

Ils présentent une certaine sensibilité à la fissuration à froid donc on utilise de préférence des procédés à bas hydrogène (attention pas de préchauffage car surchauffe).

2.8.3 Inox austénitique

2.8.3.1 Caractéristiques

Leur teneur en chrome est plus élevée que les martensitiques et leur teneur en nickel est supérieure à 8%, ce qui les rend austénitiques depuis les hautes températures jusqu'à des températures inférieures à l'ambiante.

Ni<10% ⇒ effet trempant

10%<Ni< 30% ⇒ effet trempant à gammagène

Ni>30% ⇒ effet gammagène.

Si Cr=18% et Ni>8% ⇒ effet gammagène.

Ils ne présentent donc pas de point de transformation, et de fait ne sont pas régénérables. Ils s'érouissent facilement et se durcissent fortement par érouissage, donc l'usinage est difficile. Ils peuvent être recristallisés. Ils possèdent un coefficient de dilatation important. Ils sont non magnétiques. Leur structure est du type CFC qui est maclée si l'acier a subi des traitements tels qu'érouissage ou recristallisation.

Ils sont livrés après un traitement d'austénitisation et une hypertrempe qui a pour but d'éviter la formation de carbures $Cr_{23}C_6$. Ces carbures entraînent des déchromisations locales et des risques de corrosion intergranulaire.

Ils ont d'excellentes résiliences à froid (utilisation en cryogénie pour certains jusqu'à $-250^{\circ}C$). De plus, ils ont une bonne résistance au fluage et à la corrosion à haute température (ils sont réfractaires pour certains jusqu'à plus de $1000^{\circ}C$).

Si le %C est élevé : Rp0.2 ↗ mais corrosion intergranulaire.

Si %C<0.03% : Rp0.2 ↘ mais plus de risques de corrosion intergranulaire (plus de précipitation de $Cr_{23}C_6$).

On peut rajouter du Ti afin de stabiliser l'inox austénitique et de le rendre insensible à la corrosion intergranulaire. En effet, des carbures TiC vont se former au lieu du $Cr_{23}C_6$.

Le Mo renforce la résistance de l'acier vis-à-vis de la corrosion par pique.

En général : 16%<Cr<25%, 8%<Ni<35%, 1%<Mo<6%, C≤0.03% bas carbone ou 0.03%<C<0.2% haut carbone.

2.8.3.2 Principaux effets des éléments d'alliage

2.8.3.2.1 Trempant

Quasiment tous les éléments d'alliages ont un effet trempant. La formation de martensite est proportionnelle à la teneur en C et de certains éléments d'alliage.

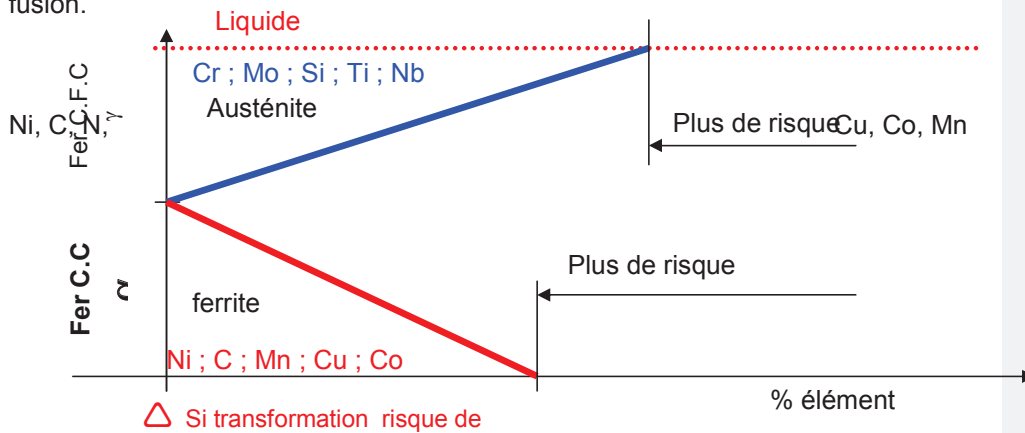
2.8.3.2.2 Alphagène

Ces éléments entraînent une augmentation de la T° de transformation de la ferrite α en austénite γ , donc un accroissement du domaine ferritique. S'il y a suffisamment d'éléments, le domaine ferritique existe de l'ambient jusqu'à la fusion.

Cr, Mo, Si, Ti, Nb, Al, W, Zr.

2.8.3.2.3 Gammagène

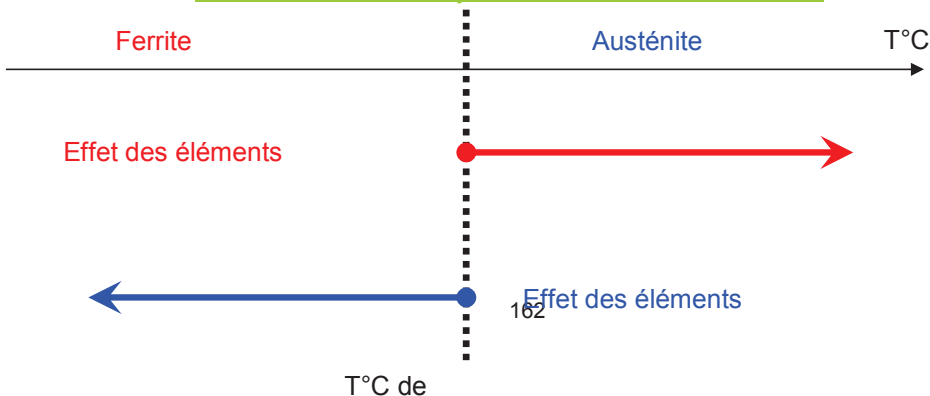
Ces éléments entraînent une diminution de la T° de transformation de la ferrite α en austénite γ , donc un accroissement du domaine austénitique. S'il y a suffisamment d'éléments, le domaine austénitique existe de l'ambient jusqu'à la fusion.



2.8.3.2.4 Stabilisation

Elle est réalisée par l'adjonction de Titane ou Niobium ce qui entraîne la formation de carbure de l'un ou l'autre des composés en lieu et place des carbures de chrome.

2.8.3.2.5 Evolution de la température de transformation



2.8.3.3 Soudabilité

Il y a essentiellement 2 phénomènes :

- Corrosion intergranulaire
- Fissuration à chaud.

2.8.3.3.1 Corrosion intergranulaire

2.8.3.3.1.1 Facteurs

La corrosion intergranulaire se développe au contact d'un milieu corrosif dans la ZAT qui a été portée lors du soudage entre 800°C et 500°C si :

- C>0.03%
- Acier non stabilisé au Ti ou Nb
- Temps suffisant entre 800°C et 500°C pour la précipitation du Cr₂₃C₆.

2.8.3.3.1.2 Remèdes

On peut utiliser les solutions suivantes :

- Utilisation d'un procédé de soudage avec un temps de refroidissement court (pas de précipitation du Cr₂₃C₆ possible)
- Mise en solution des Cr₂₃C₆ à 1100°C puis effectuer une hypertrempe.

On se rend compte que ces solutions ne sont pas toujours réalisables (procédés, déformations TTAS). Donc on préférera utiliser des nuances à bas carbone ou stabilisées :

- Si MB bas carbone : MA bas carbone ou stabilisé (Nb)
- Si MB stabilisé : MA stabilisé

Les enrobages basiques contiennent des carbonates de calcium (CaCO₃) ce qui augmente les risques de carburation donc de formation de Cr₂₃C₆ et donc de déchromisation. C'est pourquoi on préfère des électrodes rutiles à base de TiO₂. Si %Nb>10x%C, on a des risques de fissuration à chaud.

2.8.3.3.2 Fissuration à chaud

Ce sont des fissures qui se forment en cours de solidification dans la ZF dans l'axe des cordons dans les régions interdendritiques. Elles apparaissent parfois aux joints de grain en ZAT pour les matériaux moulés.

2.8.3.3.2.1 Facteurs

Ce sont la présence de contraintes durant la solidification et la ségrégation (impuretés et augmentation de l'intervalle de solidification).

Les contraintes sont accentuées pour un inox car le coefficient de dilatation est 1.5 fois celui de l'acier.

La ségrégation augmente la concentration en impuretés dans la partie liquide ce qui augmente l'intervalle de solidification (S et P qui fabriquent des composés eutectiques). La solubilité des impuretés (S, P, B) est plus importante dans les structures CC (la ferrite par exemple, la limite de solubilité de S+P est de 0.04%) que dans les structures CFC (austénite, limite de solubilité 0.02%).

2.8.3.3.2.2 Remèdes

Pour pallier aux effets de la ségrégation, on essaye de réduire la vitesse de soudage, mais cela augmente l'énergie donc les contraintes. Donc il faut réduire considérablement la puissance (UxI). En ce qui concerne les impuretés, on essaye d'avoir %S+%P<0.015% ce qui limite les risques.

Quant aux contraintes, il existe 2 axes d'action :

- Réduire le volume du bain de fusion
- Limiter l'énergie de soudage
- Limiter les températures supérieures entre passes (température maxi entre passes 150°C à 200°C)
- Souder en passes étroites (limite la ségrégation et la dilution des impuretés qui sont généralement dans le MB)
- Le bridage
- Limiter les épaisseurs soudées
- MB avec un R_e réduit

En règle générale, les impuretés sont supérieures à 0.015% car il faudrait une élaboration des produits sous vide ce qui est extrêmement coûteux. Pour les inox austénitiques, on peut souder en hétérogène de telle sorte que la ZF contienne de 5 à 10% de ferrite. Cela permet à la ferrite de piéger le S qui ne fabriquera plus de composé eutectique avec le Ni, ce qui réduira l'intervalle de solidification. On utilise le diagramme de SCHAEFFLER couplé à la composition chimique de base et à la maîtrise de la dilution.

2.8.4 Inox austéno-ferritique ou DUPLEX

Leur structure est composée d'austénite avec 40 à 60% de ferrite et $3\% < Ni < 8\%$ et $\%Cr + \%Ni \approx 30$.

2.8.4.1.1 Etat de livraison

Ils sont livrés après austénitisation à 1150°C puis trempé. Leur teneur basse en carbone les rend insensibles à la corrosion intergranulaire. La ferrite les rend

insensibles à la corrosion sous tension. En revanche, ils se fragilisent avec la phase σ ce qui réduit leur température d'utilisation (300°C maxi).

2.8.4.1.2 Soudabilité

La ZAT et la ZF perdent les propriétés du MB, car la ferrite se décompose très partiellement en austénite. Donc il faut favoriser la transformation de ferrite en austénite.

Pour la ZF, on peut ajouter des éléments gammagènes dans le métal d'apport ou de l'azote dans le gaz de protection (N est gammagène).

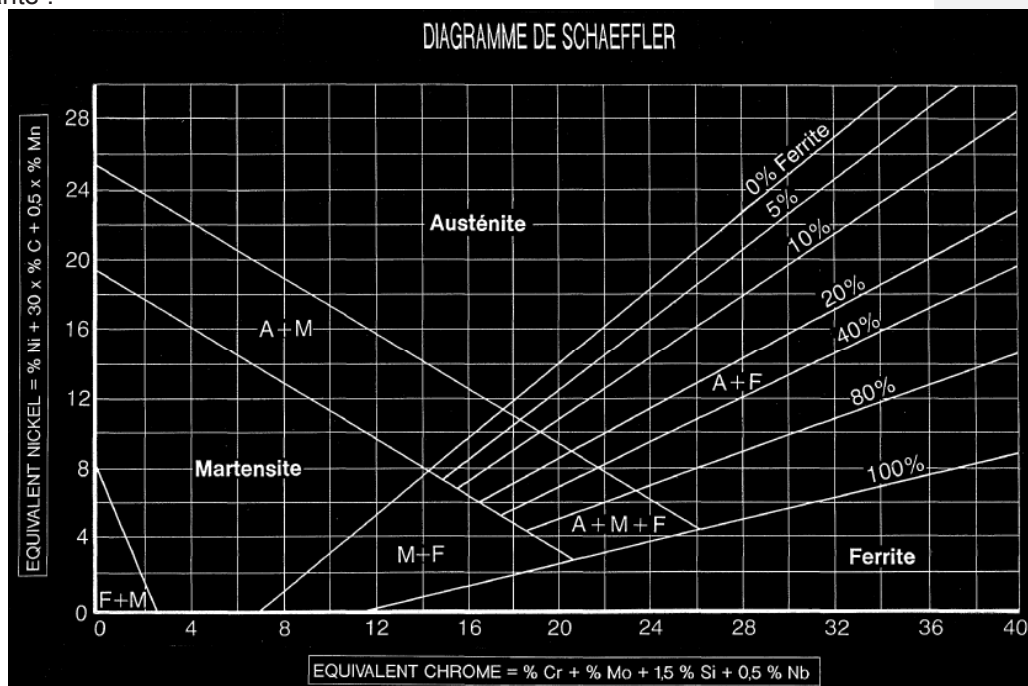
Pour la ZAT, on peut préserver l'austénite en réduisant la vitesse de refroidissement en augmentant l'énergie de soudage ou en préchauffant. Mais attention à la fragilisation par phase σ et α' si la vitesse de refroidissement devient très faible.

Les duplex sont sensibles à la fissuration à froid, donc on utilisera des procédés à bas hydrogène.

