

ICS 91.010.30; 91.080.10

Version Française

Eurocode 9: Calcul des structures en aluminium - Partie 2: Structures sensibles à la fatigue

Eurocode 9: Bemessung und Konstruktion von
Aluminiumbauten - Teil 2: Ermüdungsanfällige Tragwerke

Eurocode 9: Design of aluminium structures - Part 2:
Structures susceptible to fatigue

La présente Prénorme européenne (ENV) a été adoptée par le CEN le 26 octobre 1997 comme norme expérimentale pour application provisoire.

La période de validité de cette ENV est limitée initialement à trois ans. Après deux ans, les membres du CEN seront invités à soumettre leurs commentaires, en particulier sur l'éventualité de la conversion de l'ENV en Norme européenne.

Il est demandé aux membres du CEN d'annoncer l'existence de cette ENV de la même façon que pour une EN et de rendre cette ENV rapidement disponible au niveau national sous une forme appropriée. Il est admis de maintenir (en parallèle avec l'ENV) des normes nationales en contradiction avec l'ENV en application jusqu'à la décision finale de conversion possible de l'ENV en EN.

Les membres du CEN sont les organismes nationaux de normalisation des pays suivants: Allemagne, Autriche, Belgique, Danemark, Espagne, Finlande, France, Grèce, Irlande, Islande, Italie, Luxembourg, Norvège, Pays-Bas, Portugal, République Tchèque, Royaume-Uni, Suède et Suisse.



COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION
EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG
EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION

Secrétariat Central: rue de Stassart, 36 B-1050 Bruxelles

Sommaire

Avant-propos.....	4
1 Généralités.....	7
1.1 Objet de la partie 2 de l'Eurocode 9.....	7
1.2 Références normatives.....	9
1.3 Distinction entre principes et règles d'application.....	9
1.4 Hypothèses.....	10
1.5 Définitions.....	10
1.6 Symboles.....	15
1.7 Documents de calcul.....	16
2 Base de calcul.....	17
2.1 Généralités.....	17
2.2 Calcul de la durée de vie utile.....	19
2.3 Calcul de la tolérance aux dommages.....	20
2.4 Calcul assisté par essais.....	23
3 Charges.....	24
3.1 Sources des charges de fatigue.....	24
3.2 Calcul des charges de fatigue.....	24
3.3 Charge de fatigue équivalente.....	25
3.4 Facteurs partiels de sécurité pour la charge de fatigue.....	25
4 Analyse des contraintes.....	26
4.1 Analyse globale des contraintes.....	26
4.2 Applicabilité des contraintes nominales, des contraintes nominales modifiées et des contraintes au point chaud.....	27
4.3 Calcul des contraintes.....	28
4.4 Paramètres de plages de contraintes pour amorces spécifiques.....	31
4.5 Spectres de contraintes.....	32
5 Résistance à la fatigue.....	34
5.1 Catégories d'éléments.....	34
5.2 Données relatives à la résistance à la fatigue.....	35
5.3 Effet de la contrainte moyenne.....	49
5.4 Effet du milieu ambiant.....	49
5.5 Techniques d'amélioration.....	50
6 Exigences de qualité.....	50
6.1 Détermination du niveau de qualité requis.....	50
6.2 Désignation des niveaux de qualité sur les plans.....	51
6.3 Evaluation de l'aptitude à l'emploi.....	52
Annexe A (informative) Analyse des contraintes.....	53
A.1 Utilisation des éléments finis pour l'analyse de la fatigue.....	53
A.2 Facteurs de concentration des contraintes.....	54
A.3 contraintes au point chaud.....	54
A.4 Références.....	55
Annexe B (informative) Guide d'évaluation par la mécanique de la rupture.....	58
B.1 Domaine d'application.....	58
B.2 Principes.....	58
B.3 Valeurs A et m des données de propagation des fissures.....	59
B.4 Fonction géométrique y	67
B.5 Intégration de la propagation des fissures.....	67
B.6 Evaluation de la dimension de fissure a_2 maximale.....	67
B.7 Calculs de la longueur de fissure initiale, a_i , sur la base des données relatives à la vitesse de propagation des fissures par fatigue (FCGR) et des contraintes de référence par fatigue à 2 millions de cycles pour une fissure superficielle semi-circulaire.....	69
B.8 Références.....	70

Annexe C (informative) Essais de calcul de la fatigue	76
C.1 Calcul des données relatives aux charges	76
C.2 Calcul des données relatives à la contrainte	77
C.3 Calcul des données d'endurance	78
C.4 Données relatives à la propagation des fissures	79
C.5 Rapport	79
Annexe D (normative) Niveaux d'acceptation de contrôle et d'exécution	81
D.1 Joints soudés	81
D.1.2 Maîtrise de la qualité de soudage	81
D.2 Pièces coulées	88
Annexe E (informative) Soudures d'amélioration de la résistance à la fatigue	89
E.1 Généralités	89
E.2 Usinage ou meulage	90
E.4 Martelage	90
Annexe F (informative) Fatigue oligocyclique	91
F.1 Introduction	91
F.2 Modification des courbes $\Delta\sigma-N$	91
F.3 Données d'essai	91
Annexe G (informative) Influence du rapport R	93
G.1 Amélioration de la résistance à la fatigue	93
G.2 Exemples d'amélioration	93

Avant-propos

Le présent document a été préparé par le CEN /TC 250 "Eurocodes Structuraux".

Selon le Règlement Intérieur du CEN/CENELEC, les instituts de normalisation nationaux des pays suivants sont tenus d'annoncer ce document : Allemagne, Autriche, Belgique, Danemark, Espagne, Finlande, France, Grèce, Irlande, Islande, Italie, Luxembourg, Norvège, Pays-Bas, Portugal, République Tchèque, Royaume-Uni, Suède et Suisse.

Objectifs des Eurocodes

Les Eurocodes structuraux constituent un ensemble de normes pour le calcul structural et géotechnique des bâtiments et des ouvrages de génie civil.

Ils sont destinés à servir de documents de référence pour :

- a) prouver la conformité des bâtiments et des ouvrages de génie civil aux exigences essentielles de la Directive sur les Produits de Construction (DPC) ;
- b) servir de cadre pour établir des spécifications techniques harmonisées pour les produits de construction.

Ils ne traitent de l'exécution et du contrôle que dans la mesure où il est nécessaire de préciser la qualité des produits de construction et le niveau de réalisation nécessaire pour être conforme aux hypothèses adoptées dans les règles de calcul.

Jusqu'à ce que l'ensemble nécessaire des spécifications techniques harmonisées concernant les produits et les méthodes de contrôle de leurs performances soit disponible, certains Eurocodes structuraux traitent certains de ces aspects dans des annexes informatives.

Historique du programme Eurocodes

La Commission des Communautés Européennes (CCE) a initié le travail d'élaboration d'un ensemble de règles techniques harmonisées concernant le calcul des bâtiments et des ouvrages de génie civil, règles destinées, au début, à être utilisées en alternative aux différents règlements en vigueur dans les divers Etats Membres et à les remplacer ultérieurement. Ces règles techniques sont connues sous le nom d'« Eurocodes structuraux ».

En 1990, après consultation de ses Etats Membres, la CCE a transféré au CEN la charge de poursuivre le travail d'élaboration, de diffusion et de mise à jour des Eurocodes structuraux, et le secrétariat de l'AELE a accepté de soutenir le CEN dans son travail.

Le Comité technique CEN/TC 250 est responsable de tous les Eurocodes structuraux.

Programme Eurocodes

Le travail est en cours sur les Eurocodes structuraux suivants, chacun étant généralement constitué de plusieurs parties :

ENV 1991	Eurocode 1	Bases de calcul et actions sur les structures
ENV 1992	Eurocode 2	Calcul des structures en béton
ENV 1993	Eurocode 3	Calcul des structures en acier
ENV 1994	Eurocode 4	Calcul des structures mixtes acier-béton
ENV 1995	Eurocode 5	Calcul des structures en bois
ENV 1996	Eurocode 6	Calcul des structures en maçonnerie

ENV 1997	Eurocode 7	Calcul géotechnique
ENV 1998	Eurocode 8	Résistance des structures aux séismes
ENV 1999	Eurocode 9	Calcul des structures en aluminium

Des sous-comités séparés, chargés des différents Eurocodes énoncés ci-dessus, ont été constitués par le CEN/TC 250.

Cette partie de l'Eurocode structural concernant la conception et le dimensionnement des structures en alliage d'aluminium, dont le CCE a effectué la finalisation et approuvé la publication, est publiée par le CEN comme prénorme européenne (ENV) pour une durée initiale de trois ans.

Cette prénorme est destinée à une application expérimentale dans le cadre de la conception et du dimensionnement des bâtiments et des ouvrages de génie civil relevant du domaine d'application défini en 1.1, et au recueil d'observations.

Dans deux ans environ, les Membres du CEN seront invités à formuler des observations officielles qui seront prises en compte pour déterminer les actions futures.

En attendant, il convient d'adresser les réactions et les observations sur cette prénorme au secrétariat du sous-comité CEN/TC 250/SC 9 à l'adresse suivante :

Secrétariat du CEN/TC 250/SC 9
c/o Norwegian Council for Building Standardization
Postboks 129 Blindern
N-0314 OSLO

ou à votre organisme national de normalisation.

Documents d'Application Nationale (DAN)

Etant données les responsabilités des autorités dans les Etats Membres en matière de sécurité, santé et autres points couverts par les exigences essentielles de la DPC, des valeurs indicatives ont été attribuées à certains éléments de sécurité dans cette ENV qui sont identifiées par [...]. Il incombe aux autorités de chaque Etat Membre d'attribuer des valeurs définitives à ces éléments de sécurité.

Certaines des prénormes d'accompagnement harmonisées, y compris les Eurocodes donnant les valeurs des actions à prendre en compte ainsi que les mesures requises pour la protection contre l'incendie, peuvent ne pas être disponibles au moment de la publication de cette prénorme. Il est par conséquent prévu qu'un « Document d'Application Nationale » (DAN) donnant les valeurs définitives des éléments de sécurité, faisant référence aux normes d'accompagnement compatibles et précisant les directives nationales d'application de cette prénorme, soit publié par chaque Etat Membre ou son organisme de normalisation.

Il est prévu que cette prénorme européenne soit utilisée conjointement avec le DAN en vigueur dans le pays où est situé le bâtiment ou l'ouvrage de génie civil.

Points spécifiques à cette prénorme

Généralités

L'objet de l'Eurocode 9 ainsi que celui de la présente partie de l'Eurocode 9 sont définis en 1.1.

Lors de l'utilisation de cette prénorme dans la pratique, il convient de prêter une attention toute particulière aux hypothèses et conditions sous-jacentes indiquées en 1.4.

Lors de l'élaboration de la présente prénorme, des documents de base ont été établis, qui contiennent des observations et des justifications relatives à certaines dispositions de la prénorme.

Utilisation des annexes

Les six articles de la présente prénorme sont complétés par cinq annexes, dont certaines sont de nature normative et d'autres sont de nature informative.

Les annexes normatives ont le même statut que les articles auxquels elles se rapportent. La plupart d'entre elles ont été intégrées en retirant certaines des règles d'application les plus détaillées, nécessaires uniquement dans les cas particuliers, de la partie principale du texte afin de faciliter sa clarté.

Notion de normes de référence

Afin d'utiliser cette prénorme, il est nécessaire de faire référence à diverses normes CEN ou ISO. Ces dernières servent à définir les caractéristiques de produit et les procédés jugés par hypothèse applicables dans la formulation des règles de calcul.

Cette prénorme mentionne certaines « Normes de référence ». Chaque norme de référence se réfère, totalement ou en partie, à un certain nombre de normes CEN et/ou ISO. Lorsqu'aucune norme CEN ou ISO citée en référence n'est encore disponible, il convient de consulter le Document d'Application Nationale pour connaître la norme à utiliser. Il est supposé que seules les nuances et qualités données dans l'annexe normative B de la partie 1-1 seront utilisées pour les bâtiments et les ouvrages de génie civil dimensionnés selon la présente prénorme.

Facteurs partiels de sécurité

La présente prénorme donne les règles générales de calcul des structures en aluminium qui se rapportent aux états-limites des éléments et assemblages qui impliquent une rupture de la structure par fatigue.

La plupart des règles ont été étalonnées par rapport à des résultats d'essai afin d'obtenir des valeurs cohérentes des facteurs partiels de sécurité pour la résistance γ_{Mf} .

Des facteurs partiels appropriés γ_{Ff} de chargement font l'objet de directives lorsque le chargement ne peut être obtenu à partir des codes existants en la matière.

Construction et montage

L'article 6 de la présente prénorme est destiné à indiquer un certain nombre de niveaux minimums de réalisation et de tolérances normales dont sont issues les règles de calcul données dans cette prénorme.

Il fournit également les informations relatives aux éléments spécifiques d'une structure soumis à la fatigue que doit fournir le concepteur afin de définir les exigences de réalisation et de maintenance.

Calcul assisté par essais

En règle générale, la méthode de calculs de routine ne nécessite pas l'indication du paragraphe 2.4, mais requiert toutefois son utilisation, ainsi que celle de l'annexe C, dans des circonstances particulières pour lesquelles elle peut être appropriée.

1 Généralités

1.1 Objet de la partie 2 de l'Eurocode 9

1.1.1 Application

(1) La présente partie 2 constitue la base de calcul des structures en alliage d'aluminium eu égard à l'état-limite de la rupture par fatigue. La partie 1 traite du calcul des autres états-limites.

(2) La présente partie 2 donne les règles des méthodes de calcul suivantes :

- durée de vie utile ;
- tolérance à l'endommagement ;
- calcul par essais.

(3) La présente partie 2 contient les exigences de qualité de construction requises pour s'assurer que les hypothèses de calcul sont satisfaites dans la pratique.

1.1.2 Profils structuraux

(1) La présente partie 2 traite :

- des poutres et charpentes contreventées et non contreventées ;
- des structures à treillis ;
- des structures en tôles renforcées planes ou en coque ;
- des corps pleins.

(2) La présente partie 2 ne traite pas des récipients sous pression ou autres conduites.

1.1.3 Produits de base

(1) La présente partie 2 traite :

- des laminés ;
- des profilés filés ;
- des tubes étirés ;
- des profilés ;
- des pièces forgées ;
- des pièces coulées.

1.1.4 Profils des éléments

(2) La présente partie 2 traite des profils ouverts et creux, y compris les éléments constitués de combinaisons de ces produits.

1.1.5 Matériaux

(1) La présente partie 2 traite des alliages corroyés cochés dans le tableau 1.1.1 ainsi que des alliages coulés énumérés dans le tableau 1.1.2.

Tableau 1.1.1 — Alliages d'aluminium corroyés pour structures

Nuance de l'alliage	Traitement et profil du produit								
	Laminé (EN 485)			Profil filé (EN 755)			Etiré (EN 754)	Soudure HF continue (EN 1592)	Forgé (EN 586)
	Tôle ¹⁾	Bande	Tôle ²⁾	Tige Barre	Tube	Profilé	Tube	Tube	Formes
EN AW-3103	✓	✓	✓					✓	
EN AW-5083	✓	✓	✓	✓	✓	✓ ³⁾	✓		✓
EN AW-5052	✓	✓	✓						
EN AW-5454	✓	✓	✓						
EN AW-5754	✓	✓	✓						✓
EN AW-6060				✓	✓	✓	✓		
EN AW-6061	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		
EN AW-6063				✓	✓	✓	✓		
EN AW-6005A						✓			
EN AW-6082	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓
EN AW-7020	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		
NOTE 1 épaisseurs < 6mm.									
NOTE 2 épaisseurs ≥ 6mm.									
NOTE 3 profilés simples uniquement.									

Tableau 1.1.2 — Alliages d'aluminium coulés pour structures

Nuance de l'alliage (EN 1706)	Type de pièce coulée	
	Sable	Moulage en coque (coque)
EN AC-42100	✓	✓
EN AC-42200	✓	✓
EN AC-43200	✓	✓
EN AC-44100	✓	✓
EN AC-51300	✓ ¹⁾	✓ ¹⁾
NOTE 1 Formes simples uniquement.		

1.1.6 Modes d'assemblage

(1) La présente partie traite des modes d'assemblage suivants :

- soudage à l'arc (Soudage MIG et soudage TIG) ;
- fixation avec composants filetés ;
- rivetage ;
- assemblage par collage.

1.1.7 Conditions ambiantes

(1) La présente partie traite des applications structurales exposées aux conditions atmosphériques normales et à des températures ne dépassant pas + 100°C (pour le calcul de la fatigue), y compris les milieux marins, à

l'exception des joints fixés par collage pour lesquels les limites de température s'appliquent dans une plage comprise entre -20°C et 60°C . Pour l'alliage d'aluminium 5083, les données s'appliquent à des températures maximales ne dépassant pas 65°C . Les données relatives à la résistance à la fatigue ne s'appliquent pas aux parties de la structure exposées à des milieux fortement corrosifs pour les matériaux en question.

(2) En cas de dépassement de ces limites, il peut être nécessaire de recourir aux données d'essai et à la certification de la technologie de fabrication.

1.2 Références normatives

(1) La présente prénorme européenne comporte par référence datée ou non datée des dispositions d'autres normes. Ces références normatives sont citées aux endroits appropriés du texte.

EN 287-2, *Epreuve de qualification des soudeurs - Soudage par fusion - Partie 2 : Aluminium et ses alliages.*

EN 288-4, *Descriptif et qualification d'un mode opératoire de soudage sur les matériaux métalliques - Partie 4 : Epreuve de qualification d'un mode opératoire de soudage à l'arc sur l'aluminium et ses alliages.*

EN 485, *Aluminium et alliages d'aluminium - Tôles, bandes et tôles épaisses.*

EN 586, *Aluminium et alliages d'aluminium - Pièces forgées.*

EN 719, *Coordination en soudage - Taches et responsabilités.*

EN 729-2, *Exigences de qualité en soudage - Soudage par fusion des matériaux métalliques - Partie 2 : Exigences de qualité complète.*

EN 754, *Aluminium et alliages d'aluminium - Barres et tubes étirés.*

EN 755, *Aluminium et alliages d'aluminium - Barres, tubes et profilés filés.*

EN 1011-4, *Recommandations pour le soudage des matériaux métalliques - Partie 4: Soudage à l'arc de l'aluminium et des alliages d'aluminium.*

EN 1706, *Aluminium et alliages d'aluminium - Pièces moulées.*

EN 30042, *Assemblages en aluminium et alliages d'aluminium soudables soudés à l'arc - Guide des niveaux d'acceptation des défauts.*

ENV 1991-3, *Eurocode 1 : Bases de calcul et actions sur les structures - Partie 3 : Charges sur les ponts dues au trafic.*

ENV 1991-5, *Eurocode 1 : Bases de calcul et actions sur les structures - Partie 5 : Actions induites par les ponts roulants et autres machines.*

1.3 Distinction entre principes et règles d'application

(1) En fonction du caractère de chaque clause, une distinction est faite dans le présent Eurocode entre les principes et les règles d'application.

(2) Les principes comprennent :

- des énoncés généraux et des définitions pour lesquels il n'y a pas d'alternative ; ainsi que
- des exigences et des modèles analytiques pour lesquels aucune alternative n'est autorisée, sauf mention spécifique.

(3) Les principes sont repérés par la lettre P suivant le numéro du paragraphe.

(4) Les règles d'application sont généralement des règles reconnues qui suivent les principes et satisfont leurs exigences.

(5) Il est permis d'utiliser des règles de calcul différentes des règles d'application indiquées dans l'Eurocode, à condition de montrer que ces autres règles sont en accord avec les principes correspondants et sont au moins équivalentes en termes de résistance, d'aptitude au service et de durabilité de la structure.

(6) Dans la présente partie, les règles d'application sont repérées par un nombre entre parenthèses, comme dans ce paragraphe.

1.4 Hypothèses

(1)P Les hypothèses suivantes s'appliquent :

- les structures sont conçues par du personnel ayant une expérience et une qualification appropriées ;
- les usines, les installations et le site proprement dit font l'objet d'une surveillance et d'un contrôle qualité appropriés ;
- la construction est réalisée par du personnel ayant les compétences et l'expérience appropriées ;
- les matériaux et produits de construction sont utilisés tel que spécifié dans le présent Eurocode ou dans les spécifications de matériaux ou de produits correspondantes ;
- la structure doit faire l'objet d'un entretien approprié ;
- la structure est utilisée conformément à l'énoncé du projet.

(2)P Les méthodes de calcul sont valables uniquement lorsque les exigences de qualité relatives à l'exécution et à la réalisation données à l'annexe D sont satisfaites, sauf lorsque des mesures spécifiques sont prises pour permettre à la mécanique de la rupture ou à un essai de rupture de valider les normes de qualité alternatives.

(3) Les valeurs numériques indiquées entre parenthèses sont données à titre d'indications. D'autres valeurs peuvent être spécifiées par les Etats membres.

1.5 Définitions

1.5.1 Termes communs à tous les Eurocodes

(1)P Sauf indication contraire dans la partie 1 de l'Eurocode 9, la terminologie utilisée dans la norme internationale ISO 8930 s'applique.

1.5.2 Termes spécifiques utilisés dans la présente partie 2 de l'Eurocode 9

(1)P Les termes ci-dessous sont utilisés dans la partie 2 de l'Eurocode 9 avec les définitions suivantes :

1.5.2.1

fatigue

Endommagement d'une partie de la structure, du à la propagation lente d'une fissure provoquée par des fluctuations répétées de contraintes

1.5.2.2

chargement de fatigue

un ensemble d'événements de charges représentatifs décrits par les positions ou les mouvements de charges, leur variation d'intensité, leur fréquence et séquence d'apparition

1.5.2.3

événement de charge

séquence bien définie d'application de charge à la structure qui, pour des besoins de calcul, est supposée se répéter à une fréquence donnée

1.5.2.4

contrainte nominale

contrainte exercée sur le matériau de base à l'emplacement potentiel d'une fissure, calculée selon la théorie de la limite élastique simple de la résistance des matériaux, c'est-à-dire en supposant que les sections planes demeurent planes et que tous les effets de concentration des contraintes sont ignorés

1.5.2.4

contrainte nominale modifiée

contrainte nominale augmentée d'un facteur de concentration de contraintes géométrique approprié K_{gt} , autorisant uniquement les changements géométriques de section dont la classification d'un élément de construction particulier n'a pas tenu compte

1.5.2.4

contrainte structurale (également désignée 'contrainte géométrique')

contrainte élastique en un point donné, prenant en compte toutes les discontinuités géométriques, mais ignorant tous les points singuliers locaux où le rayon de transition tend vers zéro, telles que les entailles dues à de faibles discontinuités, par exemple bords de soudures, fissures, traits semblables à des fissures, marques normales d'usinage, etc. La contrainte structurale est en principe le même paramètre de contrainte que la contrainte nominale modifiée, mais est généralement évaluée par une méthode différente

1.5.2.5

facteur de concentration de contrainte géométrique K_{gt}

rapport entre la contrainte structurale évaluée avec l'hypothèse du comportement élastique linéaire du matériau et la contrainte nominale

1.5.2.6

contrainte au point chaud

contrainte structurale à une amorce spécifiée dans un type de géométrie particulier, tel qu'un bord de soudure dans un assemblage d'angle de profils creux, pour laquelle la résistance à la fatigue, exprimée en termes de étendue de contraintes au point chaud, est généralement connue

1.5.2.7

facteur local de concentration de contrainte d'un élément classé K_{cd}

rapport entre la contrainte de pic évaluée par une analyse spécifique de la méthode des éléments finis (FEM) au point chaud d'un élément classé et la contrainte nominale

1.5.2.8

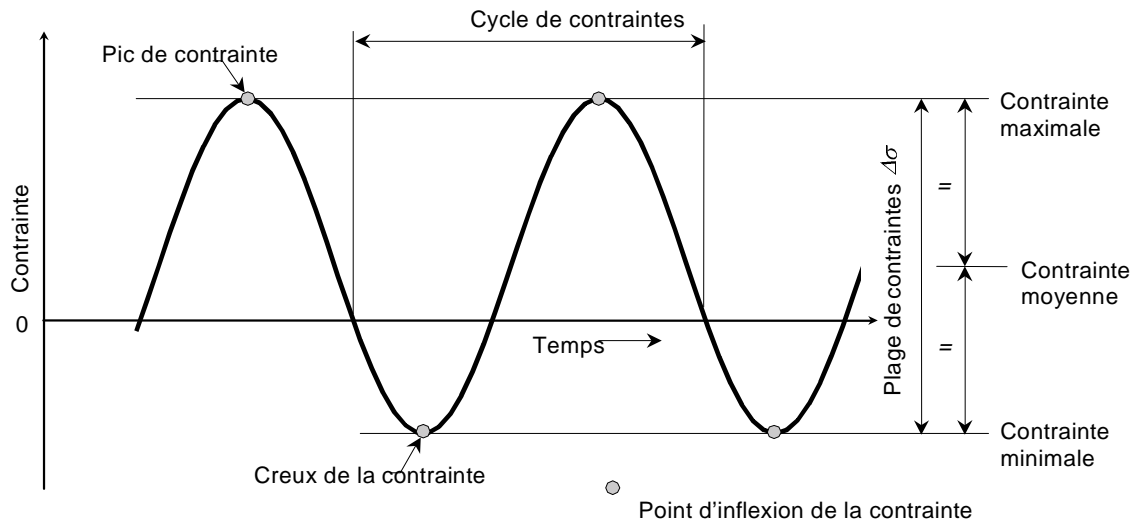
historique des contraintes

enregistrement chronologique continu, mesuré ou évalué, de la variation de contrainte en un point particulier d'une structure, (généralement pour la durée d'un événement de charge) (voir Figure 1.5.1)

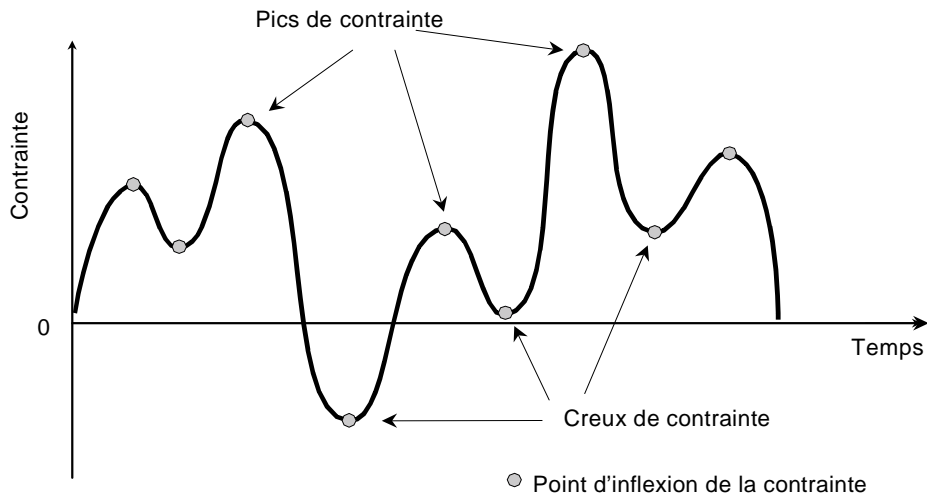
1.5.2.9

point d'inflexion de la contrainte

valeur de la contrainte observée dans le historique des contraintes à laquelle le taux de variation des contraintes change de sens (voir Figure 1.5.1)



a) Amplitude constante



b) Amplitude variable

Figure 1.5.1 — Terminologie relative aux études et aux cycles de contraintes

1.5.2.10

pic de contrainte

point d'inflexion au niveau duquel le taux de variation de contrainte passe d'un taux positif à un taux négatif (voir Figure 1.5.1)

1.5.2.11

creux de contrainte

point d'inflexion au niveau duquel le taux de variation de contrainte passe d'un taux négatif à un taux positif (voir Figure 1.5.1) (également désigné 'dépression de contrainte')

1.5.2.12

amplitude constante

fait référence à une étude des contraintes où la contrainte varie entre des pics et des creux de valeurs constantes (voir Figure 1.5.1)

1.5.2.13

amplitude variable

fait référence à une étude des contraintes contenant plus d'une valeur de contrainte de pic ou de contrainte de creux (voir Figure 1.5.1.)

1.5.2.14

cycle de contraintes

partie d'une étude des contraintes d'amplitude constante où la contrainte commence et finit à la même valeur mais qui, de ce fait, passe par un pic et par un creux de contrainte (pour toute séquence). Elle représente également une partie spécifique d'une étude des contraintes d'amplitude variable, déterminée par une méthode de comptage des cycles (voir Figure 1.5.1)

1.5.2.15

comptage des cycles

processus de transformation d'une étude des contraintes d'amplitude variable en un spectre de cycles de contraintes, chacun d'entre eux ayant une étendue de contraintes particulière, par exemple la méthode du 'Réservoir' et la méthode de 'comptage des demi-cycles' (voir Figure 4.4.1)

1.5.2.16

étendue de contraintes

différence algébrique entre le pic de contrainte et le creux de contrainte d'un cycle de contraintes

1.5.2.17

spectre d'étendue de contraintes

histogramme de la fréquence d'apparition de toutes les valeurs des étendues de contraintes enregistré ou calculé pour un événement de charge donné (également désigné 'spectre de contraintes')

1.5.2.18

spectre de calcul

L'ensemble de tous les spectres d'étendues de contrainte à considérer pour la vérification à la fatigue

1.5.2.19

catégorie d'élément

désignation attribuée à une amorce particulière de la fatigue pour une direction donnée d'ondulation de contrainte afin de déterminer la courbe de résistance à la fatigue applicable à l'évaluation de cette dernière

1.5.2.20

endurance

résistance à la fatigue exprimée en cycles, dans le cadre d'une étude de contraintes d'amplitude constante

1.5.2.21

courbe de résistance à la fatigue

relation quantitative entre la étendue de contraintes et l'endurance, utilisée pour l'évaluation de la fatigue d'une catégorie d'élément de construction, tracée sur des axes logarithmiques dans la présente norme (voir Figure 1.5.2)

1.5.2.22

résistance de référence à la fatigue

étendue de contraintes d'amplitude constante $\Delta\sigma_c$ pour une catégorie particulière d'élément pour une endurance $N = 2 \times 10^6$ cycles (voir Figure 1.5.2)

1.5.2.23

limite de fatigue d'amplitude constante

Etendue de contraintes en dessous de laquelle doivent se situer toutes les étendues de contraintes du spectre de calcul pour ignorer le dommage par fatigue (voir Figure 1.5.2)

1.5.2.24

limite de troncature

limite en dessous de laquelle les étendues de contrainte du spectre de calcul peuvent être ignorés du calcul cumulé des dommages (voir Figure 1.5.2)

1.5.2.25

durée de vie de calcul

Durée de référence pendant laquelle une structure doit se comporter en sécurité avec un degré acceptable de probabilité, vis-à-vis du risque de ruine de la structure due à la fissuration par fatigue.

1.5.2.26
durée de vie

période pendant laquelle on estime qu'une structure fonctionne en toute sécurité avec une probabilité acceptable de non apparition d'une rupture par fissuration par fatigue lorsque l'on utilise la méthode de calcul de la durée de vie utile

1.5.2.27
dommage par fatigue

rapport du nombre de cycles d'une étendue de contraintes donnée devant être maintenu pendant une période de service déterminée et de l'endurance d'élément de construction avec la même étendue de contraintes

1.5.2.28
sommation de miner

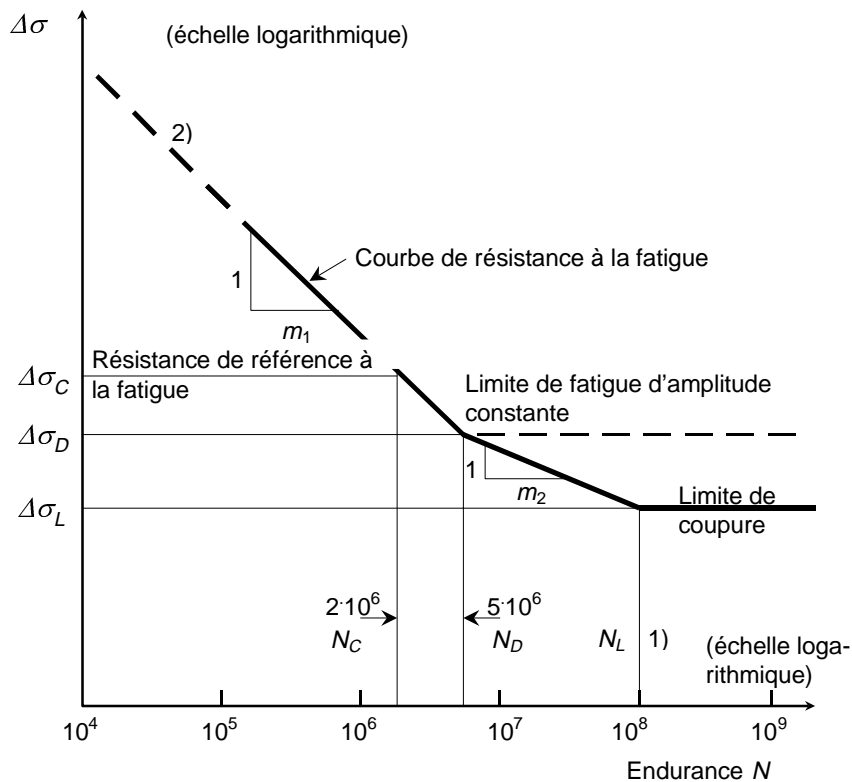
sommation du dommage dû à l'ensemble des cycles d'un spectre d'étendues de contraintes (ou un spectre de calcul), fondée sur la règle de Palmgren-Miner

1.5.2.29
chargement par fatigue équivalent

chargement simplifié, généralement une charge unique appliquée un nombre de fois déterminé de telle sorte qu'elle puisse être utilisée en lieu et place d'un ensemble de charges plus concret, dans une plage de conditions donnée, afin de produire un nombre équivalent de dommages par fatigue, à un niveau d'approximation acceptable

1.5.2.30
étendue de contraintes équivalente

étendue de contraintes observée au niveau d'un élément de construction, due à l'application d'une charge de fatigue équivalente



NOTE 1 pour certaines conditions ambiantes, voir 5.4

NOTE 2 voir 5.3.5 pour $N < 10^5$

Figure 1.5.2 — Courbe de résistance à la fatigue

1.6 Symboles

D	Domage par fatigue calculé pour une période de service donné
D_L	Domage par fatigue calculé pour toute la durée de vie théorique
L_{adh}	Longueur véritable des joints de recouvrement assemblés par collage
N	Nombre (ou nombre total) de cycles de étendues de contraintes
N_i	Endurance dans l'étendue de contraintes $\Delta\sigma_i$
N_C	Nombre de cycles (2 millions) auquel est définie la résistance de référence à la fatigue
N_D	Nombre de cycles (5 millions) auquel est définie la limite de fatigue d'amplitude constante
N_L	Nombre de cycles (100 millions) auquel est définie la limite de coupure
R	Contrainte minimale divisée par la contrainte maximale dans un historique de contraintes d'amplitude constante ou un cycle issu du historique de contraintes d'amplitude variable. S'applique également dans le contexte de l'intensité des contraintes
T_f	Temps nécessaire à une fissure pour évoluer d'une dimension décelable à une dimension critique de rupture
T_i	Intervalle de contrôle
T_L	Durée de vie théorique
T_S	Durée de vie utile
$f_{v,adh}$	Résistance caractéristique au cisaillement d'un adhésif
k_{adh}	facteur de résistance à la fatigue des joints collés
k_N	Nombre d'écart-types au dessus du nombre moyen prévu de cycles de charge
k_F	Nombre d'écart-types au dessus de l'intensité moyenne prévue de la charge
l_d	Longueur de fissure détectable minimale
l_f	Longueur de fissure critique pour la rupture
m	Constante de pente inverse d'une courbe de résistance à la fatigue $\log \Delta\sigma - \log N$
m_1	Valeur de m pour $N \leq 5 \times 10^6$ cycles
m_2	Valeur de m pour $5 \times 10^6 < N \leq 10^8$ cycles
n_i	Nombre de cycles de l'étendue de contraintes $\Delta\sigma_i$
γ_{Ff}	Facteur partiel de sécurité pour l'intensité de la charge de fatigue
γ_{Mf}	Facteur partiel de sécurité pour la résistance à la fatigue
$\sigma_{max}, \sigma_{min}$	Valeurs maximale et minimale des contraintes d'ondulation d'un cycle de contraintes

$\Delta\sigma$	Étendue de contraintes nominales (contrainte normale)
$\Delta\sigma_{adh}$	Contrainte effective de cisaillement d'un adhésif
$\Delta\sigma_C$	Résistance de référence à la fatigue pour 2 millions de cycles (contrainte normale)
$\Delta\sigma_D$	Limite de fatigue d'amplitude constante
$\Delta\sigma_L$	Limite de coupure
$\Delta\sigma_R$	Résistance à la fatigue (contrainte normale).
\log	Logarithme de base 10.

