

1) Règles générales de conception des assemblages soudés:

Paramètres à considérer:

-mécanismes de ruine: mode I par ouverture (dangereux en rupture brutale), II par glissement droit (instable en chargement variable), III par glissement vis (le - ennuyeux): réduire la contrainte locale, proscrire les entailles et ses effets. Priorité au BâB, pleine péné, accessibilité 2 faces.

-Discontinuité naturelle de racine des assemblages: mode I à écarter.

-Nécessité des CND: priorité BâB.

-Position relative des éléments à assembler (éviter l'inflexion des lignes isostatiques qui vont générer des concentrations de contraintes): contrainte géométrique. Eviter la poussée au vide.

Rendre symétriques les assemblages.

-Concentrations de contraintes: faibles en BâB, élevées en angle.

-Position du fibrage (tranche/tranche, peau/peau...)

-Considérations thermiques (bi, tri, quadri thermique). Eviter dissymétrie thermique.

-Gorge (considérée seule pour le calcul) = valeur du plus court segment de droite reliant la racine à la surface libre du cordon, exception faite des surépaisseurs.

- Il faut être en condition de ductilité pour calculer --> sinon méca de la rupture. Première mise en charge --> adaptation plastique (redistribution des contraintes). Nécessite 1 matériau de capacité de déformation plastique suffisante ($A\% > 20$ en pratique);

Régions sensibles:

Début et fin de cordons qui sont le siège de défauts (volumiques, plan).

Racine et pieds de cordon du point de vue de la tenue en fatigue (coeff de concentration de contrainte toujours + élevé en racine qu'en pied de cordon).

En règle générale toute discontinuité doit être proscrite d'autant que l'on fonctionne en sollicitations répétées.

Zones écrouies par formage à froid --> éviter de souder trop près.

Tenue en fatigue, principes à adopter pour les cordons:

Symétrie (doubler les cordons), cordons concave ou plan, éviter joints bruts de soudage (limite d'endurance affectée par présence de porosités) --> préférer les joints arasés.

Ne jamais terminer 1 soudure sur 1 extrémité de tôle, éviter cordons discontinus.

Utiliser des procédés à forte péné.

Influence des contraintes résiduelles: effets possibles en comportement en service

Amorçage et propagation de fissures / Fissuration par fatigue

Rupture fragile

Fissuration par corrosion sous tension

Déformations importantes (instabilité dimensionnelle)

Indépendamment du temps ou de cycles (statique): déformation plastique excessive, rupture ductile (instabilité statique), rupture fragile (par cisaillement), instabilité du 2nd ordre (flambement, voilement).

Dependant du temps ou de cycles: fissuration par fatigue (amorçage, propagation, rupture), rupture par fluage (déformation dans le temps sous charge), déformation progressive, corrosion sous contrainte.

Croisement des lignes de soudure:

Coplanaires: décaler de préférence les joints transversaux ($\Delta \geq 20 * \text{ép}$). Evite de cumuler 2 régions sièges de défaut proches (assimilable à 1 défaut unique) et défauts de planéité exagérés.

Formant trièdre: goussets / raidisseurs. Dégagement = max (2e, 30) souhaitable pour accès soudure mais utilisation limitée en statique et fatigue modérée. Bouclage dans le cas de corrosion. En fatigue intense -> éviter ces dégagements --> continuité absolue des cordons.

2) Calculs de cordons:

Désignation des contraintes pour les cordons d'angle: contraintes moyennes (hyp: uniformément réparties).

$\sigma_{\text{parallèle}}$: n'intervient pas dans les calculs si largeur pièce suffisamment faible/longueur.

$\sigma_{\text{perpendiculaire}}$: contrainte normale = F / a_l

$\tau_{\text{parallèle}}$: cisaillement. $\tau_{\text{parallèle}} = T / \Sigma a_l$

$\tau_{\text{perpendiculaire}}$: cisaillement. Pour 1 cordon à $45^\circ = \sigma_{\text{perpendiculaire}}$.

Désignation des contraintes:

Contrainte de membrane = contrainte moyenne

Contrainte de flexion = amplitude

Contrainte locale = au voisinage d'1 accident géom

Contrainte géom = contrainte ne tenant pas compte de l'accident géom

Contrainte nominale = dans 1 section de pièce loin de tout accident géom

Contrainte primaire = résulte d'1 chargement

Contrainte secondaire = résulte d'1 différentielle de déformation (therm ou méca).

Soudure B à B:

Si soudure pleine épaisseur (conservation ép) et carac $MA > MB$: ne se calcule pas (à condition de vérifier l'absence de défauts de compacité rédhibitoires) (*)

Coeff de concentration de contrainte:

cordon bombé $k = 1,6$ ($\alpha = 120^\circ$)

défaut de fusion en racine: $k = 4$ à 5 .

Défaut d'alignement = moment fléchissant.

$E_p \neq$: inflexion des isostatiques, flexion primaire.

Alignement des fibres moyennes préférable, délardage (2 à 5 pour 1) avec cordon dans la pente.

Etalement du cordon peut faire le délardage si ép peu \neq .

Avantages soudure oblique/effort: contrainte dans le cordon minimisée / contrainte nominale, avantage / défaut parallèle à la soudure, intérêt lorsque rés ZF ou ZAT < MB (soudage aciers TQ ou écrous).

Soudure d'angle: si soudure pleine épaisseur et carac $MA > MB$: ne se calcule pas (à condition de vérifier l'absence de défauts de compacité rédhibitoires).(*)

Cordon transversal:

composantes $\sigma_{\text{perpendiculaire}}$ et $\tau_{\text{perpendiculaire}} = \sigma_0 * \sin \alpha$

$\alpha = 45^\circ$ en général , 60° dans le cas d'1 fonctionnement en fatigue.

Flexion primaire pour assemblage à clin ou à couvre-joint engendrant 1 contrainte de flexion = 6σ

Préférable de doubler les cordons.

Etude analytique illusoire.

Les contraintes en racine et au pied de cordon sont d'autant + faibles que la péné augmente. K de 1 à 6 dans les config courantes. En racine glissement et adaptation aisés, en pied de cordon proscrire les cordons bombés, allonger le cordon dans la direction de l'effort.

Cordon longi:

$$\tau_{\text{parallèle}} = F / \Sigma a l.$$

Coupler les cordons pour éviter flexion primaire intense.

Forme cordon importe - (isocèle va bien).

Contrainte maxi aux extrémités, mini au milieu ("chaînette").

Paramètres intervenants:

Elancement du cordon: l/a cordons trapus (l/a faible) abaisse les contraintes extrémités, cordons minces et longs (l/a élevé) augmente les contraintes extrémités.

Codes: $20a \leq l \leq 40a$. $\tau_{\text{max}} \leq 2,5 \tau_{\text{moy}}$. (Longueur mini pour établissement cycle thermique $\approx 20a$)

Elancement de l'assemblage: l/b (b ép éltr rapporté = distance entre les 2 cordons). Même influence que l/a --> privilégier l/b faible (plat à chant à éviter).

Cordons mixtes (frontaux et longi): frontal ordinaire / frontal d'attaque.

Pointe de contrainte fortement abaissée du côté du cordon frontal.

Le frontal d'attaque est + chargé que le frontal ordinaire.

La proportion de l'effort transmis par les cordons frontaux suit 1 loi décroissante asymptotique selon raideur relative (surface éltr rapporté s_2 / surf éltr base s_1). Pour le calcul on considère que l'effort est transmis en proportion des surf (vrai en toute rigueur pour $0,2 < s_2/s_1 < 0,4$).

(*) On introduira 1 coeff de soudure pour les assemblages d'aciers écrouis, QT, soudure hétérogène (acier sau Ni avec fil base Ni, AlZN soudé avec fil AlMg...).

Réduction des efforts: dans le plan de l'assemblage et au CDG.

Transmission totale d'1 composante par les cordons les mieux disposés.

Règle de proportionnalité des sections ou des moments statiques en cas de d'orientation de cordons identique.

Cas du moment transmis de façon uniforme: contrainte dans l'éltr le + éloigné --> $\sigma = My / (Iy/v)$. v étant la distance de l'éltr au CDG.

Principe de vérification d'1 cordon d'angle (NF P 22470):

$$k^2 (\sigma_{\text{perpendiculaire}}^2 + 3 (\tau_{\text{parallèle}}^2 + \tau_{\text{perpendiculaire}}^2)) \leq \sigma_e^2 \text{ et } \sigma_{\text{perpendiculaire}} \leq \sigma_e$$

k coeff d'adaptation plastique de l'acier (= 0,7 pour S235, 1 pour S355 et HLE).

Formule conservatrice: $a = F / (0,5 * \sigma_e * E \Sigma l_i)$.

Cas particulier des éltrs en Alu:

2 vérif tenue ZF et tenue ZAT.

BàB transversaux: $F / (\alpha \beta * e l) \leq \sigma_e$

$$\text{Angle: } 1 / (\alpha^2 \beta^2 \gamma^2) * (\sigma_{\text{perpendiculaire}}^2 + 2,7 (\tau_{\text{parallèle}}^2 + \tau_{\text{perpendiculaire}}^2)) \leq \sigma_e^2$$

Où α = coeff de qualité d'exécution (0,8 à 1), β coeff d'efficacité métallurgique (0,45 à 1) et γ coeff minorateur (0,65 à 1).

3) Rupture fragile:

Ce phéno n'existe pas sur 1 matériau intrinsèquement non fragile et d'ép faible (<10mm).

Peu fréquent pour ép > 10 et ≤ 20 mm, au-delà de 20 faire la vérif.

Le choix du métal ne se résume pas à T° service --> garantie acier J0...K2

Il faut prendre en compte :

- Suppose l'existence d'1 défaut plan
- Toutes les contraintes (primaire, secondaire, résiduelles dûes au soudage ou à la mise en forme).
- Vitesse de déformation sous charge.

- T° de service.
- Epaisseur

La non propagation du défaut suppose $K_I < K_{IC}$.

Pour ép faibles et aciers modestes on détermine K_{cv} , sinon K_{IC} CODC J_{IC} par essais de la mécanique de la rupture.

Il existe des formules de corrélation entre K_{cv} et K_{IC} . Abaques donnant la T° de service admissible en fonction du K_{cv} de l'acier (27J).

T° de transition ductile --> fragile est relevée par l'écrouissage et le vieillissement.

4) Charpentes métalliques soudées: majoration de l'effort.

Constructions mixtes laminés/Profilés Reconstitués par Soudage: attention aux défauts d'accostage (les laminés marchands ont des tolérances larges).

Raboutages: chanfreinage symétrique de préférence pour limiter les déformations angulaires.

