

1-	RAPPEL.....	2
2-	LA RESISTANCE DES MATERIAUX.....	2
A.	TYPE DE SOLLICITATIONS.....	2
B.	CONDITIONS DE RESISTANCE	3
C.	RELATION CONTRAINTES – DEFORMATIONS.....	5
D.	MESURES DE CONTRAINTES.....	5
E.	CONCENTRATION DE CONTRAINTES	5
3-	TYPES DE SOLLICITATIONS	6
A.	STATIQUES.....	6
B.	DYNAMIQUES.....	6
4-	LA RDM DANS LES ASSEMBLAGES SOUDES.....	6
A.	CONTRAINTES MISES EN JEU.....	7
B.	COMBINAISON DE CONTRAINTES	7
C.	CALCUL EN FATIGUE DES ASSEMBLAGES SOUDES.....	8
5-	CONCEPTION ET COMPORTEMENT DES CHARPENTES METALLIQUES.....	8
A.	TYPE DE MATERIELS CONCERNES.....	8
B.	ACIERS DE CONSTRUCTION SELON EN 10025.....	9
C.	ACIERS UTILISABLES	9
D.	CARACTERISTIQUES MECANIQUES.....	9
E.	CONCEPTION : PRINCIPES GENERAUX.....	9
F.	CONSTITUTIONS DES SOUS ENSEMBLES ELEMENTAIRES.....	10
G.	POUTRES ET POUTRELLES.....	10
H.	RAIDISSAGE DES AMES.....	10
I.	RABOUTAGE SUR SITE DES POUTRES.....	10
J.	LES POUTRES CAISSONS	10
K.	STRUCTURE EN TREILLIS PLAN.....	11
6-	CONCEPTION ET COMPORTEMENTS DES STRUCTURES CHAUDRONNEES	12
A.	QU'EST CE QU'UNE STRUCTURES CHAUDRONNEES	12
B.	SOLLICITATIONS ET COMBINAISONS.....	13
C.	METHODOLOGIE DE CALCUL.....	13
D.	DETERMINATION DE LA CONTRAINTE NOMINALE DE SERVICE	13
E.	CATEGORIE DE CONSTRUCTION	14
F.	COEFFICIENT DE SOUDURE POUR APPAREIL DE PRESSION.....	14
G.	MODES DE CALCULS DES CONSTRUCTIONS CHAUDRONNEES	15
H.	DIMENSIONNEMENT DES ENVELOPPES SOUMISES A PRESSION INTERIEURE.....	15
I.	EPREUVE HYDRAULIQUE.....	15
J.	ASSEMBLAGE DES ENVELOPPES.....	15
K.	FORME DES ASSEMBLAGES.....	15
L.	CROISEMENT DE SOUDURE	15
M.	CALCUL ET CONCEPTION DES FONDS BOMBES.....	16
N.	OUVERTURES DANS LES ENVELOPPES	16
7-	CONCEPTION DE STRUCTURES EN ALUMINIUM.....	17
A.	DOMAINE D'APPLICATION.....	17
B.	SOUDAGE.....	17
8-	FATIGUE DES ASSEMBLAGES SOUDES.....	17
A.	DEFINITION, GENERALITES.....	17
B.	ESSAI DE FATIGUE	17
C.	CONTRAINTES RESIDUELLES.....	18
D.	REGLES DE CALCUL	18
E.	COURBE DE CALCUL.....	19
F.	CUMUL DE DOMMAGE (CAS DES VARIATIONS DE CONTRAINTES).....	19
G.	COEFFICIENT CORRECTEURS.....	20
H.	PARACHEVEMENTS	20
I.	EFFETS SECONDAIRES	20
J.	CONTRAINTES UTILISABLES	20
9-	MECANIQUE DE LA RUPTURE	20
A.	DEFINITIONS.....	21
B.	MODES DE RUPTURE.....	21
10-	CONTRAINTES RESIDUELLES - EXTENSOMETRIE.....	23
A.	CHAUFFAGE PONCTUEL D'UNE PLAQUE :	23
B.	CHAUFFAGE PONCTUEL D'UN BARREAU.....	24
C.	CONCEPTION POUR DIMINUER LES CONTRAINTES RESIDUELLES (OU MODIFIER LEUR REPARTITION).....	24
D.	MESURES DE CONTRAINTES.....	24

1- Rappel

La force s'exprime en Newton (N)

La surface en mm²

La contrainte (ou pression) correspond au rapport d'un effort sur une surface.

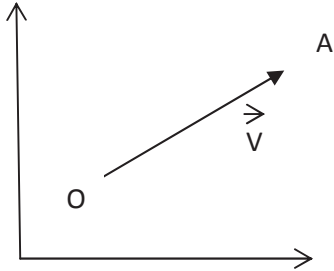
Unités :

- 1 N/mm² = 1 MPa et 1 bar = 0,1 MPa

Une force est désignée par son vecteur, il est désigné par :

- Sa norme
- Sa direction
- Son sens
- Son origine

Les coordonnées du vecteur sont : $\sqrt{(x_A - x_0)^2 + (y_A - y_0)^2}$



Pour 1 système soumis à plusieurs forces, on peut faire l'addition (soustraction) vectorielle des Forces :

$$F = F_1 + F_2 + F_3$$

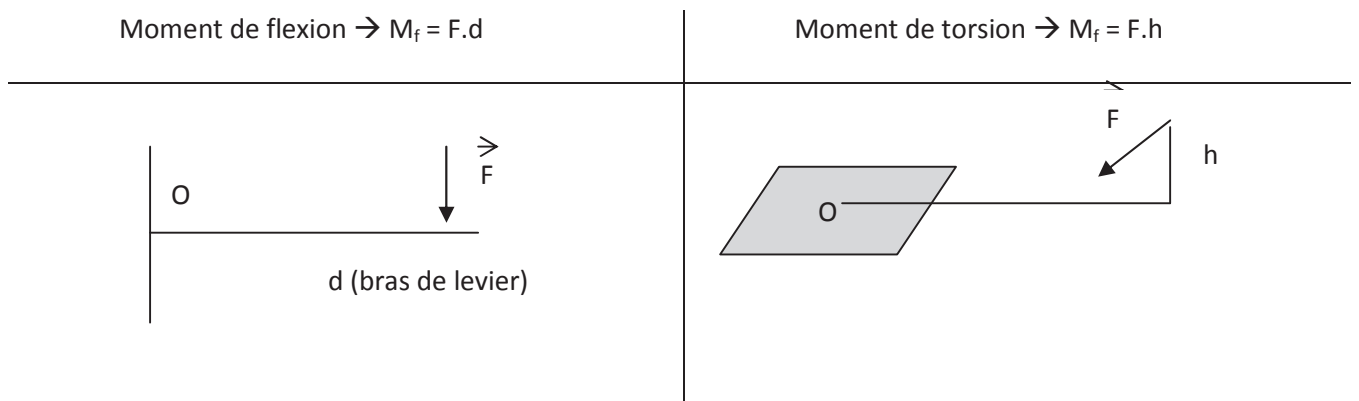
Une contrainte en traction est positive, a contrario une contrainte en compression est négative.

Le moment d'une force :

Il correspond à une force par rapport à un axe

Il est exprimé en N.mm (produit d'une force par 1 bras de levier)

2 catégories :



2- La Résistance Des Matériaux

Elle permet de déterminer les contraintes présentes dans des éléments

En 3D. (Avec une dimension plus grande que les autres)

On l'appelle également la « théorie des poutres »

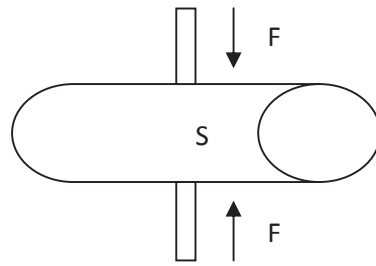
a. Type de sollicitations

i. Traction – compression

1 poutre soumise à 1 effort F de traction ou compression par rapport à sa fibre neutre

La contrainte a pour expression : $\sigma = F / \text{surface} = F/a.b$

ii. Cisaillement



Au droit de la section S, les efforts F induisent une contrainte de cisaillement
 En RDM, on adopte : $\tau = F/S = F/(\pi \cdot r^2)$

b. Conditions de résistance

1. En traction
 $\sigma \leq \sigma_e/s$ avec s coeff. de sécurité
2. En compression
 $|\sigma| \leq \sigma_e/s$

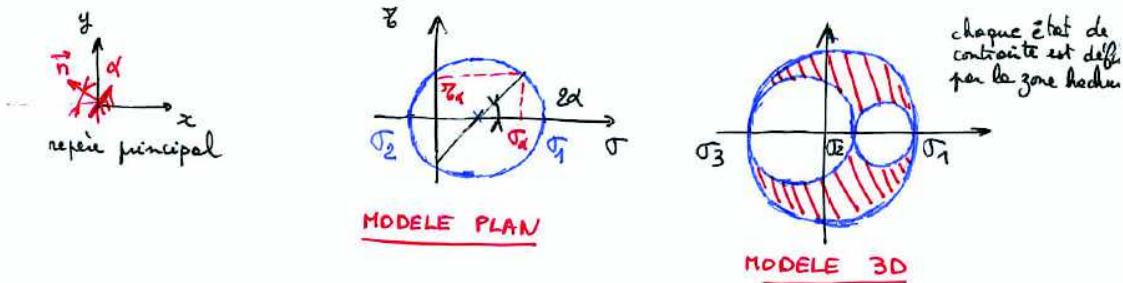
Il faut, en outre, vérifier que l'ensemble ne flambe pas, pour cela on vérifie avec la contrainte critique d'Euler : $\sigma_c = (\pi^2 \cdot E/I^2) \cdot (I/S)$
 avec E : mod. young, l : longueur flambage, I : Inertie de l'élément et S : Section

