

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

École Nationale Polytechnique
Département de Métallurgie

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

*Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'état en
Génie métallurgique*



Thème :

ETUDE NUMERIQUE DE LA FATIGUE THERMIQUE D'UN MULTIMATERIAU

Présenté par :

M^{er} Adib Soufiane ADAMOU

Proposé par :

M^{er} N-MESRATI

E.N.P

Dirigé par :

M^{er} N-MESRATI

E.N.P

Juin 1998

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

École Nationale Polytechnique
Département de Métallurgie

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

*Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'état en
Génie métallurgique*



Thème :

ETUDE NUMERIQUE DE LA FATIGUE THERMIQUE D'UN MULTIMATERIAU

Présenté par :

M^{er} Adib Soufiane ADAMOU

Proposé par :

M^{er} N-MESRATI

E.N.P

Dirigé par :

M^{er} N-MESRATI

E.N.P

Juin 1998

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

*À ma mère, sans elle
rien ne serait pareil...*

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier sincèrement mon promoteur :

M^r. N- MESRATI pour m'avoir guidé et dirigé de près ce travail, ce qui lui a demandé beaucoup d'effort et de concentration

M^r.M-LARIBI est fortement remercié pour ses conseils indispensables.

Merci beaucoup à mon frère Adel pour ses diverses suggestions si précieuses concernant la conception du simulateur , mais aussi pour sa disponibilité et bonne humeur à chaque fois que cela était nécessaire.

Je remercie également mon frère Hicham qui a su éveiller mon intérêt par les aspects historiques de mon sujet de thèse.

Finalement, j'aimerais remercier ma mère pour m'avoir soutenu moralement. Je tiens aussi à la remercier pour son aide indispensable dans la phase finale de rédaction de ce manuscrit.

Résumé

De nombreuses pièces critiques de structures utilisées à haute température sont soumises à des variations de températures rapides en cours de fonctionnement. Le gradient thermique ainsi créé dans la pièce génère des contraintes internes. La répétition de ces cycles thermiques peut conduire à l'endommagement des pièces par un processus de fatigue oligocyclique anisotherme (amorçage et propagation de fissures). Bien souvent, les pièces sont soumises à une superposition de contraintes d'origine thermomécanique, et de l'influence de l'environnement. Dans notre étude, on s'est intéressé plus particulièrement à la fatigue thermique sans les interactions éventuelles.

Actuellement, il est bien admis que l'étude de l'endommagement cyclique à température constante ne permet pas toujours de rendre compte des mécanismes relatifs à la sollicitation anisotherme. C'est pour cette raison que les méthodes d'investigation en fatigue anisotherme se sont développées ces dernières années.

L'objectif de ce travail consiste à créer un simulateur qui est en mesure de prédire la durée de vie d'un multimatériau.

On présentera deux principales parties : transfert de chaleur et étude de l'interface, la première est simulée par la méthode des accroissements finis, la seconde par la méthode des déplacements discontinus.

La démarche proposée nous permettra d'une manière comparative de suivre et de déterminer les différentes influences des paramètres sur la durée de vie d'un multimatériau.

Abstract

Many critical components from high temperature machinery are subjected to rapid temperature changes during operation. The thermal gradient within these components produces internal stresses, and the repetition of these thermal cycles may cause a real component to fail by a low cycle fatigue process (crack initiation and propagation). Generally, these components are subjected to a superposition of thermo-mecanical stresses and environmental effects. In our work, we are interested by the study of the thermal fatigue without the possible interactions.

It is now recognised that under certain test conditions the isothermal approach can lead to optimistic predictions can not always assess the failure mechanisms of non-isothermal loading. This was the reason for the development of systematic investigations in non-isothermal fatigue in the last few years.

This study aims to create simulator which predict the life time of the multimaterial.

We will present two principals parts : heat transfer and interface state, the first is simulated by the finites differences method , the second by the displacement discontinuity method.

The suggest process will give , with comparative manner the different influences of the parameters of thermal cyclage on the life time of the multimaterial.

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

Préface

Préface

"Depuis bien longtemps l'on se récrie sur l'inutilité des préfaces - et pourtant l'on fait toujours des préfaces. Il est bien convenu que les lecteurs (pluriel ambitieux) les passent avec soin, ce qui paraîtrait une raison valable de n'en pas écrire; (...)"

Th. GAUTIER, "Fortunio", 1838, préface.

La "fatigue thermique", étudiée dans cette thèse, est un cas particulier du domaine plus général qui est la fatigue, dont les premières études remontent au début du siècle passé. Je trouve donc utile de récapituler l'origine des études sur la fatigue.

En 1837, l'écrivain français **Stendhal** décrivait dans son livre "Mémoires d'un Touriste" [1] la rupture de l'axe de sa voiture à cheval :

"La Charité, 13 avril.

Je traversais au grand trot la petite ville de la Charité, lorsque, pour me punir d'avoir pensé longuement ce matin aux maladies du fer, l'essieu de ma calèche casse net. C'est ma faute : je m'étais bien promis que si jamais j'avais une calèche à moi, je ferais forger sous mes yeux un bel essieu avec six barres de fer doux, de Fourvoirie. L'immense colère de Joseph fait que je me moque de lui intérieurement, et que je n'ai point de colère. (...) Comment transporter la voiture jusqu'à la forge la plus voisine? J'examine le grain de fer de mon essieu; il est devenu gros, apparemment qu'il sert depuis longtemps. (...)"

Les connaissances de l'époque n'étaient pas suffisantes pour permettre à **Stendhal** de trouver la cause de la rupture, mais il s'agissait très probablement d'une rupture par fatigue, due

aux caractéristiques de sollicitation d'un axe et aussi par la description faite par l'auteur. En effet, on voit dans la description des signes intéressants qui nous laissent conclure que la rupture a été provoquée par fatigue :

- **l'essieu casse net** : ceci indique une rupture brutale, avec la surface de rupture perpendiculaire à l'axe; c'est la caractéristique dangereuse de la fatigue : la pièce se casse sans avertissement et sans signe extérieur apparent.
- **il sert depuis longtemps** : une des caractéristiques principales de la rupture par fatigue, la nature progressive de l'endommagement. Cela a beaucoup intrigué les scientifiques du siècle passé : comment un chargement répété, où les contraintes maximales ne dépassaient jamais la limite élastique de l'acier, pouvait provoquer la rupture?
- **le grain est devenu gros** : ici Stendhal se réfère probablement à l'aspect brillant et facetté de la dernière partie de la section de l'axe à se casser; cela coïncide avec une théorie qui a persisté au moins jusqu'à la fin du siècle passé, selon laquelle la cause de la fatigue était la "cristallisation" de l'acier sous l'effet d'un chargement répété [2 - 5] .

À l'époque où Stendhal écrivait son roman, les recherches dans le domaine de la fatigue des métaux débutaient. La première publication scientifique sur le problème de la fatigue date de 1838 [6] effectuée par **W. A. J. Albert**, ingénieur allemand responsable de l'amélioration de la qualité des chaînes en fer soudé utilisées dans les mines de charbon à Clausthal (Harz). Il a fabriqué la première machine d'essai de fatigue connue, pour la réalisation d'essais sous chargement répétés de chaînes. Certains de ces essais ont duré plus que 100'000 cycles, à une fréquence de 10 cycles par minute. **Albert** a pu identifier que la cause des ruptures était la répétition du chargement, mais ne trouvant pas de solution permettant de résoudre ce problème, il a procédé au remplacement des chaînes en fer par des câbles torsadés en acier. C'est en 1839 que le mot "fatigue" apparaît la première fois pour se référer à la rupture due à la répétition d'un chargement inférieur à ce qui provoquerait la rupture statique, dans l'ouvrage de langue française "Introduction à la Mécanique Industrielle" [7] , par **J.-V. Poncelet**. Voici comment il expliquait ce phénomène :

"(...) Il est évident encore que pareille chose doit arriver quand, cette action étant seulement intermittente, les alternatives d'extension ou de compression sont suffisamment répétées; et c'est ce qui fait dire aux ouvriers que **les ressorts les plus parfaits sont, à la longue, susceptibles de se fatiguer**. Mais ce fait s'explique de lui-même, si l'on admet que l'altération de l'élasticité, c'est-à-dire **le dérangement intime et permanent des molécules**, quoiqu'insensible pour une seule compression suivie d'une détente, n'en existe pas moins en réalité, et **fait des progrès de plus en plus marqués, à mesure qu'elle s'ajoute à elle même, à chaque oscillation du ressort**. (...)"

Pendant cette période, plusieurs accidents de train sont survenus dus à la rupture inattendue d'axes et d'autres composants des locomotives à vapeur. Ces accidents, et plus particulièrement l'accident arrivé à Versailles le 10 mai 1842 [8], ont déclenché des recherches scientifiques sérieuses pour déterminer la cause de ces ruptures ainsi que la fiabilité de ces engins. En 1843 une commission a été formée en Angleterre par la *British Association* [2, 9] et plusieurs études ont été effectuées pour élucider l'effet de la vibration et du chargement répété sur les propriétés des métaux utilisés dans la fabrication de locomotives et autres machines. Cette année même **W. Rankine** [10] a décrit avec une précision étonnante les causes des ruptures par fatigue : l'amorçage et la propagation d'une fissure à partir d'un point de concentration de contrainte. En 1854, Braithwaite publiait le premier article où le mot "fatigue" figurait dans le titre : *On the fatigue and consequent fracture of metals* [11]. Il a justifié l'emploi du mot fatigue par la nature progressive des ruptures, argumentant que c'était le terme le plus expressif qu'il ait pu trouver.

Entre 1852 et 1869, l'ingénieur allemand **August Wöhler** a entrepris la première investigation systématique sur la fatigue [12]. Il a conçu plusieurs machines d'essais de fatigue, comme la machine d'essai de fatigue par flexion rotative, qui est encore utilisée de nos jours. À travers ses essais, **Wöhler** a pu démontrer, entre autres, l'existence d'une limite de résistance à la fatigue (pour l'acier), l'effet de la contrainte moyenne et de la concentration de contraintes (essais sur des éprouvettes avec entaille) [3].

Depuis le travail de **Wöhler**, plusieurs chercheurs ont étudié le phénomène de rupture par fatigue. **La figure I** montre l'évolution de la quantité de publications sur le sujet entre 1838 et 1969 [13]. Il est évidemment impossible de décrire dans cette introduction toute l'évolution des études menées sur la fatigue jusqu'à nos jours (en effet, si la tendance exponentielle montrée sur le graphe de la **figure I.1** est maintenue, aujourd'hui le nombre de publications

existantes sur la fatigue doit dépasser 100'000!). Toutefois, il y a deux événements qui méritent d'être mis en évidence :

- **l'article publié en 1902 par Ewing et Humfrey [14] :** dans un article très intéressant, ces deux chercheurs décrivent le comportement en fatigue d'éprouvettes d'acier préalablement polies. En interrompant les essais pour observer les modifications de la surface sous microscope optique, ils ont démontré pour la première fois la formation de bandes de glissements sous chargement répété ainsi que l'évolution de ces bandes de glissements en fissures transgranulaires. Ce fut la première étude sur les mécanismes d'endommagement par fatigue et qui enterrait définitivement la théorie de la "cristallisation" des aciers (qui pourtant a curieusement persisté jusqu'aux années cinquante!)[8,15].
- **les accidents avec les avions Comet en janvier et avril 1954 [8 , 9]:** ainsi comme l'accident de Versailles en 1842 a marqué le commencement des recherches en fatigue, ces accidents coïncident avec le début d'une période de recherches dirigées vers la compréhension des mécanismes influençant la déformation et la rupture par fatigue. En effet, des progrès considérables dans ce domaine ont été obtenus dans les quatre dernières décennies grâce au perfectionnement des techniques de microscopie optique et électronique [16] .

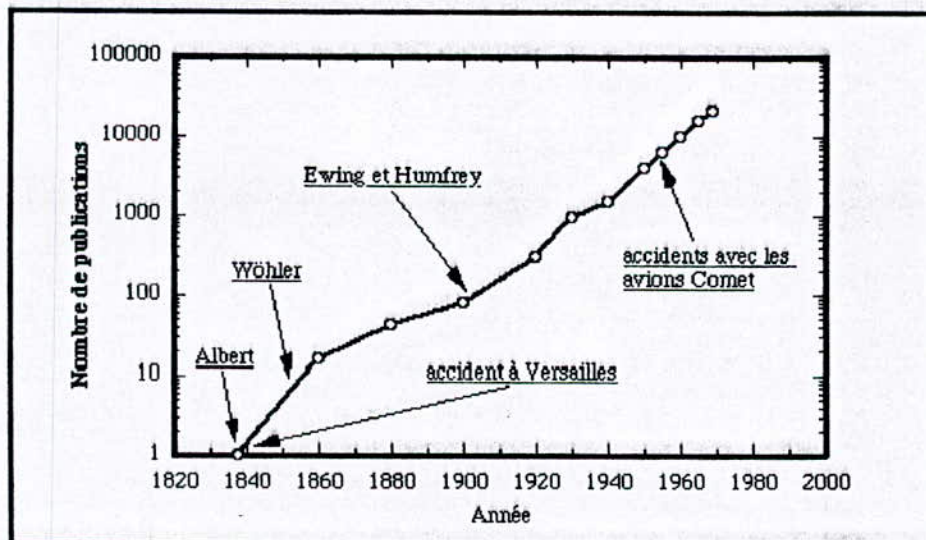


FIGURE I.1 : Nombre total de publications sur la fatigue des matériaux aux cours des années.

L'endommagement par fatigue est actuellement un phénomène bien connu et se trouve à l'origine de la plupart des ruptures. La fatigue, en réalité, consiste en la rupture provoquée par l'initiation et la propagation d'une fissure, alors que les contraintes mises en jeu sont bien inférieures à la résistance à la rupture, voire même inférieures à la limite élastique du matériau. Parmi les nombreux facteurs qui influent sur la rupture par fatigue, c'est sans doute l'état structural et mécanique des couches superficielles de la pièce qui jouent le rôle le plus important. En effet, l'examen des faciès de rupture montre que les fissures s'amorcent pour la plupart en surface, ou encore aux interfaces (joints de grains, matrice-inclusion, oxyde-métal, couche protectrice-matériaux de base, etc.). Cela est dû au fait que les contraintes en service sont maximales en surface. D'autre part, il faut aussi considérer la concentration de contrainte à la surface due aux entailles, aux changements de section et à la rugosité, ainsi que l'endommagement provoqué par le contact avec le milieu extérieur (corrosion, usure, montage, grippage, etc.)

J'espère que cette brève présentation historique aura su démontrer l'importance du problème de l'endommagement par fatigue.

L'introduction des chapitres 1 et 2 a été rédigée avec le même souci de situer dans le temps le progrès consécutif à la recherche dans l'axe de la fatigue thermique .

ADAMOU ADIB SOUFIANE
Alger – Juin 1998.

Abréviation	signification
-	constatation
>	interprétation
HCF	<i>high cycle fatigue</i>
LCF	<i>low cycle fatigue</i> : fatigue oligocyclique
T_f	température de fusion
FT	fatigue thermique
FTM	fatigue thermomécanique
ϵ_{in}	déformation interne
N_f	durée de vie à la rupture
N_i	durée de vie à l'amorçage
N_5	durée de vie totale
ϵ_{tot}	déformation totale
ϵ_m	déformation mécanique
ϵ_{th}	déformation thermique
T_{amb}	température ambiante
ϵ_e	déformation élastique
ϵ_{in}	déformation inélastique
ϵ_p	déformation plastique
ϵ_c	déformation de fluage
E	module d'élasticité
ν	coefficient de Poisson
α	coefficient de dilatation
$\Delta \epsilon_m$	amplitude de déformation mécanique
$\Delta \epsilon_s$	amplitude de contrainte
$\Delta \epsilon_{in}$	amplitude de déformation inélastique

Tableau d'abréviation.

SOMMAIRE

Introduction générale	1
-----------------------	---

Premier chapitre : Phénomènes à haute température et les multimatériaux

I.1 Introduction	3
I.2 Dégradation des matériaux	6
I.2.1 Corrosion sèche	6
I.2.2 Fluage	7
I.3 Aspects techniques sur l'évolution des matériaux	8
I.4 Les multimatériaux	9
I.4.1 Introduction	9
I.4.2 Problèmes des multimatériaux	10
I.4.3 Types de multimatériaux	14
I.5 Les contraintes résiduelles	15
I.6 Synthèse et paramètres principaux	16

Deuxième chapitre : Fatigue à haute température

II.1 Généralités	16
II.2 Fatigue à hautes températures et terminologie	18
II.2.1 Fatigue à température élevées	18
II.2.2 Durée de vie	20
II.2.3 Boucles d'hystérésis	23
II.3 Essais de fatigue isotherme	25
II.4 Essai de fatigue anisotherme	26
II.4.1 Méthodes d'étude en fatigue anisotherme	29
II.5 Les contraintes thermiques	31

Troisième chapitre : Formulation mathématique

III.1 Introduction	34
III.2 Hypothèses	35
III.3 Transfert de chaleur en régime variable	36
III.3.1 Convection	36
III.3.2 Conduction	37
III.3.3 Convection et conduction dans un régime variable	38
III.4 Les méthodes numériques	39
III.4.1 Méthode des accroissements	39
III.4.2 Méthode des éléments au frontière	47
III.5 Etude du décollement	53

**Quatrième chapitre : Simulateur
et résultats numériques**

IV.1 Fiche technique du simulateur	55
IV.1.1 Présentation et utilisation du simulateur	55
IV.2 Validation	60
Conclusion générale	69
Références bibliographiques	72

Introduction générale

Introduction générale

Améliorer et prédire la durée de vie d'un multimatériau et garantir sa fiabilité tout en jouant sur les paramètres et les constituants de ce dernier est un objet ambitieux mais réaliste. Par ailleurs, on ne peut pas reproduire des multimatériaux ainsi que des dispositifs qui sont en mesure d'effectuer des tests de caractérisation et de détermination du comportement des multimatériaux en raison de la complexité du mode d'élaboration, la cherté des essais en question et surtout le temps qu'on consomme afin d'avoir des résultats. Avant d'aller plus loin, il faut insister sur l'importance de la simulation dans la réalisation de telles expériences. Non seulement elle permet de limiter celles-ci, mais elle se révèle aussi un outil indispensable pour obtenir des résultats quantitatifs.

De nombreux programmes de simulation sont disponibles, ils prévoient avec une précision suffisante le devenir des matériaux.

Simulations et expérimentations sont menées simultanément et non indépendamment. En effet, à chaque étape de la simulation, il est nécessaire de vérifier et souvent de réajuster certaines données d'entrées du programme.

