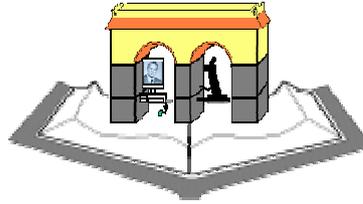


République Algérienne Démocratique Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur
et de la recherche scientifique
Universitaire de Mascara
Institut des Sciences et Technologie
Département de Génie Mécanique, Génie Civil et Hydraulique



Spécialité : Génie Mécanique
Option : Construction Mécanique
Pour l'obtention du Diplôme de Magistère en Génie Mécanique

Etude comparative des critères de fatigue multiaxiale à grand nombre de cycles

Présenté par : keddari mostafa

Membres de jury :

M ^r BALTACHE Hadj	Président	Pr	Université de mascara
M ^r AID Abdelkrim	Encadreur	MCA	Université de mascara
M ^r OULD CHEKH	Co-Encadreur :	MCA	Université de mascara
M ^r HAMADI Fodil	Examineur	MCA	Université de bachar
M ^r AMINALLAH Laid	Examineur	MCA	Université de mascara
M ^r MEDDAH Miloud	Invité	MCA	Université de mascara

Année Universitaire : 2011\2012

Dédicace

*Avant tout je remercie DIEU pour son aide et de
m'avoir Donner La chance d'étudier et de suivre le droit
Chemin :*

A ma mere

*"Seuls les faibles blâment leurs parents, leur race, l'époque où ils sont nés,
le manque de chance ou les aléas du destin. Mais chacun d'entre nous a le pouvoir de dire :
« Voici ce que je suis aujourd'hui et voilà ce que je serai demain »."*

AMOUR LOUIS

A mes proches,

*J'apprécie beaucoup la grande affection que vous tenez pour moi. A cette
reconnaissance, je vous manifeste mes meilleurs sentiments en vous offrant le
fruit de mon travail.*

A mes amis,

*" L'apprentissage de la vie, c'est de se donner les moyens de
surmonter cette angoisse qu'on a d'elle, en se structurant, en pre-
nant ses responsabilités, en se disciplinant."*

BOTHOREL JEAN

A mes collègues,

*" Le savoir que l'on ne complète pas chaque jour
diminue tous les jours."*

Proverbe Chinois

:

*A TOUS LE MONDE INTELLECTUEL
KEDDARI MOSTAFA*

Remerciement

Nous remercions DIEU tout puissant de nous

avoir donné le courage, la patience et la santé durant nos années d'étude. .

Nous tenons à remercier chaleureusement, tous ceux qui nous ont aidé de près ou de loin.

❁ *Mon encadreur ; Mr. AID ABDELKRIM, disponibilité, ses conseils, et son aide, en lui exprimant toute notre reconnaissance.*

❁ *Mon co-encadreur Mr. Ould chekfi pour son aide, son encouragement.*

❁ *Mr POL FLEVICHMEM et le defin Mr JEAN FARITI pour leurs aides dans l'outil informatique. .*

Toute mes remerciements aux membres de jury :



KEDDARI MOSTAFA

Sommaire

Introduction à la fatigue des matériaux

I-1	Introduction à la fatigue.....	1
I-2	Mécanismes de fatigue.....	3
I-3.	Approche en durée de vie.....	4
I-4.	Comportement en fatigue demétaux.....	4
I-5.	Cycle de contrainte.....	4
I-6.	Termes et symboles utilises pour décrire le cycle contrainte.....	5
I-7.	Types de cycles de contrainte.....	5
I-8.	Termes et symboles relatifs aux essaisfatigue.....	6
	a) Limite de fatigue.....	7
	b) Limite d'endurance.....	7
	c) Rapport d'endurance.....	8
	d) Durée de vie ou Endurance	9
I-9	Courbe de Wöhler	
	a) Courbe σ/N	
	.b) Modélisation	
-	I-10 Types de fatigue	
	I-10.1 Fatigue de plastiquoligocyclique.....	10
	I-10.2 Domaine d'endurance limitée.....	10
	I-10.3 Domaine d'endurance illimitée.....	
I-11.	Equation de la courbe Wöhler et loi de Basquin.....	11
I-12.	Diagramme d'endurance.....	12
I-13.	Diagramme de Haigh.....	12
I-14.	Différentes représentations de la courbe AB.....	13
I-15.	Diagramme de Goodman Smith :	
I-16.	Méthodes de comptage.....	14
	I-16-1 Traitement préliminaire du chargemen.....	

I-16-2 Procédures de comptage de cycles par la méthode Rai..	16
I-16-3. Exemple d'application	
I-16-4. Traitement préliminaire du chargement.....	17

Chapitre I : Les critères de fatigue multiaxiaux

II.1 Formalisme général d'un critère de fatigue.....	19
II.2 Formules et classification des critères de fatigue multiaxiaux ..	20
II.2.1 Les critères d'approche empirique	21
II.2.1.1 Nomenclature.....	21
II.2.1.2 Le critère de Hohenemser & Prager	21
II.2.1.3 Le critère de Gough et Pollard.....	22
II.2.1.4 Le critère de Davies [8].....	22
II.2.1.5 Le critère de Nishihara & Kawamoto.....	22
II.2.1.6 Le critère de Lee 1.....	22
I II.2.1.7 Le critère de Lee 2	23
II.2.1.8 Conclusion.....	23
II.2.2 Les critères de type plan critique.....	23
II.2.2.1 Nomenclature.....	24
II.2.2.2 Les critères de type plan critique.....	
II.2.2.3 Nomenclature.....	
a) Les termes relatifs aux contraintes normales.....	25
b) Les termes relatifs aux contraintes tangentielles.....	26
II.2.2.2 Le critère de Stulen & Cummings.....	
II.2.2.3 Le critère de Findley.....	
II.2.2.4 Le critère de Yokobori.....	27
II.2.2.5 Le critère de McDiarmid 1.....	28
II.2.2.6 Critère de Mc Diarmid 2.....	28
II.2.2.8 Le critère de Mataka.....	29
II.2.2.9 Le critère de Flavenot & Skalli	
II.2.2.10 Le critère de Dang Van 2.....	30

II.2.2.11 Le critère de Froustey dérivé Yokobor.....	30
II.2.2.12 Le critère de Munday & Mitchell.....	31
II.2.2.13 Le critère de Galtier & Séguret.....	31
II.2.2.14 Le critère de Deperrois.....	32
II.2.2.15 Le critère de Robert.....	33
II Conclusions.....	34
II.2.3 Les critères d'approche globale	
II.2.3.1 Nomenclature.....	35
II.2.3.2 Le critère de Sines.....	35
II.2.3.3 Le critère de Crossland.....	36
II.2.3.4 Le critère de Marin	36
II.2.3.5 Le critère de Deitman & Issler 1.....	37
II.2.3.6 Le critère de Deitman & Issler 2	37
II.2.3.7 Le critère de Deitman & Issler 3	37
II.2.3.8 Le critère de Grübisic & Simbürger [.....	37
II.2.3.9 Le critère de Kinasoshvili	40
II.2.3.10 Le critère de Kakuno & Kawada	40
II.2.3.11 Le critère de Hashin	40
II.2.3.12 Le critère de Fogue	40
II.2.3.13 Le critère de Papadopoulos 1	41
II.2.3.14 Le critère de Froustey & Lasserre	41
Chapitre III. Réalisation d'un outil-informatique	43
III.1 Organigramme simple.....	46
III. 2 Différents figures	48
III.3 Intepretations.....	60
III.4 Conclusion generale.....	68
Banc de données.....	70
Bibliographies.....	78

CHAPITRE I

I-1. Introduction sur la fatigue des matériaux

Le phénomène de fatigue est un processus complexe. Le nombre de facteurs d'influence est très important. S'il est possible de tester les matériaux sous certaines conditions, il sera difficile de réaliser tous les essais avec une sollicitation représentative

et la géométrie réelle des composants mécaniques. Il est cependant intéressant d'analyser rapidement le rôle et l'effet de chaque paramètre pouvant changer les éléments d'appréciation. On distingue différents types de paramètres : les facteurs relatifs à la sollicitation et à l'environnement, à la géométrie et aux matériaux. Dans la première catégorie de paramètres, on peut citer : le type de la sollicitation (Uni axiale, multiaxiale avec ou sans déphasage), les contraintes moyennes, le spectre de chargement et de surcharge, la fréquence du chargement, la température, la corrosion. Dans la deuxième catégorie de paramètres, on trouve : l'état de surface, l'effet d'entaille et l'effet d'échelle. Dans la troisième catégorie de paramètres, on a enfin : les caractéristiques du matériau, la microstructure du matériau, les contraintes résiduelles, les traitements de surface. Un concepteur doit analyser l'ensemble de ces paramètres pour en dresser une liste aussi exhaustive que possible et les quantifier pour calculer la résistance à la fatigue de sa pièce.

La pratique industrielle montre que les ruptures de pièces de machines ou de structures en fonctionnement normal sont le plus souvent dues à la fatigue. Celle-ci est particulièrement insidieuse du fait de son caractère lent et progressif et d'autant plus grave que la fissuration par fatigue conduit très souvent à une rupture brutale différée qui peut provoquer un accident.

Toute pièce ou structure soumise à des contraintes cycliques de façon répétée peut se rompre sous des contraintes bien inférieures à la contrainte de résistance à la traction ou même souvent inférieures à la limite d'élasticité du matériau.

Les pièces non fissurées sont pour la plupart des pièces de petite taille : tourillons, dents d'engrenage, chemins de roulement à bille, vilebrequins, arbres moteur.

Les pièces fissurées sont des pièces de dimensions importantes, en particulier contenant des cordons de soudure : ponts, bateaux, réservoirs sous pression, Concerne les pièces de coeur de réacteur nucléaire, de turbines, et toutes les pièces soumises à surcharge occasionnelle, contrainte supérieure à limite élastique rupture en moins de 10^4 cycles

La fatigue à grand nombre de cycles concerne toutes pièces soumises à des contraintes inférieures à limite élastique et la rupture débasse 10^4 cycles.

I-2. Mécanismes de fatigue

Les défauts peuvent se développer au cours du répétition des charges dans une partie initialement saine (non endommagée) puis se propage de façon stable jusqu'à la rupture catastrophique. Le développement de l'endommagement peut grossièrement se décrire de la façon suivante:

- 1- des modifications microstructurales qui engendrent l'apparition d'un dommage irréversible;
- 2- l'apparition de microfissures;
- 3- la croissance et la coalescence de défauts microscopiques pour former des fissures principales qui peuvent éventuellement mener à la rupture catastrophique.
- 4- la propagation stable d'une fissure principale;
- 5- la rupture finale.

Ainsi l'examen d'une surface rompue fait ressortir généralement trois zones:

- Un site d'amorçage;
- Une zone de propagation stable;
- Une surface de rupture finale.