1.7 Documents de calcul

1.7.1 Plans

(1)P Les plans doivent contenir tous les éléments de l'ensemble des assemblages sensibles à la fatigue, y compris les dimensions de composants et les tolérances de fixation, les dimensions et les types de pièce de fixation ainsi que les dimensions des gorges, côtés et autres pénétrations de soudures.

(2)P La classe de fatigue requise doit être indiquée pour les joints de soudure correspondants conformément à 6.2.

1.7.2 Spécification de fabrication

(1)P La spécification de fabrication doit comporter toutes les exigences particulières relatives à la préparation, au montage, à l'assemblage, au traitement ultérieur et à l'inspection des matériaux tels que définis dans les tableaux 5.1.1 à 5.1.5 correspondants de la catégorie d'élément afin de s'assurer que les résistances à la fatigue requises sont obtenues. Voir également annexe D.

1.7.3 Manuel d'exploitation

(1)P Il doit comporter :

- les éléments des charges de fatigue ainsi que la durée de vie théorique supposée dans le calcul ;
- toutes les exigences nécessaires requises pour le contrôle de l'intensité et de la fréquence des charges de service ;
- les limitations relatives à la modification future de la structure, en particulier la réalisation de perforations ou le soudage de fixations ;
- les instructions de démontage et de remontage des pièces, par exemple serrage des pièces de fixation ;
- les méthodes de réparation acceptables en cas de dommage accidentel en service (par exemple empreintes, pénétrations, déchirures, etc).

1.7.4 Manuel d'entretien

(1)P Il doit comporter un calendrier de tout contrôle en service nécessaire des parties soumises à la fatigue. Lorsque l'on fait appel au calcul de tolérance aux contraintes, celui-ci doit inclure :

- les méthodes de contrôle ;
- les emplacements de contrôle ;
- la fréquence des contrôles ;

- la longueur maximale admissible de la fissure avant de recourir à toute correction ;
- les éléments des méthodes acceptables de réparation ou de remplacement des pièces présentant des fissures par fatigue.

2 Base de calcul

2.1 Généralités

2.1.1 Objet du calcul

(1) L'objet du calcul d'une structure par rapport à l'état-limite de fatigue doit consister à s'assurer, avec un niveau de probabilité acceptable, que sa performance est satisfaisante pendant toute sa durée de vie théorique, de sorte que la structure ne présente pas de rupture de fatigue pendant sa durée de vie théorique ni qu'elle ne soit susceptible de faire l'objet d'une réparation prématurée de tout dommage par fatigue.

2.1.2 Influence de la fatigue sur le calcul

(1) Les structures soumises à une variation fréquente des charges de service peuvent être sensibles à la rupture de fatigue et doivent être vérifiées par rapport à cet état-limite.

(2) Le niveau de conformité avec les critères d'état-limite ultime ou de service donnés dans la partie 1-1 de l'Eurocode ne doit pas être utilisé comme mesure du risque de rupture de fatigue (voir 2.1.3).

(3) L'influence potentielle de la fatigue sur le calcul doit être établie le plus tôt possible. Les facteurs suivants doivent être pris en compte :

- a) une prévision précise de la séquence complète de charges de service pendant toute la durée de vie théorique doit être établie ;
- b) la réponse élastique de la structure soumise à ces charges doit faire l'objet d'une évaluation précise ;
- c) le calcul détaillé, les méthodes de fabrication et le degré du contrôle qualité peuvent avoir une influence significative sur la résistance à la fatigue et peuvent devoir faire l'objet d'un contrôle plus précis que dans le cas de structures calculées pour d'autres états-limites (voir article 5 et annexe D). Ceci peut avoir une influence significative sur la conception et le coût de construction.

2.1.3 Mécanisme de rupture

(1) Il doit être supposé que la rupture par fatigue s'amorce généralement en un point soumis à une contrainte élevée (en raison d'une variation géométrique brusque, d'une contrainte résiduelle de traction ou de discontinuités saillantes semblables à des fissures). Les fissures par fatigue se développent considérablement sous l'action d'un changement de cycles de contraintes. Elles demeurent généralement stables sous une charge constante. La rupture finale se produit lorsque la section restante n'est pas en mesure de supporter la charge de pic appliquée.

(2) Il doit être supposé que les fissures par fatigue se propagent approximativement à des angles droits par rapport à la direction de l'étendue de contraintes principale maximale. La vitesse de propagation augmente de manière exponentielle. Ceci est la raison pour laquelle la fissure se développe lentement au cours des premières phases et les fissures par fatigue ont tendance à être invisibles pendant la plus grande partie de leur durée de vie. Ceci peut entraîner des problèmes de détection en service (voir annexe B).

2.1.4 Amorces possibles des fissurations par fatigue

(1) Les amorces suivantes de fissures par fatigue associées à des éléments spécifiés doivent être prises en considération :

- a) bords et racines de soudures par fusion ;
- b) angles usinés ;

- c) trous poinçonnés ou percés ;
- d) bords cisailés ou sciés ;
- e) surfaces soumises à une pression contact élevée (frettage) ;
- f) fonds de filets de fixations.

(2) P Les fissures par fatigue peuvent également s'amorcer au niveau de traits non spécifiques pouvant néanmoins exister dans la pratique. Les traits suivants doivent être pris en considération le cas échéant :

- a) discontinuités de matériau ou défauts de soudure ;
- b) entailles ou éraflures dues à un dommage de nature mécanique ;
- c) piqûres de corrosion.

2.1.5 Conditions de sensibilité à la fatigue

- (1) Il convient que l'évaluation de la probabilité de la sensibilité à la fatigue tienne compte des éléments suivants :
- a) rapport élevé des charges dynamiques et statiques : les structures mobiles ou de levage, telles que les véhicules de transport terrestre ou maritime, les grues, etc ; sont davantage prédisposées aux problèmes de fatigue que les structures fixes, à moins que ces dernières ne supportent essentiellement des charges mobiles, comme dans le cas des ponts ;
 - b) applications fréquentes d'une charge : ceci entraîne un nombre important de cycles au cours de la durée de vie théorique. Les structures ou les éléments minces avec des fréquences propres faibles sont particulièrement prédisposés à la résonance et donc à l'amplification de la contrainte dynamique, même dans le cas où les contraintes de calcul statiques sont peu élevées. Il convient de vérifier avec la plus grande attention les effets de la résonance sur les structures soumises essentiellement à des charges hydrauliques, telles que le vent, ainsi que sur les structures d'appui des machines ;
 - c) recours au soudage : certains éléments soudés d'utilisation courante ont une faible résistance à la fatigue. Ceci s'applique non seulement aux assemblages entre les éléments, mais également à toute pièce de fixation à un élément soumis à une charge, que l'assemblage obtenu soit ou non considéré "structural" ;
 - d) complexité de l'élément d'assemblage : les assemblages complexes entraînent fréquemment des concentrations de contraintes élevées du fait des variations locales de la rigidité de la voie de contrainte. Alors que ces concentrations peuvent le plus souvent avoir un effet peu important sur la capacité statique finale de l'assemblage, elles peuvent en revanche avoir un effet important sur la résistance à la fatigue. Lorsque la fatigue est dominante, il est recommandé de sélectionner le profil de section de l'élément afin de garantir la régularité et la simplicité de la conception de l'assemblage, de sorte que les contraintes puissent être calculées et que des normes appropriées de fabrication et de contrôle puissent être garanties ;
 - e) environnement : dans certains environnements thermiques et chimiques, la résistance à la fatigue peut être réduite si la surface du métal n'est pas protégée.

2.1.6 Méthodes de calcul de la fatigue

(1) **P Calcul de la durée de vie utile** : Cette méthode est fondée sur le calcul des dommages au cours de la durée de vie théorique de la structure en utilisant les données d'endurance de limite inférieure de référence ainsi que l'estimation de la limite supérieure de la charge de fatigue. Ce calcul permet d'obtenir une estimation modérée de la résistance à la fatigue et le contrôle en service ne doit normalement pas être considéré essentiel à la sécurité. La méthode est donnée en 2.2.

(2) **P Calcul basé sur la tolérance aux dommages** : Cette méthode est fondée sur la limitation de la propagation de la fissuration par fatigue au moyen d'un programme d'inspection obligatoire. Une fois atteinte la longueur prédéterminée de la fissure par fatigue, la pièce doit être remplacée ou réparée. La méthode est donnée en 2.3.

NOTE La méthode peut être appliquée dans certaines situations où l'estimation de la durée de vie utile montre que la fatigue a un effet significatif sur l'économie du calcul et qu'un risque plus élevé de fissuration par fatigue au cours de la durée de vie utile peut être justifié par opposition au risque moins élevé pouvant être justifié par les principes de calcul de la durée de vie utile. Alors que la méthode est destinée à obtenir un risque de rupture finale de la structure comparable à celui supposé pour le calcul de la durée de vie utile, elle peut produire un risque plus important de perte provisoire d'aptitude au service.

(3) **Calcul assisté par essais** : Cette méthode doit être utilisée lorsque les données nécessaires de charge, de réponse, de résistance à la fatigue ou de propagation des fissures ne sont pas fournies par les normes ou les autres sources disponibles pour une application particulière. Les données d'essai doivent être utilisées en lieu et place des données de référence à la seule condition qu'elles soient obtenues et appliquées dans des conditions de contrôle. Des directives sont données en 2.4 et à l'annexe C.

2.2 Calcul de la durée de vie utile

2.2.1 Conditions préalables au calcul de la durée de vie utile

(1) L'historique de service prévu de la structure doit être disponible en termes de séquence et de fréquence de charge. La réponse de contrainte au niveau de toutes les amorces potentielles doit alternativement être disponible en termes de historiques de contrainte.

(2) Les caractéristiques de résistance à la fatigue au niveau de toutes les amorces potentielles doivent être disponibles en termes de courbes de résistance à la fatigue.

(3) Les normes de qualité utilisées pour la fabrication des composants contenant des amorces potentielles doivent être définies.

2.2.2 Mode de calcul de la durée de vie utile

(1) Vérifier en premier lieu les amorces potentielles de fissure par fatigue dans les zones de la structure contenant les plus fortes ondulations de contrainte et/ou les concentrations les plus importantes de contrainte.

(2) Le mode de calcul de base doit être le suivant (voir Figure 2.2.1) :

- a) obtenir une estimation de limite supérieure de la séquence de charges de service pour la durée de vie théorique de la structure (voir article 3) ;
- b) procéder à l'estimation de l'historique des contraintes obtenu au niveau de l'amorce potentielle soumise à vérification (voir 4.1 et 4.2 ou 4.3) ;
- c) en cas d'utilisation des contraintes normales, modifier le historique des contraintes dans toute zone de concentration de contraintes géométriques non déjà incluse dans la catégorie de l'élément, en appliquant un facteur de concentration de contraintes approprié (voir 4.2) ;
- d) réduire l'historique des contraintes à un nombre équivalent de cycles (n_i) de plages de contraintes $\Delta\sigma_i$ différentes à l'aide de la technique de comptage des cycles (voir 4.4) ;
- e) classer les cycles par ordre décroissant d'amplitude $\Delta\sigma_i$ afin de constituer un spectre d'étendues de contraintes s , où $i = 1, 2, 3$, etc. pour les première, deuxième et troisième bandes du spectre (voir 4.5) ;
- f) classer l'élément par catégories conformément aux tableaux 5.1.1 à 5.1.5. Pour la catégorie d'élément et l'étendue de contraintes de calcul ($\Delta\sigma_i$) appropriées, déterminer l'endurance admissible (N_i , etc.) à partir de 5.2.1 ;
- g) calculer le dommage total D_L pour tous les cycles à l'aide de la sommation de Miner, où :

$$D_L = \sum n_i/N_i \quad (2.1)$$

- h) calculer la durée de vie utile T_s , où

$$T_s = T_L/D_L \quad (2.2)$$

et où la durée de vie théorique de T_L a les mêmes unités que T_s

- i) si T_s est inférieure à T_L , l'action ou les actions suivante(s) doit(vent) être entreprise(s) :
- procéder à un nouveau calcul de la structure ou de l'élément pour réduire les niveaux de contrainte ;
 - remplacer l'élément par un élément de catégorie supérieure (voir 5.1) ;
 - utiliser la méthode de calcul de la tolérance aux dommages, le cas échéant (voir 2.3).

2.3 Calcul de la tolérance aux dommages

2.3.1 Conditions préalables au calcul de la tolérance aux dommages

(1) Le calcul de la tolérance aux dommages doit être utilisé uniquement lorsque les conditions des alinéas (2) à (6) ci-dessous s'appliquent.

(2) Le calcul de la tolérance aux dommages s'applique au niveau de toutes les amorces présentant un nombre de dommages D_L pour la durée de vie théorique complète, calculée conformément à 2.2, supérieur à un.

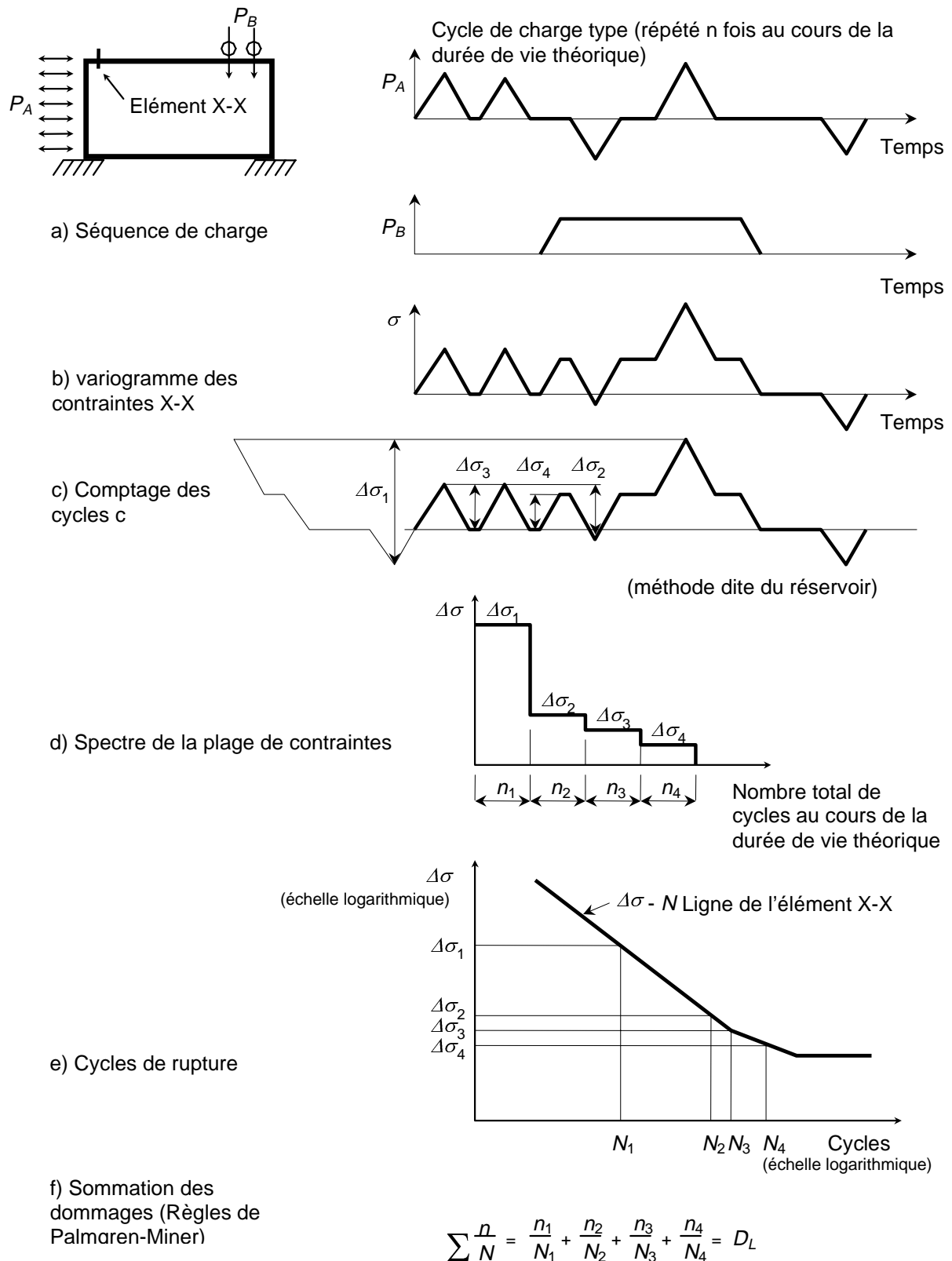


Figure 2.2.1 — Méthode d'évaluation de la fatigue

(3) Les amorces de fissure par fatigue déterminées en (2) doivent se produire sur ou à proximité d'une surface immédiatement accessible en service. La seule exception à ce phénomène est la disposition de voies de charge sûres alternatives et la conception d'éléments permettant de garantir l'arrêt des fissures sans qu'elles ne se propagent au-delà de la première voie de contrainte.

(4) Le mode opératoire décrit en 2.3.2 doit être appliqué pour déterminer la fréquence de contrôle et la longueur de fissure maximale admissible avant que toute correction ne devienne nécessaire.

(5) Des méthodes pratiques de contrôle doivent être disponibles et capables de détecter les fissures et de mesurer leur étendue bien avant qu'elles n'aient atteint leur longueur sensible à la rupture.

(6) Le manuel d'entretien doit préciser les informations énumérées en 1.8.4(1) pour chaque emplacement de fissure déterminé en (2).

2.3.2 Détermination d'une stratégie de contrôle pour le calcul des tolérances aux dommages

(1) P Au niveau de chaque amorce potentielle où la durée de vie utile T_s est inférieure à la durée de vie théorique, T_L doit être calculée conformément à 2.2.

(2) P Le manuel d'entretien doit préciser que le premier contrôle de chaque amorce potentielle doit avoir lieu avant la fin de la durée de vie utile.

(3) P Le manuel d'entretien doit spécifier que les contrôles ultérieurs doivent avoir lieu à intervalles réguliers T_i , où

$$T_i \leq 0,5 T_f$$

où T_f est le temps calculé pour qu'une fissure, dont l'amorce s'est produite au point évalué, évolue d'une longueur de surface détectable l_d à une longueur sensible à la rupture l_f (voir Figure 2.3.1).

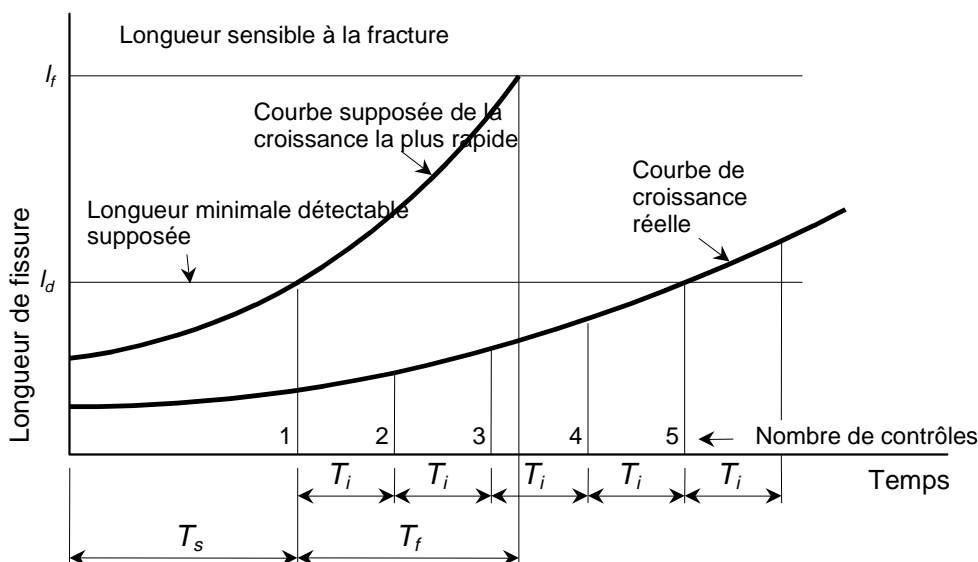


Figure 2.3.1 — Stratégie de contrôle pour le calcul des tolérances aux dommages

(4) P La longueur exposée minimale supposée de fissure superficielle doit prendre en considération l'accessibilité, l'emplacement, l'état de surface potentiel et la méthode de contrôle. A moins que des essais spécifiques ne soient effectués pour démontrer que des longueurs plus courtes peuvent être détectées avec une probabilité supérieure à 90%, la valeur supposée de l_d ne doit pas être inférieure à la valeur du Tableau 2.3.1 lorsqu'il est possible de vérifier la longueur totale de la fissure.

Tableau 2.2.1 — Valeurs de sécurité minimales de la longueur de fissure superficielle détectable en mm

Méthode de contrôle	Emplacement de la fissure		
	Surface lisse unie	Surface rugueuse, Pointe de soudure	Angle vif, Bord de soudure
Contrôle visuel, avec grossissement	20	30	50
Contrôle par ressuage	5	10	15
NOTE Les valeurs ci-dessus supposent un accès de proximité, un bon éclairage et l'élimination des revêtements de surface.			

(5)P Lorsque toute autre partie structurale ou non structurale permanente empêche un total accès à la fissure, la longueur de fissure doit être ajoutée à la valeur appropriée dans le Tableau 2.3.1 afin d'obtenir la valeur de l_d à des fins de calcul.

(6) Lorsque des épaisseurs de construction importantes sont utilisées et lorsque l'amorce se produit sur une surface inaccessible (par exemple la racine d'une soudure bout à bout simple d'un élément tubulaire), il peut être approprié de prévoir une stratégie de contrôle fondée sur l'utilisation de l'essai aux ultrasons pour détecter et mesurer les fissures avant qu'elles n'atteignent la surface accessible. Il convient de ne pas recourir à cette stratégie avant d'avoir effectué essais et évaluation.

(7)P La valeur de l_f doit être telle que la section nette, compte tenu de la forme probable du profil de fissure par l'épaisseur, doit être capable de supporter les efforts de traction statiques maximum sous la charge pondérée, calculés conformément à la partie 1.1 de la présente prénorme, sans une propagation instable de la fissure.

(8)P La valeur T_f doit être estimée par calcul et/ou essai, en supposant la charge pondérée (voir 3.4), de la manière suivante :

- a) la méthode de calcul doit être fondée sur les principes de la mécanique de la rupture (voir annexe B). Une relation de propagation de la fissure avec limite supérieure doit être utilisée. Des données spécifiques sur la propagation des fissures peuvent également être obtenues à partir d'éprouvettes de référence utilisant le même matériau que la voie de propagation des fissures, auquel cas la vitesse de propagation des fissures doit être pondérée conformément au facteur d'essai de fatigue F (voir Tableau C.1) ;
- b) lorsque des essais structuraux ou partiels simulant les matériaux, la géométrie et la méthode de fabrication appropriés permettent d'obtenir la propagation des fissures, le modèle d'effort correspondant doit être appliqué à l'éprouvette (voir annexe C). Les vitesses de propagation des fissures consignées entre les longueurs de fissure l_d et l_f doivent être pondérées par le facteur d'essai de fatigue F (voir Tableau C.1).

(9)P Le manuel d'entretien doit préciser les actions suivantes à entreprendre dans le cas d'une détection de fissure par fatigue lors d'un contrôle d'entretien habituel :

- a) lorsque la longueur de fissure mesurée est inférieure à l_d , aucune action réparatrice n'est nécessaire ;
- b) lorsque la longueur de fissure mesurée est supérieure ou égale à l_d , le composant doit être évalué sur une base d'aptitude à l'emploi afin de déterminer la durée d'autorisation d'exploitation de la structure en toute sécurité sans la nécessité d'un redressement ni d'un remplacement (voir annexe B). Dans le cas d'une exploitation prolongée, il faut alors augmenter la fréquence de contrôle à l'emplacement concerné ;
- c) lorsque la longueur de fissure mesurée dépasse l_f , la structure doit être immédiatement mise hors service.

2.4 Calcul assisté par essais

(1)P La vérification de la résistance à la fatigue d'une structure par des essais appropriés doit être acceptée comme méthode alternative aux méthodes indiquées en 2.2 et 2.3.

(2)P Lorsque les données pour une vérification complète d'une structure uniquement par calcul conformément à 2.1 ou 2.2 sont insuffisantes, un programme d'essais spécifique doit permettre d'obtenir des informations

supplémentaires. Dans ce cas, les données d'essai peuvent être requises pour une ou plusieurs des raisons suivantes :

- a) L'historique ou le spectre de charge appliqué, pour des charges simples ou multiples, n'est pas disponible et ne relève pas des méthodes pratiques de calcul théorique (voir 3.1 et 3.2). Ceci peut s'appliquer particulièrement aux structures mobiles soumises à des charges hydrauliques ou aérodynamiques avec lesquelles des effets dynamiques ou de résonance peuvent se produire. Les directives relatives aux méthodes d'essai sont données à l'annexe C.1 ;
- b) la géométrie de la structure est suffisamment complexe de sorte que les estimations des efforts exercés par les éléments ou des champs des contraintes locales ne relèvent pas des méthodes pratiques de calcul (voir 4). Les directives relatives aux méthodes d'essai sont données à l'annexe C.2 ;
- c) les matériaux, éléments de dimensions ou méthodes de fabrication des éléments ou des assemblages sont différents de ceux donnés dans les tableaux 5.1.1 à 5.1.5. Les directives relatives aux méthodes d'essai sont données à l'annexe C.3 ;
- d) les données relatives à la propagation des fissures sont nécessaires à la vérification du calcul des tolérances aux dommages.

(3)P Les essais peuvent être effectués sur des structures complètes de prototype ou de production ou sur des parties constitutives de ces structures. Le degré d'adaptation des matériaux, éléments de dimensions et autres méthodes de fabrication de la structure ou de l'élément d'essai à la structure de production finale doit tenir compte du type d'informations obtenues grâce à l'essai.

(4)P Les données d'essai doivent être utilisées en lieu et place des données de référence si elles sont obtenues et appliquées à l'aide de méthodes faisant l'objet d'un contrôle (voir annexe C.3).

3 Charges

3.1 Sources des charges de fatigue

(1)P Toutes les sources de contraintes d'ondulation exercées sur la structure doivent être identifiées. Les éléments suivants doivent faire l'objet d'une attention toute particulière :

- a) charges mobiles superposées, y compris les vibrations des machines de structures fixes ;
- b) charges du milieu environnant telles que les charges dues au vent, aux vagues, etc. ;
- c) les forces d'accélération exercées sur les structures mobiles ;
- d) les variations de température.

(2)P Les charges de fatigue doivent être celles données dans l'ENV 1991 Eurocode 1 ou dans une autre norme de charge correspondante, le cas échéant.

3.2 Calcul des charges de fatigue

(1)P Les charges de fatigue doivent normalement être décrites en termes de spectre de charge de calcul qui définit une plage d'intensités d'un événement de surcharge spécifique ainsi que le nombre de fois où est appliqué chaque niveau d'intensité au cours de la durée de vie théorique de la structure. Lorsque deux événements ou plus de surcharges indépendants sont susceptibles de se produire, il est alors nécessaire de spécifier l'intervalle requis entre eux.

(2)P Une évaluation réaliste des charges de fatigue est essentielle au calcul de la durée de vie de la structure. En l'absence de données publiées sur les surcharges, il y a lieu d'obtenir les données relatives aux structures existantes soumises à des effets similaires.

(3)P L'enregistrement de mesures continues des contraintes ou des déflexions sur une période d'échantillonnage appropriée permet de déduire les données relatives aux charges par l'analyse ultérieure de la réponse. L'évaluation des effets d'amplification dynamiques doit faire l'objet d'une attention toute particulière lorsque les

fréquences de charges sont proches de l'une des fréquences propres de la structure. Des directives complémentaires sont données à l'annexe C.1.

(4)PLe spectre de charge de calcul doit être sélectionné sur la base selon laquelle il s'agit d'une estimation de limite supérieure des conditions de service cumulées sur toute la durée de vie théorique de la structure. Il doit être tenu compte de tous les effets potentiels sur l'exploitation et l'environnement dus à l'usage prévisible de la structure au cours de cette période.

(5)PLa limite de confiance à utiliser pour l'intensité du spectre de charge de calcul doit être fondée sur la valeur moyenne prévue plus des écarts-types k_F où $k_F = 2$. La limite de confiance à utiliser pour le nombre de cycles du spectre de charge de calcul doit être fondée sur la valeur moyenne prévue plus des écarts-types k_N où $k_F = 2$. Voir également 3.4(2). La limite de confiance à utiliser pour le nombre de cycles du spectre de charge de calcul doit être fondée sur la valeur moyenne prévue plus des écarts-types k_N où :

$$k_N = 2 \text{ (voir également 3.4(2)).}$$

3.3 Charge de fatigue équivalente

(1)PUne charge de fatigue équivalente simplifiée doit être utilisée uniquement en lieu et place d'une charge de fatigue plus réaliste si les conditions suivantes sont satisfaites :

- a) la structure en alliage d'aluminium doit relever de la plage de profils et de dimensions de structure de base pour laquelle la charge de fatigue équivalente a été calculée à l'origine ;
- b) la charge réelle doit être d'intensité et de fréquence similaires et être appliquée de manière similaire à celle supposée dans le calcul de la charge de fatigue équivalente ;
- c) les valeurs de m_1 , m_2 , N_D et N_L supposées dans le calcul de la charge de fatigue équivalente doivent être les mêmes que celles appropriées à l'élément évalué ;

NOTE Certaines charges de fatigue équivalentes peuvent avoir été calculées en supposant une pente continue simple lorsque $m_2 = m_1$ et $\Delta\sigma_L = 0$. Pour bon nombre d'applications impliquant de nombreux cycles de faible amplitude, ceci conduit à une estimation très prudente de la durée de vie.

- d) la réponse dynamique de la structure doit être suffisamment faible pour que les effets de résonance, qui sont affectés par les différences observées de la masse, de la rigidité et du coefficient d'amortissement, aient un impact peu important sur la sommation globale des dommages.

(2)PDans le cas du calcul spécifique d'une charge de fatigue équivalente pour une application de structure en alliage d'aluminium, tous les éléments traités en 3.3(1) doivent être pris en compte.

3.4 Facteurs partiels de sécurité pour la charge de fatigue

(1) Lorsque la charge de fatigue est calculée conformément aux exigences de 3.2, un facteur partiel de sécurité relatif à l'intensité de charge $\gamma_{Ff} = 1,0$ peut être supposé pour garantir un niveau de sécurité acceptable.

(2) Lorsque la charge de fatigue est fondée sur des limites de confiance autres que celles décrites en 3.2(4), un niveau de sécurité acceptable peut être supposé garanti en appliquant les facteurs partiels de sécurité relatifs à la charge donnés au Tableau 3.4.1.

Tableau 3.4.1 — Facteurs partiels de sécurité applicables à l'intensité de charge de fatigue γ_{Ff}

k_F	γ_{Ff}	
	$k_N = 0$	$k_N = 2$
0	1,5	1,4
1	1,3	1,2
2	1,1	1,0

4 Analyse des contraintes

4.1 Analyse globale des contraintes

4.1.1 Généralités

(1)P La méthode d'analyse doit être sélectionnée de manière à garantir une prévision précise de la réponse en contrainte élastique de la structure à la charge de fatigue spécifiée.

NOTE Il se peut qu'un modèle élastique utilisé pour l'évaluation statique (état-limite ultime ou de service) conformément à la partie 1.1 de la présente prénorme ne soit pas nécessairement approprié à l'évaluation de la fatigue.

(2)P Les effets dynamiques doivent être intégrés au calcul de l'historique des contraintes, sauf dans le cas de l'application d'une charge équivalente qui permet déjà d'obtenir de tels effets.

(3)P Lorsque la réponse élastique est affectée de manière significative par le coefficient d'amortissement, ceci doit être déterminé au moyen d'un essai (voir annexe C).

(4)P Il ne doit être supposé aucune redistribution plastique des efforts entre les éléments des structures hyperstatiques.

(5)P L'effet de raidissement de tous les autres matériaux fixés de manière permanente à la structure en alliage d'aluminium doit être pris en compte dans l'analyse des déformations élastiques.

(6)P Des modèles d'analyse des éléments finis élastiques doivent être utilisés pour l'analyse globale des structures hyperstatiques et des cadres en treillis avec assemblages rigides ou semi-rigides, sauf lorsque les données de contrainte ont été obtenues à partir de structures de prototype ou de modèles physiques d'échelle appropriée.

NOTE Le terme « analyse des éléments finis élastiques » est utilisé pour indiquer toutes les techniques d'analyse où les éléments et les assemblages de la structure sont représentés par des dispositions de barres, de poutres, de membranes, de coques, d'éléments pleins ou autres formes d'éléments. L'analyse a pour objet de déterminer l'état de contrainte qui permet de maintenir la compatibilité de déplacement et l'équilibre statique (ou dynamique).

4.1.2 Utilisation des éléments de poutre

(1)P Les éléments de poutre s'appliquent à l'analyse globale des structures en poutres, à cadres ou à treillis soumises aux limitations données dans les alinéas (2) à (8) ci-dessous.

(2)P Les éléments de poutre ne doivent pas être utilisés pour l'analyse de la fatigue des structures à tôles renforcées de construction plane ou en coque ou pour les éléments coulés ou forgés sauf lorsqu'ils ont un profil prismatique simple.

(3)P Les propriétés de rigidité de profil axial, de flexion, de cisaillement et de torsion des éléments de poutre doivent être calculées conformément à la théorie élastique linéaire en supposant que les profils planes le demeurent. Le voilement de la section dû à la torsion doit toutefois être pris en considération.

(4) Il convient que le calcul des propriétés de rigidité de profil tienne compte des fixations par soudage, par boulons ou assemblées par collage dont la longueur est supérieure à la moitié de la profondeur de l'élément (par exemple tôles de finition et raidisseurs longitudinaux).

(5) Lorsque les éléments de poutre sont utilisés avec des structures, à éléments de profil ouvert ou à éléments de profil creux prédisposés au voilement, soumises à des efforts de torsion, les éléments doivent avoir 7 degrés de liberté y compris le voilement. Les coques doivent alternativement être utilisées pour déterminer le profil de section.

(6) Les propriétés de profil des éléments de poutre contigus aux intersections d'éléments doivent tenir compte de la plus grande rigidité due à la dimension de la zone assemblée ainsi que de la présence de composants supplémentaires (par exemple goussets, couvre-joints, etc.).

(7) Les propriétés de rigidité des éléments de poutre utilisés pour établir le profil des zones assemblées au niveau des intersections d'angle entre des éléments ouverts ou creux lorsque l'assemblage ne supporte pas entièrement leurs sections transversales (par exemple nœuds tubulaires non renforcés), ou lorsque l'élément est semi-rigide (par exemple assemblages de tôles d'extrémité boulonnées ou de cornières), doivent être évaluées à l'aide des éléments coques ou en procédant à l'assemblage des éléments par l'intermédiaire de ressorts. Ces derniers doivent avoir une rigidité suffisante pour chaque degré de liberté et cette rigidité doit être déterminée par des essais ou par des modèles d'éléments coques de l'assemblage.