Ce qu'on appelle simulation est avant tout un outil de conception et de garantie de la tenue d'un multimatériau vis à vis d'un phénomène, notre étude a pour objectif de simuler le comportement d'un multimatériau vis à vis de la fatigue thermique qui est un phénomène qui surgit lorsqu'un multimatériau est sollicité thermiquement et d'une manière cyclique. Ceci provoque la génération de contraintes thermiques internes qui vont par la suite causer une dégradation du multimatériau, sous forme de décollement de l'interface.

Notre étude est scindée en quatre parties.

En premier lieu, nous nous sommes attachés à présenter les différents phénomènes pour lesquels un matériau en générale peut être soumis. Un développement a été entretenu dans le sens d'une définition des multimatériaux ainsi que les problèmes d'élaboration.

Introduction générale

Effectivement, les multimatériaux présentent des problèmes d'ordre adhésifs en raison de la divergence de propriétés entre les différents constituants, et ceci à l'état liquide, c'est à dire au début de l'élaboration, et à l'état solide, en phase finale d'élaboration. Un autre problème d'ordre pratique, est la génération de contraintes résiduelles.

Ces multimatériaux vont être le siège d'une sollicitation thermique alternée qu'on a déjà défini en terme "fatigue thermique", donc il est impératif de mener une étude de ce phénomène, ainsi que d'autres phénomènes où des sollicitations sont appliquées d'une manière alternée afin de dégager les différences et les similitudes.

Le premier volet du programme est la modélisation, en fait, c'est un jeu de construction dont les briques sont comme «virtuelles». La modélisation consiste à représenter, de façon simplifiée mais réaliste, des phénomènes physiques complexes sous forme d'équations ou de systèmes d'équation, c'est à dire mieux connaître chacune des briques du système.

Pour ce volet (modélisation), on a opté pour deux méthodes, chacune d'elles simule un phénomène : la méthode des accroissements finis est destinée à résoudre le problème du transfert de chaleur, puisque la fatigue thermique est un cyclage thermique, ça revient à résoudre l'équation du transfert de chaleur, bien entendu dans le régime variable. En second lieu, on s'intéresse à l'état de l'interface, c'est à dire vérifier s'il y a décollement ou pas, ceci a été résolu par la méthode des discontinuités de déplacements.

Le second volet du programme est la simulation numérique ou comment les équations de la modélisation deviennent lisibles et décrivent le phénomène en question. Outil central qui va synthétiser toutes les connaissances fondamentales entreprises dans la partie modélisation.

Nous sommes attachés à ce que le programme soit interactif et facile à manipuler, pour cela, nous avons choisi un logiciel de construction.

Enfin, le troisième volet de l'étude numérique concerne la validation qui va servir à crédibiliser notre démarche.

Une étude des influences des paramètres est nécessaire afin de dégager les limites de l'endurance des multimatériaux vis à vis de la fatigue thermique.

Notre travail se situe dans cette optique et nous a conduit à mettre au point différents paramètres influants sur les multimatériaux : en particulier le couple métal / céramique.

Premier chapitre

Phénomènes à haute température et les multimatériaux

PHENOMENES A HAUTE TEMPERATURE ET LES MULTIMATERIAUX

I.1 Introduction

De nombreuses pièces critiques de structures utilisées à haute température (**tableau 1.1**) sont soumises à des variations de températures rapides en cours de fonctionnement [17,18].

Le gradient thermique ainsi créé dans la pièce génère des contraintes internes. En effet, la dilatation libre d'un élément de volume donné est limitée par la dilatation différenciée des éléments voisins qui se trouvent à des températures différentes.

L'amplitude de ces contraintes d'origine thermique est fonction du gradient thermique et de la géométrie de la pièce, mais aussi des caractéristiques physiques et mécaniques du matériau, tels que : le coefficient d'expansion thermique, la conductivité thermique, la résistance mécanique et le module d'élasticité. Si les cycles thermiques sont suffisamment sévères, la déformation plastique alternée en couches superficielles ou en points de concentration de contrainte se produit et peut conduire à l'endommagement des pièces par un processus de fatigue oligocyclique anisotherme (amorçage et propagation de fissures).

Bien souvent, les pièces sont soumises à une superposition de contraintes d'origine thermique, de contraintes d'origine mécanique et de l'influence de l'environnement, et c'est pour cette raison que l'étude de la fatigue thermique est relativement complexe.

Composant		Matériau	Température maximale
Lingotières		acier coulé	>800°C
Laminoirs		acier coulé/forgé	500-900°C
Turbomachines à gaz	Carcasse du compresseur	acier inox vieilli	400°C
	Disques du compresseur	superalliage Ni	400°C
	Chambre à combustion	superalliage Ni	>500°C
	Disques de turbine	superalliage Ni	<700°C
	Aubes de turbine	superalliage Ni	900-1100°C

TABLEAU 1.1 : Composantes de machines fonctionnant à température élevée [18].

Les turbomachines aéronautiques, les pistons de moteurs, et même les circuits intégrés fonctionnent à des températures relativement élevées. En effet, la performance de ces éléments est proportionnelle à la température du milieu environnant ou de l'importance de la source interne de chaleur [19].

La **figure 1.1**, montre la section d'une aube mobile de turbine aéronautique cassée lors du service. L'expertise du moteur de l'avion accidenté effectuée par le *Centre Technique Aérospatial (CTA) à São José dos Campos, Brésil* [20], a conclu que la rupture a été provoquée par l'interaction entre fatigue thermique et oxydation (fissure amorcée au bord d'attaque, proche du pied de l'aube), ceci montre la difficulté de l'étude de ce phénomène à cause de ces interactions qui dans ce travail ont été négligées, pour des raisons très objectives et qui seront présentées dans le troisième chapitre.

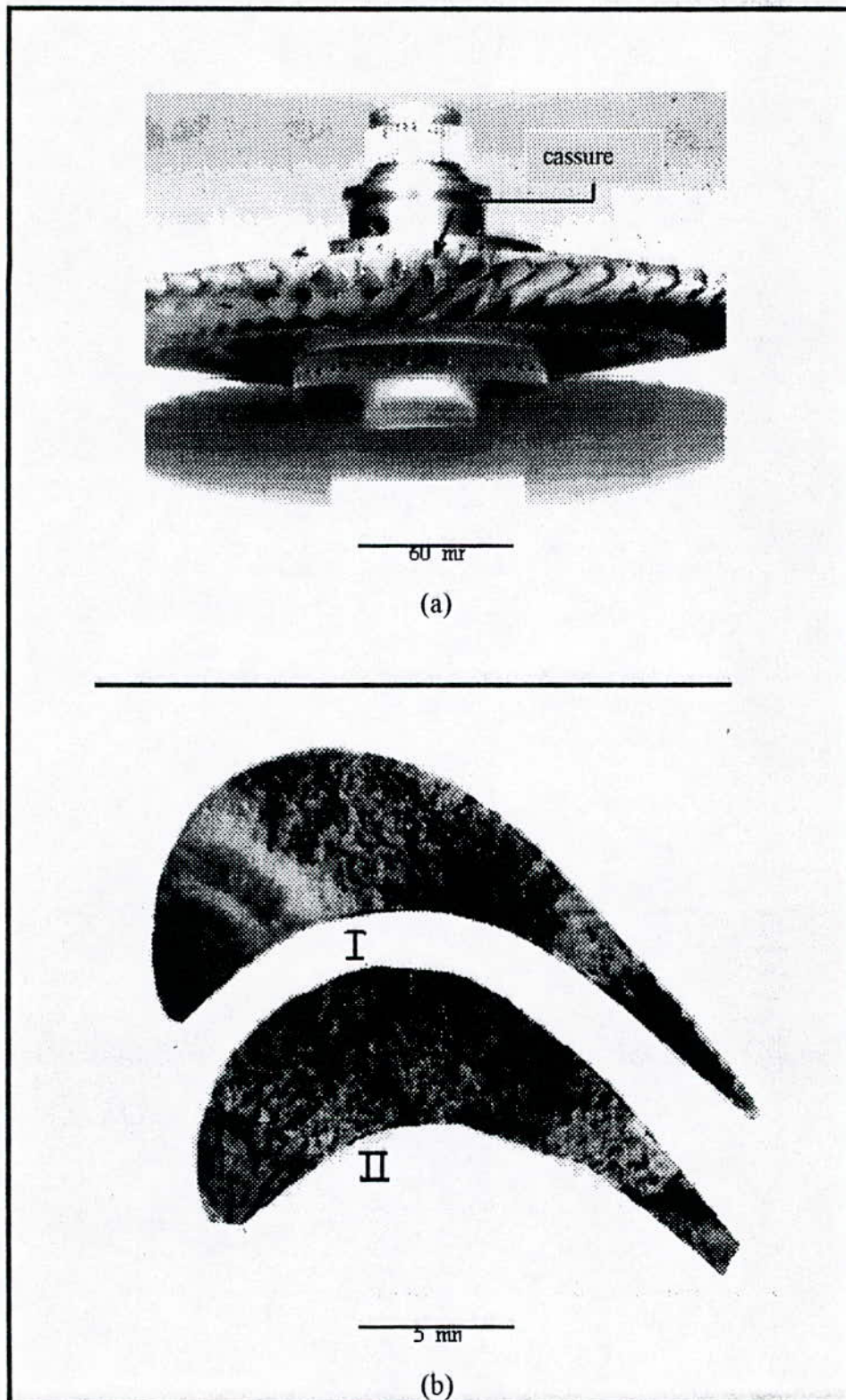


FIGURE 1.1 : Aubes de turbine aéronautique endommagées par fatigue thermique : (a) disque avec flèche indiquant l'aube cassée en service ; (b) surface de rupture de l'aube cassée en service (I) et d'une autre aube du même disque cassé par impact (II) [21].

I.2 Dégradation des matériaux

Il faut souligner qu'un matériau porté à haute température pourra subir en plus de la fatigue thermique, d'autres types de dégradations, tels que l'oxydation et le fluage. Ces phénomènes jouent un rôle déterminant sur la durée de vie du matériau en question en anticipant l'amorçage des fissures ou carrément une détérioration superficielle du matériau.

I.2.1 Corrosion sèche

La corrosion sèche est une réaction entre les matériaux (les métaux surtout) et les gaz qui les entourent. Cette réaction est une *oxydation* : il se forme en effet, le plus souvent à la surface du métal, un composé qui entraîne une perte effective et une dégradation de celui-ci.

Ce type de corrosion entraîne notamment des problèmes de *tenue en service* à des températures nettement supérieures à la températures ambiante.

Dans la majorité des cas, l'oxygène de l'air se combine aux atomes du métal pour former des oxydes.

Dans les atmosphères sulfureuses oxydantes (SO_2), par contre, les produits de corrosion sont des sulfures.

Finalement, l'attaque peut également être due à des halogènes (Cl, Br, I) et à des atmosphères de combustion (CO , CO_2 , H_2O , etc.) [22].

La formation de la couche d'oxyde se fait en quatre étapes :

- En premier lieu, il y a *adsorption chimique* de l'oxygène à la surface du métal. Cette adsorption conduit à la formation, entre l'oxygène et les ions métalliques de liaison en général ionique. Cette étape est favorisée par le fait que, à la surface, les liaisons métalliques des atomes ne sont pas saturées ; c'est pourquoi ces atomes font preuve d'une réactivité importante.
- Après une certaine période d'incubation, il y a *germination* de l'oxyde à la surface du métal
- Puis croissance latérale des germes, ce qui entraîne un recouvrement complet de la surface du métal par un film d'oxyde.
- La croissance uniforme de l'oxyde se poursuit ensuite selon une direction perpendiculaire à la surface du métal.

C'est cette dernière étape qui détermine la cinétique de l'oxydation, puisque l'épaisseur de la couche d'oxyde augmente au détriment de celle du métal.

On peut conclure que la corrosion sèche ou l'oxydation est un phénomène à tendance destructive. Pour éviter ce phénomène, on opte généralement pour des métaux ayant une basse affinité vis à vis l'oxygène de (ou l'élément oxydant), sinon on effectue un traitement se surface en utilisant un matériau qui résiste à l'oxydation.

1.2.2 Fluage

Lorsqu'on applique pendant un certain temps une contrainte d'amplitude constante à un matériau, celui-ci peut adopter un comportement viscoélastique (c'est à dire que le matériau retrouve sa position ou bien sa taille initiale consécutivement à l'éradication de la contrainte après une durée de temps «t'») [22].

En général, une augmentation de température, entraîne une agitation thermique plus élevée des atomes et une augmentation de la valeur des coefficients de diffusion de ces atomes, phénomènes fondamentaux qui provoquent une augmentation de la vitesse de déformation du matériau. C'est pourquoi, pour analyser l'influence de la température, nous devons faire intervenir le temps comme paramètre supplémentaire.

Nous pouvons résumer brièvement les effets de la contrainte et de la température, dans le domaine plastique sur un matériau cristallin ductile.

- a) La contrainte met les dislocations en mouvement, grâce aux cissions qui s'exercent sur les plans de glissement. Lorsque les dislocations se multiplient et agissent les unes sur les autres, leurs déplacements se trouvent de plus en plus limités, jusqu'à la cessation de la déformation plastique : c'est le phénomène de consolidation.
- b) La température, par contre a pour effet d'augmenter la mobilité des dislocation, à cause de l'augmentation de l'agitation thermique, et de réduire la contrainte de friction du réseau, puisque les cissions nécessaires pour déplacer les dislocations sont plus faibles. Elle favorise en outre les mécanismes de restauration, par l'annihilation des dislocations de signes opposés.

En d'autre terme, la température provoque un adoucissement.

On constate que le phénomène de fluage est maîtrisable, et on peut limiter son action sur les matériaux. Si on opte pour des *sollicitations thermiques seulement*, on peut négliger les conséquences de ce phénomène.

Certains matériaux tels que les céramiques, ont un comportement différent vis à vis de ce phénomène. Il n'apparaît qu'au domaine visqueux.

1.3 Aspects techniques sur l'évolution des matériaux

La limitation de la capacité des alliages à base de fer pour des applications dans des turbomachines ou les moteurs a abouti à l'apparition des multimatériaux, que ce soit ceux du type **Duplexe** (substrat + couche d'accrochage + revêtement) ou **multicouches** (entre le substrat et le revêtement, il existe plusieurs couches intermédiaires, avec une dégradation de propriétés assurant l'accrochage de chacune d'elle par voie chimique).

De nouvelles techniques telles que la solidification dirigée employée depuis 1968 [20] et l'élaboration des matériaux monocristallins depuis 1978 [20], ont amélioré les propriétés mécaniques des différents éléments travaillants dans des conditions hostiles, ainsi que l'alignement ou de l'élimination des joints de grains. Cette technique est toujours adoptée pour l'élaboration des semi-conducteurs (en silicium par exemple) et celle des aubes de turbine (en super alliages à base de nickel, réputé d'être les seuls matériaux répondants aux exigences et les propriétés afin de résister aux conditions sévères).

L'introduction des techniques de refroidissement et l'utilisation de couches protectrices superficielles ont aussi joué un rôle important dans l'amélioration de la performance de ces éléments, qui peuvent actuellement atteindre des températures très élevées. A titre d'exemple, pour les aubes de turbine, on peut atteindre des températures de l'ordre de 1100°C au bord d'attaque (température du métal, la température du gaz à l'entrée de la turbine pouvant atteindre environ 1400°C).

En général, deux approches sont utilisées d'une manière indépendante dans l'étude de la fatigue anisotherme : l'essai de fatigue thermique (FT) et l'essai de fatigue thermo-mécanique (FTM).

I.4 Les multimatériaux

I.4.1 Introduction

Selon sa classe, chaque type de matériau possède des propriétés et des caractéristiques qui lui sont propres : les métaux sont en général tenaces et ductiles, mais leur masse volumique est souvent élevée ; les matières plastiques, légères, ont une faible rigidité et des propriétés mécaniques moyennes, et elles sont parfois fragiles. Les céramiques quant à elles, ont un module d'élasticité et une résistance théorique à la traction très élevés, mais sont intrinsèquement fragiles.

Un groupement de deux ou plusieurs classes de matériaux souvent sous forme de couches donne naissance à ce qu'on appelle «multimatériaux ».

Les métaux dans l'industrie aérospatiales ou dans l'élaborations d'éléments à vocations hostiles ne sont pas utilisables à grande échelle en raison de leur instabilité (formation et changement de phases) et leur faible résistance à des températures élevées, où plusieurs phénomènes ont tendance destructive qui vont enclencher une dégradation de ces métaux (ou alliages), c'est pour cette raison qu'on opte pour des couches protectrices ou des traitements de surface.

En ce qui concerne l'élaboration des couches protectrices, plusieurs travaux ont été menés afin de pouvoir maîtriser cette procédure et résoudre les problèmes d'interfaces qui surgissent consécutivement à ce mode d'élaboration (élaboration de cette couche protectrice) surtout pour un revêtement dont la structure est différente de celle des métaux tel que les céramiques dont la structure atomique est covalente ou ionique.

I.4.2 Problèmes des multimatériaux

Les propriétés des différentes couches d'un multimatériau sont complexes et dépendent du procédé d'élaboration ainsi que des propriétés physico-chimiques de chacun des éléments du multimatériau considéré, c'est pour ces raisons qu'une maîtrise des procédés d'élaboration est très importante. Dans ce sens on a pu distinguer deux groupes de procédés :

- Ceux qui font intervenir une phase liquide à haute température soit métallique, soit à base de verre.
- Ceux qui mettent en œuvre seulement l'état solide.

Donc il impératif de maîtriser les énergies des surfaces et d'interfaces en présence[23].

1.4.2.1 Interface liquide – solide

Afin de permettre une compréhension des mécanisme d'adhésion liquide / solide il faut effectuer une analyse des forces affectant la mouillabilité du métal liquide sur un substrat solide.

L'énergie d'adhésion (voir figure II.2)a comme composantes :

- une énergie d'interface liquide – solide : γ_{SL}
- une énergie d'interface solide – gaz : γ_{SG}
- une énergie d'interface liquide – gaz : γ_{LG}

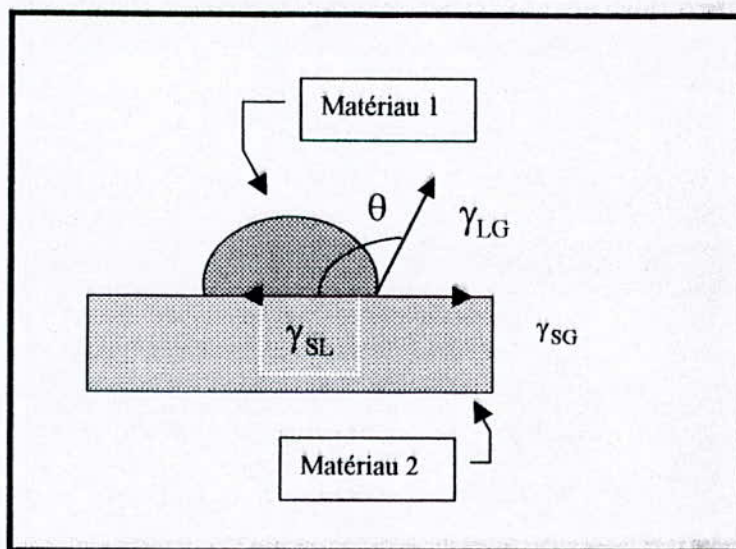


Figure I.2 : Schéma d'une goutte du matériau '1' sur une surface du matériau '2'[23].