Appendices d'extrémités provisoires pour éviter les risques de défauts de compacité ou de forme sur les rives.

Chanfrein rectiligne sur les profils ronds/carrés pleins.

Poutres T, I ou H: prépa en V sur semelles (soudure à plat, plafond uniquement pour les reprises envers), en X dissymétrique sur fortes ép, en X symétrique sur âme.

Gougeage localisé (ou dégagement circulaire) au niveau du raccordement soudures âme/semelle. Laissé tel que si statique, rebouché en cas de sollicitations en fatigue.

Décroisement des soudures d'âme et de semelles pas avantageux en terme de réalisation (pas de différence significative en statique et en fatigue).

Raboutage sur chantier: interruption en pré-fab des soudures longi sur 1 distance de $20e$ environ (si PRS), pour faciliter l'accostage. Soudures des pièces les + épaisses (semelles) en simultanément.

Soudage des âmes (en pas de pellerin pour limiter les contraintes résiduelles) --> contraintes résiduelles de traction (pas de risque de flambement).

Rebouchage des échancrures et finalisation des soudures longi.

Tubes: avec support annulaire interne subsistant.

Liaisons angulaires (cadres soumis à flexion et torsion dans leur plan):

I H ou U:

Coupes droites + platine et goussets

Coupes d'onglet + diaphragme bissecteur.

Tubes:

Onglet simple: poussée au vide --> flexion locale intense.

Coupe d'onglet + diaphragme bissecteur. Liaisons 3 tranches.

Caissons: diaphragme bissecteur ou coupes droites avec diaphragmes.

Si cadres soumis à flexion et torsion hors de leur plan: système de contraintes spatial.

Préférer des profils fermés aux profils ouverts.

Poutres:

Essentiellement flexion plane (M_y , T_z), + rarement flexion déviée, torsion.

Poutres à âme pleine:

Profil en I le plus rationnel (et économique): semelles reprennent 75 à 90% du moment fléchissant, âme reprend l'effort tranchant.

Ruines: déformation plastique excessive (semelles, âme et liaisons âme/semelles), déversement par flambement de la semelle, voilement de l'âme.

Poutrelles du commerce IPN/IPE...

Poutrelles améliorées: adjonction de semelles supplémentaires (renforcement charpente existante), adjonction d'1 élé d'âme (pour augmenter l'inertie), inertie variable.

Poutres composées PRS: permettent l'optimisation du profil (inertie et section d'âme), meilleure précision dimensionnelle que poutrelles laminées.

Calcul des cordons d'angle par formule du glissement (cisaillement longitudinal) dans le cas de simples cordons d'angle (statique ou fatigue modérée):

$$\tau_{\text{parallèle}} = T_z * H / (2aI_y) \leq \sigma_e / \sqrt{3} .$$

T_z effort tranchant, H moment statique de la semelle située au delà des soudures (= aire semelle * bras de levier = largeur semelle * ép semelle * distance axe neutre semelle/CDG = $b * e_s * h/2$), a gorge et I_y moment d'inertie de la section totale.

En cas de fatigue intense: cordons péné (prépa en K ou procédé à forte péné) + CND.

Autres solutions: plat à béton ou rechargement local préalable.

PRS à inertie variable: par variation hauteur d'âme, par variation d'ép de semelles (souvent les 2 combinées). On distingue les semelles monolithiques et les semelles multiples empilées (mauvaise tenue en fatigue au niveau des cordons de liaison des semelles).

Raidissage de l'âme:

Raidisseurs longi en région comprimée si flexion pure. Profil plat ou T. Interrompus aux croisements (- sollicités).

Raidisseurs transversaux si cisaillement simple (panneaux carrés). Raidissage prioritaire dans le cas de flexion+cisaillement. Sur toute la hauteur de l'âme, en retrait de 20 à 30 mm par rapport aux rives des semelles. Profils: plat, T, caisson (en U, en V).

Raidissage longi sur semelles: rés à la torsion de semelle supérieure de poutre de roulement. Continuité impérative.

Poutres hybrides: semelles en acier de Re + élevée.

Poutres caisson: section fermée (2 âmes, 2 semelles). Bonne rigidité en flexion déviée et torsion. Meilleure stabilité au déversement.

Raidissage par diaphragme interne.

Poutrelles associées I, H ou U.

Poutres caisson composées.

Raidissages possibles: semelles additionnelles, cadres préfabriqués, diaphragmes.

Caissons en tôle pliée.

Poutres à âmes ajourées:

Découpe zig-zag IPE ou HEA --> amélioration sensible inertie primitive.

Mais affaiblissement section d'âme --> effort tranchant de valeur modeste gravité/charge climatique).

Treillis:

plans: treillis isostatique $b = 2n-3$, hyperstatique $b > 2n-3$, localement instable $b < 2n-3$

Forces agissant dans le plan du treillis.

Spatiaux: décomposables ou non en systèmes plans élémentaires.

Hyp: charges appliquées sur les noeuds, convergence des fibres neutres (sinon moment fléchissant primaire), noeuds sont des articulations (hyp conservative mais simplificatrice), déformation élastique des barres (en compression ou traction) engendre des rotations locales au niveau des noeuds (moment fléchissants secondaires).

Sollicitations:

efforts normaux primaires en traction ou compression

Moment fléchissant primaire éventuel (à éviter).

Moment fléchissant secondaire fonction de la rigidité à la flexion des barres.

Pour limiter ce dernier on dispose les barres de façon à ce que leur inertie mini soit dans le plan du treillis.

Vérifier la stabilité au flambement des barres comprimées.

Attention à l'espacement positif des barres qui ne permet pas la reprise des composantes transversales (dans certains cas on préfère une excentricité négative entre les intersections).

Membrures parallèles --> poutres et pannes. Poutre en N solution logique (montants comprimés, diagonales tendues).

Membrure supérieure inclinée --> fermes (charpente de toiture).

Treillis non tubulaires à 1 plan de barres:

légers à membrures en T

- diagonales en L assemblées par recouvrement et soudure à clin. Jumelage des barres pour supprimer moments locaux. Gousset soudé ou découpe membrure pour respect de la convergence des barres.

- Diagonales en L ou en plat (barres tendues) assemblées par enfourchement et cordons latéraux. Moments locaux négligeables.

- Diagonales en plat, I ou T avec semelles biseautées.

Semi-lourds à membrures en I, H ou U.

H ou double U formant caisson pour les membrures comprimées.

U retourné préférable pour les intempéries (I déconseillée).

Membrures I+H: solution rationnelle membrures et barres de même dimensions --> assemblage B à B des semelles, échancrure des âmes des barres.

Membrures U et double U caisson: transmission de la composante transversale par liaison directe des barres.

Problèmes des angles vifs rentrants en fatigue --> goussets découpés avec congés.

Treillis non tubulaires à 2 plans de barres:

semi-lourds membrures I ou H, U ou double U formant caisson, double T formant TT.

Barres en L, T ou U assemblées par recouvrement.

Treillis lourds en caisson: membrures et barres comprimées en caisson composé par soudage.

Barres tendues en I.

Découpe des âmes de membrures de façon à emboîter les barres et souder par cordons à clin.

Découpe avec congés circulaires et soudures B à B des semelles des barres pour tenue en fatigue.

Treillis semi-tubulaires: barres en profil tubulaire. Profil tubulaire adapté aux barres comprimées.

Légers à membrures en T : barres assemblées par enfourchement, recouvrement, BàB, à cordons d'angle sur semelle membrure.

Ecrasement des extrémités de tubes --> risque de vieillissement de l'acier.

Semi-lourds à membrures en I, H, U ou double U formant caisson.

Découpe tubes simplifiée (surface plane). Tubes de section peu différente des membrures (pour transmission de la composante transversale).

Si âme membrure perpendiculaire au plan du treillis --> membrure en I préférable pour accès soudure. Gousset transversal pour raidir l'âme.

Si âme membrure parallèle au plan du treillis --> membrure en H. Espacement positif préjudiciable.

Treillis tubulaires: membrures et barres de section tubulaire.

Assemblage à intersection:

membrures et barres de section circulaire: pas justifiable sur treillis plans. Découpage barres compliqué. Espacement positif en général. Coque extérieure membrures transmet les efforts.

Paramètres de calcul:

$d1/d \geq 0,25$, $d1$ dia barre, d dia membrure.

e/d , e ép membrure.

g espacement relatif, $g/d \leq 0,6$

Sens des efforts dans les barres (treillis en N), dans la membrure.

Présence d'1 moment fléchissant au noeud.

Membrures et barres de section rectangulaire: préparations simplifiées (surfaces planes).

Attention si profils finis à froid --> risque de vieillissement local après soudage des barres (préférer des dimensions voisines entre barres et membrures).

Possibilité de disposer les barres sur les faces latérales des membrures.

Assemblage sur tubes aplatis:

Aplatissement des extrémités de barres et soudure sur peau membrure.

Aplatissement des extrémités de barres et enfourchement sur goussets de liaison.

Aplatissement en région courante des barres.

6) Constructions chaudronnées: minoration de la contrainte admissible

Membrane (ou voile apexique): ép négligeable/rayon --> contraintes normales, gradient nul dans l'ép --> sollicitation de membrane.

Plaque: ép non négligeable --> rigidité de flexion entraînant 1 gradient de contrainte normale et de déformation + champ de cisaillement.

Nature des actions: pression (int ou ext), gravité, dyn des fluides, climatique, thermique, contraintes résiduelles de fab, corrosion, vibration.

Modes de défaillance: rupture ductile (instabilité plastique), rupture fragile, déformation plastique excessive, déformation plastique progressive, instabilité du 2nd ordre, fluage, fissuration liée au milieu, fatigue, corrosion.

Contraintes: état tri-axial. σ_θ contrainte circonférentielle (ou circulaire), σ_x contrainte méridienne (ou longi) et contrainte radiale $\sigma_r < 0$ (compression dans tous les cas). σ_θ et $\sigma_x > 0$ si $P_i > P_e$ et courbure positive.

Propriétés des matériaux:

Capacité de déformation plastique des matériaux: A% doit avoir 1 valeur mini garantie (pour travaux de mise en forme + biaxialité de déformation en service).

Ténacité: influence des opé de fab (écrouissage --> effet nocif immédiat, vieillissement,

contraintes résiduelles). A prendre en compte pour basses T° de service mais aussi fortes ép avec T° de service importante (mais en général l'essai hydrostatique se fait à l'ambiante).

Propriétés méca garanties à T° de conception (Rm et Re).