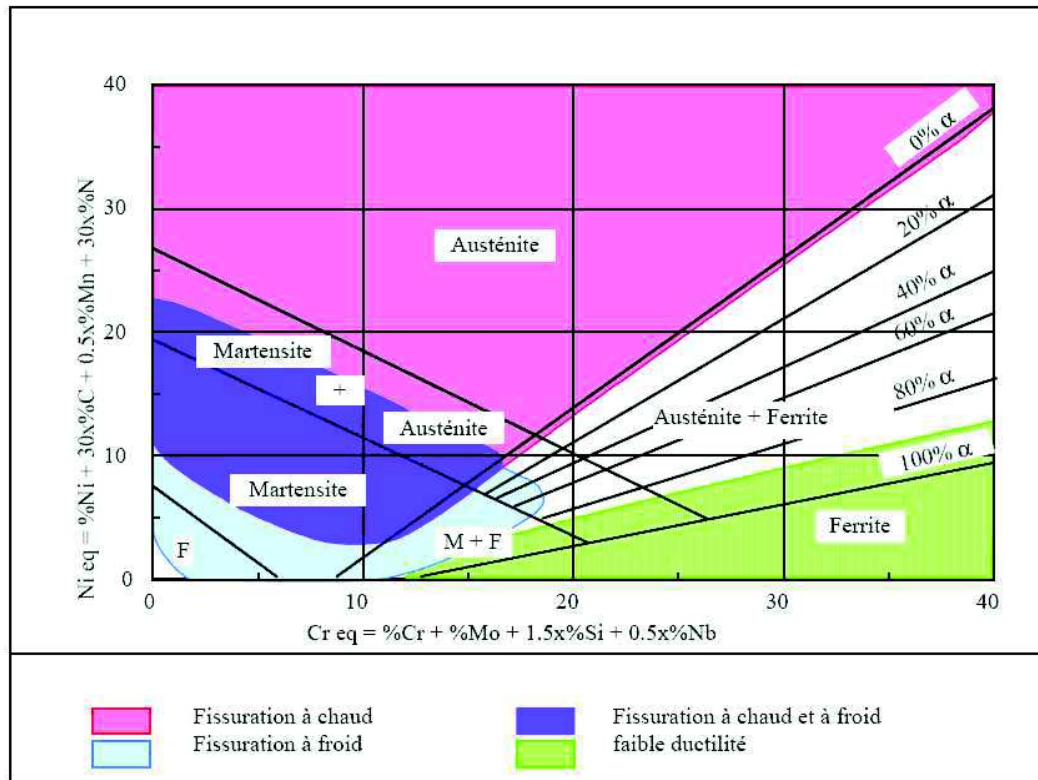
On maintiendra un bas carbone dans la ZF pour éviter la corrosion intergranulaire en ZF.

2.8.5 Diagramme de SCHAEFFLER

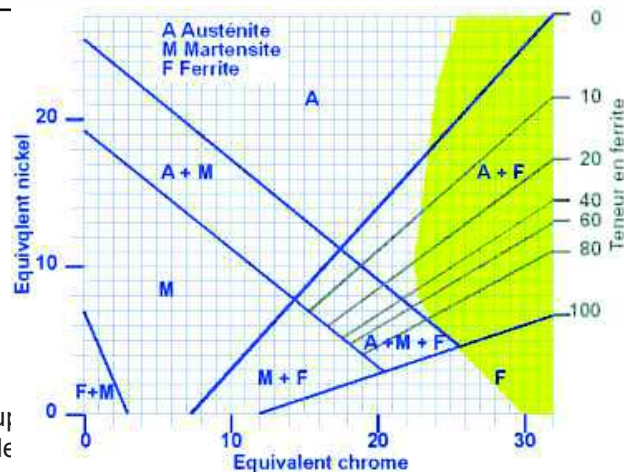
Il est surtout utilisé pour les aciers inoxydables et il se présente de la façon suivante :



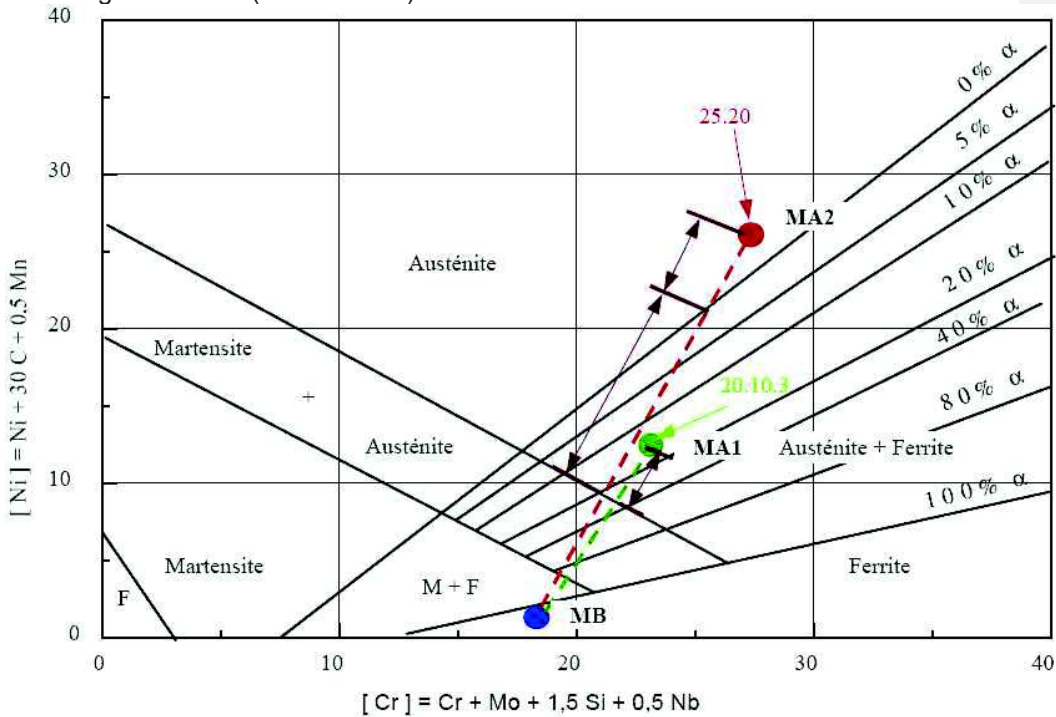
Il permet de déterminer la structure de la zone fondue après solidification en fonction des équivalents Cr et Ni. On observe plusieurs domaines de solidification qui entraînent des risques différents :



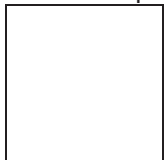
On l'utilise souvent pour déterminer la nature de



reporté les points représentatifs du métal de base et de 2 types de produits de soudage différents (316 L et 310).



Connaissant la position des points représentatifs du métal de base (soit MB) et du métal déposé hors dilution (soit MA), le point représentatif du métal fondu (MF) se trouve nécessairement sur le segment de droite joignant les 2 points précédents de telle sorte que l'on ait :



Dans l'exemple envisagé, on voit sur le diagramme de la figure 5.2, que si l'on utilise un produit de soudage du type 20.10.3 qui conduit hors dilution à une structure n'occasionnant aucun risque métallurgique (Austénite + 15 % Ferrite), le métal fondu n'aura une structure « idéale » que si le taux de dilution est compris entre 0 et environ 27%. Au contraire, si l'on utilise un produit du type 25.20 lequel présente, hors dilution, une structure totalement austénitique très sensible à la fissuration à chaud, on obtiendra une structure mixte Austénite+Ferrite donc « idéale » si le taux de dilution est compris entre 18 et 67%. La seconde solution

laisse une grande marge de manœuvre du point de vue opératoire et a toutes les chances de réussir alors que la première n'est satisfaisante que dans le cas de très faibles taux de dilution et est difficilement maîtrisable.

2.8.6 Traitements thermiques après soudage sur les inox

Pour les inox martensitiques, on peut réaliser un revenu après soudage pour adoucir la martensite (700°C pendant une heure puis refroidissement lent). Pour les inox austénitiques, si des carbures de chrome sont présents, on peut réaliser un traitement d'hypertrempe (austénitisation à 1100°C puis refroidissement rapide).

En ce qui concerne la stabilisation, en général ce traitement est néfaste car il entraîne des précipitations de phases σ pour les ferritiques (fragilisation) et des déchromisations locales pour les austénitiques (corrosion intergranulaire).

2.9 LES ALUMINIUM

2.9.1 Aluminium et ses alliages

Série	Alliages sans traitement thermiques (Alliages non trempant)	Alliages à traitement thermiques Alliages trempant : Durcissement par précipitation
1XXX Al	X	
2XXX Al-Cu		X
3XXX Al-Mn	X	
4XXX Al-Si	X	
5XXX Al-Mg	X	
6XXX Al-Si+Mg		X
7XXX Al-Zn		X
8XXX autres	Li, Sc	Al-Li+Cu
	-Propriétés mécaniques faibles à moyennes -Durcissement par écrouissage (état H xx) -Etat Recuit : O -Bonne résistance à la corrosion.	2XXX, 7XXX – Propriété spécifiques élevées 6XXX profil à Propr. méca. faibles à moyennes -Trempe mûri : T4 -Trempe revenu ou sous revenu : T6x -Trempe surevenu : T7

2.9.2 Soudabilité opératoire

En fonction des propriétés de l'aluminium, on va tirer des conclusion sur sa soudabilité.

2.9.2.1 Conductivité thermique

La conductivité thermique de l'aluminium est 5 fois celle de l'acier. Il en résulte qu'il est plus difficile de fondre l'aluminium, bien que sa T° de fusion soit très inférieure à celle de l'acier. Cela va entraîner des risques de manques de fusion ou collages. Donc il faudra des joints avec de faibles talons et une accessibilité suffisante (V à 40° mini). Il faudra éviter de souder des pièces de différentes épaisseurs ou alors il faudra préchauffer.

2.9.2.2 Etat de surface

L'aluminium s'oxyde au contact de l'air et se recouvre d'une pellicule d'oxyde qui est l'alumine. Ce composé Al_2O_3 est un isolant électrique. Ceci entraîne l'impossibilité de souder avec de faibles intensités.

Cet oxyde est réfractaire avec une température de fusion 3 fois supérieure à celle de l'aluminium (2000°C). Il faudra décaper cette couche d'oxyde afin de réaliser la fusion.

De plus, ce composé poreux contient de l'humidité ce qui entraîne la formation de soufflures. En effet, l'hydrogène est très peu soluble dans l'aluminium.

En outre, l'alumine est tenace et des fragments de pellicule de cet oxyde peuvent former des défauts plans de type fissure ou collage interne.

2.9.2.3 Conductivité électrique

Sa conductibilité électrique est 5 fois supérieure à celle de l'acier. Donc il sera très difficile de réaliser du soudage par effet Joule. Il faudra utiliser des générateurs plus puissants

2.9.2.4 Coefficient de dilatation

Son coefficient de dilatation est 2 fois celui de l'acier ce qui génère deux problèmes majeurs :

- Fissuration à chaud par déchirement du film liquide suite au retrait de la soudure
- Fortes déformations (effet de serrage, dénivellation des bords)

2.9.2.5 Coefficient de réflexion :

L'aluminium réfléchit particulièrement bien le faisceaux lumineux d'une source LASER, donc il sera plus difficile de souder par ce procédé. On utilisera des sources plus puissantes.

2.9.3 Soudabilité métallurgique

2.9.3.1 Risques métallurgiques

Types de défauts	Causes	Recommandations	
------------------	--------	-----------------	--

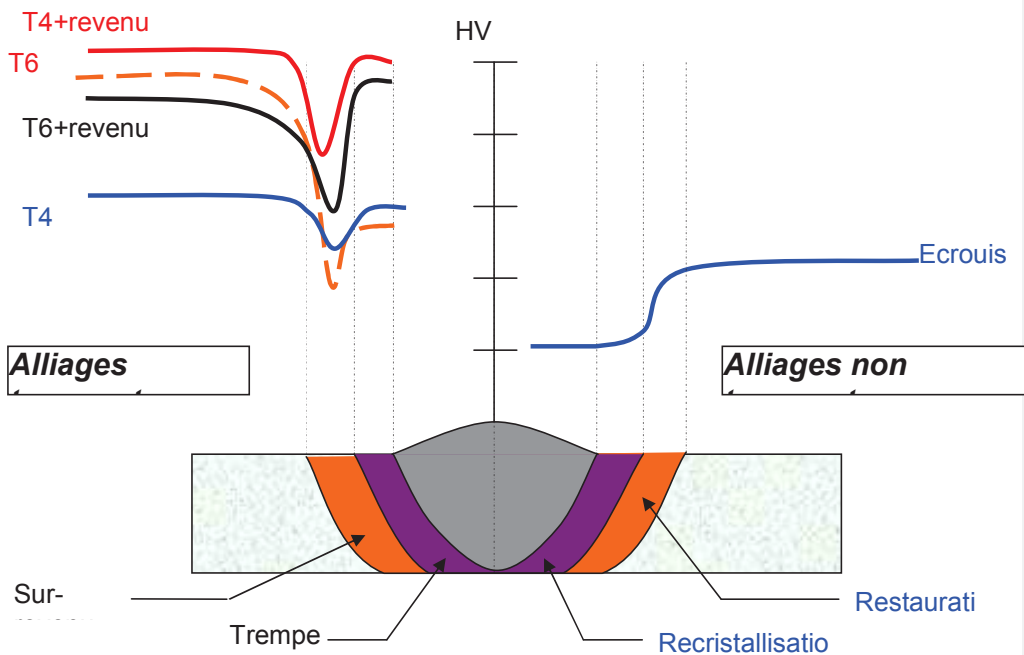
Inclusion	-Alumine	-Décapage	
Collages	-Conductivité -Alumine	-Préchauffage 150°C -Décapage	Risques de fissuration des alliages avec TTH si préchauffage
Soufflures	-Alumine -Hydrogène	-Décapage -Préchauffage (80-100°C) -∅ E soudage	
Fissuration à chaud	-Conductivité -Liquation	-Diminution énergie -Métal apport	Les alliages sans TTH ne sont pas affectés

2.9.3.2 Evolution locale de structure

On constate une dégradation des caractéristiques de l'assemblage de 95% à 60% en fonction des alliages. Le soudage fait disparaître les effets de l'écrouissage et des traitements thermiques.

Un traitement thermique ultérieur, appelé revenu, permet d'amoindrir ces effets sur les alliages à traitements thermiques.

Donc il faudra prévoir des surépaisseurs dans les zones soudées ou positionner les joints dans des zones moins sollicitées.



En ce qui concerne les alliages non-trempants, ils sont soudables avec ou sans apport. Selon leur état de livraison :

- Etat recuit (O), le coefficient de joint est proche de 1 (mêmes propriétés mécaniques en ZF et dans le MB).
- Etat écrouis on ne dépassera pas l'état H2 car la ZAT se recristallise et le coefficient de joint peut baisser jusqu'à 0.45 (on réduira l'énergie de soudage au maximum afin de limiter la ZAT).

Pour les alliages trempants on peut les souder avec ou sans métal d'apport. Si on les soude à l'arc avec métal d'apport type 5000 (propriétés max dans la ZF) ou type 4000 (évite la fissuration), on essaiera de limiter l'énergie de soudage. Le coefficient de joint sera inférieur à 1. Selon le traitement thermique :

- Si revenu post-soudage \Rightarrow nuance T4 ou T61 en sous-revenu.
- Si pas de revenu post-soudage \Rightarrow nuance T4 ou T6.