L'énergie d'adhésion 'W' est alors définis comme suit :

$$W = \gamma_{SG} + \gamma_{LG} - \gamma_{SL} - \gamma_{LG} (1 + \cos \theta) \quad (I.1)$$

Selon la valeur de θ , on peut distinguer les trois cas suivants :

$$\left\{ \begin{array}{l} \bullet \quad \gamma_{SG} > \gamma_{SL} : \theta < 90^\circ \\ \bullet \quad \gamma_{SG} = \gamma_{SL} : \theta = 90^\circ \\ \bullet \quad \gamma_{SG} < \gamma_{SL} : \theta > 90^\circ \end{array} \right.$$

En d'autre terme, si θ décroît d'une valeur supérieure à 90° à une valeur inférieure à 90° , γ_{SL} va décroître jusqu'à être inférieure à 180° .

Si cette réduction d'énergie a eu lieu dans le temps, cela implique qu'une solution du substrat dans le liquide a eu lieu ou bien une réaction à l'interface ou encore un processus de polarisation, ce qui veut dire qu'une sous couche s'est formée.

1.4.2.2 Interface solide – solide

Dans une interface solide – solide, les atomes peuvent se trouver dans des situations très proches de celles qu'ils ont en volume, comme c'est le cas dans un joint de macles ; à l'opposé, ils peuvent conserver les caractéristiques d'atomes de surface lorsque l'interface est constituée de deux surfaces accolées avec des forces d'adhésion négligeables.

E.Gillet et Coll [24] proposent pour comprendre et prévoir le phénomène tel que l'adhésion d'un métal sur un isolant (étant donné que l'isolant joue un rôle de protection) de caractériser l'interface à l'échelle microscopique du point de vue cristallographique, électronique et chimique, en suivant l'évolution morphologique du dépôt depuis l'adsorption initiale.

1.4.2.2.1 : Mode de croissance et structure de l'interface

Dans le **tableau I.2**, nous pouvons décrire les différents modes de croissance possibles d'un matériau appelé 'B' sur un support 'A' et les principaux types d'interfaces qui peuvent en résulter.

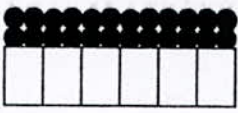
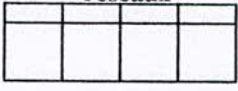
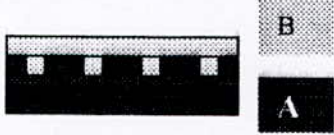
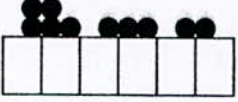


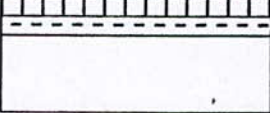


Mode de croissance	Nature de l'interface	
	Interface abrupte	Interface avec couche intermédiaire Interface interactive
<p>Type Frank & Van Der Merwe</p> 	<p>Croissance épitaxiale adaptation parfaite des réseaux</p> 	<p>Couche intermédiaire avec interdiffusion d'un composé.</p> 
<p>Type Volmer Weber, nucléation et croissance de cristallites.</p> 	<p>Croissance épitaxiale de cristallites tridimensionnels jusqu'à coalescence sans ou avec joints de grains.</p>  <p>Ou bien :</p>  <p>Adaptation pseudomorphe ou dislocation interfaciales</p>	<p>Film non homogène latéralement – présence de joints de grains dislocations.</p> 
<p>Type Stranski-Krastanov, formation d'une monocouche suivie d'une nucléation.</p> 	<p>Croissance épitaxiale de cristallites tridimensionnels en adaptation grâce à la première couche.</p> 	<p>Persistance de la première couche adsorbée, d'où formation d'un film épitaxial en adaptation pseudomorphique. Sinon retour au cas précédent.</p>

Tableau I.2 : Modes de croissance classiques et types d'interfaces qu'ils peuvent induire lors du dépôt d'un film de métal sur un isolant [23].

D'une façon générale, les multimatériaux présentent un problème de l'énergie d'adhésion entre ses constituants, c'est pour cette raison qu'on retrouve le plus souvent des multimatériaux multicouches afin de garantir une adhésion meilleure, en injectant des éléments qui forment une (ou des) couche (s) intermédiaire (s) , ceci est intéressant aussi du point de vue dégradations «uniforme » des propriétés [25].

Pour conclure, on peut dire que pour augmenter l'énergie d'adhésion, il est possible de jouer sur les éléments d'additions, qui favorisent des réactions au sein de l'interface et sur ce renforcer l'état de l'interface. [26]

1.4.3 Types de multimatériaux

Actuellement, il est possible de distinguer trois grands types principaux de revêtement protecteur thermique qui permettent de résoudre plus ou moins partiellement les problèmes de tenue en service évoqués précédemment.

- **Les revêtements monocouches :** le revêtement est projeté directement sur un substrat. Dans ce cas, il est préférable que les coefficients de dilatation thermique de ces deux matériaux soient les plus proches possible (**figure.3.a**) sauf si une énergie d'adhésion forte peut être obtenue compte tenu des éléments en présence comme nous l'avons signalé précédemment [25].
- **Les revêtements bi-couches :** appelés 'duplexe', constitués d'un revêtement assurant la protection vis à vis du milieu externe, associé à une sous couche d'accrochage qui peut jouer d'une part le rôle de barrière chimique et d'autre part d'accommoder les coefficients de dilatation thermique des deux matériaux (**figure I.3.b**) [25].
- **Les revêtements appelés 'multicouches' :** composés d'une sous-couche recouverte à son tour d'une couche intermédiaire séparant ainsi le revêtement et la sous-couche (**figure I.3.c**) [25].

Dans cette étude, nous traiterons ces différents multimériaux à titre comparatif, afin de dégager les différences et les similitudes.

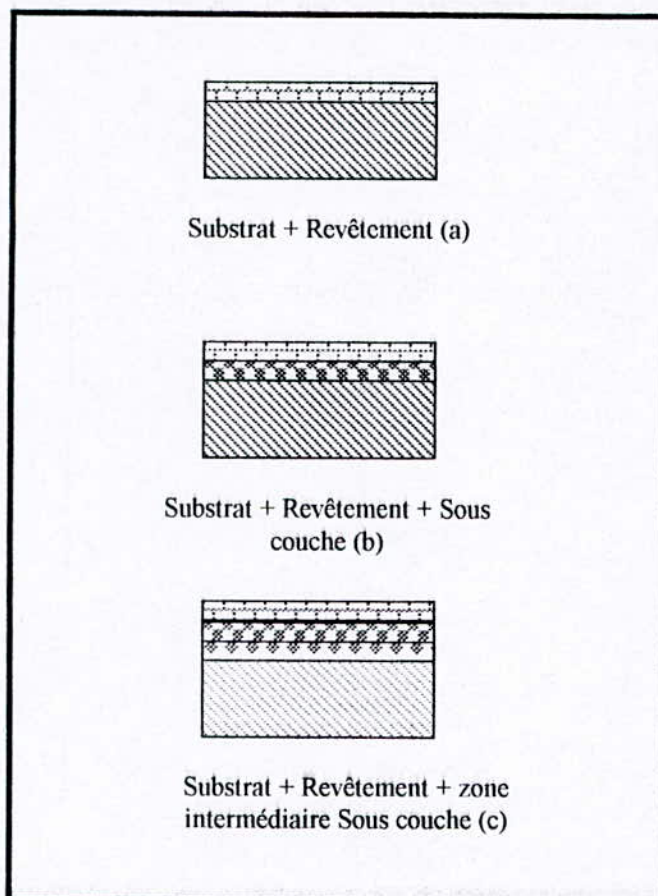


Figure I.3 : Les différents types de multimatériaux[25].

I.5 Les contraintes résiduelles

A cause de la diversité des procédés d'élaboration des multimatériaux, on veut introduire quelques paramètres relatifs à l'élaboration des multimatériaux. On a choisi les procédés basés sur la projection à haute température qui s'avèrent les plus utilisés dans l'industrie. Compte tenue de la complexité de ces paramètres, on ne va pas s'étaler sur tous les paramètres mais plutôt sur la température du substrat et des particules projetées et uniquement les micro-contraintes générées par la projection qui sont dues à la contraction de chaque particule pendant le refroidissement. Elles dépendent du coefficient de dilatation thermique ainsi que de la constante élastique des particules. Ces contraintes s'expriment par la relation suivante :

$$\sigma = \alpha(T_m - T_c)E \quad (1.2)$$

Avec :

α : Coefficient de dilatation thermique du matériau projeté.

T_m : Température de fusion de la particule.

T_c : Température initiale du substrat sur lequel les particules s'écrasent.

E : Module d'élasticité de la particule.

A l'aide de cette formule, on peut établir également l'effet de la température initiale du substrat lors de l'élaboration du multimatériau sur le comportement de ce dernier vis à vis la fatigue thermique.

1.6 Synthèse et paramètres principaux

L'évolution et la création de nouvelles classes de matériaux ont été, bien évidemment poussée par le besoin industriel, et l'infaillibilité des métaux et matériaux existants. Cette évolution bien entendue n'est pas hasardeuse, mais plutôt étudiée dans le sens d'une meilleure résistance dans des milieux hostiles, cela incite les utilisateurs de ces matériaux d'étudier ces derniers dans des conditions similaires à l'échelle du laboratoire.

L'endommagement d'un matériau dû au milieu environnant est généralement quantifié afin de prédire la durée de vie de l'élément élaboré à partir du matériau en question.

Ce chapitre, traite indirectement les phénomènes d'endommagement et les multimatériaux tout en éclairant les problèmes qui peuvent surgir pendant l'élaboration, bien que cela n'intervient pas directement sur le phénomène de la fatigue thermique.

Ceci est une introduction pour le chapitre suivant, où le lecteur pourra faire le lien entre les phénomènes d'endommagement et les matériaux, il pourra aussi comprendre les problèmes qui pourront apparaître lors d'un traitement thermiquement activé.

Deuxième chapitre

Fatigue à haute température

LA FATIGUE À HAUTE TEMPÉRATURE

"Fatigue may be described as a disease of metal. When metals are subjected to an alternating load, after a great many reversals the whole character of the metal may alter, and this change may happen very suddenly. An aluminium alloy which has stood up quite well to many thousands of hours in flight may suddenly become crystalline and break under quite small forces, with most unpleasant consequences for the aeroplane."

N. SHUTE, "No highway", 1948 [15].

II.1 Généralités

L'utilisation des pièces à haute température est à l'origine de nombreux problèmes, dont les principaux sont le fluage, l'oxydation (ou la corrosion) et la fatigue. La complexité de l'étude de l'endommagement à haute température vient justement du fait **que ces phénomènes ne peuvent généralement pas être dissociés**. En effet, une combinaison de l'endommagement provoqué par ces facteurs est généralement à l'origine de l'amorçage de fissures qui vont se propager et provoquer la rupture par fatigue. Les premières études sur la fatigue à températures élevées datent des années vingt [26, 27].

Le développement de la turbine à gaz a été une des forces motrices pour les études de fatigue à haute température [28- 31]. Au début, les constructeurs ont rencontré essentiellement des problèmes de **fatigue vibratoire isotherme** liés à des fréquences élevées et à un **grand nombre de cycles** (HCF, de l'Anglais : *high cycle fatigue*) [32, 33]. Avec les progrès des recherches dans

les domaines des matériaux et de la mécanique de la rupture, les bureaux de calcul des industries aéronautiques sont parvenus à utiliser des coefficients de sécurité plus affinés pour les contraintes statiques. Ainsi, particulièrement dans les zones peu chargées en vibration, il a été admis que l'on travaille de plus en plus dans le domaine plastique ou bien alors dans le domaine élastique avec une fissuration initiale. C'est alors qu'est apparu le phénomène de **fatigue oligocyclique** (LCF, de l'Anglais : *low cycle fatigue*) [34], lié aux cycles de fonctionnement de la machine. Le nom "oligocyclique" vient du fait que la rupture se produit dans un nombre réduit de cycles (tiré du grec *oligos* : petit, peu nombreux) en présence d'une déformation inélastique.

La nécessité d'améliorer le rendement des turbomachines aéronautiques a poussé la température d'utilisation à des niveaux où la résistance des matériaux est plus basse. En plus, les propriétés (ainsi que la microstructure) peuvent se dégrader avec le temps. Pour ces machines, chaque vol correspond à un cycle combiné de sollicitations mécaniques (forces centrifuges, forces aérodynamiques, couple moteur, etc.) et de sollicitations thermiques (contraintes liées aux gradients de température). La succession de ces cycles, entraîne l'endommagement par fatigue oligocyclique.

Il est important de souligner que ce type de sollicitation à haute température se rencontre pour toutes les pièces de la machine à l'exception de celles situées à l'entrée du compresseur.

Pour les moteurs d'avions militaires, les pièces sont conçues pour une durée de vie estimée entre 3'000 et 10'000 cycles, tandis que pour les avions civils la durée de vie souhaitée est de l'ordre de 40'000-80'000 cycles [34].

Les phases de démarrage et d'arrêt du moteur sont les parties critiques du "cycle de fatigue oligocyclique" que subissent les turbomachines. En effet, pendant ces périodes la variation rapide de la température induit des gradients thermiques transitoires dans les pièces, principalement dans les aubes fixes et mobiles à l'entrée de la turbine. Les gradients thermiques dans l'aube entraînent un état transitoire de contraintes internes. La déformation plastique qui en résulte peut conduire à l'amorçage et à la propagation de fissures, éventuellement jusqu'à la rupture. Cela constitue un phénomène d'endommagement par **fatigue oligocyclique anisotherme**, normalement désigné simplement comme **fatigue thermique**.

II.2 Fatigue à hautes températures et terminologie

Plusieurs termes utilisés dans les études de fatigue à température ambiante ne sont pas toujours appropriés aux essais à températures élevées. La limite élastique, par exemple, est très difficile à définir pour des températures supérieures à $0,4T_f$ (où T_f est la température de fusion). Dans le cas des essais de fatigue anisotherme, le problème est encore plus complexe dû à l'absence de normalisation (une commission travaille actuellement à l'élaboration d'une norme pour des essais de fatigue anisotherme [35, 36]). Il est donc judicieux de bien définir certains termes utilisés dans ce travail.

II.2.1 Fatigue à températures élevées

La fatigue à haute température peut être divisée en **fatigue isotherme** (cycles de traction/compression imposés à température constante) et **fatigue anisotherme** (variation simultanée de la déformation et de la température), comme le montre la **figure II.1**. Les essais de fatigue anisotherme sont aussi considérés comme des essais de **fatigue oligocyclique anisotherme**, vu qu'une déformation inélastique est presque toujours présente. En effet, **on ne trouve pratiquement pas d'essais de fatigue anisotherme de longue durée dans la littérature.**

Les **méthodes d'essais** utilisées aujourd'hui pour l'étude de la fatigue anisotherme peuvent être divisées en deux groupes : **les essais de fatigue thermique (FT)**, où la variation de la température seule est à l'origine de l'endommagement (génération de contraintes internes dans l'éprouvette) et **les essais de fatigue thermo-mécanique (FTM)**, où des contraintes externes sont imposées par une machine d'essais servo-contrôlée, indépendamment de la variation de température.

L'important ici est de bien souligner que la distinction entre les deux méthodes se réfère à l'origine des contraintes.

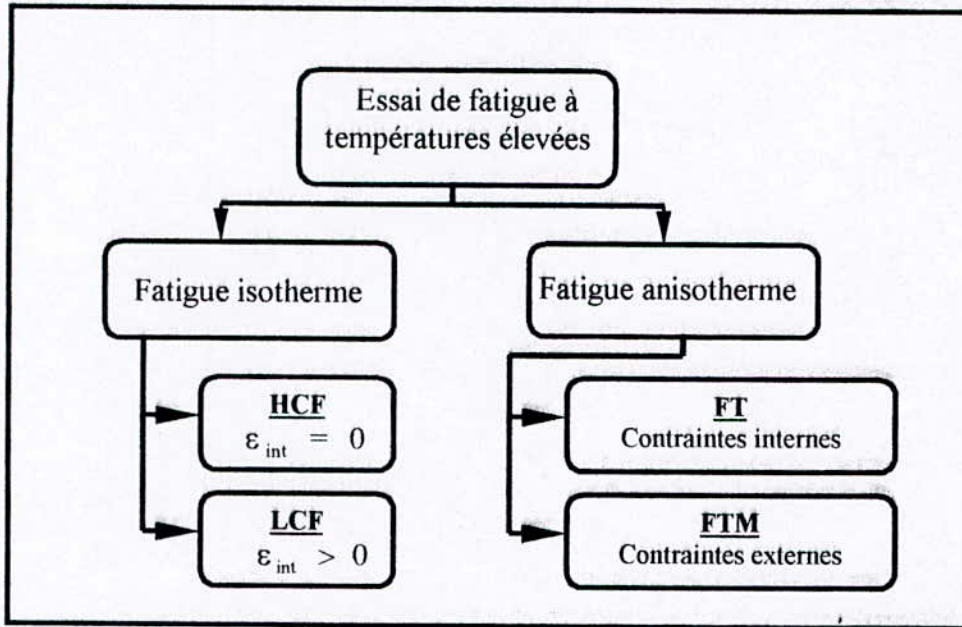


FIGURE II.1 : Classement des méthodes d'essai de fatigue à températures élevées[37].

En ce qui concerne **l'endommagement des pièces réelles**, la distinction donnée ci-dessus ne s'applique pas. En effet, les pièces réelles (comme les aubes de turbine, les pistons de moteurs, les laminoirs, tambour de freins...) sont généralement soumises à des contraintes internes d'origine thermique superposées à des contraintes externes (d'origine mécanique). Dans ce cas il n'est plus possible de différencier l'endommagement par fatigue anisotherme en FT et en FTM. Le plus correct serait de dire que la pièce s'endommage par un processus de "fatigue thermique et mécanique". D'une manière générale, toute pièce qui s'endommage par fatigue en présence d'un gradient de température ou d'une variation de température est dite endommagée par **fatigue thermique** (c.à.d., FT est utilisé comme synonyme pour fatigue anisotherme). Si les variations de température en service sont particulièrement brutales, la pièce peut s'endommager en un ou peu de cycles ; on parle alors de **choc thermique** [38].