Le coefficient d'élanement $\gamma = l/r$ (rayon de giration) et $r = (I/S)^{1/2}$ permet de juger des risque de flambage d'une pièce

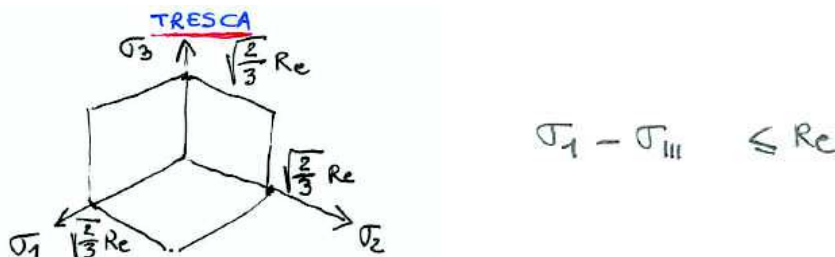
ii. Cercle de Mohr, Tresca et Von Mises

- Le cercle de Mohr

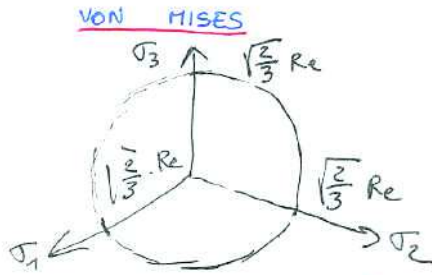
• cercle de Mohr : donne suivant l'orientation de la facette, la contrainte normale et la contrainte de cisaillement.



- Tresca



- Von Mises



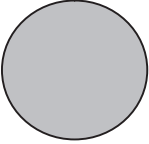
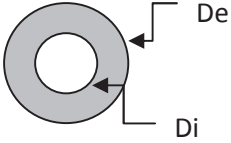
$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 \leq 2 R_e^2$$

$$\frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2]^{1/2} \leq R_e$$

iii. Torsion

La torsion concerne les sections circulaires

$\tau_{max} = M_t / (I_o / v)$ avec I_o : Moment d'inertie polaire et v : distance maxi à la fibre neutre (soit diamètre / 2)

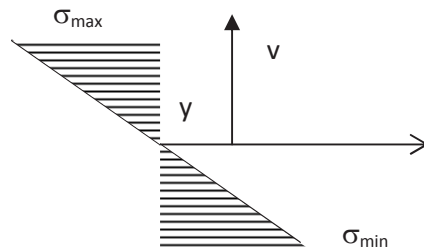
Section pleine	Section creuse
$I_o = \pi \cdot D \cdot e^4 / 32$ 	$I_o = \pi \cdot (D_e^4 - D_i^4) / 32$ 

iv. Flexion

Sur une barre en flexion, une partie est en traction et l'autre en compression

$$\sigma_{max} = M_f / (I_{oz} / v)$$

$$\sigma v = M_f / (I_{oz} / y)$$



Le moment d'inertie :

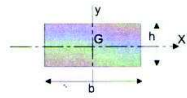
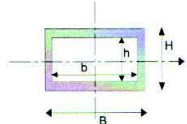
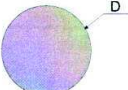
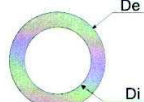
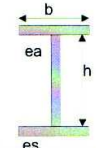
Il se calcule toujours au centre de gravité de l'assemblage.

Théorème de Huygens : le moment d'inertie est égal à la somme des inerties :

$$I_\Delta = I_\Delta G + S \cdot d^2$$

Moment d'inertie par forme :

Remarque :

	$I_x = \frac{bh^3}{12} \quad I_y = \frac{hb^3}{12}$
	$I_x = \frac{BH^3}{12} - \frac{bh^3}{12}$ $I_y = \frac{HB^3}{12} - \frac{hb^3}{12}$
	$I_x = I_y = \frac{\pi d^4}{64}$
	$I_x = I_y = \pi \left(\frac{d_e^4 - d_i^4}{64} \right)$
	$I_x = \frac{e \cdot h^3}{12} + 2 \left[\frac{bes^3}{12} + besx \cdot \left(\frac{h+es}{2} \right)^2 \right]$ $I_y = \frac{h \cdot e_a^3}{12} + 2 \times \frac{es \cdot b^3}{12}$

c. Relation contraintes – déformations

i. Courbe de traction

1 partie élastique jusqu'à R_e , puis 1 partie plastique jusqu'à rupture.

Graphes de contrainte = $f(A\%)$

En partie élastique, loi de Hooke : $\sigma = E \cdot \varepsilon$ coeff. directeur de la droite en élastique

d. Mesures de contraintes

Diverses méthodes :

- Quadrillage, dessin de quadrillage sur l'éprouvette
- Extensométrie
- Vernis craquelant
- Photoélastiximétrie

e. Concentration de contraintes

Quand une pièce subit des variations brutales d'inertie, elle est le siège de concentrations de contraintes. Le cas le plus flagrant est l'entaille. Il en existe 3 sortes :

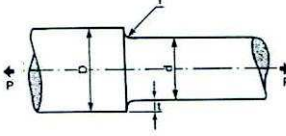
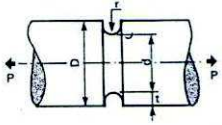
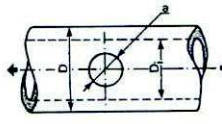
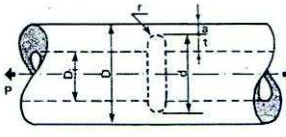
- Métallurgique
- Mécanique
- De service (fatigue)

Facteur théorique de concentration de contrainte :

$$K_t = \sigma_{\max} / \sigma_{\text{nom}}$$

K_t est dépendant de la forme de la pièce, σ_{\max} est mesurable et σ_{nom} se calcule par les formules de RDM.

Ce coeff. n'est valable qu'en considérant le domaine élastique ($\sigma < \sigma_e$), alors que le matériau se plastifie, ce qui conduira à une amorce de rupture.

	$\sigma_{nom} = \frac{4P}{\pi d^2}$
	$\sigma_{nom} = \frac{4P}{\pi d^2}$
	$\sigma_{nom}^{(b)} = \frac{4P}{\pi(D^2 - d_1^2)}$ - - 2 (D - D ₁). a
	$\sigma_{nom} = \frac{4P}{\pi(D^2 - d^2)}$

En présence de trous dans la pièce, on tient compte de la surface résiduelle.

3- Types de sollicitations

a. Statiques

Comme le nom l'indique, elles ne varient pas avec le temps. On classe le changement de gravité dans cette catégorie.

Les joints soudés sont l'objet de concentrations de contraintes importantes, forme du joint, surépaisseur,...

b. Dynamiques

De forme plutôt cyclique, sinusoïde

Quand une pièce est soumise à ces sollicitations, on dit qu'elle travaille en fatigue.

« Très résistant à la fatigue » → pas fissurations pour cycle élevé ou contrainte élevées

i. Moyens d'amélioration

En général, ce sont les pied et racine de cordon qui doivent être améliorés.

- Modification de la forme du cordon
 - o Meulage
 - o Refusion TIG
- Modification du champ de contraintes résiduelles
 - o TTh relaxation
 - o Grenailage de précontrainte (mettre la peau en contrainte de compression)
 - o Martelage (comme pour grenailage)
 - o Mélange des procédés ci-dessus

c. Thermiques

En chauffant, une barre se dilate (ou contracte)

$$\Delta l = \alpha \cdot \Delta \theta \cdot L$$

α = Coefficient de dilatation ($12 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ pour les aciers)

En cas de bridage, il y a création de contraintes, que l'on peut calculer comme suit :

$$\sigma = E \cdot \Delta l / L = \alpha \cdot \Delta \theta \cdot E$$

Pour exemple, une barre d'1 m chauffée de 100°C , conduit à une contrainte de 240 MPa

4- La RDM dans les assemblages soudés

Il existe 2 types d'assemblages : en bout à bout (alignés) ou en angle (non alignés)
 En général, on effectuera plus d'1 cordon pour améliorer la tenue de l'assemblage.

La **section efficace** d'une soudure correspond :

- A la longueur du cordon
- A la gorge « a », obtenue soit par macrographie (gorge réelle), soit par mesure simple (avec le chanfrein)

Il faut regarder au niveau du cordon (ou des cordons) les sollicitations faites.