En utilisant des procédés sans métal d'apport (FE, laser ...) on améliore le coefficient de joint.

2.9.3.3 Préparation des pièces

On dégraisse et décape les pièces et le métal d'apport mécaniquement ou chimiquement. Si on ne soude que d'un seul côté, il faut enlever la carre côté envers.

2.9.3.4 Soudage TIG

C'est un procédé sous gaz inerte qui s'oppose à la formation d'alumine lors du soudage. Cependant, on l'utilisera en courant continu afin de décaper la couche d'alumine à la surface de la pièce (phase de polarité inverse). Mais on peut aussi l'utiliser en courant continu en polarité directe en automatique sous hélium.

On l'utilisera jusqu'à une épaisseur de 6 mm environ, après on lui préférera le MIG sauf cas particulier de maniabilité.

L'énergie de soudage est élevée ce qui limite le risque de soufflure. En revanche, cela grossit la ZAT ce qui est néfaste dans le cas de coefficients de joint faible (0,45 par exemple). De plus on augmente le volume du bain de fusion donc le risque de fissuration à chaud.

Il existe d'autres procédés de soudage : MIG courant continu ou pulsé, plasma courant continu, faisceau d'électrons, laser CO₂, stir welding, friction, résistance à courant continu ...

2.10 LES Alliages de NICKEL

2.10.1 Propriétés

Le nickel pur a des propriétés proches de l'acier (Conductivité thermique, conductivité électrique, coefficient de dilatation, θ_f 1450°C, densité 8.9). Sa structure cristalline est CFC sans transformations. Il est magnétique jusqu'à 355°C. Les alliages de nickel ont une conductivité thermique plus faible, une température de solidification inférieure et ils sont amagnétiques.

On lui ajoute du cuivre, du chrome, du fer ou molybdène en fonction des usages.

Les alliages sont soit sans TTH (série paire) ou avec TTH (série impaire, hypertrempe et revenu pour la précipitation de phase γ').

Les alliages sans traitement sont utilisés dans le domaine de la chimie et dans les milieux corrosifs. Les alliages durcis par précipitation de Ni₃Ti ou Ni₃Al sont utilisés pour leur résistance mécanique et à la corrosion.

2.10.2 Les alliages

	Sans TT	Avec TT
Ni	N022x	N033x
Ni Cu	N044x	N055x
Ni Cr	N066x	N077x
Fe Ni Cr	N088x	N099x
Ni Mo	N10xxx	N/A
Ni Mo Cr		
Fe Ni	invar	
	Corrosion Chimie	Haute résistance et corrosion

2.10.3 Consigne de soudage

Le bain de fusion du nickel est relativement visqueux, donc les risques de collage sont plus importants. On essaiera d'ouvrir plus les chanfreins à cause de cette mauvaise mouillabilité.

Les impuretés présentes S, Si et B en fonction de leur quantité, provoquent de la fissuration à chaud. C'est le même phénomène que pour les inox austénitiques car ils augmentent l'intervalle de solidification en se ségréguant aux joints de grain et les contraintes de retrait déchirent le film encore à l'état liquide. Donc on essaiera de réduire l'intensité, la vitesse d'avance, la température entre passes (pas de préchauffage, $T < 150^\circ\text{C}$ entre passes). En revanche les alliages au Mo sont insensibles à ce type de fissuration. Ce phénomène existe aussi en ZAT par liquation intergranulaire à une température située entre 30 et 150°C au-dessous de

la température de solidification (micro-fissures) et au réchauffage dans le métal fondu dans le cas de soudures multipasses.

Pour éliminer les risques de soufflure, on choisit un procédé à bas hydrogène. On soignera particulièrement le décapage pour enlever les oxydes et le dégraissage. Il faut une protection endroit et envers (Argon). On portera une attention particulière aux prises de masse afin d'éviter les phénomènes de soufflage magnétique.

En ce qui concerne les alliages sans durcissement, on les soude à l'état hyperefflué ou recuit (alliage écroui non soudable). Le coefficient d'efficacité de joint est de 1. Les procédés généralement utilisés sont le TIG (141 sous Ar pur), le MIG (135 sous Ar pur), le SAEE (111) et le SFP (121).

Pour les alliages trempants, on peut les souder soit en TIG soit avec un procédé haute énergie. En TIG, on essaiera de réduire au maximum l'énergie de soudage afin de réduire la ZAT pour éviter trop de pertes des caractéristiques mécaniques. On pratiquera un revenu post-soudage avec une montée en température rapide, mais avec un gros risque de fissuration. Le métal d'apport utilisé sera non trempant et le coefficient d'efficacité de joint sera forcément inférieur à 1. On préfère des procédés à haute énergie tels que le faisceau d'électrons ou le laser. La ZAT est réduite et le coefficient d'efficacité de joint est proche de 1. On ne réalise pas de revenu post-soudage.

Pour le soudage hétérogène, on utilise parfois des bases nickel pour le soudage des aciers autotrepants, pour les inox entre eux (ferritique sur austénitique), pour les soudages mixte aciers/inox ou le soudage des fontes. Le nickel absorbe l'hydrogène ce qui évite son transfert en zone de liaison et la fissuration à froid des aciers trempants. De plus, le cordon réalisé est ductile et absorbe les contraintes de soudure lors du refroidissement.

2.11 LE TITANE ET SES ALLIAGES

2.11.1 Propriétés

Le titane a une température de fusion de 1670°C. Sa densité est de 4.51 et son coefficient de dilatation est proche de celui de l'acier. En revanche sa conductivité thermique et électrique sont proches de celles des inox.

Le titane se présente sous deux structures cristallines, avec transformation réversible à 882° C.

- Le titane α , stable jusqu'à 882°C, structure hexagonale compacte.
- Le titane β , stable de 882°C jusqu'au point de fusion, structure cubique centrée.

Le titane β est moins dense que le titane α . L'addition d'éléments d'alliage fait apparaître un domaine $\alpha + \beta$.

Les alliages de titane présentent plusieurs familles : le titane non allié (51), les alliages α et super α (52), les alliages biphasés (53), les alliages β métastables ou stables (54).

Le titane et ses alliages ont une résistance spécifique élevée (1100 à 1300 Mpa pour une densité de 4.5). Le titane pur ou très faiblement allié est formable à froid et présente une bonne soudabilité et une bonne résistance à corrosion en tous milieux sauf acide réducteur. Les alliages α ont une bonne résistance au fluage. Les alliages β formables à froid sont durcissables par précipitation. Les alliages résistent bien à la corrosion suite à la formation d'une couche d'oxyde protectrice TiO_2 . Ils sont utilisés aussi en cryogénie (biphasés) avec des températures de transition vers $-150^\circ C$. Certains alliages sont biocompatibles, à mémoire de forme, à mémoire de résistance électrique ou supraconducteurs.

2.11.2 Soudabilité

Le titane présente, à température élevée, une grande affinité pour l'oxygène, l'azote, le carbone et l'hydrogène. On doit tenir compte de cette caractéristique essentielle dans l'élaboration et les transformations du métal.

L'avidité du titane en oxygène oblige à utiliser des modes opératoires d'assemblage très propres. En effet, dès $500^\circ C$ une contamination du métal de base et de la zone fondue se produit au contact de l'air, fragilisant fortement le matériau. Pour l'assemblage, il convient donc de souder sous une atmosphère neutre de grande qualité. Généralement, cette qualité de protection est obtenue en soudant dans une cloche (la boîte à gant) remplie d'un gaz neutre (argon). Le soudeur veille en particulier à ne pas entraîner une coloration (synonyme d'oxydation) de la zone soudée. Au pire la couleur, ne doit pas dépasser le jaune paille.

L'autre aspect à surveiller pour le soudeur est le grossissement du grain de la structure. Le titane y est assez sensible. C'est pourquoi certains constructeurs martèlent la soudure entre passes. L'écroissage entraîne une recristallisation qui affine le grain.

Les soufflures sont un défaut relativement fréquent. Elles sont très petites et ne sont pas nocives pour les propriétés mécaniques. En revanche, elles favorisent l'amorçage des fissures en fatigue. Ces soufflures proviennent de l'hydrogène présent dans le métal de base.

Le titane et ses alliages ne présentent pas de risques de fissuration à froid ni à chaud. Par contre, étant donné les fortes limites élastiques, la ductilité est quasi nulle ce qui complique le soudage au niveau des contraintes résiduelles lors du retrait par exemple. La majorité des alliages est insoudable par fusion.

La ZF et la ZAT sont systématiquement des structures de trempé.

2.11.3 Préparation

La préparation des joints est identique à celle de l'inox.

Pour des soudures ordinaires, un bon dégraissage est suffisant. Cependant, il ne faudra pas utiliser un solvant chloré ce qui engendrerait de la corrosion sous contrainte.

Pour les soudures de qualité et sur des alliages à hautes caractéristiques, on réalise un décapage chimique (bain nitro-fluorhydrique), puis l'usinage de préparation avant de réaliser la soudure. Ensuite on redécape chimiquement la pièce dans le même type de bain afin d'améliorer les propriétés en fatigue. On veillera à la protection endroit par un gaz neutre (argon) avec un point de rosée le plus bas possible pour éviter l'humidité (hydrogène donc soufflures). Généralement, on adjoindra un traînard pour les procédés manuels afin de protéger la zone fondue lors du refroidissement. La protection envers sera assurée par de l'argon pur. On peut souder dans une boîte à gant ce qui permet d'assurer la protection endroit+envers. Le métal d'apport utilisé est le même que le métal de base.

2.11.4 Procédés

On peut utiliser le TIG, le MIG et le plasma. Généralement on utilise un système d'inertage mobile ou traînard. Avec le plasma on peut souder jusqu'à 15 mm en une seule passe. Pour le TIG, on soude 3 mm en une seule passe sans préparation.

Le soudage laser permet d'éviter le grossissement des grains pour les fines épaisseurs. Mais là aussi il faudra assurer une forte protection par gaz inerte avec des débits importants. On peut souder jusqu'à 25 mm avec des lasers 25kW. Le soudage par faisceau d'électrons permet de souder des épaisseurs plus importantes (200 mm).

2.12 LES ALLIAGES DE CUIVRE

2.12.1 Propriétés

Le cuivre et ses alliages sont utilisés pour leur propriétés de conductivité électrique et thermique, résistance à la corrosion, résistance aux frottements et aux chocs, pas de magnétisme.

Les alliages sont classés en 3 catégories : le cuivre non allié, le cuivre faiblement allié (2% maximum d'éléments d'addition) et les alliages cuivreux.

2.12.1.1 Cuivre non allié

Il en existe 3 types : Cu-a (avec 0.1% d'O₂ maxi), Cu-b (désoxydé au phosphore donc contenant du phosphore) et le Cu-c (mini 99.95% de Cu).

La limite d'élasticité du cuivre recuit est de 70 Mpa.

2.12.1.2 Cuivre faiblement allié

Il existe 2 grandes familles :

- Cuivre durci par éléments d'addition et écrouissage
- Cuivre durcissable par TTH (trempe+revenu) et éventuellement écrouissage complémentaire.

Les alliages durcissables par TTH ont des limites d'élasticité plus élevées.

2.12.1.3 Alliages cuivreux

Ils se présentent à l'état recuit ou écroui car ils ne sont pas aptes aux TTH. Il existe 6 grandes familles :

- Les laitons
- Les bronzes
- Les cupro-aluminium
- Les cupro-nickel
- Les cupro-silicium
- Les maillesshorts

2.12.2 Soudabilité

Leur soudage est rendu délicat par leur forte conductivité électrique, leur forte conductibilité thermique et leur fort coefficient de dilatation.

2.12.2.1 Soudabilité opératoire

Les difficultés opératoires découlent des propriétés physiques du cuivre.

2.12.2.1.1 Conductivité thermique élevée

On est obligé d'utiliser des énergies de soudage très fortes associées à un préchauffage pour lutter contre la dispersion de chaleur très rapide. On peut atteindre 600°C en préchauffage. Si l'énergie de soudage est insuffisante, on a des manques de fusion ou collages et des manques de pénétration.

2.12.2.1.2 Conductibilité électrique élevée

Il est difficile de provoquer un échauffement par effet joule donc de souder par résistance.

2.12.2.1.3 Fluidité importante

Le cuivre à l'état liquide est extrêmement fluide ce qui provoque l'effondrement du bain de fusion et complique tous les soudages en position. En effet la tension superficielle du bain de fusion est faible.

2.12.2.1.4 Coefficient de dilatation important

Les déformations de pièces seront importantes de part la forte dilatation et la forte surface chauffée (conductibilité thermique). Il faudra particulièrement soigner le bridage et les séquences de soudage.

Pour les procédés à arc, on peut souder ce type de matériau avec des courants pulsés afin de lutter contre la forte énergie nécessaire à la création du bain de fusion.

Les propriétés des alliages cuivreux sont différentes et par exemple le préchauffage ne sera pas nécessaire pour les laitons, les cupro-nickel, les mailleshort et les cupro-silicium.

2.12.2.2 Soudabilité métallurgique

L'état de livraison de l'alliage a son importance. En effet, seul les états recuits sont soudables sans pertes des propriétés mécaniques après soudage. Les nuances écrouies voient leurs caractéristiques chuter après soudage (recristallisation irréversible). Les nuances trempées-revenues voient aussi leurs caractéristiques chuter après soudage, mais on peut les rétablir sous réserve de pouvoir réaliser le même traitement de trempe et de revenu.

2.12.2.2.1 Fragilisation par l'oxygène

L'oxygène fragilise les soudures du cuivre et de ses alliages à partir de 800°C. Donc on ne soudera pas du Cu-a. Les pièces seront décapées pour enlever la couche d'oxyde avant soudage. On protégera les zones à plus de 800°C lors du soudage par le gaz de protection (endroit+envers+traînard+buse large).

2.12.2.2.2 Sensibilité aux soufflures

A l'état liquide, la limite de solubilité de N, H₂ et O₂ est élevée ce qui provoque des soufflures dans la ZF lors de la solidification.

Pour les alliages cuivreux on sera attentif à la volatilisation du Zn.

On veillera particulièrement au décapage et à la protection lors du soudage.

2.12.2.2.3 Fissuration à haute température

Certains alliages cuivreux manquent de ductilité entre 300 et 700°C. Donc avec la dilatation et le retrait, on risque de fissurer lors de la solidification.