II.2.2 Durée de vie

La définition de la durée de vie d'un composant de machine (ou d'une éprouvette) est une question très importante quand il s'agit d'une sollicitation par fatigue. En ce qui concerne une pièce réelle, on peut dire que la durée de vie est atteinte dès que cette pièce ne pourra plus exercer le rôle pour lequel elle a été conçue. Cela se produit généralement par la rupture de la pièce ou bien par un changement excessif de sa géométrie (déformation plastique). On parle alors de **durée de vie totale** ou **durée de vie à la rupture**. La durée de vie totale en fatigue correspond donc au nombre de cycles nécessaires à provoquer **l'amorçage et la propagation** d'une (ou de plusieurs) fissure jusqu'à la rupture ou la défaillance complète.

Dans le cas des machines où la rupture d'un composant peut compromettre l'intégrité de l'ensemble, la durée de vie des composants est définie comme le nombre de cycles nécessaires pour amorcer (et éventuellement propager) une fissure jusqu'à une certaine taille critique. Dès qu'une fissure ayant une taille égale ou supérieure à cette taille critique est détectée sur un composant, la durée de vie est atteinte et ce composant doit être remplacé. Il s'agit, dans ce cas, de **durée de vie utile** ou **durée de vie à l'amorçage**.

Cette définition est particulièrement délicate car elle est fonction de divers facteurs comme [39] : la résolution de la méthode de détection de fissures, la taille et la géométrie du composant, etc.

Pour dissocier les mécanismes d'amorçage et de propagation de fissures, trois durées de vie ont été définies dans l'étude de la fatigue anisotherme :

- **Durée de vie à la rupture (N_f) :**

Nombre de cycles écoulés jusqu'à la rupture complète de l'éprouvette. La rupture finale se fait par traction simple dès que l'aire de la section n'est plus capable de supporter le chargement appliqué.

- **Durée de vie à l'amorçage (N_i) :**

Nombre de cycles nécessaires à amorcer une fissure, qui peut apparaître à la surface et atteindre une certaine taille définit selon l'importance du composant (la pièce) ainsi que la profondeur relative à cette dernière. ' N_i ' peut être déterminée à partir de répliques de la surface des

éprouvettes soit par des ondes acoustiques (ondes ultrasoniques), soit par les infrarouges (notons que le dernier procédé est le mieux adapté à l'échelle du laboratoire).

• **Durée de vie totale (N5) :**

Nombre de cycles où une réduction de 5 % de la valeur de la contrainte maximale stabilisée, (σ_{max}), est observée sur l'amplitude de contrainte, $\Delta\sigma$ (ou nombre de cycles jusqu'à la rupture complète de l'éprouvette, si cela arrive avant). La contrainte maximale stabilisée ainsi que l'amplitude de contrainte stabilisée sont mesurées à partir du cycle correspondant à la moitié de la vie ($N5/2$). Un exemple d'application de cette méthode est donné sur la **figure II.2**. Comme la définition du cycle stabilisé ($N5/2$) est liée à la détermination de N5 elle-même, cette méthode doit être appliquée itérativement, comme le montre le schéma de la **figure II.3**.

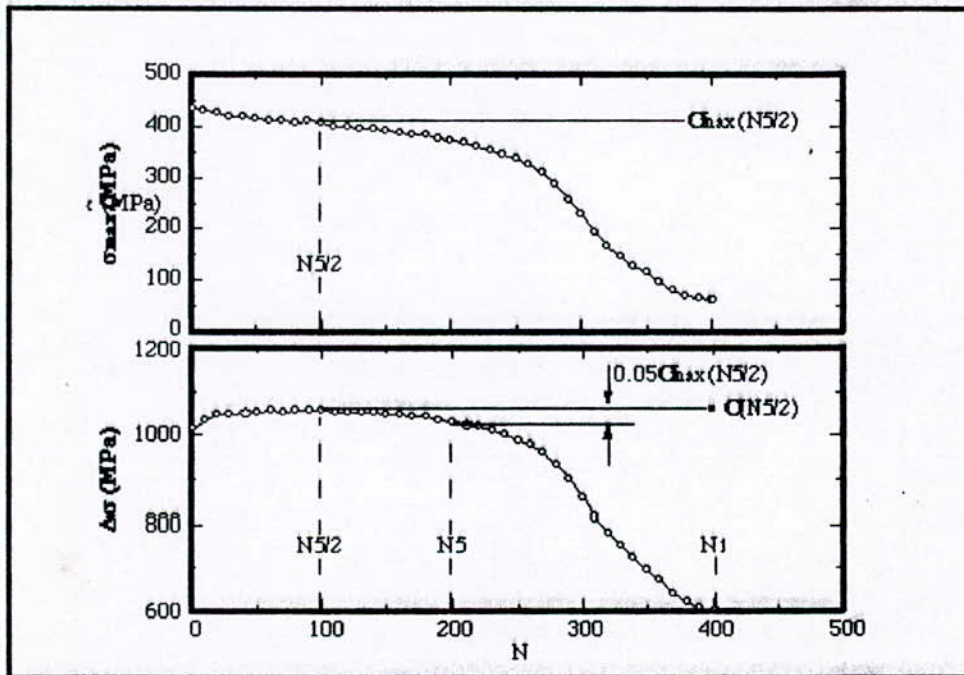


FIGURE II.2 : Exemple d'application de la méthode de détermination de N5

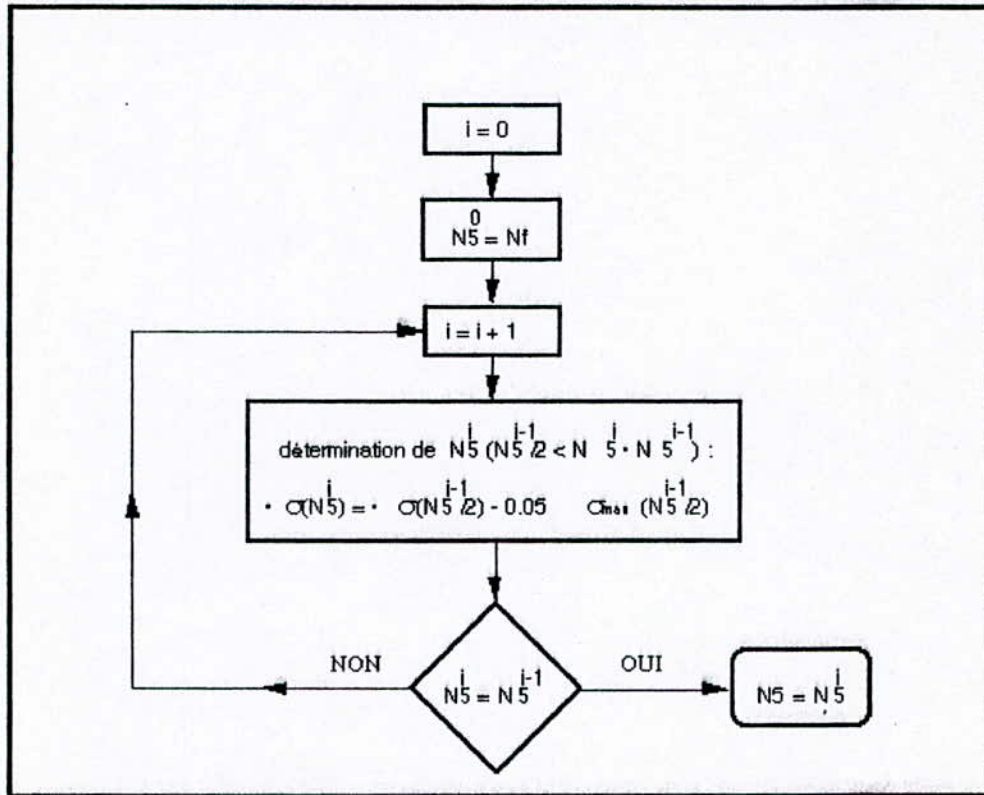


FIGURE II.3 : Organigramme de calcul de N5.

Le critère de durée de vie N5 est utilisé pour analyser l'ensemble des résultats obtenus dans ce travail. L'idée comprise dans ce critère est d'avoir une fissure qui ait propagé jusqu'à ce que l'aire de la section soit réduite de 5 %. Pour la géométrie d'éprouvette de FT choisie, cela correspond approximativement à une fissure qui est au point de traverser l'épaisseur de la paroi (1 mm de profondeur). Cette définition de N5 est en effet une modification du critère de chute de la valeur de la contrainte maximale, fréquemment utilisé pour des essais de fatigue isotherme. La modification suggérée a pour objet d'adapter ce critère pour le cas d'essais de fatigue anisotherme. Dans la littérature, cette définition est quelquefois utilisée comme critère d'amorçage dû à la facilité d'utilisation [40].

II.2.3 Boucles d'hystérésis anisotherme

La déformation totale (**etot**) mesurée lors d'un essai de fatigue anisotherme est la somme de la déformation mécanique (**em**) imposée par la machine d'essai, et de la déformation thermique (**eth**) (voir la **figure II.4**) :

$$\mathbf{etot} = \mathbf{em} + \mathbf{eth} \quad (\text{II.1})$$

La déformation thermique est résultante de la variation de la température. Elle est déterminée par la relation suivante :

$$\mathbf{eth(T)} = \mathbf{a(T)} (\mathbf{T-Tamb}) \quad (\text{II.2})$$

Où **Tamb** est la température ambiante .

La déformation mécanique peut être décomposée en déformation élastique (**ee**) et déformation inélastique (**ein**) :

$$\mathbf{em} = \mathbf{ee} + \mathbf{ein} \quad (\text{II.3})$$

et **ee** est donnée par la loi de **Hooke** (élasticité linéaire) :

$$\mathbf{ee} = \mathbf{s} / \mathbf{E(T)} \quad (\text{II.4})$$

Où **s** est la contrainte mesurée. En plus, **ein** contient deux contributions à températures élevées : une déformation plastique (**ep**), provoquée par des contraintes qui dépassent la limite élastique du matériau (se produit sans activation thermique), et une déformation de fluage (**ec**), thermiquement activée. La séparation de ces deux composants n'est pas toujours évidente, on peut le remarquer dans la figure ci-dessous, où on constate la superposition des déformations relatives à la fatigue thermique ainsi que celles relatives à la fatigue thermo-mécanique.

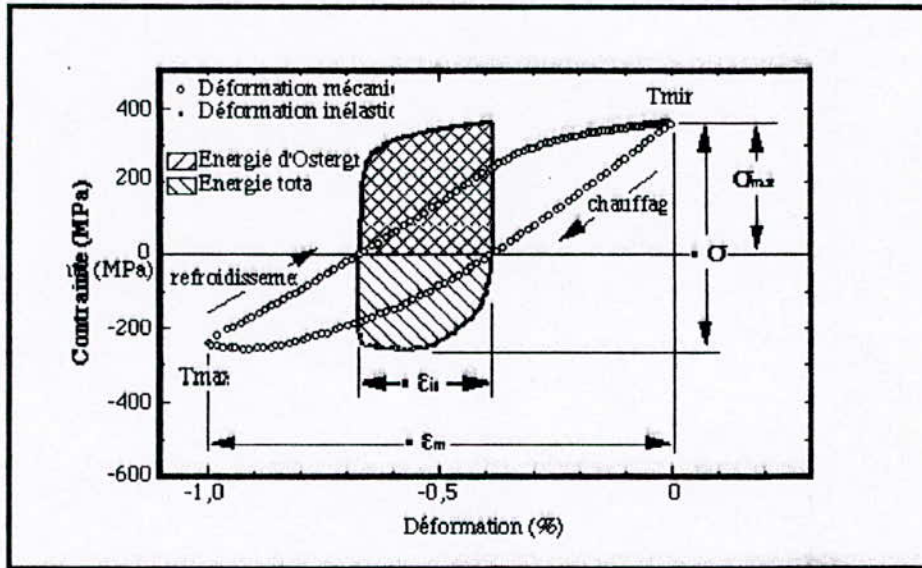


FIGURE II.4 : Exemple de dépouillement d'une boucle d'hystérèse anisotherme [44].

II.3 Essais de fatigue isotherme

Avant les années cinquante, presque toutes les recherches sur la fatigue des métaux étaient menées à température constante [45]. La réalisation d'essais à haute température n'était pas un exploit très difficile. Il suffisait pour cela de modifier une machine d'essai conventionnelle de façon à pouvoir installer un four autour de l'éprouvette. Cette tâche a été simplifiée par l'introduction de systèmes de chauffages par induction [46] ou par résistance (effet Joule) [47]. Il s'agissait d'essais de HCF, où l'amplitude de force ou de déplacement était le paramètre contrôlé.

Apparus dans les années cinquante, les essais de LCF sont effectués avec le contrôle de la déformation imposée. Ils sont plus difficiles à mettre en œuvre car, en plus de l'exigence d'un extensomètre suffisamment sensible, les dispositifs de fixation et d'alignement doivent être de meilleure qualité pour répondre aux charges élevées qui sont atteintes au cours de l'essai. La géométrie de l'éprouvette doit aussi être adaptée pour éviter le flambage pendant la partie compressive du cycle, surtout à températures élevées.

Chronologiquement, les études en LCF isotherme ont commencé après ceux de fatigue anisotherme. Toutefois, grâce à sa simplicité, la majorité des données disponibles aujourd'hui sur l'endommagement en fatigue à haute température a été obtenue par des essais isothermes. Ces essais sont très utiles pour étudier l'influence de la température sur les mécanismes d'endommagement par fatigue, ainsi que les effets d'interaction fatigue - oxydation et fatigue - fluage (essais effectués à des fréquences différentes ou avec des temps de maintien). Malgré cela, Les essais isothermes ne peuvent pas simuler les conditions de sollicitations thermiques et mécaniques des structures soumises aux variations de température lors de leur application.

II.4 Essais de fatigue anisotherme

L'étude de l'endommagement des pièces en présence d'un gradient de températures peut être rapportée au moins jusqu'à 1838, la même année que la première publication sur la fatigue par **Albert [6]**. En effet, au cours de cette année, le chercheur français **Duhamel [48]** publia les premières équations pour le calcul des contraintes générées dans un corps dues à un gradient thermique. Les études sur la rupture provoquée par choc thermique ont débuté vers la fin du siècle passé [45]. Ces études étaient menées surtout sur des matériaux fragiles comme les céramiques et les verres.

La première fois que le problème de fatigue anisotherme a été associé aux métaux semble avoir été en 1915, par le chercheur russe **D. K. Chernov [49]**, qui a étudié les causes de la fissuration dans les tubes de fusils. Il a suggéré que les fissures étaient provoquées par la répétition de chocs thermiques à la surface des tubes, qui généraient un gradient de contraintes à travers son épaisseur. Dans certains cas, la contrainte maximale à la surface dépassait la limite d'élasticité et la répétition de ces déformations cycliques menait à la défaillance du matériau [50].

Il a fallu attendre jusqu'à 1944 pour que l'expression "fatigue thermique" soit introduite, dans un article en anglais intitulé *Thermal fatigue of metals* [51], par les chercheurs **W. Boas et R. W. K.**

Honeycombe. L'étude portait sur la fissuration d'échantillons d'étain, de cadmium, de zinc et de plomb soumis à des cycles thermiques entre 30-150°C. Ils ont observé qu'à l'exception du plomb, des signes de déformation plastique apparaissaient sur la surface des échantillons pendant l'essai, même après un seul cycle. Cela est expliqué par l'anisotropie du coefficient d'expansion thermique des trois autres alliages (métaux de structures non cubiques). L'emploi de l'expression "fatigue thermique" a été suggéré par analogie à l'endommagement (par fatigue) provoqué par la répétition de contraintes externes.

Des études de fatigue à températures élevées sous contrôle de déformation étaient rares et onéreuses jusqu'à 1953, date à laquelle **L. F. Coffin Jr.** et **R. P. Wesley** ont présenté une machine simple conçue pour la réalisation d'essais de fatigue anisotherme [47]. Le principe de l'essai développé consistait à chauffer et à refroidir uniformément une éprouvette tubulaire rigidement fixée aux extrémités. Comme le mouvement axial de l'éprouvette est complètement empêché ($\Delta\epsilon_{tot} = 0$), toute la dilatation thermique se transforme en déformation mécanique ($\Delta\epsilon_{em} = \Delta\epsilon_{eth}$). C'était la première fois qu'un essai de "fatigue thermo-mécanique" était effectué. En effet, l'absence de gradients thermiques fait que les contraintes générées dans l'éprouvette soient d'origine exclusivement externe. La limitation de ce dispositif est le fait que l'amplitude de déformation ne soit pas indépendante de la variation de la température (en plus, la forme du cycle est toujours du type *out-of-phase*). Ce travail pionnier a marqué le début des recherches intensives en fatigue anisotherme.

Les études effectuées par **Coffin** [42, 52] ont permis d'établir que la durée de vie en fatigue anisotherme était une fonction exponentielle de l'amplitude de déformation plastique. **S. S. Manson**, dans un travail indépendant, est arrivé à la même conclusion. La relation suivante, connue comme l'équation de **Manson - Coffin**, est encore le critère le plus utilisé de nos jours pour la prédiction de vie en LCF et en fatigue anisotherme :

$$\Delta\epsilon_{ein} = C (Nf)^m \quad (II.5)$$

En 1958, **E. Glenny *et al.* [55]** ont proposé d'étudier l'endommagement en fatigue anisotherme dans des conditions plus proches de celles rencontrées par les aubes de turbines lors du service. Ils ont utilisé des éprouvettes en forme de disque ayant la section conique pour s'approcher de la géométrie des aubes. Les éprouvettes étaient immergées alternativement dans deux bains à des températures différentes. Les gradients thermiques ainsi générés (à cause de la géométrie particulière des éprouvettes) entraînaient des contraintes internes (aucune contrainte externe n'était appliquée). Ce dispositif d'essai est à l'origine des essais de "fatigue thermique".

Les années soixante ont été marquées par l'épanouissement des études de fatigue anisotherme et par le développement de différentes méthodes expérimentales [54, 55]. La majorité de ces études a été influencée par le travail pionnier de **Coffin**. Des modifications du dispositif proposé par **Coffin**[42] ont été suggérées de façon à permettre l'évaluation de différentes conditions de sollicitations thermo-mécaniques. En 1961, **S. Taira *et al.* [56]** ont modifié le dispositif d'essai de Coffin pour effectuer des essais en présence d'une contrainte moyenne de traction, et en 1964 **Y. F. Balandin** et **A. V. Gubinont** ont également travaillé dans ce sens [57].