Dimensionnement: 2 méthodes

de calcul: conception par Formules (DBF) règles spécifiques (statique), conception par Analyse (DBA) règles générales (calcul numérique), vérification d'aptitude à l'emploi (ECA) méca de la rupture.

Expérimentale: programme d'essais, échantillonnage.

3 types de situations de calcul: normales de service, exceptionnelles de service, d'essai de rés (épreuve hydrostatique règlementaire en fin de fab ou ré-épreuves périodiques).

Pression de calcul: au moins égale à la + grande valeur que peut atteindre la pression à l'int de l'enceinte en service normal, pression moyenne effective à l'int de l'enveloppe pour calcul avec fluage.

Dispositions règlementaires:

Selon le type d'appareil.

- Récipients et appareils à pression, chaudières et génie vapeur:

Règlementation de 1999 DM et AM: classe les appareils selon type de fluide (I sans danger pour la santé, II dangereux). Catégories de I à IV en fonction des grandeurs carac PS, V et PS*V.

Exigences en matière de conception, fabrication (CND,TT,essais) et matériaux (garanties, certificats, ctrl réception).

Codes et recommandations (normes): CODAP, ASME... pour appareils non soumis à l'action d'1 flamme.

- Réservoirs de stockage de liquides: CODRES, API...

- Tuyauterie:

Règlementation de 1999 Décret Ministériel et Arrêté Ministériel.

Codes et recommandations (normes): CODETI, ASME...

Pression d'essai de rés P_E: doit générer 1 contrainte de membrane suffisante pour écrêter les défauts de circularité (gabarissage --> diminution des contraintes de flexion), former des rotules plastiques éventuelles (adaptation ultérieure dans les régions concernées), relaxer partiellement les joints soudés. Améliore la tenue à la fatigue.

$$P_E = \max (1,43 P_S ; 1,25 P_S * f_{20}/f_T)$$

P_S est la pression maximale admissible, f₂₀ contrainte admissible à l'ambiante, f_T contrainte admissible à T° de service.

On peut y ajouter la sur-ép de corrosion: facteur e (e-c).

Ainsi que la Re réelle (lue sur le CCPU): facteur Re réelle / Re garantie.

En gal n'est pas dimensionnant.

La contrainte de membrane maxi doit cependant être < 0,95 Re.

T° de calcul:

T_m T° mini conditionne le choix de l'acier (risque de rupture fragile).

T T° de calcul (maxi) conditionne les carac méca (risques de déformation plastique excessive, fluage...).

T = T° maxi à mi-ép enveloppe pour récipients non calorifugés, T° maxi int si calorifugé.

T = T ambiante si T° de service < T ambiante.

En situation de fluage T = T° moy à l'int. N'est en gal pas dimensionnant pour les aciers ferritiques si T < 375°C (fluage négligeable).

T° en situation d'essai de rés T_E = T° effective du fluide utilisé.

Contrainte nominale: f = valeur maxi admissible de la contrainte équivalente de membrane générale.

$f = \min (Re/k1; Rm/k2)$ en situation hors fluage.

$k1$ et $k2$ sont des coeff de sécu dépendant de la nuance du matériau et de son mode d'élaboration (corroyé, moulé...).

$f = \min (\sigma_{1Tt}; \sigma_{RTt}/1,5)$ valeurs moyennes des contraintes carac à $T^\circ T$ pendant la durée de fonctionnement t .

Coeff de joint: z intervient sur le calcul de l'ép de l'enveloppe si présence d'une liaison soudée BàB orthogonale ou oblique par rapport à la contrainte principale maxi.

Pas de signification technique car pas de dégradation significative des carac méca du matériau lors du soudage (sauf si acier TQ et/ou tenue au fluage).

Enveloppes cylindriques ou coniques : s'applique sur les cordons longi (pas sur les circulaires).

Tubulaires et piquage / sollicitations en compression ou autres que pression --> ne s'applique pas.

$z = 1$ équipements soumis à CND 100% et essais destructifs.

$z = 0,85$ équipements soumis à CND 10%

$z = 0,7$ équipements soumis à simple examen visuel.

Introduit dans les formules sous la forme $f*z$.

Contraintes dans les enveloppes minces classiques: $e/De \leq 0,16$ ou $Re/Ri < 1,5$.

Cylindriques:

$\sigma_\theta = PR/e$, $\sigma_x = PR/(2e)$ --> $\sigma_\theta = 2 * \sigma_x$, P pression exercée, e ép et R rayon moyen ($Ri + e/2$).
 $e \geq PRe / fz$ si pression modeste ($P/fz < 0,02$). Re rayon ext.

Coniques: conviennent mal à la pression (cône réservé aux fonds)

$\sigma_\theta = PR / (e \cos \alpha)$, $\sigma_x = PR / (2e \cos \alpha)$ --> $\sigma_\theta = 2 * \sigma_x$.

$e \geq P Dm / (2 fz \cos \alpha)$ Dm dia moy grande base, $\alpha \leq 70^\circ$.

En gal cônes par tronçon d'ép échelonnées (pour économiser de la matière).

Sphériques: enveloppe d'égale résistance.

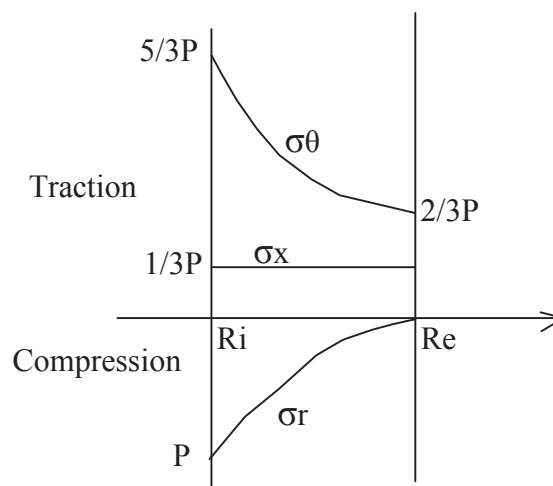
$\sigma_\theta = \sigma_x = PR/(2e)$.

$e \geq PRe / 2fz$ si pression modeste ($P/fz < 0,04$).

Répartition des contraintes dans 1 enveloppe cylindrique épaisse:

soumise à pression intérieure P

La contrainte maxi est sur le peau int.



La stabilité élastique est vérifiée par l'intermédiaire d'1 contrainte de comparaison:

Critère de Von Mises (principe de l'én de glissement)

Critère de Tresca (cisaillement maximal): le + sécurisant.

En pratique il y a plastification des fibres internes à la mise sous pression --> autofrettage (fibres en compression). Si on souhaite rester dans le domaine élastique: $P_{max} = 0,5 * Re$ (critère de Tresca).

Assemblage des enveloppes:

Envirolage à l'ambiante ($<150^{\circ}\text{C}$) sur aciers non alliés sans TT ultérieur si A% limité à 5%.

Relaxation si $5 < A\% < 10$, relaxation ou normalisation si $A\% > 10$.

Solution la - économique (longueur de soudure) mais la plus répandue: joints circulaires selon sens de laminage. Meilleure tolérance géométrique + sens de laminage favorablement orienté (parallèle à $\sigma\theta$).

On commence par les joints longi, recalibrage éventuel des viroles élémentaires + CND. Puis on raboute.

Soudures hélicoïdales: contrainte normale dans le cordon = $0,75 PR/e$ si angle 45° .

Favorable dans le cas de défauts longi dans la soudure (moins sollicités par $\sigma\theta$).

Capacité de déformation plastique sensiblement améliorée pour acier pré-écroui ou traité.

Meilleure tenue en fatigue également.

Meilleure circularité.

Croisement de soudures coplanaires: 2 critiques

--> alignement des défauts de compacité (pouvant se comporter comme 1 défaut unique de longueur inadmissible).

--> Conservation des déformations angulaires de soudage. Défaut local de rotondité créant une flexion locale interne.

Décalage des joints longi recommandé.

Voisinage de soudures coplanaires: distance mini admissible ? 2 effets à considérer: déformations angulaires dues au soudage (+ sensible sur joints longi) + dégradation d'ordre métallurgique (adoucissement, fragilisation).

Joints longi ou méridiens: soudure BàB pleine section , alignement des fibres moyennes (pour éviter flexion primaire).

Assemblage à recouvrement à proscrire --> flexion locale (facteur 4).

Si intérieur inaccessible prépa en V avec soudure pleine péné. Latte support subsistante non autorisée en général.

Délardage de l'élément + épais (pente $\leq 0,25$).

Surépaisseur suffisante pour assurer la tenue méca si MA de + faible carac méca.

Joints circulaires ou transversaux: soumis aux contraintes longi + faibles.

Alignement fibres neutres pas obligatoire.

Délardage de pente 0,33.

Assemblages sur support subsistant et sur bords soyés (matériaux ductiles) acceptables si pas de risque de fissuration ou corrosion.

Assemblages à clin autorisé: double soudure à clin pour $e \leq 8$ mm et en l'absence de gradient thermique, simple soudure à clin pour $e \leq 4$ mm et en l'absence de gradient thermique et de corrosion.

Fonds bombés:

Risque de flambage circonférenciel de la zone de carre.

Paramètres:

la profondeur relative H/R (H hauteur du fond, R rayon) conditionne σ_x et σ_θ en zone polaire et σ_{xi} en zone de carre (flexion méridienne importante en zone de carre).

Rigidité relative e/R (si ép non négligeable) --> flambage circonférenciel de la carre (flexion bi-axiale).

Types de fonds:

En général ces fonds sont fabriqués avec bord droit cylindrique pour éloigner la soudure de raboutage de la zone de flexion importante.

Hémisphériques: $H/De = 0,5$.

Elliptiques: $R/H = 1,9$.

Torisphériques ou en anse de panier: à grand rayon de carre , $2,58 \leq R/H \leq 2,6$.

Les versions à moyen et petit rayon de carre ne sont pas admis règlementairement.

Calcul: sous pression intérieure.

3 vérif successives pour déterminer l'ép mini.

- Contrainte de membrane au pôle.

- Flexion méridienne de la carre (σ_{xi}): abaques donnant e/De en fonction de P/f et du type de fond.

- Flambage circonférenciel de la carre (σ_θ): abaques donnant e/De en fonction de P/f et du type de fond.

Le flambage circonférenciel n'est à craindre qu'aux faibles pressions, la flexion méridienne est déterminante dans 1 gamme de pression intermédiaire et la contrainte de membrane au pôle est à considérer aux pressions élevées.

Soudures des fonds:

Fonds hémisphériques: position soudures indifférente. Classique: calotte + quartiers.