Les sites préférentiels pour l'amorçage sont le plus souvent situés en surfaces, dans des zones de fortes contraintes comme les entailles, les rayures, les pics de corrosion, les inclusions...etc.

I-3. Approche en durée de vie

Le dimensionnement en fatigue implique très souvent l'évolution de la durée de vie totale en fonction de l'amplitude de charge appliquée (approche S-N) ou de l'amplitude de déformation soit totale soit plastique. Le nombre de cycles à rupture est déterminé sur des éprouvettes initialement non fissurées et avec un état de surface contrôlé. La durée de vie comprend alors le nombre de cycles nécessaire pour former une fissure principale (qui peut atteindre 90% de la durée vie totale) et pour propager ce défaut jusqu'à la rupture finale. Il convient en outre de prendre en compte les différents facteurs pouvant affecter la durée de vie (contrainte moyenne, environnement, chargement multiaxial, etc.).

Lorsque l'on considère des durées de vie très longue associées à des faibles niveaux de charge (endurance) le matériau se déforme dans le domaine élastique; le temps ou le nombre de cycles à rupture est déterminé en fonction de l'amplitude de contrainte. Cependant, les contraintes liées au domaine de fatigue oligocyclique (à faible

nombre de cycles) sont suffisamment élevées pour engendrer des déformations plastiques. Dans ce cas, la durée de vie est déterminée en fonction de l'amplitude de déformation. La détermination du nombre de cycle nécessaire à l'amorçage et aux premiers stades de propagation d'une fissure dans un champ de déformations associé à une concentration de contrainte constitue un exemple d'application de cette approche basée sur l'amplitude de déformation.

I-4. Comportement en fatigue des métaux.

Afin de prévenir la rupture de pièces en service, des essais sont conduits en laboratoire sur des éprouvettes de petites dimensions sous des chargements simples ou des représentations plus réalistes des conditions de chargements en service. Les résultats permettent de déterminer les conditions limites d'opération de la pièce considérée soit en durée de vie (nombre de cycles admissibles) soit en contrainte admissible.

I-5. Cycle de contrainte

C'est l'étude de la fonction contrainte-temps qui se répète périodiquement. La contrainte sinusoïdale peut être considérée comme la superposition d'une contrainte alternée σ_a et d'une contrainte statique appelée contrainte moyenne σ_m .

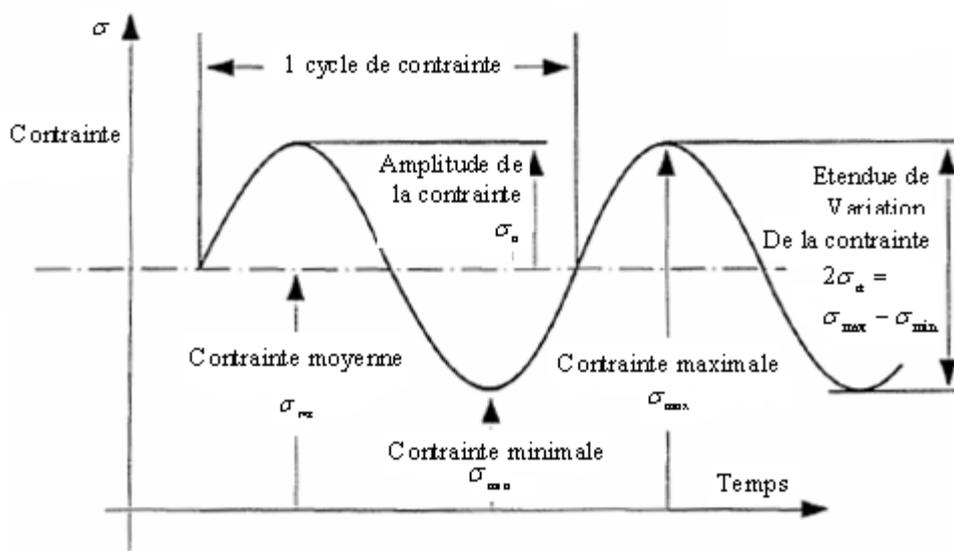


Figure I-1. cycle de contrainte de fatigue

I-6. Termes et symboles utilisés pour décrire le cycle de contrainte

Contrainte maximale σ_{\max} : valeur maximale algébrique de la contrainte au cours d'un cycle de contrainte avec $\sigma_{\max} = \sigma_m + \sigma_a$

Contrainte minimale σ_{\min} : valeur minimale algébrique de la contrainte au cours d'un cycle de contrainte avec $\sigma_{\min} = \sigma_m - \sigma_a$

Contrainte moyenne σ_m : définie par valeur algébrique :

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\min} + \sigma_{\max}}{2} \quad (1)$$

Amplitude de contraintes σ_a : (appelée aussi contrainte alternée) définie par la valeur algébrique

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (2)$$

Rapport de contrainte **R** : définie par le rapporte algébrique

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (3)$$

I-7. Types de cycles de contrainte

1) Contrainte purement alternée: contrainte qui a les valeurs égales dans le sens positif et négatif .

2) Contrainte alternée: contrainte qui évolue entre une valeur maximale positive et une valeur minimale négative dont les valeurs absolues sont différentes:

(Pour ce cycle de contrainte: $0 < \sigma_m < \sigma_a$)

3) Contrainte répétée : contrainte qui varie entre la valeur 0 et une valeur maximale positive ou entre 0 et une valeur maximal négative (pour ce cycle de contrainte ($\sigma_m = \sigma_a$)).

4) Contrainte ondulée: contrainte qui varie entre les valeurs maximal et minimal qui sont de même signe ($\sigma_m < \sigma_a$).

Nombre de cycle (n): nombre de répétition du cycle de contrainte au cours de l'essai de fatigue.

5) Nombre de cycle à rupture (N): nombre de répétition du cycle de contrainte jusqu'à rupture.

6) Rapport du nombre de cycles $\frac{n}{N}$: rapport du nombre de répétition n de cycles de contraintes réalisé à la même amplitude de contrainte au nombre N du même cycle de contrainte nécessaire pour obtenir la rupture.

Dans le cas d'essai de fatigue en traction – compression, le cycle de contrainte peut prendre l'une des formes représentées en (figure. I. 2).

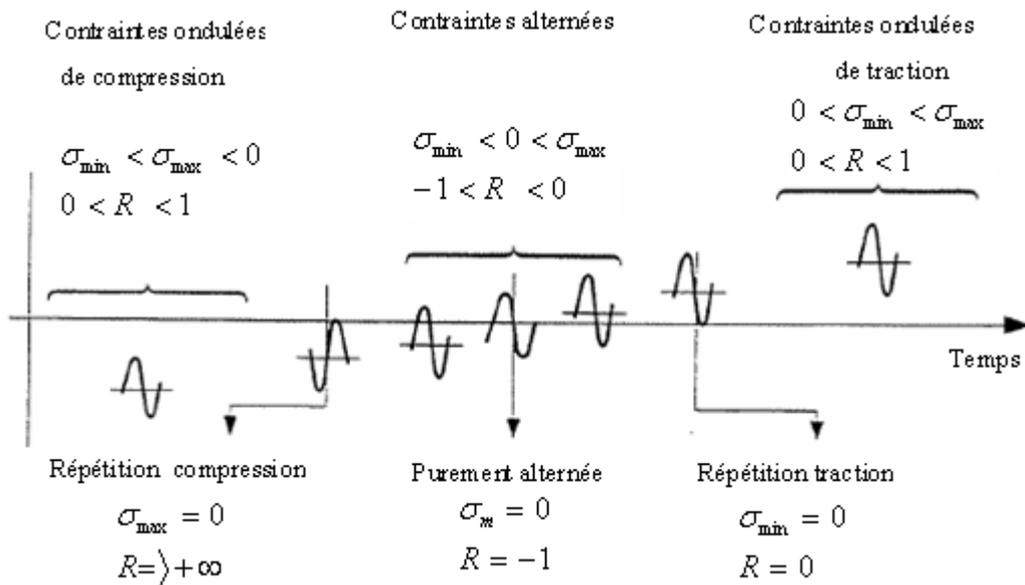


Figure I 2. Les différentes formes de cycles de contrainte au cours d'essai de fatigue en traction- compression

I-8. Termes et symboles relatifs aux essais de fatigue

a) Limite de fatigue

C'est pour une contrainte moyenne σ_m donnée la plus grande de contrainte pour laquelle il n'est pas observé de rupture après un nombre infini de cycles. Dans le cas particulier des aciers, il est expérimentalement constaté que ce nombre infini peut être ramené à 10^7 cycles.

En revanche pour les aciers en présence de corrosion et pour certains alliages d'aluminium, de cuivre ou de titane, cette limite de fatigue reste théorique et sans intérêt puisque tous les mécanismes ont une durée de vie limitée par suite de l'usure, la corrosion ou d'autres causes inhérentes à leur service même; on est donc conduit à utiliser une autre grandeur appelée limite d'endurance.

b) Limite d'endurance

C'est pour une contrainte moyenne σ_m donnée, l'amplitude de contrainte pour laquelle il est constaté 50% de rupture après un nombre fini N (appelé censure) de cycles. Cette valeur peut être déterminée à l'aide de méthodes statistiques. Dans le cas des aciers, la censure est généralement de 10^7 cycles. On peut déterminer

expérimentalement la limite d'endurance pour des censures différentes suivant la nature du matériau ou de la pièce essayée. Cette grandeur est notée $\sigma_D(N)$ ou $\tau_D(N)$.

c) Rapport d'endurance

Dans la pratique, il est parfois intéressant de rapporter la limite d'endurance à la charge de rupture à la traction du matériau essayé en fatigue. On définit ainsi le rapport d'endurance R_D :

$$R_D = \frac{\sigma_D(N)}{R_m} \quad (4)$$

d) Durée de vie ou Endurance

enfin, on appelle durée de vie ou endurance en fatigue, le nombre de cycles de contraintes N nécessaires pour que l'éprouvette ou la pièce se rompe pour un cycle de contraintes (σ_a, σ_m) . Ces valeurs peuvent être déterminées à l'aide de méthodes statistiques.

I-9.a) Courbe de Wöhler (courbe σ/N)

Cette courbe est appelée courbe S.N (Stresses – Number of cycles) dans les pays anglo-saxons.

Universellement connue, la courbe de Wöhler est la plus ancienne qui permette de visualiser la tenue des matériaux dans tout le domaine de fatigue.

Chaque pièce est soumise à des cycles d'efforts périodiques: N_R est le nombre de cycles au bout duquel la rupture se produit. Pour plus de commodité, ce nombre N_R est reporté en abscisse avec une échelle logarithmique et la contrainte est reportée en ordonnée sur une échelle linéaire.