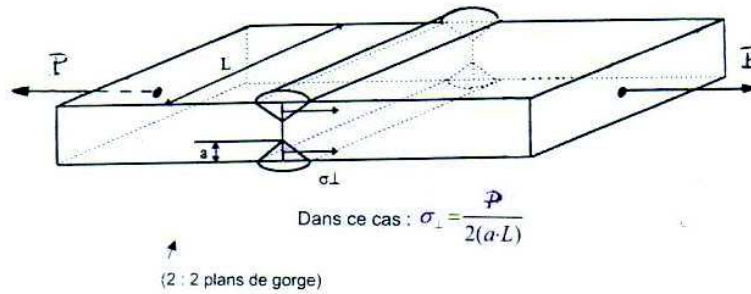
a. Contraintes mises en jeu

i. $\sigma_{//}$

Cas du bout à bout, elle n'est pas prise en compte

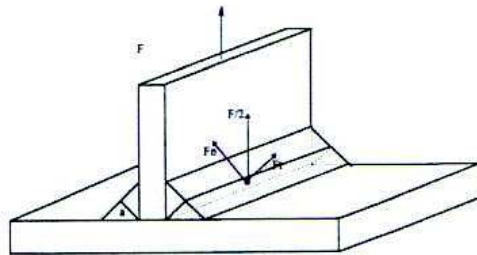
ii. σ_{\perp}

Cas du bout à bout $\sigma_{\perp} = P/2(a.L)$



iii. Cisaillement transversale : τ_{\perp}

$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = (F/2) / (\sqrt{2}.a.L)$

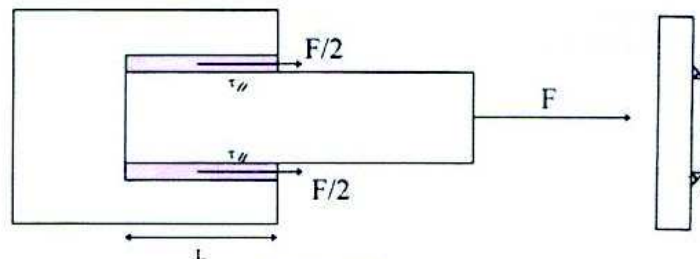


F_t introduit une contrainte de cisaillement τ_{\perp} .
 F_n introduit une contrainte normale σ_{\perp} .

iv. Cisaillement parallèle $\tau_{//}$

C'est une contrainte de cisaillement situé dans le plan de gorge du cordon

$\tau_{//} = F/(2.a.L)$



La contrainte $\tau_{//}$ est égale à :

$\tau_{//} = \frac{F}{2a.L}$

b. Combinaison de contraintes

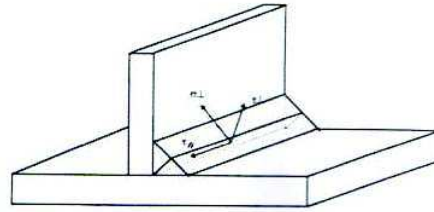
En réalité, les cordons sont soumis à l'ensemble des contraintes, et selon NFP22470, on peut écrire :

$k.\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{//}^2)} \leq \sigma_e$ et $\sigma_{\perp} \leq \sigma_e$

où k est donné dans la norme (0,7 pour S235,...)

$$k \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{//}^2)} \leq \sigma_e \quad \text{et} \quad \sigma_{\perp} \leq \sigma_e$$

avec : σ_e = limite d'élasticité du matériau constituant les tôles à assembler
 k = 0,7 si acier S235
 k = 0,85 si acier S275
 k = 1,0 si acier S355



Ce type de formule permet, en l'utilisant à l'inverse, de déterminer la gorge nécessaire à effectuer pour sécuriser l'assemblage.

On obtient alors pour le cas a_{ii} : $a \geq k.F / (\sqrt{2}..l.\sigma_e)$

Remarque : Il faut toujours s'arranger pour aligner les fibres neutres d'un assemblage ou d'améliorer son écoulement.

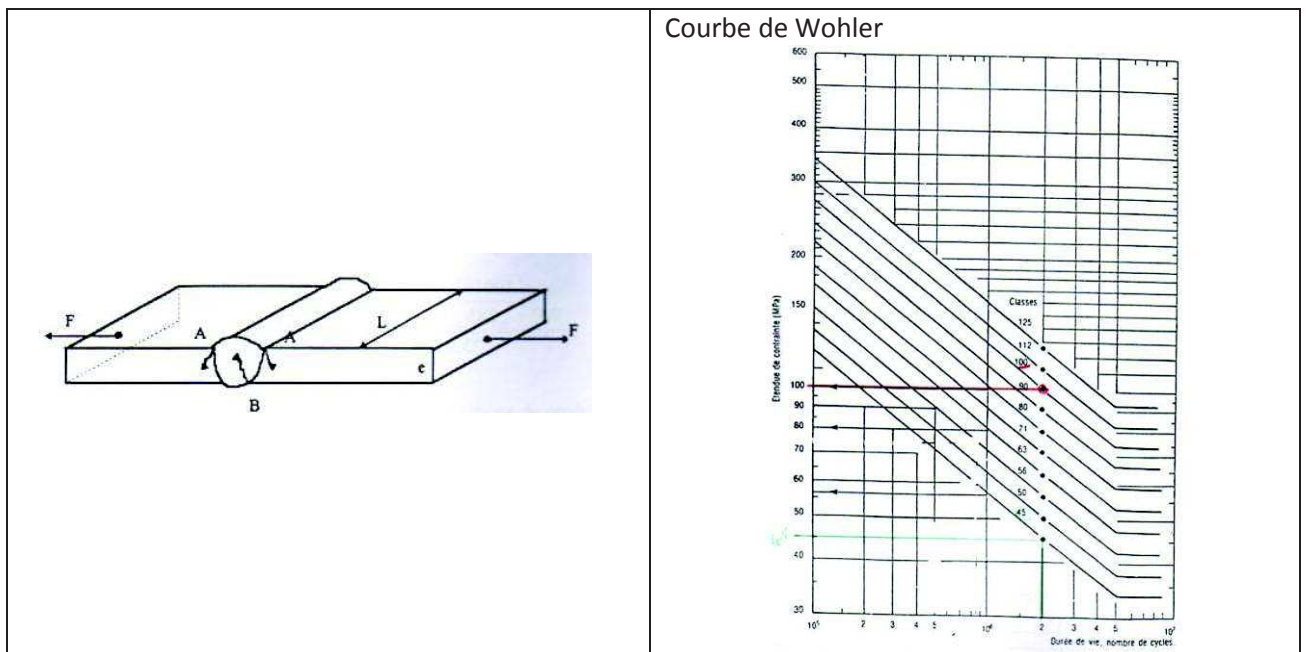
La CM 66 (normalement plus utilisée) donne une formule un peu différente :

$$\sqrt{[\sigma^2 + 1,8(\tau_{\perp}^2 + \tau_{//}^2)]} \leq \alpha \sigma_e \text{ où } \sigma_{\perp} \text{ est notée } \sigma \text{ et } \alpha = 1 \text{ si } a \leq 4 \text{ et } 0,8(1+1/a) \text{ si } a > 4$$

Voir exemple de calculs fascicule pages 73 à 79

Dans le cas de calculs sur poutre en I, on regarde d'abord la contrainte de la l'âme puis des semelles.

c. Calcul en fatigue des assemblages soudés



Il faut calculer la contrainte $\sigma = F/e.L$

Utiliser la courbe de Wohler , la classe correspond à la contrainte en MPa pour 2.10^6 cycles

5- Conception et comportement des charpentes métalliques

Pour les constructions métalliques, 2 dimensions sont faibles (voire négligeable) par rapport à la troisième.

a. Type de matériels concernés

- Ponts et ouvrages d'art soumis en sollicitations statique (poids) et dynamique (passage véhicule)
- Batiments et édifices soumis en statique
- Engins de levage et manutention soumis à la fatigue

Ces éléments sont construits avec des poutres d'où l'utilisation de la RDM connaissant en tout point M, le torseur des sollicitations.

b. Aciers de construction selon EN 10025

- Nécessaire : C et Mn pour \nearrow R, aide à la trempe et Si, Al comme desoxydants
- Impuretés :
 - S eutectique FeS fragiles, fissuration à chaud, MnS diminution R \rightarrow arrachement lamellaire
 - P : eutectique fragilité et fissuration à chaud
 - O₂ : oxyde de fer \rightarrow décroissance R et K
 - H₂ : diffusive dans γ , peu soluble dans α \rightarrow fissures, floconage, baisse K
 - N₂ : vieillissement, fragilité
- Recommandations

Indice de qualité	Applications	Impuretés (à la couée)	
		S %	P %
A	Sollicitations modérées Effervescence possible	0,050	0,080
B	Sollicitations moyennes Épaisseurs modérées Risque rupture fragile exclu	0,050	0,060
C	Constructions pour lesquelles le risque de rupture fragile est à considérer	0,050	0,060
D	Sollicitations élevées } Fortes épaisseurs } Basses températures } risque de rupture fragile à craindre	0,050	0,060

c. Aciers utilisables

Selon EN 10025, 7 nuances :

- Base Steels : S185, S295, S335, S360

Teneurs en C et N non garanties, KV non garantie \rightarrow soudabilité incertaine

- S235, S275 et S355

Qualité : BS-FN (base Steel non effervescent) ; QS-FN (Quality Steel non effervescent) ; QS-FF (Quality Steel calmar spécial)

Teneur en C garantie

Teneur en Si et Mn garantie pour S355

d. Caractéristiques mécaniques

La valeur de la limite d'élasticité est donnée pour les faibles épaisseurs. Celle-ci diminue avec l'épaisseur croissante.

Les aciers HE sont obtenus par TTh (trempe + revenu, précipitation) – 6 nuances E420T, E460T, E500T, E550T, E620T, E690T.