(8) Lorsque les éléments de poutre sont utilisés pour établir le profil d'une structure dont les excentricités sont comprises entre les axes des éléments au niveau des assemblages ou lorsque les charges et les contraintes sont appliquées sur les éléments en des points autres que leurs axes, des éléments de liaison rigides doivent être utilisés pour maintenir l'équilibre statique correct. Des ressorts similaires à ceux décrits en 4.1.2.(7) doivent être utilisés si nécessaire.

4.1.3 Utilisation des éléments membranes, coques et autres éléments pleins

(1) Les éléments membranes doivent s'appliquer uniquement aux parties d'une structure dont on sait que les contraintes de flexion hors plan sont négligeables.

(2) Les éléments coques s'appliquent à tous les types de structure sauf dans les cas d'utilisation d'éléments coulés, forgés ou usinés de forme complexe impliquant des champs de contrainte tridimensionnels, des éléments pleins devant alors être utilisés.

(3) Lorsque l'analyse globale fait appel aux membranes ou aux coques pour prendre en compte les effets globaux de concentration des contraintes tels que ceux énumérés en 4.2.2, la largeur de maille de la partie de l'élément contenant l'amorce doit être suffisamment petite pour procéder à une évaluation complète de l'effet (voir annexe A).

4.2 Applicabilité des contraintes nominales, des contraintes nominales modifiées et des contraintes au point chaud

4.2.1 Contraintes nominales

(1) Les contraintes nominales doivent être utilisées directement pour l'évaluation des amorces observées sur les éléments et les assemblages simples lorsque les conditions suivantes s'appliquent :

- a) les éléments associés à l'amorce sont conformes aux exigences appropriées relatives à la catégorie d'élément des tableaux 5.1.1 à 5.1.5 ;
- b) la catégorie d'élément a été établie au moyen d'un essai conformément à l'annexe C et lorsque les résultats sont exprimés en termes de contraintes nominales ;
- c) les effets géométriques globaux tels que ceux énumérés en 4.2.2 ne sont pas visibles au voisinage immédiat de l'amorce ;
- d) l'amorce de fissure est située à la racine d'une soudure d'angle ou d'une soudure bout à bout à pénétration partielle.

4.2.2 Contraintes nominales modifiées

(1) Les contraintes nominales modifiées doivent être utilisées en lieu et place des contraintes nominales lorsque l'amorce se trouve au voisinage immédiat de l'un ou de plusieurs des effets globaux suivants de concentration des contraintes géométriques (voir Figure 4.2.1) à condition que les conditions 4.2.1(a) et (b) s'appliquent toujours :

- a) changements globaux de forme de la section, par exemple au niveau des découpes ou des angles rentrants ;
- b) changements globaux de rigidité de la zone entourant la section de l'élément au niveau des soudures d'angle non renforcées entre les profils ouverts ou creux ;
- c) changements de direction ou d'alignement au-delà de ceux admis dans les Tableaux 5.1.1 à 5.1.5 ;
- d) retard de cisaillement et déformation des éléments plaqués ou creux de grande dimension ;
- e) effets de flexion hors plan non linéaires des composants minces tels que tôles planes lorsque la contrainte statique est proche de la contrainte critique élastique, par exemple champ tensoriel des âmes (voir partie 1 de la présente prénorme).

4.2.3 Contraintes au point chaud

(1) Les contraintes au point chaud doivent être utilisées uniquement lorsque les conditions suivantes s'appliquent :

- a) l'amorce est le bout de soudure d'un assemblage de géométrie complexe où la contrainte nominale n'est pas clairement définie ; ou
- b) une catégorie d'élément au point chaud a été établie par essai conformément aux annexes A et C lorsque les résultats sont exprimés en termes de contrainte au point chaud, pour le mode de charge approprié ;
- c) les contraintes de flexion exercées sur les coques se produisent dans les joints flexibles selon 4.1.2 (7).

4.3 Calcul des contraintes

4.3.1 Calcul des contraintes nominales

4.3.1.1 Modèles de structure utilisant des éléments de poutre

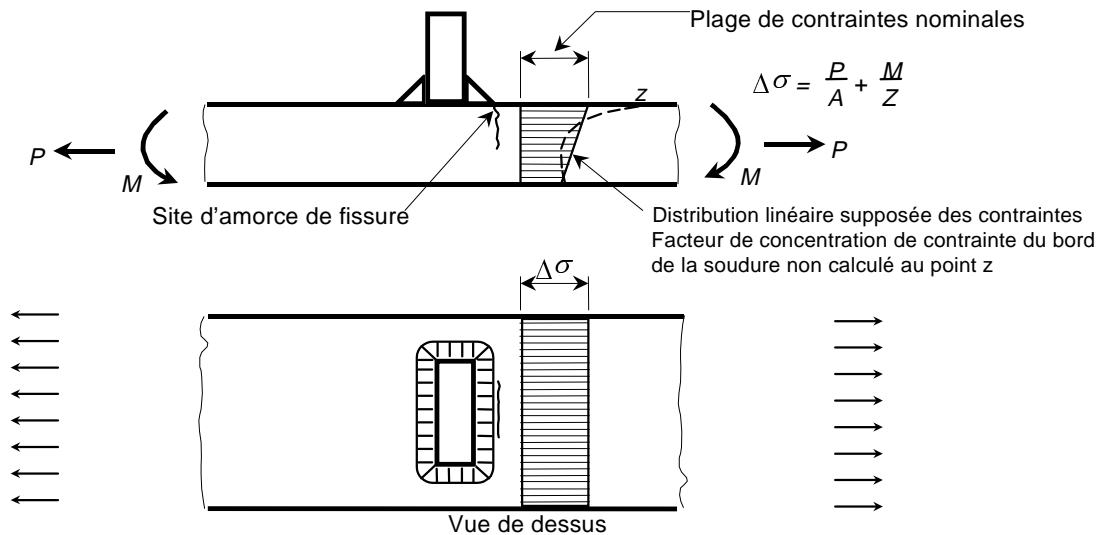
(1) Les contraintes axiales et de cisaillement au niveau de l'amorce doivent être calculées à partir des forces axiales et des efforts de flexion, de cisaillement et de torsion exercés sur la section concernée en faisant appel aux propriétés de section élastique linéaire.

(2) Les aires transversales et les modules de section doivent tenir compte de toutes les exigences spécifiques des Tableaux 5.1.1 à 5.1.5.

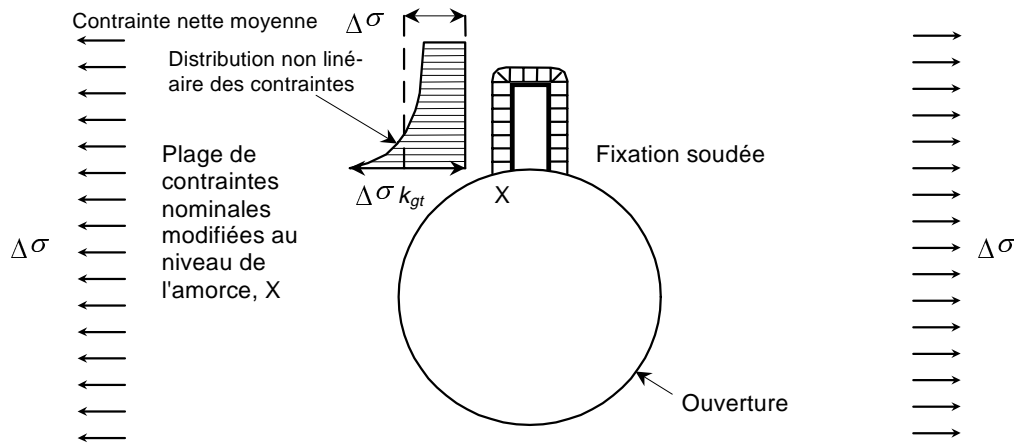
4.3.1.2 Modèles de structure utilisant des éléments membranes, des éléments coques ou autres éléments pleins

(1) Lorsque la distribution des tensions axiales est linéaire sur la section d'élément sur les deux axes, les contraintes au point d'amorce peuvent être utilisées directement.

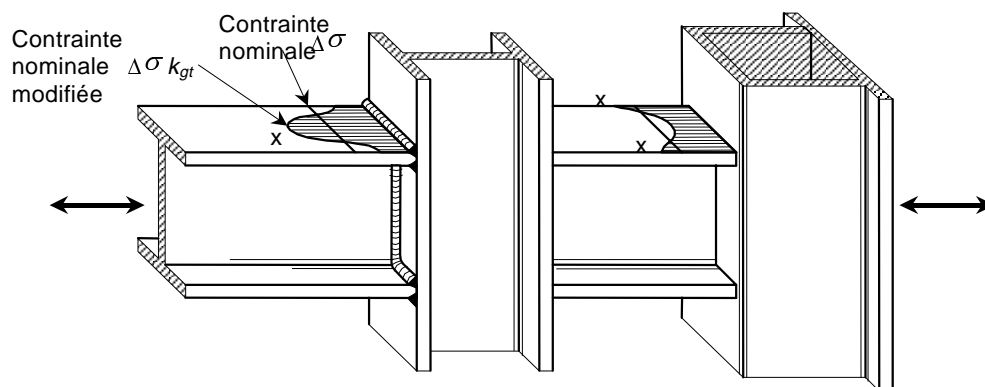
(2) Lorsque la distribution axiale est non linéaire sur la section d'élément sur l'un des deux axes, les contraintes exercées sur la section doivent être assimilées pour obtenir la force axiale et les moments de flexion. Ces derniers doivent être utilisés conjointement à l'aire transversale et aux modules de section appropriés conformément aux Tableaux 5.1.1 à 5.1.5 afin d'obtenir les contraintes nominales.



a) Concentration de contrainte locale (bord de la soudure)



b) Concentration globale de contrainte (ouverture de grande dimension)



c) point dur d'un assemblage

Figure 4.2.1 — Effet des concentrations de contrainte sur les contraintes nominales et sur les contraintes nominales modifiées

4.3.2 Calcul des contraintes nominales modifiées

4.3.2.1 Modèles de structure utilisant des éléments de poutres

(1)P Les contraintes nominales doivent être multipliées par les facteurs appropriés de concentration des contraintes élastiques K_{gt} selon l'emplacement de l'amorce et le type de champ de contrainte.

(2)P Les facteurs K_{gt} doivent prendre en compte toutes les discontinuités géométriques à l'exception de celles déjà intégrées à la catégorie d'élément (voir Tableaux 5.1.1 à 5.1.5).

(3)P Les facteurs K_{gt} doivent être déterminés par l'une des méthodes suivantes :

- a) solutions-étalons pour les facteurs de concentration de contrainte (voir Annexe A) ;
- b) sous-structuration de la géométrie environnante à l'aide des éléments coques prenant en compte (2) et appliquant les contraintes nominales aux limites ;
- c) mesure des déformations élastiques sur un modèle physique qui intègre les discontinuités géométriques globales, mais qui exclut les traits déjà intégrés à la catégorie d'élément (voir (2)).

4.3.2.2 Modèles de structure utilisant les éléments membranes, les éléments coques ou les éléments pleins

(1)P Lorsque la contrainte nominale modifiée doit être obtenue à partir de l'analyse globale dans la zone d'amorce, elle doit être sélectionnée sur la base suivante :

- a) concentrations de contraintes locales de telle sorte que l'élément classé et le profil de soudure déjà intégrés à la catégorie d'élément soient omis ;
- b) le maillage dans la zone d'amorce doit être suffisamment fin pour prévoir avec précision le champ de contrainte général autour de l'amorce (voir annexe A) mais sans intégrer les effets décrits en (a).

4.3.3 Calcul des contraintes au point chaud

(1)P La contrainte au point chaud est la contrainte principale essentiellement transversale à la ligne du bord de la soudure et doit être évaluée en règle générale par des méthodes numériques ou expérimentales (voir annexe A), sauf lorsque des solutions-étalons sont disponibles. Pour les cas simples, tel que celui représenté à la Figure 4.2.1(c), il convient d'évaluer la contrainte au point chaud en multipliant la contrainte nominale par le facteur de concentration de contraintes géométriques K_{gt} , défini comme la concentration de contraintes théoriques évaluée pour le matériau élastique linéaire en omettant toutes les influences (locales ou géométriques) déjà incluses dans la courbe de calcul $\Delta\sigma-N$ d'élément classé considéré comme un élément de référence.

(2)P En général, pour les configurations de structure pour lesquelles les facteurs de référence de concentration de contrainte ne sont pas applicables et qui par conséquent requièrent une analyse particulière, il est recommandé que la contrainte de fatigue au niveau du bord de la soudure omette les effets de concentration des contraintes dus au fait que l'élément classé soit considéré comme une référence, c'est-à-dire la géométrie du bord de soudure.

4.3.4 Orientation des contraintes

(1)P L'étendue principale de contraintes doit être la plus grande différence algébrique entre les contraintes principales agissant sur les plans principaux dont l'angle d'écartement n'est pas supérieur à 45°.

(2)P Pour évaluer si un élément est perpendiculaire ou parallèle à l'axe d'une soudure si l'angle de direction de la contrainte principale de traction est inférieur à 45° par rapport à l'axe de la soudure, il doit être supposé qu'il lui est parallèle.

4.4 Paramètres de plages de contraintes pour amorces spécifiques

4.4.1 Matériau de base, soudures en cordon à pénétration complète et assemblages mécaniques (voir Tableaux 5.1.5, 5.1.2, 5.1.3 et amorces 1,2,3,7 et 9 dans le Tableau 5.1.3)

(1) Les fissures dont l'amorce se produit dans des bords de soudure, des orifices de fixation, des surfaces de liaison, etc. et qui se propagent dans le matériau de base ou dans le métal fondu totalement pénétré doivent être évaluées à l'aide de l'étendue de contraintes principales nominales de l'élément au niveau de ce point particulier (voir Figure 4.2.1).

(2) Les effets de la concentration de contraintes locales du profil de soudure, des trous de boulons et de rivets, etc. doivent être ignorés dans la mesure où ils sont pris en compte dans les données relatives à la résistance $\Delta\sigma-N$ pour la classe d'élément appropriée. Ils ne doivent pas être calculés (voir Tableaux 5.1.1 à 5.1.5).

4.4.2 Soudures d'angle et soudures bout à bout à pénétration partielle (voir amorces 4, 5, 6, 8 et 11 dans le Tableau 5.1.3)

(1) Il convient d'évaluer les fissures dont l'amorce se produit sur les racines de soudures et qui se propagent sur la gorge de soudure à l'aide de la somme vectorielle des efforts de cisaillement qui s'exercent sur le métal fondu sur la base d'une dimension réelle de gorge (voir Figure 4.4.1).

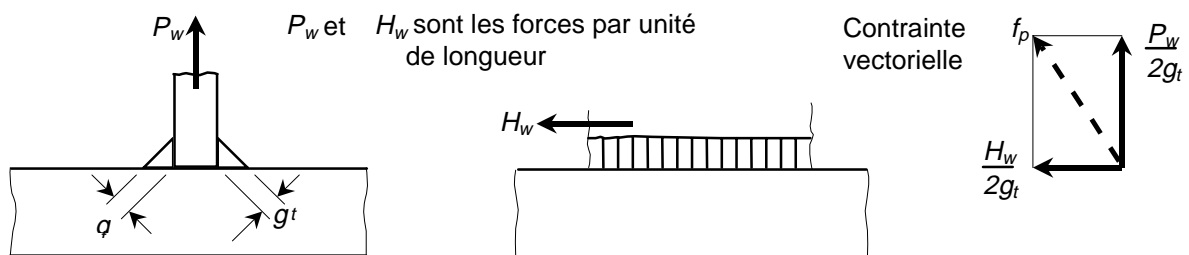


Figure 4.4.1 — Contraintes sur les gorges de soudure

(2) Avec les assemblages à recouvrement dans un plan, la contrainte par unité de longueur de soudure peut être calculée sur la base de la surface moyenne des forces axiales et d'un module polaire élastique du groupe de soudage pour les moments de flexion dans le plan (voir Figure 4.4.2).

(3) Avec les assemblages en T, tout effet de rigidité axiale différente le long de l'assemblage doit être pris en compte (voir Figure 4.2.1(c)).

(4) Lorsque les soudures d'angles simples ou les soudures bout à bout à pénétration incomplète sont soumises à des moments de flexion hors du plan, il est recommandé de calculer les contraintes au niveau de la racine en utilisant une distribution linéaire des contraintes dans la gorge de soudure (voir Figure 4.4.3).

(5) Il y a lieu de n'admettre aucun contact par roulement sur le méplat des joints de soudure à pénétration partielle.

4.4.3 Joints collés (voir Tableau 5.1.5)

(1) Pour les joints à recouvrement dont le plan de joint est défaillant, la plage effective de cisaillement $\Delta\sigma_{adh}$ doit être fondée sur la force par unité de largeur du joint divisée par la longueur véritable du recouvrement L_{adh} , où :

L_{adh} = longueur de recouvrement L , où $L \leq 15\text{mm}$ (voir Tableau 5.1.5) ;

L_{adh} = 15mm, où $L > 15\text{mm}$.

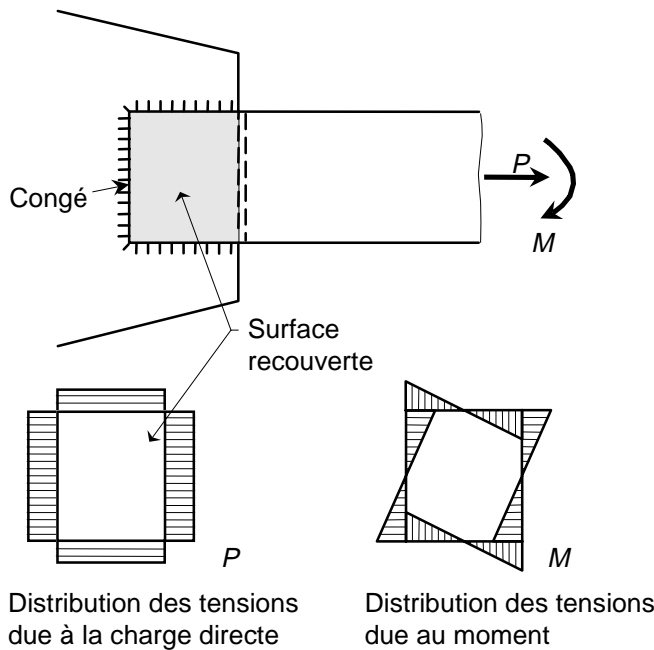


Figure 4.4.2 — Contraintes des joints à recouvrement

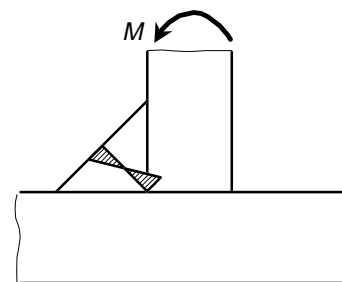


Figure 4.4.3 — Contraintes de la racine d'une soudure d'angle

4.4.4 Pièces coulées

(1) La contrainte structurale principale doit être obtenue par analyse des contraintes finies ou extensométrie dans le cas de formes complexes, en l'absence de solutions étalons.

4.5 Spectres de contraintes

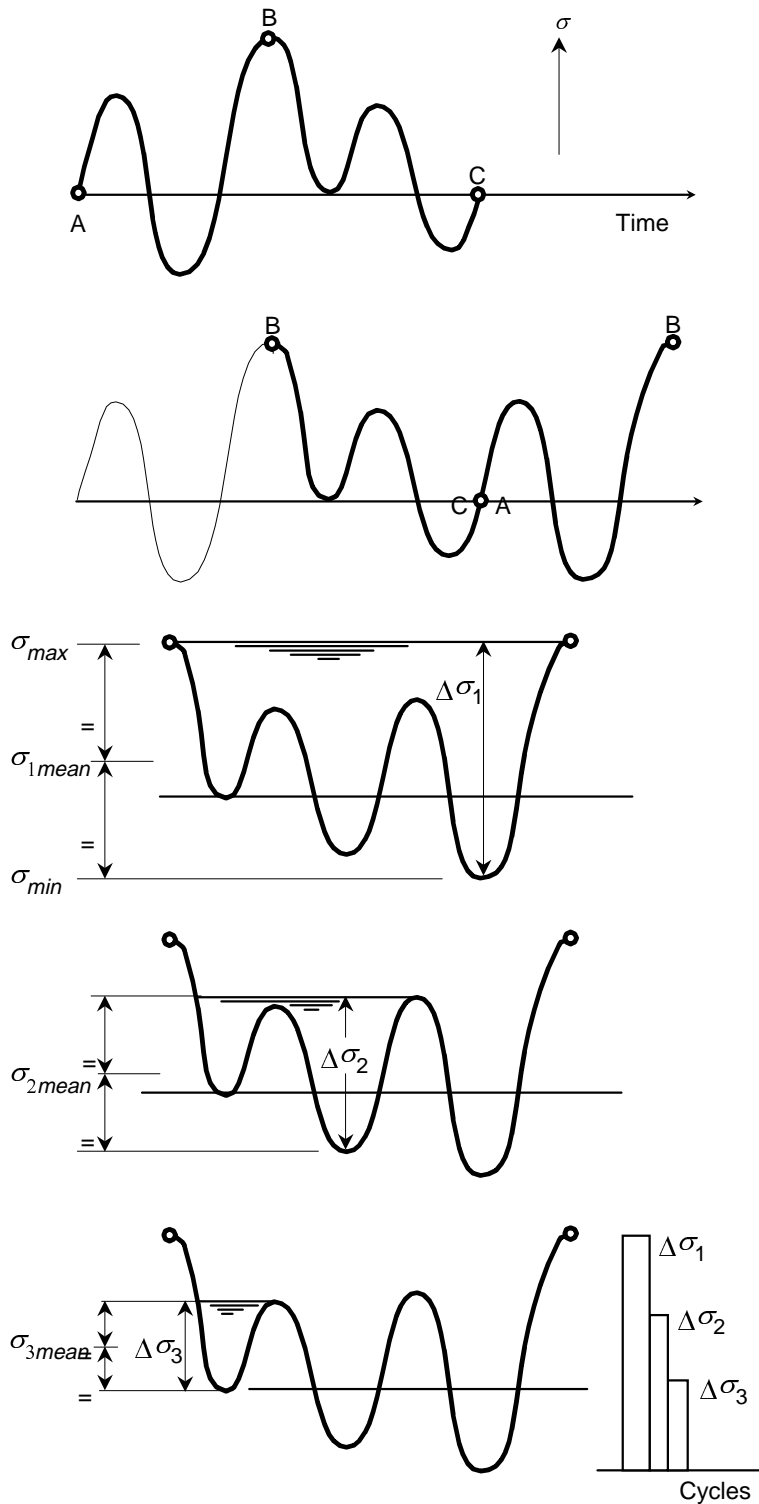
4.5.1 Comptage des cycles

(1) Le comptage des cycles est une méthode de répartition d'un historique de contraintes complexe en un spectre pratique de cycles en termes d'étendue de contraintes $\Delta\sigma$, de nombre de cycles n et, si nécessaire, de rapport R (voir Figure 2.2.1 et 5.3). Différentes méthodes sont utilisées.

(2) Pour les historiques de contraintes à court terme où les événements de charges simples sont répétés un certain nombre de fois, la méthode du réservoir est recommandée. Cette méthode, facilement visualisable, est simple à utiliser (voir Figure 4.5.1). Lorsque des historiques de contraintes à long terme doivent être utilisés, tels que ceux obtenus à partir des tensions mesurées dans des structures réelles (voir annexe C), la méthode du comptage des demi-cycles est recommandée. Les deux méthodes conviennent à une analyse électronique.

4.5.2 Calcul du spectre de contraintes

(1) Le classement des cycles par ordre décroissant d'amplitude $\Delta\sigma$ produit un spectre de contraintes. Pour un calcul facile, il peut être nécessaire de simplifier un spectre complexe en un spectre comportant moins de bandes. Une méthode classique consiste à regrouper les bandes en des groupes plus importants contenant le même nombre total de cycles, mais dont l'amplitude est égale à celle de la bande la plus élevée du groupe. Plus précisément, la moyenne pondérée de toutes les bandes d'un groupe peut être calculée à l'aide de la puissance m , où m est la pente inverse de la courbe $\Delta\sigma-N$ dont l'utilisation est la plus vraisemblable (voir Figure 4.5.2). L'utilisation d'une valeur moyenne arithmétique traduit toujours un défaut de prudence.



Etape 1. Déterminer le variogramme des contraintes pour l'événement de charge. Identifier le point de pic B.

Etape 2. Déplacer le variogramme des contraintes de la gauche du point de pic B vers la droite.

Etape 3. Remplir le "réservoir" "d'eau". La plus grande profondeur est le cycle principal.

Etape 4. Vidanger au niveau de la plus grande profondeur. Déterminer la nouvelle profondeur maximale. Cette dernière constitue le deuxième plus grand cycle.

Etape 5 et suivantes. Répéter l'opération jusqu'à ce que toute "l'eau" soit vidangée. La somme de tous les cycles est le spectre de contraintes pour le variogramme susmentionné.

Figure 4.5.1 — Méthode de comptage des cycles, dite du réservoir

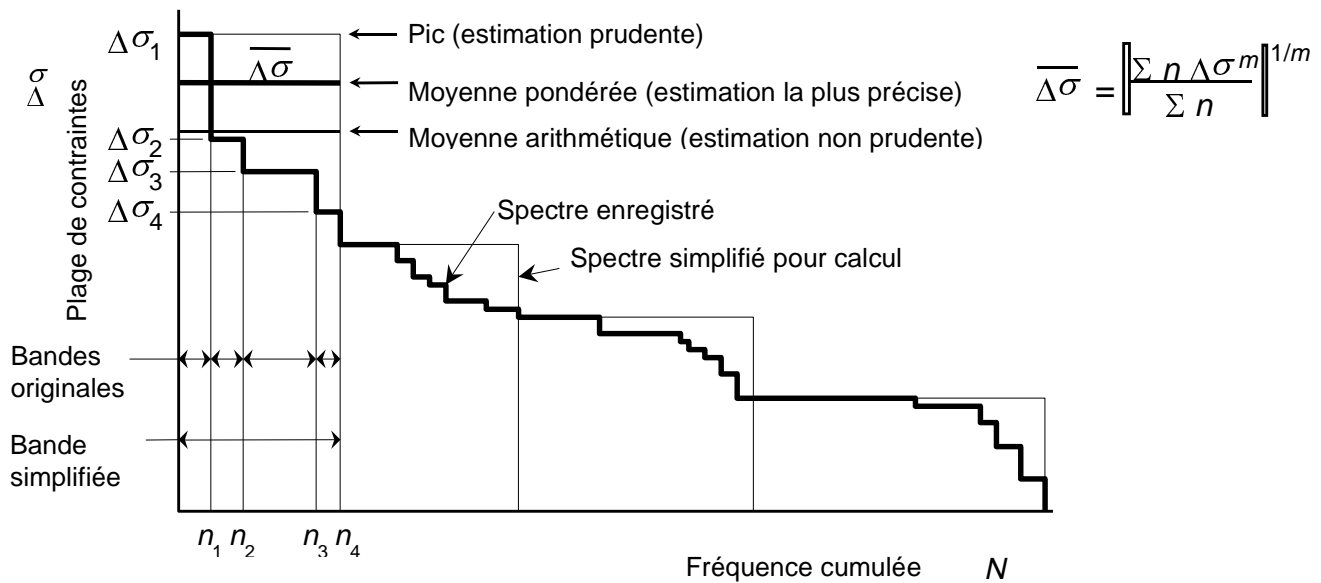


Figure 4.5.2 — Spectre d'étendues de contraintes simplifié

5 Résistance à la fatigue

5.1 Catégories d'éléments

5.1.1 Facteurs affectant la catégorie d'éléments

(1) La résistance à la fatigue d'un élément doit tenir compte des facteurs suivants :

- a) le sens de la contrainte d'ondulation par rapport à l'élément ;
- b) l'emplacement de l'amorce de fissure dans l'élément ;
- c) la disposition géométrique et la proportion relative d'élément.

(2) La résistance à la fatigue peut également dépendre des facteurs suivants :

- d) le type de produit ;
- e) le matériau (à moins qu'il ne soit soudé) ;
- f) la méthode de fabrication ;
- g) le niveau de contrôle après fabrication ;
- h) le niveau de qualité (dans le cas de soudures et de pièces coulées).

5.1.2 Tableaux des catégories d'éléments

(1) Les catégories pour les éléments les plus couramment utilisés ont été divisées en cinq groupes de base, à savoir :

- a) les éléments non soudés des alliages corroyés et coulés (voir Tableau 5.1.1) ;
- b) les éléments soudés à la surface de l'élément soumis à une charge (voir Tableaux 5.1.2(a) et 5.1.2(b)) ;
- c) les éléments soudés au niveau des assemblages d'extrémité (voir Tableau 5.1.3) ;

- d) les assemblages mécaniques (voir Tableau 5.1.4) ;
- e) les joints collés (voir Tableau 5.1.5).

5.2 Données relatives à la résistance à la fatigue

5.2.1 Éléments classés

(1) La forme généralisée de la relation $\Delta\sigma-N$ est représentée à la Figure 1.5.2, et est tracée sur des échelles logarithmiques. La courbe de calcul représente un niveau moyen d'écart-type moins 2 en dessous de la ligne moyenne obtenue avec les données d'expérience.

(2) La relation de base de calcul de la fatigue pour des durées inférieures à 5×10^6 cycles est définie par l'équation suivante :

$$N_i = 2 \times 10^6 \times \left(\frac{\Delta\sigma_c}{\Delta\sigma_i} \frac{1}{\gamma_{Ff} \gamma_{Mf}} \right)^{m_1} \quad (5.1)$$

où :

- N_i est le nombre prévu de cycles à la rupture de l'étendue de contraintes $\Delta\sigma_i$;
- $\Delta\sigma_c$ est la valeur de référence de la résistance à la fatigue à 2×10^6 cycles, en fonction de la catégorie d'élément ;
- $\Delta\sigma_i$ est l'étendue de contraintes principale au niveau d'élément et est constante pour tous les cycles ;
- m_1 est la courbe inverse de la courbe $\Delta\sigma-N$, en fonction de la catégorie d'élément ;
- γ_{Ff} est le facteur partiel de sécurité autorisant des incertitudes du spectre de charge et de l'analyse de la réponse (voir 3.4) ;
- γ_{Mf} est le facteur partiel de sécurité pour les incertitudes observées dans les matériaux et leur exécution (voir 5.2.1(3)).

(3) Pour les applications normales où le calcul est conforme à la présente prénorme, y compris les exigences de fabrication de l'annexe D, une valeur de $\gamma_{Mf} = 1,0$ peut être appliquée (se référer toutefois à 5.2.3(3) dans le cas de joints collés).

(4) La limite de fatigue à amplitude constante, $\Delta\sigma_D$, est effective à 5×10^6 cycles, niveau en dessous duquel les cycles de contraintes sont supposés être non préjudiciables. Toutefois, même si des cycles occasionnels se produisent au dessus de ce niveau, ils provoquent une propagation qui, à mesure de l'extension de la fissure, entraîne des cycles d'amplitude inférieure et préjudiciables. C'est pourquoi, il convient de modifier la pente logarithmique inverse m_2 des courbes $\Delta\sigma-N$ de base entre 5×10^6 et 10^8 cycles en valeur m_2 pour des conditions de charge d'un spectre général, où $m_2 = m_1 + 2$.

(5) Tous les cycles de contraintes inférieurs à la limite de coupure $\Delta\sigma_L$, effective à 10^8 cycles, sont généralement supposés non préjudiciables.

(6) La relation $\Delta\sigma-N$ est entièrement décrite par la catégorie d'élément à double chiffre $\Delta\sigma_c - m_1$ où $\Delta\sigma_c$ est un entier exprimé en unités de N/mm^2 . Leur valeurs sont données dans les Tableaux 5.1.1 à 5.1.5. Les courbes $\Delta\sigma-N$ sont données dans les Figures 5.2.1 à 5.2.5.

(7) Le Tableau 5.2.6 donne une plage normale de valeurs $\Delta\sigma_c$ afin de définir une plage finie de catégories et de permettre à un intervalle géométrique constant d'augmenter ou de réduire une catégorie. Une augmentation (ou une réduction) d'une catégorie signifie qu'il faut sélectionner la valeur $\Delta\sigma_c$ suivante la plus grande (ou la plus petite) tout en conservant la même valeur de m_1 et de m_2 .

8)P Les catégories d'éléments sont sûres pour toutes les valeurs de contrainte moyenne (voir 5.3) mais n'autorisent l'utilisation d'aucun autre environnement que le milieu ambiant (voir 5.4).

9) Il peut être prudent d'utiliser la constante de pente inverse $m_2 = m_1 + 2$ pour certains spectres. Lorsqu'un calcul dépend de manière critique de cette zone et lorsque l'on recherche une économie maximale, il peut être opportun d'envisager d'utiliser des essais partiels (voir annexe C.3.1) ou d'appliquer l'analyse de la mécanique de la rupture (voir annexe B).

(10)P Les valeurs des catégories d'éléments indiquées entre parenthèses dans les Tableaux 5.1.2(b) et 5.1.3 peuvent être obtenues uniquement avec des niveaux élevés de qualité de soudage non immédiatement vérifiables par les méthodes normales d'essai non destructif. Afin de satisfaire aux besoins d'assurance qualité, il convient de n'utiliser les valeurs entre parenthèses que lorsque l'on applique des méthodes particulières de contrôle qui se sont révélées capables de détecter et d'évaluer les dimensions critiques des discontinuités de soudure que la mécanique de la rupture ou les essais (voir annexe B et C) ont dû établir.

5.2.2 Éléments non classés

(1) On évalue généralement les éléments non entièrement couverts par les Tableaux 5.1.1 à 5.1.5 en se référant le cas échéant aux données publiées. Des essais alternatifs d'acceptation de la fatigue peuvent être effectués conformément à l'annexe C.3.

5.2.3 Assemblages collés

(1) Il convient que le calcul des joints collés tienne compte des éléments suivants :

- il est recommandé de réduire les efforts d'arrachement au minimum ;
- il y a lieu de minimiser les concentrations de contraintes ;
- il convient de maintenir les tensions dans le métal de base en dessous de la limite d'élasticité ;
- la conversion chimique ou l'anodisation des surfaces améliore généralement la résistance à la fatigue par comparaison au dégraissage ou à l'abrasion ;
- les milieux agressifs réduisent généralement la résistance à la fatigue.

(2) La résistance de référence à la fatigue d'un joint à recouvrement collé dont le plan de joint est défailant est définie par l'équation suivante :

$$\Delta\sigma_c = k_{c,adh} \cdot f_{v,adh} \quad (5.2)$$

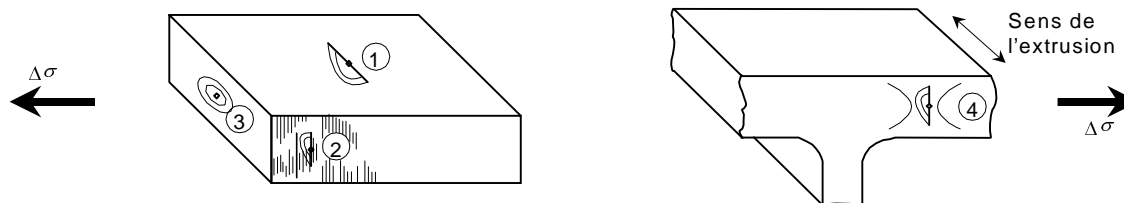
où

$k_{c,adh}$ est la valeur du facteur de résistance à la fatigue du joint collé k_{adh} à $N = 2 \times 10^6$ cycles ;

$f_{v,adh}$ est la résistance caractéristique au cisaillement de l'adhésif obtenue avec un essai étalon statique de cisaillement et de recouvrement (voir partie 1.1 de la présente prénorme).