Fonds elliptiques ou torisphériques: position indifférente dans la zone de bombé (jusqu'à $dia = 0,8 De$), soudures disposées dans des plans méridiens ou décalée de + de $0,2 De$ d'1 axe diamétral dans la zone périphérique (\approx carre).

Calcul ép avec coeff de joint z sur fond bombé, sans coeff sur zone de carre.

Assemblage des fonds bombés sur viroles:

Soudures à soigner (surtout si fatigue) --> discontinuité au niveau des contraintes.

Incompatibilité de dilatation circonférencielle (fond en contraction, virole en extension) --> flexion secondaire dans la région de raccordement.

- Eloigner la soudure circulaire de la ligne de raccordement théorique (fonds avec bord droit).

- Délardage faible pente (0,25 maxi).

- Qualité de la soudure circulaire (absence de défauts de péné).

Fonds hémisphériques: ép fond \approx ép virole/2 --> virole rallongée avec délardage, fond raccourci.

Avantages: ép virole conservée dans sa partie utile, fibres neutres \approx alignées, embouti moins profond.

Fonds non hémisphériques: ép fond elliptique \approx ép virole --> pas de délardage.

Délardage interne pour les fonds torisphériques.

Fonds bombés intermédiaires: pour séparer des capacités distinctes. Exposés en service à des inversions de contraintes.

Fonds plats:

Calcul de l'ép : $e \geq C D \sqrt{P/f}$, coeff C dépend de la raideur de la virole et de la géom locale (0,3 à 0,7), D est le dia.

Assemblages:

- B à B: fonds à bord rétreint, fond forgé, forgé à rainure de décharge.
- Angulaires:

assemblage à simple cordon d'angle règlementairement interdit.

Fond totalement emboité + chanfreinage partiel si pas de risque de corrosion.

Fond non ou partiellement emboité + soudure pleine ép sur virole.

L'épreuve hydrostatique plastifie le fond de racine ou introduit des contraintes résiduelles de compression à fond d'entaille et donc améliore la tenue en fatigue.

Assemblage à double soudure (accès int): point faible en fatigue au niveau du raccordement de la passe intérieure. Discontinuité de racine empêche le CND US.

Orifices dans les enveloppes sous pression intérieure:

Orifice circulaire de faible dia: introduit des coeff de concentration de contrainte en bordure de l'orifice (de -1 à 3).

Orifice elliptique idem (coeff peut être > 3). Sur enveloppe cylindrique orientation circulaire préférable.

Coeff modéré sur enveloppe sphérique --> il est préférable de prévoir les orifices de visite dans la zone polaire des fonds.

Orifices de dimensions non négligeables:

Accroissement et concentration des contraintes de membrane au voisinage de l'orifice par diminution de la section du ligament.

Flexion locale longi par modif locale de la position de l'axe neutre et de l'inertie de la section transversale. Risque de flambage longi des génératrices opposées à l'orifice (zone en compression due à la flexion secondaire).

Flexion locale transversale: effet de fond exercé par la tubulure.

Principe de compensation:

Vérif qu'il supplément local de matière est dispo pour cet accroissement de contrainte.

Bilan de la section de métal excédentaire dans la "zone d'influence".

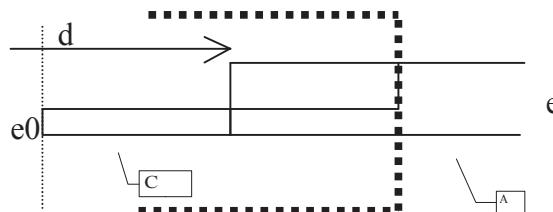
2 méthodes:

méthodes des sections : vérif aire $A \geq$ aire C

e_0 ép mini théorique ($z=1$)

e ép réelle (corrosion déduite)

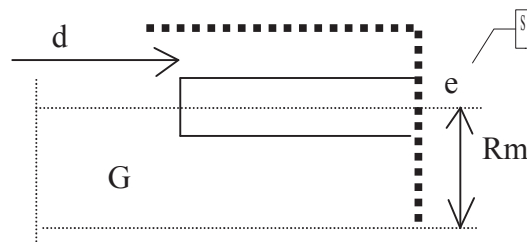
d dia orifice.



Méthode de Winn ou Kellog: calcul d'l contrainte circonférentielle moy dans le ligament.

Aire S / Aire G \geq P/f.

G section soumise à pression.



Renforcement d'1 orifice:

Orifices situés sur 1 même géné --> section du ligament commun compense les 2 orifices voisins.

Orifices situés dans 1 même plan transversal: compensation de l'orifice le plus large selon plan de coupe longi + calcul contrainte longi σ_x maxi.

Dispositions constructives piquages et tubulures:

Multiples. Le choix est conditionné par les critères suivants:

- conditions de fonctionnement de l'appareil: fatigue, effets thermiques, corrosion.
- Géom de l'orifice: ép et dia, déformations de soudage, arrachement lamellaire.
- Conditions de fab et de ctrl: accessibilité int, possibilité CND, possibilité usinage.

4 principes:

- interposition d'1 manchette de tubulure épaissie (orifices de faible dim).
- Augmentation globale de l'ép de la paroi (orifices multiples).
- Epaississement local de la paroi par adjonction d'1 élt laminé ou forgé soudé BàB (effet thermique ou fatigue).
- Adjonction d'1 selle renfort disposée à recouvrement. Située à proximité même de l'orifice.

Liaison directe avec la paroi en bordure de l'orifice nécessaire.

1 renfort commun plutôt que 2 renforts voisins.

Soudures principales de paroi hors orifices et de leur zone d'influence (sinon recouverte par le renfort avec CND préalable).

Soudures tubulure et selle-renfort dans 1 plan transversal.

Goussets radiaux: pas de rôle de renforcement de l'orifice. Risque de poinçonnement secondaires locaux sur paroi mince. Gousset tangentiel préférable.

Raidissage par ceintures + nervures longi si sollicitations extérieures excessives.

Règlementation:

Chanfreinage pleine ép paroi ou tubulure lorsque $d \geq 2/3 R_i$

Assemblage non totalement péné et soudure unique autorisé si $d \leq 150$ mm et gorge $\geq 1,5$ ép la + faible.

Assemblage à 2 soudures admis pour $d \leq 2/3 R_i$ avec gorge $\geq 0,7$ ép la + faible.

selle-renfort autorisée si liée à la paroi par 2 soudures périphériques continues.

Piquages pénétrants, semi-pénétrants ou posés. Anneaux forgés, bossages usinés.

Piquage de petit dia --> rond chanfreiné posé avec avant trou. Perçage orifice après soudage.

Brides:

3 contraintes de traction: contrainte radiale (maxi à l'encastrement), contrainte longi et circonférencielle (sur dia int au niveau du plateau).

L'1 ou l'autre de ces contraintes est prépondérante selon forme bride.

Brides à collerette (monobloc): forgées, matricées ou moulées.

Usinage dans 1 tôle épaisse interdit.

Brides reconstituées à partir d'élt laminés, assemblés par soudure circulaire.

Plaques tubulaires:

Mêmes impératifs que les fonds plats.

Plaques débordantes: échangeurs. Tolérance de planéité pour portée joint étanchéité nécessite souvent un usinage après soudure.

Assemblage à double soudure: accès à la soudure int nécessite souvent de fractionner l'enveloppe.

Assemblage sur peau toléré si garantie dans le sens travers court.

Assemblage sur tranche partielle écarte le risque d'arrachement lamellaire.

Assemblage à soudure unique extérieure: chanfreinage total. Pas de corrosion.

Plaques tubulaires à collerette: assemblage BàB. Collerette forgée ou usinée.

Plaques non débordantes: voir fonds plats.

Assemblages tubes/plaques tubulaires:

tubes traversants: gorge réglementaire 1,5 e en l'absence de mandrinage (pour rés au cisaillement de l'assemblage).

Tubes non traversants: BàB sur la surf int des plaques (assemblage à l'abri de corrosion pe).
Réparation problématique en cas d'incident.

7) Appareils en acier revêtu:

Matériau trop coûteux pour réalisation en massif, cpt élast insuffisant, fragilisation lors du soudage impropre à la construction en massif.

Placage / doublage / rechargement.

Construction en acier plaqué: obtenu par co-laminage à chaud ou explosion.

Mise en forme avec écrouissage intense --> prudence.

Eviter TT, effets thermiques sévères en service.

Reconstitution locale du placage par soudage nécessite 1 dilution mini (SAEE, position montante à proscrire).

Assemblages accessibles sur les 2 faces sont les + simples et les + fiables.

Alignement des lignes de liaison placage/support en cas d'ép ≠.

Assemblages seulement accessibles sur la face non plaquée: MA relatif au placage (attention en ce cas aux carac méca de l'assemblage), ou couche de transition.

Cas des revêtements incompatibles (pas de dilution avec le Fe): doublage local avec bandelette soudée à clin.

Construction en acier doublé: surf interne "tapissée" de bandelettes minces (convient bien pour enveloppes cylindriques). Ne convient pas en fonctionnement sous vide.

BàB avec écartement: méthode des 3 passes à plat.

A recouvrement: bandelettes embouties et soudées à clin. Cordon discontinu hétérogène à l'abri de la corrosion.

Test étanchéité doublage par remplissage sous basse pression d'l gaz traceur (orifices dans la partie acier).

Constructions rechargée par soudage: revêtement métallurgiquement compatible.

Rechargement local en complément des techniques précédentes ou rechargement global.

Dilution contrôlée.

RESUME FATIGUE- MECANIQUE DE LA RUPTURE

Calcul de l'étendue de contrainte « particulière » (nominale calculée à partir de la RDM ou par éléments finis).

$\Delta\sigma$ (effort ΔF / moment ΔMt / pression ΔP / thermique / déplacement).

Ce chargement peut être unidirectionnel, bidirectionnel ou tridirectionnel.

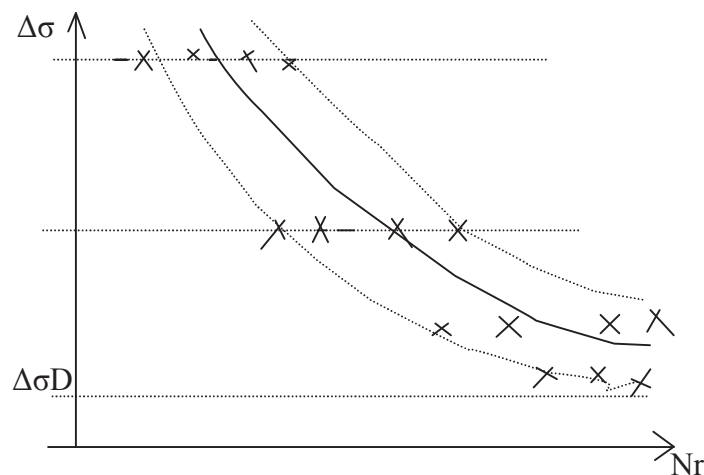
Il est répété dans le temps --> constant, constant par bloc ou aléatoire. La fréquence n'a pas d'effet sur la tenue en fatigue jusqu'à 80 Hz (sauf en corrosion).