Certains aciers sont garantis avec propriétés dans le **sens travers court (épaisseur)**, donnée par leur striction : $Z \geq 15\%$ (insuffisant en soudage) et $Z \geq 25\% \geq 35\%$

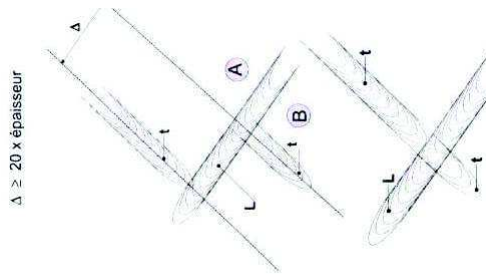
e. Conception : principes généraux

Il ne faut pas créer de concentration de contraintes élevée pour cela :

- Transmission d'effort uniforme
- Assurer la continuité de l'effort

Solutions :

- Bombé concave des cordons, mise de renfort (goussets sur semelle), gousset en raccords de tube
- Ne pas aligner des soudures en croisement, décalage des joints transversaux



- Créations de dégagement pour les ferrures (non accumulations d'humidité)

f. Constitutions des sous ensembles élémentaires

i. Plats, ronds et carrés pleins

- Pour les plats, dans la mesure du possible, usinage en X, V des bords
- Pour les ronds et carrés, chanfreinage non circulaire mais rectiligne

ii. Profils creux

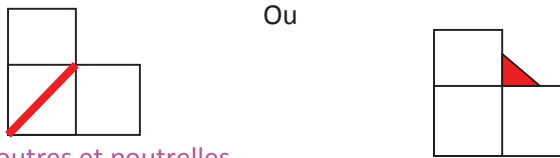
La mise en place de support en intérieur facilite le soudage en bout à bout

iii. Profilés I, H et T

Réalisation d'un gougeage spécial par oxycoupage, meule... pour faciliter le soudage

iv. Liaisons angulaires de profils creux, ailes

On placera un diaphragme bissecteur ou gousset triangulaire



g. Poutres et poutrelles

Les profilés sont donnés par catalogues dans tailles « standards » mais on peut les fabriquer par soudage aux dimensions voulues appelées « **poutres reconstituées soudées** »

Pour augmenter l'inertie d'une poutre, on fait un empilement de semelles (**mais mauvais en fatigue**)

On peut remédier à la déformation d'une poutre après soudage par chaude de retrait (chauffage précis en 1 endroit de la poutre)

h. Raidissage des âmes

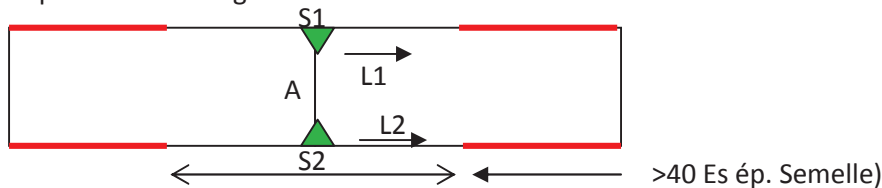
Il peut y avoir des fléchissements de l'âme d'une poutre, pour cela on peut poser des raidisseurs d'âme, soient :

- Transversaux → soudage sur toute la hauteur (- 20 à 30 mm par rapport à la semelle), et de plusieurs formes
- Soit longitudinaux (profilés plat, en T ou L) mais nécessité d'une découpe locale car ∇ rigidité locale

i. Raboutage sur site des poutres

- chanfreins en X pour les âmes
- Chanfreins pour soudage à plat pour les semelles car – de passes au plafond (en position)

Séquence de soudage :



Effectuer S1 et S2 (si possible simultanément)

Effectuer A

Effectuer L1 et L2

j. Les poutres caissons

Les poutres en I, H et U sont utilisées souvent car les structures sont fléchies mais leur comportement est mauvais en torsion, on leur préfère alors les profils tubulaires ou caissons

- Les différents types :

Poutrelles associés	Poutrelles composées

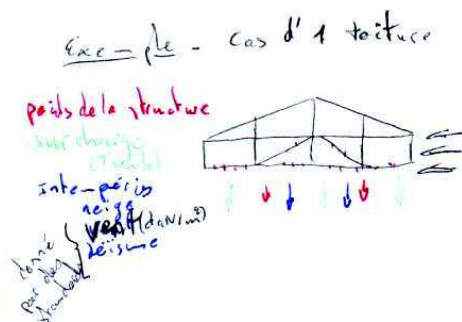
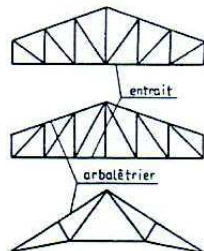
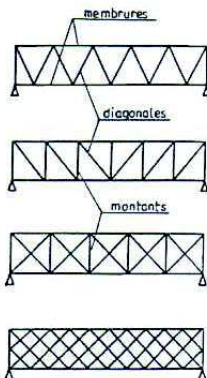
- Raidissage

En fonction de l'utilisation un raidissage peut s'avérer nécessaire :

- o En chargement symétrique, pas de raidissage
- o En chargement dissymétrique, par pose d'un diaphragme percé

k. Structure en treillis plan

Les treillis sont des barres qui convergent en des points appelés **nœuds**, points d'assemblage des poutres.



calcul des forces en 3 axes à chaque poutre
idem à chaque nœuds.

On étudie alors le calcul des forces qui s'appliquent sur chaque barre et sur chaque nœud.

Dans le calcul, interviennent des paramètres de poids de structure (propre et de ce qui y est posé), d'intempéries (neige, vent selon des critères fixés),...

Voir fascicule pour schéma des assemblages possibles pages 116 à 124

i. Treillis non tubulaires

Par recouvrement et soudure en clin	Par enfourchement et cordons latéraux
Si le profilé en L constitue une diagonale, il faut mettre l'aile du côté le plus long	Bon pour profil L et profil plat
Soudure bout à bout	Membrures type I
Profils bas ou profils T et I	Ne pas utiliser de barre de largeur peu différente de celle de la membrure
Membrures type V	

Assurer une bonne transmission de la composante verticale

ii. Treillis tubulaires

Membrane et barres de section circulaire	
Zones plus sollicitées sont A, B et D Ecartement g environ 3 mm Et $d_1 > 0,25 d \rightarrow d < 200$ mm	
Membrures de section carré ou rectangulaire	
Membrures et barres coplanaires	
Membrures et barres non coplanaire	

6- Conception et comportements des structures chaudronnées

a. Qu'est ce qu'une structures chaudronnées

Plus couramment appelés « appareils à Pression », de très grande étendue puisque cela couvre de la bombe aérosol au réacteur nucléaire. Tous ce qui est sous pression.

Le CODAP 2005 : **C**ode d'**A**ppareils sous **P**ression

Il définit 2 divisions :

- Division 1 : appareils courant avec matériaux courant
- Division 2 : appareils plus complexes

Contrairement aux charpentes métalliques, 1 dimension est négligeable par rapport aux 2 autres. Les lois de la RDM ne s'appliquent pas mais les équations de la théorie de l'élasticité.

Suivant annexe G du CODAP 2005 :

- Appareils spécifiques, de conception fonctionnelle fournit par le client (le donneur d'ordre)
- Appareils de catalogue, de conception et responsabilités fournit par le constructeurs.

i. Définition des composants

Par définition, tous corps de Diamètre Nominal (DN) >100mm sera appelé Partie Principale sous pression (PPSP), dans le cas contraire partie sous pression ou non soumise à la pression.

L'appareil est composé :

- D'une virole sous pression PPSP
- De fonds PPSP
- De tubulures (DN > ou < 100)
- Brides, renforcement, raidisseurs, support et boulonnerie

ii. Matériaux

Les matériaux sont choisis en fonction de certains critères, comme la résistance à la corrosion, fragilisation, érosion, soudabilité,...

- **2 caractéristiques fondamentales :**
 - o La ténacité (résistance à la propagation de fissures)
 - o La capacité à la déformation plastique
- **2 catégories d'acier**
 - o Aciers non ou faiblement alliés
 - o Aciers inoxydables ou base nickel

Les aciers non ou faiblement alliés seront utilisés si pas d'exigences particulières (prix moins élevé), par contre on utilisera les autres si utilisation à T°, basse T°, résistance H₂.

Le CODAP 2005 donne des tableaux de classifications des métaux.

Si on doit utiliser plusieurs gaz faire la somme des pressions partielles : $P_{tot} = P_{gaz1} + P_{gaz2} + P_{gaz3} + \dots$

iii. Réglementations

Directives des Equipement Sous Pression DESP 97/23/CE de mai 1997

Mais chaque pays dispose encore de son propre code et doivent le rapprocher de la DESP

En France, Décret 99-1046 de déc 1999 et Décret 21 décembre sur les habilitations

Les codes :

- CODAP 2005 : France
- ASME : Sections I, III, IV, VIII aux USA
- BS 5500 : GB
- AD Merkblatt : Allemagne

2002 → Code européen des AP → EN 13445

iv. Natures des défaillances

- Défaillances à court terme
 - Rupture fragile (indiquer caractéristiques minimales de ténacité)
 - Instabilité plastiques (éclatement) → de $R_e + R_m$
 - Rupture ductile → $A\%$
 - Fuite aux joints → pas couverte par le code
 - Instabilité élastique et élasto-plastique (flambage) → sollicitations < coeff. Sécurité
- Défaillances à long terme (non cyclique)
 - Rupture par fluage → T° élevée et déformation du matériau sous charge constante
 - Erosion, corrosion
 - Fissuration favorisée par l'environnement → corrosion ss contrainte, H_2
- Défaillances à long terme (cyclique)
 - Plastique progressive
 - Fissuration par fatigue

v. Choix des matériaux

La DESP précise :

- $A > 14\%$ - $KV = 27J$ à $t^\circ 20^\circ C$
- Résistance chimique au fluide
- Non sensible au vieillissement
- Convenir aux méthodes de transformation
- Certificat matière approprié
- Respect des dispositions européennes

b. sollicitations et combinaisons

i. Sollicitations

Mécaniques → pression intérieure ou extérieure, poids, climat, sismique, mvt fluide, vibration,...