(3) Il est recommandé d'effectuer les essais dans des conditions représentatives de géométrie, de réalisation et de milieu environnant pour les applications critiques. Il convient sinon d'utiliser une valeur élevée de γ_{Mf}

Tableau 5.1.1 — Catégories d'éléments pour un matériau non ouvré



Formes de produit		Tôle, Feuille, Tige et barre simples filées		Profilés façonnés, Tubes, pièces forgées		Tôle, feuille, profilés pleins, pièces forgées		Profilés creux		Pièces coulées		
Amorce	N° de référence	1,2		1,2		1,2		2		1	3	
	Emplacement	Faible irrégularité de surface		→	→	→	→	Soudure par extrusion		Irrégularité de surface	Discontinuité interne	
Orientation de la contrainte (voir 4.3.4)		PARALLELE à la direction de laminage ou d'extrusion →				PERPENDICULAIRE au laminage ou au sens d'extrusion		PERPENDICULAIRE au sens d'extrusion		-	-	
Alliages		7020	Selon le Tableau 1.1.1 (à l'exception de 7020)		7020	Selon le Tableau 1.1.1 (à l'exception de 7020)		7020	Série 6**** selon le Tableau 1.1.1		Selon le Tableau 1.1.2	
Exigences particulières	Dimension	Surfaces exemptes d'angles vifs à moins que la pièce ne soit parallèle à la direction de contrainte → → → → → →										
		Le profil ne présente aucun angle rentrant, Absence de contact avec les autres pièces										
	Fabrication	Usinage uniquement avec une fraise à fileter à grande vitesse						Filé par orifice de remplissage ou filière à pont		Pièce coulée selon le tableau 1.1.2. Usinage admis uniquement si effectué par fraise à fileter à grande vitesse		
	Contrôle/essai	Visuel	→	→	→	→	→	→	Essais d'évasement au niveau des extrémités du profilé		Ressuage	Radiographie
Norme qualité		Etat de surface (R _a < 0.5mm)		Absence d'éraflure transversale à la direction de contrainte		→		Absence de rupture par essai d'évasement le long du cordon de soudure		Annexe D, Tableau D.4		
Analyse des contraintes	Paramètre de contrainte	Contrainte de structure principale au niveau de l'amorce → → → → → → → → → →										
	Concentrations de contraintes déjà admises	Etat de surface		→	→	→	→	→	→	→	→	Porosité interne admise
Numéro de type		1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	1.10	
Catégorie d'élément Δσ _c - m ₁		121 - 7	86 - 7	96 - 7	69 - 7	96 - 7	69 - 7	86 - 7	62 - 7	77 - 6	77 - 6	

Légende : → les règles d'exigence vont de gauche à droite.

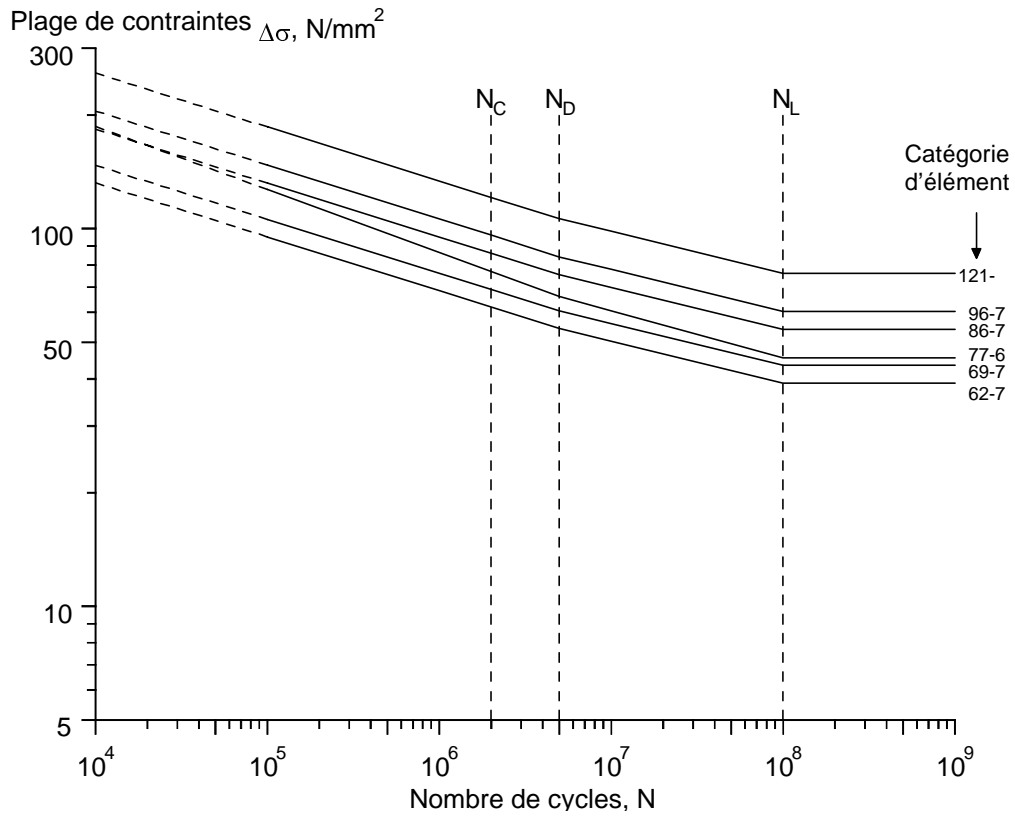
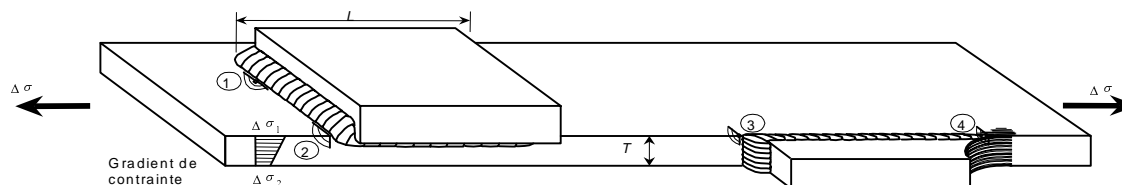


Figure 5.2.1 — Courbes $\Delta\sigma$ -N pour matériau non ouvré

Tableau 5.2.1— Valeurs numériques de $\Delta\sigma$ (N/mm²) pour matériau non ouvré

Catégorie d'élément ($N = 2 \times 10^6$)		$N = 10^5$	$N_D = 5 \times 10^6$	$N_L = 10^8$
$\Delta\sigma_c$	m_1	$\Delta\sigma$	$\Delta\sigma_D$	$\Delta\sigma_L$
121	7	185,6	106,2	76,1
96	7	147,3	84,2	60,4
86	7	131,9	74,4	54,1
77	6	126,9	66,1	45,5
69	7	105,9	60,5	43,4
62	7	95,1	54,4	39,0

Tableau 5.1.2(a) Eléments avec fixations soudées – Bord de soudure transversal



Types de produits		Produits laminés, filés et forgés															
Amorce	N° référence	1				2				3		4					
	Emplacement	Au niveau du bord transversal de la soudure d'un élément soumis à contrainte				→ → → →				→ →		Au niveau de l'extrémité de soudure longitudinale					
		sur la surface à distance de l'extrémité				→ → → →				Au niveau de l'angle		Sur l'extrémité		Sur le bord de soudure meulé de l'extrémité			
Orientation des contraintes (voir 4.3.4)		Perpendiculaire au bord de soudure transversal				→ → → →				→ →		Parallèle à l'axe de soudure					
Alliages		selon le tableau 1.1.1. → → → → → → → → → → → → →															
Exigences particulières	Dimension	Géométrie des joints		Fixation sur la surface de l'élément → → → → → → → →								Fixation sur le bord de l'élément →					
		Soudé à la surface à distance de l'angle		→ → → →				Angle arrondi soudé		Soudure sur l'extrémité → →							
	Longueur L(mm) > ≤		0 10	10 20	20 30	30 50	50 80	80 120	120 200	200 ¥	L et T comme pour les types 2.1 à 2.8		Absence de rayon		Rayon d'angle R (mm)		
	Epaisseur T (mm)		Voir tableau ci-dessous → → → → → → → →										10<R≤20		20≤R≤40		R>40
	Fabrication										Lisser le caniveau		Rayon de meulage dans la direction de Δσ*				
Contrôle/essai		selon l'annexe D, Tableau D1 → → → → → → → → → → → → →															
Norme qualité		selon l'annexe D, T tableau D2 → → → → → → → → → → → → →															
Analyse des contraintes	Paramètre de contrainte		Contrainte nominale au niveau de l'amorce → → → → → → → → → → → → →														
	Concentrations de contraintes déjà admises		Profil de soudure autorisé par l'annexe D Tableau D2 → → → → → → → →														
		Effet de raidissement de la fixation → → → → → → → → → → → → →															
Numéro de type		2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	2,10	2,11	2,12	2,13			
Catégorie d'élément Δσ _c m ₁ = 3,2 pour tous les types		T ≤ 4 31 31 31 31 31	4 < T ≤ 10 28 28 28 28 28	10 < T ≤ 15 25 25 25 25 25	15 < T ≤ 20 25 25 25 25 25	20 < T ≤ 25 22 22 22 22 22	25 < T ≤ 30 22 22 22 22 22	30 < T ≤ 35 22 22 22 22 22	35 < T ≤ 40 20 20 20 20 20	T > 40 18 18 18 18 18	selon les Types 2.1 à 2.8, mais réduit par une catégorie d'élément		18	25	28	31	
Réglage du gradient de contrainte		où Δσ ₁ et Δσ ₂ connaissent une augmentation de sens opposé par 2 Catégories où T ≤ 15mm ou 1 catégorie où 15 < T ≤ 40mm															
Légende : * Le bord de la soudure doit être entièrement meulé → les règles d'exigence vont de gauche à droite.																	

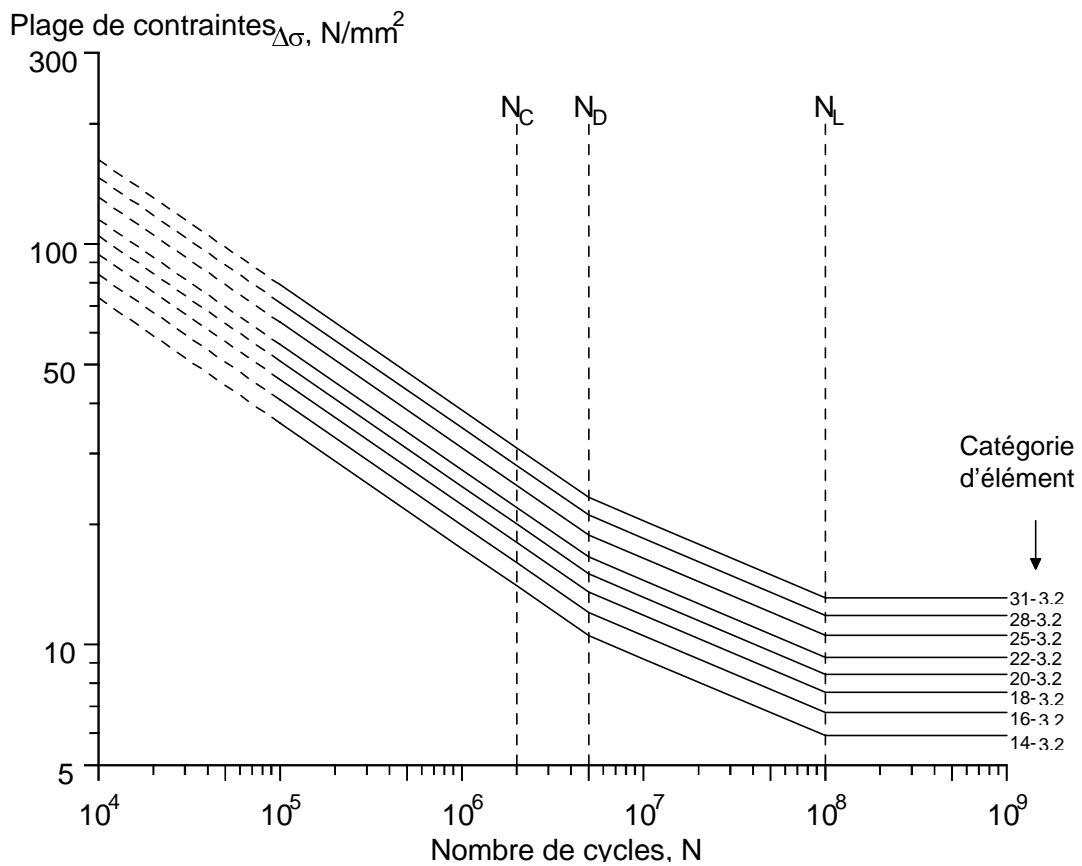
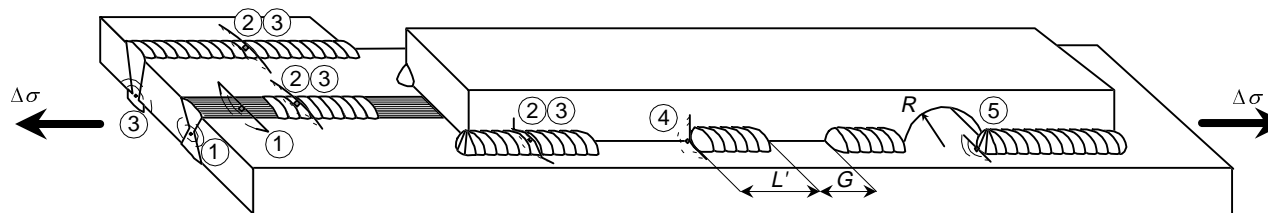


Figure 5.2.2(a) — Courbes $\Delta\sigma$ - N pour les éléments à fixations soudées – Bord de soudure transversal

Tableau 5.2.2(a) — Valeurs numériques de $\Delta\sigma$ (N/mm²) pour les éléments à fixations soudées – bord de soudure transversal

Catégorie d'élément ($N = 2 \times 10^6$)		$N = 10^5$	$N_D = 5 \times 10^6$	$N_L = 10^8$
$\Delta\sigma_c$	m_1	$\Delta\sigma$	$\Delta\sigma_D$	$\Delta\sigma_L$
31	3,2	79,1	23,2	13,1
28	3,2	71,4	21,0	11,8
25	3,2	63,8	18,8	10,6
22	3,2	56,1	16,5	9,3
20	3,2	51,0	15,0	8,4
18	3,2	45,9	13,5	7,6
16	3,2	40,8	12,0	6,8
14	3,2	35,7	10,5	5,9

Tableau 5.1.2(b) — Catégories d'élément des éléments à fixations soudées — Soudures longitudinales



Types de produits		Produits laminés, filés et forgés				
Amorce	N° référence	1	2	3	4	5
	Emplacement	Discontinuité de soudure	Vague de solidification	Arrêt-marche	Bord ou cratère de soudure	Bord ou cratère de soudure
Orientation des contraintes (voir 4.)		Parallèle à l'axe de soudure →		→	→	→
Alliages		selon le tableau 1.1.1. →		→	→	→
Exigences particulières	Dimension	Pénétration complète			Soudure d'angle discontinue	Orifice du contre-profil centré sur l'axe de soudure
		Soudure bout à bout double face			$G \leq 2.5L$	$R \leq 25mm$
	Fabrication	Soudage automatique continu				
		Chapeaux de soudage meulés à niveau dans la direction de Ds				
		Les supports à l'envers non subsistants (et les soudures de fixation) doivent être continues →				
	Contrôle/essai	selon l'annexe D Tableau D1 →		→	→	→
Norme qualité	selon l'annexe D Tableau D2 →		→	→	→	
Analyse des contraintes	Paramètres de contraintes	Contrainte nominale au niveau de l'amorce →		→	→	→
		Tout matériau de fixation doit être inclus dans les propriétés de section			→	→
	Concentrations de contraintes déjà admises	Discontinuités de soudure admises par l'annexe D Tableau D.1. →		→	→	→
				présence d'orifice de contre-profil		
Numéro de type		2,14	2,15	2,16	2,17	2,18
Catégorie d'élément $\Delta\sigma_c\text{-}m_1$		(60-4,5)55-4,5	44-4,5	35-4	31-3,5	28-3,5
Légende : → les règles d'exigence vont de gauche à droite () avant d'utiliser les valeurs entre parenthèses, voir 5.2.1(10)						

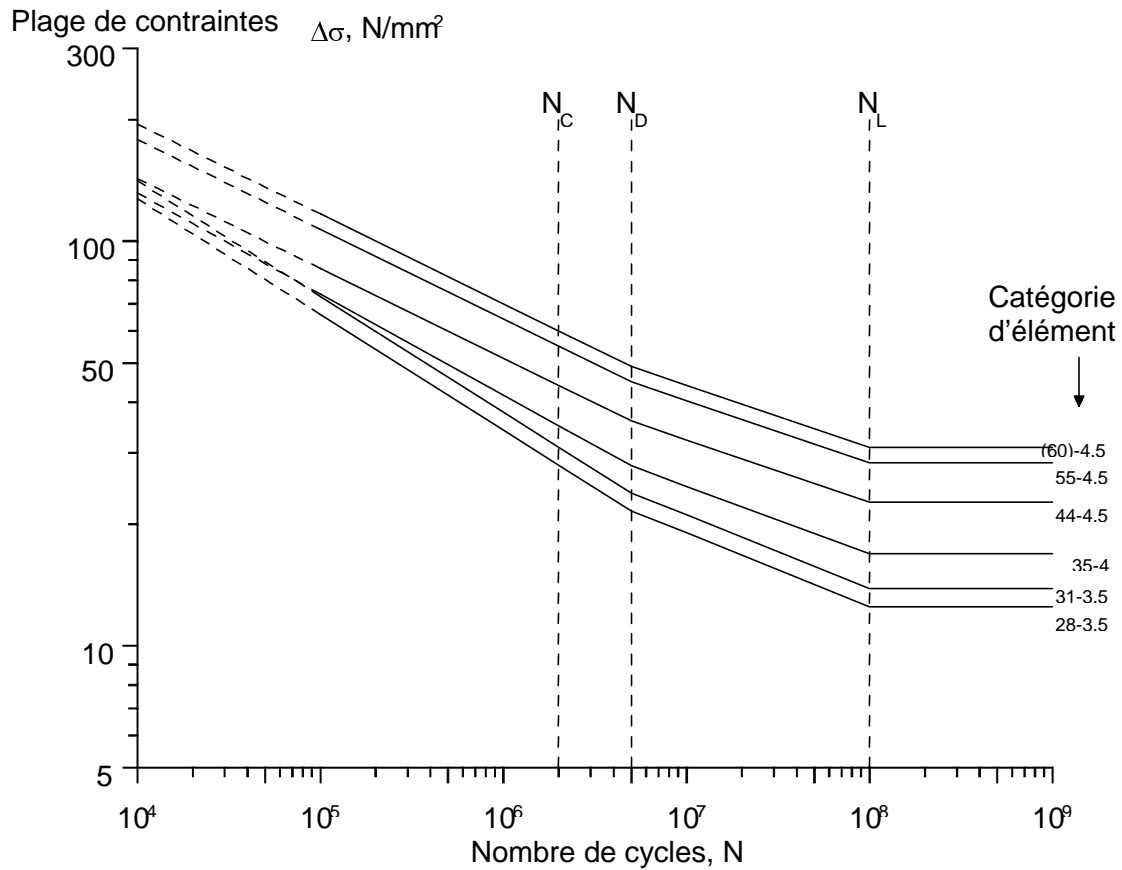
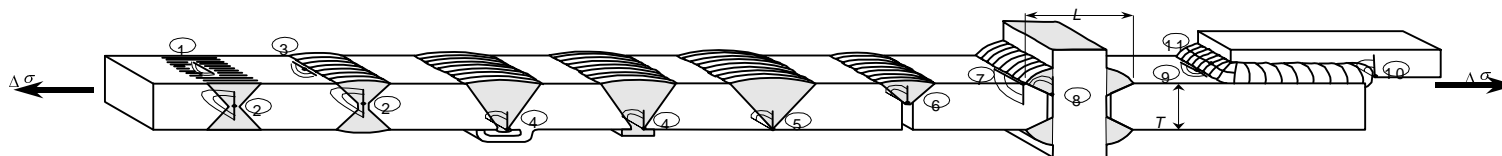


Figure 5.2.2(b) — Courbes $\Delta\sigma$ -N pour les éléments à fixations soudées — Soudures longitudinales

Tableau 5.2.2(b) — Valeurs numériques de $\Delta\sigma$ (N/mm²) pour les éléments à fixations soudées — Soudures longitudinales

Catégorie d'élément ($N = 2 \times 10^6$)		$N = 10^5$	$N_D = 5 \times 10^6$	$N_L = 10^8$
$\Delta\sigma_c$	m_1	$\Delta\sigma$	$\Delta\sigma_D$	$\Delta\sigma_L$
(60)	4,5	116,8	48,9	30,9
55	4,5	107,0	44,9	28,3
44	4,5	85,6	35,9	22,6
35	4	74,0	27,8	16,8
31	3,5	73,0	23,9	13,8
28	3,5	65,9	21,6	12,5

Tableau 5.1.3 —Catégories d'éléments pour les assemblages soudés entre éléments



Types de produit		Produits laminés, filés et forgés → → → → → → →										Pièces coulées			
Amorces	N° de référence.	1, 2	3, 2	4	5	6	7		8	9, 10	11	selon les types 3.1 à 3.10			
	Emplacements	Discontinuité de surface ou incrustée	Bord de soudure ou discontinuité incrustée	Racine de soudure	Discontinuité de la racine	Racine infondue	Bord de soudure	Bord de soudure	Racine de soudure	Bord de soudure	Racine de soudure				
Orientation des contraintes (voir 4....)		Perpendiculaire à l'axe de soudure → → → → → → → → →													
Alliages		selon le tableau 1.1.1 → → → → → → → → →										tableau 1.1.2			
Exigences particulières	Dimension	Type d'assemblage	Bout à bout droit → → → →				En croix ou en T →			Recouvrement →		selon les Types 3.1 to 3.10			
		Type de soudure	Bout à bout → → → →				Bout à bout			Angle →					
		Préparation	Bilatérale →		unilatérale →										
		Pénétration	Complète →				partielle		complète		partielle →				
		Transition	Inclinaison de dépouille L1 de 4 pour toute modification de largeur ou d'épaisseur →												
	Fabrication	Racine	meulée →		étayée		non étayée		meulée						
		Chapeau	Meulé de niveau												
		Extrémités	Tôles d'extension utilisées sur les extrémités, découpées et meulées de nouveau à la direction de $\Delta\sigma$						→		→				
Contrôle/essai		selon l'annexe D Tableau D.1 →		→		→		→		→					
Norme qualité		selon l'annexe D Tableau D.2 →		→		→		→		→					
Analyse des contraintes	Paramètre de contrainte	Gorge nette + contrainte spécifiée de décalage (pas de bavure de laminage)				→		section nette		gorge nette		section nette		gorge nette	
	Effets des concentrations de contraintes inclus dans la catégorie d'élément	Décalage et discontinuités du profil non spécifiés admis par l'annexe D Tableau D.2 →						→			→			→	
Numéro de type		3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6	3.7	3.8	3.9	3.10	3.11 à 3.20			
Catégorie d'élément $\Delta\sigma_c - m_1$	Méplats, pleins	(55-6) 44-5	(39-4) 35-4	(35-4) 25-3,2	(29-3,2) 18-3,2	14-3,2	selon le tableau 5.1.2(a) Types 2.1 à 2.9		18-3,2	selon les types 3.6 et 3.7		14-3,2	selon les types 3.1 à 3.10 moins 1 Catégorie d'élément		
	Profils ouverts	(44-5) 28-4	(35-4) 28-4												
	Creux	NA	NA												
Légende : NA = non applicable, → les règles d'exigence vont de gauche à droite () Avant d'utiliser les valeurs entre parenthèses, voir 5.2.1(10)															

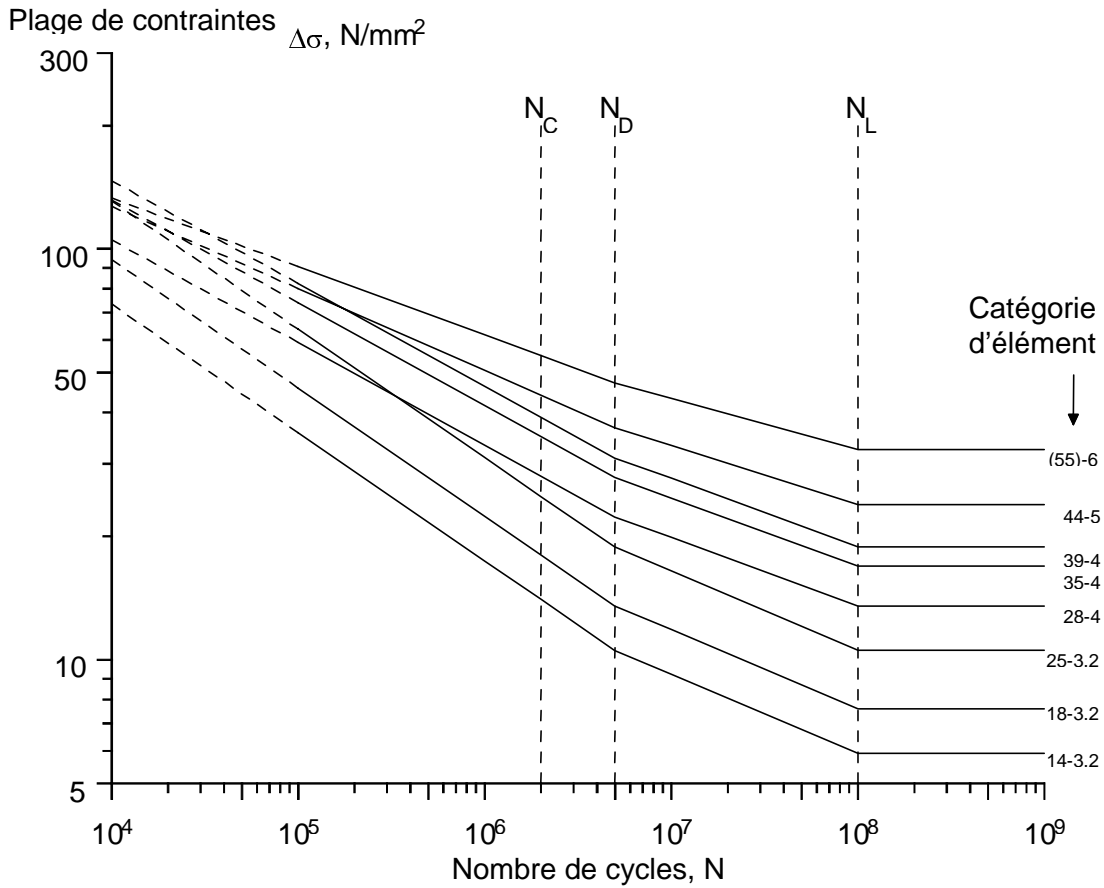
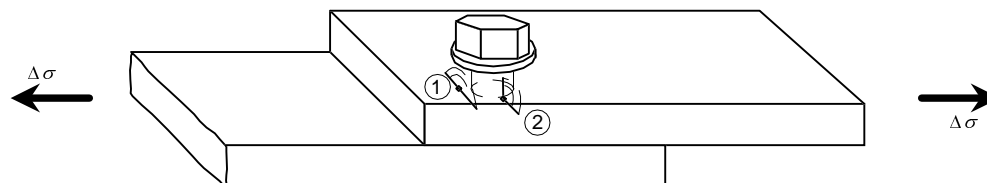


Figure 5.2.3 — Courbes $\Delta\sigma$ - N pour les assemblages soudés entre éléments

Tableau 5.2.3 — Valeurs numériques de $\Delta\sigma$ (N/mm²) pour les assemblages soudés entre éléments

Catégorie d'élément ($N = 2 \times 10^6$)		$N = 10^5$	$N_D = 5 \times 10^6$	$N_L = 10^8$
$\Delta\sigma_c$	m_1	$\Delta\sigma$	$\Delta\sigma_D$	$\Delta\sigma_L$
(55)	6	90,6	47,2	32,5
44	5	80,1	36,6	23,9
39	4	82,5	31,0	18,8
35	4	74,0	27,8	16,8
28	4	59,2	22,3	13,5
25	3,2	63,8	18,8	10,6
18	3,2	45,9	13,5	7,6
14	3,2	35,7	10,5	5,9

Tableau 5.1.4 — Catégories d'éléments pour assemblages fixés



Type de fixation		Précontrainte (à frottement)		Non précontrainte (à palier)	
		Boulon haute résistance	Rivet tendu	Boulon	Rivet à expansion
Types de produit		Produits laminés, filés et forgés →		→	
Amorce	N° de référence	1, (2)	1, (2)	2	2
	Emplacement	Devant l'orifice (parfois au bord de l'orifice) →		Bord de l'orifice →	
Orientation des contraintes		Parallèle au sens de laminage ou d'extrusion →		→	
Alliages		selon le tableau 1.1.1 →		→	
Matériaux de fixation		Acier, R _{p0,2} ³ 640 N/mm ² →		selon la partie 1 →	
Exigences particulières	Dimension	Assemblage à recouvrement avec surfaces parallèles planes →		Assemblage à recouvrement →	
		Rondelle en acier sous la tête de boulon et sous l'écrou			
	Fabrication	Usinage uniquement par fraise à fileter à grande vitesse →		→	
		Trous percés (avec alésage facultatif) ou poinçonnés (avec alésage obligatoire si épaisseur >6mm)		→	
	Assemblage	Les surfaces de liaison dégraissées ou grenillées doivent être entièrement en contact avec une précontrainte de 30% sur tous les boulons	Les surfaces de liaison dégraissées ou grenillées doivent être entièrement en contact à l'aide de boulons provisoires	Les trous observés dans les plis doivent être alignés à ± 0,5mm	
Fixation	Les boulons doivent être serrés à une charge d'épreuve minimale de 85%	La tête de rivet doit être sertie tandis que le rivet est soumis à une charge d'épreuve minimale de 85%	Les boulons doivent être serrés à une charge d'épreuve minimale de 50% à moins que des contre-écrous ne soient utilisés	Les rivets doivent être placés jusqu'à ce que les surfaces de liaison soient en contact	
Contrôle/essai	Vérification de la rotation finale du couple de serrage/écrou après réalisation du serrage		Vérification du couple final en cas de non utilisation des contre-écrous		
Analyse des contraintes	Paramètre de contrainte	Contrainte nominale fondée sur les propriétés de section brutes →		Contrainte nominale fondée sur les propriétés de section nettes	
	Concentrations des contraintes déjà admises	Etat de surface, géométrie de l'orifice d'assemblage, répartition inégale des charges entre les rangées de boulons et excentricité de la voie de contrainte uniquement avec les joints de recouvrement symétriques à double protection →		→	
Numéro de type		4.1	4.2	4.3	4.4
Catégorie d'élément Δσ _c - m ₁		55 - 4	55 - 4	55 - 4	55 - 4

Légende : → les règles d'exigence vont de gauche à droite.

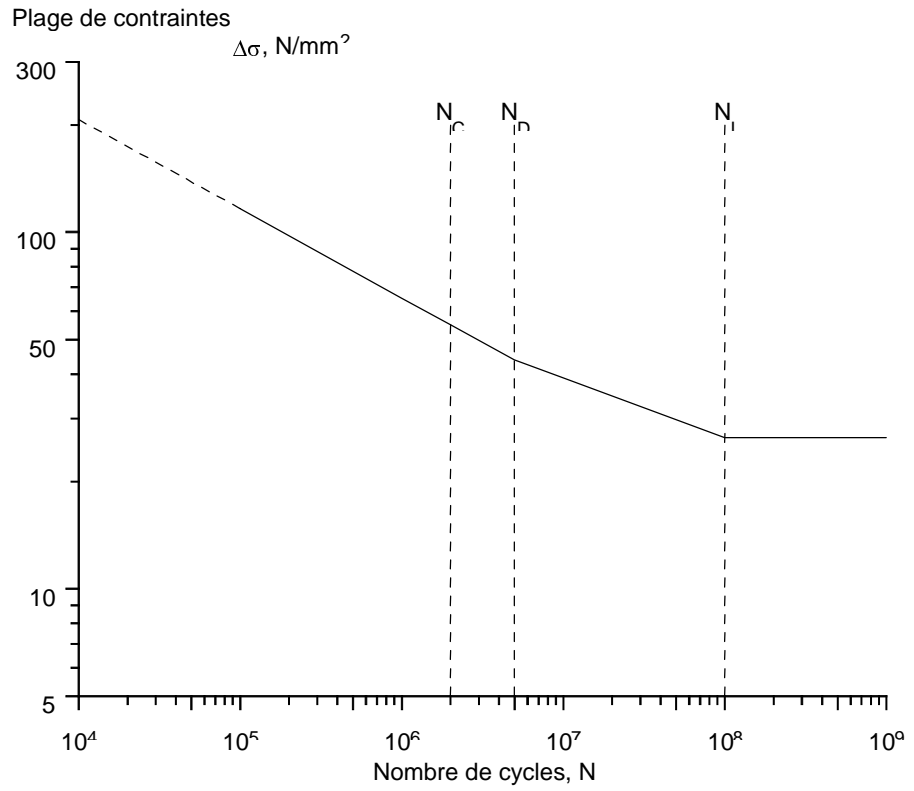
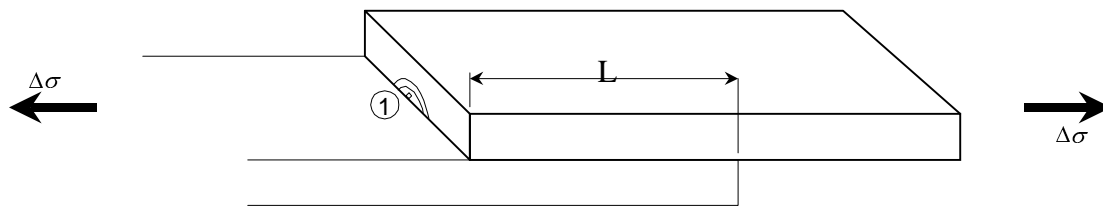


Figure 5.2.4 — Courbe $\Delta\sigma$ - N pour les assemblages fixés

Tableau 5.2.4 — Valeurs numériques de $\Delta\sigma$ (N/mm^2) pour les assemblages fixés

Catégorie d'élément ($N = 2 \times 10^6$)		$N = 10^5$	$N_D = 5 \times 10^6$	$N_L = 10^8$
$\Delta\sigma_c$	m_1	$\Delta\sigma$	$\Delta\sigma_D$	$\Delta\sigma_L$
55	4	116,3	43,7	26,5

Tableau 5.1.5 — Catégorie d'élément pour les assemblages collés



Types de produits		Produits laminés, filés et forgés
Amorce	N° de référence	1
	Description	Sur la ligne de joint au niveau du bord d'attaque
Orientation des contraintes		Perpendiculaire au bord d'attaque
Alliages		selon le tableau 1.1.1
Adhésifs		Epoxy simple et double
Exigences particulières	Cote	Joint de recouvrement Épaisseur de la partie la plus mince $\leq 8\text{mm}$
	Fabrication	Usinage uniquement à l'aide d'une fraise à fileter à grande vitesse
	Préparation de la surface	Dégraissage ou chromatisation
	Assemblage	Épaisseur de la ligne de joint dans les limites de tolérances spécifiées pour l'essai de résistance au cisaillement
	Contrôle/essai	selon la Partie 1-1
Analyse des contraintes	Paramètre de contrainte	Contrainte moyenne de cisaillement fondée sur une longueur véritable L_{adh} (voir 4.4.3(11))
	Concentrations de contraintes déjà admises	Pic de contrainte au niveau du bord d'attaque, excentricité de la voie de contrainte uniquement avec les joints de recouvrement symétriques à double protection
Catégorie d'élément $\Delta\sigma_c - m_1$		$0,11 f_{vadh} - 6$

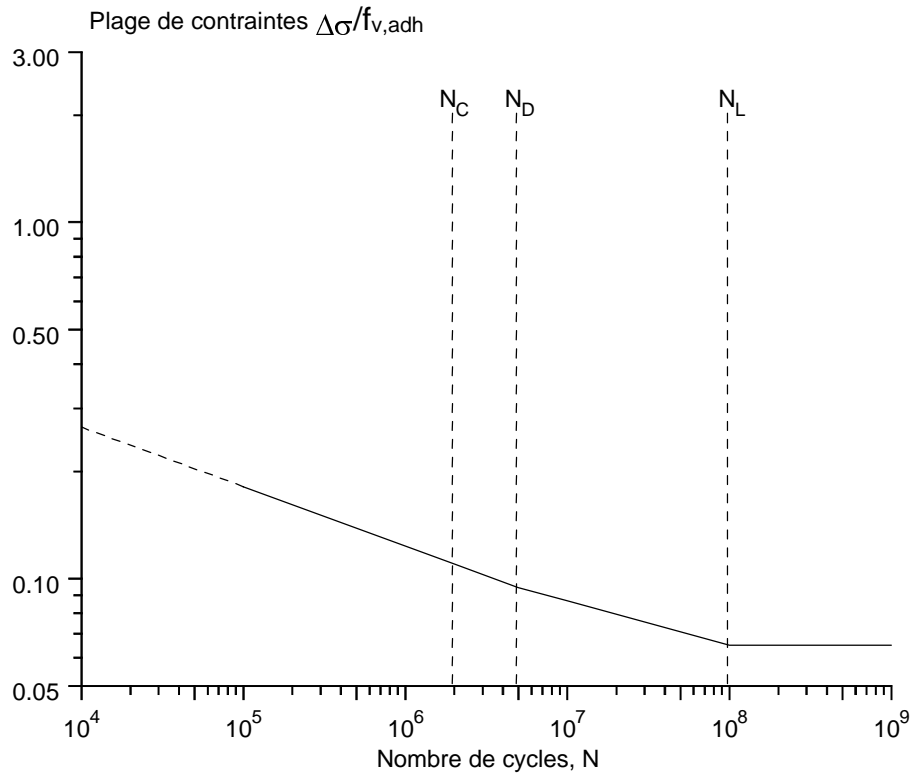


Figure 5.2.5 — Courbe $\Delta\sigma f_{v,adh}$ pour joints collés

Tableau 5.2.5 — Valeurs numériques pour k_{adh} ($=\Delta\sigma f_{v,adh}$) pour les joints collés

Catégorie d'élément ($N = 2 \times 10^6$)		$N = 10^5$	$N_D = 5 \times 10^6$	$N_L = 10^8$
$\Delta\sigma_c f_{v,adh}$	m_1	$\Delta\sigma f_{v,adh}$	$\Delta\sigma_D f_{v,adh}$	$\Delta\sigma_L f_{v,adh}$
0,11	6	0,181	0,94	0,065

Tableau 5.2.6 — Plage normale des valeurs $\Delta\sigma_c$ (N/mm²)

12, 14, 16, 18, 20, 22, 25, 28, 31, 35, 39, 44, 49, 55, 62, 69, 77, 86, 96, 108, 121, 135,
NOTE Ne s'applique pas aux joints collés

5.2.4 Contrainte au point chaud

Les valeurs de $\Delta\sigma_c$ pour l'évaluation de la contrainte au point chaud sont données dans le Tableau 5.2.7.