Pour pallier à cela, on sélectionne un métal d'apport avec une bonne ductilité à chaud et on essaye de limiter l'énergie de soudage.

C'est le cas pour les laitons, les cupro-aluminium et les cupro-nickel.

2.13 Les essais mécaniques

Les matériaux ont 2 types de comportement :

- Comportement ductile :
 - o Déformation élastique
 - o Déformation plastique
 - o Rupture ductile avec striction et faciès terne
- Comportement fragile :
 - o Déformation élastique

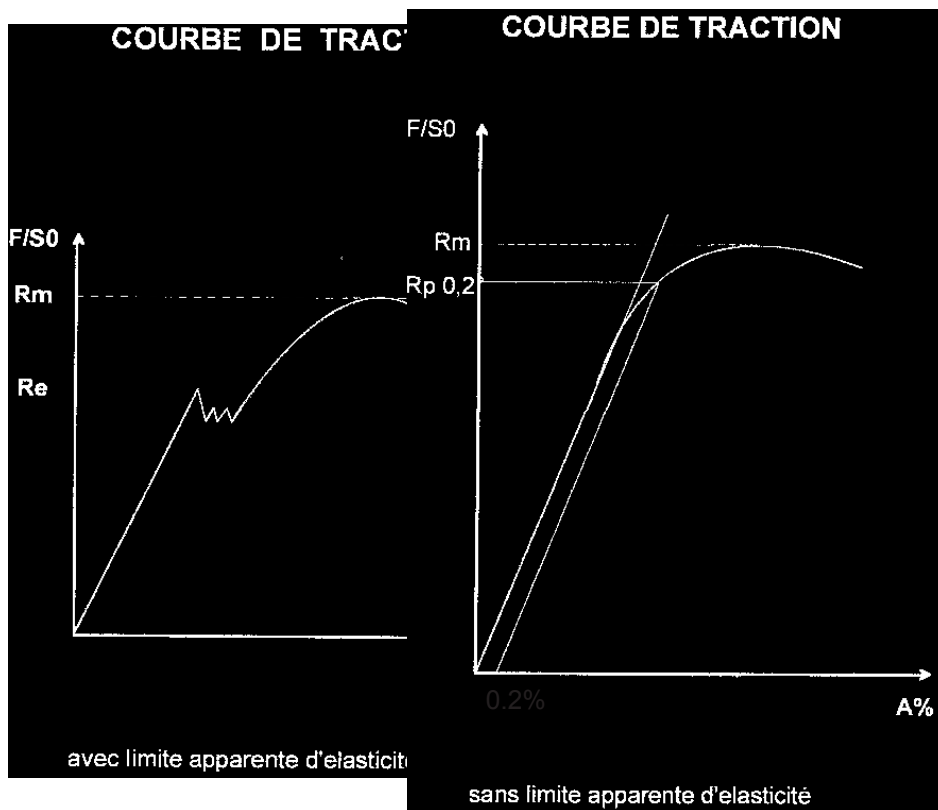
- Rupture fragile facies à facettes brillantes sans déformations (clivage)

Les facteurs de fragilité sont :

- Métallographiques :
 - Structure cristalline CC(direction de faible densité)
 - Composés chimiquement définis ex :carbures, oxydes ... (à cause de leurs liaison ionique)
 - Taille des grains (+ ils sont gros –il y a de joint de grain)
 - L'effet de soluté : mélange de différent atomes perturbant le phénomène de dislocation)
- Thermiques
 - Basses températures
- Mécaniques
 - Effet de choc
 - Effet d'entaille
 - Forte épaisseur

2.13.1 Essai de traction

Il a pour but de déterminer la résistance aux déformations élastiques et plastiques d'un matériau. C'est pour caractériser le comportement ductile. On obtient des courbes de traction.



Le diagramme nous permet de définir

- la limite d'élasticité R_e ,
- la résistance à la traction R_m ,
- l'allongement à la rupture $A\%$ et
- la striction $Z\%$.

Si la limite d'élasticité n'est pas apparente on détermine la limite d'élasticité conventionnelle à 0.2% d'allongement $R_{p0.2}$.

Dans le cas général, les sens de prélèvements sont les suivants :

- Sens long (sens de laminage)
- Sens travers long
- Sens travers court

Dans le cas du soudage :

- Traction longitudinale dans le métal fondu

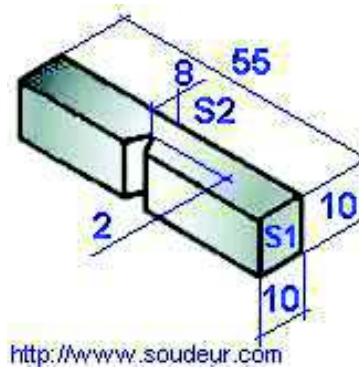
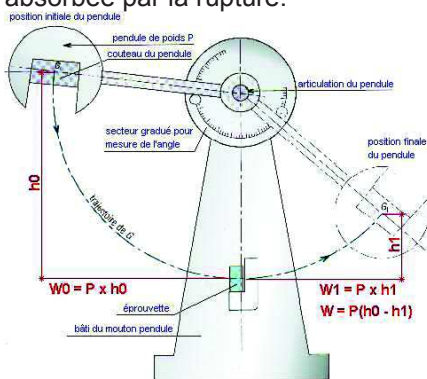
- Traction travers (caractérisation du joint)
- Traction travers court (caractérisation du métal de base)

Les résultats de l'essai peuvent varier suivant

- la vitesse
- éprouvette entaillé ou non
- température

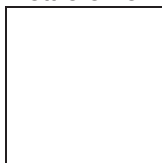
2.13.2 Essai de flexion par choc

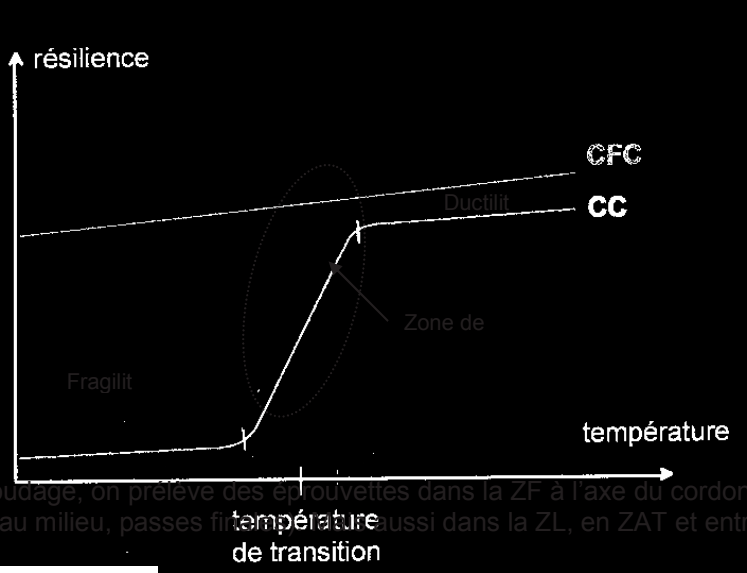
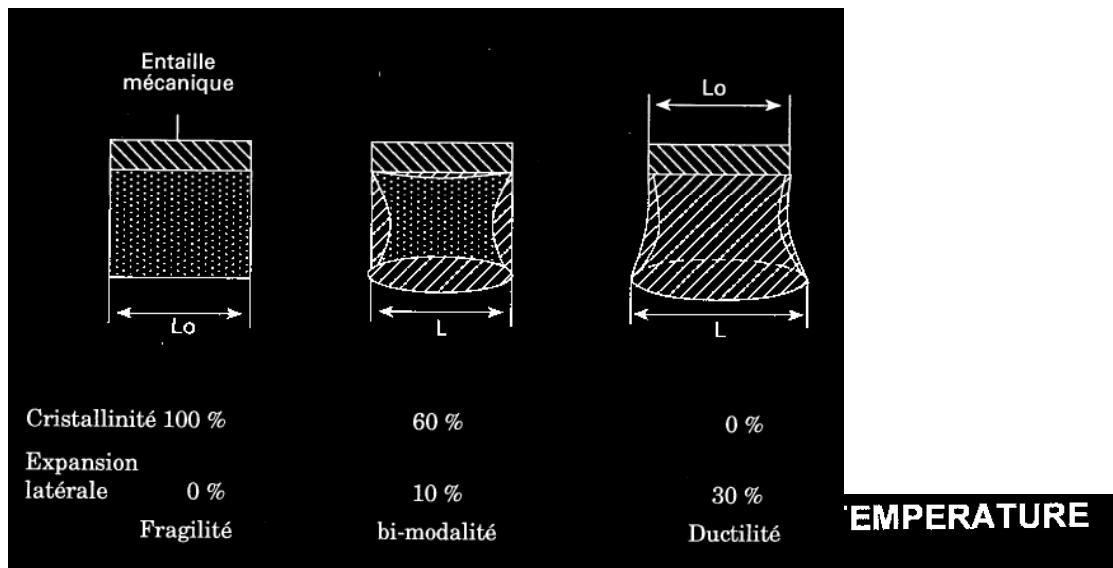
Cet essai a pour but d'évaluer la résistance à la rupture fragile K_{Ic} . Cela consiste à mesurer le travail nécessaire pour rompre, à l'aide d'une masse pendulaire, un barreau usiné de forme carrée de 1 cm^2 de section, entaillé en son milieu par une encoche et reposant sur deux appuis. Cet essai est réalisé sur une machine spéciale appelée mouton pendule rotatif de CHARPY qui enregistre l'énergie absorbée par la rupture.



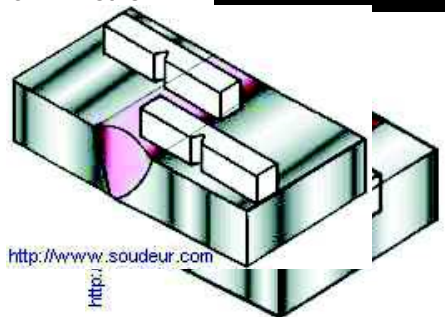
L'éprouvette avec entaille est prélevé de manière convenue vis à vis du sens et de sa position par rapport à l'épaisseur. On mesure l'énergie de rupture en J. Si on divise cette énergie par la section de l'éprouvette, on obtient la résilience en J/cm^2 . On fait généralement 3 mesures à une température donnée.

La courbe de transition ductile/fragile est déterminée par l'exécution de 3 séries d'éprouvettes de résiliences à différentes températures. Cette courbe permet de mettre en évidence, si elle existe, une zone de transition ductile/fragile de l'acier.





Dans le cas du soudage, on prélève des éprouvettes dans la ZF à l'axe du cordon (première passe, au milieu, passes finales) et aussi dans la ZL, en ZAT et entre la ZAT et le MB.



<http://www.soudeur.com>

2.13.3 Essai de dureté

Ils permettent de caractériser la résistance à la déformation plastique du matériau. En fonction du type de pénétrateur, de sa géométrie et de la charge appliquée, on distingue différents modes d'essai : Brinell, Rockwell, Vickers. Cet essai permet de détecter un risque de fragilité si la dureté est élevée.

2.13.3.1 Essai de dureté Brinell (échelle macrographique = dureté moyenne)

Il consiste à imprimer dans la pièce ou le produit à tester une bille en acier ou en carbure de tungstène de diamètre D , sous une charge F et à déterminer le diamètre moyen d de l'empreinte laissée sur la surface après enlèvement de la charge. Des tables permettent de convertir le diamètre de l'empreinte en valeur de dureté Brinell. L'essai doit être effectué sur une surface suffisamment lisse et plane pour permettre de déterminer avec précision le diamètre de l'empreinte : la distance entre deux empreintes successives doit être au moins égale à quatre fois le diamètre moyen de l'empreinte. La distance de l'empreinte par rapport au bord de l'échantillon doit être de 2,5 fois le diamètre moyen de l'empreinte.

2.13.3.2 Essai de dureté Rockwell

L'essai consiste à imprimer (en deux temps et sous deux charges successives) un pénétrateur de type bille ou cône à la surface de la pièce ou du produit à tester. On mesure ensuite l'accroissement résiduel de profondeur de pénétration lors de l'enlèvement de la deuxième charge. Il existe deux types de pénétrateurs :

- La bille d'acier (HRB) : elle est utilisée pour les produits à faible limite élastique (aciers inoxydables martensitiques ou ferritiques recuits et aciers inoxydables austénitiques hypereutectés. La dureté Brinell équivalente (HB) ne dépasse pas 229.
- Le cône de diamant (HRC) : plus indiqué dans le cas des aciers martensitiques trempés et les produits écrouis. Il est utilisé pour des valeurs HRC de 20 à 70.

2.13.3.3 Essai de dureté Vickers(échelle micrographique = dureté locale)

L'essai consiste à imprimer, dans la pièce ou le produit à tester, un pénétrateur en forme de pyramide droite à base carrée, sous une charge F , et à mesurer la diagonale moyenne d de l'empreinte laissée à la surface après enlèvement de la charge.

Des tables indiquent les correspondances entre le diamètre de l'empreinte et la valeur nominale de la dureté Vickers. Il existe trois types d'essais de dureté Vickers, dépendant du niveau de charge appliquée :

- Dureté Vickers standard ;
- Dureté sous charge réduite ;
- Microdureté.

En général, plus la charge est faible, plus la dispersion des mesures peut devenir importante, en particulier si le matériau comporte plusieurs phases de duretés différentes (essais Vickers sous charge réduite et microdureté).

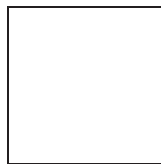
L'essai doit être effectué sur une surface lisse (polie finement pour les essais de microdureté) et si possible plane. Dans le cas des produits cylindriques ou sphériques, il faut affecter un facteur correctif aux valeurs obtenues. La préparation préalable des surfaces doit limiter les échauffements ou l'écrouissage local susceptibles de fausser les mesures. Après essai, aucune déformation ne doit être visible sur la face opposée au pénétrateur (cas des produits très minces) : l'épaisseur de la pièce testée ne doit pas être inférieure à 1,5 fois la diagonale de l'empreinte ; dans le cas contraire, il faut travailler sous charge réduite.

2.13.3.4 Application au soudage

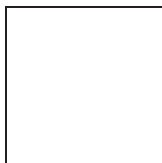
On utilise la dureté Vickers. Ces mesures permettent de vérifier l'absence d'une structure de trempe en ZAT, l'absence de points durs sur la soudure (entaille métallurgique, corrosion sous contrainte), l'absence d'anomalie de soudage (qualité de la protection) et l'absence de phase indésirables (σ).