Thermiques (pb de dilatation) → bidage, positionnement de l'appareil

ii. combinaisons

L'appareil peut subir plusieurs combinaisons de sollicitations pendant 1 certain laps de temps.

1. Situation normale de service

Régime établi, régime transitoire (dilatation thermique), actions climatiques, pesanteur

2. Situation exceptionnelle de service

Mise en route soupape sécurité, séisme, climat extrême, explosions,...

3. Essais de résistance

Vérification de l'appareil avant service dans des conditions données

c. Méthodologie de calcul

Calcul en prenant en compte toutes les situations pré citées.

d. Détermination de la contrainte nominale de service

Contrainte nominale de service f est la valeur admissible de la contrainte primaire générale de membrane.

Elle est calculée avec R_e et R_m .

$F \approx 0,95 R_e$ pour acier au carbone et $R_m/2$ pour inox

f varie selon les situations étudiées (en service avec et sans fluage, extrême, essai de résistance)

$$f = \text{MIN}[(\sigma_R/1,6) ; \sigma_{1\%}]$$

où σ_R est la contrainte de rupture après 100000 h à température de calcul

et $\sigma_{1\%}$ est la contrainte qui produit 1 allongement de 1% après 100000 h à température de calcul

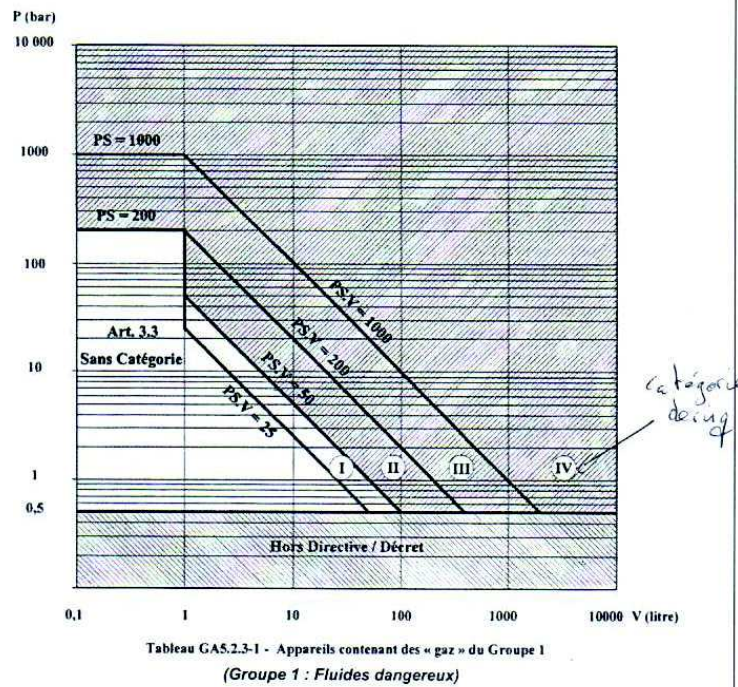
Pour A.C $f = \text{MIN}[Re/1,5 ; Rm/2,4]$ et inox $f = \text{MIN}[R_{1\%}/1,2 ; R_m/3]$

On a fluage pour les aciers courants à partir de 370°C et 425°C en inox austénitique

e. Catégorie de construction

L'enveloppe constitue la surface de séparation de 2 milieux.

En fonction du gaz (ou fluide) il existe des abaques (cf figure ci-dessous) pour déterminer la catégorie en fonction de la pression et du volume.



Des tableaux donnent des évaluations des risques, notés de faible à très élevée (à transposer par numérique) pour obtenir une note.

f. Coefficient de soudure pour appareil de pression

Le calcul de la l'épaisseur de la paroi sollicitée en traction est effectué en minorant le coeff. F par un coefficient z au plus égal à l'unité.

On choisit le coefficient en fonction :

- La nuance du matériau de base
- L'étendue des contrôle CND et destructifs
- La sévérité d'acceptation des défauts.

La valeur de z est :

	Catégorie de construction			
	A	B1	B2	C
Contrainte nominale de calcul : f	f_1	f_1	f_1	f_2
Coefficient de soudure : z	$z = 1$	$z = 0,85$	$z = 0,85$	$z = 0,7$

A : si CND et destructifs → 1

B1/B2 : si CND → 0,85

C : si CND autres que visuels → 0,7

Le coeff. z n'est pas applicable si :

- Aux assemblages transversaux d'appareils cylindriques ou coniques
- Exclusivement sollicités en compression
- Exécution de tubulures ou piquâges

g. Modes de calculs constructions chaudronnées

i. Calcul de l'épaisseur

Pour l'épaisseur de commande, il faut prendre en compte :

- Epaisseur de corrosion / érosion
- Amincissement par la mise en forme
- La tolérance négative de l'épaisseur

ii. Analyse des contraintes

- En statique :

Flambement local, support, effets thermiques, assemblage de brides boulonnées

Sollicitations extérieures des tubulures

- En fatigue :

Au-delà d'un certain nombre de cycles, il faut vérifier la pression, la t° et les sollicitations extérieures

h. Dimensionnement des enveloppes soumises à pression intérieure

- Pour les enveloppes cylindriques, il faut $D_m \geq 5e$

$$e = P \cdot D_{ext} / 2f \cdot z + P$$

- Enveloppes sphériques :

$$e = P \cdot D_e / 4f \cdot z + P$$

- Enveloppes coniques

$$e = (1/\cos\alpha) \cdot [P \cdot D_e / 2f \cdot z + P]$$

i. Epreuve hydraulique

La pression lors de l'épreuve hydraulique doit être au moins égale :

$$\text{Max} [1,25 \cdot P_s \cdot f_{\text{ambiante}} / f_{\text{service}} ; P_m \cdot 1,43]$$

j. Assemblage des enveloppes

La mise en forme est réalisée soit sur cintreuse à rouleaux, soit sur presse à cintrer.

L'environnement peut être effectué à $T^\circ < 150^\circ\text{C}$ sans TTh ultérieur si allongement est inférieur à une certaine valeur de $d\%$:

$d\% = 50 \cdot e / R_m \cdot [1 - R_m / R_o]$ avec R_m : plus petit rayon moyen de la section et R_o : plus petit rayon avant formage.

k. Forme des assemblages

On appelle soudure longitudinale la soudure faite le long de la virole et transversale la soudure du fond.

Les soudures longitudinales sont 2 fois plus chargées que les transversales : $\sigma = P \cdot R / e$

- Les joints longitudinaux :

Pas de recouvrement

Préparation en V ou U, mais avec pénétration totale

Débardage de l'épaisseur plus élevée ($\text{pente} \leq 0,25$)

Le raccordement peut être réalisé par le cordon si différence de CM

- Joints circulaires

Fibre neutre par obligatoirement alignée

Pente de débardage $< 0,33$

l. Croisement de soudure

Le croisement des joints longitudinaux :

- $\Delta \geq 20.e$ pour $e \leq 5$ mm
- $\Delta \geq 10.e$ pour $5 < e \leq 40$ mm
- $\Delta \geq 5.e$ pour $e > 40$ mm

m. Calcul et conception des fonds bombés

<ul style="list-style-type: none"> - Fonds hémisphériques $H/De = 0,5$ - Fonds elliptiques $Di/2H = 1,9$ - Fonds en anse de panier $2,58 \leq Di/2H \leq 2,60$ 	
--	--

Il existe aussi des fonds plats

- Calcul de l'épaisseur du fond
 - 1^{er} calcul : σ de membrane de pôle \rightarrow épaisseur 1
 - 2nd calcul : flexion meridienne de la carre \rightarrow épaisseur 2
 - 3^{ème} calcul : flambage circonférentiel de la carre \rightarrow épaisseur 3

Fonds elliptiques et fond torisphériques : Prendre Max des 3 épaisseurs

Fonds Hémisphériques : $e = P.Ri/(2.f.z - 0,5P)$

Fonds plats : nécessite une épaisseur plus élevée, car sollicitations en flexion plus importantes, Inconvénient, plus lourds et avantages facilité à l'obtenir à partir de tôle

n. Ouvertures dans les enveloppes

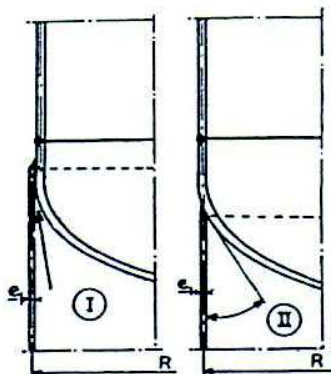
L'enlèvement de matière crée des contraintes. L'ouverture doit être au maxi : $d \leq 16\sqrt{D_m.e}$

Prévoir une distance de $\sqrt{D_m.e}$ entre 2 tubulures ou par rapport à un angle.