En 1963, **M. Kawamoto *et al.* [58]** ont développé une machine d'essai qui permettait l'application de cycles de déformation indépendamment du cycle de température. Le principe de fonctionnement de cette machine était complètement mécanique et la forme des cycles thermo-mécaniques était définie par la géométrie des cames qui commandaient les contrôles de déformation et de température. Un système similaire très complexe a été conçu par **A. I. Ivanov** et **B. F. Trakhtenberg** en 1967 [59].

D'autres chercheurs se sont intéressés à l'étude de l'endommagement dans des conditions vraiment très proches des conditions réelles. On peut citer comme exemple les dispositifs d'essai développés par **M. J. Donachie Jr. *et al.* [60]** et par **G. N. Tret'yachenko *et al.* [61]** en 1967. Dans les deux cas, les éprouvettes utilisées possédaient des géométries identiques à des aubes réelles et le chauffage était effectué par le gaz expulsé d'un prototype de turbine placé devant les éprouvettes. Des conditions très réalistes de chargement ont pu ainsi être reproduites, particulièrement en ce qui concerne l'endommagement à la surface par corrosion et par érosion.

Les essais de fatigue thermo-mécanique ont évolué vers des techniques de plus en plus perfectionnées grâce à l'introduction de machines d'essais asservies en boucle fermée [54, 62].

L'emploi d'ordinateurs dans les laboratoires de recherche à partir de la moitié des années septante a été le facteur décisif pour permettre la réalisation d'essais très souples et entièrement automatisés. En effet, l'utilisation d'un ordinateur permet le contrôle indépendant et simultané de consignes de déformation et de température. Le dispositif d'essai de FTM présenté par S. W. Hopkins en 1976 [63] en est un exemple et a servi de base pour la majorité des dispositifs d'essais utilisés de nos jours.

II.4.1 Méthodes d'étude en fatigue anisotherme

D'une manière générale, les objectifs suivants sont poursuivis par les chercheurs qui travaillent dans le domaine de la fatigue anisotherme [64] :

- Compréhension des mécanismes d'amorçage et de propagation de fissures sous l'influence d'un gradient de température (changement de la microstructure ou des phases, génération de contraintes internes aux interfaces, etc.). C'est l'intérêt primordial des scientifiques dans le domaine des sciences des matériaux en recherche fondamentale.
- **Développement de modèles mathématiques pour la prédiction de durées de vie** et pour l'obtention de lois de comportements sous conditions de fatigue anisotherme. C'est le domaine de recherche des ingénieurs mécaniciens de projet. Idéalement, les recherches fondamentales devraient être menées de telle sorte à permettre le développement de modèles basés sur les mécanismes d'endommagement.

La figure ci-après (**figure II.5**), montre la différence entre l'étude de la FT et l'étude de la FTM.

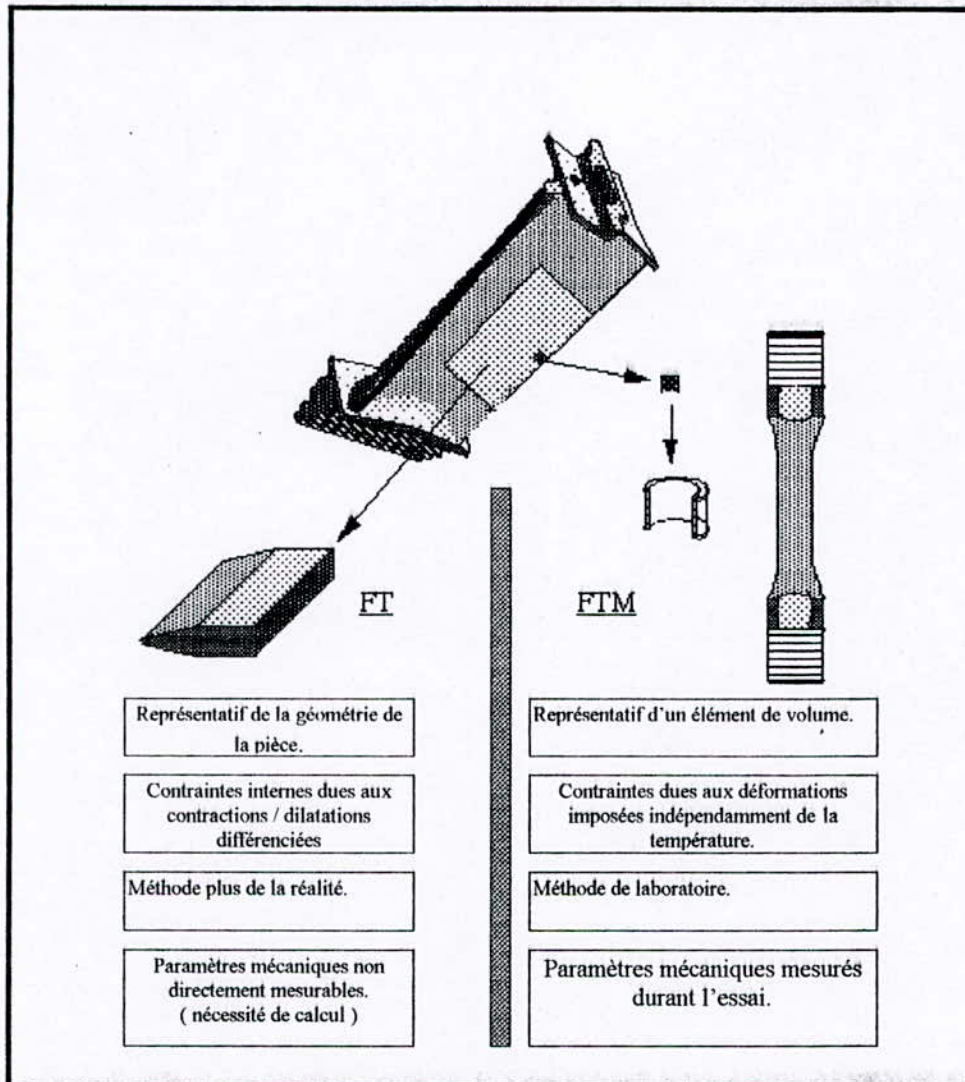


Figure II.5 : Méthodes d'essai en fatigue anisotherme.

L'essai de fatigue thermique (FT)

Il consiste à soumettre une éprouvette de géométrie complexe, se rapprochant généralement de la pièce à étudier, à des cycles de chauffage et de refroidissement alternés rapides. Des gradients de température s'établissent dans ces éprouvettes, conduisant à des effets de dilatations/contractions

différenciées transitoires au sein de celles-ci. Par ce mécanisme, des déformations mécaniques et des contraintes d'origine thermique se créent. La sévérité de l'essai est contrôlée par la géométrie de l'éprouvette, par l'amplitude des cycles de température et par les vitesses de chauffage et de refroidissement.

Cette méthode permet donc une simulation assez réaliste du fonctionnement en service d'une pièce réelle. Toutefois, jusqu'à maintenant, les paramètres mécaniques (contrainte et déformation) n'ont pas directement été mesurés, mais calculés. Il faut donc disposer d'un programme de calcul thermique et de structure en utilisant une méthode d'analyse numérique et une loi de comportement aussi réaliste que possible.

II.5 Les contraintes thermiques

Les variations de températures entraînent des variations dimensionnelles du matériau. Par conséquent, lorsque le matériau n'est pas libre de se dilater ou de se contracter, il se trouve soumis à des contraintes thermiques. Ces contraintes sont dues aux gradients de déformation qui se développent dans un solide dont tous les éléments sont incapables de se déformer librement.

Considérons un élément de longueur l_0 , situé au cœur d'un solide encastré à ses extrémités.

Supposons que ce solide subisse une trempe entraînant une variation de température $\Delta\theta$, c'est à dire que sa température chute brusquement d'une valeur θ_1 à une valeur θ_2 ($\Delta\theta = \theta_1 - \theta_2$). Lorsque le solide est libre de se contracter, l'accroissement relatif ε de l'élément est déterminé par la relation [66] :

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \alpha \Delta\theta \quad (\text{II.6})$$

Où α est le coefficient de dilatation linéique du matériau .

Puisque les extrémités du solide ne sont pas libres de se déplacer, la contraction thermique de l'élément ne peut pas se produire ; l'élément est donc soumis à une contrainte de traction et, d'après la loi de **HOOKE** généralisée, l'amplitude $\Delta\sigma_0$ de cette contrainte est :

$$\Delta\sigma_{\theta} = \frac{E\varepsilon}{(1-\nu)} \quad (\text{II.7})$$

Où ν est le coefficient de **POISSON** du matériau.

En combinant les deux premières équations, on obtient :

$$\Delta\sigma_{\theta} = \frac{E\alpha\Delta\theta}{(1-\nu)} \quad (\text{II.8})$$

Cette relation est valable pour un élément situé au cœur du solide, c'est à dire un élément soumis à des déformations planes.

De façon générale, lorsqu'un élément peut se déplacer plus ou moins librement dans une direction (par exemple, un élément situé près de la surface libre), l'amplitude $\Delta\sigma_{\theta}$ de la contrainte thermique est donnée par la relation :

$$\Delta\sigma_{\theta} = \frac{E\alpha\Delta\theta}{f(\nu)} \quad (\text{II.9})$$

Où $f(\nu)$ est une fonction du coefficient de **POISSON** ; fonction dont la valeur dépend de la géométrie de la pièce.

L'équation **II.9** n'est valable que lorsque la variation de température est infiniment rapide, ce qui est extrêmement rare, mais pour des raisons de simplifications, on opte le plus souvent pour la température moyenne du corps en question et donc pour la relation **II.8**.

Dans notre cas, nous considérons une pièce multicouches, traité d'une manière unidimensionnelle, dont les degrés de liberté sont éradiqués comme le montre le schéma de la procédure expérimentale.

REMARQUES :

- Concernant les contraintes thermiques, et pour des raisons de simplifications, on a opté pour l'hypothèse de **D.j.Smith [65]** dans le cas des plaques, la fonction $f(\nu)$ s'écrit :

$$f(\nu) = 1-\nu \quad (\text{II.10})$$

- On peut remarquer que la plupart des exemples traités concernent surtout le domaine aéronautique, cela est dû simplement que le phénomène en question était étudié en premier lieu à cause des accidents d'avions comme on l'a bien détaillé en préface.

En guise de synthèse, on peut retenir que :

La fatigue thermique en tant que phénomène, est très complexe et cette complexité est imputée à la difficulté qu'on trouve pour dissocier le phénomène en question des autres phénomènes annexes, comme la fatigue thermo-mécanique, le fluage et l'oxydation.

L'ordre chronologique des résultats trouvés par des chercheurs très connus, ne montre pas seulement l'importance de ce phénomène mais aussi la difficulté de quantifier l'endommagement par la fatigue thermique. D'autre part, on peut distinguer que la plupart des études ont été menées dans un axe principal qui est le développement des dispositifs expérimentaux.

Bien que notre étude soit purement numérique, nous nous sommes étalés sur des analyses telles que les boucles d'hystérésis ainsi que les autres phénomènes de fatigue à haute température, à titre facultatif. Ceci nous permet de balayer tout ce qui est en rapport avec notre étude et de mieux comprendre ce phénomène ainsi que de faire la différence entre les différents types d'endommagement, qui n'est guère évidente dans certains ouvrages.

On peut donc dégager les points suivants, qu'on estime importants de les évoquer :

- L'endommagement par fatigue thermique est le résultat d'un cyclage thermique conduisant à des déformations transitoires qui vont causer un amorçage - propagation de fissures ou bien favoriser la propagation de celles-ci, si elles existent initialement par suite du procédé d'élaboration par exemple.
- On peut alors déceler une relation entre la FT et la FTM, cette relation réside dans la déduction des contraintes thermiques par la FT consécutivement à un essai de FTM très simple qui consiste

à éradiquer les degrés de liberté de l'échantillon en question, afin de convertir ces contraintes qui sont bien entendu internes en des contraintes externes.

C'est la meilleure approche qu'on puisse faire afin de mieux quantifier l'endommagement par FT.

Troisième chapitre

Formulation mathématique

FORMULATION MATHÉMATIQUE

III.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, on a mis en évidence le phénomène de la fatigue thermique, on pourra déduire que la quantification du dommage par la fatigue thermique n'obéit pas à une formulation simple, plutôt complexe, étant donné qu'elle est basée sur plusieurs paramètres, et nécessitant plusieurs méthodes de calculs :

- D'abord il faut établir la formulation du transfert de chaleur, en régime variable, et d'une manière périodique, ceci pourra se faire par une méthode des accroissements finis et dans le cas unidimensionnel, ce choix sera justifié plus loin.
- Il faut aussi établir une formulation afin de vérifier l'état de l'interface (ou des interfaces), pour cela la méthode des déplacements discontinus est la plus appropriée.

On pourra dire que :

Notre étude numérique est basée sur deux volets :

- **Le transfert de chaleur** : qui est simulé par la méthode des accroissements finis.
- **L'état de l'interface** : on entend par ceci, le décollement du revêtement ou la (les) couche(s) après un cyclage thermique.

Pour ce volet, on a opté pour la méthode des éléments aux frontières, et plus précisément celle des discontinuités des déplacements.

III.2 Hypothèses

Compte tenu de la complexité de l'étude du décollement de l'interface par fatigue thermique on s'est proposé de mener cette étude comme suit :

- Réduire l'étude au cas unidimensionnel , ce choix est fondé sur :
 - l'hypothèse que le décollement se fait totalement, donc on suppose que les milieux étudiés sont totalement isotropes, élastiques, ce cas (unidimensionnel) est valable pour les parois des fours par exemple ou pour les pistons dont les têtes sont céramisées et dont l'attaque par un flux de chaleur est **unidimensionnelle**.
 - la fatigue thermique est en fait un phénomène généralisé dans un même multimatériau, cependant l'étude d'une portion de ce dernier nous permet d'affirmer qu'elle est crédible et représentative du point de vue résultats (voir quatrième chapitre).

- **Choix des matériaux** : cette étude est valable pour les matériaux à basse affinité vis à vis de l'oxygène afin d'éviter l'interaction fatigue thermique / oxydation ; et les matériaux à densité relativement basse ou les matériaux qui ne contiennent pas de déformation plastique, ou qui résistent au fluage , ou les matériaux pour lesquels le phénomène du fluage apparaît à des températures très hautes par rapport aux températures d'utilisation (tel que les céramiques), afin d'éviter l'interaction fatigue thermique / fluage.

Evidemment, ces matériaux doivent être isotropes afin de pouvoir utiliser des constantes caractéristiques telles que la diffusivité, la densité ... etc.

Dans le cas des matériaux dont la rupture est causée dans un stade plastique, **Irwin [39]** a établi une théorie dans laquelle, il a introduit la notion de la fissure équivalente, c'est à dire jouer tout simplement sur le champs de contraintes pour lequel la fissure en question est soumise (dans le domaine plastique) et on les change de telle façon à revenir à l'état élastique.

Remarque : Le lecteur est avisé sur le fait que l'établissement d'un formalisme mathématique d'une fissuration dans le domaine plastique est très complexe.

- **Module d'élasticité, coefficient de poisson, densité** : constants

En fait en cours d'un transfert de chaleur, les constantes citées ci dessus peuvent changer, mais puisque le transfert de chaleur n'est pas prolongé mais plutôt alterné, on pourra faire cette supposition (ces coefficients sont constants) [66].

III.3 Transfert de chaleur en régime variable

III.3.1 Convection

La convection est un transport de chaleur par le mouvement d'un fluide. La conduction et le rayonnement n'impliquent aucun mouvement visible de matière ; au contraire, la convection a pour cause un courant de fluide [66,67].

Soit un corps solide, dont une paroi plonge dans un fluide (liquide ou gaz) ; soit θ_1 la température de la surface solide et soit θ_2 la température du fluide prise à une certaine distance de la paroi . Supposons, pour fixer les idées, que le solide soit plus chaud que le fluide dans lequel il est plongé. Les couches du fluide qui sont en contact avec la paroi s'échauffent ; le courant liquide ou gazeux les entraîne, et elles vont chauffer les autres parties du fluide . Ces couches sont remplacées par d'autres, qui s'échauffent à leur tour, et ainsi de suite. Les choses se passent en séries si le fluide est plus chaud que la paroi.

Il faut distinguer plusieurs cas, selon le mécanisme qui donne lieu au mouvement du fluide.

1) En l'absence de toute agitation (*on a opté pour ce cas*) due à une cause mécanique extérieure, c'est à dire en air ou liquide calme, les courants sont produits uniquement par les différences de température elles-mêmes qui engendrent des différences de densité et par suite des «courants de gravité ». Ces courants sont facilement mis en évidence en chauffant par le fond un vase plein d'eau tenant en suspension de petites corpuscules.

La convection ainsi produite est désignée sous le nom de *convection naturelle* ; elle existe toutes les fois qu'un corps chaud est placé dans l'air ou lorsqu'on chauffe un liquide dans un récipient mis sur le feu ; c'est presque uniquement par elle que l'air d'une pièce est chauffé par un radiateur.

2) Le courant fluide peut être produit (*ou aidé*) par une cause extérieure et indépendante du phénomène thermique ; ce courant peut avoir pour cause une différence de pression artificiellement produite, le mouvement d'une pompe ou d'un ventilateur.

III.3.2 Conduction

La conduction est un phénomène au moyen duquel la chaleur s'écoule à l'intérieur d'un milieu (solide, liquide ou gaz) d'une région à haute température vers une autre à basse température ou entre différents milieux mis en contact. Dans l'écoulement de chaleur par conduction, l'énergie se propage par contact direct des molécules sans un déplacement appréciable des molécules. Conformément à la théorie cinétique, la température d'un élément de matière est proportionnelle au coefficient de l'énergie cinétique des molécules qui la constituent. L'énergie accumulée dans un élément de matière, en vertu de la vitesse et des positions relatives des molécules, est appelée, *énergie interne*. Ainsi, plus les molécules se déplacent rapidement et plus grand sera aussi bien la température que l'énergie interne de l'élément. Lorsque dans une région les molécules acquièrent une énergie cinétique moyenne plus grande que celle des molécules d'une région adjacente, comme cela se manifeste par une différence de température, les molécules possédant la plus grande énergie transmettent aux molécules de la région à basse température une fraction de leur énergie. Le transfert d'énergie peut s'effectuer par contact élastique (par exemple dans les fluides) ou par diffusion des électrons à partir d'une région à haute température vers une région à basse température (par exemple dans les métaux). Indépendamment du mécanisme exact qui n'est entièrement compris, l'effet observable de la conduction de chaleur est l'égalisation de températures. Cependant, si les différences dans les températures sont maintenues en différents points par l'apport ou l'évacuation de chaleur, il s'établit un écoulement continu de chaleur de la région chaude à la région froide.