Pour tracer une telle courbe, on réalise généralement des essais à contrainte moyenne constante et on fait varier l'amplitude du cycle de contrainte appliquée.

Ainsi, pour chaque pièce essayée correspond donc un point du plan (σ_a, N) et à partir d'un certain nombre d'essais à contraintes généralement décroissantes, on peut tracer une courbe qui à l'allure suivante:

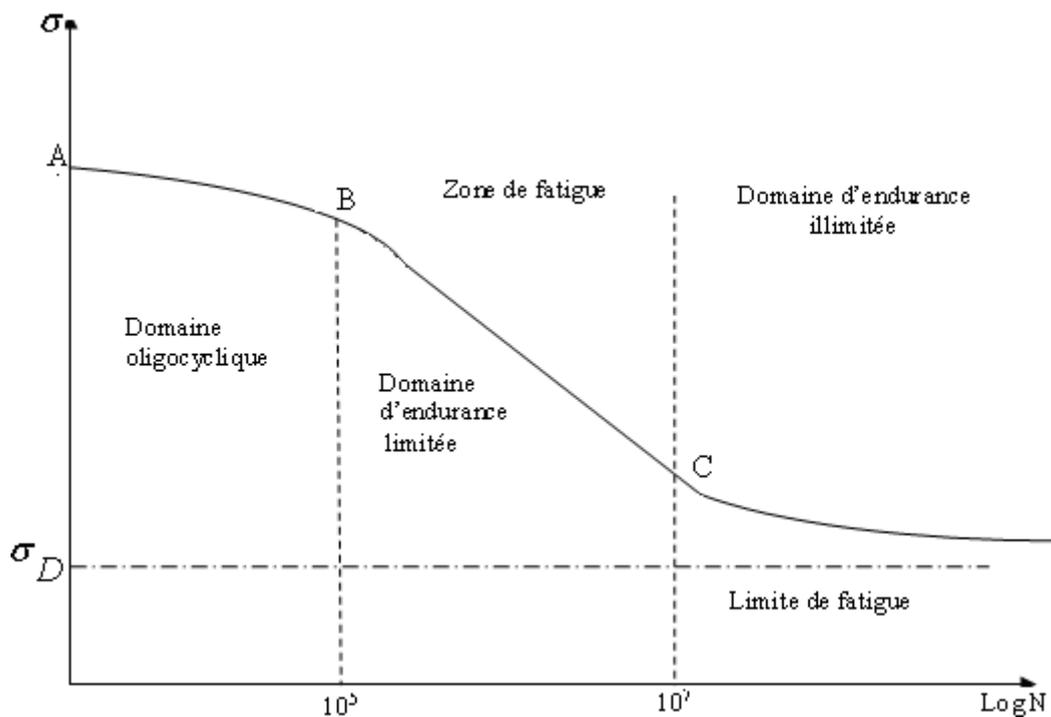


Figure I.3. Courbe de Wöhler

La courbe de Wöhler présente en général une asymptote horizontale correspondant à une contrainte dont la valeur est, par définition, la limite de fatigue (figure.I.3) c'est le cas des aciers. En revanche, pour certains alliages d'aluminium, de cuivre, ou de titane et des aciers inoxydables austénitiques, la courbe de Wöhler ne prend pas cette allure horizontale pour les grands nombres de cycles. Par ailleurs dans

le cas de fatigue d'aciers en présence de corrosion la limite de fatigue n'existe plus et il y a toujours rupture.

La dispersion des résultats des essais de fatigue est un fait d'expérience. Elle provient de nombreuses causes liées à l'hétérogénéité des matériaux, aux tolérances d'usinage, aux défauts superficiels, à la présence de contraintes résiduelles, aux tolérances de montage sur la machine, aux variations de température et de milieu au cours de l'essai, On peut la réduire en précisant tous les paramètres et en les maintenant dans des limites étroites, mais on ne peut pas l'éliminer par suite du caractère aléatoire des ruptures par fatigue. C'est pourquoi, sur la courbe de Wöhler, la durée de vie pour une contrainte donnée ne peut pas être représentée par un point mais par une distribution du nombre de cycles N . La représentation mathématique de la courbe de fait appel à des méthodes statistiques

Une courbe de Wöhler comprend trois domaines:

. Le domaine de la fatigue oligocyclique ou sous de fortes contrainte, la rupture survient après un nombre réduit de cycles; par ailleurs ces forts niveaux de contrainte sont généralement associés à une déformation plastique notable d'où le nom de fatigue plastique.

. Le domaine d'endurance limitée ou le nombre de cycles à rupture décroît rapidement lorsque l'on abaisse l'amplitude de contrainte σ_a .

. Le domaine d'endurance illimitée observée sous faibles contraintes et où la rupture ne se produit pas avant un nombre donné de cycles supérieur à la durée de vie envisagée de la pièce à concevoir.

Dans certains cas il est possible de tracer une asymptote horizontale définissant une valeur limite de la contrainte en dessous de laquelle la probabilité de rupture est quasi-nulle. Cette valeur est appelée limite de fatigue.

b) Modélisation

A la suite des travaux de Wöhler, plusieurs auteurs ont proposé une modélisation mathématique de courbe S-N. Le tableau 1 rappelle les plus utilisés et basés sur des expressions reliant la contrainte appliquée au nombre de cycles à rupture et à la limite d'endurance.

avec

σ : amplitude de la contrainte appliquée

N : nombre de cycles à rupture

σ_D : limite d'endurance

A ,B,C,a,b et E sont des constantes estimées d'après les résultats d'essais

Tableau 1 – comparaison de quelques modèles mathématiques

FORMULE	AUTEUR	AVANTAGES	INCONVEIENTS
$\text{Log}(N) = a - b\sigma$	WÖHLER 1850	<ul style="list-style-type: none"> - Simple - Souvent très bonne dans la partie moyenne de la courbe 	<ul style="list-style-type: none"> - Mauvaise modélisation de l'inflexion de la branche quasi-horizontale ou asymptotique de la courbe de Wöhler
$\text{Log}(N) = a - b \text{Log}(\sigma)$	BASQUIN 1910	<ul style="list-style-type: none"> - Représentation passable de la partie moyenne. - Utilisé par beaucoup d'auteurs 	<ul style="list-style-type: none"> - Sa validité se dilue dans la zone d'endurance (limite de fatigue) - Ne représente pas la partie horizontale plus que la droite de Wöhler - convient moins bien que la formule de Wöhler dans la zone intermédiaire
$\text{Log}(N) = [a - b \text{Log}(\sigma - \sigma_D)]$ Ou $\sigma = \sigma_D + (A/N)^C$ avec $A = e^a$ et $C = 1/b$	STROMEYER 1914	<ul style="list-style-type: none"> - Plus réaliste que les deux premières sur l'ensemble de la courbe. - Il faut des données assez nombreuses et un examen attentif pour déceler ses insuffisances. 	<ul style="list-style-type: none"> - On est gêné par l'estimation de E ou σ_D - Ajustement difficile - Présente mal la zone de contraintes élevée

$N = \frac{A}{\sigma - \sigma_D} e^{-C(\sigma - \sigma_D)}$	<p style="text-align: center;">CORSON 1955</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Prend en compte la partie horizontale, quand S tend vers σ_D ou σ - Etabli sur des bases expérimentales 	<ul style="list-style-type: none"> - Ajustement à des données d'essais difficile
$N = \frac{A}{\sigma - \sigma_D} e^{-\left(\frac{\sigma - \sigma_D}{B}\right)^C}$	<p style="text-align: center;">BASTENAIRE 1974</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Rend en compte la courbe toute entière - Le paramètre de forme C améliore la qualité de l'ajustement des données - On retrouve comme cas particulier, le modèle de Stromeyer pour C=1 	<ul style="list-style-type: none"> - 3 paramètres A,B,C et plus de la limite d'endurance - Illusoire de prétendre préciser tous les paramètres si on a trop peu de données

I-10. Types de fatigue

I-10.1 Fatigue plastique oligocyclique

Ce domaine correspond à des niveaux de contraintes maximales compris entre R_e et R_m . Chaque cycle conduit alors à une déformation plastique macroscopique $\Delta\varepsilon_p$.

Lorsque l'on s'intéresse plus particulièrement à ce domaine on conduit les essais à $\Delta\varepsilon_t$

R_e : résistances élastique

R_m : résistances de matériaux

Ou $\Delta\varepsilon_p$ imposée. Les résultats sont présentés sous la forme d'un diagramme **log- log** (figure I-4).

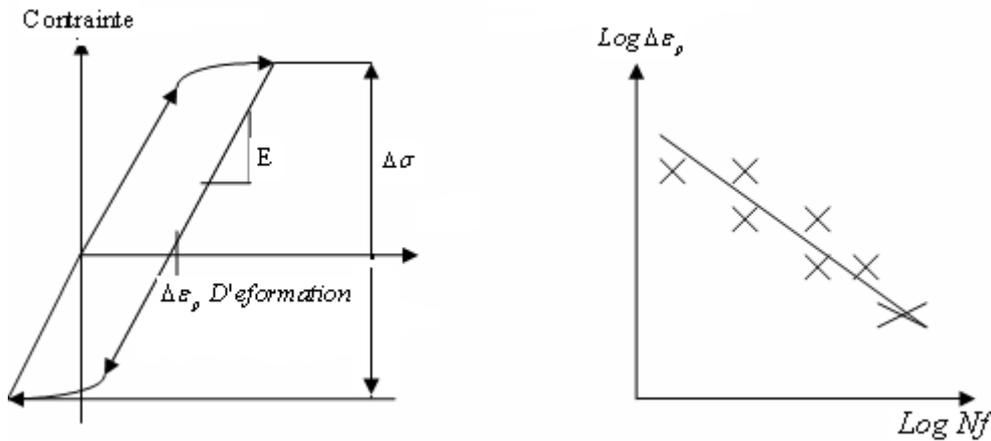


Figure I-4. Fatigue plastique

I-10.2 Domaine d'endurance limitée

Dans ce domaine la durée de vie varie

fortement en fonction du niveau de contrainte appliqué. Il s'étend jusqu'à 10^5 à 10^7 cycles environ sans apparition de déformation plastique macroscopique appréciable.

I-10.3 Domaine d'endurance illimitée

Lorsque la contrainte devient inférieure à une valeur limite appelée limite de fatigue on considère que la durée de vie devient infinie. En pratique elle est largement supérieure à la durée de l'essai et la durée projetée d'utilisation de structure considérée.

Cependant si cette valeur limite est bien définie dans le cas des aciers, il n'en va pas de même dans le cas des alliages d'aluminium par exemple. C'est aussi le cas en fatigue-corrosion. Dans ce cas, on définit une limite de fatigue conventionnelle comme le niveau de contrainte ne conduisant pas à la rupture avant un nombre donné de cycles.