Tableau 5.2.7 — Valeurs $\Delta\sigma_c - m_1$ pour l'évaluation de la contrainte au point chaud

Epaisseur de l'élément soumis à contrainte T (mm)	$\Delta\sigma_c - m_1$
$0 < T \leq 4$	44 -3,2
$4 < T \leq 10$	39 -3,2
$10 < T \leq 15$	35 -3,2
$15 < T \leq 25$	31 -3,2
$25 < T \leq 40$	28 -3,2
$T > 40$	25 -3,2

5.3 Effet de la contrainte moyenne

5.3.1 Généralités

(1) Les données relatives à la résistance à la fatigue indiquées en 5.2 font référence à des conditions de contrainte moyenne de résistance à la traction élevée. Lorsque la contrainte moyenne est de compression ou a une faible valeur de traction, la résistance à la fatigue peut être améliorée dans certaines conditions. Voir 5.3.2 à 5.3.6 et annexe G pour de plus amples directives.

5.3.2 Matériau non ouvré et assemblages fixés

(1) Le facteur d'amélioration de la fatigue donné à l'annexe G peut être pris en considération à condition d'ajouter les effets des contraintes résiduelles de traction et de défaut d'ajustement aux contraintes appliquées.

5.3.3 Assemblages soudés

(1) Aucune contrainte moyenne ne doit être admise dans les assemblages soudés à l'exception des situations suivantes :

- a) lorsque les essais qui représentent l'état final réel de contrainte (y compris les contraintes résiduelles et de défaut d'ajustement) dans la structure et qui démontrent une augmentation cohérente de la résistance à la fatigue conjointement à une réduction de la contrainte moyenne ont été effectués ;
- b) lorsqu'il doit être fait appel aux méthodes d'amélioration qui se sont révélées produire des contraintes de compression résiduelles et lorsque l'amplitude de la contrainte appliquée n'est pas telle que les contraintes résiduelles de compression sont réduites par l'effet d'élasticité en service (voir annexe E).

5.3.4 Assemblages collés

(1) Aucun effet de contrainte moyenne ne doit être admis sans une justification par un essai.

5.3.5 Faible plage d'endurance

(1) Dans la plage d'endurance comprise entre 10^3 et 10^5 , il doit être vérifié que l'étendue de contraintes de calcul ne produit pas une contrainte de traction maximale qui dépasse la résistance de calcul de l'état-limite ultime de l'élément (voir Partie 1 de la présente prénorme). La Note 2 de la Figure 1.5.2 indique cette possibilité.

(2) Pour certains éléments, des résistances plus élevées à la fatigue peuvent être utilisées pour des rapports R négatifs pour $N < 10^5$ cycles (voir annexe F).

5.3.6 Comptage des cycles pour le calcul du rapport R

La méthode permettant d'obtenir les contraintes maximale, minimale et moyenne pour les cycles individuels d'un spectre à l'aide de la méthode de comptage dite de réservoir doit être telle que représentée à la Figure 4.5.1.

5.4 Effet du milieu ambiant

(1) La catégorie d'élément $\Delta\sigma_c$ donnée dans les Tableaux 5.1.1 à 5.1.5 et 5.2.2 doit être réduite conformément au Tableau 5.4.1 pour certaines combinaisons de l'alliage et du milieu ambiant lorsque la température ambiante moyenne au cours de la durée de vie ne dépasse pas 65°C.

NOTE Pour les milieux marins, il convient que la température ambiante moyenne au cours de la durée de vie ne dépasse pas 30°C.

Tableau 5.4.1— Nombre de catégories d'éléments avec lesquelles la valeur $\Delta\sigma_c$ doit être réduite selon le milieu ambiant et l'alliage¹⁾

Alliage			Milieu ambiant							
Série	Composition de base	Caractéristiques de protection (voir Partie 1.1)	Rural	Industriel/Urban		Marin			Immergé	
				Modéré	Difficile	Non-Industriel	Modéré	difficile	Eau douce	Eau de mer
3000 ³⁾	AlMnCu	A	-	-	(P)	-	-	- ⁵⁾	-	- ⁵⁾
5000	AlMg	A	0	0	(P) ⁴⁾	0	0	0 ⁵⁾	0	0 ⁵⁾
5000	AlMgMn	A	0	0	(P) ⁴⁾	0	0	0 ⁵⁾	0	1 ⁵⁾
6000	AlMgSi	B	0	0	(P) ⁴⁾	0	0	1 ⁵⁾	0	2 ⁵⁾
7000	AlZnMg	C	0	0	(P) ⁴⁾	0	0	2 ⁵⁾	1	3 ⁵⁾

NOTE 1 Voir tableau 5.2.1. (7)

NOTE 2 Pour les situations où le tableau 5.4.1 requiert une réduction de la catégorie d'élément et où la température moyenne dépasse 30°C, il convient de demander l'avis d'un spécialiste.

NOTE 3 Données non disponibles.

NOTE 4 (P) dépend fortement de la composition chimique du milieu ambiant. Une protection régulière peut être requise pour éviter tout risque d'expositions locales susceptibles d'être particulièrement préjudiciables à une amorce de fissuration.

NOTE 5 Il convient d'augmenter la valeur de N_D de 5×10^6 à 10^7 cycles. Il est recommandé d'augmenter la valeur de N_L de 10^8 à 2×10^8 cycles

5.5 Techniques d'amélioration

(1) La résistance à la fatigue de certains types d'éléments représentés dans les tableaux 5.1.1 à 5.1.5 peut être améliorée par l'application de techniques de fabrication particulières. Ces techniques, dont le coût d'application est généralement élevé, présentent des difficultés de contrôle de la qualité. Il y a lieu de ne pas se fonder sur ces techniques à des fins de dimensionnement, à moins que la fatigue ne soit particulièrement critique pour le coût économique global de la structure, auquel cas il convient de faire appel à un spécialiste. Ces techniques sont plus couramment utilisées pour éliminer les défauts de conception existants.

(2) Les techniques suivantes ont été utilisées avec des alliages en aluminium et leur efficacité se révèle maximale pour des applications mégacycliques :

- a) introduction de contraintes résiduelles de compression à l'emplacement de l'amorce de fissure. Ceci peut être effectué au niveau des bords de soudure transversaux par martelage. La méthode d'expansion à froid peut être utilisée avec les trous de boulons ;
- b) réduction de l'effet de concentration de contraintes à l'emplacement de l'amorce de fissure. Ceci peut être effectué en procédant au meulage des bords de soudure transversaux afin d'obtenir un profil lisse.

(3) L'annexe E fournit de plus amples informations sur les techniques d'amélioration.

6 Exigences de qualité

6.1 Détermination du niveau de qualité requis

(1) Les catégories d'éléments des tableaux 5.1.1 à 5.1.5 représentent la résistance maximale à la fatigue admise par le présent code pour l'élément concerné lorsqu'il est fabriqué selon les exigences de qualité de l'annexe D, et ne doivent pas être dépassées sans procéder à un autre essai de justification (voir annexe C).

(2) Les éléments de classe supérieure requièrent souvent un contrôle supplémentaire et exigent des normes de réalisation plus strictes (voir annexe D), susceptibles d'avoir un effet préjudiciable sur le coût économique de fabrication. Les normes de contrôle et de réalisation doivent être déterminées par le niveau de qualité approprié aux exigences particulières de réalisation de la fatigue et non par la résistance maximale potentielle à la fatigue.

(3) Le niveau de qualité requis pour un élément doit être obtenu en déterminant la plus faible courbe de résistance à la fatigue à partir de laquelle la sommation de Miner D_L ne dépasse la valeur 1 (voir 2.2.2(2)g). Lorsque les ondulations de contrainte sur un élément se produisent dans plusieurs directions, il est possible d'être confronté à différentes exigences relatives à la classe d'élément pour chaque direction.

(4) Le niveau de qualité des assemblages soudés doit être déterminé à partir du Tableau 6.1.1.

Tableau 6.1.1 — Détermination du niveau de qualité des assemblages soudés

Plus basse catégorie d'élément $\Delta\sigma_c$ pour laquelle $\Delta_L \leq 1^1)$	Niveau de qualité requis
62, 55	Fat 62
49, 44	Fat 49
39, 35	Fat 39
31, 28	Fat 31
25, 22	Fat 25
20 et en dessous	Normal
NOTE 1 En supposant que m_1 et m_2 demeurent constants.	

6.2 Désignation des niveaux de qualité sur les plans

(1) Pour que le contrôle puisse particulièrement se focaliser sur les parties de la structure critiques pour la fatigue, les actions suivantes doivent être entreprises :

- déterminer par calcul les parties de la structure où l'exigence relative à la résistance à la fatigue dépasse la catégorie d'élément 20 ;
- indiquer sur les plans détaillés de tous les éléments des parties concernées, le niveau de qualité donné dans le Tableau 6.1.1 ainsi que la direction d'ondulation des contraintes tel que représenté à la Figure 6.2.1 ;
- tout plan contenant un élément dont la résistance à la fatigue requise est supérieure à 20 doit être accompagné de la note générale suivante :

— « les éléments requérant des niveaux de qualité supérieurs au niveau de qualité normal sont signalés par un numéro 'Fat' et une flèche (voir ENV1999-2, annexe D) ».

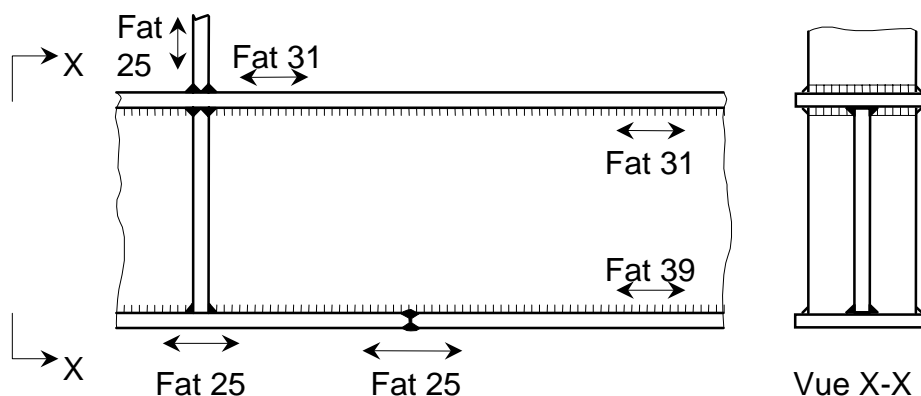


Figure 6.2.1 — Méthode d'identification de la classe de fatigue requise sur les plans

(2) Les mêmes principes peuvent être appliqués pour indiquer les niveaux de qualité requis des zones critiques des pièces coulées.

6.3 Évaluation de l'aptitude à l'emploi

(1) Dans le cas où la non-conformité avec les exigences de qualité de l'annexe D est marginale et où :

- a) la correction de cette non-conformité est préjudiciable à l'intégrité de la structure ; ou
- b) une évaluation technique critique (ECA) peut être effectuée et avoir de graves conséquences économiques.

Les informations suivantes seront requises :

- a) les exigences relatives aux contraintes statiques et cycliques de l'élément en question ;
- b) les dimensions du défaut ;
- c) les propriétés des matériaux dans la région du défaut ;
- d) les éléments du milieu ambiant.

(2) La résistance à la fatigue peut être évaluée soit par la mécanique de la rupture (voir annexe B) soit par l'essai des éléments représentatifs (voir annexe C).

Annexe A **(informative)**

Analyse des contraintes

A.1 Utilisation des éléments finis pour l'analyse de la fatigue

A.1.1 Types d'éléments

A.1.1.1 Éléments de poutre

(1) Les éléments de poutre sont utilisés principalement pour l'analyse des contraintes nominales des cadres et autres structures similaires. Un élément de poutre classique pour l'analyse des cadres tridimensionnels a 6 degrés de liberté à chaque nœud d'extrémité, à savoir trois déplacements et trois rotations. Cet élément peut décrire correctement le comportement à la torsion uniquement dans les cas où la section n'est pas prédisposée au voilement ou dans les cas où ce dernier peut se produire librement. Il n'est pas possible de procéder à l'analyse conjointe des contraintes par voilement et des structures ouvertes à parois minces.

(2) Les éléments de poutre sont généralement reliés rigidement entre eux au niveau des nœuds. A défaut, des joints clavetés peuvent également être spécifiés. Toutefois, dans de nombreuses structures, les joints sont semi-rigides. De plus, dans les joints tubulaires, la rigidité est inégalement répartie, ce qui entraîne des moments de flexion supplémentaires. Ces caractéristiques de structure requièrent une modélisation plus complexe que l'utilisation de joints rigides ou clavetés.

A.1.1.2 Éléments de membrane

(1) Les éléments de membrane sont destinés à modéliser des structures composées de tôles soumises à une précontrainte dans le plan. Ils ne peuvent traiter les contraintes de flexion des coques. Les éléments de tôles triangulaires et rectangulaires permettent de résoudre les champs de contraintes nominales exercées sur les membranes des structures de grande dimension à tôle renforcée.

A.1.1.3 Éléments de coque mince

(1) Les programmes à éléments finis contiennent différents types d'éléments de coque mince. Ceux-ci comprennent des éléments plats, des éléments à déviation simple et des éléments à déviation double. Les champs de déformation sont généralement désignés comme linéaires (élément à 4 nœuds) ou paraboliques (élément à 8 nœuds). Généralement, les éléments de coque mince conviennent à la résolution des contraintes structurales élastiques selon la théorie des coques. La contrainte de plan médian est égale à la contrainte de la membrane, et les contraintes de surface supérieure et de surface inférieure sont des contraintes de flexion superposées exercées dans la membrane et dans la coque.

(2) Les éléments de coque mince ne peuvent modéliser que les plans médians des tôles. L'épaisseur réelle des matériaux est donnée comme propriété uniquement pour l'élément. Il existe également des coques minces à épaisseur conique, qui peuvent par exemple être utilisés pour la modélisation des structures coulées. L'inconvénient majeur des éléments de coque mince est qu'ils ne peuvent pas modéliser la répartition réelle de la rigidité et des contraintes à l'intérieur et à proximité immédiate de la zone de soudure des coques d'intersection.

A.1.1.4 Éléments de coque épaisse

(1) Certains programmes à éléments finis comportent également des éléments appelés éléments de coque épaisse. Ceux-ci permettent un cisaillement transversal de la coque dans le sens de l'épaisseur à prendre en compte. Les éléments de coque épaisse sont plus efficaces que les éléments de coque mince, par exemple pour les détails présentant une faible distance entre les intersections de coques adjacentes, entraînant de ce fait d'importantes contraintes de cisaillement.

A.1.1.5 Éléments de contrainte du plan

(1) Il est parfois utile d'analyser les champs de contraintes locales autour des entailles à l'aide d'un modèle 2-D local. Une section d'épaisseur unique peut alors être modélisée comme structure bidimensionnelle en utilisant les éléments de contrainte du plan.

A.1.2 Directives supplémentaires relatives à l'utilisation des éléments finis

(1) La modélisation de structures présentant des champs de contrainte et de déformation tridimensionnels requiert l'utilisation d'éléments pleins. Les éléments isoparamétriques courbes à 20 nœuds conviennent généralement le mieux. Ils sont parfois requis pour la modélisation de la zone d'intersection des tôles ou des coques des éléments soudés.

A.2 Facteurs de concentration des contraintes

(1) Les valeurs des facteurs de concentration des contraintes et des facteurs d'entaille pour les géométries courantes peuvent être obtenues à partir des données publiées (voir Références A.4.1 et A.4.2).

(2) Les valeurs types de K_{gt} pour les angles arrondis d'une tôle plate sont données à la Figure A.2.1.

A.3 contraintes au point chaud

(1) La méthode des contraintes au point chaud est utilisée principalement avec les assemblages dont le bord de soudure est transversal à l'élément de contrainte ondulée, et avec lesquels la fissure est supposée se propager à partir du bord de soudure. Cette méthode ne convient pas pour les assemblages avec lesquels la fissure se propagerait à partir de défauts incrustés ou de la racine d'une soudure d'angle. Par comparaison à la méthode des contraintes nominales, cette méthode est davantage appropriée aux cas suivants :

- a) aucune contrainte nominale n'est clairement définie en raison d'effets géométriques complexes ;
- b) la discontinuité de la structure ne peut être comparée à aucun élément classé inclus dans les règles de calcul (méthode des contraintes nominales) ;
- c) la méthode des éléments finis est utilisée pour la modélisation des éléments coques et/ou pleins, pour les raisons susmentionnées ;
- d) l'essai des structures prototypes est effectué à l'aide de mesures extensométriques ;
- e) les décalages ou déformations angulaires dépassent les tolérances de fabrication spécifiées comme étant cohérentes avec les courbes de calcul $\Delta\sigma$ -N utilisées dans la méthode des contraintes nominales.

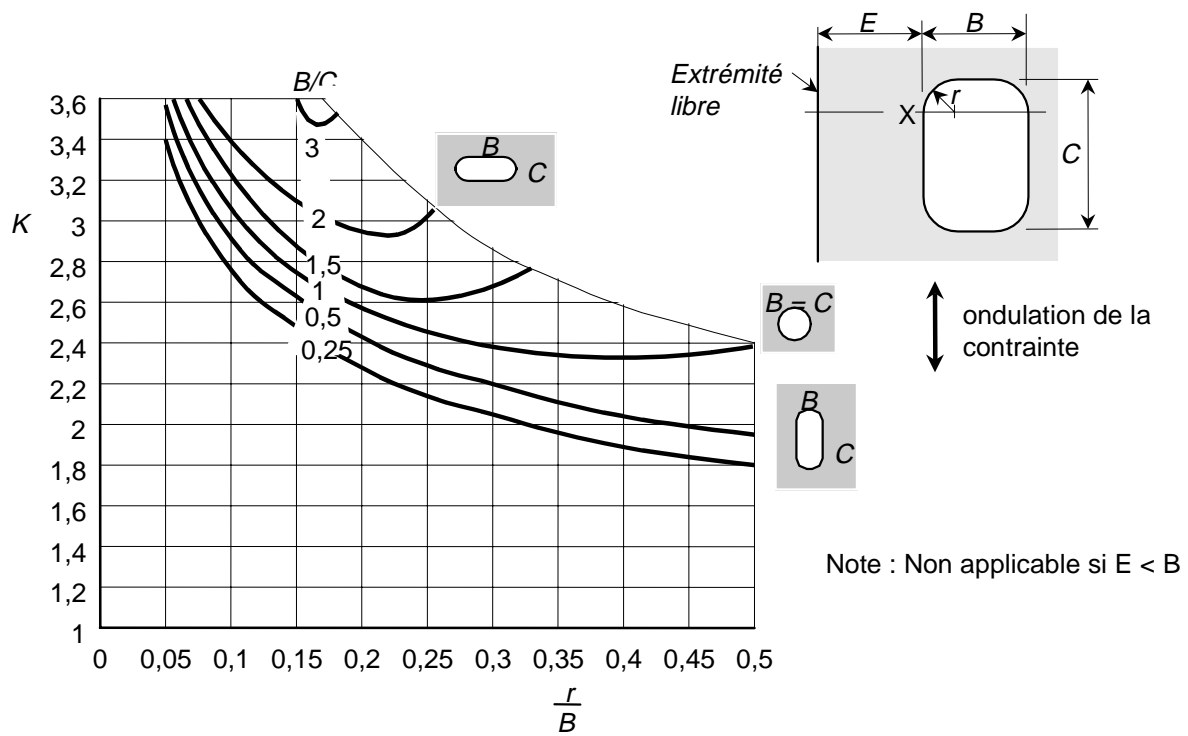
(2) Pour les assemblages de nœuds tubulaires, il convient d'évaluer l'étendue de contraintes au point chaud à un nombre suffisant d'emplacements pour pouvoir caractériser totalement la résistance à la fatigue de chaque assemblage. Par exemple, dans le cas d'un assemblage tubulaire défini, la répartition d'au moins quatre points équidistants par rapport au périmètre d'assemblage doit être envisagée. Pour tout type particulier de charge, par exemple charge axiale, cette étendue de contraintes au point chaud est le produit de l'étendue de contraintes nominales dans le contrevent et du facteur de concentration de contraintes approprié (SCF).

(3) La contrainte au point chaud est définie comme la plus grande valeur de la contrainte directe autour de l'intersection contrevent/membrure de l'extrapolation du bord de soudure de la répartition des contraintes géométriques à proximité du bord de soudure. Cette contrainte au point chaud comporte les effets de la géométrie générale de l'assemblage, c'est-à-dire les dimensions relatives du contrevent et de la membrure, mais ne tient pas compte de l'influence de concentration des contraintes de la soudure proprement dite, ce qui entraîne une répartition locale des contraintes (voir Figure A.3.1).

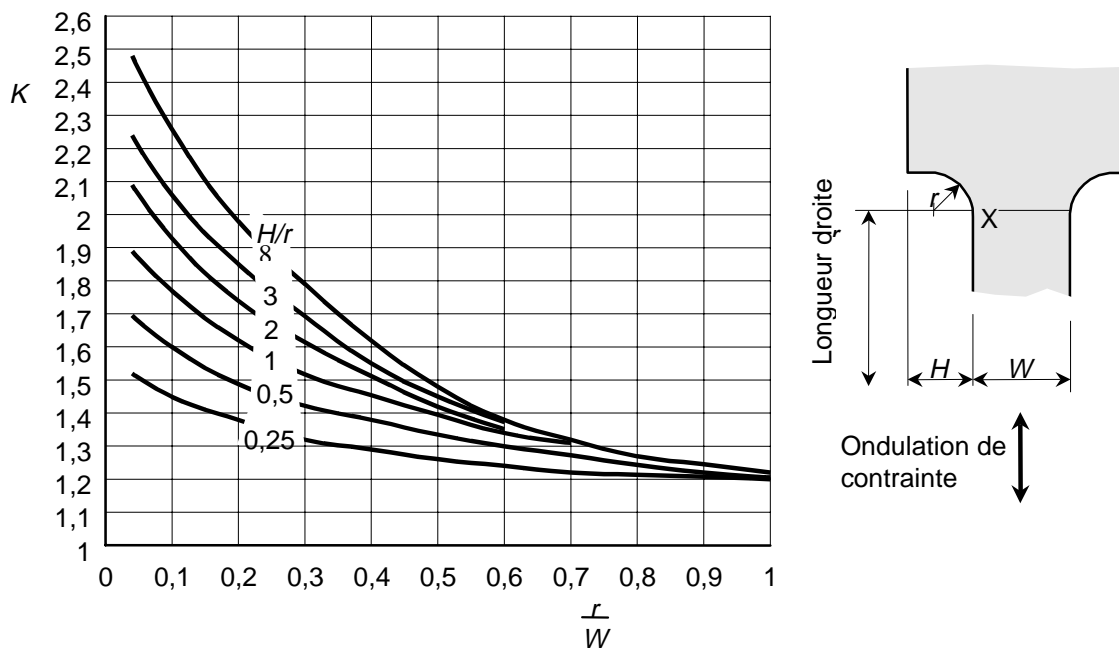
(4) Le calcul de la contrainte au point chaud peut être effectué de différentes manières, par exemple par des études de maquettes, par analyse des éléments finis, ou par l'utilisation de formules paramétriques semi-empiriques. La position du 'point chaud' par rapport à la couronne et au sabot peut être déterminée par les deux premières méthodes mais non par des équations paramétriques. Lorsque des maquettes sont utilisées, il convient de veiller à ce que la contrainte géométrique soit extrapolée au bord de soudure tel que décrit ci-dessus. Lorsque les calculs par éléments finis ne permettent aucun effet de géométrie de soudure, la contrainte au point chaud au niveau de la soudure peut être estimée à partir de la valeur obtenue à l'intersection contrevent/membrure. Il est recommandé d'utiliser les formules paramétriques avec prudence du fait de leurs limitations intrinsèques ; il y a lieu plus particulièrement de les utiliser dans les limites d'applicabilité correspondant à la formule concernée.

A.4 Références

- A.4.1** Peterson, R. E: 'Stress concentration factors' John Wiley and Sons Inc., 1974.
- A.4.2** Roark, J. R. and Young, W. C: 'Formulas for stress and strain', McGraw Hill, 1973.
- A.4.3** Niemi, E.: 'Stress determination for fatigue analysis of welded components', (International Institute of Welding document 1221-93), Abington Publishing, Cambridge, 1995.
- A.4.4** BS7608 'Code of practice for fatigue design and assessment of steel structures', British Standards Institute 1993.
- A.4.5** Hobbacher, A: 'Recommendations on fatigue of welded components', IIW Doc. XIII-1539-94/XV-845/-94.

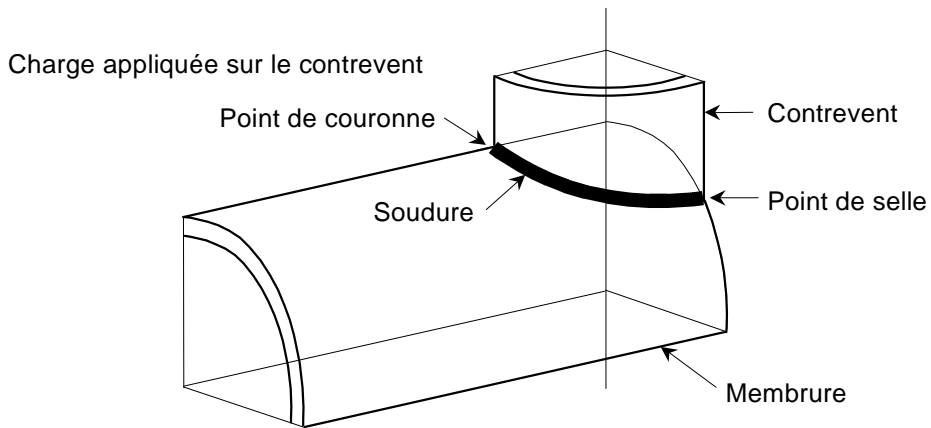


a) facteur de concentration des contraintes de fatigue pour les ouvertures non renforcées sur la base d'une contrainte nette au point X

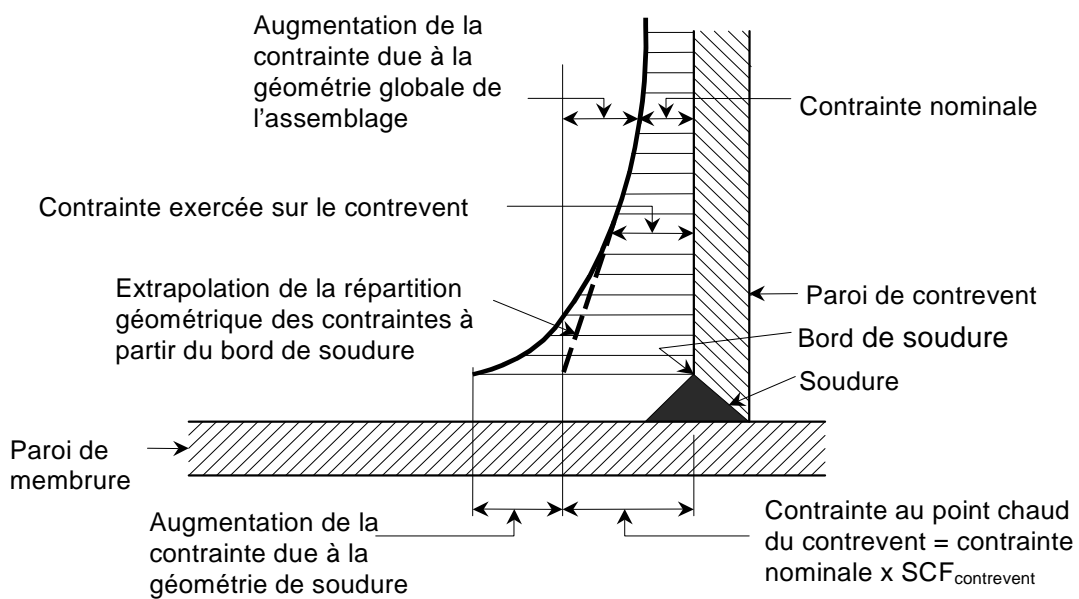


b) Facteur de concentration de contraintes à la fatigue pour les angles rentrants sur la base d'une contrainte nette au point X

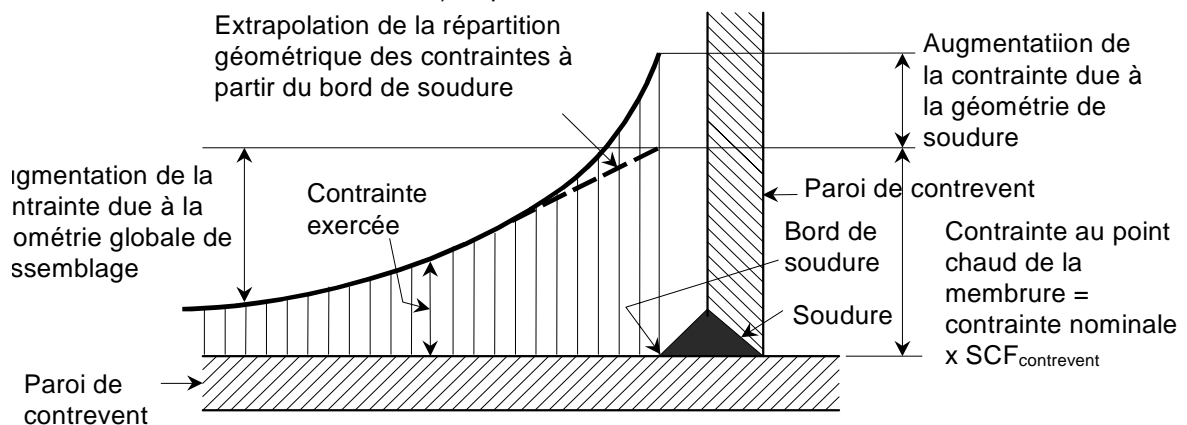
Figure A.2.1 — Calcul des facteurs types de concentration de contraintes avec les angles arrondis d'une tôle plate



a) Nomenclature de joints nodaux



b) Répartition des contraintes sur le contrevent



c) Répartition des contraintes sur la membrure

Fig.A.3.1 —Exemple de contraintes au point chaud d'un assemblage à treillis tubulaire

Annexe B (informative)

Guide d'évaluation par la mécanique de la rupture

B.1 Domaine d'application

(1) L'annexe a pour but de fournir des informations sur l'utilisation de la mécanique de la rupture pour évaluer la propagation des fissures par fatigue à partir de discontinuités planes aiguës. La mécanique de la rupture est utilisée principalement pour évaluer :

- les défauts identifiés (y compris les fissures par fatigue observées en service) ;
- les défauts supposés (y compris l'étude de l'assemblage d'origine ou des limites de détection NDT) ;
- la tolérance aux défauts (y compris l'évaluation de l'aptitude à l'emploi des défauts de fabrication pour les exigences particulières de service).

(2) La méthode couvre la propagation des fissures à la fatigue perpendiculairement au sens de la contrainte de traction principale (Mode 1).

B.2 Principes

B.2.1 Dimensions des défauts

(1) La propagation de la fatigue est supposée s'amorcer à partir d'un défaut plan préexistant, le front de fissure aiguë étant orienté perpendiculairement au sens d'ondulation $\Delta\sigma$ de la contrainte de traction principale à ce point.

(2) Les dimensions des défauts préexistants sont indiquées à la Figure B.2.1 et sont fonction de la nature des défauts, à savoir superficiels ou incrustés dans le matériau.