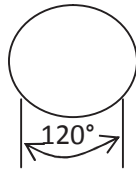
- Dispositions constructives :

Elles sont liées :

- o Au fonctionnement de l'appareil
- o A la géométrie de l'orifice
- o Aux conditions de fabrication et de contrôle
- o Supportage
- Jupe – support : Il faut veiller à aligner les charges en vérifiant les risques de flambement et/ou compression



- Berceaux support, ils servent à maintenir l'appareil à l'horizontal :



7- Conception de structures en Aluminium

On utilise l'aluminium pour :

- Sa faible densité
- Conductibilité thermique et électrique élevées
- Bonne résistance à la corrosion atmosphérique
- Bonne aptitude au formage
- Non toxique
- Bonne ductilité et malléabilité à basse température
- Qualité esthétique

a. Domaine d'application

- Aéronautique et aérospacial
- Construction navale
- Transport
- Armement terrestre
- Conducteur électrique
- Emballage
- Bâtiment

b. Soudage

Les mêmes attentions doivent être portées que pour l'acier

8- Fatigue des assemblages soudés

a. Définition, généralités

Une structure est soumise à la fatigue s'il y a changement au cours du temps.

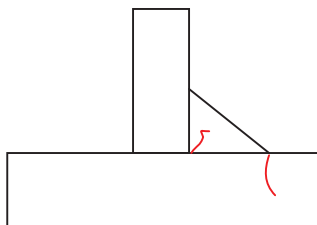
La fatigue se cumule avec le fluage (haute température)

En assemblage soudé, **le temps d'amorçage est court** et le temps de propagation représente la plus grande partie de la durée de vie, **à l'inverse des pièces mécaniques**.

La tenue à la fatigue est indépendante du type de matériau, alors que pour les pièces mécaniques, la tenue dépend des propriétés mécaniques (R_m).

L'effet d'entaille est présent dans les assemblages soudés (forme du cordon, pénétrations,...)

- Privilégier les cordons concaves aux cordons convexes ou bombés.
- C'est en racine ou en pieds que peuvent apparaître les fissures



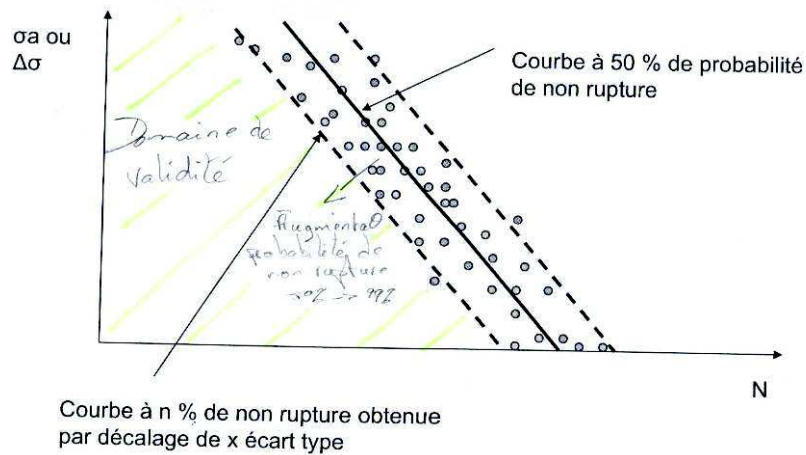
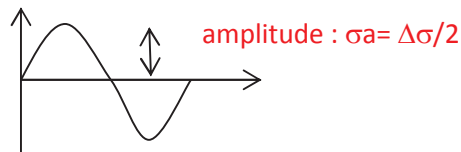
b. Essai de fatigue

- Il est réalisé sur assemblage bout à bout.
- L'éprouvette est soumise à une déformation cyclique.
- Après 1 certain nombre de cycle, une fissure apparaît
 - o Amorçage dans la zone la plus défavorable (pénétration, morsure, caniveau, bombé,...)
- La propagation se poursuit dans l'épaisseur jusqu'à rupture

Présentation des résultats :

Ils sont représentés dans un graphe log/log de $\Delta\sigma = f(N)$, où N = nombre de cycle.

$\Delta\sigma$: Variation de contrainte, parfois remplacé par $\sigma_a = \Delta\sigma/2$

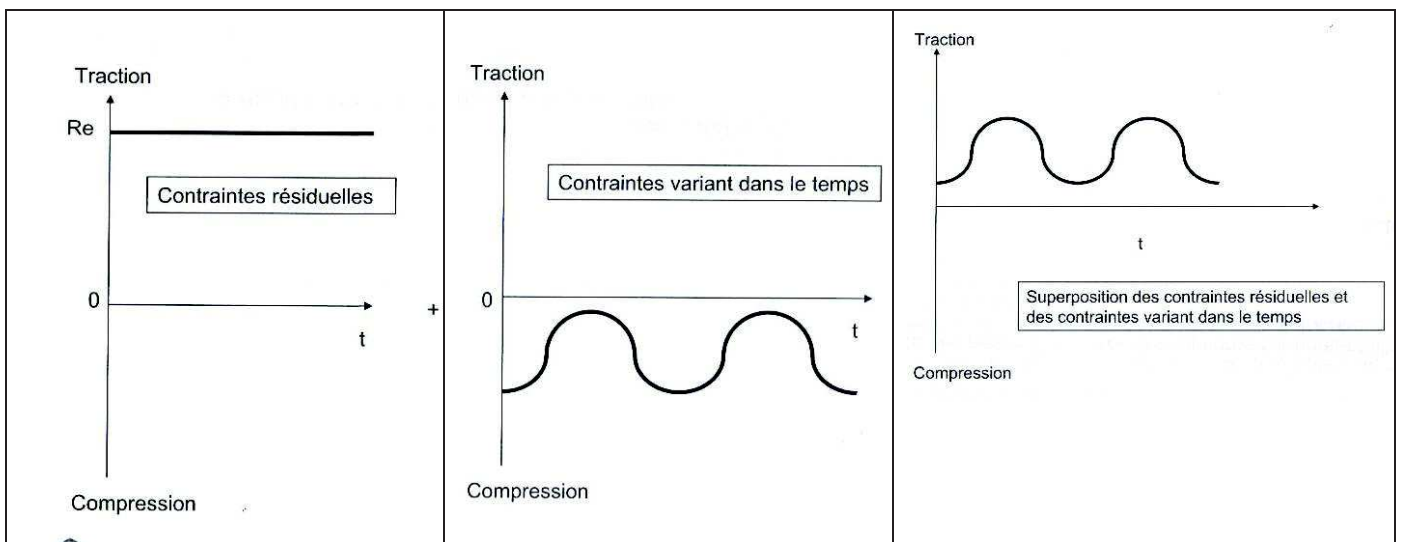


La frontière donne l'espérance de vie à 50%, mais en calculant les écart type on décale la courbe vers la gauche, suivant les valeurs :

- 1 écart type → 84,13%
- 1,28 écart type → 90%
- 2 écart type → 97,72%
- 3 écart type → 98,87%

c. Contraintes résiduelles

L'opération de soudage engendre des contraintes, dites résiduelles, lors du refroidissement. Celles-ci atteignent la limite élastique.



d. Règles de calcul

Il y a 2 approches possibles :

- Par dimensionnement :

On prend en données, les efforts, conditions de service et nombre de cycles pour connaître l'étendue de contrainte et l'épaisseur des tôles à assembler.

- Par vérification

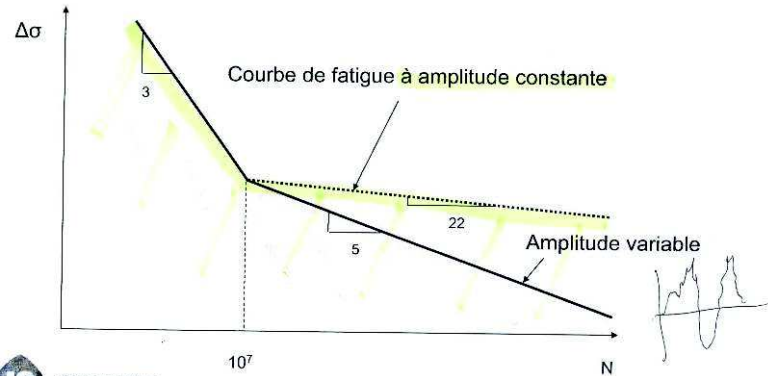
On prend les efforts à transmettre, les conditions de service et les dimensions de l'assemblage pour connaître l'étendue de contrainte et le nombre de cycles.

e. Courbe de calcul

Les courbes sont données pour une valeur d'espérance de vie de 97,7% (le CODAP 99%)