I-11. Equation de la courbe Wöhler et loi de Basquin

Diverses expressions analytiques ont été proposées pour représenter les courbes de Wöhler dans le domaine d'endurance limité ou dans le domaine d'endurance lorsqu'elles sont connues pour un matériaux ou une pièce. Ces équations permettent de déterminer le nombre de cycles à rupture en fonction de la contrainte.

Parmi toutes les formules qui relient la contrainte alternée appliquée σ_a au nombre de cycles à rupture N et à la limite d'endurance σ_D , nous retiendrons ce

Chapitre I : Les critères de fatigue multiaxiaux

Depuis près de deux ans, une aide précieuse m'a été offerte par deux informaticiens Mr POL FLEVICHMEM polonais et Mr JEAN FARITT qui ont voulu m'aider à mettre un ce travail dans les conditions les plus favorables pour le développement d'un outil – informatique qui regroupe tous les critères de prévision de durée de vie à contraintes quelconques d'une fissure Macroscopique. Dans un tel contexte, l'utilisation des critères De fatigue multiaxiaux représente une étape incontournable. Le chargement le plus complexe auquel la matière peut être soumise correspond à un chargement multiaxial d'amplitude variable que l'on qualifie communément de multiaxial aléatoire, sans pour autant lui associer forcément un caractère statistique. En fatigue à grand nombre de cycles, les critères multiaxiaux sont les outils permettant de rendre compte du caractère multiaxial des sollicitations. L'objectif de ce chapitre est donc de référencer le plus grand nombre de critères de fatigue multiaxiaux afin dans un premier temps d'en créer une banque de données.

1.1 Formalisme général d'un critère de fatigue

Au même titre qu'un critère de résistance (tel que celui de Rankine, de Tresca ou de Von Mises) permet de statuer sur le dépassement de la limite d'élasticité d'un matériau soumis à un état de contrainte multiaxial, un critère de fatigue multiaxial permet de savoir si la limite d'endurance ou plus généralement la limite de fatigue à N cycles du matériau est atteinte pour une succession d'états de contraintes définissant un cycle multiaxial. Un critère de fatigue est cependant plus complexe qu'un critère de résistance du fait du caractère variable des contraintes au cours du cycle, particularité à l'origine du phénomène de fatigue.

Un critère de fatigue met en relation des grandeurs issues du cycle multiaxial de Contraintes $[\sigma(t)]$ définies sur la période T (amplitudes, valeurs moyennes, valeurs maximales,...) et des limites d'endurance (ou des limites de fatigue à N cycles) suivant plusieurs modes de sollicitations simples (traction alternée symétrique σ_{-1} , flexion alternée symétrique f_{-1} , traction répétée σ_0 , flexion répétée f_0 , torsion alternée symétrique τ_{-1} , ...). Un critère de fatigue peut donc être représenté à l'aide d'une

fonction de fatigue dans laquelle interviennent le cycle multiaxial de contraintes et plusieurs limites d'endurance ou limites de fatigue du matériau. Cette fonction de fatigue est prise égale à l'unité lorsque la limite d'endurance ou la limite de fatigue du matériau est atteinte ;

$$E([\sigma_{ij}(t)]_T, f_{-1}, \sigma_0, \sigma_{-1}, f_0, \tau \dots) = 1$$

..

Un critère de fatigue, par l'intermédiaire de la valeur de sa fonction de fatigue, situe ainsi tout cycle multiaxial de contraintes $T_{ij}[\sigma(t)]$ par rapport à la limite d'endurance ou à la limite de fatigue du matériau. Il traduit donc par la valeur de la fonction E le caractère plus ou moins endommageant du cycle de contraintes appliqué. Pour un cycle multiaxial donné, si celle-ci est inférieure à l'unité ($E < 1$), le critère prévoit l'amorçage d'une fissure au delà du nombre N de cycles définissant l'endurance ou la limite de fatigue du matériau. Si la fonction de fatigue est supérieure à l'unité ($E > 1$), le critère prévoit au contraire l'apparition d'une fissure avant l'application des N cycles correspondant au seuil d'endurance ou à la limite de fatigue. La fonction de fatigue est égale à l'unité, la durée de vie du matériau soumis au cycle multiaxial considéré coïncide avec la durée de vie (N cycles) du matériau correspondant aux limites.

1.2 Formules et classification des critères de fatigue multiaxiaux

Une étude bibliographique a permis de recenser 37 critères de fatigue qui constituent la base de données. L'ensemble des critères sont répartis en trois approches distinctes qui se différencient par leur concept.

A) La première approche, dite empirique, regroupe les critères dont le formalisme est issu de résultats expérimentaux obtenus pour un type de sollicitations multiaxiales et un matériau donné.

B) La deuxième approche porte le nom d'approche globale. Elle réunit entre autres les critères où interviennent des invariants du tenseur des contraintes ou de son déviateur. Ces quantités représentant l'ensemble des contraintes sous un scalaire confèrent aux critères qui les mettent en oeuvre un caractère global. Certains critères définissent des grandeurs liées à l'ensemble des plans physiques possibles passant par le point où l'étude en fatigue est conduite pour ensuite en faire une moyenne, quadratique en général. Cette dernière assure aussi aux critères basés sur ce principe un aspect global. Une dernière sous-catégorie peut être citée. Il s'agit des formalismes basés sur des énergies.

C) La troisième approche, de type plan critique, rassemble les critères dont le formalisme est basé sur la recherche d'un plan physique critique. L'endommagement du matériau par fatigue, au point où sont connues les contraintes, est lié à leur action sur le plan en question. Parmi ces trois approches, des sous-groupes différencient les

formalismes de critères. On distingue les critères macroscopiques faisant intervenir des contraintes évaluées à l'échelle macroscopique.

Chapitre I : Les critères de fatigue multiaxiaux

Depuis près de six ans, un partenariat étroit entre le LEDEPP (Laboratoire d'Etudes et de Développement des Produits Plats) de SOLLAC et l'INSA a pour objectif le développement d'une méthode de prévision de durée de vie à l'amorçage d'une fissure macroscopique, sous chargement quelconque. Dans un tel contexte, l'utilisation des critères de fatigue multiaxiaux représente une étape incontournable. Le chargement le plus complexe auquel la matière peut être soumise correspond à un chargement multiaxial d'amplitude variable que l'on qualifie communément de multiaxial aléatoire, sans pour autant lui associer forcément un caractère statistique. En fatigue à grand nombre de cycles, les critères multiaxiaux sont les outils permettant de rendre compte du caractère multiaxial des sollicitations. L'objectif de ce chapitre est donc de référencer le plus grand nombre de critères de fatigue multiaxiaux afin dans un premier temps d'en créer une banque de données, et dans un second temps de les valider à l'aide d'une autre banque de données, d'essais multiaxiaux cette fois-ci.

1.1 Formalisme général d'un critère de fatigue

Au même titre qu'un critère de résistance (tel que celui de Rankine, de Tresca ou de Von Mises) permet de statuer sur le dépassement de la limite d'élasticité d'un matériau soumis à un état de contrainte multiaxial, un critère de fatigue multiaxial permet de savoir si la limite d'endurance ou plus généralement la limite de fatigue à N cycles du matériau est atteinte pour une succession d'états de contraintes définissant un cycle multiaxial. Un critère de fatigue est cependant plus complexe qu'un critère de résistance du fait du caractère variable des contraintes au cours du cycle, particularité à l'origine du phénomène de fatigue.

Un critère de fatigue met en relation des grandeurs issues du cycle multiaxial de contrainte $[\sigma_{ij}(t)]_T$ définies sur la période T (amplitudes, valeurs moyennes, valeurs maximales, parties alternées) et des limites d'endurance (ou des limites de fatigue à N cycles) suivant plusieurs modes de sollicitations simples (traction alternée symétrique $\sigma - 1'$, flexion alternée symétrique $f-1$, traction répétée σ_0 , flexion répétée f_0 , torsion alternée)

symétrique $\tau - 1$, ...). Un critère de fatigue peut donc être représenté à l'aide d'une fonction de fatigue dans laquelle interviennent le cycle multiaxial de contraintes et plusieurs limites d'endurance ou limites de fatigue du matériau. Cette fonction de fatigue est prise égale à l'unité lorsque la limite d'endurance ou la limite de fatigue du matériau est atteinte :

$$E([\sigma_{ij}(t)]_{\tau, \sigma-1, f-1, \sigma_0, f_0, \tau-1, \dots}) = 1 \quad (1.1)$$

Un critère de fatigue, par l'intermédiaire de la valeur de sa fonction de fatigue, situe

ainsi tout cycle multiaxial de contraintes $[\sigma_{ij}(t)]_{\tau}$ par rapport à la limite d'endurance ou à la limite de fatigue du matériau. Il traduit donc par la valeur de la fonction E le caractère plus ou moins endommageant du cycle de contraintes appliqué. Pour un cycle multiaxial donné, si celle-ci est inférieure à l'unité ($E < 1$), le critère prévoit l'amorçage d'une fissure au delà du nombre N de cycles définissant l'endurance ou la limite de fatigue du matériau. Si la fonction de fatigue est supérieure à l'unité ($E > 1$), le critère prévoit au contraire l'apparition d'une fissure avant l'application des N cycles correspondant au seuil d'endurance ou à la limite de fatigue. Enfin, et par définition, lorsque la fonction de fatigue est égale à l'unité, la durée de vie du matériau soumis au cycle multiaxial considéré coïncide avec la durée de vie (N cycles) du matériau correspondant aux limites d'endurance ou aux limites de fatigue utilisées pour le calcul de E.

I.2 Formalisme et classification des critères de fatigue multiaxiaux

Une étude bibliographique a permis de recenser 37 critères de fatigue qui constituent la base de données. L'ensemble des critères sont répartis en trois approches distinctes qui se différencient par leur concept.

La première approche, dite empirique, regroupe les critères dont le formalisme est issu de résultats expérimentaux obtenus pour un type de sollicitations multiaxiales et un matériau donnés.

La deuxième approche porte le nom d'approche globale. Elle réunit entre autres les critères où interviennent des invariants du tenseur des contraintes ou de son déviateur. Ces quantités représentant l'ensemble des contraintes sous un scalaire confèrent aux critères qui les mettent en œuvre un caractère global. Certains critères définissent des grandeurs liées à l'ensemble des plans physiques possibles passant par le point où l'étude en fatigue est conduite pour ensuite en faire une moyenne, quadratique en général. Cette dernière assure aussi aux critères basés sur ce principe un aspect global. Une dernière sous-catégorie peut être citée. Il s'agit des formalismes basés sur des énergies.

La troisième approche, de type plan critique, rassemble les critères dont le formalisme est basé sur la recherche d'un plan physique critique. L'endommagement du matériau par fatigue, au point où sont connues les contraintes, est lié à leur action sur le plan en question.