III.3.3 Convection et conduction dans un régime variable

Notre étude du transfert de chaleur est basée sur la conduction, la convection est en rapport comme étant une condition des points à la surface. Pour commencer, il faut définir le transfert de chaleur en régime variable.

L'équation générale du transfert de chaleur par conduction, dans le cas unidimensionnel est donnée par la relation :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{III.1})$$

L'expérience montre que l'on peut classer les corps, du point de vue de leurs comportement thermique, en *corps minces et corps épais* à l'aide d'un critère proposé par **Biot [39]**. Pour les corps minces ou plus généralement pour *les systèmes thermiques minces*, la température peut y être considérée comme uniforme. Elle ne dépend pas alors que du temps. Tandis que pour les *systèmes épais* la température est fonction du point considéré et du temps.

Dans cette étude, on traitera le modèle des corps épais.

Considérations

On considère un échantillon porté initialement à une température T_0 qui est attaqué par un flux de chaleur par convection de l'air, porté à une température T_{\max} . On suppose aussi que l'interface corps / air n'atteint la température T_{\max} qu'après un bout de temps, c'est à dire écarter le cas instantané, qui s'avère presque inexistant dans la réalité.

Le transfert s'établit pour une durée t_1 et les températures atteintes sont alors considérées comme des températures initiales pour la deuxième phase qui est le refroidissement, en effet l'air est maintenant refroidit à une température T_{\min} pendant un temps t_2 .

Ces conditions sont des conditions aux limites qui concernent le cyclage uniquement, cependant il existe une condition de continuité, qui régit le multimatériau en question, on doit donc supposer que l'interface possède une seule température sinon (si cette condition

n'est pas vérifiée), on peut dire qu'on n'a pas une continuité, et donc les couches sont séparées.

III.4 Les méthodes numériques

Comme c'est indiqué en introduction, notre étude numérique est basée sur deux méthodes :

III.4.1 Méthode des accroissements finis et transfert de chaleur en régime variable

La méthode graphique est largement utilisée en industrie pour résoudre les problèmes de conduction en régime variable, car elle donne une image continue du changement de la répartition des températures ; ses constructions peuvent être confiées à un personnel relativement inexpérimenté, et les erreurs, si elles se présentent sont rapidement découvertes. Cependant, pour les calculs précis, spécialement lorsque les variations des propriétés physiques avec la température sont importantes, une méthode numérique devrait être utilisée à la place de la méthode graphique. Les méthodes numériques sont particulièrement commodes lorsqu'on dispose d'un commutateur digital à vitesse élevée, car dans ce cas les étapes qui interviennent dans la solution numérique peuvent être programmées sans difficultés.

La méthode numérique résolvant les problèmes de conduction en régime variable diffère de celle qui est utilisée en régime établi. Dans ce dernier cas la répartition des températures dans un corps pouvait être obtenue, pour un réseau de points, en résolvant un système d'équations relatives aux résidus variables, la répartition initiale des températures est connue, mais sa variation en fonction du temps doit être déterminée.

Il est par conséquent, nécessaire de déduire la nouvelle répartition des températures à partir d'une répartition antérieure connue.

Pour illustrer la méthode numérique, il faut d'abords transformer l'équation différentielle relative à une répartition des températures dans un solide où la chaleur s'écoule par conduction en régime variable en une équation à accroissement fini. Partant de l'équation suivante :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q}{k} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{III.2})$$

On remplace la première et la seconde dérivée par des termes appropriés d'une forme d'accroissement finis.

En prenant le cas général de la conduction tridimensionnel dans un système homogène, l'équation III.2 peut être mise sous forme d'une équation à accroissement finis :

$$\frac{T_1^t + T_3^t - 2T_0^t}{\Delta x^2} + \frac{T_2^t + T_4^t - 2T_0^t}{\Delta y^2} + \frac{T_5^t + T_6^t - 2T_0^t}{\Delta z^2} + \frac{q_0^t}{k} = \frac{1}{a} \frac{T_0^{t+\Delta\theta} - T_0^t}{\Delta\theta} \quad (\text{III.3})$$

Dans lesquelles $T_0^t, T_1^t, T_2^t \dots$ etc, sont les températures aux nœuds 0,1,2... etc aux temps θ ,

$T_0^{t+\Delta\theta}$ est la température au nœud 0 après un intervalle de temps $\Delta\theta$ et q_0^t est la quantité d'énergie locale par unité de volume engendrée au nœud 0 au temps θ . Si l'on pose $\Delta x = \Delta y = \Delta z$, l'équation (III.3) devient :

$$T_1^t + T_2^t + T_3^t + T_4^t + T_5^t + T_6^t - 6T_0^t + \frac{q_0^t \Delta x^2}{k} = M(T_0^{t+\Delta\theta} - T_0^t) \quad (\text{III.4})$$

avec $M = \frac{\Delta x^2}{a\Delta\theta}$.

En résolvant l'équation III.4 par rapport à l'inconnue $T_0^{t+\Delta\theta}$, on obtient :

$$T_0^{t+\Delta\theta} = \frac{1}{M}(T_1^t + T_2^t + T_3^t + T_4^t + T_5^t + T_6^t) + \left(1 - \frac{6}{M}\right)T_0^t + \frac{q_0^t \Delta x^2}{kM} \quad (\text{III.5})$$

Les relations suivantes correspondent pour les systèmes à deux et à une dimension sont respectivement :

$$T = \frac{1}{M}(T_1 + T_2 + T_3 + T_4)^t + \left(1 - \frac{4}{M}\right)T_0^t + \frac{q_0}{kM} \quad (\text{III.6})$$

$$T_0^{t+1} = \frac{1}{M} (T_1 + T_2)^t + \left(1 - \frac{2}{M}\right) T_0^t + \frac{q_0 \Delta x^2}{kM} \quad (\text{III.7})$$

Si la répartition des températures au temps θ est connue, **les équations III-5 à III.7** peuvent être utilisées pour donner la température au nœud 0 après l'écoulement d'un intervalle de temps. Le même procédé est appliqué à tous les points du réseau $\theta + \Delta\theta$ à partir de la répartition connue au temps. Pour un système unidimensionnel en régime variable, **l'équation III.7** s'écrit pour n'importe quel nœud interne sous la forme :

$$T_n^t = \frac{1}{M} (T_{n+1}^t + T_{n-1}^t) + \left(1 - \frac{2}{M}\right) T_n^t \quad (\text{III.8})$$

Avec cette équation, on désigne la température dans la section n à l'instant $\theta = (t+1) \Delta\theta$ à partir des températures des sections $(n+1)$, n , et $(n-1)$ à l'instant $\theta = t$.

Comme il est mentionné antérieurement, les dimensions du réseau choisi dans un système donné influent sur la précision des calculs relatifs aux accroissements finis et par conséquent sur la précision du résultat.

Plus les divisions sont petites, meilleure sera la précision, par contre le travail exigé deviendra plus long.

Dans **l'équation III.8**, les coefficients de T_{n+1}^t et T_{n-1}^t , les températures « actuelles » des nœuds adjacents au nœud dont on cherche sa « nouvelle » température sont positifs quel que soit la valeur de M . Par contre, le coefficient de T_n^t serait négatif si l'intervalle de temps $\Delta\theta$ avait été choisi relativement grand de façon que M soit inférieur à deux. Si le coefficient de température « actuelle » au nœud n était négatif, **l'équation III.8** impliquerait que plus la température T_n est élevée au temps et plus basse elle sera après un temps écoulé égal.

Ceci est une contradiction avec les principes de thermodynamique et conduit à des instabilités dans la solution numérique. Il existe de nombreux critères pour la stabilité des solutions numériques des équations aux dérivées partielles, mais pour des buts pratiques, on peut simplement utiliser la règle suivant laquelle le coefficient négatif doit être évité par un choix

convenable de $\Delta\theta$ et de Δx . Cette règle indique que pour les points internes d'un réseau relatif à la conduction en régime variable, la solution numérique est convergente si :

$M \geq 2$ pour les cas unidimensionnels

$M \geq 4$ pour les cas bidimensionnels

$M \geq 6$ pour les cas tridimensionnels

En conséquence, un choix de M , pour un réseau de nœuds, limite supérieurement la valeur admissible de l'intervalle de temps.

Les échanges d'énergie entre un système et le milieu environnant s'effectuent dans beaucoup de problèmes pratiques par convection ou par rayonnement.

Pour de tels problèmes, les conditions à la surface sont un peu plus compliquées que dans les systèmes où seule la conduction rentre en jeu et les conditions aux limites doivent être exprimées par des équations à accroissement finis lesquelles sont différentes des équations pour l'intérieur du système.

On va établir maintenant les équations et les critères de stabilité qui leur sont associées pour les points du réseau situés à la surface et qui seront désignées par «équation des points à la surface».

Si la condition aux limites comporte un transfert de chaleur par convection entre la surface du système et le milieu ambiant de température T_∞ avec une conductance par unité de surface \bar{h}_c , l'équation à accroissement finis pour un nœud situé à la surface, peut être obtenue au moyen du bilan thermique.

Pour étudier le cas général, on admettra que la surface est également soumise à un flux de chaleur q_0 par unité de surface.

Dans un système unidimensionnel d'aire 'A', la masse associée à un nœud situé à la surface peut être représenté par une plaque d'épaisseur $\Delta x / 2$.

En l'absence d'une production interne de chaleur, l'augmentation de l'énergie interne au nœud 0 au cours de l'intervalle de temps entre $\theta = t \Delta\theta$ et $\theta = (t+1) \Delta\theta$ est égale à la quantité de

chaleur transmise vers le nœud pendant le même temps où :

$$\frac{\rho c \Delta x A}{2} \frac{T_0^{t+1} - T_0^t}{\Delta \theta} = \frac{kA}{\Delta x} (T_1^t - T_0^t) + A \bar{h}_c (T_1^t - T_0^t) + q_0 A \quad (\text{III.9})$$

en posant $M = \frac{\Delta x^2}{a \Delta \theta}$

et :

$$N = \frac{h_c \Delta x}{k} \quad (\text{III.10})$$

on obtient après quelques réarrangements :

$$T_0^{t+1} - T_0^t = \frac{2}{M} (T_1^t - T_0^t) + \frac{2N}{M} (T_{\max}^t - T_0^t) + \frac{2\Delta x}{kM} q_0 \quad (\text{III.11})$$

La résolution par rapport à la nouvelle température T_0^{t+1} donne :

$$T_0^{t+1} = \left(1 - \frac{2N+2}{M}\right) T_0^t + \frac{2N}{M} T_{\max}^t + \frac{2}{M} T_1^t + \frac{2\Delta x}{kM} q_0 \quad (\text{III.12})$$

En conclusion :

- comme le transfert de chaleur pour une couche est présent en deux modes : convection et conduction, on peut résumer les procédures et les formules de la manière suivante :
- étant donné que la surface présente un mode de transfert par convection, les températures calculées suivront la formule suivante :

$$T_0^{t+1} = \left(1 - \frac{2N+2}{M}\right) T_0^t + 2 \frac{N}{M} T_{\infty} + \frac{2}{M} T_1^t$$

- étant donné que la transmission de chaleur pour les nœuds internes se fait par conduction uniquement, la formule qu'on utilisera est la suivante :

$$T_n^{t+1} = \frac{1}{M} (T_{n+1}^t + T_{n-1}^t) + \left(1 - \frac{2}{M}\right) T_n^t$$

Remarques

- L'avant dernière formule nous permet de dégager un autre critère de convergence de la méthode et c'est :

$$M \geq N + 2$$

- Le système bien entendu, n'est pas isolé, la deuxième extrémité du multimatériaux possède une température.

III.4.1.1 Transfert de chaleur pour les multicouches

Pour le cas des matériaux multicouches, les couches qui se trouvent après celles qui subissent le transfert de chaleur par convection, subiront un transfert par conduction uniquement avec une condition au limite : (voir la **figure III.1**)

- La température de la dernière division d'une couche est la première de la couche ultérieure (on pourra supposer un nombre infini de couches).

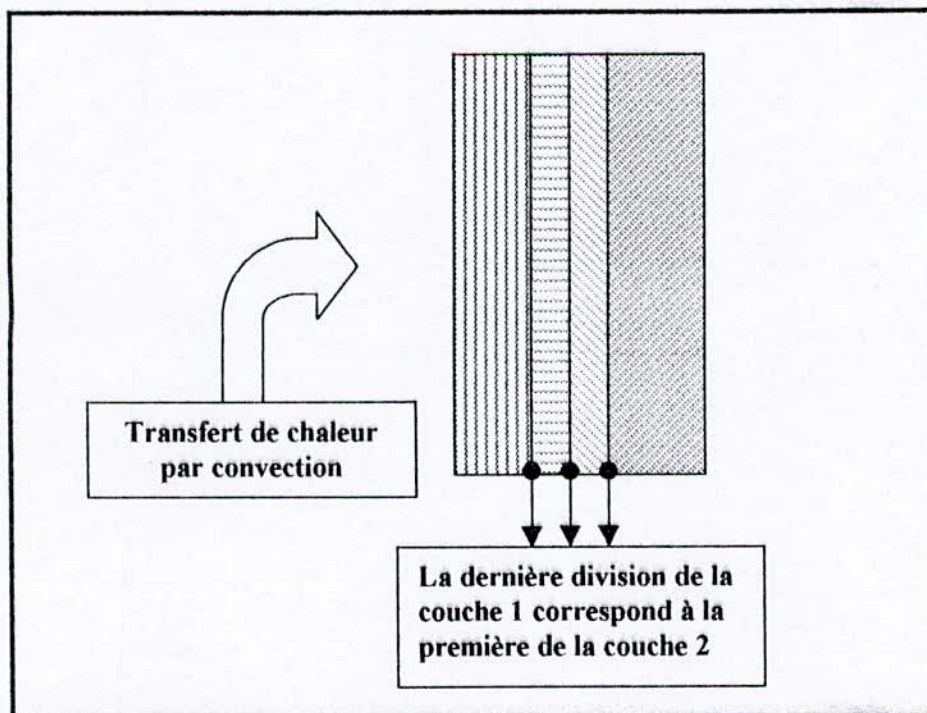


Figure III.1 : Conditions aux limites (frontière) pour un multicouches.

De cette façon , on peut alors , imposer une condition dite de *continuité* , qu'on peut la tirer à partir des flux instantané , c'est à dire l'égalité d'un flux incident lors de sa diffusion à travers deux milieux différents , ceci est présenté dans la **figure III.2** :

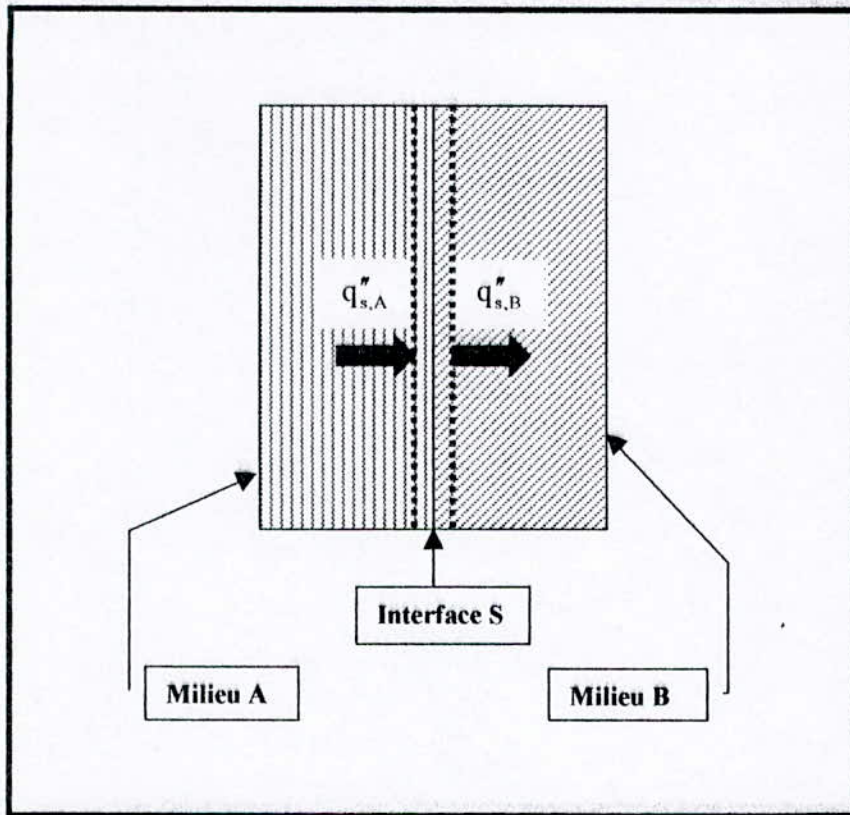


Figure III.2 : Contact interfacial entre deux milieux A et B.

L'équilibre de l'interface, du point de vue température peut être déterminé par l'énergie surfacique comme le montre la figure ci-dessus , et cela mène à :

$$q''_{s,A} = q''_{s,B} \quad (\text{III.13})$$

on remplace chacune des énergies par sa valeur comme suit :

$$\frac{-K_A(T_s - T_{A,i})}{(\pi a_A t)^{1/2}} = \frac{K_B(T_{S,B} - T_s)}{(\pi a_B t)^{1/2}} \quad (\text{III.14})$$

Avec :

a_A et a_B sont les diffusivités des deux milieux A et B.

Résolvant cette équation par rapport à T_s :

$$T_s = \frac{(K\rho c)_A^{1/2} * T_{A,i} + (K\rho c)_B^{1/2} * T_{B,i}}{(K\rho c)_B^{1/2} + (K\rho c)_B^{1/2}} \quad \text{(III.15)}$$

la relation finale serait :

$$T_s^{i+1} = \frac{\frac{K_A}{\sqrt{a_A}} * T_{(A)}^i + \frac{K_B}{\sqrt{a_B}} * T_{(B)}^i}{\frac{K_A}{\sqrt{a_A}} + \frac{K_B}{\sqrt{a_B}}} \quad \text{(III.16)}$$

Avec :

K_A : conductivité du milieu A

K_B : conductivité du milieu B

a_A : diffusivité du milieu A

a_B : diffusivité du milieu B

$T_{(A)}^i$ et $T_{(B)}^i$ sont respectivement la température de l'avant dernière division du milieu A et la température de la deuxième division du milieu B .