2.13.3.4.1 Localisation des empreintes dans les soudures bout à bout

Pour les matériaux qui durcissent en zone thermiquement affectée lors du soudage, au moins une empreinte doit être réalisée dans cette zone à une distance de 0,5 mm de la ligne de fusion.



2.13.3.4.2 Localisation des empreintes dans les soudures d'angles

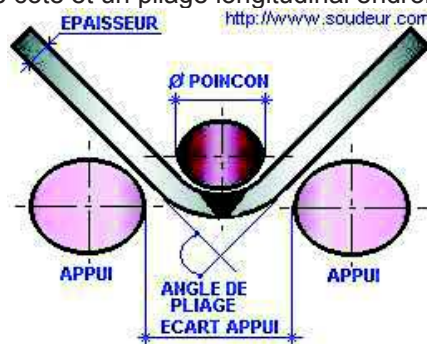


Pour les matériaux qui durcissent en zone thermiquement affectée lors du soudage, au moins une empreinte doit être réalisée dans cette zone à une distance de 0,5 mm de la ligne de fusion pour vérifier toute absence de structure martensitique dure et fragile.

2.13.4 Essai de pliage

L'essai consiste à exercer sur une éprouvette, à température ambiante, une déformation plastique par pliage. L'éprouvette est prélevée transversalement ou longitudinalement à l'assemblage soudé. Une seule face de l'éprouvette est mise en extension (endroit, envers ou côté). Le pliage est réalisé jusqu'à ce que l'une des branches de l'éprouvette fasse un angle alpha déterminé avec le prolongement de l'autre branche. Aucun défaut ne doit être visible après pliage.

Cela permet d'évaluer la ductilité des différentes zones de la soudure et la qualité d'exécution de la soudure. On peut exécuter généralement, un pliage transversal endroit et envers, un pliage de côté et un pliage longitudinal endroit et envers.



3 Conception et calcul

3.1 Notions fondamentales de résistance des matériaux

3.1.1 Relation entre effort et contrainte, théorie de l'élasticité

$\sigma //$ = contrainte parallèle à l'axe du cordon

$\sigma \perp$ = contrainte perpendiculaire à l'axe du cordon

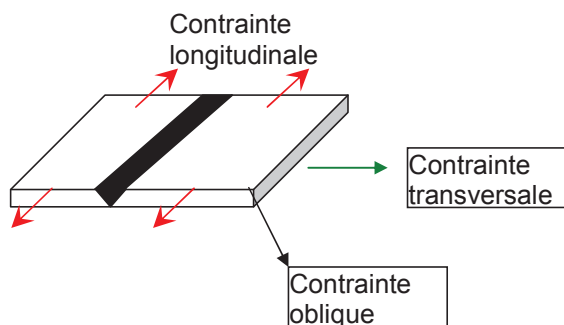
$\tau \perp$ = contrainte de cisaillement parallèle à l'axe du cordon

$\tau //$ = contrainte de cisaillement perpendiculaire à l'axe du cordon

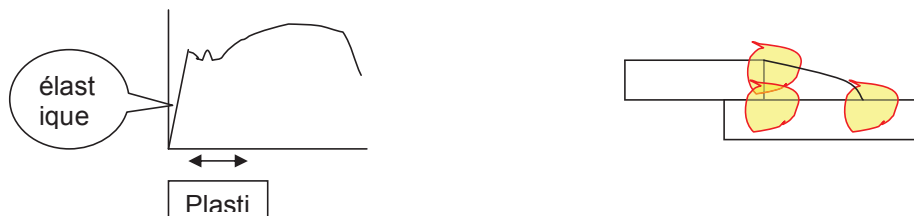
a = gorge du cordon

E = épaisseur ou la distance entre les fibres neutres

k coefficient du matériau utilisé $k=0,7$ pour s235, $k=0.85$ pour s275, $k=1$ s 355



3.1.2 Déformation élastique et plastique



Des contraintes de soudage (forme, K_t contraintes résiduelles..) donnent naissance à des zones plastifiées lors du premier chargement avec des systèmes de contraintes de signes opposés bénéfiques pour les prochains cycles. Mais ce phénomène nécessite une capacité de déformation plastique suffisante : clause réglementaire d'allongement à la rupture mini ($a\% > 20\%$)

3.1.3 Facteur de concentration des contraintes

Forme du cordon trop bombé, pénétration trop importante \Rightarrow faire des cordons concaves « creux », mauvais accostage, excentration importante, manque de pénétration

Défauts internes dit « doux » inclusions, soufflures

Défauts « durs » collage fissures

Sur les assemblages bout à bout

désalignent des fibres neutres

le bombé du cordon pouvant multiplier par 1.6 si l'angle de raccordement est à 120°

3.1.4 Comportement des matériaux dans les différentes conditions de charges (tension, compression cisaillement ...)

3.1.5 Calcul de contraintes

Calcul en statique uniquement sur matériaux en état de ductilité => pas sur les fontes

Dimensions caractéristiques des cordons de soudure

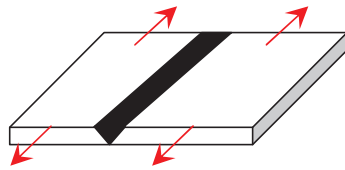
Plan de gorge

Gorge du cordon = a

4 catégories de contrainte

contrainte parallèle

elle n'intervient pas dans les calculs



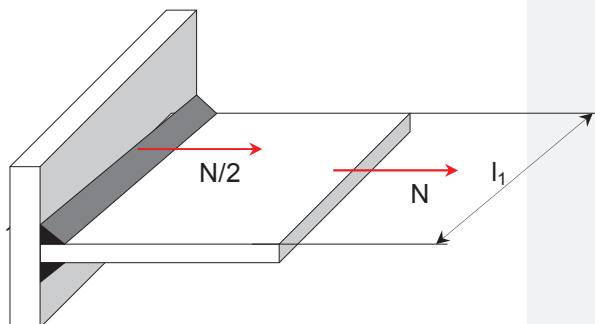
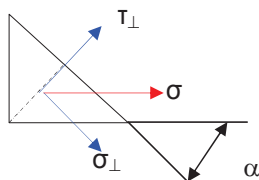
contrainte perpendiculaire et cisaillement perpendiculaire

$$K \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \leq \sigma_e$$

k coef = 0,7 pour s235,

k=0.85 pour s275,

k =1 s 355



Une flexion

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{N}{2\sqrt{2} \sum a l}$$

clin
né les fit

$$\sigma_{\perp} = \sigma \times \cos \alpha$$

$$\tau_{\perp} = \sigma \times \sin \alpha$$

Pour une flexion primaire **Moment = e . f = σ**

$$\sigma = 3 \times F \times \text{largeur de la pièce} / A I^2$$

$$\sigma \text{ de flexion} = \frac{\text{Moment x v}}{\text{Inertie}}$$

La formule fondamentale s'écrit

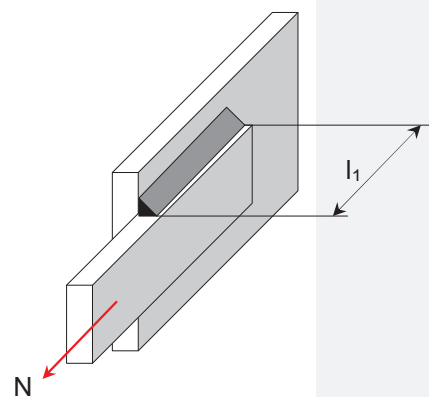
$$K^2 \left[\frac{N^2}{4.2(\sum a l)} + \frac{3N^2}{4.2(\sum a l)} \right] \leq \sigma_e^2$$

Cisaillement parallèle $\tau_{//}$

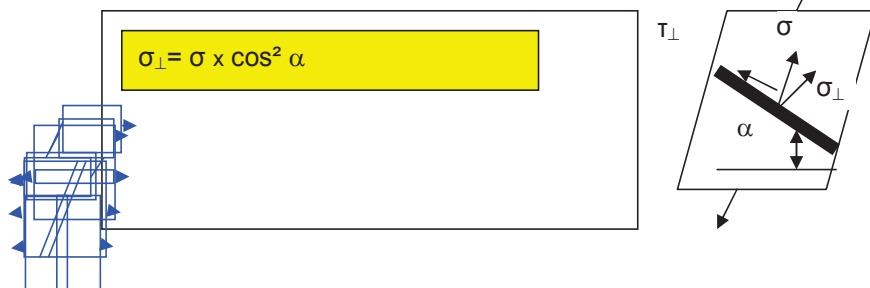
$$\tau_{//} = \frac{N}{\sum a l_1}$$

Formule fondamentale :

$$\sqrt{3} \times K \frac{N}{\sum a l_1} \leq \sigma_e$$



Pour les cordons avec une contraintes oblique



$K^2 \cdot (\sigma_{\perp})^2$
 K de 0.7 à 1.0
 $\sigma_{\perp} = \sigma \times \cos \alpha \times \sin \alpha$

			ou assemblage en angle soudé d'un seul coté		ou assemblage en angle soudé des deux cotés		
Force	re cordon >= r e	$\sigma = k F/al$	$\sigma = k F/al$	$\sigma = k F/al$	$\sigma = k F/al$	$\sigma = k F/al$	$\sigma = k F/al$
σ_{\perp}			$\sigma = \sigma_0 \cos \alpha$	$\sigma_{\perp} = \sigma_0 \cos^2 \alpha$			
$\sigma_{//}$							
$\tau_{//}$	oui	<re		$\tau_{//} = \sigma_0 \sin \alpha \cdot \cos \alpha$		F/al	
τ_{\perp}			$\sigma_0 \sin \alpha$				
1 Moment			Flexion primaire = $M V / I =$ 6σ				

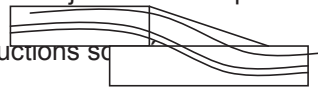
3.1.6 Types de fractures en fonction des contraintes

3.1.7 Utilisations des normes et spécification

3.2 Les bases de la conception des soudures

Pour les cordons d'angle
rendre symétrique les assemblages pour éviter les flexion secondaire
Cordons plats ou concaves
Pour les cordons d'angle soumis à la compression diminuer le jeu entre les pièces

Pour les cordons à clin voir courbe page 26 cours constructions so
recherche de la symétrie



Cordons plats ou concaves ou allongés
Raccourcir les cordons pour une même section afin de diminuer la contrainte en bout de cordon
Augmenter la pénétration
Éviter les cordons bombés
Faire des cordons frontaux
La tôle doit être
fine pour avoir un cordon fin $a = e / \sqrt{2}$
large pour élargir le maintien

un cordon frontal fait diminuer la contrainte à l'extrémité comportant le cordon frontal mais fait augmenter l'autre extrémité surtout si l'assemblage est élancé ($L / l > 1$)

Pour deux cordons : le cordon frontal d'attaque est toujours plus chargé que le cordons frontal ordinaire

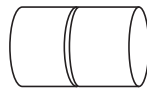
Pour les cordons bout à bout de différente épaisseur
créer des débardage pour avec des plats
des cordons pentus dans la limite de la norme

3.3 Principes de conception des structures soudées

Règle : la transmission uniforme d'un effort (ou d'une sollicitation) d'un éléments A à un éléments B n'a lieu que dans la mesure ou la matière est disposée pour assurer la continuité de l'effort

3.4 Conceptions des joints

Raboutage de profilés pleins
soudage par friction
soudage l'arc



liaison en T
liaison entre deux profilés IPE
arrachements lamellaires
utilisation des produits laminés tranche /tranche



3.5 Fatigue

3.5.1 déformation excessive :

Dimensionnement par :
Essais
Calcul par éléments finis en plasticité
Calcul par méthodes simplistes
- Contrainte primaire (C_p) $\approx \Rightarrow$ Déformation $<$ D_{limite}

3.5.2 Instabilité plastique :

Dimensionnement par :
Essais
Calcul par éléments finis en plasticité
Calcul par méthodes simplistes
- Contrainte primaire (C_p) $\approx \Rightarrow C_p < \sigma_R / K_R$

3.5.3 Instabilité élastique :

- Calcul élastique de $C_p \approx \Rightarrow C_p < \sigma_e / K_{re}$

3.5.4 Déformation progressive :

Dimensionnement par :

Essais
 Calcul Contraintes primaires (Cp)
 Calcul Contraintes secondaires (Cs)
 $|Cp + Cs| \leq 2\sigma_e$ En liaison avec effet BAUSCHINGER

Commentaire [jlp1]: Verif mais 0.5 me
 semble plus juste PAGE : 74

3.5.5 Définition de la fatigue :

Effort, Moment
 Chargement Thermique
 Constant par bloc
 Pression
 Déplacement

Uniaxé
 qui peut être
 Biaxé et Variable dans le temps
 Multiaxé
 Aléatoire.

Pour traiter les problèmes de fatigues, il existe 3 outils :

Essais et calculs en fatigue
 Mécanique de la rupture : On calcule la durée de vie avec propagation d'un défaut de dimension initiale à un défaut final dans un assemblage
 Critères matériaux

A
 VOIR

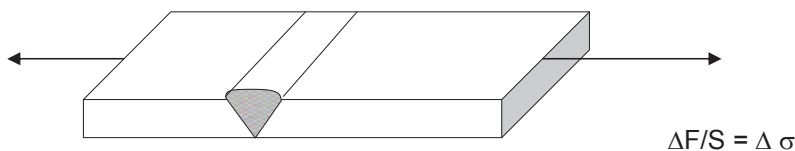
3.5.6 Essais et calculs en fatigue

Le comportement en fatigue des assemblages soudés ne peut être directement apprécié par calcul, il faut passer par des essais.