Parmi ces trois approches, des sous-groupes différencient les formalismes des critères. On distingue les critères macroscopiques faisant intervenir des contraintes évaluées à l'échelle macroscopique. Le choix des termes de contraintes intervenant dans la définition de tels critères est justifié par leur auteur. D'autres critères sont basés sur le comportement de la matière à l'échelle microscopique. Ils sont dits microscopiques bien que leur formalisme final utilise des grandeurs macroscopiques.

La figure I.1 récapitule l'ensemble des critères multiaxiaux de fatigue répertoriés dans la littérature ainsi que leur classification.

Empirique

Hohenemser & Prager
Gough & Pollard
Davies
Lee 1
Nishihara & Kawamoto
Lee 2

G

I
o
b

ale

Macroscopique	Sines	Deitmann &
	Crossland	Issler 3
	Marin	Deitmann &
	Hashin	Issler 1
	Kinasoshvili	Deitmann &
	Fogue	Issler 2
Microscopique	Kakuno - Kawada	Grubišić & Simbürger
	Papadopoulos 1	Altembach & Zolocheski 1
	Papadopoulos 2	Altembach & Zolocheski 2
Energétique	Froustey & Lasserre	Papadopoulos 2
		Palin Luc
Plan critique	Macroscopique	Stulen & Cummings
		Findley
		Yokobori
		McDiarmid 1
		McDiarmid 2
		Munday & Mitchell
Microscopique		Matake
		Flavenot & Skalli
		Robert
	Dang Van 1	Galtier & Séguret
	Dang Van 2	Deperrois
		Froustey dérivé Yokobori

Figure I.1. Ensemble des critères multiaxiaux de fatigue et leur classification.

I.2.1 Les critères d'approche empirique

Cette catégorie regroupe six critères. Ils sont issus de résultats expérimentaux obtenus généralement pour un type de sollicitations multiaxiales déterminé. Il s'agit habituellement de traction-torsion ou de flexion-torsion, le plus souvent en phase. On retrouve parmi ces critères les plus anciennes modélisations, celles de Hohenemser & Prager [1] et de Gough & Pollard [2,3] qui ont été élaborées en 1933 et 1935 respectivement. Les modèles les plus récents proposés par Lee datent de 1980 [4,5] et de 1989 [6,7].

I.2.1.1 Nomenclature

Pour définir leur fonction de fatigue, ces critères utilisent les amplitudes et les valeurs moyennes des composantes du tenseur des contraintes des sollicitations considérées séparément (traction, flexion, torsion), ainsi que des limites d'endurance pour différentes sollicitations simples telles que la traction, la flexion ou la torsion. Certaines formulations utilisent la résistance maximale à la traction ou au cisaillement.

σ_a : amplitude de la contrainte de traction

f_a : amplitude de la contrainte de flexion

τ_a : amplitude de la contrainte de cisaillement (torsion)

σ_m : contrainte moyenne de traction

f_m : contrainte moyenne de flexion

τ_m : contrainte moyenne de cisaillement (torsion)

σ_{-1} : limite d'endurance en traction alternée symétrique

f_{-1} : limite d'endurance en flexion alternée symétrique

τ_{-1} : limite d'endurance en torsion alternée symétrique

R_m : résistance maximale de traction

τ_u : résistance maximale au cisaillement

I.2.1.2 Le critère de Hohenemser & Prager [1]

Le critère de Hohenemser & Prager est le premier critère recensé. Etabli en 1933, il a été obtenu à partir d'essais de traction-torsion où le cisaillement est variable et la contrainte normale de traction σ_m statique.

$$E_{\mathbb{P}} = \left(\begin{array}{c|c} & \\ \hline a & \\ \hline \end{array} \right) \sigma^m \quad (1.2)$$

$$+ \left(\begin{array}{c} \\ \hline \tau-1 \\ \hline \end{array} \right) R_m$$

Chapitre II. Réalisation d'un outil-informatique

Les critères de fatigue multiaxiaux comptent parmi les outils incontournables des méthodes d'estimation de durée de vie en contraintes développées depuis maintenant plusieurs années par des chercheurs. Le plus grand nombre d'entre eux ont été présentés et validés à l'aide d'une banque de données d'essais. Multiaxiaux menés au seuil de l'endurance et relevés dans la littérature composent cette banque de données. Elle intègre une grande variété de chargements (bi axialité, déphasage, contraintes moyennes, ...). Les critères ont été validés :

conservatif ou non conservatif. Ainsi les critères de Munday & Mitchell, Yokobori, Altenbach &, Deitman 1 & Kinasoshvili sont très peu fiables. Ceux de Findley et Stulen & Cummings sont trop conservatifs tandis que ceux de McDiarmid 1 & Zolocheski 1, Crossland, Papadopoulos 1 ne le sont pas assez fortement. Nous voulions montrer que certains critères de type plan critique présentent une ambiguïté. Lorsque plusieurs plans sont définis comme critiques, la valeur de la fonction de fatigue n'est pas la même selon le choix du plan critique. Ces critères ne nous semblent donc pas très pertinents bien qu'ils donnent des résultats pouvant être considérés globalement comme corrects dans le cadre des essais des bancs de données.

Cette étude des critères de fatigue a pour objectif d'insertion dans la méthode classique d'estimation de durée de vie sous chargement quelconque un logiciel. Cette dernière est réalisée de façon à conserver au mieux le formalisme initial de chaque critère.. Un autre paramètre influant sur le comportement en fatigue est la présence d'un gradient de contrainte due à une entaille par exemple.ils avez montré, au travers de nombreux résultats expérimentaux, l'aspect bénéfique du gradient de contrainte sur la tenue en fatigue des matériaux. Sa prise en compte a été faite jusqu'alors par l'intermédiaire de coefficients relatifs à la concentration de contrainte et à la diminution des limites de fatigue exprimées en termes de contrainte nominale entre une éprouvette lisse et entaillée. La première prise en compte du gradient de contrainte au sein des critères de fatigue a été entrepris .

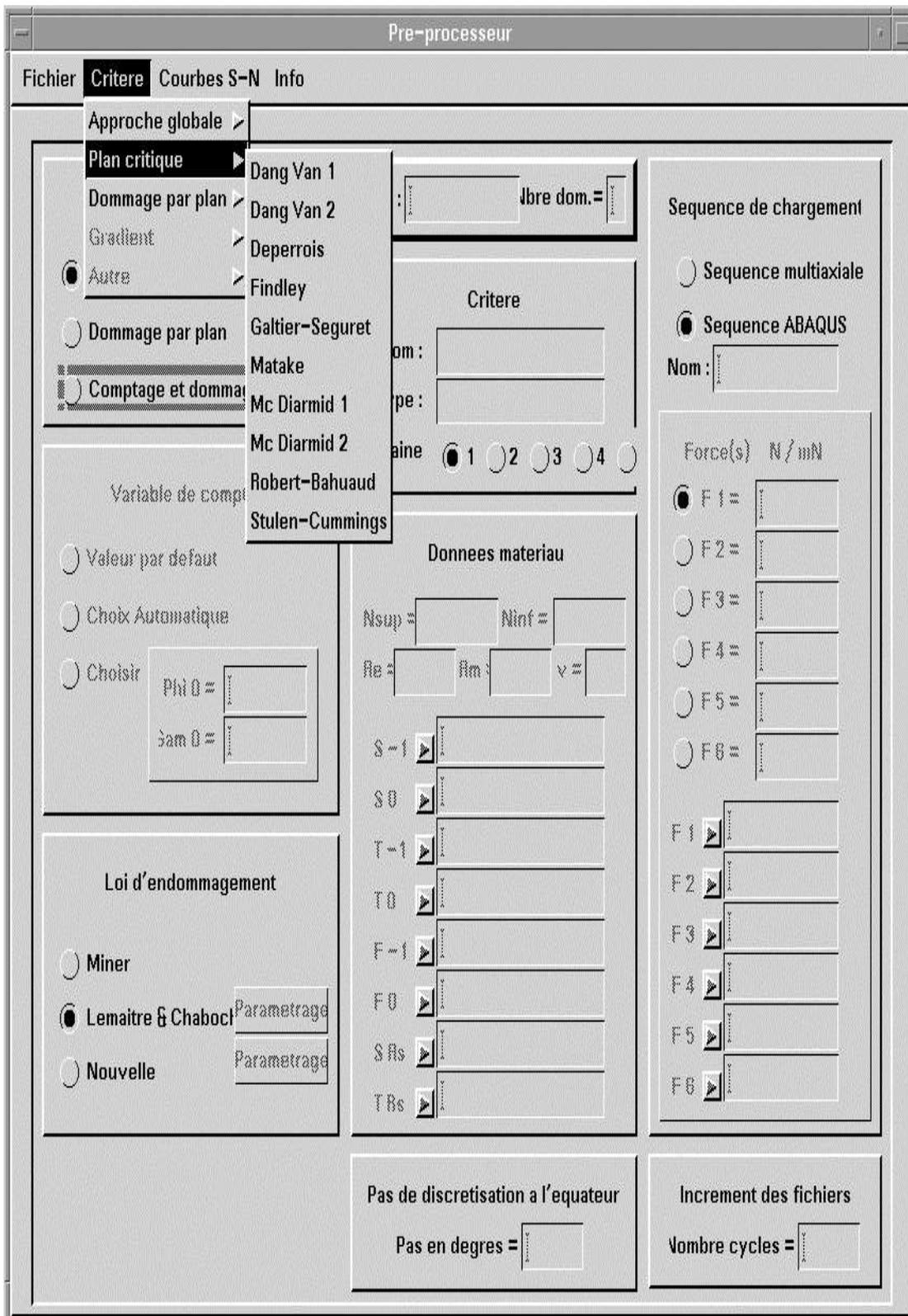
. En cours d'élaboration aujourd'hui, de logiciel fonctionne et permet de calculer la réponse en fatigue d'une structure soumise à n'importe quel type de chargement comme cela a été présenté sur deux applications industrielles. Le logiciel est composé des quatre modules suivants :

- Le module de mise en données permettant de construire les fichiers contenant les données d'entrée nécessaires aux calculs en fatigue pour faciliter la tâche du futur utilisateur dans les opérations de calculs.