III.4.2 Méthode des éléments au frontière et l'état de l'interface (boundary element Method)

L'étude de l'interface est très importante dans le domaine de la fatigue thermique des multimatériaux parce que l'état de cette dernière est l'aboutissement final du phénomène en *question* : après un cyclage thermique répété, on peut assister à un décollement de l'interface (que ce soit celui du revêtement ou des couches d'accrochage).

- au moment de l'élaboration du multimatériau, et compte tenu des différences des coefficients de dilatation, il y a génération de contraintes résiduelles du type « micro » ou « macro », sachant que dans notre étude, on fait introduire les microcontraintes car elles influent sur l'état de l'interface. (ce type de contraintes a été évoqué dans le chapitre I)

Plusieurs méthodes numériques peuvent être adoptées dans ce sens (étude du décollement), parmi elles, il y a la méthode des éléments finis réputée d'être souple et possède un champ d'activités très étendu mais elle présente les inconvénients suivants :

- **quand le domaine devient infini**, alors la MEF n'est pas applicable.
- **quand apparaissent des singularités** en des points où certaines dérivées deviennent **infinies**, alors la solution est grossièrement approchée par des développements polynomiaux.

Ces pour ces raisons techniques, qu'on a opté pour la méthode des éléments en frontières (BEM).

En effet, la BEM est une méthode basée sur la solution analytique d'un problème contenant une singularité. La solution singulière obtenue est utilisée pour construire une solution numérique, pour des problèmes plus compliqués.

La BEM présente également un autre avantage, c'est que la discrétisation concerne uniquement la frontière comme le montre la **figure III.3**.

Le principe de cette méthode est la transformation des équations de volumes en relations intégrales reliant les paramètres connus à ceux inconnus, et donc réduction d'un problème tridimensionnel en un autre bidimensionnel (ou un problème bidimensionnel en un problème unidimensionnel) et ainsi l'obtention de systèmes équations algébriques d'ordre inférieur plus facile à résoudre.

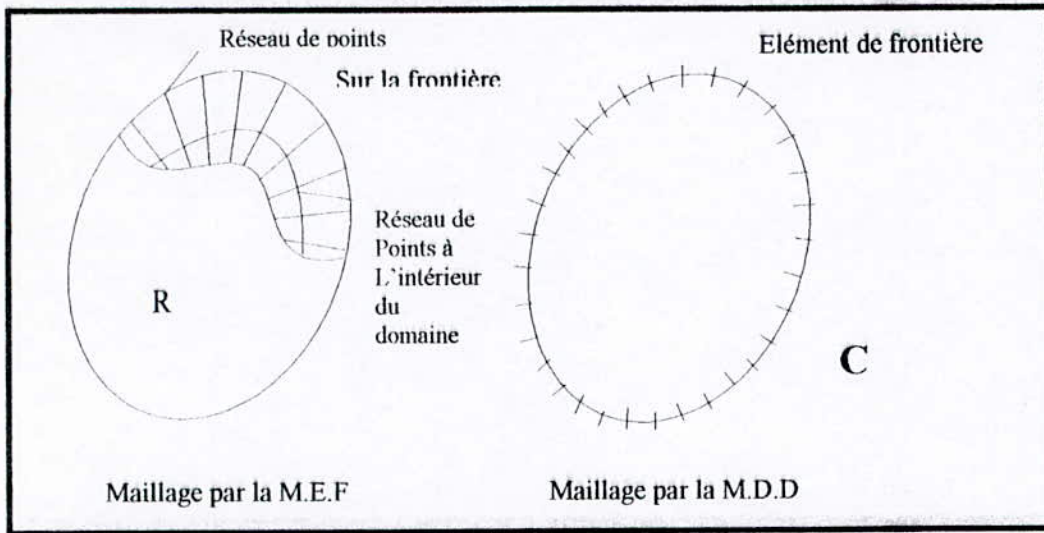


Figure III.3 : maillage avec la MEF et avec la BEM

Pour l'étude d'un multimatériau, on considère le cas le plus simple c'est à dire celui de deux couches :

- dans un multimatériaux, il y a une discontinuité, c'est la frontière ou l'interface. On peut dire qu'in y a deux interfaces ou deux frontières, chacune d'elles est relative à un milieu (ou matériau). Bien entendu chaque matériau est caractérisé par ses coefficient d'élasticité et de poisson.

III.4.2.1 Principe de la méthode

Comme nous l'avons indiqué , cette méthode ne s'intéresse qu'à la frontière , pour pouvoir formuler le problème du décollement , il faut savoir qu'un multimatériau comporte une discontinuité et c'est bien l'interface , à partir de laquelle on trouve deux milieux différents , ainsi notre étude est basée sur l'interface :

Les discontinuités de déplacement de l'interface pourra causer un décollement , pour l'étudier on procède de la manière suivante :

- sachant qu'une interface contient deux frontières relatives aux deux milieux.
- les deux milieux sont différents , que ce soit du point de vue caractéristiques physico-chimique ou (et c'est le plus important) mécanique.
- bien entendu, l'interface avant toute sollicitation est stable et continue.

Ceci nous ramène à déterminer les conditions de continuité , qui peuvent être exprimées par les relations suivantes : (voir la **figure III.4**)

$$\begin{cases} \sigma_s^{[1]}(Q) = \sigma_s^{[2]}(Q) \\ \sigma_n^{[1]}(Q) = \sigma_n^{[2]}(Q) \\ u_s^{[1]}(Q) = u_s^{[2]}(Q) \\ u_n^{[1]}(Q) = u_n^{[2]}(Q) \end{cases} \quad \text{(III.17)}$$

Avec :

- $\sigma_s^{[1]}$ et $\sigma_s^{[2]}$ sont les contraintes tangentielles appliquées sur les deux frontières '1' et '2' respectivement.
- $\sigma_n^{[1]}$ et $\sigma_n^{[2]}$ sont les contraintes normales appliquées sur les deux frontières '1' et '2' respectivement.
- $u_s^{[1]}$ et $u_s^{[2]}$ sont les déplacements tangentiels selon les deux frontières '1' et '2' respectivement.
- $u_n^{[1]}$ et $u_n^{[2]}$ sont les déplacements normaux selon les deux frontières '1' et '2' respectivement.
- le signe (-) qui apparaît dans les équations de déplacement est dus à l'opposition des sens des systèmes s_1, n_1, s_2, n_2 le long de l'interface comme le montre la figure ci-dessous.

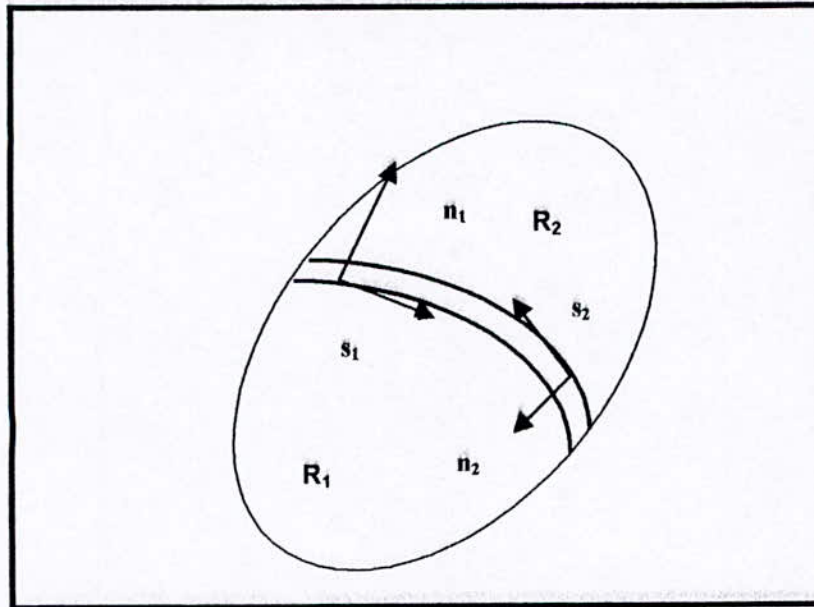


Figure III.4: Corps non homogène comprenant 2 milieux.

Si on divise chaque frontière en éléments de la manière suivante :

- on divise la frontière '1' en N_1 éléments.
- on divise la frontière '2' en N_2 éléments.
- on associe les coefficients de déplacements D_s et D_n pour chacun des milieux (matériaux) sachant que pour le milieu '1', on lui associe les coefficients : $D_s^{[1]}$ et $D_n^{[1]}$. Quant au milieu '2' ça sera $D_s^{[2]}$ et $D_n^{[2]}$.

Pour une raison de simplification et de commodité, on énumère ces éléments comme suit :

- énumérer ces éléments à partir de 1 à N_1 pour la première interface et de N_1+1 jusqu'à N , avec $N=N_1+N_2$.
- Les contraintes tangentielles et normales du i^{em} éléments peuvent être exprimées en fonction des composantes de la discontinuité de déplacement du j^{em} élément comme suit : pour les contraintes sur la frontière '1': [68]

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma^{i[1]} = \sum_{j=1}^{N_1} A_{ss}^{ij(1)} D_s^{j(1)} + \sum_{j=1}^{N_1} A_{sn}^{ij(1)} D_n^{j(1)} \\ \sigma^{i[1]} = \sum_{j=1}^{N_1} A_{ns}^{ij(1)} D_s^{j(1)} + \sum_{j=1}^{N_1} A_{nn}^{ij(1)} D_n^{j(1)} \end{array} \right. \quad i=1, N_1 \quad \text{(III.18)}$$

et celle de la frontière '2' :

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma^{i[2]} = \sum_{j=N_1+1}^N A_{ss}^{ij(2)} D_s^{j(2)} + \sum_{j=N_1+1}^N A_{sn}^{ij(2)} D_n^{j(2)} \\ \sigma^{i[2]} = \sum_{j=N_1+1}^N A_{ns}^{ij(2)} D_s^{j(2)} + \sum_{j=N_1+1}^N A_{nn}^{ij(2)} D_n^{j(2)} \end{array} \right. \quad i = N_1+1, N \quad \text{(III.19)}$$

Avec : A_{ss}^{ij} ... sont les **coefficients d'influence sur les contraintes** dues aux discontinuités de déplacements.

Le caractère élastique des deux matériaux nous permet d'écrire :

- pour les déplacements on peut avoir pour la frontière '1' :

$$\left\{ \begin{array}{l} u_s^{i[1]} = \sum_{j=1}^{N_1} B_{ss}^{ij(1)} D_s^{j(1)} + \sum_{j=1}^{N_1} B_{sn}^{ij(1)} D_n^{j(1)} \\ u_n^{i[1]} = \sum_{j=1}^{N_1} B_{ns}^{ij(1)} D_s^{j(1)} + \sum_{j=1}^{N_1} B_{nn}^{ij(1)} D_n^{j(1)} \end{array} \right. \quad i = 1, N \quad \text{(III.20)}$$

- de même, les déplacements des éléments de la frontière '2' sont obtenus par :

$$\left\{ \begin{array}{l} u_s^{i[2]} = \sum_{j=N_1+1}^{N_1} B_{ss}^{ij(2)} D_s^{j(2)} + \sum_{j=N_1+1}^{N_1} B_{sn}^{ij(2)} D_n^{j(2)} \\ u_n^{i[2]} = \sum_{j=N_1+1}^{N_1} B_{ns}^{ij(2)} D_s^{j(2)} + \sum_{j=N_1+1}^{N_1} B_{nn}^{ij(2)} D_n^{j(2)} \end{array} \right. \quad i = N_1+1, N \quad \text{(III.21)}$$

Les équations (III.12) à (III.16) peuvent se mettre sous la forme d'un système de $2N$ équations à $2N$ inconnues :

$$\left\{ \begin{array}{l} b_s^i = \sum_{j=1}^N C_{ss}^{ij} D_s^j + \sum_{j=1}^N C_{sn}^{ij} D_n^j \\ b_n^i = \sum_{j=1}^N C_{ns}^{ij} D_s^j + \sum_{j=1}^N C_{nn}^{ij} D_n^j \end{array} \right. \quad i=1, N \quad \text{(III.22)}$$

L'élément qui se trouve à la portion libre d'un contour et supposons que ce soit la frontière

'1', cet élément sera soumis à des contraintes qu'on appelle $\sigma = (\sigma_s^i)_0$ et $\sigma_n = (\sigma_n^i)_0$.

Afin de déterminer b_s^i, b_n^i et C_{ss}^{ij} ...etc on passe à l'équation (III.17) et on aura :

$$C_{ss}^{ij} = \begin{cases} A_{ss}^{ij(1)} & \text{si } j=1, N_1 \\ 0 & j=N_1+1, N \end{cases} \quad \text{(III.23)}$$

et de la même manière on pourra calculer les autres coefficients C_{sn}^{ij}, C_{ns}^{ij} et C_{nn}^{ij} .

De même s'il s'agit d'un déplacement.

Pour la détermination des coefficients, on applique les conditions aux limites.

III.5 Etude du décollement

On convertie les gradients de températures en contraintes de sollicitation et on effectue la résolution du système linéaire, on vérifie à chaque fois si :

$$\sigma_n^i \geq 0$$

Cela veut dire qu'il y a un décollement car l'élément i est libre (il n'appartient pas aux deux frontières).

On refait la résolution linéaire jusqu'à obtention de N éléments libres.

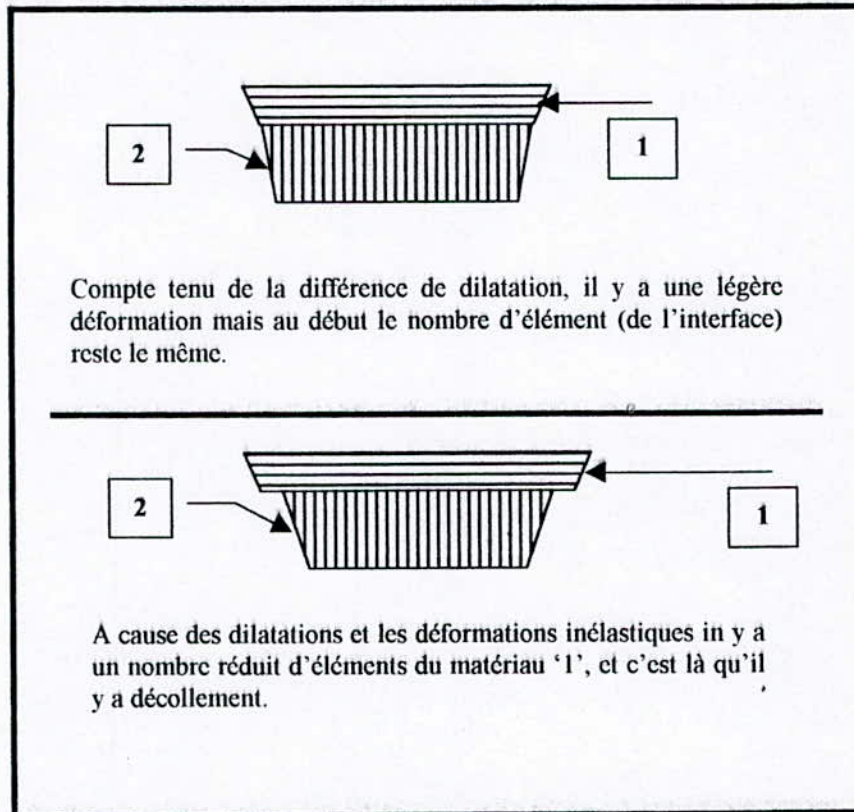
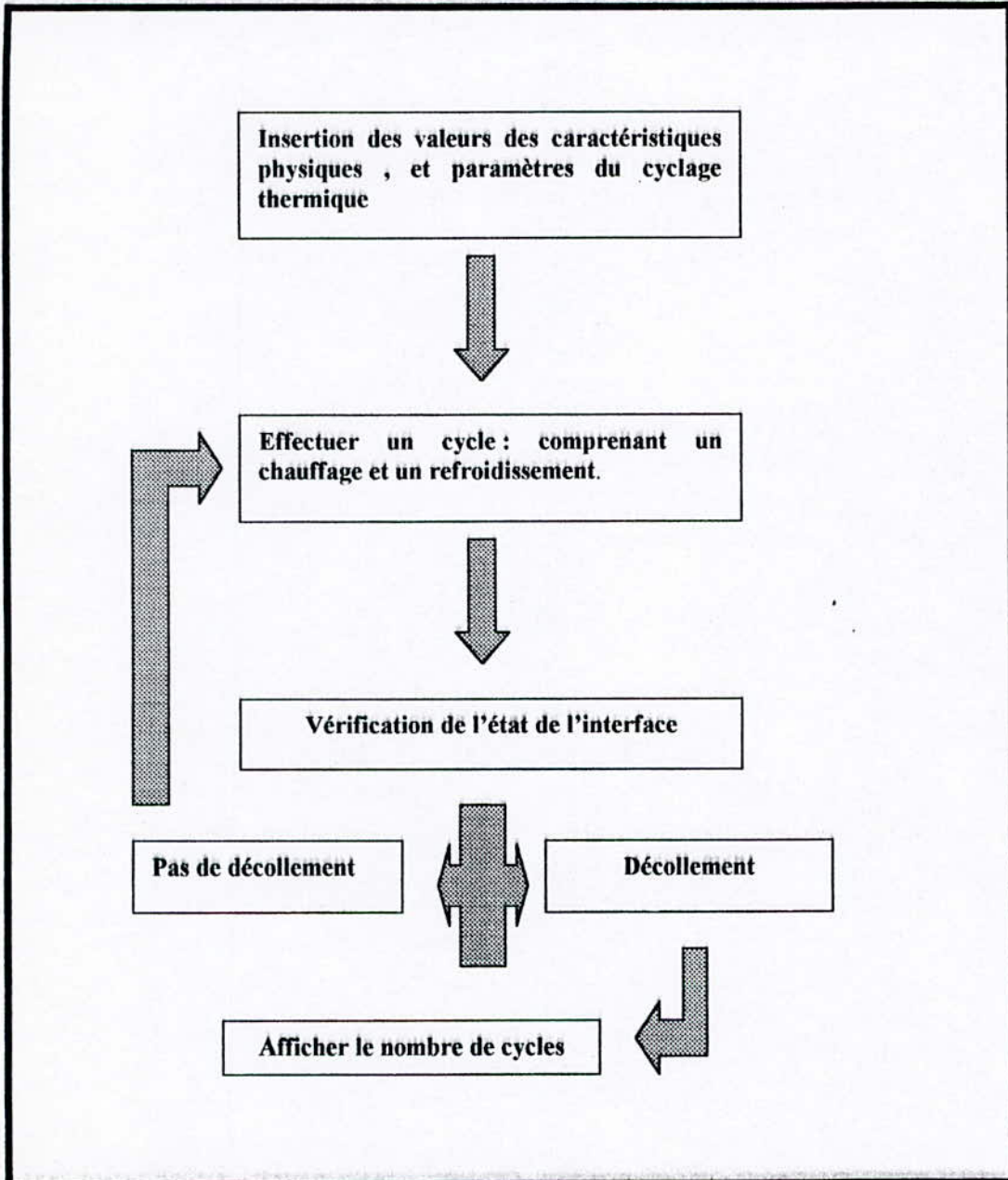


Figure III.5 : La différence du nombre d'éléments est imputée au décollement.