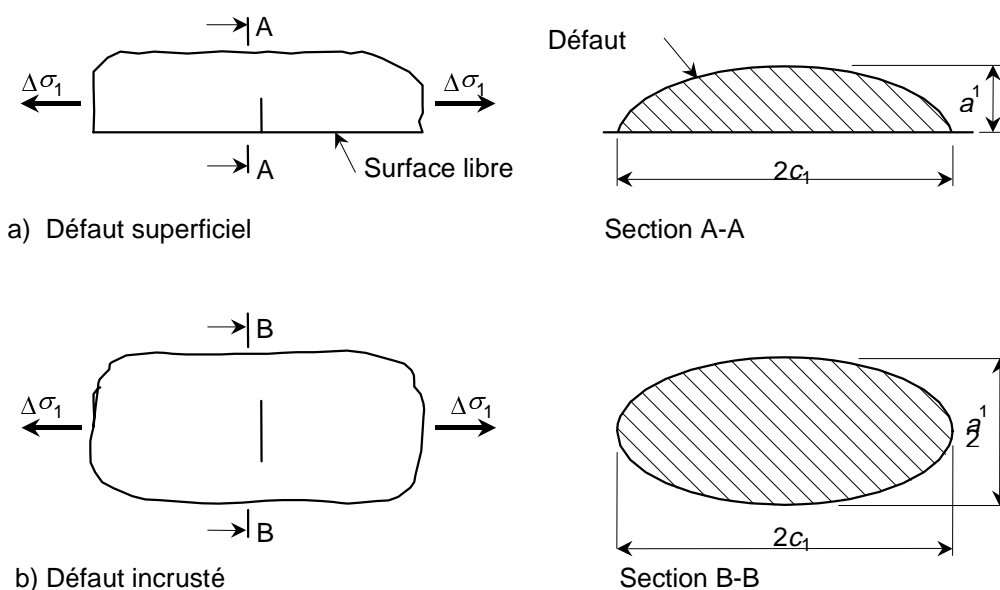


Figure B.2.1 — Défauts plans préexistants

B.2.2 Relation de propagation des fissures

(1) Sous l'action de l'étendue de contraintes cycliques $\Delta\sigma$, le front de fissure pénètre dans le matériau selon la loi de propagation des fissures. Dans la direction de 'a', la vitesse de propagation est donnée par l'équation suivante :

$$da/dN = A (\Delta\sigma a^{0,5} y)^m \quad (\text{B.1})$$

où

A est la constante matérielle de vitesse de propagation des fissures par fatigue (FCGR) ;

m est l'exposant de vitesse de propagation des fissures ;

y est le facteur de géométrie des fissures déterminé par les dimensions de forme, d'orientation et de limites de surface de la fissure.

NOTE Les unités les plus courantes des facteurs d'intensité des contraintes ΔK sont $\text{MPam}^{0,5}$ ($\text{Nmm}^{-2} \text{m}^{0,5}$) et m/cycles pour la vitesse de propagation des fissures da/dN . Les données indiquées en B.3. sont valables uniquement pour ces unités.

(2) Cette relation peut se réécrire sous la forme suivante :

$$da/dN = A \Delta K^m \quad (\text{B.2})$$

où

ΔK est la plage d'intensité des contraintes et est égal à $\Delta\sigma a^{0,5} y$.

(3) Suite à l'application de N cycles de l'étendue de contraintes $\Delta\sigma$, la fissure passe de la dimension a_1 à la dimension a_2 selon l'intégration suivante :

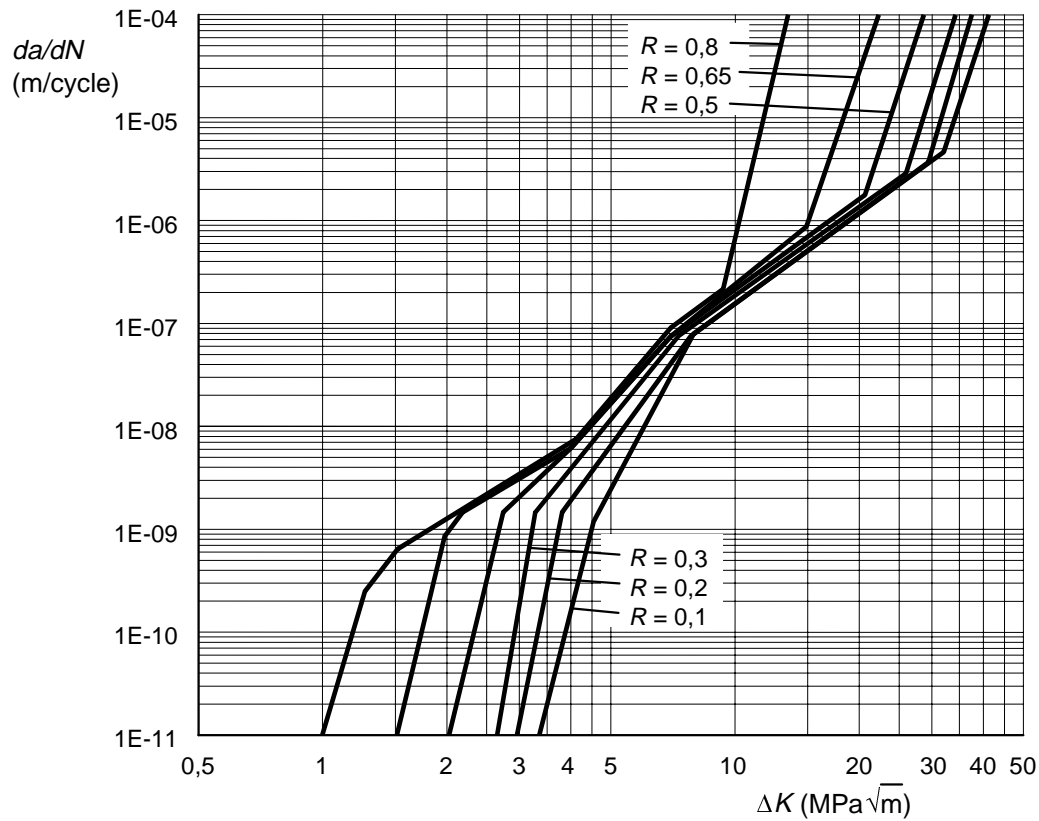
$$N = \int_{a_1}^{a_2} \frac{da}{A(\Delta\sigma a^{0,5} y)^m} \quad (\text{B.3})$$

(4) Pour le cas général A , ΔK et m sont fonction de 'a'.

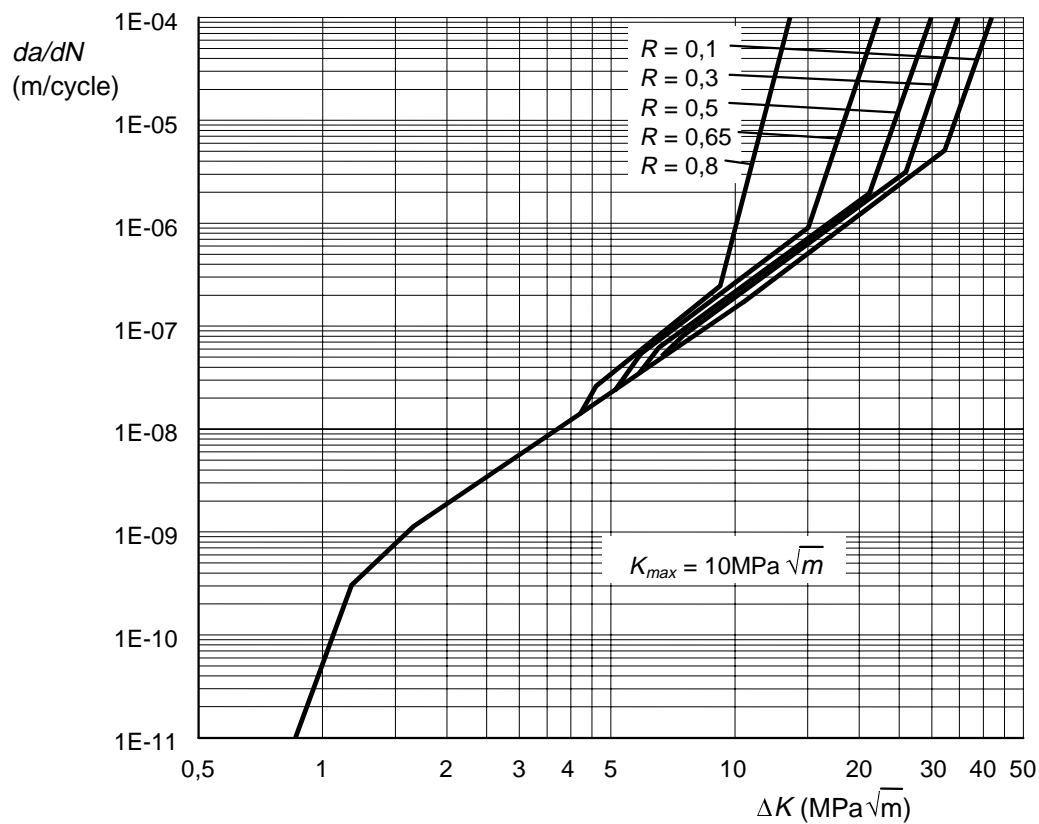
(5) Pour de plus amples informations sur les techniques de la mécanique de la rupture, particulièrement pour les structures soudées, voir les Références B.8.1 et B.8.2.

B.3 Valeurs A et m des données de propagation des fissures

(1) On obtient les valeurs A et m à partir des mesures de la propagation des fissures effectuées sur des éprouvettes étalons entaillées orientées dans l'axe LT , TL ou ST (voir par exemple Figure B.3.1) en utilisant des méthodes d'essai normalisées (voir par exemple Référence B.8.3). Le modèle d'éprouvette doit être un modèle d'éprouvette pour lequel existe une solution factorielle (K) précise d'intensité des contraintes (c'est-à-dire la relation entre la charge appliquée et la dimension de fissure 'a').



a) R = différents rapports R constants (k_{min}/k_{max})



b) $k_{max} =$ différents rapports R constants ($10 \text{ MPa}\sqrt{m}$)

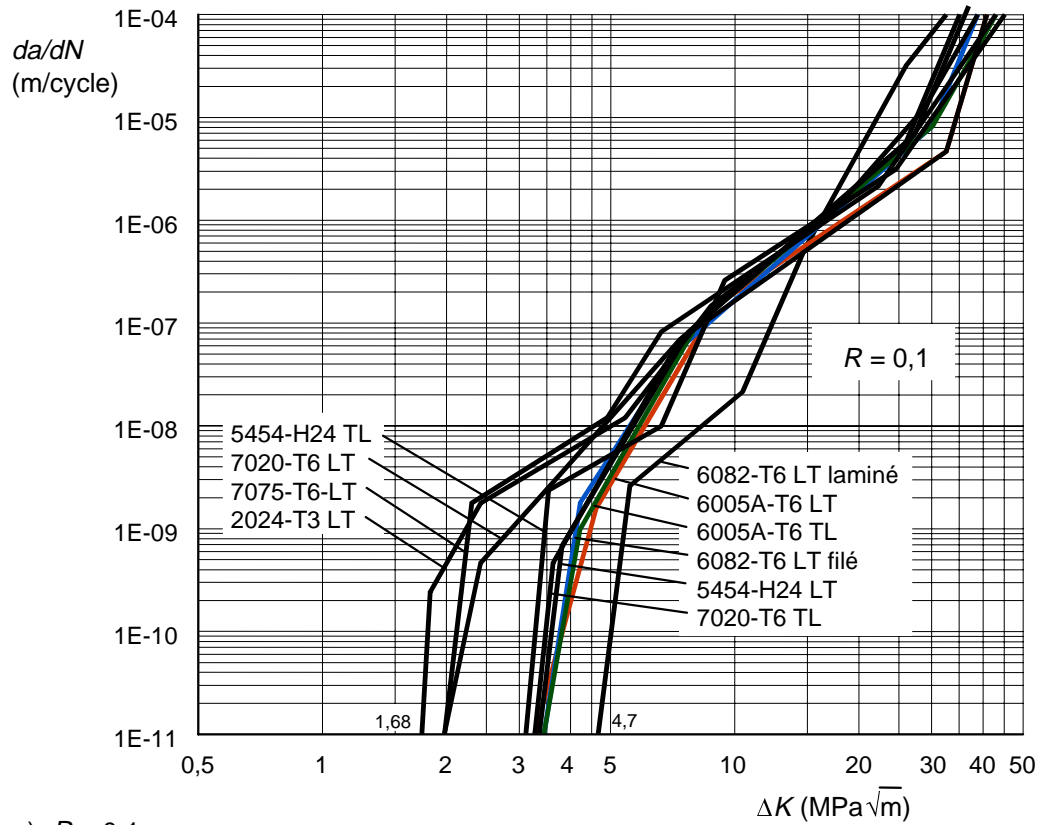
Figure B.3.2 — Courbes types de propagation des fissures par fatigue pour l'alliage d'aluminium 6005A T6LT

Tableau B.3.2(a) — Données relatives à la vitesse de propagation des fissures par fatigue pour l'alliage EN AN 6005-T6 LT, $R-K_{min}/K_{max} = \text{constant}$

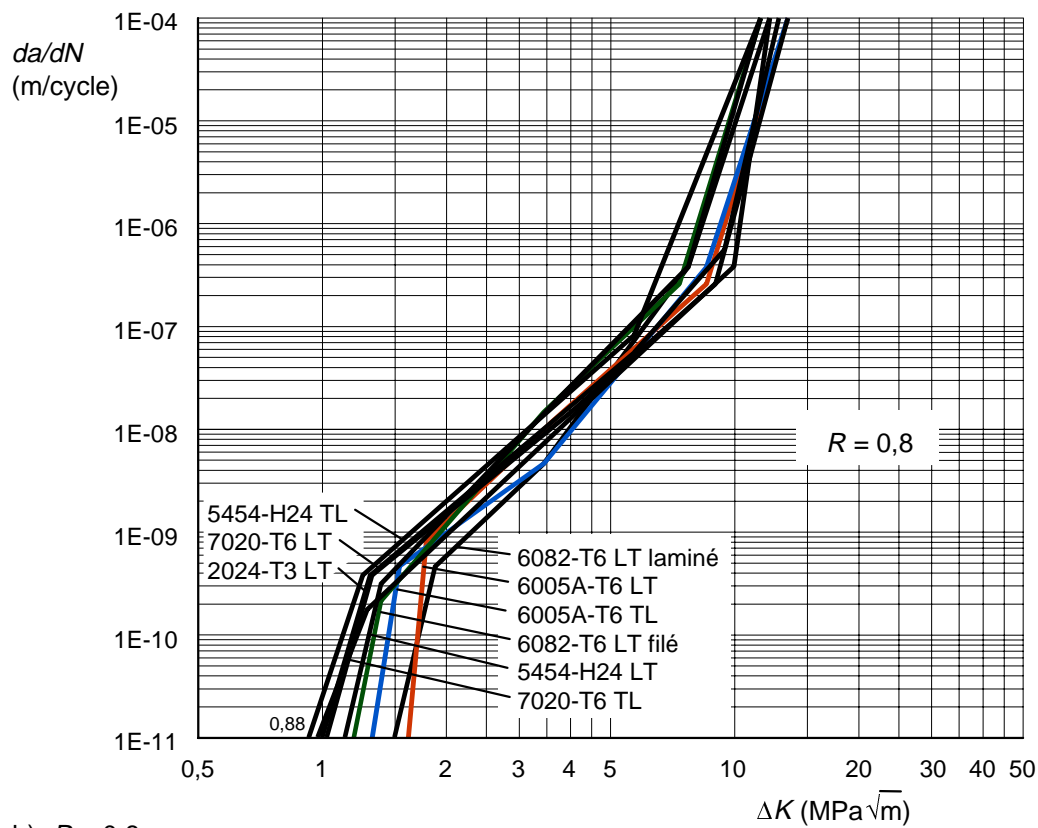
Rapport R	Intensité de contrainte ΔK MPam ^{0,5}	m	A	Rapport R	Intensité de contrainte ΔK MPam ^{0,5}	m	A
0,100	3,30	15,00	0,1657E-18	0,500	2,00	16,29	0,1243E-15
	4,50	7,51	0,1293E-13		2,72	3,85	0,3174E-10
	8,00	2,96	0,1673E-09		4,20	4,86	0,7414E-11
	32,4	11,97	0,4100E-23		6,50	2,80	0,3406E-09
	41,61	11,97	0,4100E-23		21,00	12,23	0,1211E-21
	60,00	11,97	0,4100E-23		29,16	12,23	0,1211E-21
				42,50	12,23	0,1211E-21	
0,200	2,90	18,53	0,2679E-19	0,650	1,50	16,93	0,1042E-13
	3,80	5,86	0,5949E-12		1,95	4,42	0,4418E-10
	7,50	2,92	0,2227E-09		2,20	2,38	0,2206E-09
	29,60	12,43	0,2253E-23		3,55	4,76	0,1068E-10
	37,98	12,43	0,2253E-23		6,00	3,05	0,2326E-09
	55,00	12,43	0,2253E-23		15,00	12,00	0,6084E-20
					22,17	12,00	0,6084E-20
0,300	2,60	18,67	0,1774E-18	0,800	1,00	13,03	0,9999E-11
	3,40	5,23	0,2470E-11		1,28	4,99	0,7289E-10
	7,35	2,82	0,3060E-09		1,55	2,50	0,2168E-09
	26,00	12,40	0,8411E-23		3,50	6,03	0,2611E-11
	34,49	12,40	0,8411E-23		4,60	3,11	0,2225E-09
	50,00	12,40	0,8411E-23		9,20	15,93	0,9830E-22
					13,48	15,93	0,9830E-22

Tableau B.3.2.(b) — Données relatives à la vitesse de propagation des fissures par fatigue pour l'alliage EN AA-6005A-T6 LT, $K_{max}-100 \text{ MPa}(m)^{0,5} = \text{constante}$

Rapport R	Intensité de contrainte ΔK MPam ^{0,5}	m	A	Rapport R	Intensité de contrainte ΔK MPam ^{0,5}	m	A
0,100	0,85	11,09	0,6069E-10	0,500	0,85	11,09	0,6069E-10
	1,16	3,74	0,1807E-09		1,16	3,74	0,1807E-09
	1,60	2,68	0,2969E-09		1,60	2,69	0,2960E-09
	8,00	2,96	0,1673E-09		5,55	4,76	0,1081E-11
	32,40	11,97	0,4103E-23		6,50	3,05	0,2326E-09
	41,61	11,97	0,4103E-23		21,00	12,04	0,6081E-21
				29,16	12,04	0,6081E-21	
0,300	0,85	11,09	0,6069E-10	0,650	0,85	11,09	0,6069E-10
	1,16	3,74	0,1807E-09		1,16	3,74	0,1807E-09
	1,60	2,71	0,2935E-09		1,60	2,69	0,2960E-09
	6,70	5,51	0,1413E-11		4,95	4,76	0,1081E-10
	7,35	2,82	0,3060E-09		6,00	3,05	0,2326E-09
	26,00	12,40	0,8421E-23	15,00	12,04	0,6081E-20	
	34,49	12,40	0,8421E-23	22,17	12,04	0,6081E-20	
				0,800	0,85	11,09	0,6069E-10
					1,16	3,74	0,1807E-09
					1,60	2,71	0,2927E-09
			4,15		6,01	0,2689E-11	
			4,60		3,11	0,2225E-09	
			9,20	15,93	0,9819E-22		
			13,48	15,93	0,9819E-22		

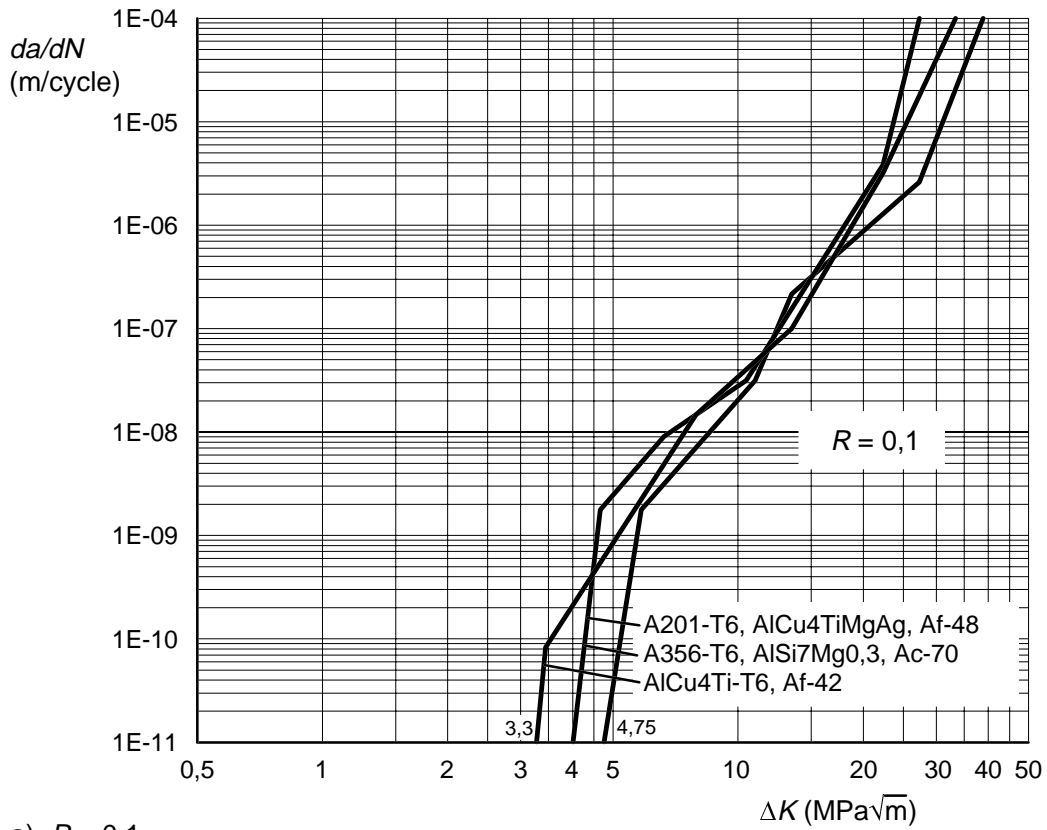


a) $R = 0,1$

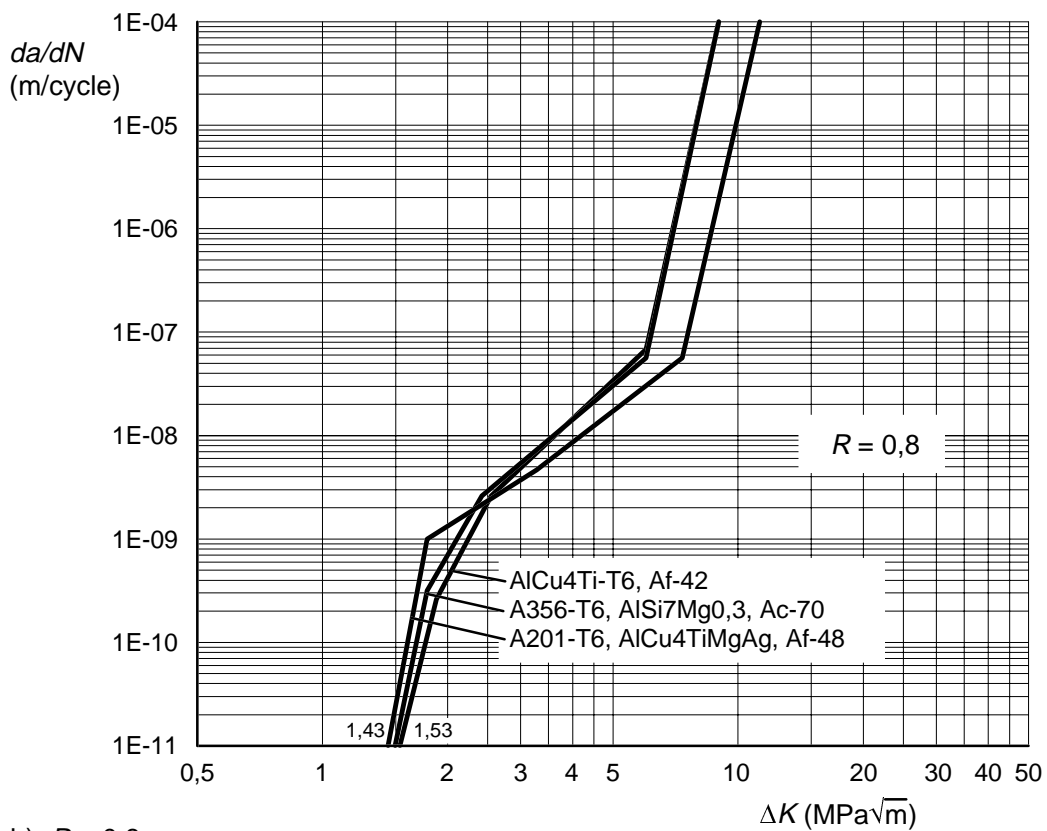


b) $R = 0,8$

Figure B.3.3 — Courbes types de vitesse de propagation des fissures pour différents alliages corroyés

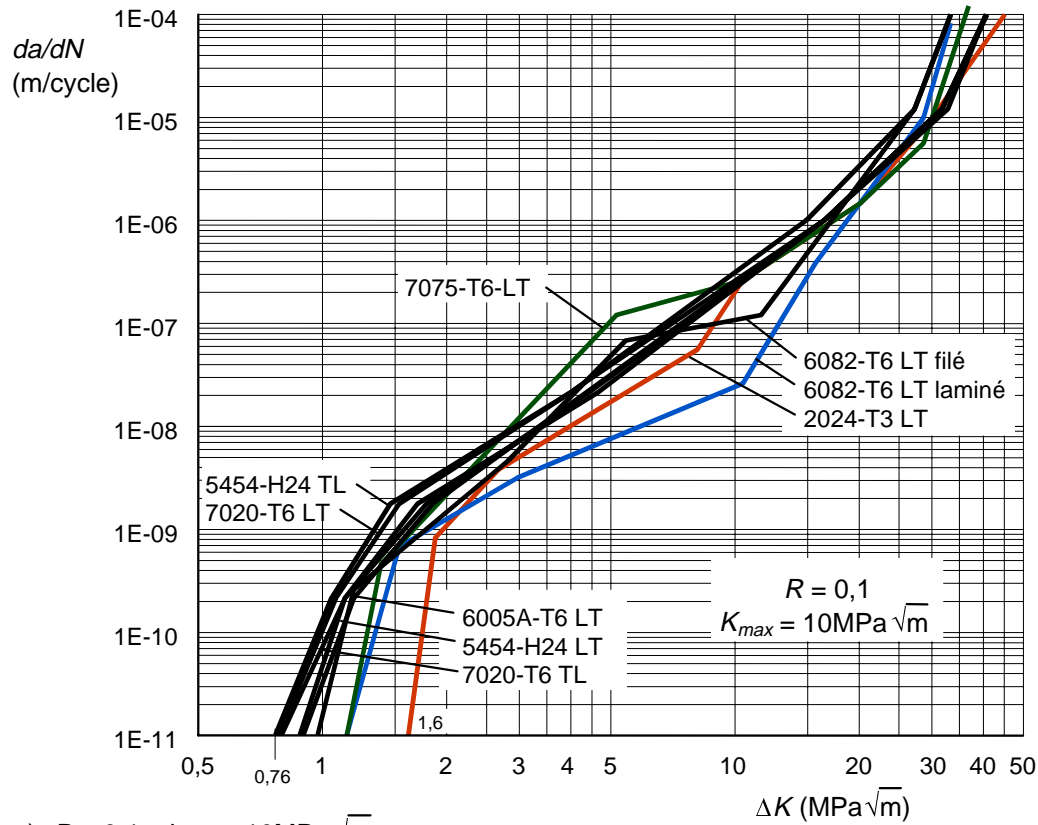


a) $R = 0,1$

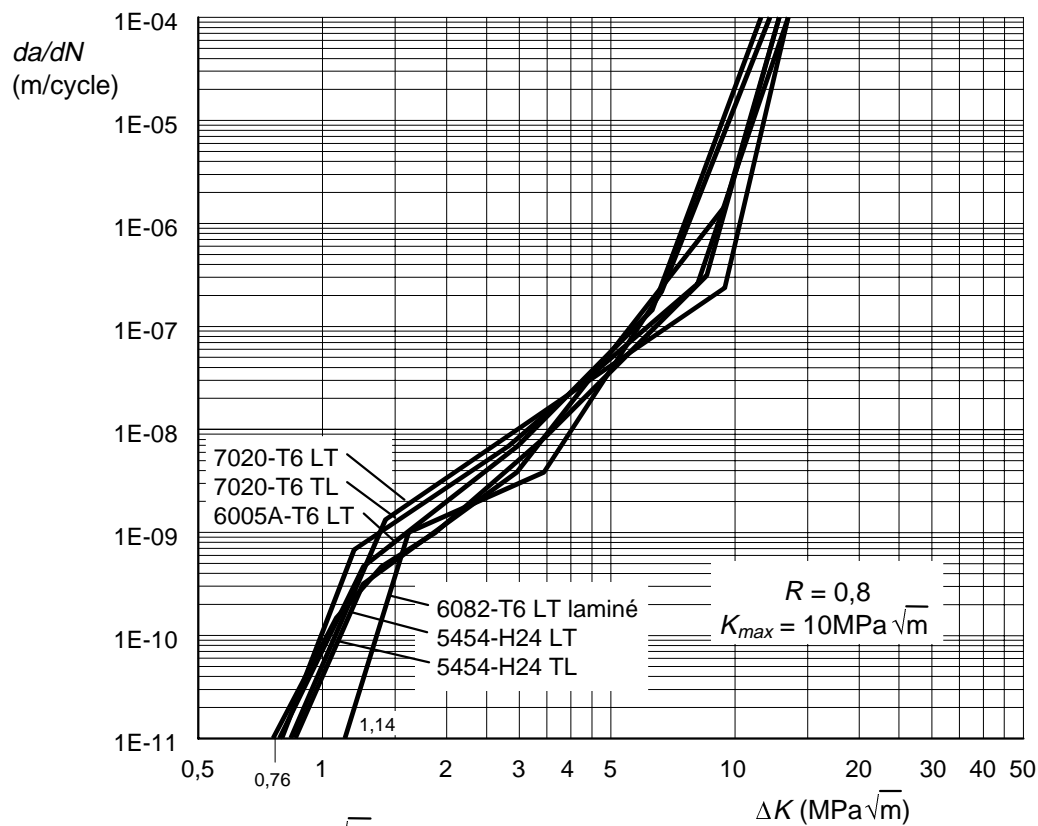


b) $R = 0,8$

Figure B.3.4 — Courbes types de propagation des fissures par fatigue pour différents alliages coulés



a) $R = 0,1$; $k_{max} = 10\text{MPa}\sqrt{m}$



b) $R = 0,8$; $k_{max} = 10\text{MPa}\sqrt{m}$

Figure B.3.5 — Courbes types de propagation des fissures par fatigue pour différents alliages corroyés

$(K_{max}) = 10\text{MPa}\sqrt{m}$

Tableau B.3.3 — Données relatives à la vitesse de propagation des fissures par fatigue,
 $R = K_{min}/K_{max} = \text{constant}$

Rapport R	Intensité de contrainte ΔK MPam ^{0,5}	m	A
a) 0,100	1,68	3,3	0,2541E-18
	1,89	3,4	0,4065E-10
	2,96	4,1	0,4886E-09
	4,75	6,6	0,2951E-12
	6,70	2,8	0,4838E-09
	19,51	5,9	0,4080E-13
	28,71	9,8	0,3072E-17
b) 0,800	0,87	10,43	0,4276E-10
	1,24	3,33	0,1959E-09
	2,27	2,98	0,2603E-09
	3,40	6,36	0,4155E-11
	5,44	8,34	0,1454E-12
	11,45	8,34	0,1454E-12
	NOTE Ces valeurs sont des enveloppes de limite supérieure issues des courbes représentées aux figures B.3.3(a) et (b)		

Tableau B.3.4 — Vitesse de propagation des fissures par fatigue des alliages coulés avec
 $R = K_{min}/K_{max} = \text{constant}$

Rapport R	Intensité de contrainte ΔK MPam ^{0,5}	m	A
a) 0,100	3,28	35,46	0,5102E-29
	3,45	11,01	0,7184E-16
	4,60	6,50	0,7051E-13
	8,85	3,85	0,2260E-10
	23,07	19,12	0,3475E-31
	27,30	19,12	0,3475E-31
	b) 0,800	1,42	21,24
1,76		5,47	0,4520E-10
5,82		12,34	0,2537E-15
8,70		12,34	0,2537E-15

Tableau B.3.5 — Données relatives à la vitesse de propagation des fissures par fatigue des alliages corroyés, $K_{max} = 10\text{MPa}(m)^{0,5}$ constant

Rapport R	Intensité de contrainte ΔK MPam ^{1/2}	m	A
0,100	0,76	9,13	0,1211E-09
	1,26	2,77	0,5266E-09
	19,50	5,95	0,4190E-13
	28,71	8,79	0,3072E-17
	34,48	8,79	0,3072E-17
0,800	0,76	9,30	0,1268E-09
	1,22	2,84	0,4560E-09
	4,37	5,28	0,1243E-10
	6,76	11,02	0,2128E-15
	11,45	11,02	0,2128E-15

B.4 Fonction géométrique y

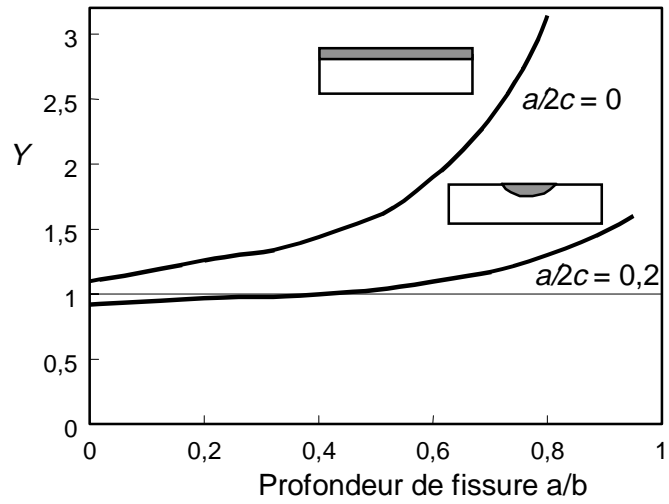
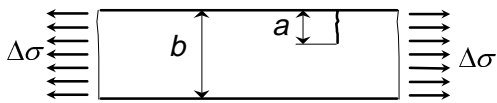
- (1) La fonction géométrique y dépend des dimensions de la fissure (forme et taille), des dimensions limites de la surface du matériau environnant et de la répartition des contraintes dans la zone de la voie de fissure.
- (2) Ces informations peuvent être obtenues à partir des analyses des éléments finis du détail en utilisant des éléments de fond de fissure. L'intensité de contrainte pour différentes longueurs de fissure est calculée à l'aide de la méthode de détermination de l'intégrale J . Elle peut également être calculée à partir du champ de déformation ou de contrainte autour du fond de fissure, ou de l'énergie totale de déformation élastique.
- (3) Les solutions publiées relatives aux géométries couramment utilisées (matériau non ouvré et joints soudés) constituent une autre source de valeurs y . Les données de référence sont souvent indiquées par Y où $Y = y\pi^{0,5}$. Un exemple type de fissure de rupture de surface sur une tôle non ouvrée est représenté à la Figure.B.4.1.a. Si la fissure se situe au niveau d'un bord de soudure à la surface de la tôle, il peut alors être procédé à l'adaptation de l'effet des concentrations de contraintes locales à l'aide du facteur d'amplification M_K (voir Figure.B.4.1.b).
- (4) Le produit de Y pour la tôle non ouvrée et de M_K pour le bord de soudure donne la variation de y comme la propagation des fissures par l'épaisseur du matériau (voir Figure.B.4.1.c).
- (5) Pour de plus amples informations sur les solutions publiées relatives à la fonction géométrique y , voir les Références B.8.1, B.8.3 et B.8.5.