3.5.6.1 Les essais : les courbes de Woelher

Principe :

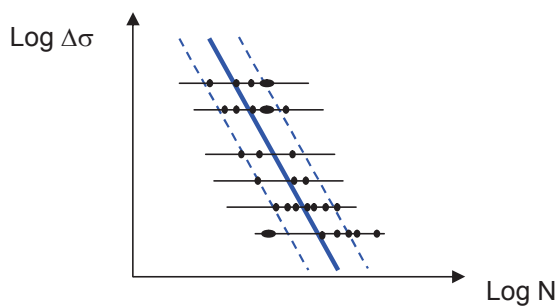
Une éprouvette est soumise à un essai de traction dans lequel on fait varier l'effort F $\Delta F = F_{max} - F_{min}$.
 On détermine le nombre de cycle pour lequel il y aura rupture .
 Cet essai est reproduit un grand nombre de fois en faisant varier l'étendu de contrainte $\Delta \sigma$



$$\Delta F/S = \Delta \sigma$$

Représentation des courbes de woehler / les courbes S-N

L'ensemble des résultats des essais sont caractérisés par les données ($\Delta \sigma$; N de rupture) et placés dans un graphique



La courbe moyenne obtenue est d'équation $N = C/(\Delta \sigma)^m$ et représente une probabilité de survie ou de rupture à 50%.

Par analyse statistique, on détermine une courbe représentant 97.5% de survie et 97.5% de risque probabilité de rupture.

Pour un grand nombre de cycle, l'étendue de contrainte ne varie plus et se note $\Delta \sigma D$ (limite d'endurance)

Nota : une courbe est représentative d'un joint avec son procédé sa forme et ses contraintes résiduel

Paramètres influents :

La température

Matériaux de base= $\Delta \sigma D = 2/3 Re$; mais c'est surtout la géométrie qui est importante.

Les contraintes résiduelles dans les joints soudés.

La géométrie du cordon et des types de joints.

Le rapport de charge $R = \sigma_{min}/\sigma_{max}$

Les défauts

fissures, manques de pénétration, collages : le plus nocif dépend du chargement

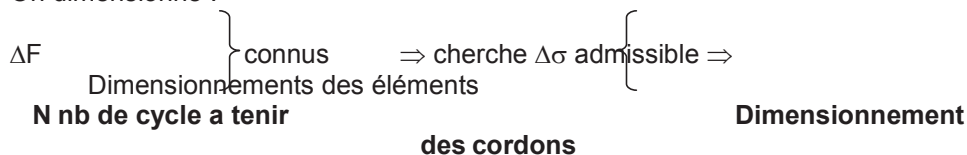
A voir

soufflures : $\Delta\sigma_D$ est affectée par la présence des porosités en fonction de leur % dans la soudure (Aire critique de porosités=17% joints bruts et 7% joints arasés)
 inclusions : pas tolérables
 caniveaux : les caniveaux peuvent être tolérés sans risque fatigue car si caniveaux profonds mais avec grands rayons, K_T diminue mais si caniveaux peu profonds mais avec petits rayons, K_T augmente
 forme du cordon : influence K_T
 désalignement, déflexion : influence K_T , la nocivité du défaut dépend du chargement appliqué

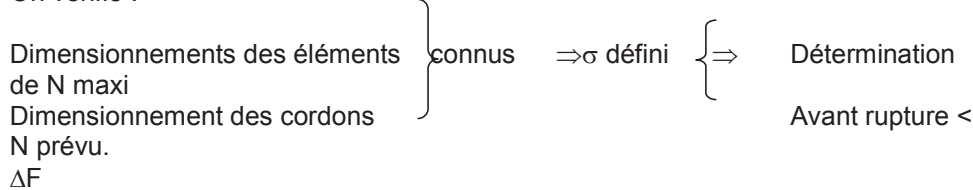
3.5.6.2 Les calculs avec chargement constant

2 cas :

On dimensionne :



On vérifie :



La définition de $\Delta\sigma$ se fait

$\Delta\sigma$ nominale : RDM

$\Delta\sigma$ géométrique : calcul par éléments finis extrapolés

$\Delta\sigma$ locale : calcul par éléments finis

On utilisera pour déterminer $\Delta\sigma = f(N)$ soit:

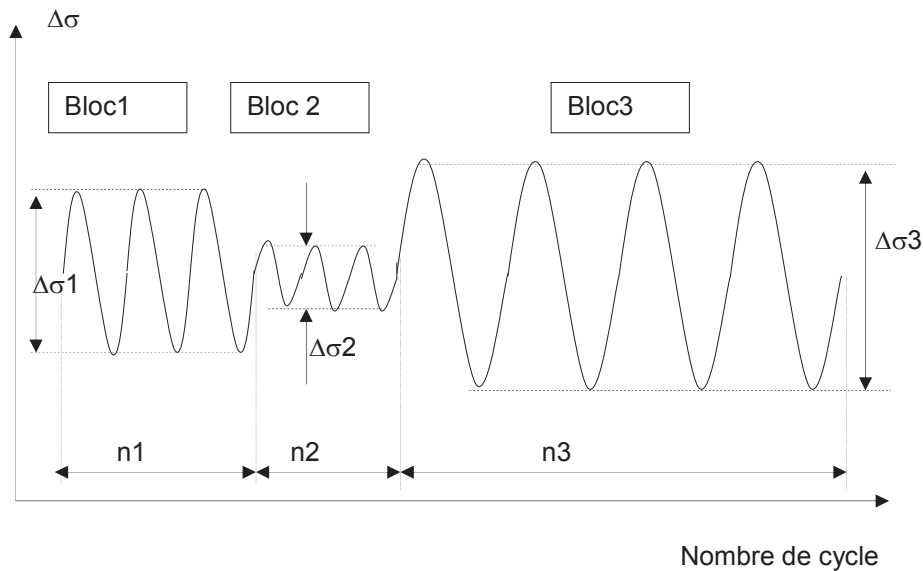
Une courbe de Woehler spécifique si elle est à disposition en prenant 97.5% de survie par ex.

Des classifications d'assemblage (ex classification faite par L'IIW ou l'IS) qui donnent à 2 millions de cycles et à 97.5% de survie l'étendue de contrainte admissible. Elles sont prévues pour des aciers non alliés et un process de soudage à l'arc. Des coefficients de correction peuvent être appliqués en fonction de l'épaisseur et du rapport de charge $R. = (\sigma_{\min}/\sigma_{\max})$

3.5.6.3 Les calculs avec chargement constant par bloc Loi de Miner

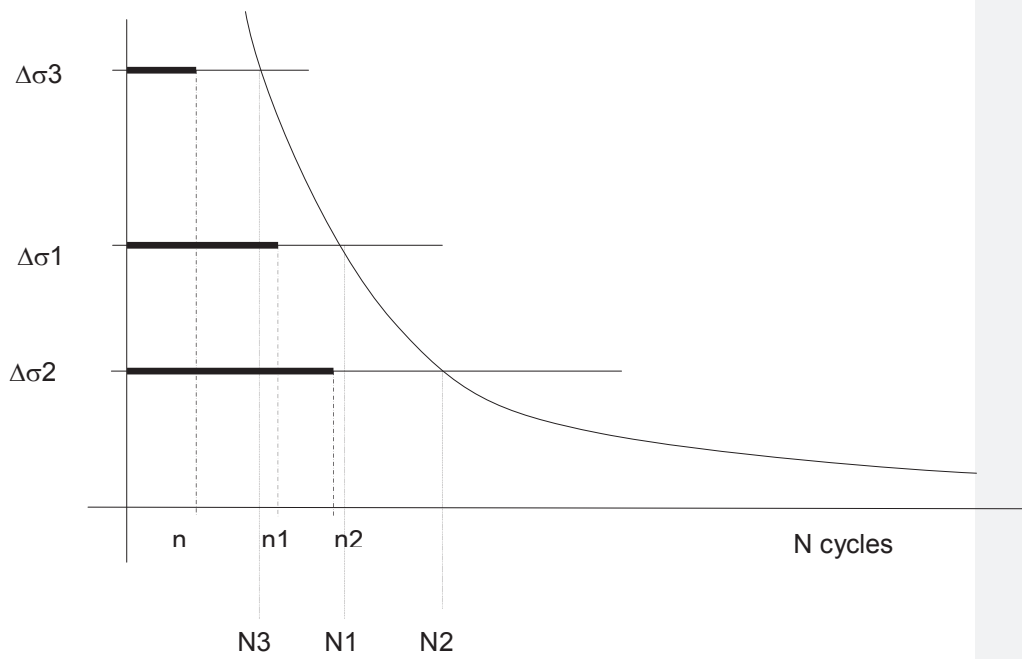
$$\sum(n_i)/N_i < 0,5$$

Chaque bloc est associé à un nombre de cycle n et un chargement $\Delta\sigma$.



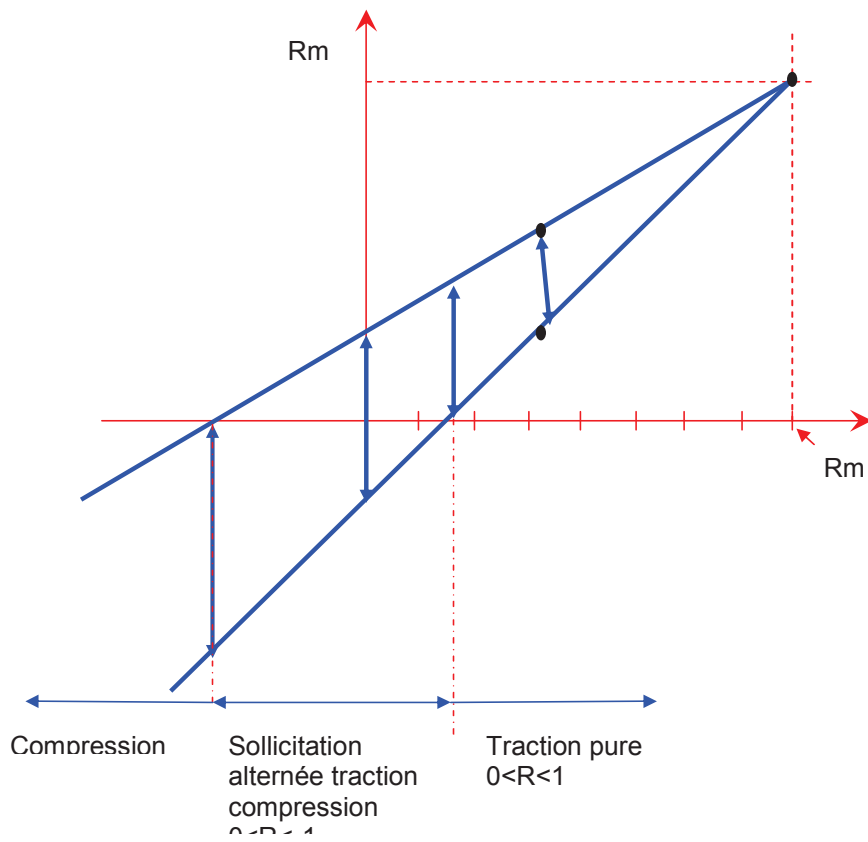
Pour chaque bloc on détermine le nombre de cycle admissible N pour l'étendue de contrainte $\Delta\sigma$ et on vérifie que : $\sum(n_i)/N_i < 0,5$; c'est à dire $n_1/N_1 + n_2/N_2 + n_3/N_3 < 0,5$.

S'il on veut être sécuritaire ---> mettre les grandes amplitudes au début puis les plus petites



3.5.6.4 Le diagramme de Goodman

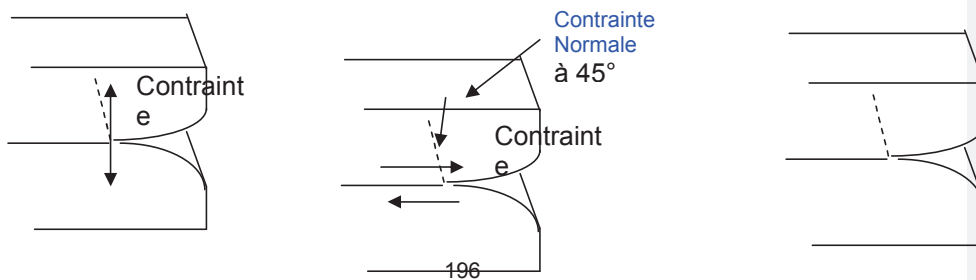
Donne l'étendue $\Delta\sigma$ en fonction du rapport R A voir



3.6 La mécanique de la rupture

3.6.1.1 Rappels et définitions.

Rappel Modes de rupture : Mode I ; Mode II, Mode III.



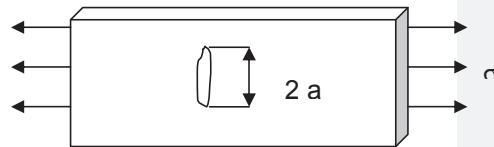
Rappel K_t coefficient de contrainte := $K_t = \sigma_{max} / \sigma_{moy}$.
 Utilisable pour des défauts volumiques, mais pas pour les défauts plans => On utilise le facteur d'intensité de contrainte.

3.6.1.1.1 Définitions Facteurs d'intensité de contraintes

C'est une grandeur physique qui permet d'apprécier le comportement d'un matériau soumis à un défaut plan (ex entaille). Cette grandeur notée K est associée au mode de rupture : KI, KII, KIII.

$$K_I = \lim_{\rho \rightarrow 0} (\sqrt{\pi/2}) \cdot K_t(\rho) \cdot \sigma_{nom} \cdot \sqrt{\rho}$$

Cas particulier : $K_I = \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a}$



3.6.1.2 En statique.

3.6.1.2.1 3.2.1 K_{Ic}

3.6.1.2.1.1 En statique, on peut atteindre une situation critique lorsque

1/ σ atteint une valeur critique pour lequel il y a fissure =>

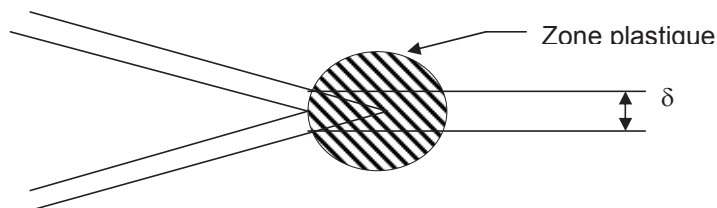
$$K_{Ic} = \sigma_c \cdot \sqrt{\pi \cdot a}$$

2/ la valeur a atteint une valeur critique pour lequel il y a fissure : => $K_{Ic} =$

$$\sigma_c \cdot \sqrt{\pi \cdot a_c}$$

3.2.2 COD

Le crack opening displacement = COD = Ecartement à fond de fissure en mode I.



En régime élastique :

$$\delta = KI^2/(\sigma_e.E)$$

On peut en déduire la valeur de δ critique pour KI critique ; donc la valeur du fond de la fissure critique.

3.6.1.3 Applications.

Contraintes primaires= contrainte nominale

Contrainte secondaire= contrainte imposé par la continuité de la matière (thermique, résiduel...)