3 types de documents de référence: règles CECM / Recommandations IIW / Eurocode.

Fatigue expérimentale- Courbes de Wöhler

Plusieurs essais de rupture --> dispersion des résultats (1 à 20).

Traitement statistique --> courbe moyenne.



N_r nombre de cycles à rupture.

$\Delta\sigma_D$ **limite d'endurance**. Définie à 5 millions de cycles en chargement constant dans le temps. 100 millions de cycles en chargement non constant.

En dessous de cette limite d'endurance il n'y a pas de risque de rupture par fatigue.

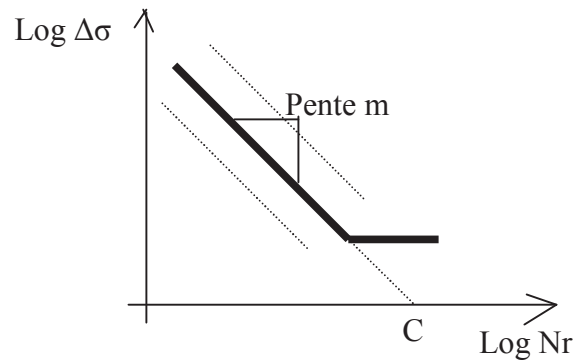
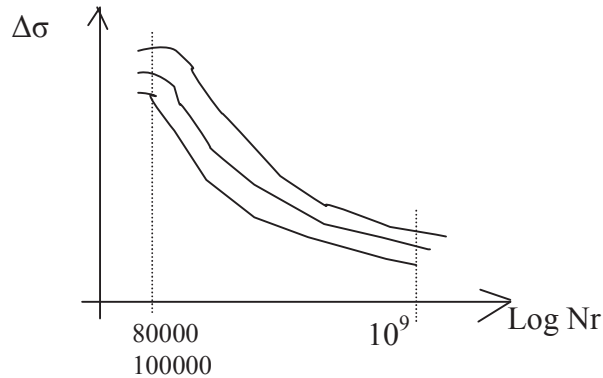
Courbe médiane: proba rupture 50%.

Courbes à 2 écarts type: basse --> proba non rupture à 95% / haute --> proba rupture à 95%.

Paramètres influençant la courbe de Wöhler:

- Matériau
- Environnement (corrosion, T° , érosion)
- Forme géom de la pièce (type d'assemblage)
- Défauts éventuels
- Epaisseur
- Procédé soudage
- Type de chargement (longi, transverse, torsion / traction, flexion)
- Rapport de charge R ($\sigma_{\text{mini}} / \sigma_{\text{maxi}}$). Si $1 > R > 0$ traction pure, si $R \leq 0$ alterné, si $R > 1$ compression pure.

2 représentations possibles:



En deçà de 80000/100000 cycles --> point d'inflexion sur la courbe : domaine de la **fatigue oligocyclique**.

2ème représentation **Droites SN**. $N_r = C / \Delta\sigma^m$. Domaine de la fatigue constante (jusqu'à $5 \cdot 10^6$ cycles); $m=3$ pour aciers (4,32 pour alu).

$m = 5$ (6,32 pour alu) au delà (et jusqu'à 10^8 cycles) domaine de la fatigue cste par bloc ou aléatoire. Voir document IIW / IIS en Anglais « Fatigue design of welded joints and components ».

Courbes valables:

pour des températures d'utilisation de 0 à 70/80°C.

Pour procédés à l'arc.

Pour épaisseur ≥ 3 mm

Pour nuances aciers S235 / S355 / HLE 460 / HLE 490 (par défaut pour HLE > 490).

Pour nuances Alu 5xxx / 6xxx / 7xxx, quels que soient leur état de TT et de corroyage.

Fatigue thermique = oligocyclique (nb de cycles faible).

Règle pour aciers, alu alliages Ti (pas pour les inox): $\Delta\sigma$ admissible à 2 millions de cycles = $2/3 Re$. $R \approx 0,1$.

Démarche globale de calcul:

définir le choix de la contrainte de référence

définir l'amplitude contrainte

définir la ou les zones à risque

choisir 1 doc de référence

choisir 1 classe de référence (type d'assemblage, type de chargement, zone de fissuration)

application de la loi de Miner (si chargement cst par bloc)

application des coeff minorateurs ou majorateurs (rapport de charge, défauts, ép...)

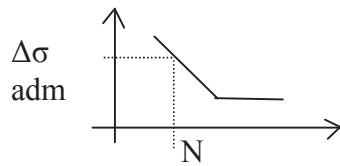
détermination des ép ou hauteur de gorge.

On utilise ces courbes:

soit pour vérifier 1 dimensionnement: faire d'abord 1 calcul statique pour définir les dim de l'assemblage. Efforts / moments appliqués sont connus --> on en déduit $\Delta\sigma$ appliquée.

Définir 1 durée de vie pour l'appareil --> nb de cycles N.

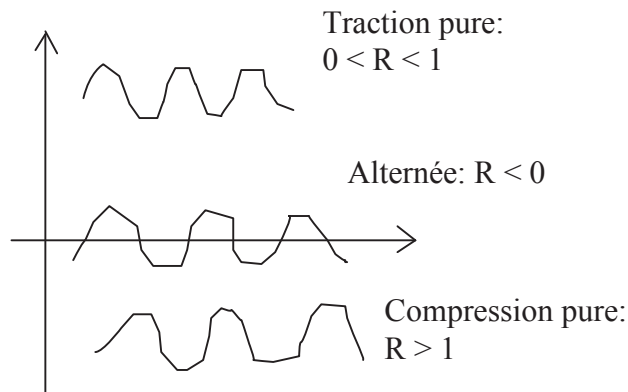
Avec la courbe SN associée on vérifie que $\Delta\sigma$ appliquée < $\Delta\sigma$ admissible (classe de détail FAT).



soit pour dimensionner: on connaît les efforts et moments et la durée de vie. On détermine $\Delta\sigma$ admissible par la courbe SN. $\Delta\sigma$ admissible = $\Delta F / S$; S section. On en déduit S (1 dimension est en général définie, on calcule donc 1 épaisseur, 1 valeur de gorge ou une inertie).

Effet du rapport de charge R:

Pièce sollicitée en compression uniquement --> durée de vie + importante. Contrainte en traction 1/3 plus faible (coeff de Poisson).



Doc IIW -> facteur correctif f(R) page 76.

Toutes les courbes sont valables pour R = 0,5 (cas de chargement le plus nocif).

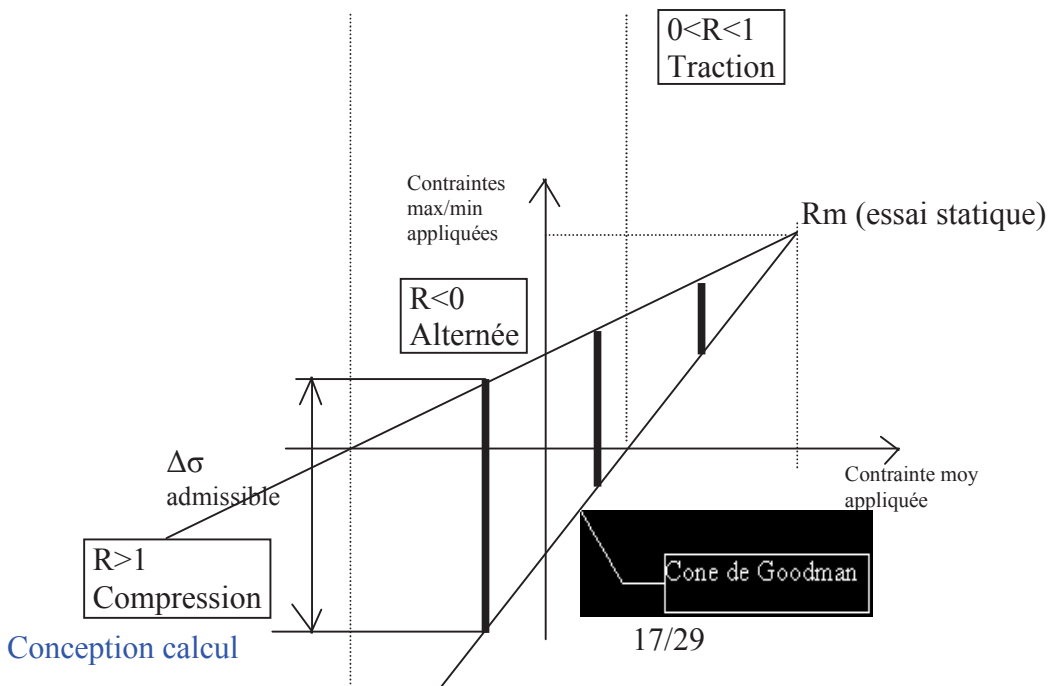
On multiplie la classe de fatigue par ce facteur f(R)

On distingue 3 cas (voir IIW page 76):

- I matériaux de base, profilés dont les contraintes résiduelles < 0,2 σ_e
- II petits éléments de soudure (goussets pe)
- III Structures complexes --> pas de correction.

Ceci est valable pour les aciers et les alu.

Diagramme de Goodman:



Il suffit de 3 points pour tracer ce diag. 1 essai statique + 1 essai maîtrisé en sollicitation pour 1 nb de cycles donné.

+ on travaille en traction + $\Delta\sigma$ se réduit.

Ce diag est moins pénalisant que le facteur $f(R)$.

Effet de l'épaisseur:

Voir doc IIW page 77. Facteur correctif $f(t) = (25/t)^n$ utilisé lorsque $t > 25$ mm.

n dépend du type de joint, du pied de cordon (brut ou meulé).

n varie de 0,1 à 0,3.

$f(t) < 1$ --> on abaisse la limite de fatigue pour les ép > 25 mm.

Effet de la température:

réduction de la classe de fatigue --> facteur (voir diag).

A basse T° σ_e augmente donc les classes de fatigue augmentent.

Cas des chargements constants par blocs:

2 méthodes: règle de Miner ou la règle de la contrainte équivalente. En cas de différence notable privilégier Miner.

Règle de Miner: loi d'endommagement linéaire. On somme les endommagements de chaque bloc. n_i nb de cycles pour chaque bloc. On calcule N_i pour chaque bloc (courbe de Wöhler).