B.5 Intégration de la propagation des fissures

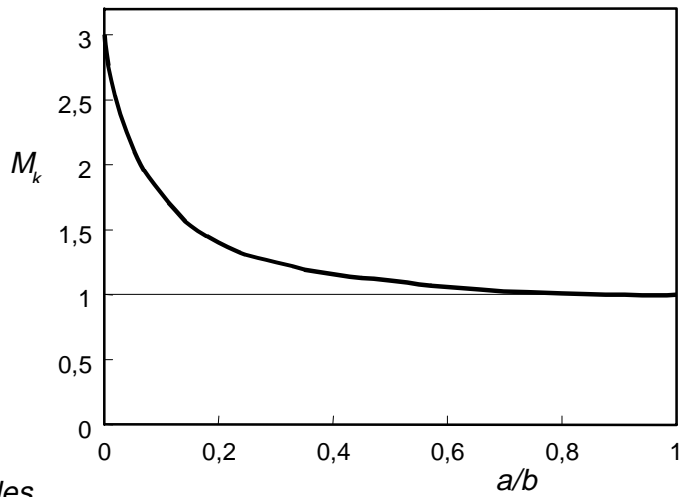
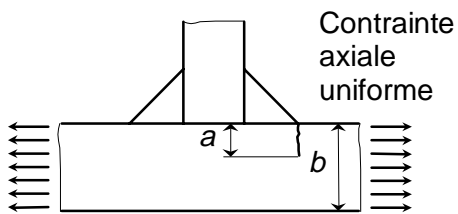
- (1) Un spectre de contraintes (voir 2.2) doit être calculé dans le cas général d'un historique de contraintes à amplitude variable. Dans la pratique, il convient d'appliquer le spectre entier en 10 séquences identiques au minimum avec les mêmes plages de contraintes et les mêmes rapports R , mais seulement avec un dixième du nombre de cycles. Il est recommandé d'appliquer en premier lieu le bloc ayant la plus grande amplitude dans chaque séquence (voir Figure.4.5.1). La propagation incrémentale des fissures est calculée à l'aide du polygone de propagation des fissures pour le rapport R approprié, pour chaque bloc de cycles de contraintes d'amplitude constante.
- (2) Dans la zone des soudures, il convient d'utiliser un rapport R élevé ($R = 0,8$) ou une courbe de propagation des fissures constante K_{max} , à moins que la répartition des contraintes résiduelles ne soit réellement connue.
- (3) La longueur de fissure ' a ' est intégrée sur cette base jusqu'à ce que la dimension de fissure maximale requise a_2 soit atteinte et les nombres calculés.

B.6 Evaluation de la dimension de fissure a_2 maximale

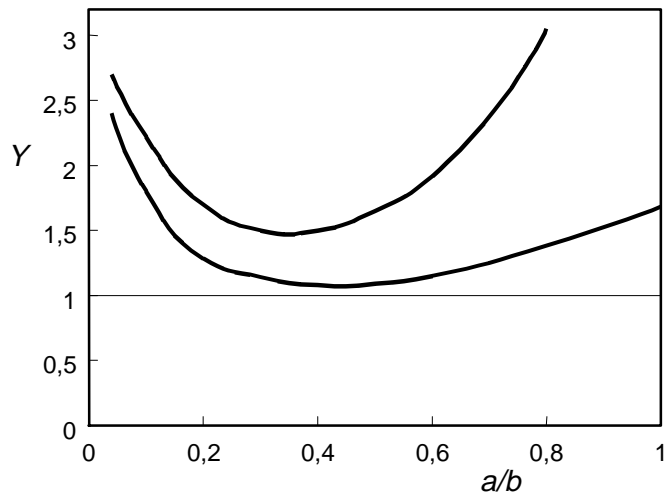
- (1) Cette évaluation est généralement déterminée sur la base d'une déchirure ductile d'une section nette sous la charge de traction maximale appliquée avec le facteur partiel approprié (voir partie 1 de la présente prénorme). Pour de plus amples informations sur la ténacité, voir les Références B.8.1 et B.8.2.



a) Valeur Y pour une tôle non ouverte



b) Valeur M_k pour la concentration des contraintes au niveau du bord de soudure



c) valeur Y pour joint soudé

Figure B.4.1 — Utilisation de solutions géométriques normales types pour la valeur y

B.7 Calculs de la longueur de fissure initiale, a_i , sur la base des données relatives à la vitesse de propagation des fissures par fatigue (FCGR) et des contraintes de référence par fatigue à 2 millions de cycles pour une fissure superficielle semi-circulaire

(1) La longueur de fissure par fatigue initiale étalonnée, a_i , a été déterminée pour les plages de contraintes de référence par fatigue à 2 millions de cycles dans le cas (1) d'une tension uniforme et (2) d'un gradient de contrainte. Les enveloppes modérées proposées des courbes de propagation de fissures par fatigue telles que représentées aux figures B.3.3-B.3.5 et indiquées dans les tableaux B.3.3 à B.3.5 ont été utilisées. Le modèle de mécanique de la rupture consistait en une fissure superficielle semi-circulaire dans une tôle de 12 mm d'épaisseur et de 200 mm de largeur soumise aux deux cas de charge (voir Figure B.7.1).

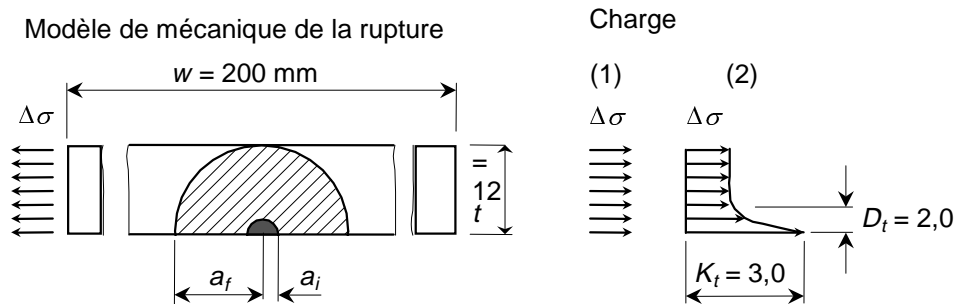


Figure B.7.1 — Géométrie de fissure et répartitions des contraintes pour le calcul des longueurs de fissure dans le cas d'une fissure superficielle semi-circulaire

(2) Ci-dessous les deux cas de charge utilisés :

Cas de charge 1 : étendue de contraintes de tension uniforme, $\Delta\sigma = 80\text{N/mm}^2$
 (étendue de contraintes de référence à 2×10^6 cycles)

Cas de charge 2 : Gradient de contrainte, $K_t = 3,0$, $D_t = 2,0\text{mm}$, $\Delta\sigma = 80\text{N/mm}^2$
 (K_t à la surface 3,0 et 2,0 mm en dessous de la surface, 1,0, décroissance parabolique, DCF5)

(3) Ci-dessous les courbes de vitesse de propagation des fissures par fatigue (FCGR) utilisées :

- | | | |
|------------------------|---|--------------------------|
| 1) alliage corroyé WAA | $R = K_{min}/K_{max} = \text{const.},$ | $R = 0,1$ et $R = 0,8 ;$ |
| 2) alliage corroyé WAA | $K_{max} = 10\text{MPa}(m)^{0,5} \text{ const.},$ | $R = 0,1$ et $R = 0,8 ;$ |
| 3) alliage coulé | $R = K_{min}/K_{max} = \text{const.},$ | $R = 0,1$ et $R = 0,8 ;$ |
| 4) AA6005A-T6LT | $R = K_{min}/K_{max} = \text{const.},$ | $R = 0,1$ et $R = 0,8 ;$ |
| 5) AA6005A-T6LT | $K_{max} = 10\text{MPa}(m)^{0,5} \text{ const.},$ | $R = 0,1$ et $R = 0,8.$ |

(4) Phases d'analyse de la propagation des fissures par fatigue :

Phase 1 : longueur de fissure initiale $a_i = 0,05\text{mm}$, longueur de fissure finale, $a_f = 2,05 \text{ mm}$

Phase 2 : longueur de fissure initiale $a_i = 2,0\text{mm}$, longueur de fissure finale, $a_f = 12, \text{ mm}$

(5) La contrainte de surface trois fois équivalente à la contrainte globale décroît de manière parabolique, atteint la contrainte globale 2mm en dessous de la surface et demeure constante sur tout le reste de l'épaisseur avec la même étendue de contraintes de référence que dans le premier cas. La résistance à la fatigue est égale au produit de la propagation des fissures par fatigue à partir de la longueur de fissure initiale, a_i , et de la longueur de fissure finale, a_f , donnée par l'épaisseur de la tôle. Le phénomène de propagation des fissures par fatigue peu importantes est calculé de manière approximative à l'aide des courbes FCGR de constante K_{max} dans la zone où la longueur de fissure est inférieure à 2 mm. Les courbes FCGR correspondant au rapport R appliqué ($R = K_{min}/K_{max}$) sont utilisées à partir de cette longueur de 2 mm. Dans le cas des alliages d'aluminium coulés, les courbes de constante K_{max} sont calculées de manière approchée par la courbe de rapport $R = 0,8$ de l'ensemble FCGR de constante R .

(6) Les tableaux B.7.1.(a) et (b), respectivement pour les alliages corroyés et coulés, montrent les variations de la dimension de fissure initiale maximale tolérable prévue en fonction de l'étendue de contraintes de référence par fatigue, du rapport R et de la répartition des contraintes.

(7) Les tableaux B.7.2 à B.7.5. montrent les variations de la résistance à la fatigue prévue dans une étendue de contraintes de 80N/mm^2 en fonction de la longueur de fissure initiale a_i , et de la courbe de propagation des fissures par fatigue. Le rapport R et la répartition des contraintes sont également utilisés.

B.8 Références

B.8.1 IIW guidance on assessment of the fitness for purpose of welded structures. IIW Draft for Development doc. SST-1157-90.

B.8.2 Guidance on some methods for the derivation of acceptance levels for detects in fusion welded joints. British Standard Published Document 6493:1991.

B.8.3 Standard test method for measurement of fatigue crack growth rates, ASTM E647-93.

B.8.4 Fatigue crack propagation in aluminium, IIW Document XIII-B77-90.

B.8.5 Stress intensity factor equations for cracks in three-dimensional finite bodies. ASTM STP 791, 1983, ppl-238 - I-265.

B.8.6 Graf, U: 'Fracture mechanics parameters and procedures for the fatigue behaviour estimation of welded aluminium components', 1992.

B.8.7 Simulations of short crack and other low closure loading conditions utilising contact K_{max} ΔK -decreasing fatigue crack growth procedures. ASTM STP 1149-1992, pp.197-220.

Tableau B.7.1 — Longueur de fissure initiale prévue a_i pour différentes plages de contraintes à 2×10^6 cycles

a) Alliages d'aluminium corroyés				
Données de limite supérieure relatives à la propagation des fissures par fatigue des Tableaux B.3.3 et B.3.5				
Étendue de contraintes	Tension uniforme		$K_t=3,0, Dt = 2,0\text{mm}, \text{DCF5}$	
Rapport d'intensité des contraintes R :	0,1	0,8	0,1	0,8
N/mm ²	mm	mm	mm	mm
16	8,57	6,68	6,28	4,06
20	6,63	4,79	4,00	1,99
25	4,82	3,00	2,19	0,266
25 ¹⁾	—	—	0,11	0,11
31	3,22	1,42	0,44	0,07
31 ¹⁾	—	1,42	0,051	0,051
39 ¹⁾	1,24	0,52	0,025	0,025
49 ¹⁾	0,30	0,26	0,014	0,014
62 ¹⁾	0,14	0,13	0,0073	0,0073
77 ¹⁾	0,078	0,075	—	—
96 ¹⁾	0,042	0,042	—	—
121 ¹⁾	0,023	0,023	—	—

NOTE 1 FCGR: WAA $K_{max} 10\text{MPa(m)}^{0,5}$ une monophasé, c'est-à-dire la valeur FCG de a_i jusqu'à l'épaisseur de tôle de 12 mm.

b) Alliages d'aluminium coulés				
Vitesse de limite supérieure de propagation des fissures par fatigue du Tableau B.3.4				
Étendue de contraintes	Tension uniforme		$K_t = 3,0, Dt = 2,0 \text{ mm}, \text{DCF5}$	
Rapport d'intensité des contraintes R :	0,1	0,8	0,1	0,8
N/mm ²	mm	mm	mm	mm
16	11,99	6,46	11,99	3,33
20	11,88	4,49	11,56	1,83
25	10,99	2,97	9,09	0,391
31	8,87	1,92	5,90	0,200
39	6,51	1,17	3,32	0,1067
49	4,48	0,71	0,072	0,062
62	2,86	0,42	0,036	0,035
77 ¹⁾	1,80	—	—	—
77	0,295	0,259	0,022	0,0219
96 ¹⁾	1,082	—	—	—
96	0,162	0,159	—	—
121 ¹⁾	0,621	—	—	—
121	0,096	0,095	—	—

NOTE 1 FCGR: CAA R constant, $R = 0,1$, une monophasé, c'est-à-dire la valeur FCG de a_i jusqu'à l'épaisseur de tôle de 12 mm.

Tableau B.7.2 — Prévisions de la résistance à la fatigue fondées sur les données de limite supérieure relatives à la propagation des fissures par fatigue pour les alliages d'aluminium corroyés des tableaux B.3.3 et B3.5

a) Tension uniforme — Phase 2					
Type de FCGR :		$R = K_{min}/K_{max} = \text{constant}$		$K_{max} = 10\text{MPa}(m)^{0,5} \text{ constant}$	
Rapport d'intensité de contraintes R :		0,1	0,8	0,1	0,8
Longueur de fissure, a_i mm	Plage d'intensité de contraintes MPam ^{0,5}	Résistance à la fatigue cycles	Résistance à la fatigue cycles	Résistance à la fatigue cycles	Résistance à la fatigue cycles
12,00	13,88	—	—	—	—
11,00	12,97	1 428	3	1 411	2
10,00	12,03	3 172	8	3 131	6
9,00	11,08	5 347	17	5 271	15
8,00	10,12	8 123	37	7 996	40
7,00	9,16	11 749	80	11 545	110
6,00	8,20	16 614	185	16 293	336
5,00	7,25	23 258	464	22 854	1 163
4,00	6,30	33 728	1 312	32 319	4 295
3,00	5,31	61 317	3 452	46 887	12 007
2,00	4,25	149 999	16 791	71 997	33 860

b) Gradient de contrainte — Phase 2					
Type de FCGR :		$R = K_{min}/K_{max} = \text{constant}$		$K_{max} = 10\text{MPa}(m)^{0,5} \text{ constant}$	
Rapport d'intensité de contraintes R :		0,1	0,8	0,1	0,8
Longueur de fissure, a_i mm	Plage d'intensité de contraintes MPam ^{0,5}	Résistance à la fatigue cycles	Résistance à la fatigue cycles	Résistance à la fatigue cycles	Résistance à la fatigue cycles
12,00	15,61	—	—	—	—
10,00	14,65	2 027	2	2 009	1
9,00	14,00	3 214	3	3 184	2
8,00	13,26	4 580	6	4 535	3
7,00	12,42	6 196	10	6 130	6
6,00	11,51	8 166	17	8 070	12
5,00	10,51	10 655	31	10 516	28
4,00	9,42	13 950	64	13 745	77
3,00	8,19	18 618	158	18 303	275
2,00	6,72	26 049	547	25 524	1 590

Tableau B.7.3 — Prévisions de la résistance à la fatigue fondées sur les données de limite supérieure relatives à la propagation des fissures par fatigue pour les alliages d'aluminium coulés du tableau B.3.4 et l'alliage corroyé AA 6005A-T6 du tableau B.3.2(a)

a) Tension uniforme — Phase 2					
Type de FCGR :		CAA $R = K_{min}/K_{max} = \text{constant}$		AA6005A $R = K_{min}/K_{max} = \text{constant}$	
Rapport d'intensité de contraintes R :		0,1	0,8	0,1	0,8
Longueur de fissure, a_i mm	Plage d'intensité de contraintes Mpam ^{0,5}	Résistance à la fatigue cycles	Résistance à la fatigue cycles	Résistance à la fatigue cycles	Résistance à la fatigue cycles
12,00	13,88	—	—	—	—
11,00	12,97	2 016	0	2 725	11
10,00	12,03	4 670	0	6 092	47
9,00	11,08	8 267	0	10 346	172
8,00	10,12	13 294	1	15 849	681
7,00	9,16	20 552	4	23 148	3 031
6,00	8,20	32 302	16	33 107	8 369
5,00	7,25	57 146	63	50 251	16 049
4,00	6,30	116 025	312	96 452	27 648
3,00	5,31	279 046	1 692	246 958	46 490
2,00	4,25	938 072	6 154	997 170	83 056

b) Gradient de contrainte — Phase 2					
Type de FCGR :		CAA $R = K_{min}/K_{max} = \text{constant}$		AA6005A $R = K_{min}/K_{max} = \text{constant}$	
Rapport d'intensité de contraintes R :		0,1	0,8	0,1	0,8
Longueur de fissure, a_i mm	Plage d'intensité de contraintes MPam ^{0,5}	Résistance à la fatigue cycles	Résistance à la fatigue cycles	Résistance à la fatigue cycles	Résistance à la fatigue cycles
12,00	15,61	—	—	—	—
11,00	15,19	1 182	0	1 808	1
10,00	14,65	2 517	0	3 793	3
9,00	14,00	4 081	0	6 035	7
8,00	13,26	5 978	0	8 636	16
7,00	12,42	8 367	0	11 742	38
6,00	11,51	11 505	0	15 572	109
5,00	10,51	15 835	1	20 477	383
4,00	9,42	22 202	3	27 074	1 776
3,00	8,19	33 164	13	36 609	6 769
2,00	6,74	64 980	94	59 496	15 333

Tableau B.7.4 — Prévisions de la résistance à la fatigue fondées sur les données de limite supérieure relatives à la propagation des fissures par fatigue pour les alliages d'aluminium corroyés du tableau B.3.3 et pour l'alliage corroyé AA 6005A-T6 du tableau B.3.2(b)

a) Tension uniforme — Phase 2					
Type de FCGR :		WAA $K_{max} 10\text{MPa}(m)^{0,5}$ constant		AA6005A $K_{max} 10\text{MPa}(m)^{0,5}$ constant	
Rapport d'intensité de contraintes R :		0,1	0,8	0,1	0,8
Longueur de fissure, a_i mm	Plage d'intensité de contraintes MPam ^{0,5}	Résistance à la fatigue cycles	Résistance à la fatigue cycles	Résistance à la fatigue cycles	Résistance à la fatigue cycles
2,05	4,30	—	—	—	—
1,85	4,07	7 139	7 527	14 355	13 409
1,65	3,83	15 518	16 395	31 119	29 712
1,45	3,58	25 527	27 031	51 031	49 116
1,25	3,32	37 759	40 089	75 212	72 732
1,05	3,03	53 169	56 627	105 451	102 341
0,85	2,72	73 424	78 502	144 855	141 042
0,65	2,38	101 802	109 388	199 471	194 885
0,45	1,98	146 015	158 005	283 365	278 004
0,25	1,47	231 455	253 422	444 329	438 619
0,05	0,66	5 561 90	5 604 65	19 522 9	19 515 2

b) Gradient de contrainte — Phase 2					
Type de FCGR :		WAA $K_{max} 10\text{MPa}(m)^{0,5}$ constant		AA6005A $K_{max} 10\text{MPa}(m)^{0,5}$ constant	
Rapport d'intensité de contraintes R :		0,1	0,8	0,1	0,8
Longueur de fissure, a_i mm	Plage d'intensité de contraintes MPam ^{0,5}	Résistance à la fatigue cycles	Résistance à la fatigue cycles	Résistance à la fatigue cycles	Résistance à la fatigue cycles
2,05	6,82	—	—	—	—
1,85	6,70	1 905	673	3 995	2 335
1,65	6,61	3 877	1 395	8 124	4 760
1,45	6,55	5 923	2 170	12 405	7 290
1,25	6,48	8 015	2 978	16 778	9 883
1,05	6,36	10 188	3 847	21 316	12 591
0,85	6,08	12 553	4 869	26 240	15 567
0,65	5,71	15 315	6 243	31 964	19 112
0,45	5,14	18 765	8 350	39 063	23 666
0,25	4,10	24 176	13 294	50 033	31 961
0,05	1,99	42 254	32 843	85 148	66 467

Tableau B.7.5 — Prévisions de la résistance à la fatigue fondées sur les données de limite supérieure relatives à la propagation des fissures par fatigue pour les alliages d'aluminium coulés du tableau B.3.4.

a) Tension uniforme — Phase 1			
Rapport d'intensité de contraintes R :		0,1	0,8
Longueur de fissure, a_i mm	Plage d'intensité de contraintes MPa(m) ^{0,5}	Résistance à la fatigue cycles	Résistance à la fatigue cycles
2,05	4,30	—	—
1,85	4,07	398 937	1 736
1,65	3,83	1 154 022	4 119
1,45	3,58	2 688 305	7 506
1,25	3,32	7 563 667	12 541
1,05	3,03	99 972 200	20 495
0,85	2,72	3,630109E+0	34 172
0,65	2,38	9	60 895
0,45	1,98	3,462941E+1	125 648
0,25	1,47	1	1 3278 202
0,05	0,66	1,719760E+1	6,315015E+12
		4	
		3,335859E+1	
		8	
		1,680181E+3	
		0	

b) Tension uniforme — Phase 1			
Rapport d'intensité de contraintes R :		0,1	0,8
Longueur de fissure, a_i mm	Plage d'intensité de contraintes MPa(m) ^{0,5}	Résistance à la fatigue cycles	Résistance à la fatigue cycles
2,05	6,82	-	-
1,85	6,70	11 723	47
1,65	6,61	24 415	101
1,45	6,55	38 268	165
1,25	6,48	52 852	235
1,05	6,36	68 809	319
0,85	6,08	88 282	442
0,65	5,71	116 339	685
0,45	5,14	163 937	1 100
0,25	4,10	335 864	2 136
0,05	1,99	1,638740E+1	17 145
		3	

Annexe C **(informative)**

Essais de calcul de la fatigue

C.1 Calcul des données relatives aux charges

C.1.1 Structures fixes soumises à une charge mécanique

(1) Cette désignation comprend les structures tels que ponts, ponts roulants à poutre et autres supports de machines. Des structures similaires existantes soumises aux mêmes sources de charge peuvent être utilisées pour obtenir l'amplitude, la synchronisation et la fréquence des charges appliquées.

(2) Des capteurs de déformation, de flexion ou d'accélération fixés à des éléments sélectionnés étalonnés dans des conditions de charges appliquées connues peuvent enregistrer le mode de répartition des efforts sur une période de service type de la structure, à l'aide d'un dispositif d'acquisition des données analogiques ou numériques. Il convient de sélectionner les éléments de sorte que les principaux éléments de charge puissent être déduits de manière indépendante en utilisant les coefficients d'influence obtenus à partir des charges d'étalonnage.

(3) Des capteurs à jauge peuvent également être montés au niveau des interfaces entre la charge appliquée et la structure et un enregistrement continu est possible à l'aide de ces mêmes capteurs.

(4) Le décrétement de masse, de raideur et logarithmique de la structure d'essai est généralement égal à 30% du décrétement de la structure finale et la fréquence propre des modes entraînant les plus fortes variations de déformation est généralement égale à 10%. Si tel n'est pas le cas, il convient alors de vérifier la réponse de charge sur une structure réalisée selon la structure finale.

(5) Il est recommandé de multiplier la composante fréquentielle du spectre de charges obtenu sur la période de service par le rapport entre la durée de vie théorique et la période de service pour obtenir le spectre de calcul final. Le cas échéant, une intensité ou une fréquence plus forte ou une extrapolation statistique de la période mesurée pour calculer la durée de vie théorique est également généralement admise.

C.1.2 Structures fixes soumises à des charges environnementales

(1) Cette désignation comprend les structures telles que mâts, cheminées et infrastructures en mer. Les méthodes de calcul du spectre de charges sont foncièrement les mêmes que celles décrites en C.1.1 si ce n'est que la période de service est généralement plus longue du fait de la nécessité d'obtenir un spectre représentatif des charges environnementales telles que les charges dues au vent et aux vagues. Le dommage par fatigue tend à se limiter à une bande spécifique du spectre de charges global en raison des effets de résonance due à l'écoulement. Ce phénomène a tendance à être spécifique à la direction, à la fréquence et à l'amortissement. Pour cette raison, une plus grande précision se révèle nécessaire, tant dans la simulation des propriétés structurelles (masse, rigidité et amortissement) que dans celle des propriétés aérodynamiques (géométrie de section).

(2) Il est recommandé de vérifier ensuite la charge sur une structure semblable à la structure finale si les données d'origine relatives aux charges sont obtenues avec des structures dont la fréquence propre ou l'amortissement diffère de plus de 10%, ou si la forme de la section n'est pas identique.

(3) Un spectre de calcul final peut être obtenu en termes de direction, d'intensité et de fréquence de charge, puis être modifié de manière appropriée en comparant les données relatives aux charges au cours de la période de collecte des données avec les relevés météorologiques obtenus sur une durée de vie théorique type de la structure.

C.1.3 Structures mobiles

(1) Cette désignation comprend les structures telles que les ponts roulants et autres structures sur pneumatiques, les véhicules et les structures flottantes.

Dans ces types de structure, il convient de définir correctement la géométrie de la surface mobile en termes de forme, d'amplitude d'ondulations et de fréquence, dans la mesure où ceci a un effet significatif sur la charge dynamique exercée sur la structure.

(2) Les autres effets de charge tels que les chargements et déchargements de fret peuvent être mesurés à l'aide des principes précisés en C.1.1.

(3) Les surfaces mobiles telles que les parcours de mesure spécialisés peuvent être utilisées pour obtenir des historiques de charges dans le but de concevoir des prototypes. Il y a lieu d'utiliser les données relatives aux charges des structures précédentes avec prudence, dans la mesure où de faibles différences, particulièrement dans la conception des bogies de roulement par exemple, peuvent fondamentalement affecter la réponse dynamique. Il est recommandé de vérifier la charge sur la construction finale lorsqu'il n'est pas réalisé d'essai de fatigue en vraie grandeur (voir C3).

C.2 Calcul des données relatives à la contrainte

C.2.1 Données relatives à l'essai individuel

(1) Lorsque les principales composantes de force des éléments simples peuvent être calculées ou mesurées facilement, il convient de soumettre à l'essai les composantes contenant l'assemblage ou l'élément à analyser.

(2) Il est recommandé de calibrer une éprouvette appropriée de dimensions identiques à celle utilisée dans la structure finale à l'aide d'une méthode pratique telle que l'utilisation d'extensomètres à résistance électrique, de réseaux de franges de moiré ou de techniques élastiques thermiques. Les extrémités de l'élément sont généralement suffisamment éloignées de la zone locale concernée pour que les effets locaux au niveau de ce point d'application des charges appliquées n'affectent pas la répartition de la contrainte au niveau du point. Il convient que les composantes de force et les gradients de contrainte dans la zone concernée soient identiques à ceux de la structure dans son ensemble.

(3) Les coefficients d'influence peuvent être obtenus à partir des charges appliquées statiquement qui permettent de déterminer la répartition des contraintes pour toute combinaison de composantes de charge souhaitée. Si nécessaire, les coefficients peuvent être obtenus avec des éprouvettes réduites, à condition que la composante dans son ensemble soit également réduite.

C.2.2 Données relatives à l'essai de la structure

(1) Avec certains types de structure tels que les structures en coque, la continuité du matériau de structure peut empêcher l'isolation des composantes avec des forces appliquées simples. Dans ce cas, il convient d'obtenir les données de contrainte à partir de prototypes ou de structures de production.

(2) Des méthodes de mesure similaires peuvent être utilisées pour l'essai des composantes. Pour la plupart des utilisations d'ordre général, il est recommandé d'appliquer les charges statiques en tant que composantes indépendantes de sorte que les contraintes puissent être combinées en utilisant les coefficients d'influence individuels pour le point concerné. La charge subit généralement un cycle d'accommodation avant d'obtenir les données relatives aux coefficients d'influence.

C.2.3 Vérification de l'historique de contraintes

(1) La même méthode que celle décrite en C.2.2. peut être utilisée pour vérifier l'historique en un point au cours de l'essai de prototype sous une charge spécifiée. Dans ce cas, il convient d'utiliser le dispositif d'acquisition des données employé en C.1.1, soit pour enregistrer l'historique complet, soit pour procéder à un comptage de cycles. Il est possible d'utiliser ce dernier pour prévoir la durée de vie une fois sélectionnée la courbe $\Delta\sigma$ -N appropriée.

(2) Une autre option, qui peut être utilisée dans le cas d'historiques de charges incertains, consiste à maintenir le dispositif de comptage des cycles fixé à la structure en service.

C.3 Calcul des données d'endurance

C.3.1 Essai individuel

(1) Lorsque les données relatives aux spectres de forces ou aux historiques de contraintes sont connues, il est possible d'effectuer un essai individuel pour vérifier la conception des parties critiques de la structure. Il est recommandé de fabriquer la composante à soumettre à l'essai selon les mêmes dimensions et méthodes que celles qui doivent être utilisées dans la construction finale. Tous ces aspects font généralement l'objet d'une documentation complète avant de fabriquer la composante d'essai. De plus, il convient que toute méthode d'essai non destructif ainsi que les critères d'acceptation fassent l'objet d'une documentation complète, accompagnée du rapport sur la qualité des assemblages à soumettre à l'essai, rédigé par la personne responsable de la vérification.

(2) En règle générale, les éprouvettes sont soumises à des charges appliquées de manière similaire à celles décrites en C.1.1. Il y a lieu d'utiliser des extensomètres pour vérifier que les ondulations de contraintes sont tel que requis. Il convient de disposer les extensomètres de telle sorte qu'ils enregistrent le paramètre de contrainte approprié (voir 7.5). Lorsque l'extensomètre enregistre la contrainte nominale, il est recommandé qu'il se situe à au moins 10 mm de tout bord de soudure. Trois extensomètres sont généralement utilisés pour procéder à l'interpolation lorsque le gradient de contrainte est élevé.

(3) Pour obtenir une courbe $\Delta\sigma-N$ à des fins de calcul, il convient de soumettre à l'essai un minimum de huit éprouvettes identiques pour que l'endurance se situe dans une plage comprise entre 10^4 et 10^7 cycles. Il est recommandé d'effectuer l'essai en se référant aux méthodes normales appropriées. En règle générale, une courbe moyenne est calculée et une courbe de calcul obtenue, cette dernière étant parallèle à la courbe moyenne sur un diagramme bilogarithmique, d'une valeur non inférieure à 2 écarts-types, ni supérieure à 80% de la valeur de résistance, en prenant la plus petite valeur. Ceci permet d'obtenir des variations de production plus importantes que ce qu'un simple ensemble d'éprouvettes de fatigue permet normalement de prévoir.

(4) Il y a lieu d'obtenir un enregistrement de la propagation des fissures par fatigue avec les cycles pour les calculs de la tolérance aux dommages.

(5) A défaut, lorsque l'historique de contraintes de calcul est connu et qu'une installation d'amplitude variable est disponible, l'éprouvette peut être soumise à l'essai avec l'historique de contraintes non factorisé.

C.3.2 Essai en vraie grandeur

(1) Un essai en vraie grandeur peut être effectué dans les conditions de service réelles ou sur une installation d'essai, les composantes de charge d'essai étant appliquées par des méthodes à commande hydraulique ou autre.

(2) Les conditions de fabrication de la structure sont généralement les mêmes que celles utilisées pour l'essai individuel décrit en C.3.1.

(3) Il y a lieu que les charges appliquées ne soient pas supérieures aux charges nominales.

(4) Lorsque les charges de service varient de manière aléatoire entre des limites établies, il est recommandé qu'elles soient représentées par une série de charges équivalente convenue entre le fournisseur et l'acheteur.

(5) A défaut, il convient que la (les) charge(s) d'essai soi(ent) égale(s) à la (aux) charge(s) limite(s).

(6) En règle générale, l'application des charges sur l'échantillon reproduit exactement les conditions d'application prévues pour la structure ou la composante en service.

(7) Il y a lieu de poursuivre l'essai jusqu'à la rupture ou jusqu'à ce que l'échantillon ne puisse plus résister à la charge maximale d'essai en raison du dommage subi.

(8) Il est recommandé de compter et de consigner avec précision le nombre d'applications de la (des) charge(s) d'essai à la rupture et d'observer la propagation progressive des fissures.

C.3.3 Acceptation

(1) Le critère d'acceptation diffère selon que doit être garantie la performance de la durée de vie utile de la structure ou sa performance au regard de la tolérance aux dommages. Voir a et b ci-dessous :

- a) pour que le calcul de la durée de vie utile soit accepté, il convient que la résistance à la rupture déterminée par essai et adaptée de manière à tenir compte du nombre de résultats d'essai disponibles ne soit pas inférieure à la durée de vie théorique telle que définie en 2.2, à savoir :

$$T_m \geq T_L \times F \quad (C.1)$$

où

T_L est la durée de vie théorique (en cycles) ;

T_m est la résistance moyenne à la rupture (en cycles) ;

F est un facteur dépendant du nombre effectif de résultats d'essai disponibles, tel que défini dans le Tableau C.1.

Tableau C.1 — Facteur d'essai de fatigue F

Résultats d'essais	Nombre d'échantillons soumis à l'essai							
	1	2	4	6	8	9	10	100
Les échantillons identiques sont tous soumis à l'essai de résistance à la rupture. Rupture de tous les échantillons, facteurs établis sur la moyenne logarithmique en supposant que l'écart-type de population est égal à $\log 0,176$	3,80	3,12	2,73	2,55	2,48	2,44	2,40	2,09
Tous les échantillons identiques sont soumis à l'essai de manière simultanée. Rupture du premier échantillon avec l'écart-type de population supposé égal à $\log 0,176$	3,80	2,67	2,01	1,75	1,60	1,54	1,54	0,91

- b) l'acceptation du calcul de la tolérance aux dommages dépend de la durée de vie d'une fissure qui atteint une dimension susceptible d'être détectée par une méthode de contrôle pouvant être appliquée en service. Elle dépend également de la vitesse de propagation de la fissure, des considérations de longueur critique de la fissure ainsi que des implications pour la sécurité résiduelle de la structure et le coût de réparation.

(2) Les critères de factorisation de la durée de vie mesurée ainsi que les critères d'acceptation varient d'une application à l'autre, et il convient qu'ils fassent l'objet d'un accord avec l'ingénieur responsable de l'acceptation.

C.4 Données relatives à la propagation des fissures

Des conseils sur le calcul des données relatives à la propagation des fissures sont indiqués à l'annexe B.

C.5 Rapport

(1) Au terme de tout essai effectué conformément à la présente partie, il convient de compiler un certificat d'essai de type contenant les informations suivantes :

- a) nom et adresse du laboratoire d'essai ;
- b) référence d'agrément de l'installation d'essai (le cas échéant) ;
- c) date de l'essai ;
- d) nom(s) du (des) témoin(s) ;
- e) description de l'échantillon soumis à l'essai, par :
 - 1) une référence au numéro de série le cas échéant ; ou

- 2) une référence au(x) numéro(s) de dessin le cas échéant ; ou
 - 3) une description accompagnée de croquis ou de diagrammes ; ou
 - 4) des photographies ;
- f) description des systèmes de charges appliqués y compris les références à d'autres normes européennes le cas échéant ;
- g) consignation des applications de charges et des réactions mesurées aux charges, c'est-à-dire flexion, déformation, durée de vie ;
- h) récapitulation des charges, déformations et contraintes aux points d'acceptation critiques ;
- i) consignation de l'endurance et du mode de rupture ;
- j) consignation des sites d'observations par référence à (e 2-4) ci-dessus ;
- k) notes relatives à l'observation de tout comportement concernant la sécurité ou l'aptitude à l'emploi de l'objet soumis à l'essai, par exemple nature et emplacement de la fissuration dans l'essai de fatigue ;
- l) consignation des conditions ambiantes au moment de l'essai le cas échéant ;
- m) déclaration de l'autorité de validation pour tout appareil de mesure utilisé ;
- n) définition de l'objet ou des objectifs de l'essai ;
- o) déclaration de conformité ou de non-conformité aux critères d'acceptation correspondants le cas échéant ;
- p) consignation des noms et statuts des personnes responsables de l'essai et de la publication du rapport ;
- q) numéro de série du rapport et date de publication.