Contrainte de pointe= produite par des accidents géométriques (désalignement de tôles , effet de toit....)

* Si somme des contraintes < limites élastiques :

Mécanique linéaire applicable :

Utilisation de KIc

Uniquement en
domaine élastique, il
caractérise la fragilité

Mécanique linéaire non applicable :

Utilisation de $CODc$

domaine plastique et
ductile

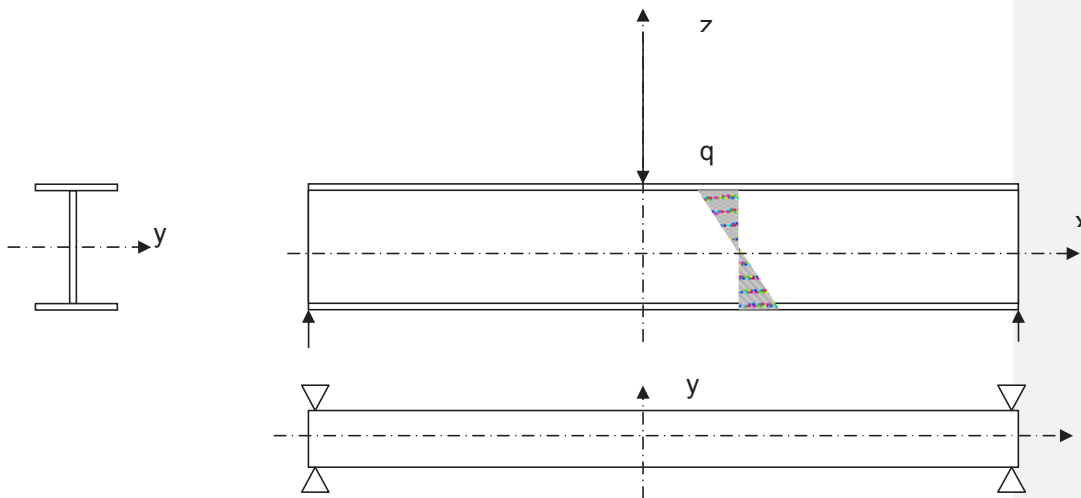
* Si somme des contraintes > limites élastiques : Utilisation de C

3.6.1.4 En fatigue.(dynamique)

Loi de Paris :

La vitesse de propagation d'une fissure est lié à la variation du facteur d'intensité de contrainte : $da/dn = C(\Delta K)^m$.

3.7 Calcul d'une Poutre



3.7.1 Mode de ruines

3 modes de ruines :

Flambage de l'aile supérieur ou déversement.

Voilement de l'âme

Flèche ou plastification de la semelle inférieur

Blocage dans axe y pour éviter le déversement et raidisseur au droit des réactions et de la charge pour éviter le voilement.

3.7.2 Vérifications :

3.7.2.1 Plasticité des semelles

$\sigma_x = M.v / I_y \leq \sigma_e$ La contrainte maxi est égal au moment Maxi sur le module de flexion (I/v)

La contrainte max doit être inférieur à la limite élastique

3.7.2.2 Cisaillement de l'âme

$$\tau_{xz} = T / A_a \leq \sigma_e / \sqrt{3}$$

Nous sommes dans un système de contrainte de cisaillement verticale et horizontal qui équilibre le système.

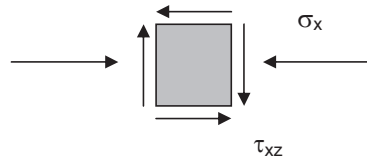
La contrainte est égal à la l'effort tranchant sur la section de l'âme. Elle doit être inférieur ou égal à la limite élastique sur racine de trois

3.7.2.3 Contraintes combinées

A la liaison âme/semelle

$$\sigma_x^2 + 3\tau_{xz}^2 \leq \sigma_e^2$$

On utilise la contrainte calculer pour la plasticité de la semelle et celle calculé pour le cisaillement de l'âme



3.7.2.4 Déversement de la semelle

Elle est initié par le moment fléchissant. C'est une contrainte de compression, On considère la semelle seule avec un blocage verticale, donc la section a considérer est seulement celle de la semelle.

$$K\sigma_c \leq \sigma_e \quad K = f(\lambda) \quad \lambda = L/i_z \quad i_z = \sqrt{I/A}$$

Il faut calculer λ puis chercher $K = f(\lambda)$ dans un tableau correspondant a la limite élastique de l'acier considéré.

$$\sigma_c = M_z \cdot v / I_z$$

Le moment considéré est le moment maxi.

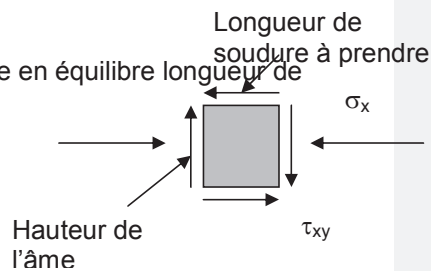
3.7.2.5 Voilement de l'âme

C'est une contrainte de compression. C'est un calcul dimensionnant en fonction de l'épaisseur.

3.7.2.6 Calcul du cordon

Liaison âme/semelle. Du fait que l'on se trouve dans un système en cisaillement en équilibre (voir plus haut) la section de soudure a considérer sera la gorge par la hauteur de

l'âme, car on voit sur le croquis ci dessous pour être en équilibre longueur de soudure égal la hauteur de l'âme



$$\tau_{//} = \tau_{xy} \leq \sigma_e / \sqrt{3}$$

$$\tau_{xy} = T / 2a \cdot h$$

La contrainte de cisaillement est égal à l'effort tranchant

3.8 Calcul d'un treillis

3.8.1 Dimensionnement statique en traction et en compression

3.8.2 Vérification en fatigue

Raccordement des différentes membrure

3.8.3 Calcul en statique des cordons d'angles

3.8.4 Vérification en fatigue des soudures bout à bout et d'angle

3.9 CONCEPTION ET CALCUL D'UN APPREIL A PRESSION

Les étapes

- 1/ Calcul de la contrainte nominale f
- 2/ Définition de la catégorie de construction
- 3/ Calcul de la pression d'essai de résistance.
- 4/ Détermination du Tk_{27}

3.9.1 Calcul de la contrainte nominale f

➤ C'est la valeur maximale admissible de la contrainte équivalente primaire de membrane.

Elle dépend

des caractéristiques mécaniques du matériau
du coefficient de sécurité appliqué

f = fonction de (σ et coefficient de sécurité)

Il existe plusieurs tables qui permet de déterminer f en fonction de l'utilisation

- Normale sans fluage
 - Normale avec fluage (c'est celle qui a été utilisée dans le cas d'étude : $f = \sigma_r / 1.6$)
- Exceptionnelle de service ou d'essai

➤ f étant défini , on calcul l'épaisseur e du matériau à l'aide de la formule :

$$e = P \cdot R_m / (2 \cdot f \cdot z)$$

Avec

e = épaisseur du matériau

P = pression de service

R_m = rayon moyen de l'appareil

f = contrainte maximale admissible

z = coefficient de joint.

3.9.2 2/Définition de la catégorie de construction

Un tableau classifie les matériaux en groupe (ex St 5.1 pour les aciers au Cr-Mo)

Ce groupe permet de déterminer dans un second tableau en fonction de l'épaisseur utilisé une catégorie (A ; B ou B)

Cette catégorie permet elle même de définir dans un troisième tableau un coefficient de joint z ainsi qu'un type de réception.

En fonction du type de réception (1,2,ou3) des conditions de livraisons des tôles sont spécifiés (ex contrôle 3.1b, de la composition chimique, du traitement thermique, du R^tp0.2 etc....)

3.9.3 3/Calcul de la pression d'essai de résistance

$$PE = 1.25 P \cdot f_{20} / ft$$

$$PE \geq 1.25 P$$

3.9.3.1 Avec

PE = Pression d'essai de résistance

P = Pression de service

f₂₀ = contrainte maxi admissible à température ambiante

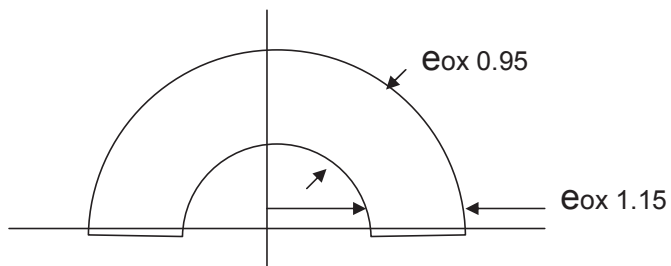
ft = contrainte maxi admissible à température de service (calculée dan le 1/)

$$f_{20} = \min (R_{m20} / 2.7 ; R_{0.2-20^\circ c} / 1.5)$$

3.9.4 4/Détermination du Tk27

Calcul de e_r (épaisseur de référence)

C'est l'épaisseur de la paroi à prendre en compte pour le calcul du Tk27



1

2

$$\epsilon_r = e_{ox} \cdot 1.15 / 0.95$$

Lorsque la sphère est emboutie à chaud, il y a une déformation : dans la partie 1 l'épaisseur de la sphère diminue ; alors que dans la partie 2, elle augmente.

Détermination de la température TMA : Température minimale admissible
 Dans le cas d'étude TMA est égal à la température d'essai = 0°C.

Détermination de la température TK27 :
 Le graphe donne Tk27 = -10°C

Détermination de l'abaissement de la température :
 Calcul de la contrainte dans les conditions d'essai :
 $\sigma_{essai} = P_{essai} \cdot R_m / 2 \cdot e$

Calcul de $\rho = \sigma_{essai} / R_{0.2}$ à 20°C

Si ρ est < 0.6 , il est possible d'augmenter la température du Tk27 suivant un tableau

4 Fabrication et applications d'ingénierie

4.1 Introduction à l'assurance qualité dans les construction soudées

4.2 Contrôle de la qualité en fabrication

La soudure est un assemblage permanent qui doit avoir au moins les mêmes caractéristiques que le métal de base pendant toute la durée de vie de l'équipement

Les dispositions constructives

- définition d'un coefficient de joint (+l'assemblage est sollicité =>+ contrôle)
- niveau de qualité de la réalisation (donnée par les codes suivant les risques EHS la durée de vie) pour donner les critères d'acceptation et le coef de joint
- programme de contrôle
- programme d'inspection (préalable à l'essai de réception témoigne de la qualité de la fab suivant les exigences)

les codes

- appareil a pression
- levage
- transports
- ouvrage d'art destinés au public
-

4.3 Contrainte et déformation en soudage

4.3.1 Lexique

ϵ : Coefficient de dilatation

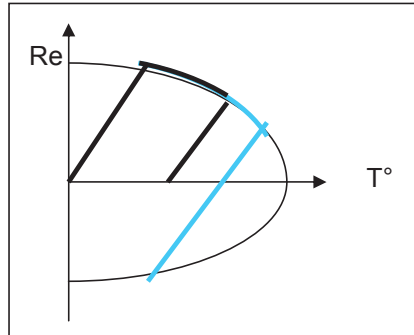
E : module de Young

σ = contrainte

α = coefficient moyen

T_c : température de chauffe

ν : Coefficient de poisson



4.3.2 Propriété physiques

Re baisse quand la température augmente en trait fin noir. Devient négligeable vers 600°C

Pour les métaux avec un changement de phase en dilatation il y a une transformation allotropique

Quand nous entravons la dilatation il y a une plastification et la longueur diminue en trait noir foncé

Quand nous entravons en dilatation et en compression il y a une inversion de contrainte (la contrainte de traction se transforme en contrainte de compression , le métal a une striction)

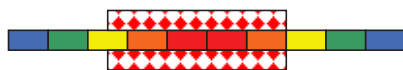
Les contraintes dans un matériaux pendant le chauffage sont d'abord dans le domaine élastique (jusqu'à 100°C pour de l'acier doux) puis dans le domaine du plastique (écrouissage et recristallisation)

Les soudures sur fibre tendu sont moins déformante que sur des fibres non contraintes

Les chaudes de retrait ont plus d'effets quand elle sont effectués sur des fibres comprimés

4.3.2.1 Règle pour le chauffage homogène

Le chauffage d'une pièce en respectant un gradient de température constant selon les 3 directions principales n'introduit pas de contrainte thermique dans un matériau isotrope => pour les TTH locaux et le soudage avec préchauffage , nous devons respecter les sections droites isothermes



Isotrope : se dit d'un milieu dont les propriétés ne dépendent pas de la direction suivant lesquelles on les évalue

4.3.2.2 Chauffage hétérogène : le soudage

Quand on chauffe une partie d'un métal si celui ci s'auto bride, les contraintes de compression se plastifie et au refroidissement inverse (les tôles mine se voiles ou fléchisse)

En soudage par fusion ,chaque point est un cycle thermique dépendant de

- puissance spécifique (W/t.s)
- diffusibilité thermique du matériaux
- géométrie de la pièce

4.3.2.3 la zone plastifiée

il faut savoir que la zone plastifiées en blanc dépend pour un soudage par fusion de proche en proche

- la rigidité de la pièce (épaisseur , mode d'accostage)
- puissance spécifique du procédé (technique de soudage....)
- diffusivité matériau

pour un acier doux, les isothermes de plastification sont pour un assemblage extrêmement bridées entre 70°C et 650°C

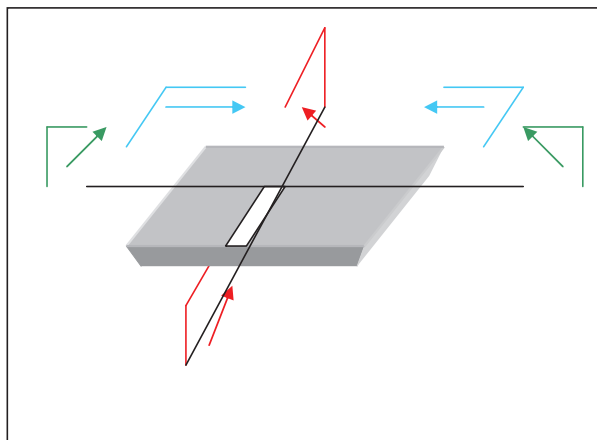
Au refroidissement, la zone plastifié est entravée de manière différente selon la direction longitudinal et transversale

la contrainte plus élevée en longitudinal

mais la contrainte transversale elle dépend

- épaisseur des éléments (mono ou multi-passes)
- vitesse de déplacement (diffusibilité thermique)
- raideur des éléments