Si $n/N < 1$ il n'y aura pas fissuration.

Donc $\sum (n_i / N_i) < 1$

Cette loi ne fonctionne pas toujours (en cas de sollicitations très fortes au départ puis faibles après on peut observer rupture - ce qui ne serait pas le cas dans l'ordre inverse).

Loi actuelle modifiée: $\sum (n_i / N_i) \leq 0,5$.

Cette loi encore insatisfaisante est encore en cours de modification.

Règle de la contrainte équivalente:

On se ramène à 1 chargement constant dans le temps mais équivalent en terme d'endommagement.



On a toujours le même nb de cycles.

$$\Delta\sigma_{eq} = \left(\frac{\sum (n_i \cdot \Delta\sigma_i^m)}{\sum n_i} \right)^{1/m}$$

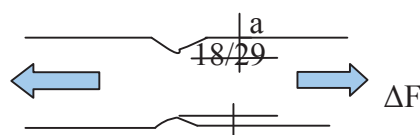
Il faut prendre en compte les facteurs de charge $R_1, R_2 \dots$

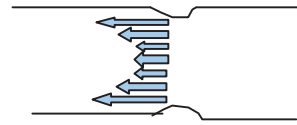
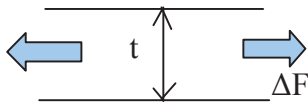
Paramètres affectant la tenue en fatigue:

Morphologie globale: soudure B à B, angle, à clin, par point.

Morphologie locale: concentrations de contraintes --> k_T élevés non maîtrisés.
effet géométrique. Influence l'état de contrainte: effet d'entaille par diminution de section.

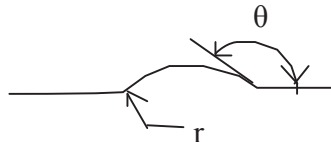
Conception calcul





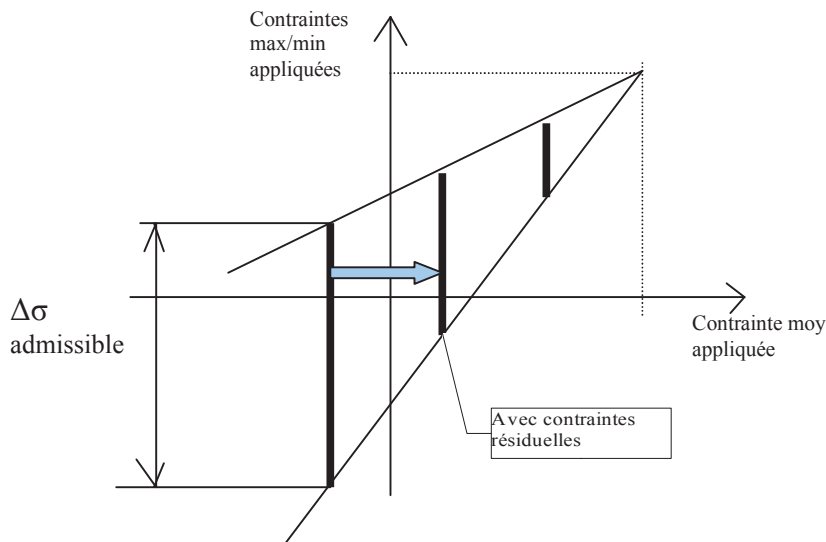
Pour avoir la même contrainte dans la zone de l'entaille: $\Delta F * (t-2a)/t$.
 On n'aura pas la même durée de vie même si on diminue ΔF dans le 2ème cas.

On augmente localement l'état de contrainte --> coeff de concentration de contrainte k_T .
 $k_T = \sigma_I / \sigma_{nominale} > 1$ (peut aller jusqu'à 15/20).
 Il existe des abaques pour déterminer k_T .
 Exemple: soudure bout à bout.



r rayon de raccordement / θ angle de raccordement.
 k_T varie de 1,5 à 4,5 selon r et θ . L'effet est très important ce qui explique la dispersion des résultats en fatigue (facteur de 2 entre soudure arasée et angle de 100°).
 Localement on peut atteindre σ_e . Plastification de la pièce --> amorce / propagation.
 Comportement élastique pur --> binaire (casse ou tient éternellement)
 Comportement élastoplastique --> courbe de Wöhler.
 1 assemblage en angle tient moins bien en fatigue qu'un bout à bout en général.

Contraintes résiduelles (bridage / transfo métallurgique): soudure détensionnée contraintes résiduelles proches de 0. Si soudure non détensionnée traction en peau / compression à coeur (pour 1 bout à bout). Ces contraintes s'ajoutent à celles du chargement.
 L'intervalle de contrainte admissible diminue (diag de Goodman).



C'est l'inverse si on se retrouve en compression (FE, laser pe).
 En fonctionnement en T° (150/200°C) les contraintes résiduelles se détensionnent (elles peuvent baisser jusqu'à 70%).

Hétérogénéité de la microstructure (ZF ZAT MB):
 En période d'amorçage et de propagation le rôle métallurgique est limité. Nr varie peu en final.
 Mécanisme de fissuration: 3 phases

amorçage: période très courte sur 1 cordon de soudure.

propagation --> cisaillement du grain à 45° (transgranulaire)

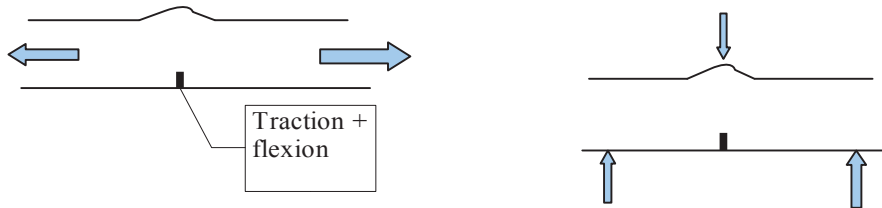
rupture --> propagation intergranulaire perpendiculairement à la sollicitation.

C'est la période de propagation qui fait la durée de vie sur un cordon de soudure.

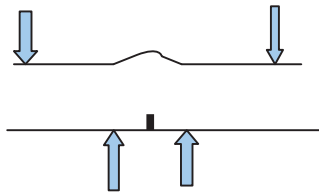
Défauts: la nocivité d'un défaut se juge par la dim, l'étendue et la nature du chargement.

Défaut acceptable ou non dépend de la sollicitation / orientation du défaut, des caractéristiques méca du matériau, de la T° de service et de la dim du défaut --> aptitude à l'emploi.

Pas acceptables:



Acceptable:



Il faut donc toujours associer 1 chargement avec 1 défaut pour savoir s'il est acceptable ou non.

-défauts plans: collage, manque de fusion, manque de péné, fissures. "Défauts durs".

Amorçage fissures en racine ou aux pieds de cordon. Très nocifs si perpendiculaires au chargement.

-défauts volumiques: inclusions, soufflures, porosités. "Défauts doux".

Porosités --> défaut le moins nocif. On définit 1 taux de porosité = surface affectée par porosités / surface totale.

Les codes limitent à entre 1 et 2%. Les taux critiques pour la tenue en fatigue sont de l'ordre de 10 à 20%. Pas d'étude sur soufflures vermiculaires. Soufflure $k_T = 2$.

Inclusions: pas d'études sur le sujet. Mais formes différentes des sphères --> coins saillants et donc k_T élevés. Plus nocifs que les porosités.

Défaut elliptique (inclusions): $k_T = 1 + 2(a/b)$; k_T mini = 3

-défaut de forme: caniveau (entre les 2 précédents) --> concentration de contrainte.

k_T varie de 2 à 6 en fonction de la profondeur et du rayon de raccordement. Rechercher cordon concave, sans excès de matière.

-désalignement de tôle: peut être très pénalisant. Introduction de moment "parasites" supplémentaires qui augmentent la contrainte réelle en pied de cordon.

Règles: 20% de désalignement --> 60% de contrainte en +

40% de désalignement --> 120% de contrainte en +. C'est 1 loi linéaire.

Norme: désalignement admissible jusqu'à 30% de l'ép.

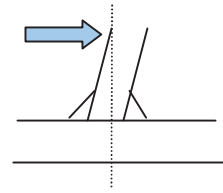
Ceci explique également la dispersion des courbes de fatigue.

Les courbes IIW ont pris en compte ces défauts --> ce sont les plus basses.

Si la géométrie est soignée on peut utiliser des courbes + hautes.

-déflexion de tôle: 2 paramètres --> angle de déflexion et longueur pièce.

Déflexion angulaire acceptable jusqu'à 12° (la norme ne définit qu'un angle mais pas 1 bras de levier). Très significatif en fatigue si sollicitation en traction.
 En flexion transversale pas d'effet nocif du défaut angulaire:



-Faux rond sur tube: en service la virole se regabarise. Zones en traction et zones en compression.

Approche locale

Sur 1 petit élément de volume. Repère local.

Critère de fatigue multiaxé.

Contrainte nominale déterminée par la RDM ou calcul par éléments finis si pièce de forme particulière.

Contrainte géométrique déterminée par la méthode du point chaud ou par méthode expérimentale (jauges de déformation).

Contrainte locale: calcul ou mesure aux points spécifiés.

Détermination des contraintes principales: $\sigma_I > \sigma_{II} > \sigma_{III}$; σ_{II} et σ_{III} perpendiculaires à σ_I

Contrainte de Tresca (cisaillement): $\tau_{max} = (\sigma_I - \sigma_{III}) / 2$

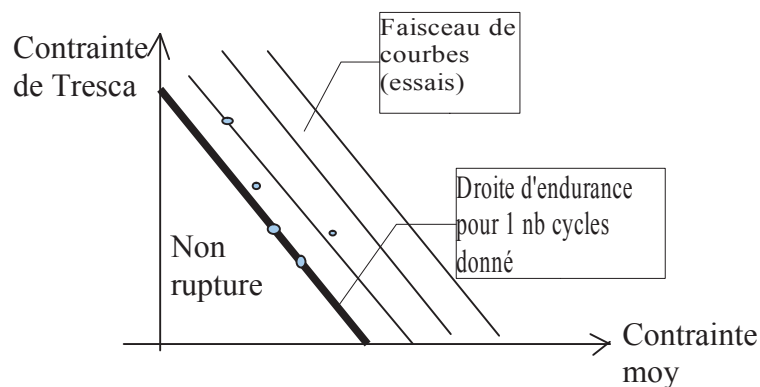
Tresca fatigue = $(\sigma_{I_{max}} - \sigma_{III_{min}}) / 2$

Contrainte moyenne ou hydrostatique $P = (\sigma_I + \sigma_{II} + \sigma_{III}) / 3$

Critère de Dang Van:

$\tau_{max} + P_{max} * \alpha < \beta$ --> équation d'1 droite.