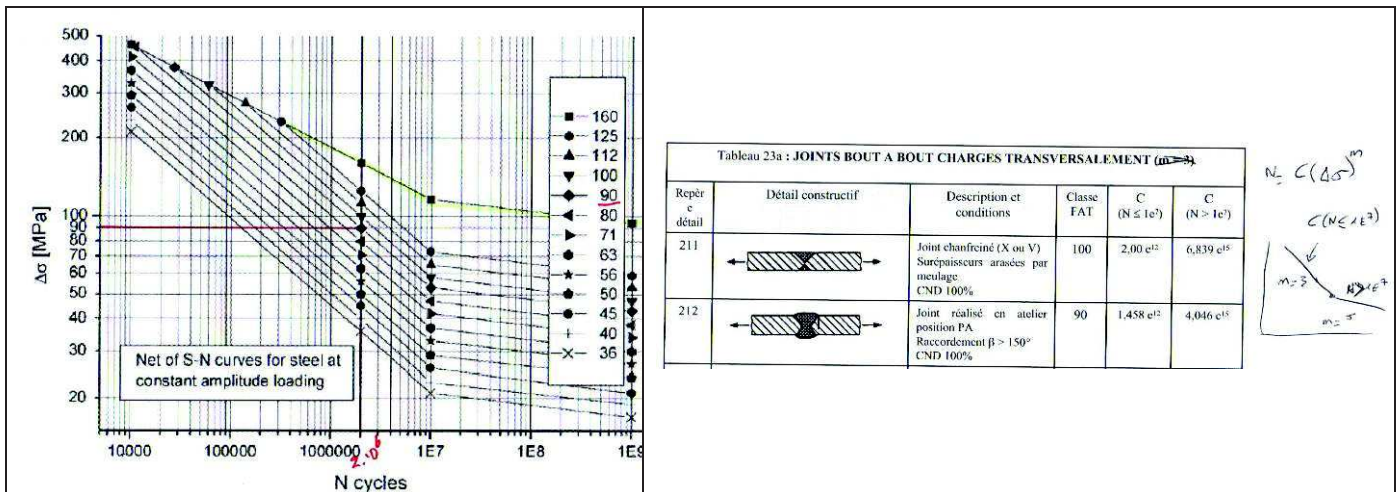
On distingue 2 droites :

- La première au bout de laquelle on trouve la limite de fatigue pour $5 \cdot 10^6$ cycles (ou 10^7) avec un coefficient directeur de -3
- Une seconde qui détermine la limite d'endurance à 10^8 cycles avec un coefficient directeur de -5



Il faut prendre en compte le type de sollicitation, soit constante, soit variable.

A l'aide du document de l'IIW-1823-07, on obtient une série d'abaque et de type d'assemblage

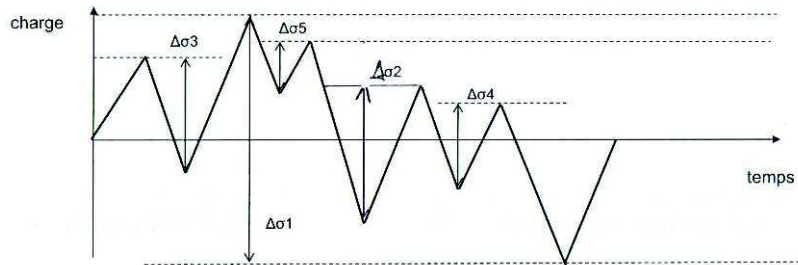


Domaine de validité :

- Re < 960 MPa
- Courbe spécifique au Alu
- Pas bon pour faisceau d'électron, friction,...
- Brut de soudage
- Pas de T° où apparait le fluage
- Pas dans le domaine oligo-cyclique (N < 100000)

f. Cumul de dommage (cas des variations de contraintes)

On calcule la somme des endommagements par nombre de cycle



g. Coefficient correcteurs

- Epaisseur de la pièce à souder
 $\Phi_e = (25/e)^n$ n varie de 0,1 à 0,3 suivant le type d'assemblage
- Température (de 100°C à 600°C)
 $\Phi_T = 1,12 - 0,0012T$

Rem : Le CODAP applique des règles afférentes aux aciers ferritiques et austénitiques.

h. Parachèvements

Le parachèvement a pour but d'améliorer la tenue de l'assemblage soudé, il en existe plusieurs :

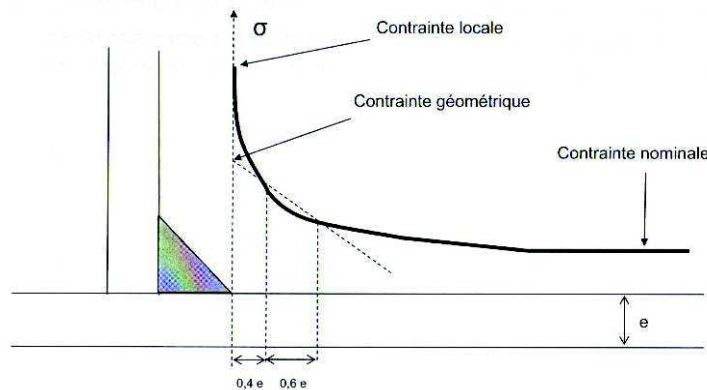
- Tth de détensionnement
- Meulage des pieds de cordon (veiller au sens de meulage → dans le sens du cordon pas travers)
- Refusion TIG
- Martelage et grenailage, pour créer des contraintes de compression en peau

i. Effets secondaires

Les problèmes de désalignement ou asymétrie peuvent créer des moments parasites

j. Contraintes utilisables

- Contrainte nominale, calculée loin des discontinuités géométriques
- Contrainte géométrique prend en compte les effets géométriques
- La contrainte locale pour l'ensemble des contraintes

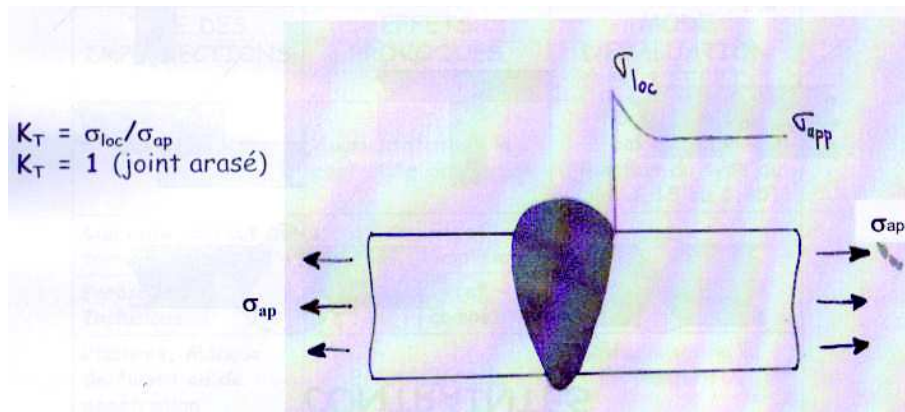


9- Mécanique de la rupture

Coefficient de concentration de contraintes :

$$K_t = \sigma_{loc} / \sigma_{ap} > 1$$

En réalité σ_{loc} est limité par Re car si $\sigma_{loc} > Re \rightarrow$ plasticité



Les types de défauts pouvant contrarier sont :

- Désalignement $\rightarrow \nearrow \sigma_{flexion}$
- Caniveau, défaut de forme, porosités, inclusions \rightarrow effet d'entaille
- Fissure, manque de fusion ou pénétration \rightarrow effet d'entaille

La sensibilité à l'effet d'entaille est mesurée par l'essai de résilience

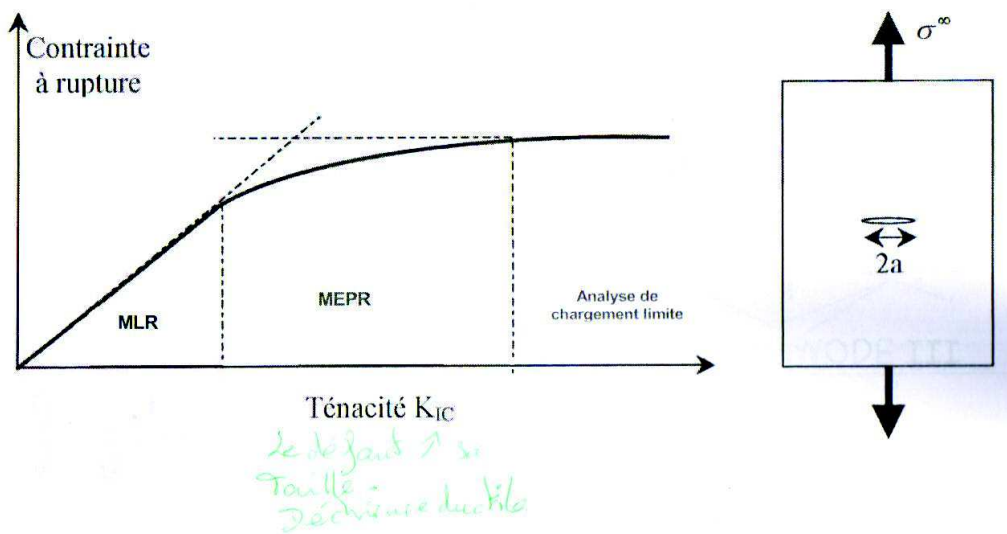
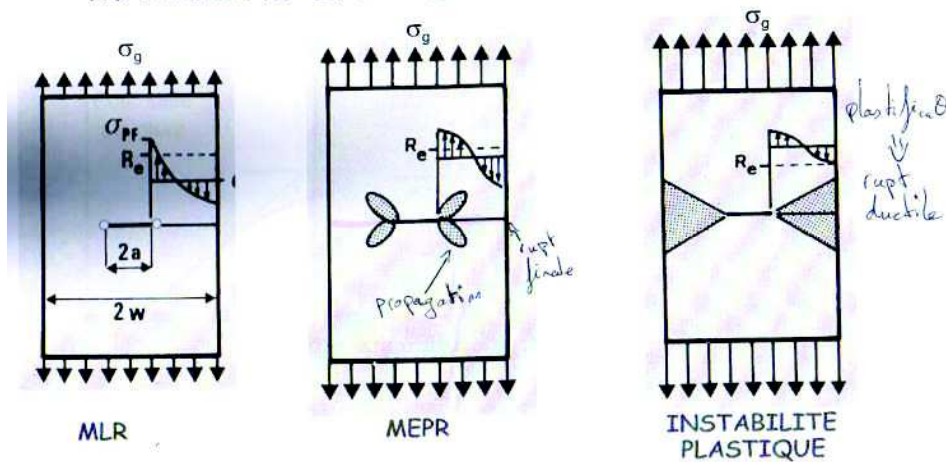
a. Définitions

MLR : s'applique aux matériaux de comportement linéaire élastique, propagation rapide et instable de la fissure.