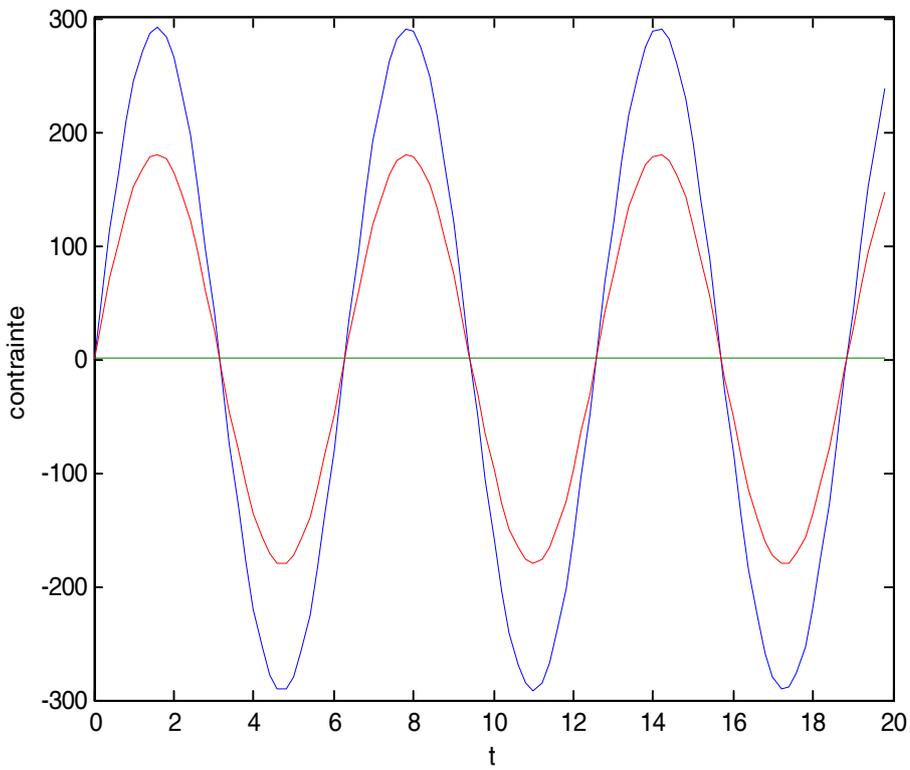
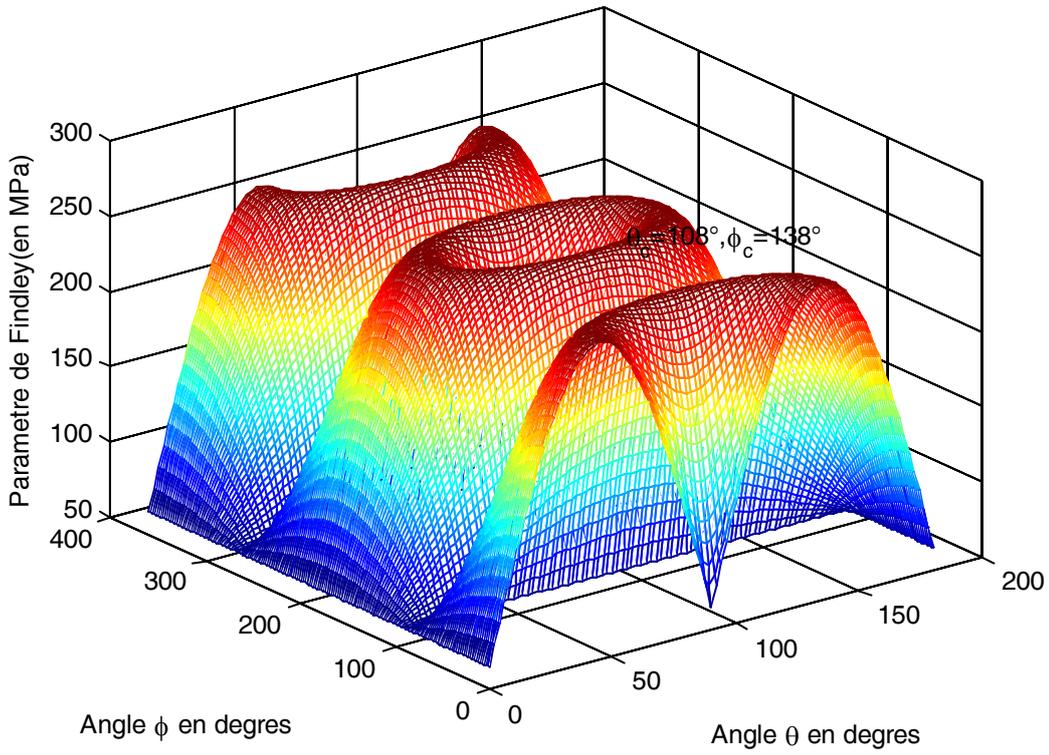
- Le module de décomposition du chargement pour le calcul des contraintes en service. La modélisation par éléments finis est réalisée grâce au code de calcul .

Les perspectives à court terme sont la finalisation du logiciel dans sa globalité afin qu'il constitue d'une part un outil industriel performant de calcul en fatigue et d'autre part un outil d'investigation tout aussi fiable. Au travers des validations réalisées sur des structures industrielles, nous voulons mettre en évidence le fait que les déformations permanentes dont l'origine provient surtout des opérations de mise en forme (emboutissage) améliorent de façon non négligeable les caractéristiques en fatigue du matériau. Nous espérons modéliser prochainement les variations des propriétés de fatigue à partir de celles obtenues sur le métal de base avant transformation, faudra alors réaliser l'estimation de durée de vie en considérant les paramètres.

III.1 Organigramme simple ;



Evolution du parametre de Findley en fonction des angles



Evolution du parametre de Dangvan en fonction des angles

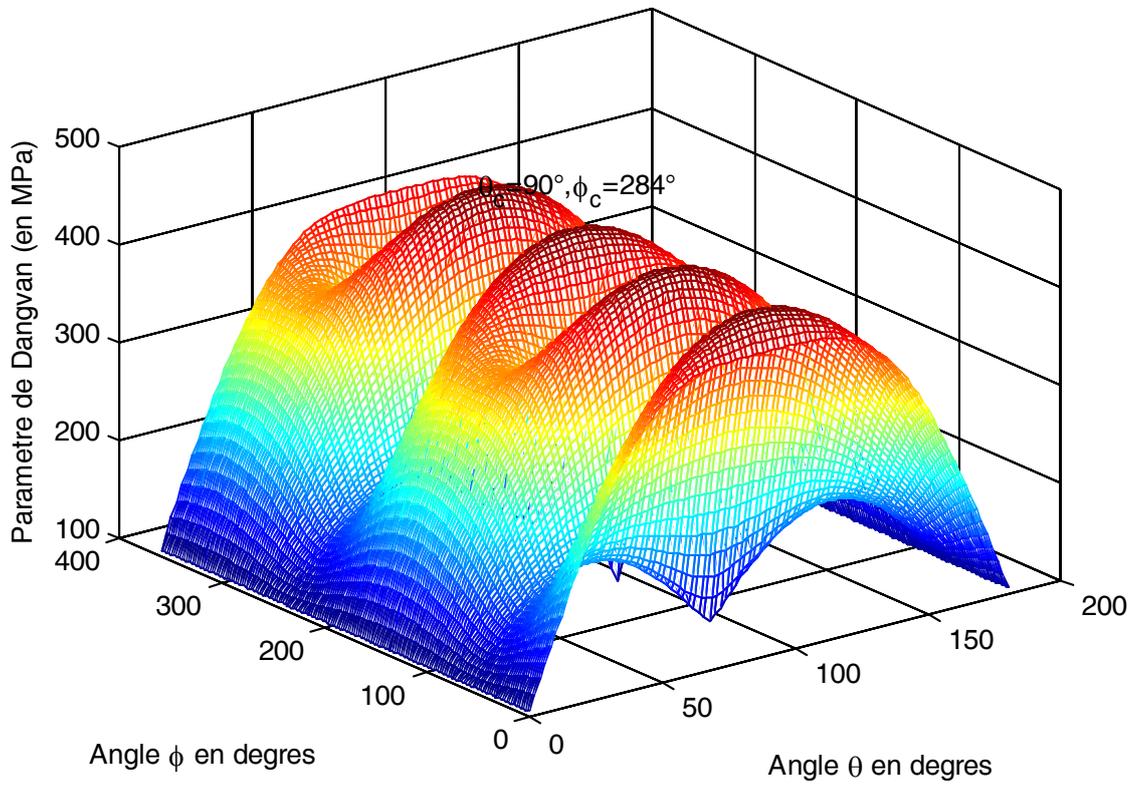
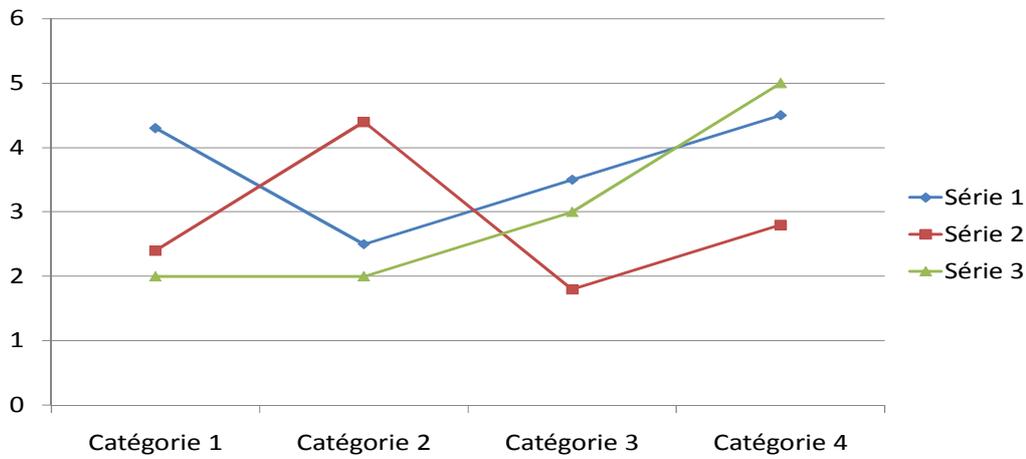
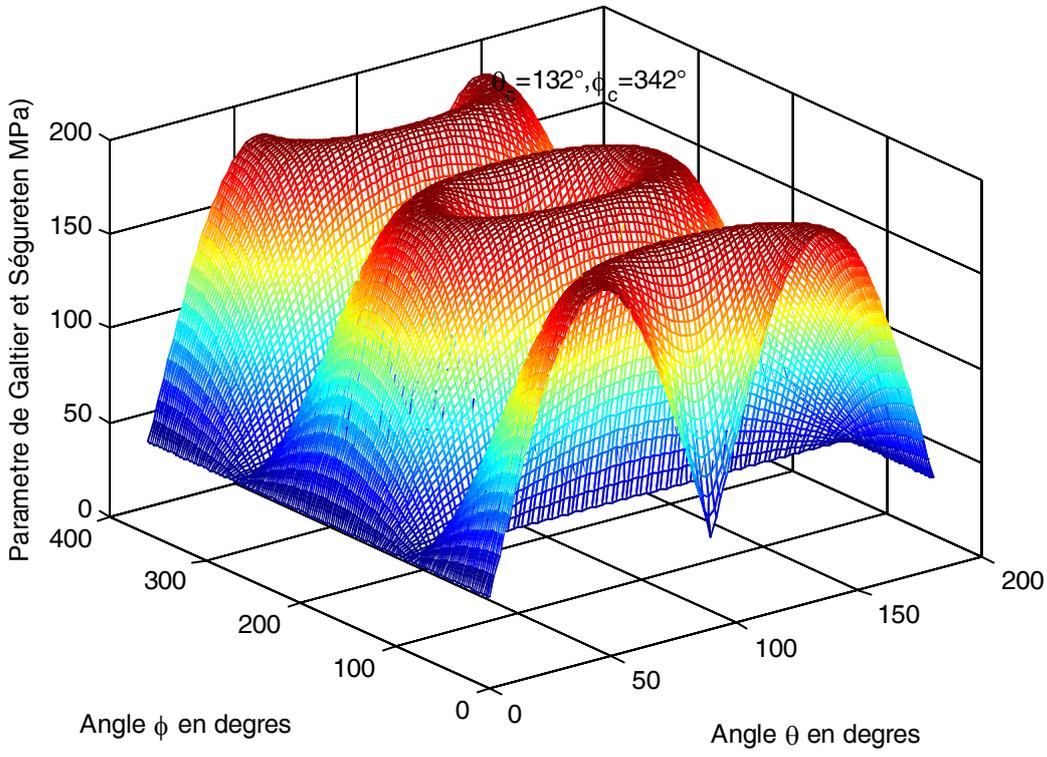