α et β sont déterminés expérimentalement.



Cette droite est valable quel que soit l'assemblage, la forme, le défaut.

C'est 1 carac intrinsèque du matériau (1 courbe = 1 matériau).

Le chemin de fissuration est perpendiculaire à σ_I .

Théorie relativement nouvelle, déjà utilisée dans l'automobile, les transports...

Critère puissant, amené à être de + en + utilisé.

Mécanique de la rupture

Théorie relativement récente (1940). Apparue avec les problèmes des Liberty ships (rupture de bateaux). Rupture fragile.

Présence de défauts plans (MIG) + chargement + T° basse + contraintes résiduelles.

Mécanique de la rupture = étude de la qualité d'un matériau à être capable d'accepter 1 défaut.

3 cpt possibles du matériau en présence d'1 défaut: MLR / MEPR ou instabilité plastique.

Essai de résilience: Sensibilité du matériau à l'effet d'entaille.

En > 27 J/cm² --> rupture ductile. c'est 1 valeur expérimentale / empirique.

L'éprouvette de résilience contient 1 défaut mais qui n'est pas plan.

Essai avec fissure: but -> estimer le k_T.

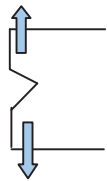
k_T = σ_{max} / σ_{nom} fonction du rayon en fond de fissure.

Mécanique de la rupture linéaire: MLR --> ténacité.

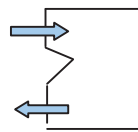
Zone plastique très limitée / propagation rapide et instable de la fissure (HLE pe).

K_I facteur d'intensité de contrainte en mode I

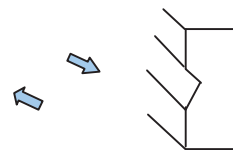
Mode I:
ouverture



Mode II:
cisaillement longi



Mode III:
cisaillement perpendiculaire



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

Modèle mathématique: K_I = C * σ_{nom} * √(π*a) en MPa√m ou MPa√mm.

C est 1 cste.

K_I est utilisé dans le cadre de **rupture fragile**. Il reflète la redistribution des contraintes à l'extrémité de la fissure.

C'est 1 carac intrinsèque du matériau.

K_{IC} est la valeur critique du facteur d'intensité de contrainte. K_I < K_{IC} situation d'équilibre.

$$K_{IC} = C * \sigma_{nomc} * \sqrt{\pi*a} \text{ ou } = C * \sigma_{appl} * \sqrt{\pi*a_c}$$

a: défaut fini a_c: dimension critique de défaut.

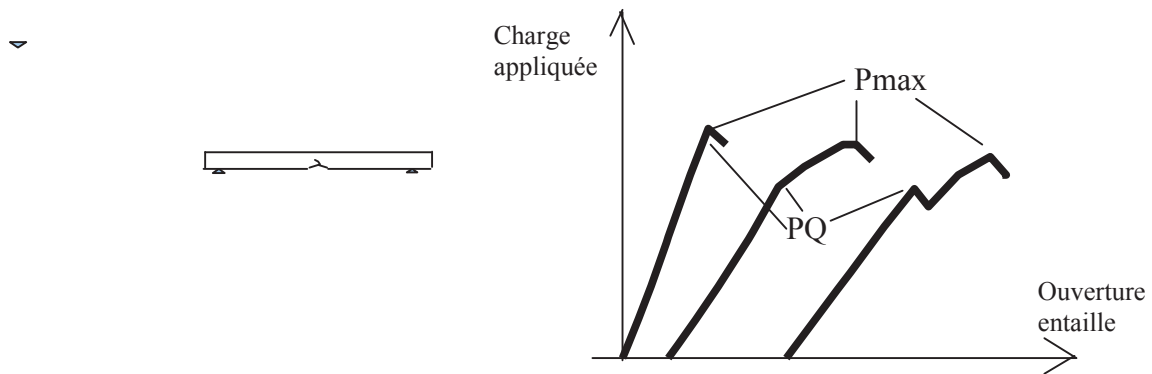
K_{IC} est affecté par la triaxialité des contraintes, la T°, la vitesse de déformation et l'acuité du défaut.

Il varie avec l'ép (diminue quand ép augmente / domaine de transition) jusqu'à 1 certaine ép H. Au delà de H K_{IC} est cst.

Essai pour calculer K_{IC}: état de déformation plane (chargement de flexion en 3 pts CENB ou traction CT).

Charge statique. On relève la courbe charge appliquée/ouverture. Préfissuration par fatigue (fissure de fatigue est le cas le + sévère --> on s'affranchit du paramètre "acuité du défaut").

On obtient PQ, on calcule KQ en fonction de PQ.



Critères à respecter pour que $KQ = K_{IC}$:

- a et $B > 2,5 (KQ / Re)^2$; a profondeur ou longueur fissure, B ép éprouvette.
- $P_{max}/PQ < \text{ou} = 1,1$
- angle déviation fissure maxi 10°

Si ces 3 conditions ne sont pas remplies, c'est que l'on a intégré 1 cpt plastique.
 K_{IC} dépend de la T° d'essai et de l'ép de l'éprouvette. Essai valide signifie que l'ép n'influe pas.
 Globalement il varie de 45 à 200 $MPa\sqrt{m}$.
 K_{IC} peut aussi être évalué en fonction de la résilience.

Mécanique élasto-plastique de la rupture MEPR: zone de transition -> risque de rupture élasto-plastique. Déformations plastiques confinées dans 1 zone à comportement élastique.

Matériaux ductiles (aciers basses carac, inox).

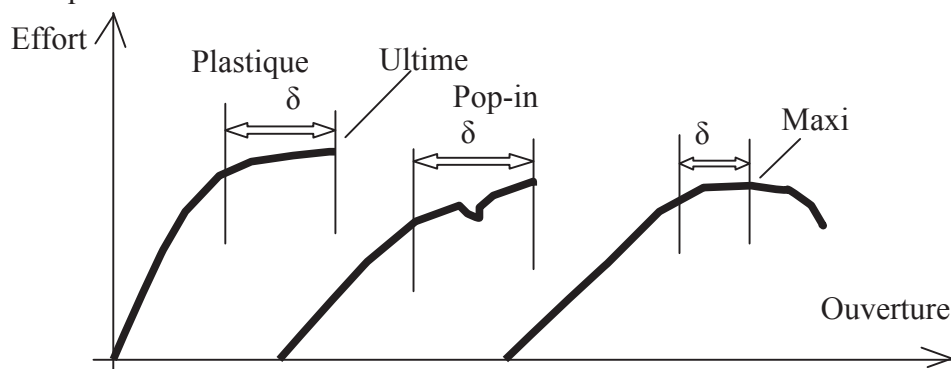
Phéno en 3 phases: amorçage fissure / propagation stable / propagation rapide et instable.

Passage progressif d'1 état linéaire élastique à 1 état de ruine plastique.

K_{IC} ne signifie plus rien.

On définit le **CTOD** (Crack Tip Opening Displacement). C'est l'ouverture en fond de fissure à partir de laquelle il y a propagation stable de la fissure. Augmente avec la ductilité du matériau.

Essai identique au KIC



On mesure 1 valeur δ (ouverture en mm).

Si $\delta < 0,1$ mm on peut calculer K_{IC}

Si $0,1 < \delta < 0,7$ mm --> zone de transition (CTOD).

$\delta > 0,7$ mm --> état parfaitement ductile.

Autre méthode: intégrale J (énergétique) --> travail absorbé. Paramètre J de Rice.

Ductilité pure:

Contrainte d'écoulement plastique = contrainte qui amène à la rupture au bout de qqes s ou min.

$$\approx (\sigma_e + \sigma_u) / 2$$

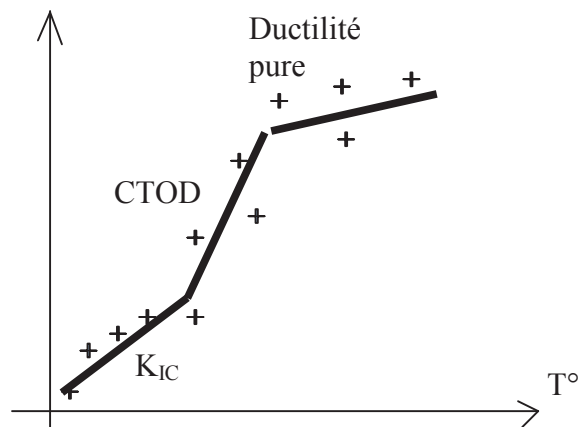
Récapitulatif:

Fragile: calcul du K_{IC} permet de définir a_c ou σ_c par la formule $K_{IC} = C * \sigma * \sqrt{(\pi*a)}$

Elasto-plastique : CTOD ou J permet de définir l_a admissible ou σ admissible < valeurs critiques. Attention à la grande dispersion des résultats.

Ductilité pure: σ écoulement plastique permet de calculer 1 section résistante.

La courbe complète est la courbe de transition:
qualité d'un matériau en présence d'un défaut - pour une T° donnée.



Méthode des 2 critères:

la rupture fragile est instantanée (qqs dixième de s), la rupture ductile varie entre 2s et 15 mn.

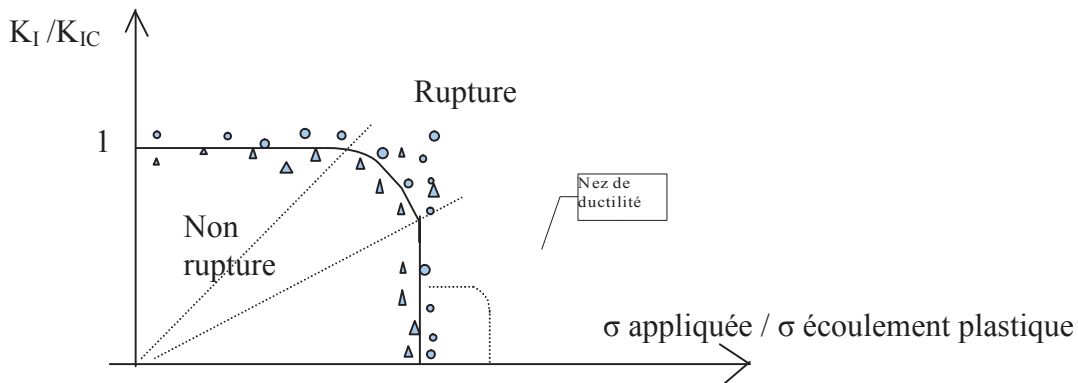


Diagramme de niveau 2.