Annexe D **(normative)**

Niveaux d'acceptation de contrôle et d'exécution

D.1 Joints soudés

D.1.1 Généralités

- (1) Ces exigences sont essentielles pour garantir l'application en toute sécurité des règles de calcul (voir 1.4(2)P)
- (2) Le niveau de qualité requis pour chaque joint soudé doit être obtenu à partir des plans détaillés (voir 6.2).
- (3) Les niveaux de qualité supérieurs au niveau 'Normal' sont indiqués par un numéro 'Fat' et une flèche.
- (4) Lorsqu'un assemblage ne dispose pas de numéro 'Fat', il doit être supposé que seul le niveau de qualité 'Normal' est requis.
- (5) Lorsqu'un assemblage dispose d'un numéro 'Fat', mais avec une flèche dans un seul sens uniquement, il doit être supposé que le niveau de qualité 'Normal' est requis dans l'autre sens.

D.1.2 Maîtrise de la qualité de soudage

D.1.2.1 Exigences de qualité

- (1) Le fabricant doit respecter les exigences de qualité de l'EN 729-2.

D.1.2.2 Coordination du soudage

- (1) Le personnel chargé de la coordination des opérations de soudage doit disposer de connaissances techniques approfondies conformément à l'EN 719.

D.1.2.3 Procédures de soudage

- (1) Les procédures de soudage doivent être approuvées conformément à l'EN 288-4.

D.1.2.4 Approbation des soudeurs

- (1) Les soudeurs doivent être approuvés conformément à l'EN 287-2.

D.1.2.5 Procédés de soudage

- (1) La maîtrise des opérations de soudage doit être conforme à l'EN 1011-1 et 4.

D.1.3 Méthodes de contrôle et étendue du contrôle

- (1) Les méthodes de contrôle ainsi que l'étendue de contrôle minimale doivent être conformes au tableau D.1 pour le contrôle final du travail exécuté, sauf accord contraire avec l'acheteur.

Tableau D.1 — Méthodes de contrôle et étendue de contrôle des soudures industrielles

Étapes de contrôle	Caractéristiques devant être contrôlées	Type d'assemblage	Orientation ⁴⁾	Type de soudure		Niveau de qualité requis	Nombre d'assemblages de chaque type ^{1) 3)}				
							%				
Étape 1 : immédiate-ment avant le soudage Contrôle visuel et contrôle des dimensions	état de la surface, préparation et dimensions d'aménagement, exigences relatives au gabarit de soudage et au pointage	Tout type	Toute orientation	Tout type		Tout niveau	100				
Étape 2 : A l'issue du soudage ²⁾ Contrôle visuel et contrôle des dimensions	Géométrie globale des soudures, Discontinuités du profil et de la surface	Tout type	Toute orientation	Tout type		Tout niveau	100				
Étape 3 : À l'issue du contrôle visuel) Essais non destructifs	(a) discontinuités de surface (b) discontinuités subsuperficielles						Ressuage	Par ultrasons		Contrôle radiographique	
								8mm≤t <25mm	t≥25mm	t<8mm	t≥8mm
		Bout à bout	Trans	Bout à bout double face		Normal Fat 25 Fat 31 Fat 39 Fat 49	100S/S 100 100 100 100	5 100 100 100 100	20 100 100 100 100	5 DF 5 DF 20 100 100	– – – – 100
				Bout à bout une seule face	Non supportée supportée	Normal Fat 25	100S/S 100	100 ⁵⁾ 100	100 100	5 DF –	– –
		En T, Cruciforme	Trans	Bout à bout		Normal Fat 25 Fat 31	100S/S 100 100	– – –	20 100 100	– – –	– – –
		En T, Cruciforme	Trans	D'angle		Normal Fat 25 Fat 31	100S/S 20 100	– – –	– – –	– – –	– – –
		A recouvrement	Trans	D'angle		Normal	100				
		Tout type	Longl	Tout type		Normal Fat 25 Fat 31 Fat 39 Fat 49 Fat 62	100 WE 100 WE 100 S/S 100 S/S 100 100	– – – – – –	– – – – – –	– – – – – 5	– – – – – 20

Tableau D.1 — Méthodes de contrôle et étendue du contrôle des soudures industrielles (fin)

Étapes de contrôle	Caractéristiques devant être contrôlées	Type d'assemblage	Orientation ⁴⁾	Type de soudure	Niveau de qualité requis	Nombre d'assemblages de chaque type ^{1) 3)} %
Etape 4 : A l'issue de l'essai non destructif ⁵⁾ Essais destructifs	Discontinuités subsuperficielles	Bout à bout	Trans	Bout à bout	Fat 39 Fat 49	% 2 (3 sections macroscopiques) 5 (3 sections macroscopiques)
			Longl	Bout à bout	Fat 61	2 (3 sections macroscopiques)
		En T Cruciforme	Longl	Bout à bout	Fat 49	2 (3 sections macroscopiques)
				D'angle	Fat 49	2 (3 sections macroscopiques + 2 essais à la rupture)

NOTE 1 Lorsqu'il doit être contrôlé moins de 100% des assemblages, il convient que l'échantillon comprenne au moins une soudure de chaque assemblage lorsqu'une procédure de soudage différente est requise. Les essais destructifs comprennent en règle générale au moins deux soudures de chaque assemblage. Dans tous les cas, il y a lieu de contrôler les cinq premiers assemblages de chaque type au début de la production. En cas de non-conformité avec le Tableau D.2, il est recommandé de soumettre à l'essai cinq autres assemblages avant de revenir au contrôle partiel recommandé. En l'absence de recommandation spécifique pour les essais non destructifs, ceci est indiqué par un tiret.

NOTE 2 Lorsque l'accès de contrôle d'un assemblage peut être supprimé par tout travail ultérieur avant exécution de l'ensemble des opérations de soudage, il convient de contrôler cet assemblage avant d'effectuer ce travail.

NOTE 3 W/E-sur une longueur de 20mm par rapport à l'extrémité de la soudure ; S/S sur une longueur de 20 mm par rapport à un arrêt ou à une amorce de soudure ; DF s'applique uniquement lorsque les chapeaux de soudage doivent être égalisés.

NOTE 4 Trans - transversale, Longl - longitudinale. Transversale s'applique à toutes les soudures dont les axes sont orientés selon un angle supérieur à 45° par rapport à l'axe longitudinal de l'élément. Les soudures dont les angles sont inférieurs à 45° sont traitées comme des soudures longitudinales. Toutes les soudures sur une longueur de 100 mm par rapport à l'assemblage entre les éléments porteurs ou les principaux points de charge sont traitées comme des soudures transversales.

NOTE Le contrôle radiographique peut être utilisé en lieu et place du contrôle par ultrasons à des fins de détection. Le contrôle par ultrasons peut toutefois être requis pour l'évaluation de la conformité des discontinuités avec le tableau D.2.

NOTE Lorsque l'on utilise des tôles témoins de débordement pour les essais non destructifs, il convient que celles-ci soient situées de manière à satisfaire à la note de bas de page 1. Lorsque des composants industriels doivent être échantillonnés pour les essais destructifs, il est recommandé d'exécuter le nombre approprié de composantes supplémentaires au moment de la production.

D.1.4 Niveaux de qualité

D.1.4.1 Qualité totale

(1) Le niveau B de l'EN 30042 doit être utilisé comme guide général d'identification des intervalles de temps relatifs à la maîtrise de l'assemblage ou du soudage.

D.1.4.2 Acceptation finale

(1) Les niveaux de qualité requis pour l'acceptation finale des soudures industrielles et pour les actions correctives doivent être conformes au Tableau D.2, afin d'éviter toute réparation inutile.

Tableau D.2 — Niveaux d'acceptation des soudures industrielles

Caractéristique	Paramètre	Type de soudure	Conditions particulières ¹⁾	Référence à la Figure D.2.1	Dimensions	Critères d'acceptation selon le niveau de qualité requis ^{2), 3), 4)}						Actions correctives
						Normal	Fat 25	Fat 31	Fat 39	Fat 49	Fat 62	
Géométrie globale de la soudure	Emplacement ⁶⁾	Tout type				$D \pm 10$	$D \pm 5$	$D \pm 5$	$D \pm 5$	$D \pm 5$	$D \pm 5$	E
	Type de soudure	Tout type				D	D	D	D	D	D	E
	Etendue (longueur)	Tout type				$D + 10 - 0$	$D + 10 - 0$	$D + 10$	$D + 10 - 0$	$D + 10 - 0$	$D + 10 - 0$	E
Discontinuités de profil	Epaisseur de gorge réelle	Tout type		i, ii, iii	a, \geq a, \leq	D (50) D + 5	D D + 4	D D + 4	D D + 3	D D + 3	D D + 3	R DS
	Longueur du côté	D'angle		i	$z \geq$	D (50)	D (50)	D (50)	D	D	D	R
	Angle du bord (interface et entrecourse)	Tout type	Trans Longl	i, ii i, ii	$\theta \geq$ $\theta \geq$	90° 90°	120° 90°	150° 90°	165° 90°	175° 90°	- 175°	DS/R DS/R
	Surépaisseur excessive	Bout à bout	Trans Longl	ii ii	$h \leq$ $h \leq$	6 6	5 6	4 5	2 4	0,5 3	- 0,5	DS DS
	Sillon incomplet ou racine concave	Bout à bout	Trans Longl	ii ii	$h \leq$ $h \leq$	0 (50) 0,1t	NP 0,1t	NP 0,1t	NP 0,1t	NP 0,05t	- NP	R R
	Défaut d'alignement	Bout à bout	Trans, bout à bout	iv	$h \leq$	$D + 0,2t$	$D + 0,1t$	$D + 0,05t$	$D + 0,05t$	$D + 0,05t$	-	E
		Tout type	Trans, cruciforme	v	$h \leq$	$D + 0,4t$	$D + 0,2t$	-	-	-	-	E
Tout type		Longl	iv, v	$h \leq$	$D + 0,4t$	$D + 0,4t$	$D + 0,4t$	$D + 0,4t$	$D + 0,4t$	$D + 0,4t$	E	
Discontinuités de rupture de surface	Caniveau ⁷⁾	Tout type	Trans (pas de joint à recouvrement)	iv, v	$h_1 + h_2 \leq$ $l \leq$	0,05t 25	0,05t 25	0,03t 10	NP NP	NP NP	- -	R R
		Tout type	Trans (pas de joint à recouvrement)	iv	$h_1 + h_2 \leq$ $l \leq$	0,03t 10	NP NP	- -	- -	- -	- -	R R
		Longl		iv, v	$h_1 + h_2 \leq$	0,1t	0,1t	0,1t	0,1t	0,05t	0,05t	R
	Absence de pénétration à la racine	S/S bout à bout	Trans Longl	iii iii	$h \leq$ $h \leq$	$D + 0,05t$ (50) $D + 0,01t$ (50)	- $D + 0,1t$	- $D + 0,1t$	- $D + 0,05t$	- $D + 0,05t$	- -	R R
	Porosité	Tout type	Trans Longl	vi vi	$d \leq$	2 10 [100]	1 5 [100]	1 5 [100]	NP NP	NP NP	- -	R R
					$\Sigma d \leq$	2 20 [100]	2 10 [100]	1 5 [100]	1 5 [100]	NP NP	NP NP	R R
Absence de fusion	Tout type		vii	$l \leq$	NP	NP	NP	NP	NP	NP	R	
Fissures	Tout type			$l \leq$	NP	NP	NP	NP	NP	NP	R	

Tableau D.2 - Niveaux d'acceptation dessoudures industrielles (fin)

Caractéristique	Paramètre	Type de soudure	Conditions particulières ¹⁾	Référence à la Figure D.2.1	Dimensions	Critères d'acceptation selon le niveau de qualité requis ^{2), 3), 4)}						Actions correctives	
						Normal (FAT 20)	Fat 25	Fat 31	Fat 39	Fat 49	Fat 62		
Discontinuités subsuperficielles	Absence de pénétration à la racine par fusion	Bout à bout	Tout type	vii, viii	$h \leq$	3	3	3	3	3	NP	R	
			Trans	Section constante $h^1 \leq 6$	vii, viii	$\Sigma l \leq$ $l \leq$ $l' \geq$	1,5t [100] 10 10	1,5t [100] 5 10	NP NP NP	NP NP NP	NP NP NP	R R R	
					vii, viii	$l \leq$ $l' \geq$	NL NL	10 10	5 10	NP NP	NP NP	R R	
			Longl	Section constante $h^1 \leq 6$	vii, viii	$\Sigma l \leq$ $l \leq$ $l' \geq$	3 t [100] NL NL	1,5t [100] NL NL	1,5t [100] 5 NL	1,5t [100] NP NP	1,5t [100] NP NP	NP NP NP	R R R
	vii, viii	$l \leq$ $l' \geq$			NL NL	10 10	5 10	NP NP	NP NP	R R			
	Ecartement des bords	D'angle/ Bout à bout PP			l, v	$h \leq$	2 (100) 3	2	2	2	2	1	R
	Inclusion de cuivre	Tout type					NA	NA	NP	NP	NP	NP	R
	Inclusions solides et inclusions d'une autre nature	Tout type				$d \leq$	NA	NA	2	1	NP	NP	R
	Porosité	Tout type			vi, vii	$d \leq$ $A \leq$	NA	NA	2 3%	1 2%	1 1%	NP NP	R R
Fissures	Tout type					NP	NP	NP	NP	NP	NP	R	

NOTE 1 Pour la définition de l'orientation, voir la note en bas de page 4 du tableau D.1.

NOTE 2 Toutes les dimensions sont en millimètres sauf indication contraire.

NOTE 3 L'épaisseur s'applique à l'épaisseur minimale de l'élément au niveau de la soudure concernée. Pour les épaisseurs supérieures à 20mm, la valeur t est prise comme étant égale à 20 mm. Lorsque la dimension admise h d'une discontinuité est liée à la valeur t , la valeur maximale admise n'est en aucun cas inférieure à 0,3 mm.

NOTE 4 En présence de deux valeurs, ces deux valeurs s'appliquent.

NOTE 5 Voir Note 1 du tableau D.1.

NOTE 6 Soumis à toutes autres exigences d'emplacement.

NOTE 7 'à recouvrement' s'applique à tout assemblage à soudage d'angle dont la longueur dans le sens longitudinal dépasse 50 mm.

NOTE 8 Toute ligne droite parallèle à l'axe de la soudure.

Légende

D Dimension spécifiée sur les plans

DS Araser

E Voir le concepteur

NL Pas de limite

NP Non admis (s'applique aux discontinuités décelables par les méthodes d'essai non destructif données dans le Tableau D.1).

PP Pénétration partielle

R Réparation par soudage selon une méthode homologuée

SS A une seule face, (y compris les soudures bout à bout des profils creux)

() longueur de soudure sur laquelle peut être moyennée la mesure (en mm)

[] longueur de soudure, sur laquelle est effectuée l'addition [en mm]

NA non applicable normalement (voir Tableau D.1)

_ Non applicable (voir tableaux 5.1.2 et 5.1.3)

A zone de pourcentage (de porosité) observée sur la radiographie sur toute longueur de soudure de 100mm

l longueur parallèle à l'axe de la soudure

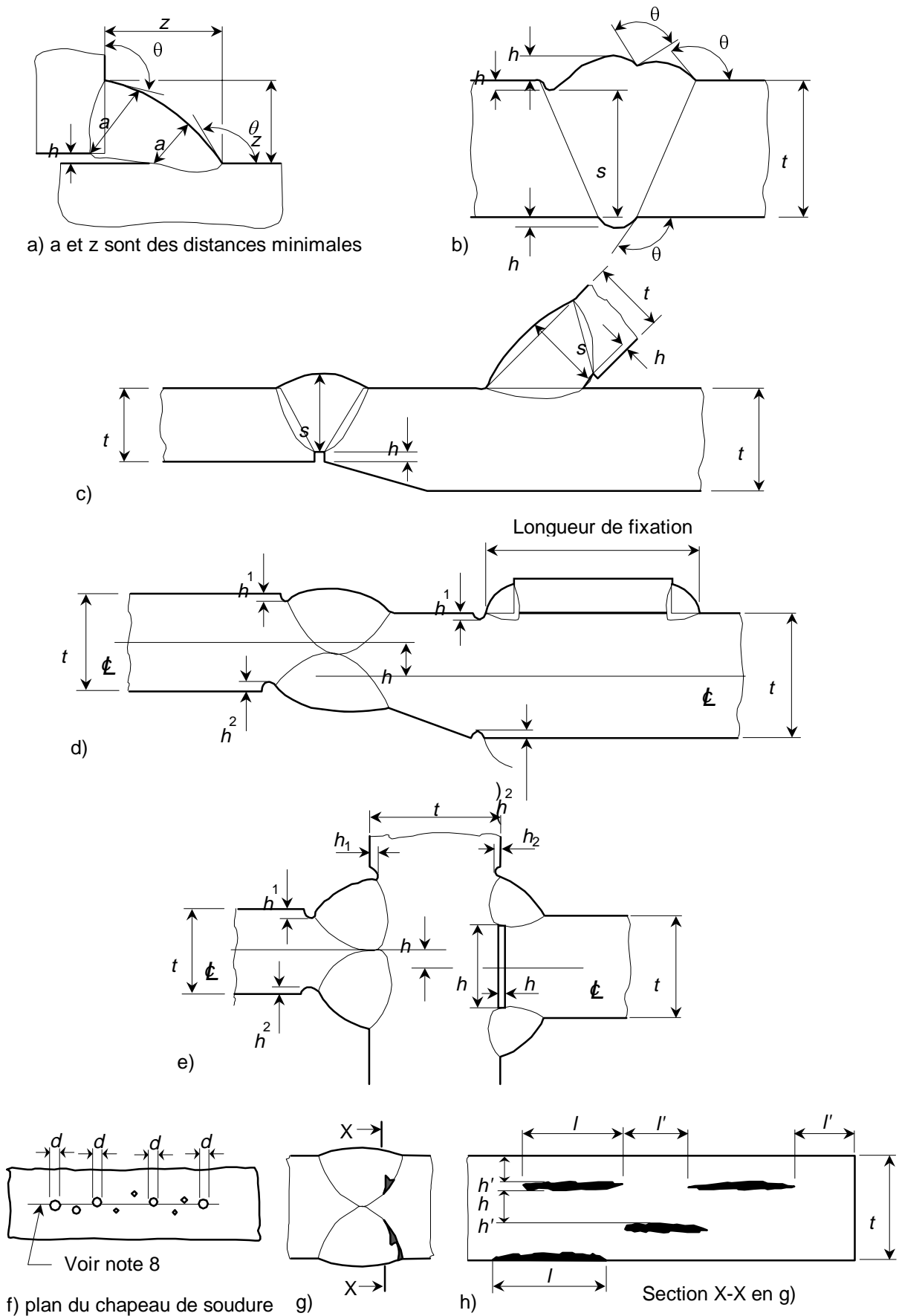


Figure D.2.1 — Dimensions des discontinuités de soudure

D.2 Pièces coulées

D.2.1 Méthodes de contrôle et étendue du contrôle

(1) Les méthodes de contrôle et l'étendue minimale du contrôle doivent être conformes au Tableau D.3 afin de procéder à un contrôle final du travail.

Tableau D.3 — Etendue du contrôle des pièces coulées

Niveau de qualité requis	Type de contrôle	
	superficiel	Volumétrique
Normal	100% visuel	–
Fat 25	100% ressuage	10 % Radiographie
Fat 31	100% ressuage	100% Radiographie
Fat 39	100% ressuage	100% Radiographie
Fat 49	100% ressuage	100% Radiographie
Fat 62	100% ressuage	100% Radiographie
Fat 77	100% ressuage	100% Radiographie

D.2.2 Acceptation finale

(1) Les niveaux de qualité requis pour l'acceptation finale des pièces coulées doivent être tels qu'indiqués dans le Tableau D.4.

Tableau D.4 — Niveaux de qualité pour les pièces coulées

Niveau de qualité requis	Type de Discontinuité	
	Fissures	Taille maximale des pores (mm)
Normal	Non admise	3,0
Fat 25	Non admise	2,2
Fat 31	Non admise	1,5
Fat 39	Non admise	0,9
Fat 49	Non admise	0,5
Fat 62	Non admise	0,3
Fat 77	Non admise	0,2

Annexe E (informative)

Soudures d'amélioration de la résistance à la fatigue

E.1 Généralités

(1) Lorsque les fissures par fatigue s'amorcent au niveau du bord de soudure, il est possible d'améliorer la capacité des joints soudés. Dans la pratique, ces méthodes sont généralement utilisées avec les soudures soumises aux contraintes les plus fortes ou pour améliorer les soudures ayant une faible résistance.

(2) Dans les cas où des techniques d'amélioration spécifiées sont utilisées, il est possible d'obtenir une amélioration de 30% de la rupture par fatigue au bord de la soudure. L'amélioration maximale est obtenue par la combinaison de deux méthodes telles que l'usinage (ou le meulage) et le martelage qui permet d'améliorer deux fois plus les méthodes individuelles.

(3) Les méthodes étudiées sont les suivantes :

- usinage ou meulage ;
- arasage par soudage à l'arc TIG ou au plasma ;
- martelage (grenailage, martelage à l'aiguille ou au marteau).

(4) Il convient de tenir compte des aspects suivants pour l'ensemble de ces méthodes :

- une procédure de travail appropriée doit être disponible ;
- avant d'appliquer les mesures d'amélioration, il faut s'assurer de l'absence de fissures superficielles aux emplacements critiques. Ceci s'effectue en règle générale par ressuage ou par d'autres méthodes d'essai non destructif appropriées ;
- pour une amélioration au niveau de la zone de résistance à la fatigue à moyen et à long terme, il est possible d'améliorer la capacité de 30% telle que mesurée par l'étendue de contraintes ;
- dans la zone de résistance à la fatigue à court terme, où les contraintes locales dépassent la limite d'élasticité, la période d'amorce représente une faible fraction (indépendamment de l'entaille) et l'amélioration est donc faible. Il n'y a donc aucune amélioration du calcul à 10^5 cycles. (on procède ainsi à une rotation de la courbe $\Delta\sigma-N$ avec des valeurs fixes à 10^5) ;
- les emplacements possibles de rupture par fatigue autres que ceux en cours d'amélioration doivent être pris en considération : par exemple en cas d'amélioration de la zone du bord de soudure, les emplacements tels que la gorge de soudure ou les fissures internes (pénétration partielle) pourraient constituer le facteur de limitation de la résistance à la fatigue et il y a lieu d'étudier l'utilité des méthodes d'amélioration ;
- un milieu marin à corrosion libre signifie bien souvent la perte de l'amélioration. Les méthodes impliquant l'utilisation de contraintes résiduelles de compression (martelage) sont moins sensibles. Une protection contre la corrosion s'impose donc si l'amélioration doit être réalisée.

E.2 Usinage ou meulage

(1) L'usinage peut être effectué à l'aide d'un ébarboir rotatif à vitesse élevée et présente l'avantage de donner une définition plus précise de l'arrondi, de laisser des marques de meulage parallèles au sens de la contrainte et de permettre l'accès aux angles. Une meuleuse à disque peut également être utilisée si l'accès le permet, voir Figure E.2.1. Dans les deux cas, le rayon de la tête ou de l'arête de coupe doit être correctement choisi.

(2) Afin de garantir l'élimination des intrusions, etc. l'ébarbage doit être effectué jusqu'à une profondeur d'au moins 0,5 mm en dessous de la partie inférieure de tout caniveau visible etc., mais il convient que cette profondeur ne dépasse pas 2 mm ou 5% de l'épaisseur de la tôle, en choisissant la plus faible profondeur, voir Figure E.2.2. La faible réduction de l'épaisseur de la tôle et l'augmentation correspondante de la contrainte nominale ne sont pas importantes pour une épaisseur supérieure ou égale à 10 mm. Dans le cas de soudures à passes multiples, au moins deux bords de soudure doivent être traités. Il convient également de veiller à maintenir la largeur de gorge requise.

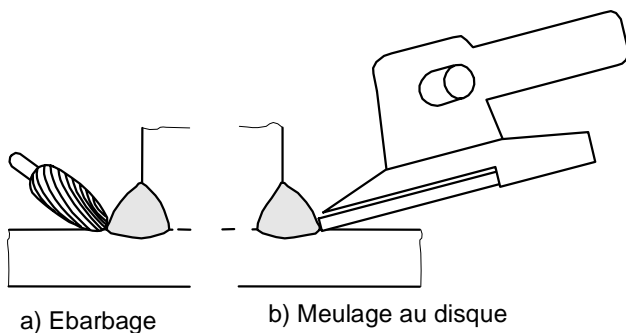


Figure E.2.1 — Techniques d'usinage/meulage

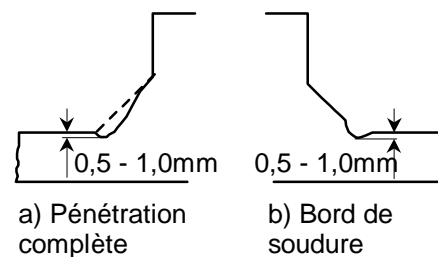


Figure E.2.2 — Géométries de profil

E.3 Arasage par soudage à l'arc TIG ou au plasma

(1) Alors que le soudage à l'arc TIG est uniquement un procédé pratique pour les structures constituées de tôles d'épaisseur inférieure ou égale à 4 mm, il peut être utilisé pour améliorer la résistance à la fatigue lorsque le bord de soudure constitue le site critique. Lors de la refonte du bord de soudure existant, les inclusions et autres caniveaux peuvent être éliminés et le rayon de bordure peut être augmenté, ce qui réduit le facteur de concentration de contraintes locales.

(2) Le matériel classique d'arasage par soudage à l'arc TIG peut être utilisé, sans autre matériau d'apport. L'arasage à l'arc TIG dépend des compétences de l'opérateur et il est important de disposer de surfaces propres pour éviter la présence de pores. Des procédures détaillées doivent être élaborées.

(3) L'amélioration doit être vérifiée au moyen d'essais.

E.4 Martelage

(1) Les méthodes faisant appel à des contraintes résiduelles de compression présentent généralement plus d'avantages. Les méthodes les plus courantes sont le martelage au marteau, le martelage à l'aiguille et le grenailage. Le martelage est un procédé de déformation à froid dans lequel l'impact de l'outil opère une déformation plastique de la surface. Le matériau (élastique) environnant comprime le volume déformé. Des charges de service de compression importantes peuvent réduire le niveau de contrainte résiduelle et doivent être prises en compte lors de l'application des spectres de charges aléatoires.

(2) Les procédures relatives à l'ensemble des méthodes de martelage doivent être élaborées : passes, déformation du bord de soudure et empreinte pour martelage au marteau et martelage par botte de fil ; intensité, surface couverte et déformation de bande Almen pour grenailage.

Annexe F (informative)

Fatigue oligocyclique

F.1 Introduction

(1) Lorsque les plages de contraintes élevées appliquées moins de 10^5 fois produisent des dommages significatifs, il se peut que les courbes $\Delta\sigma$ - N données en 5.2 pour certains éléments ainsi que les rapports R soient inutilement modérées. Les données ci-dessous peuvent être utilisées pour obtenir une prévision plus précise de la durée de vie.

F.2 Modification des courbes $\Delta\sigma$ - N

(1) Pour une endurance comprise entre 10^3 et 10^5 cycles, la courbe de calcul de la fatigue peut se définir comme suit :

$$N_i = \left(\frac{\Delta\sigma_c}{\Delta\sigma_i} \right)^{20^{m_0/m_1}} \times 10^5 \quad (\text{F.1})$$

où

N_i est le nombre calculé de cycles à la rupture d'une étendue de contraintes $\Delta\sigma_i$;

$\Delta\sigma_c$ est la valeur de référence de la résistance à la fatigue à $2,10^6$ cycles en fonction de la catégorie d'élément ;

$\Delta\sigma_i$ est l'étendue de contraintes principale de l'élément et est constante pour l'ensemble des cycles ;

m_0 est la pente logarithmique inverse de la courbe $\Delta\sigma$ - N dans le plage comprise entre 10^3 et 10^5 cycles, en fonction de la catégorie de détail, de l'alliage et de la valeur de R ;

m_1 est la pente logarithmique inverse de la courbe $\Delta\sigma$ - N en fonction de la catégorie de détail, voir Tableaux 5.1.1 à 5.1.5 ou 5.2.1.

(2) Voir également 5.3.4(1).

F.3 Données d'essai

(1) Le Tableau F.3.1 donne les valeurs de m_0 pour les éléments sélectionnés de certains produits d'alliage corroyés calculés à partir des données d'essai.

(2) Une interpolation linéaire de valeur inverse m_0 peut être utilisée pour les rapports R compris entre $R = -1$ et $R = 0$.

(3) La valeur de R peut être fondée uniquement sur les contraintes appliquées sans tenir compte des contraintes résiduelles.

Tableau F.3.1 — Valeurs de M_0

Numéro de type d'élément	Tableau de la catégorie d'élément	Alliages	Type de produit	m_0	
				$R = -1$	$R \geq 0$
1,1 1,2 1,3 1,4	5.1.1	7020 série 6000 7020 série 6000	Feuille et tôle Feuille et tôle Extrusions profilées Extrusions profilées	5,0 4,0 4,0 4,0	m_1 m_1 m_1 m_1
3,6 3,7 3,8 3,9	5.1.3	} selon le tableau 1.1.1	} selon le tableau 1.1.1	3,0 3,0 3,0 3,0	m_1 m_1 m_1 m_1
4,1 4,2 4,3 4,4	5.1.4	7020 7020 7020 7020	} selon le tableau 1.1.1	3,3 3,3 3,3 3,3	m_1 m_1 m_1 m_1

Annexe G (informative)

Influence du rapport R

G.1. Amélioration de la résistance à la fatigue

(1) Pour les valeurs de rapport de contrainte appliquées inférieures à $R = +0,5$ la résistance de référence à la fatigue $\Delta\sigma_c$ peut être améliorée par un facteur de rapport $R f(R)$ où la résistance de référence améliorée à la fatigue $\Delta\sigma_{c(R)}$ à 2×10^6 est donnée par l'équation suivante :

$$\Delta\sigma_{c(R)} = f(R) \Delta\sigma_c \tag{G.1}$$

- (2) La valeur de $f(R)$ dépend de la valeur de R et du type de composant et d'élément (voir G.2).
- (3) Il est recommandé de ne pas améliorer la résistance à la fatigue à 10^4 cycles.
- (4) La pente de base $m_{1(R)}$ des courbes $\Delta\sigma-N$ améliorées doit être réglée conformément aux valeurs de Δ_c à 10^4 et 2×10^6 cycles (voir Figure G.1.1.)

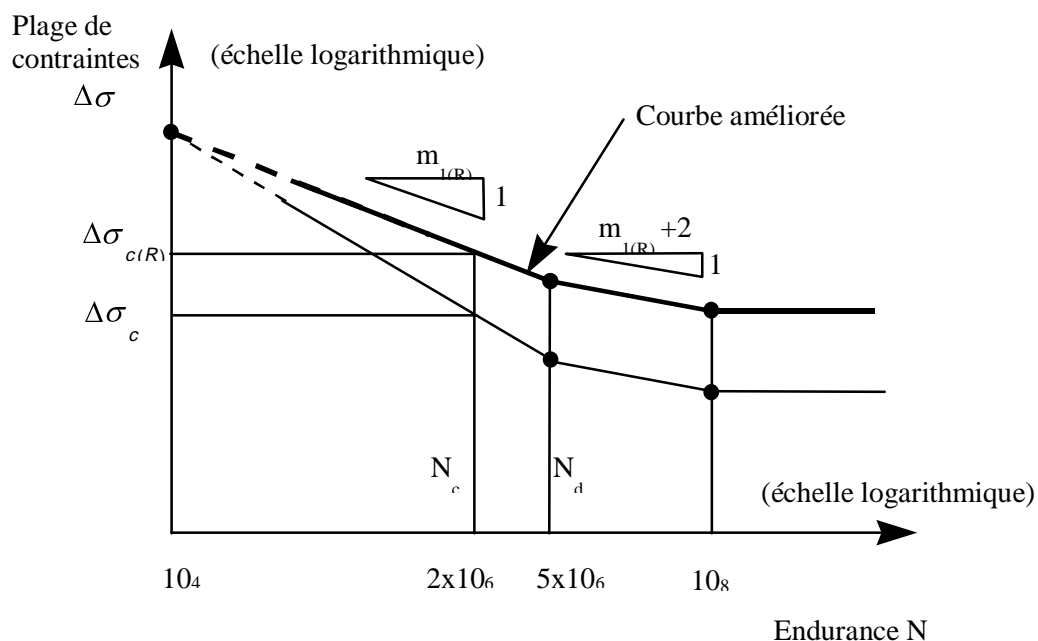


Figure G.1.1 — Amélioration de la courbe $\Delta\sigma-N$

G.2. Exemples d'amélioration

G.2.1. Exemple 1

(1) Cet exemple s'applique aux amorces observées dans le matériau de base ainsi qu'aux produits corroyés des éléments de structure loin de tout assemblage. Il peut également s'appliquer aux structures dont les contraintes ont été effectivement relaxées.

(2) Toute précontrainte ou tout défaut d'ajustement doit être autorisé(e) outre les contraintes appliquées.

(3) Les valeurs de $f(R)$ sont données dans le Tableau G.2.1. et la figure G.2.1.

Tableau G.2.1 — Valeurs de $f(R)$ pour l'exemple 1

R	$f(R)$
< -1	1,6
> -1 $< + 0,5$	$1,2 - 0,4 R$
$> + 0,5$	1,0

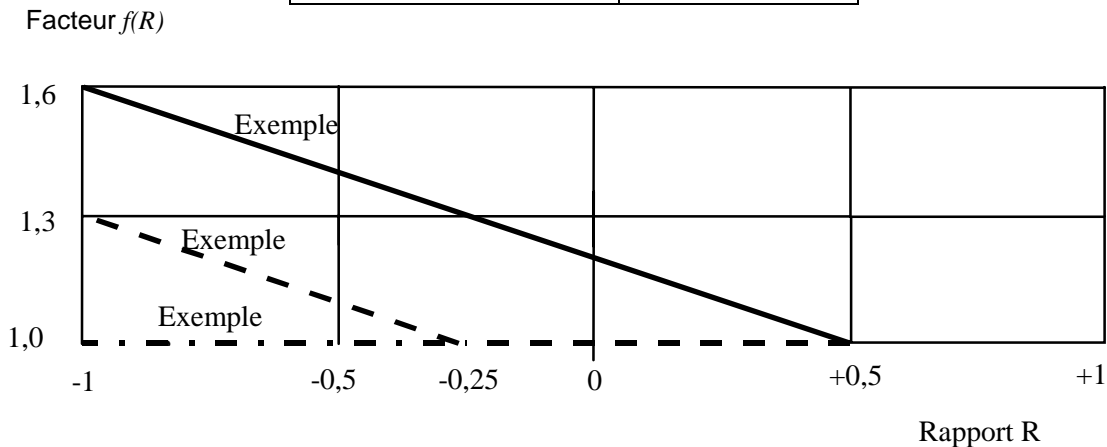


Figure G.2.1 — Facteur d'amélioration de la résistance $f(R)$ à 2×10^2 cycles

G.2.2 Exemple 2

(1) Cet exemple s'applique aux amorces associées aux assemblages soudés ou fixés d'éléments de structure simples, où les contraintes résiduelles σ_{res} ont été établies, en tenant compte de toute

(2) Il convient d'estimer le rapport R effectif, R_{eff} de la manière suivante :

$$R_{eff} = (2\sigma_{res} - \Delta\sigma) / (2\sigma_{res} + \Delta\sigma)$$

où

$\Delta\sigma$ est l'étendue de contraintes appliquée.

(3) Les valeurs de $f(R)$ sont données dans le Tableau G.2.2. et la Figure G.2.1.

Tableau G.2.2 — Valeurs de $f(R)$ pour l'exemple 2

R_{eff}	$f(R)$
< -1	1,3
> -1 $< - 0,25$	$0,9 - 0,4R$
$> - 0,25$	1,0

G.2.3 Exemple 3

(1) Cet exemple s'applique aux assemblages de structures complexes pour lesquels le contrôle des contraintes résiduelles est impossible.

(2) Dans ce cas, il est recommandé de prendre la valeur $f(R)$ comme unité pour tous les rapports R .