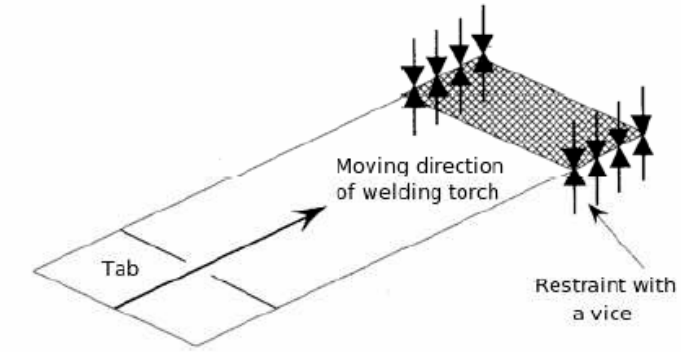
Généralités

Solidification

Liquation

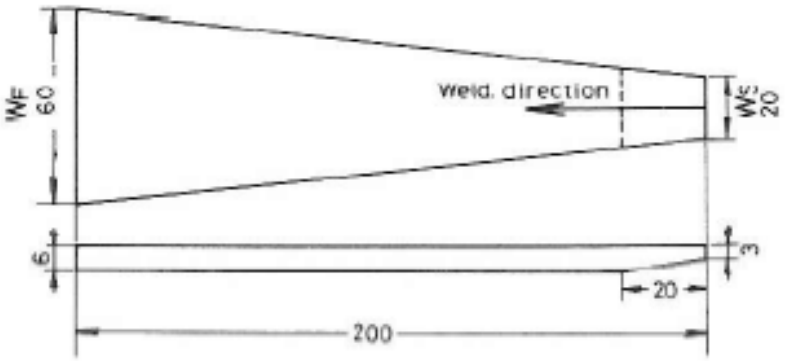
Chute de ductilité

Moyens d'essais

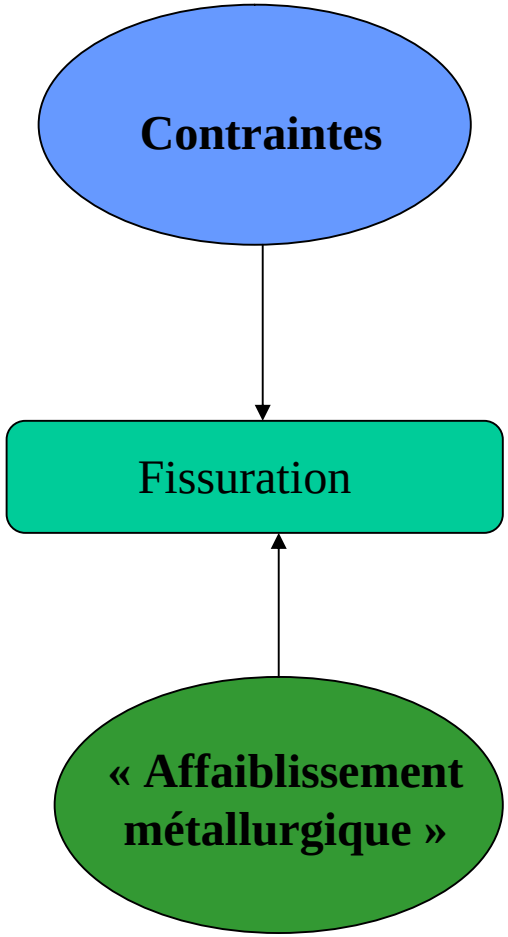
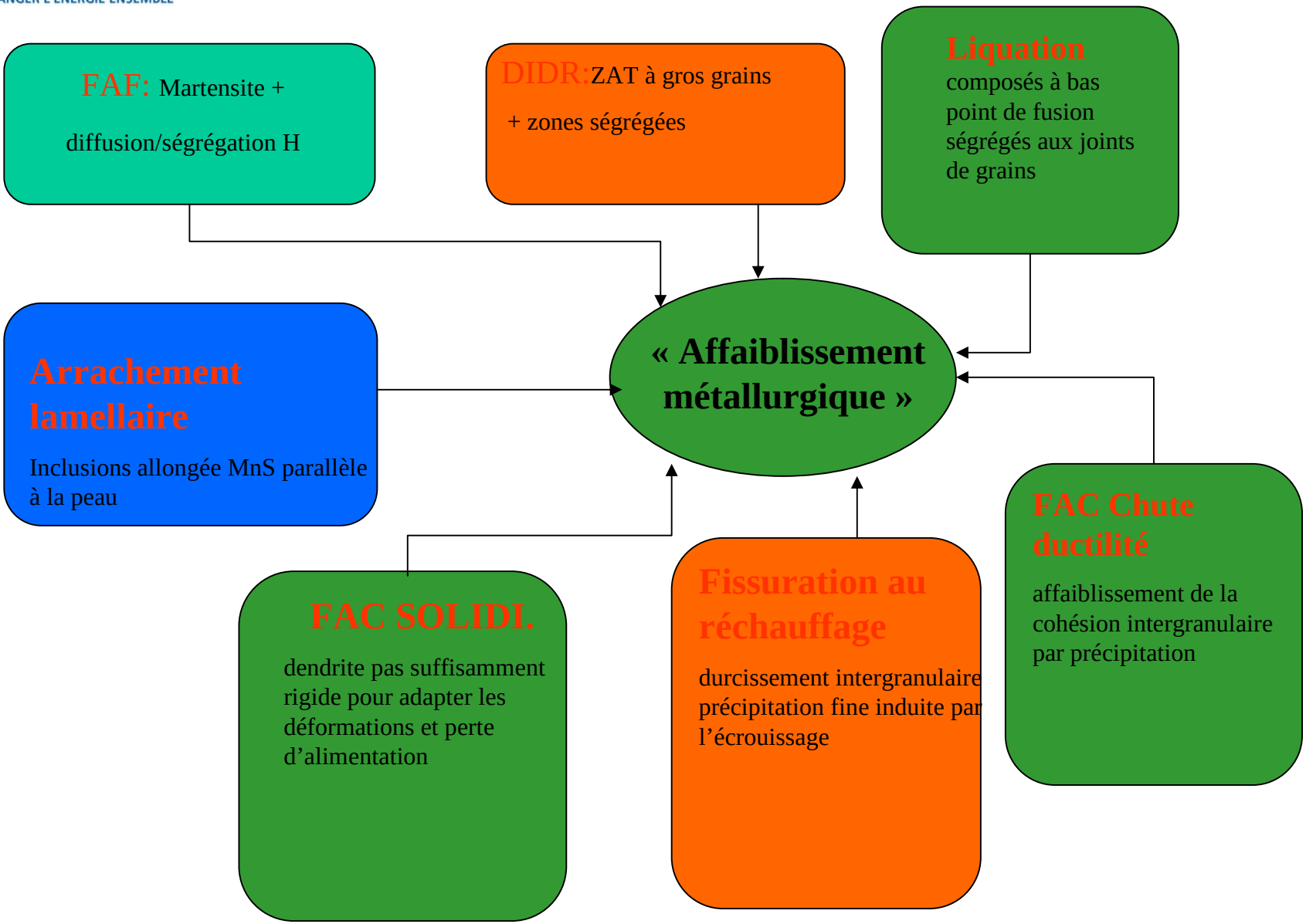


Essais JWRI sur éprouvettes auto-bridées

Test éventail sur éprouvettes auto-bridées



Fissuration et soudage



Fissuration et soudage