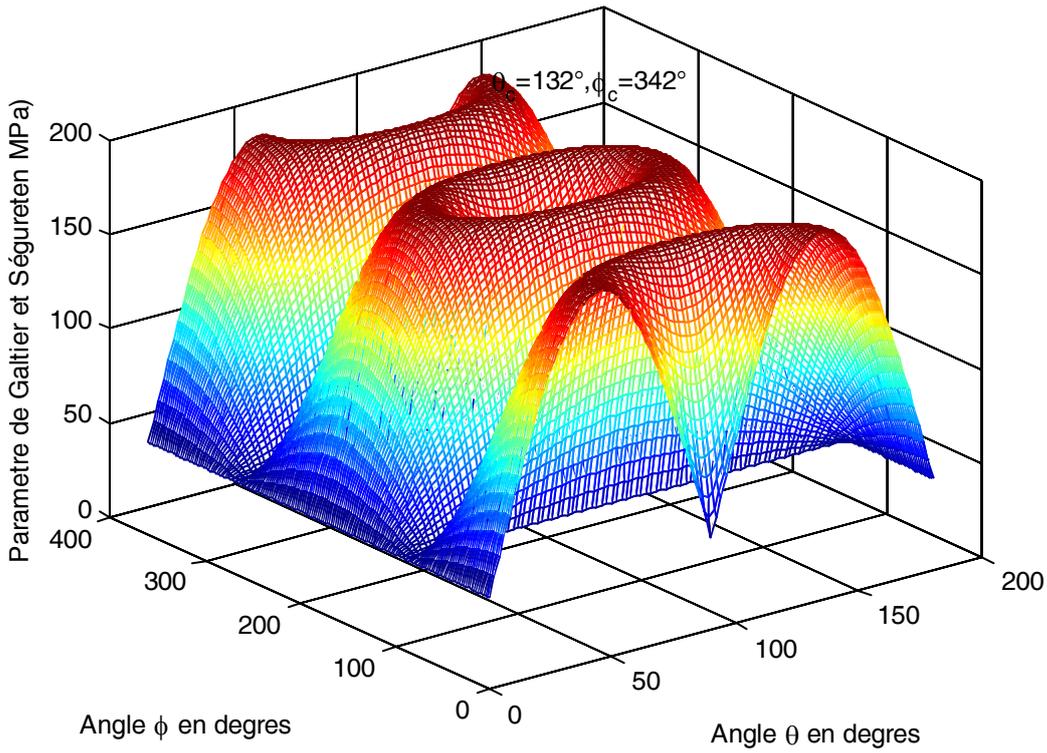
Tableau de résultats de la durée de vie:



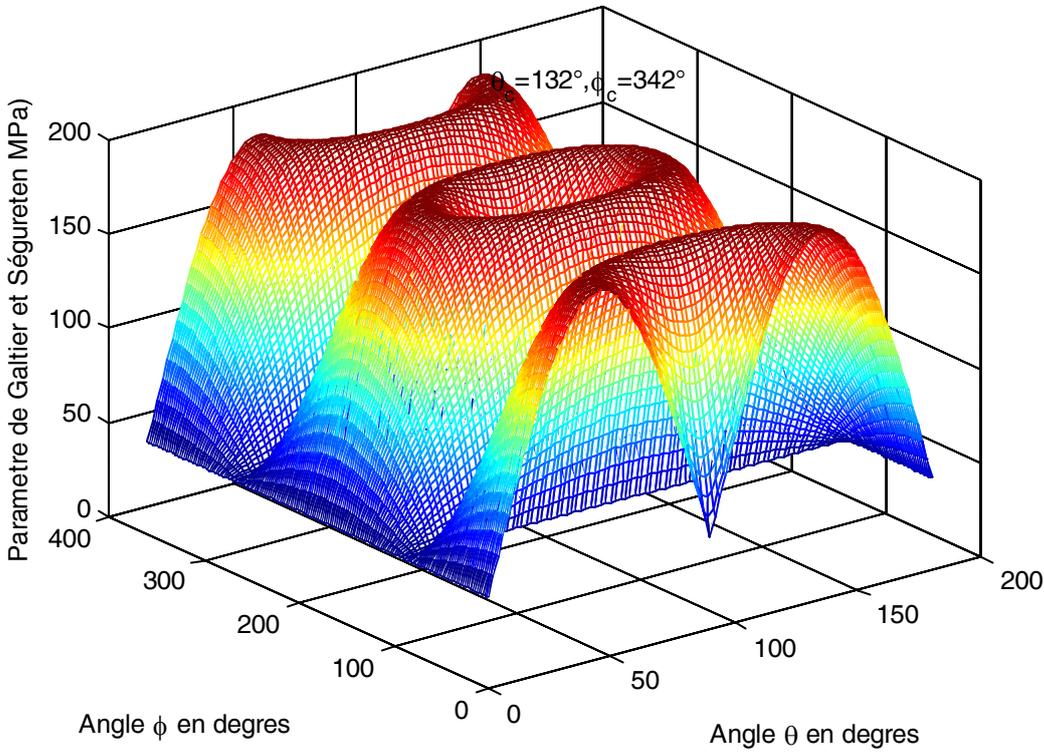
Evolution du parametre de Galtier et Séguret en fonction des angles



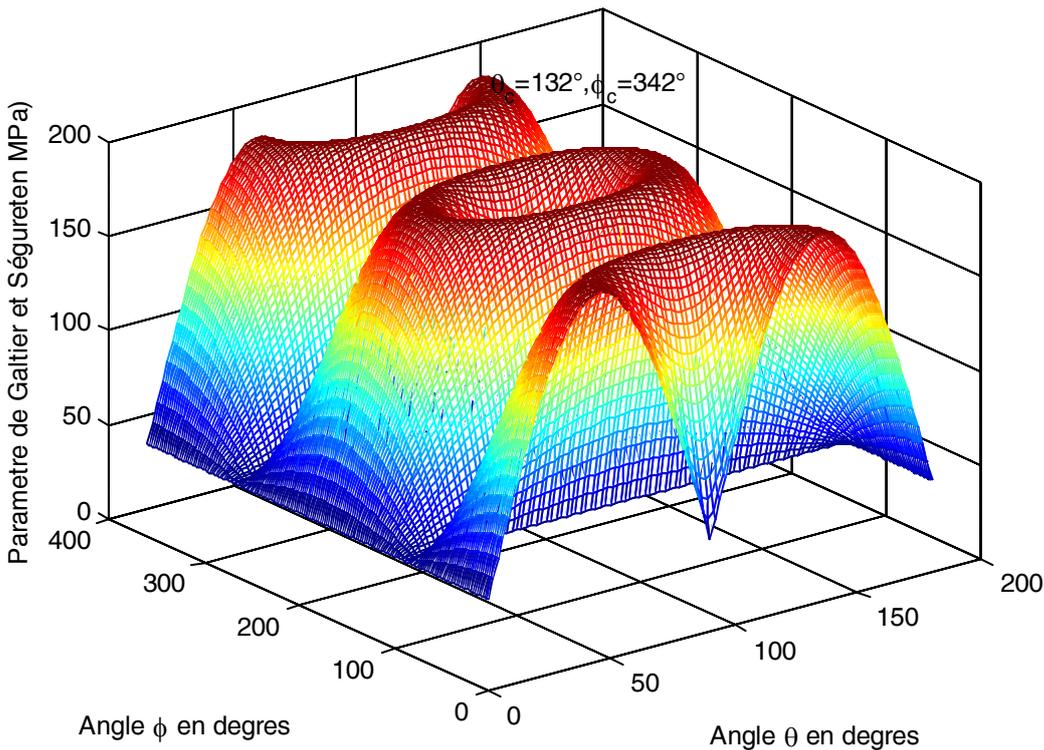
Evolution du parametre de Galtier et Séguret en fonction des angles



Evolution du parametre de Galtier et Séguret en fonction des angles



Evolution du parametre de Galtier et Séguret en fonction des angles



III.5 Validation des critères de fatigue PAG (Papadopoulos), RBG (Robert) et FGG (Fogue) prenant en compte l'effet du gradient de contrainte

Les trois propositions précédentes intégrant la prise en compte du gradient de contrainte sont validées dans ce qui suit à l'aide des résultats de Froustey séries d'essais qui figurent en annexe A. L'ensemble des résultats expérimentaux retenus correspond à des sollicitations de flexion-torsion sur éprouvettes toroïdales à géométrie connue (rayon R_0) et qui peuvent être considérées comme lisses, car présentant des coefficients de concentration de contrainte proches de l'unité. La présence ou non de contraintes moyennes de flexion et de torsion, composantes en phase ou déphasées. L'emploi du premier calage (avec les limites de fatigue σ_{-1} , σ_0 , τ_{-1} et f_{-1}) est retenu pour valider les critères intégrant le gradient. Aussi certaines données ont elles été estimées

afin de pouvoir mettre en oeuvre les critères. Pour les séries d'essais considérées, seules les limites de fatigue au seuil de l'endurance en flexion alternée symétrique f_{-1} , en flexion répétée f_0 et en torsion alternée symétrique τ_{-1} sont fournies, bien que les deux premières soient présentées d'ailleurs comme celles obtenues pour une sollicitation de traction-compression (σ_{-1} et σ_0). En effet, lors d'un critère de fatigue, quel qu'il soit, il n'est pas gênant dans le principe de confondre les limites de fatigue obtenues en traction avec celles de flexion, à plus forte raison quand il s'agit d'employer ensuite le critère pour juger du comportement du matériau en flexion-torsion. Il n'en demeure pas moins que pour confronter les critères avec intégration du gradient de contrainte aux résultats expérimentaux, il est fondamental de dissocier les limites de fatigue en traction-compression σ_{-1} et σ_0 de celles de flexion f_{-1} et f_0 . Comme seules sont connues les limites de fatigue f_{-1} , f_0 et τ_{-1} .