Tronqué dans la zone de dispersion des résultats (zone de transition).

Diagramme de niveau 3: présente 1 nez de ductilité --> matériaux capables de déplacer la limite d'écoulement plastique (Inconels, certains inox).

Fatigue en mécanique de la rupture:

Variation du facteur d'intensité de contrainte $\Delta K_I = C_1 * \Delta\sigma_{nom} \sqrt{\pi a}$

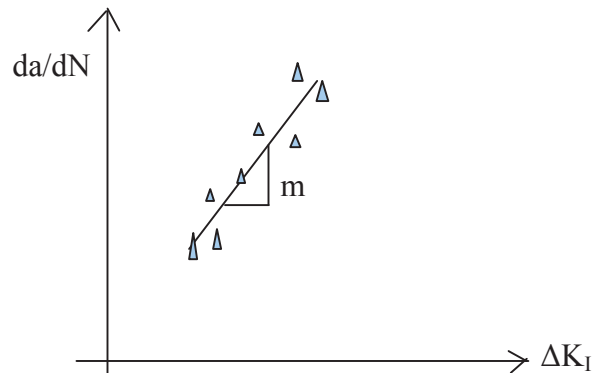
D'où:

$$\Delta\sigma_{nom} = \Delta K_I / (C_1 * \sqrt{\pi a})$$

Essais particuliers.

loi de fissuration: da variation du défaut à chqe dN.

da / dN vitesse de propagation = $C_2 * (\Delta K_I)^m$ m idem courbe de Wöhler



$dN = da / (C_2 * (\Delta K_I)^m)$ --> durée de vie de la pièce $N = \int_{a_0}^{a_f}$

avec $\Delta K_I = C_1 * \Delta\sigma \sqrt{\pi a}$

a_f taille du défaut quand $K_I = K_{IC}$

a_0 = mesuré / estimé

Intégration pas à pas:

$$N = 1 / (C \Delta\sigma^m) \int da / (M(a)^{m/2} * a^{m/2})$$

Calcul / conception des assemblages en alliages d'aluminium

Eurocode 9.

Règles de transposition: règles basiques adaptées au matériau de base mais pas au cordon de soudure.

Critères de résistances (rés équivalente à acier):

Traction: $S_{\text{alu}} = S_{\text{acier}} * Re_{\text{acier}} / Re_{\text{alu}}$

Flexion: $I/v_{\text{alu}} = I/v_{\text{acier}} * Re_{\text{acier}} / Re_{\text{alu}}$

Tôle: $e_{\text{alu}} = e_{\text{acier}} * \sqrt{(Re_{\text{acier}} / Re_{\text{alu}})}$

Critères de déformation (flèche équivalente à acier):

Traction: $S_{\text{alu}} = 3 * S_{\text{acier}}$

Flexion: $I_{\text{alu}} = 3 * I_{\text{acier}}$

Tôles: $e_{\text{alu}} = 1,45 * e_{\text{acier}}$.

Calcul des joints soudés:

idem aux aciers.

On introduit 3 coefficients supplémentaires par rapport aux aciers.

Coeff de qualité d'exécution α : caractérise la qualification du soudeur, le contrôle effectué, l'appréciation de la difficulté de réalisation de la soudure.

$\alpha = 1$ si soudure exécutée dans de bonnes conditions + contrôle radio.

Sinon $\alpha = 0,8$ si pièce sollicitée en traction/flexion (= 1 si compression pure).

Coeff d'affectation métallurgique β : caractérise l'abaissement des carac méca du à la chaleur de soudage arc (notion de ZAT).

Valeurs expérimentales fonction de la nuance, du procédé, ép, prépa et MA.

$0,4 < \beta < 1$

Coeff d'abattement γ : pour assemblages soudés en angle.

$0,7 < \gamma < 1$

Notion de largeur de zone de résistance réduite de part et d'autre du cordon. variation très progressive des carac méca au voisinage de la soudure avec mini au milieu du cordon.

Largeur de zone de rés réduite et largeur de ZAT dépendent du MB, de son état de livraison, de l'ép, prépa bords, procédé.

Valeurs généralement admises: pas de zone de rés réduite pour les états recuits, largeur 25 mm de part et d'autre de l'axe de la soudure pour les autres.

Sur les constructions Alu la méthode de conception est importante. Privilégier l'utilisation des profilés.

Ex: PRS en I --> calcul τ parallèle à la racine pour vérifier qu'il n'y a pas risque de fissuration.

Version alu --> 2 profilés en T raboutés --> pas de vérif de cordon car il se trouve en fibre neutre (zone de contraintes nulles en flexion).

Comparatif fatigue: le document de référence est primordial. CECM est basé sur des essais. Il est + proche de la réalité et est - pénalisant.

BàB en traction: 2.10^6 cycles --> CECM classe 50 MPa si angle $> 150^\circ$, 45 si angle $> 130^\circ$ (Doc IIW respectivement 40 et 32).

Angle sollicité en transversal / fissure en pied de cordon --> CECM 30MPa IIW 22
Angle sollicité en transversal / fissure en racine --> CECM 25 IIW 16.

Effet du rapport de charge: coeff multiplicateur $f(R)$ comme l'acier.

I matériau de base: $1 \leq f(R) \leq 1,6$

II "petite soudure": $1 \leq f(R) \leq 1,3$

III "grande soudure" avec chargement multidirectionnel: $f(R) = 1$

Effet de l'épaisseur: coeff = $(t/25)^{0,25} < 1$ c'est 1 coeff minorateur (pour ép > 25 mm).

Traitements de parachèvement

Permettent d'améliorer le comportement en fatigue des assemblages soudés. Agissent sur la période d'amorçage uniquement (pas d'action sur la période de propagation).

Effet de forme prépondérant sur la tenue à la fatigue (+ que la nuance de l'acier).

S'il n'y a pas de défaut interne les fissures démarrent toujours de la surface.

Donc éviter les manques de péné internes si parachèvement externe (rupture interne).

On peut combiner les différents procédés de parachèvement (martelage/grenailage toujours en dernier).

2 types de parachèvement:

1) Modification de la forme du cordon: forme concave

Meulage/usinage: but --> augmenter les rayons de raccordement et donc baisser k_T .

$r > 2,5$ mm k_T acceptable. Gain possible de 50% sur limite d'endurance.

Sens de meulage dans le sens des efforts. Stries parallèles à la direction de l'effort.

Permet aussi d'éliminer les inclusions de laitier et microfissures.

Profondeur 0,5 à 0,8 mm maxi 2 ou 5% ép pièce.

Refusion TIG: idem. $r > 3$ mm k_T acceptable. Applanissement des profils de raccordement + enlèvement défauts de soudage.

Passe sans MA. Forte énergie et grande vitesse.

Axe de l'arc proche du raccordement et dirigé vers le MB.

2) Modification du champ de contraintes résiduelles: supprimer les contraintes de traction ou introduire des contraintes de compression. Attention ces contraintes introduites doivent être de signe opposées aux contraintes de service.

+ l'acier de base a des carac élevées + l'effet est important.

Grenailagede précontrainte: introduction de contraintes de compression sur peaux extérieures (supérieures à $0,5 Re$ au + égales à Re). Gain peut être de l'ordre de 100%.

Billes compatibles métallurgiquement avec le métal de base.

Paramètres : nature des billes, dia des billes, intensité (énergie de bombardement, tps de bombardement), taux de recouvrement (taux d'impact).

La couche affectée par le grenailage est de 2 à 3 dixième maxi.

Pièce sollicitée en fatigue ou en corrosion sous contrainte.

Martelage: 2 rôles --> relaxation des contraintes entre passes / augmentation de la tenue à la fatigue d'1 cordon terminé. Gain mini observable $\approx 35\%$.

Paramètres du martelage: nb de passes, vitesse d'avance, nb d'aiguilles, puissance de frappe.

C'est 1 opérateur qui martèle et non le soudeur.

Efficace en cas de réparation sur pièces mécaniques avec tolérances dim. Pièces épaisses (> 30 mm).

Pas de martelage des passes de fond. MA de grande ductilité. Martelage en zone centrale du cordon.

Progression du remplissage à profil concave. Pas de martelage de la dernière passe (risque vieillissement).

Martelage US: très localisé (sur endroits utiles seulement).

Gain peut être important (100 à 300% sur la limite de fatigue). Modification du profil de raccordement + introduction de fortes contraintes de compression.

Compression mécanique locale: poinçon placé aussi près que possible de l'entaille à traiter.
Zone comprimée localement - charge $> 2 Re$.

Traitement de sursollicitation: mise en traction d'1 pièce, épreuve règlementaire pour appareils à pression, épreuve sous charge pour ouvrage d'art. On utilise le phéno de plastification. Chargement de l'ordre de 85 à 90% de Re suffit. Contraintes résiduelles de compression dans les zones de concentration de contraintes.

Traitement thermique de détensionnement: élimine les contraintes résiduelles de traction. Réservé aux zones inaccessibles ou difficilement accessibles.
2 phéno entrent en jeu: effondrement de Re avec la T° + fluage isotherme (avec variation du module d'élasticité).
Procéder par sections droites isothermes (gradient de T° constant - c'est la dérivée du gradient qui fait les contraintes) en cas de traitement localisé.
Taux de relaxation = $(\sigma_i - \sigma_f) / \sigma_i$. En général on recherche 80/85%.
Paramètre d'Hollomon et Jaffé: P ou $H = T (20 + \log t)$. Paramètre de fluage.
 T en absolu (K).
Abaques donnant le taux de relaxation en fonction de ce paramètre P (ou H).

Chauffage localisé: s'utilise sur entailles localisées. Centre région chauffée sur le trajet que suivrait la fissure de fatigue. Ligne joignant le centre zone chauffée à l'entaille perpendiculaire à la direction des contraintes. Ne s'applique pas sur les aciers trempants.

Procédé thermomécanique Linde: étirage méca d'1 soudure longi par chauffage localisé de part et d'autre avec ref derrière pour éviter de chauffer toute la plaque (T 170/200°C). On reste dans la domaine élastique (contrairement à 1 chaude de retrait). Dilatation des zones comprimées situées de part et d'autre du cordon --> étirage du cordon --> redistribution plus homogène des contraintes résiduelles longi.

Traitement par vibration: pièce soumise à vibration de fréquence voisine de sa fréquence propre. Avis très partagé.
Efficace au niveau déformation (recherche de stabilité dimensionnelle). Pas d'action visible sur les contraintes résiduelles en surf.