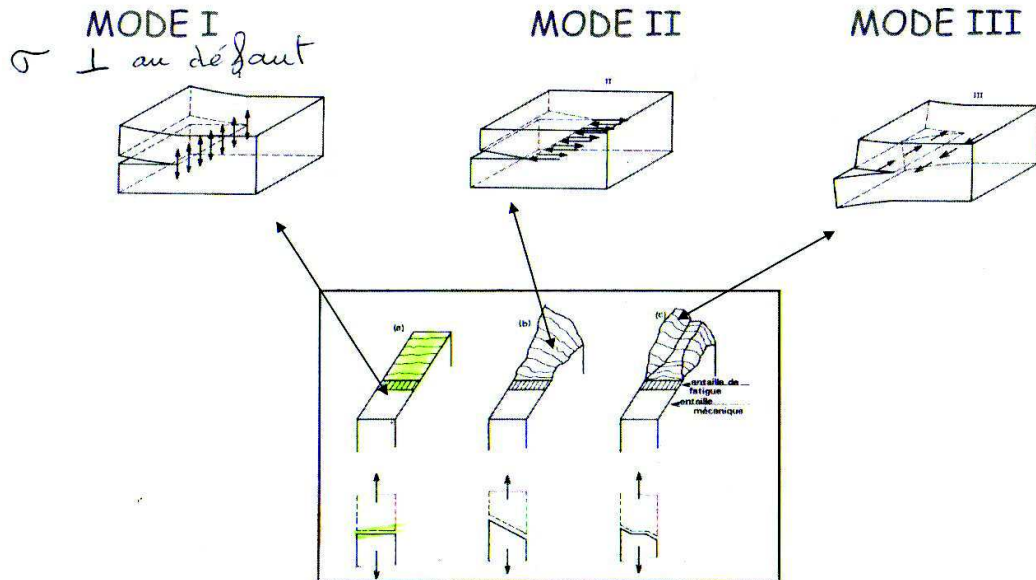
\rightarrow Mécanique élasto-plastique de la rupture

MEPR ou MNLR : s'applique aux matériaux ductiles. Amorçage et propagation ou moyenne résistance.

Régime de la plasticité généralisée : (ruine plastique) \rightarrow plasticité s'applique dans toute la structure



b. Modes de rupture



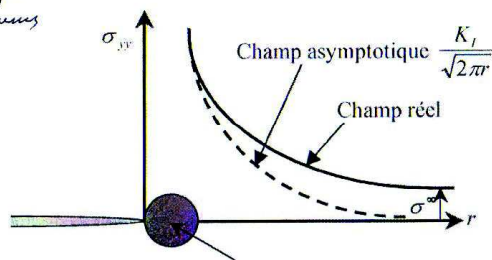
On ne s'intéresse qu'au cas de rupture en mode 1, le plus grave, les modes 2 et 3 restent secondaires. En mode I, les contraintes sont proportionnelles à une constante unique K. Si on connaît K, la distribution des contraintes en pointe de fissure est connue.

Répartition en pointe de fissure :

Pour $\Theta = 0$ $\sigma_{yy} = KI/\sqrt{2\pi r}$

$KI = \lim(\sigma_{yy} \sqrt{2\pi r})$ Pour $r \rightarrow 0$

KI d'une plaque de longueur infinie avec $\sigma \perp$ à un défaut de longueur $2a$.



$KI = \sigma_{ap} \sqrt{\pi a}$ (MPa√m)

*Si 250 MPa sur défaut de 10 mm (2a)
 $\Rightarrow KI = 31,3 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$*

$KI = \sigma_{ap} \sqrt{\pi a}$ (en MPa√m)

On applique un coefficient de sécurité en fonction du risque : 10% si risque faible, 40% en cas de mort d'homme.

Facteurs de correction :

$$KI = (M_1 * M_2 * M_3 * M_4 * M_5) \sigma_{ap} \sqrt{\pi a} \quad (\text{MPa}\sqrt{\text{m}})$$

M_1 - tient compte de la surface à l'origine de la fissure et de la distribution de la contrainte Pour une fissure traversante $F_1=1.122$ (distribution uniforme)

M_2 - tient compte de la surface vers laquelle se dirige la fissure

M_3 - tient compte de la forme réelle de la fissure (0 et 1)

M_4 - tient compte de gradient de contrainte

M_5 - tient compte de la taille de la zone plastique

KI critique : KIC

$$KI = \sigma_{ap} \sqrt{\pi a}$$

$$KI(\sigma, a) < KIC \quad \text{Situation d'équilibre}$$

calcul de la σ qui provoque la rupture \rightarrow

$$KIC = \sigma_c \sqrt{\pi a}$$

$$KIC = \sigma_{ap} \sqrt{\pi a_c}$$

Situation d'Instabilité

Propagation de la fissure rapide et instable

Voir fascicules

10- Contraintes résiduelles - Extensométrie

Les contraintes résiduelles viennent de la dilatation. Sans bridage le phénomène est réversible.

Contrainte résiduelles : $\sigma_x = E\alpha\Delta T$ où $E = \text{mod. Young}$ et $\alpha = \text{coefficient de dilatation}$

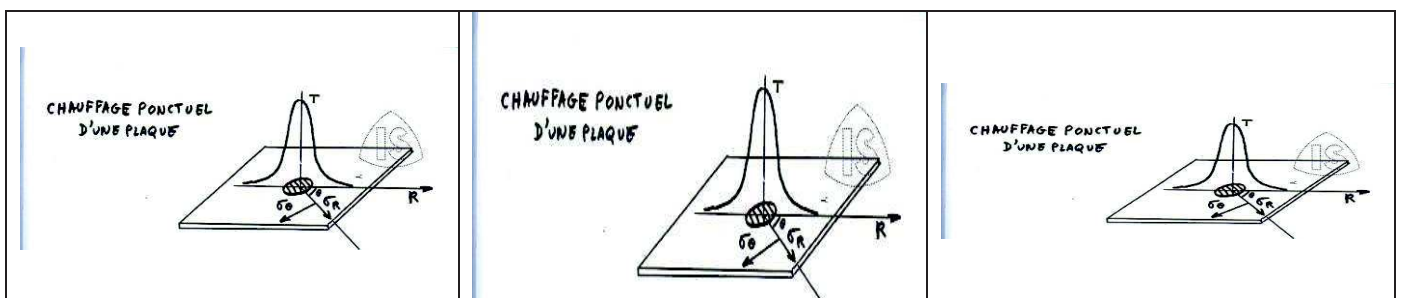
Une \nearrow de 100°C provoque une contrainte de 240MPa , soit supérieure au Re d'un S235 \rightarrow plasticité $\rightarrow \sigma_{\text{résiduelle}}$

Si bridage au retrait = 0 $\rightarrow \epsilon_r \text{ max}$ et $\sigma_x = 0$

Si parfait alors $\epsilon_r = 0$ et $\sigma_x = \text{max} = Re$

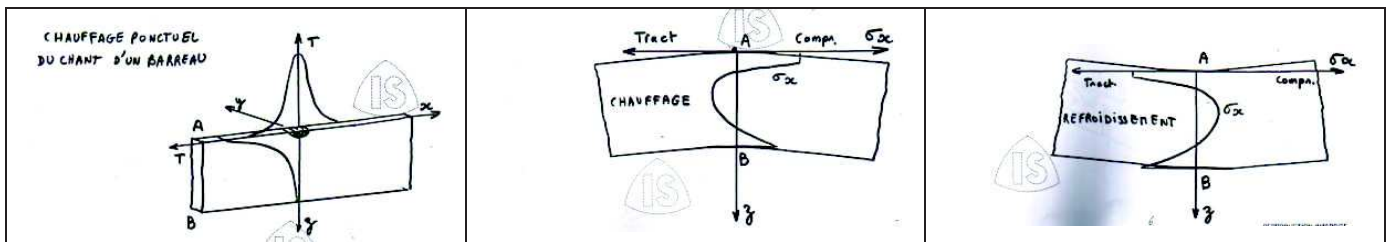
En fait ϵ_r et σ_x sont associés

a. Chauffage ponctuel d'une plaque :



En plaque mince, on peut conduire au flambage de la plaque.

b. Chauffage ponctuel d'un barreau



c. Conception pour diminuer les contraintes résiduelles (ou modifier leur répartition)

- Rapport largeur zone chauffée / longueur élément bridé
- Procédés haute énergie
- Baisse énergie soudage
- Comportement élasto-plastique
- Soudage under matching des passes de racine \rightarrow \sphericalangle fissuration à froid
- Bridage local de la zone chauffée par pièce froide
- Préchauffage pièce globale
- (le préchauffage local est défavorable pour le gradient de T°)
- Bridage du joint par les autres joints
- Champ de contrainte globalement auto équilibré
- Mannequin de soudage permet le bridage du joint puis suppression après refroidissement
- Imposition d'un effort de traction extérieur \rightarrow banc d'étirage

d. Mesures de contraintes

- Par rayons X
- Par relaxation