..

Conclusions

Conclusions

Les études effectuées dans ce mémoire ont un objectif commun : ils visent Les critères de fatigue multiaxiaux comptent parmi les outils incontournables des méthodes d'estimation de durée de vie. Le plus grand nombre d'entre eux ont été présentés et validés à l'aide d'une banque de données d'essais multiaxiaux menés au seuil de l'endurance et relevés dans la littérature composent cette banque de données. Elle intègre une grande variété de chargements (biaxialité, déphasage, contraintes moyennes, ...). Au total 06 critères ont été validés. Les graphiques donnant le nombre d'essais en fonction de l'écart de validité permettent de juger de leur justesse et de dégager éventuellement leur caractère conservatif ou non conservatif. Ainsi les critères de Munday, Yokobori, Altenbach 2, Deitman & et Kinasoshvili sont très peu fiables. Ceux de Findley et Stulen & Cummings sont trop conservatifs tandis que ceux de, 1, Crossland, Papadopoulos 1 ne le sont pas assez fortement. Nous avons démontré que certains critères de type plan critique présentent une légère insuffisance. Lorsque plusieurs plans sont définis comme critiques, la valeur de la fonction de fatigue n'est pas la même selon le choix du plan critique. t les résultats pouvant être considérés globalement comme corrects.

Cette la méthode classique des critères de fatigue a pour donnerleur insertion dans d'estimation de durée de vie sous chargement quelconque. Cette intégration est réalisée de façon à conserver au mieux le formalisme initial de chaque critère.

c mêmes critères calés simplement sur la limite de fatigue de flexion au lieu de celle de traction. La prise en compte du gradient proposée peut être étendue suivant le même principe à d'autres critères. L'utilisation des critères intégrant le gradient pour des structures à géométrie complexe nécessite la mise en œuvre d'une méthode numérique permettant, à partir de résultats de calculs par éléments finis, de déterminer la valeur du gradient quelque soit le type de chargement. Cette étape indispensable a fait l'objet d'une proposition.

La finalité de ces études est l'implémentation des critères de fatigue dans la méthode d'estimation de durée de vie proposée. Celle-ci a évolué dans un premier temps vers un nouveau concept : le dommage par plan. Il s'agit d'une vision différente de l'endommagement qui ne se manifeste plus de façon globale en un point mais qui est perçu par la matière plan physique par plan physique. La validation a montré une amélioration générale des résultats. Dans un second temps, l'étude de l'influence de la variable de comptage, qui constituait un point discutable de l'approche du LMSo du fait du choix arbitraire de cette variable, a abouti à une troisième méthode basée sur le principe du comptage et dommage par plan. S'il est pertinent d'affecter au

plan un dommage évalué à l'aide des contraintes agissant sur ce plan, le comptage des cycles est tout autant à relier au plan utilisé car ce comptage est réalisé à partir de la contrainte normale. La notion de cycle est donc intimement liée au plan employé pour l'identifier. Ainsi la nouvelle démarche passe en revue un grand nombre de plans physiques sur lesquels sont réalisés pour chacun d'entre eux le comptage, l'évaluation du dommage puis son cumul. Le plan le plus endommagé constitue le plan critique et renseigne à la fois sur la durée de vie du matériau et sur l'orientation du plan d'amorçage de la fissure macroscopique. Cette dernière approche confère un sens plus physique à la méthode générale d'estimation de durée de vie.

Toutes les méthodes (classique, dommage par plan, comptage et dommage par plan) ont été validées avec les séquences fournies par l'Université Technique d'Opole (Pologne). Les résultats montrent une amélioration des prévisions avec, pour la dernière méthode, une indépendance des estimations vis à vis d'un choix arbitraire de plan de comptage.

L'aboutissement de ces travaux est la création du logiciel à caractère industriel cours d'élaboration aujourd'hui, le logiciel fonctionne et permet de calculer la réponse en fatigue d'une structure soumise à quelque type de chargement comme cela a été présenté sur deux applications. Le logiciel est composé de :

- la mise en données permettant de construire les fichiers contenant les données d'entrée nécessaires aux calculs en fatigue..
- De décomposition du chargement pour le calcul des contraintes en service. La modélisation par éléments finis est réalisée grâce au code de calcul.

Nous possédons aujourd'hui un outil de calcul en fatigue capable de traiter un nombre réduit de problèmes de fatigue,.

Les perspectives à court terme sont la finalisation du logiciel dans sa globalité afin qu'il constitue d'une part un outil industriel performant de calcul en fatigue et d'autre part un outil d'investigation tout aussi fiable. Au travers des validations réalisées sur deux structures industrielles, nous avons voulu en évidence le fait malheureusement le temps et surtout l'outil-informatique qui est l'obstacle pour la réalisation de travail non fini.

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIE

[1]- J. Lemaitre et J. L. Chabouche, *Mécanique des matériaux solides*, paris , 1996 ,2^{ème} édition.

[2]- Claude Bathias et Jean-Paul Baille, *La fatigue des matériaux et des structures Paris, 1997* 2^{ème} édition.

[3]- Myriam Kaminski, *Modélisation De L'endommagement En Fatigue Des Superalliages Monocristallins Pour Aubes De Turbines En Zone De Concentration De Contrainte*, Thèse Pour Obtenir Le Grade Supérieure Des Mines De Paris, Le 23 Novembre 2007

- [4]- Guy Fortuné Anago, Endommagement Par Fatigue De L'aluminium Cas Du 1200 et du 5005, Thèse pour l'obtention Du Grade De DoctL'université Nationale Du Benin
- [5]- Anduré Pineau et Anduré Zaoui, Comportement mécanique des matériaux, Hermès, Paris, 1993, 2^{ème} édition.
- [6]- Jean-Claude Charmet, Mécanique Du Solide Et Des Matéria Rupture, ESPCI - Laboratoire d'Hydrodynamique et Mécanique Physique
- [7]- Aid Abdelkrim, cumul d'endommagement en fatigue multiaxial dan chargement aliatoire, Thèse doctorat, Université Sidi Bel Abbès, 2006
- [8]- P.BONNET, Fatigue Des Métaux, Paris, Année 2004-2005
- [9]- Zengah Sahnoun, Performance Des Lois De Cumule D'endommagement En Fatigue Sous Chargement Aléatoire, Thèse De Magister, Centre Université Mustapha Stambouli Mascara. 2008
- [10] Baudry G., Tenue en service des composants mécaniques – quelle endurance pour quelle pièce et quelle procédé, compte rendu des 22e Journées de Printemps, Fatigue et procédés de fabrication, CETIM Senlis, 2003
- [11] Billaudeau, T., Fatigue multiaxiale des matériaux à défauts: mécanismes et critère d'endurance, these de doctorat, ENSMA, 2002
- [12] BUI, H.D., Etude de l'évolution de la frontière du domaine élastique avec l'écroutissement et relations de comportement élasto-plastique des métaux cubiques, Thèse de doctorat ès-sciences physiques, Université de Paris VI, N° A.O. 2883, 1969
- [13] Cano, F., Constantinescu, A., Maitournam, H., Critère de fatig polycyclique pour des matériaux anisotropes : application aux monocristaux, C. R. Mecanique 332, pp. 115-124, 2004
- [14] Flavenot, J.F., Skalli, N., L'épaisseur de la couche critique ou une nouvelle approche du calcul en fatigue des structures soumises à des sollicitations multiaxiales, Mécanique, Matériaux, Electricité, vol.397, pp. 15-25, 1983
- [15] Baïlon, J.P., Masounave, J., Lantaigne, J., Scripta Met., 12, 607-611978

- [16] Ballard, P., Dang Van, K., Deperrois, A., Papadopoulos, Y.V., High cycle
- [17] Banvillet A., Palin-Luc T., Lasserre S., A volumetric energy based high cycle
- [18] Baudry G., Tenue en service des composants mécaniques
- [19] Bernard, G., Hersant, T., Moliex, F. et Moussy, F., Mém. Sci. Rev. Mét. 76,
- [20] Beretta S., Blarasin A., Endo M., Giunti T., Murakami Y., defect tolerant design of automotive components, Int. J. Fatigue, 1997
- [21] Berg, M., Kreveld, M., Overmars, M., Schwarz-kopf, O., Computational Geometry : Algorithms and Applications, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York,1998
- [22] Beretta, S., Murakami, Y., SIF and threshold for small cracks at small notches under torsion, 2000
- [23] Bernasconi, A., Papadopoulos, I.V., Efficiency of algorithms for shear stress amplitude calculation in critical plane class fatigue criteria, 2005
- [24] Billaudeau, T., Fatigue multiaxiale des matériaux à défauts et critère 2002
- [25] BUI, H.D., Etude de l'évolution de la frontière du domaine élastique avec l'érouissage et relations de comportement élasto-plastique des métaux cubiques, 1969
- [26] Cano, F., Constantinescu, A., Maitournam, H., Critère de fatigue polycyclique 2000
- [27] Baïlon, J.P., Masounave, J., Lanteigne, J., Scripta Met., 12, 607-611, 1978
- [28] Ballard, P., Dang Van, K., Deperrois, A., Papadopoulos, Y.V., High cycle fatigue Page 58,59,60 1995

RESUME :

L'objectif de ce travail est la comparaison des modèles de calcul de durée de vie à des différents critères multiaxiaux travaillant en endurance limitée et qui sont soumises à des sollicitations multiaxiales d'amplitude variable. La particularité de ce calcul est la détermination la plus proche durée de vie utilisée dans l'industrie qui requiert certaines exigences : modèle prédictif sur structures avec comptage de nombre de cycles rapidité et moins coûteux.

Mots-clés : - Durée de vie finie - Chargement multiaxial d'amplitude variable -

Comporte-différents critères de fatigue- Facteur d'endommagement.

ABSTRACT :

The purpose of this work is to compare a reliable model for stress of the lifetime at crack nucleation of metallic structures, working in finite life regime of high-cycle fatigue and subjected to variable amplitude multiaxial loadings. This deterministic model is characterized by its possible use in the industry which demands certain requirements : predictive model on structures without counting of cycles, model of simple use (not too many parameters to be identified, not too many fatigue data to be used and less expensive calculation) and applicable on a broad variety .

Keywords : High-cycle fatigue - Finite lifetime - Variable amplitude multiaxial loading - Damage factor.