4.3.3 les déformations



3 translations

- retrait longitudinal (1/1000 en acier)
- retrait dans l'ép. (souvent nul) est à prendre en compte seulement dans le cas de forte épaisseur soudée en une seule passe avec une spécifique élevée
- retrait transversal

3 rotations

effet de pliage **en vert** : résultant de dissymétrie par rapport à la fibre neutre

- géométrique : préparation en V => dissymétrie thermique
 - cinétique de l'exécution ou du refroidissement
 - peu visible sur soudure mono passe en FE SFP
- effet de serrage **en bleu**
- positif : rapprochement des bords le + courant avec un procédé « lent »
 - négatif : éloignement progressifs des bords

- effet de cintrage **en rouge** généralement masqué par le flambement il s'agit d'une flexion longitudinale de l'ensemble du plan engendrée par la dissymétrie des contraintes longitudinale

Attention au sens et au type de laminage effectué sur la pièce

Le flambage des âmes fines est due a des contraintes de compression

4.3.3.1 Les déformations longitudinales

sont prévisible et variable suivant

- L'inertie de chaque éléments
- Axes de la soudure par rapport au centre de gravité de la pièce
- Epaisseur de chaque pièce

- Bridage
- Pas fractionné évitant la déformation
-

Le retrait sur une pièce prismatique

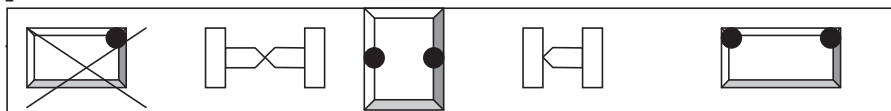
- la soudure dans l'axe neutre : aucune flexion mais un raccourcissement de la pièce
- hors axe neutre : moment fléchissant donne à la pièce une courbure circulaire
- si 2 soudures sont à réaliser hors de l'axe neutre faire en premier celle qui en est la plus proche puis la plus éloignée car souder sur une fibre tendu est moins déformant
- pour les soudures multi-passes la déformation est égale à la déformation de la zone plastifiée totale et non à la somme des zones plastifiées

4.3.3.2 Mesure préventive pour le retrait longitudinale

- Le soudage sur mannequin permet de diminuer la déformation
- Sur un mannequin avec un pré déformation inverse et un débridage après refroidissement complet évite celle ci
- le soudage sur l'état contraint (proche R_e) permet au débridage a froid une relaxation longitudinale homogène sur diverses les fibres
- découpage des détail avec la pré déformation

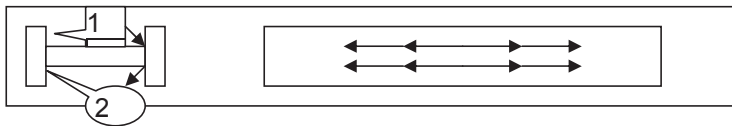
on préférera disposé les soudures longitudinales

- sur centre de gravité 2^{eme} dessin
- ou sur un axe d'inertie 4^{eme} dessin
- une flexion plane facilement maîtrisable
- sur un axe de symétrie par rapport au centre de gravité
- au plus près que possible du centre de gravité et en soudant symétriquement 4^{eme} dessin
- symétriquement par rapport à un axe de d'inertie
- flexion plane si exécution symétrique 5^{eme} dessin



-

- soudage symétrique de joints symétriquement disposés



4.3.3.3 le retrait transversal et pliage

on peut s'appuyer uniquement sur des expérimentations

paramètre intervenant sur le retrait transversale

- le dispositif d'accostage et de maintien des bords (clam age, étriers...)
- Le mode opératoire : passe large moins déformant que les passe étroite
- Longueur de la soudure ↑ retrait transversal ↓ pliage ↓
- Pointage rapproché évite le retrait

paramètre intervenant sur le pliage

- Le mode opératoire : passe large moins déformant que les passe étroite
- gradient thermique dans l'épaisseur (+ important=> +la relaxation des passes précédentes est faibles
- cumul des zones plastifiées
- caractéristique mécaniques plus élevées des dépôts
-

4.3.3.4 Mesure préventive pour le pliage

- Forme des chanfrein en X et en K avec une préférence pour les dissymétrique $2/5^\circ$ ou pour les épaisseur intermédiaire
- Pour les virole cylindrique chanfreinage en V pour soudage depuis l'intérieur
- Pré déformation élastique inverse <Re
- Réalisation de sous ensemble avec des soudures peu déformante
- Séquence de soudage fractionnée en pas de « pèlerin »

- Fractionnement de l'exécution des soudures : finition quand l'assemblage présente le max d'inertie
-

4.3.4 Les contraintes résiduelles

Contrainte \leftrightarrow risque de fissuration

4.3.4.1 Les contraintes longitudinales

proche de la R_e quand on soude sans préchauffage et avec une pièce avec beaucoup d'inertie

Peut donner des fissurations transversales sur des métaux de faible ductilité (fontes et rechargement dur ..)

4.3.4.2 Les contraintes transversales

Le soudage en multi-passe auto bridant conduit à la création de contraintes de traction à l'extérieur et comprime l'intérieur fortement.

L'écroûissage intense et le maintient à la température critique entre 250°C et 400°C font que la racine des cordons en X est une région sensible au vieillissement \Rightarrow dégradation de la ductilité et de la ténacité

Dans le cas de rechargement de surface de révolution sur des aciers sensibles à la trempe

- Rechargement extérieur en rotation pour comprimer le MB
- Rechargement intérieur à éviter (essai possible avec un préchauffage à haute T° et risque important de fissuration sous cordon)
- Rechargement des faces depuis le centre vers l'extérieur en rotation avec préchauffage (avec le risque de cisaillement sous cordon)

Pour résumer le retrait transversal fait l'objet d'un auto bridage dont l'importance dépend de nombreux paramètres

En l'absence d'un bridage ext. Le champ de contraintes transversales est assez hétérogène et difficile à définir pouvant conduire

- Fissures longitudinales à l'axe (à chaud) \Rightarrow impureté pour les alliages eutectiques Soufre et phosphore, forme cristallisation, dilution et solidification

- Fissure sous le cordon (froid) =>acier trempant martensitique, hydrogène, effet d'entaille, contraintes
- arrachement lamellaire =>conception soudage sur peau, acier avec inclusion Mn S, structure bridée ou en rotation ;

Seul un préchauffage à la température de plasticité du matériau permet d'éviter l'apparition de contraintes résiduelles

4.3.5 Séquence de soudage

Une analyse qualitative des effets engendrés par chacune des soudures de l'ensemble permet de définir un ordre logique, les précautions a prendre, et les contrôle de chacune des soudures

- commencer par des détail et finir par des liaisons principales
- faire des sous ensemble avec soudures peu déformantes
- souder symétriquement les dispositions symétriques ou approximativement symétriques
- soudures a retrait transversal libre
- compenser par des moyens appropriés le pliage, la flexion longitudinale et le serrage
- penser au pré et post chauffage

4.3.6 traitements de parachèvement

modification de la forme du joint

- tig refusions
- meulage

le but est d'obtenir une forme concave

modification du champ de contrainte résiduelles

- traitement thermique de relaxation
- grenailage

- martelage
- chaude locale

4.3.6.1 le meulage

modification de l'angle de raccordement entre le cordon de la soudure et le métal de base. Attention il ne faut créer d'entailles et d'amorce de fissure supplémentaire les stries sont parallèle à la direction de l'effort

4.3.6.2 les refusions TIG

réduction de la concentration de contrainte

- aplanissant des profils de raccordement
- enlèvement des défauts de soudage (refusions)

il y a des conditions opératoires pour bien réussir

- sans métal d'apport
- augmentation de l'apport d'énergie et de la vitesse d'exécution stabilise l'effet du parachèvement
- pas de calamine , laitier, impureté diverse
- gros diamètre d'électrode (intensité maxi)

4.3.7 Les traitements de relaxation

4.3.7.1 la relaxation des contraintes résiduelles

Une relaxation des contraintes résiduelles est obtenue lorsqu'une déformation plastique se substitue à toutes ou partie de la déformation élastique à laquelle est soumis le métal

4.3.8 La relaxation mécanique

- dans le domaine élasticité :La contrainte est proportionnelle à la déformation pour un allongement faible
- dans le domaine plastique : la loi n'est plus respecté mais la contrainte diminue quand la déformation augmente et quand la libération la pièce ceci se fait élastiquement

Une nouvelle limite élastique est donnée son maxi est égale au maxi de la contrainte maxi donnée par l'essai

Cette même donne pour une poutre fléchie sous l'action d'une charge entraînant des contrainte de traction = R_e quand elle sera soumise a une surcharge il y aura les zones qui se plastifieront et des autres qui seront dans le domaine élastique quand la surcharge sera supprimée

- les zones plastifié seront le sièges de contraintes inverses qui s'opposeront aux contraintes initiales
- les autres zones resteront intact
-

4.3.8.1 Pour les appareils soudés, l'épreuve

peut atteindre $0.95 R_e$ mais il peut avoir ruine si 3 rotules plastiques sur plan

4.3.8.2 Étirage mécanique

pour des pièces prismatique droites de section constante

4.3.8.3 Procédé thermomécanique « LINDE »

Un chauffage des 2 rives entre 170 et 200°C la dilatation fit étirage mécanique de la soudure
relaxation seulement dans un sens longitudinal

4.3.8.4 Martelage entre passe

Le martelage de la zone plastifié = relaxation des contrainte mais utilisable sur matériaux ductile et peu sensible au vieillissement

- Sur acier doux sans TTH limitation à $A\% < 5\%$
- Sur inox austénitique il doit être limiter pour éviter la martensite (bas carbone) et l'apparition du Ferro magnétisme
- passes de fond et finition non martelées
- métal d'apport très ductile
- progression du remplissage à profil concave
- martelage de la zone centrale du dépôt

4.3.8.5 Galetage et grenailage de précontrainte

Pour les pièces soumise à la fatigue et la corrosion sous contraintes on cherche a établir des contrainte de compression sur une profondeur de 0.2 à 0.3 mm

4.3.8.6 Relaxation par vibration

Utilisation de vibration proche de la résonance. Mais cette méthode n'est homogène

4.3.8.7 La chauffe de retrait

- n'apporte pas grand intérêt si elle n'est pas effectuée sur un état bridé élastiquement avec chauffage des fibres comprimées.
- Sur acier doux non alliés évité les refroidissement à l'eau
- sur inox austénitique attention au carbure de Chrome

4.3.8.8 Redressage à la presse

4.3.9 Relaxation par TTH

On cherche à obtenir une déformation plastique par l'abaissement des caractéristiques mécaniques du matériau à haute T° ceci repose sur 2 phénomènes dans le cas d'une construction homogène à la dilatation thermique

- un dépassement de la limite élastique à chaud
- fluage isotherme accompagné

et la variation du module d'élasticité

dilatation ou la contraction

les transformations structurales

la relaxation commence dès le chauffage $T^{\circ} > 350^{\circ}\text{C}$ et au refroidissement une relaxation complémentaire peut intervenir

pour les TTH locaux respecter la règles des sections droites des isothermes :

4.3.9.1 la contrainte est faible $< Re$ à chaud

on ne dépasse pas la limite élastique à chaud donc la relaxation se fait par fluage au cours du temps de maintien

4.3.9.2 la contrainte est $>$ à la Re à chaud

on dépasse la limite élastique à chaud donc la relaxation se fait par dépassement

4.3.9.3 Aspect métallurgique

L'étude se fait sur MB, ZAT, ZF

avantage	Inconvénient
Revenu des structure de trempe et ZAT	Diminution des caractéristique en traction du métal de base

Restauration des aciers fragilisé par déformation a froid	Fragilisation du MB et de la zat fragilisation au revenu par précipitation des carbures durcissant fragilisation au revenu réversible irréversible
Restauration des zones fragilisé par le soudage	
Amélioration des caractéristiques du métal fondu	

4.3.9.4 Courbes du TTh

- T° et temps de maintien seront choisis en connaissance de la relaxation max. et des effets métallurgique défavorable
- La vitesse d'échauffement et de refroidissement sont choisis pour éviter d'avoir des gradient de température dans la pièce et des altération des caractéristiques mécaniques ; entre 55°c/H et 220°c/H

4.4 Moyens de production, gabarits et montage

4.5 Hygiène et sécurité

4.5.1 Chaleur

risques	cas	protections
brûlures	Contact Projections Flamme Rayonnement (UV)	EPI du soudeur Paravents Rideaux et peinture mate
Inflammations accidentelles	Sciures grasses Vêtements gras	
explosions	Mélange a partir d'air et hydrocarbure Vidange de réservoir	
déshydratation	Réflexe hypotension	

4.5.2 Electricité

- Eviter les contacts directs et indirect

- augmenter la résistance entre de l'interface entre le conducteur et le personnel (simple EPI)
- mettre un disjoncteur différentiel
- les masses métallique et conductrice doivent être mis a la terre
- vérifier l'isolation des conducteurs
- mettre le porte électrode dans une boîte isolante

4.5.3 Rayonnements

risques	cas	protections
Infra rouge	cataracte	EPI du soudeur
Ultra violets	Coup d'arc Coup de soleil conjonctivite	Paravents Rideaux et peinture mate
Lumiere visible	éblouissement	

4.5.4 Gaz et fumées

risques	cas	protections
acétylène	Explosif	Ventilation individuelle et collective
Vapeurs nitreuse	Oedème du poumon	Arrivée d'air frais
Oxyde de carbone (Co)	toxique	
Ozone (piqûre du nez et des yeux)	Irritation des muqueuses	
Argon et CO2	Asphyxie (manque d'oxygène)	

4.5.5 Le bruit

Nous possédons 40000 cellules auditives à la naissance a chaque fois que l'on l'une d'elles meurent et elle ne sera pas remplacée

Il agit en plus de la surdité sur notre organisme

- fatigue anormale
- irritabilité
- stress
- maux de tête

le droit européens oblige

- formation du personnel sur les risques encouru
- se conformer aux mesures de protections et préventions
- se soumettre à une surveillance auditives

4.5.6 La santé des soudeurs

4.6 Mesures, régularisation et enregistrement en soudage

4.7 END

4.8 Aspects économiques

4.9 Réparations par soudage

4.10 Aptitude à l'emploi

4.11 Etude de cas concrets