On pourra résumer la conception de notre simulateur comme suit :



Organigramme III.1 : Conception générale du simulateur.

Quatrième chapitre

Simulateur et résultats numériques

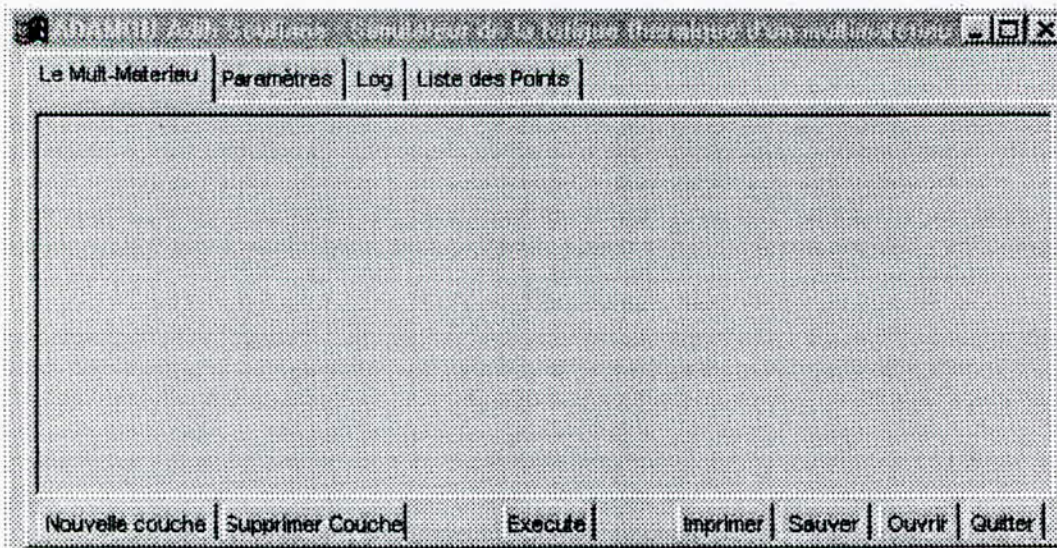
Simulateur et résultats numériques

IV.1 Fiche technique du simulateur

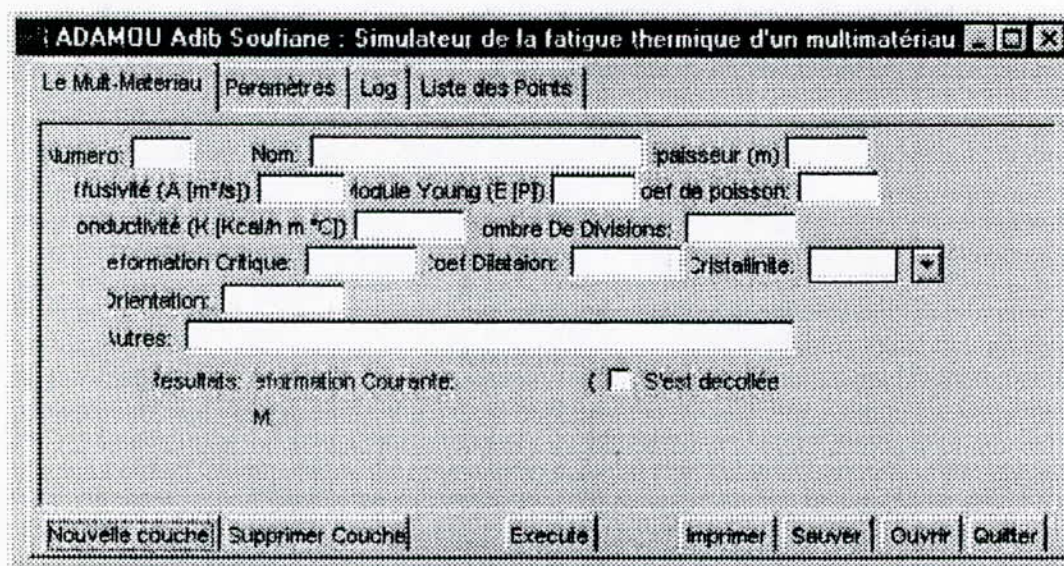
Le simulateur est programmé avec le logiciel de construction **Power Builder®** , ce qui nous offre la possibilité de créer un environnement interactif (Windows) et très facile à gérer, ça consiste en des fenêtres et boutons au lieu de la programmation classique qui présente un inconvénient en la manipulant, du point de vue lisibilité.

IV.1.1 Présentation et utilisation du simulateur

Après avoir lancer le simulateur, il y aura un affichage de la fenêtre suivante :

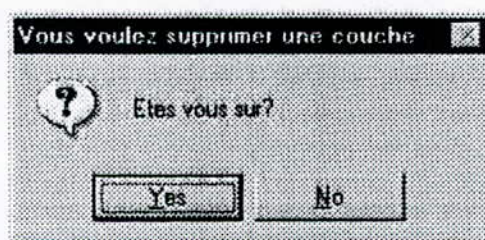


- Nous pouvons distinguer les "Onglet", suivant lesquelles on pourrait insérer nos données avec une grande simplicité. D'ailleurs, commençons par insérer les données concernant les constituants du multimatériau, pour cela on commence par la couche exposée aux sollicitations thermiques, il suffit de cliquer sur 'Nouvelle couche' et on aura la fenêtre suivante :



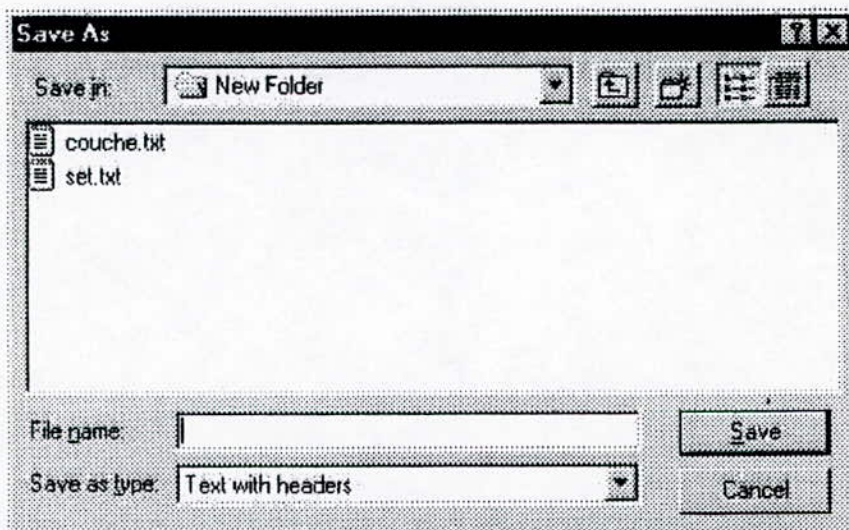
- On s'aperçoit de l'existence de plusieurs onglets et de plusieurs boutons, ils sont soit relatifs aux fonctions d'inférences ou des fonctions annexes.

Pour pouvoir insérer les données relatives aux constituants du multimatériau, il faut cliquer sur '**Nouvelle couche**', plusieurs cases vont apparaître, ces dernières sont attribuées aux caractéristiques du multimatériau, on clique également sur '**Nouvelle couche**' à chaque fois qu'on désire insérer les données d'un autre constituant, on pourrait également supprimer une couche en cliquant sur '**Supprimer couche**', cette commande sera suivie par un message de confirmation, et il appartient à l'utilisateur de confirmer ou de refuser cette commande.

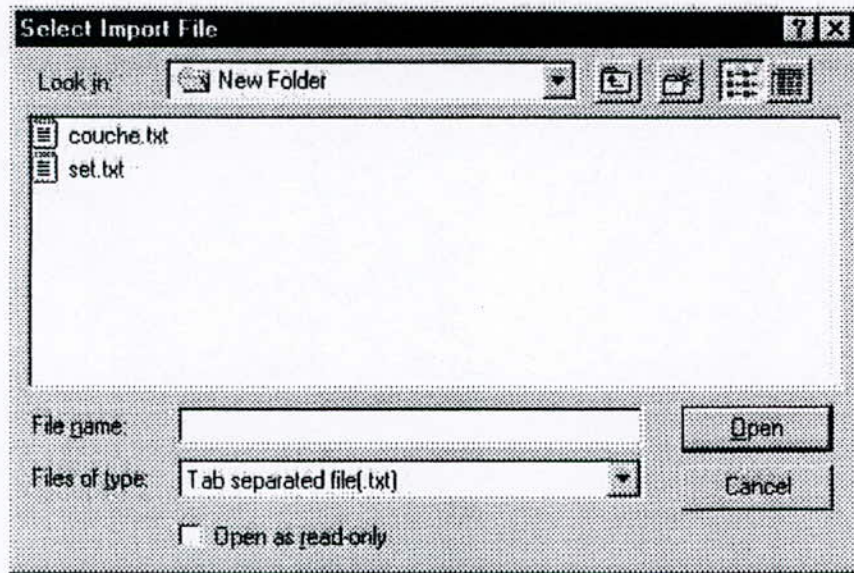


Pour chaque constituant, il est préférable que l'utilisateur insère des données portant sur la structure atomique, ainsi que des remarques concernant le constituant en question afin de pouvoir faire une comparaison consistante, mais ceci est optionnel.

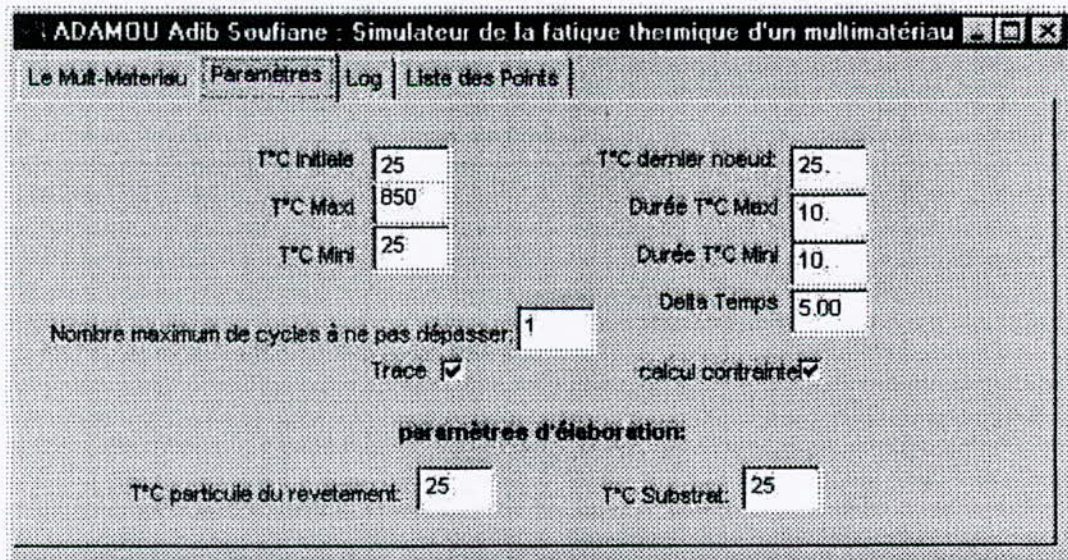
Des commandes annexes sont présentes dans notre simulateur, en particulier dans cette fenêtre, comme celle de l'enregistrement, qu'on peut effectuer en cliquant sur le bouton 'Sauver', le simulateur affiche une fenêtre avec laquelle l'utilisateur aura le choix de sauvegarder les caractéristiques des constituants du multimatériau dans un fichier qu'il le renomme :



Le but d'introduire cette fonctionnalité est d'avoir des données pour une autre utilisation tout en cliquant sur '**Ouvrir**'. Cette fenêtre est munie aussi d'une option d'impression sous la forme du bouton 'imprimer', ainsi qu'une option 'read only' afin de supprimer la possibilité de changer le contenu d'un fichier sauvegardé.



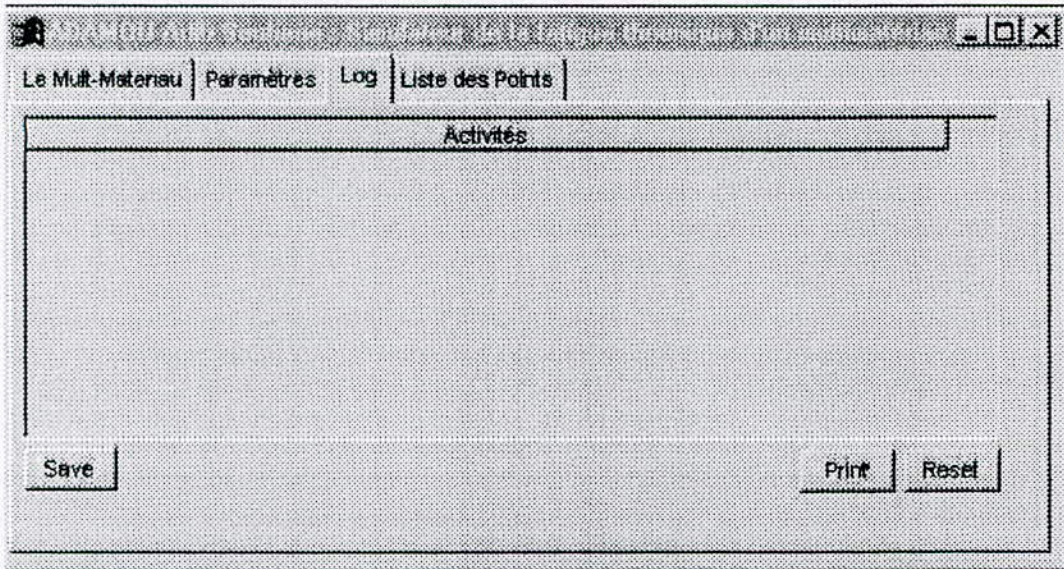
Afin de pouvoir insérer les valeurs concernant le cyclage thermique, on passe à l'onglet intitulé 'Paramètres', où nous pouvons constater la présence des paramètres du cycle thermique, comme la température initiale du multimatériau, ainsi que les températures maximale et minimale du multimatériau, ainsi que les temps de maintien pour chaque température.



On peut remarquer, la présence d'une option 'Paramètres d'élaboration', ceci est relatif à la température du substrat pendant l'élaboration ainsi que celle des particules projetées.

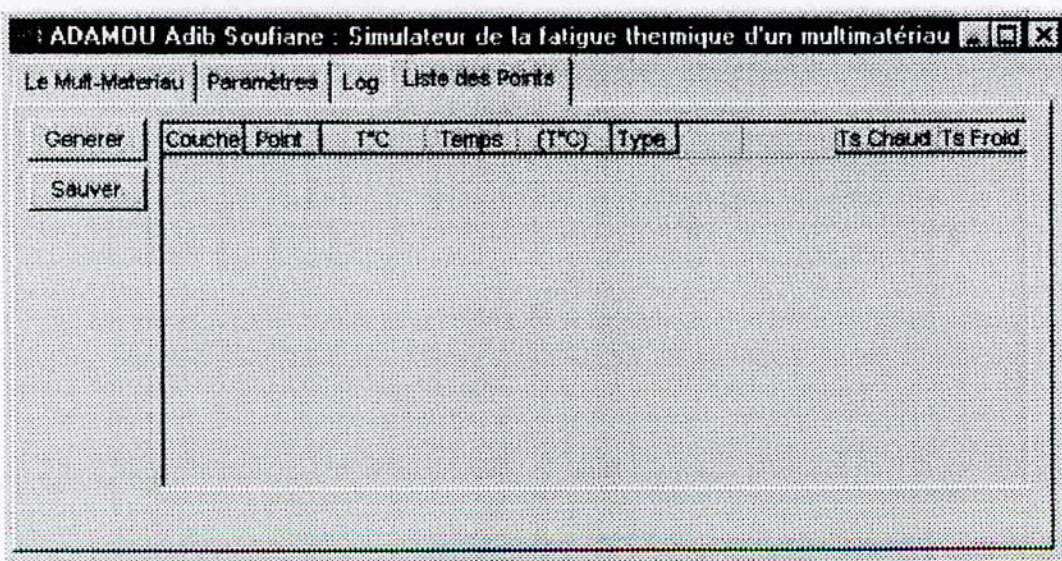
Pour faire démarre le simulateur, on clique sur le bouton 'Execute' de l'onglet 'multimatériau', et pour pouvoir visualiser les différentes étapes de l'activité du simulateur on clique sur l'onglet 'Log'. Si par exemple on veut passer à une autre simulation, il suffit de cliquer sur 'Reset'.

L'onglet 'Log' contient aussi des fonctionnalités de sauvegarde et d'impression.

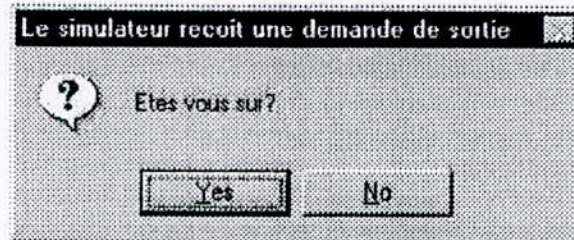


Pour faciliter la compréhension à l'utilisateur, un autre onglet a été conçu :

'Liste des points' permet un balayage par rapport au temps de chaque point (division), que ce soit un point de surface ou un point d'interface ou interne.



Et enfin, un bouton appartenant à l'anglet 'Multimatériau' conçu pour quitter le simulateur et c'est le bouton 'Quitter', là également une fenêtre apparaît suite à cette commande afin de confirmer ou de refuser de quitter le programme.



IV.2 Validation

Pour crédibiliser notre démarche, et afin de valider notre modèle mathématique, on s'est basé sur des résultats expérimentaux présentés dans le cadre d'une thèse de doctorat [25], et effectués par M^{er}G-SAIF de l'École Centrale de Lyon, qui portait sur "la mise au point et caractérisation de couches intermédiaires permettant l'accrochage entre un alliage métallique et une céramique projetée plasma".

On a utilisé les multimatériaux suivant :

- **Zircone stabilisée** en tant que revêtement (déposée par une torche plasma).
- Une couche d'accrochage, qu'on varie afin d'établir une comparaison quantitative pour le but de situer quelle couche d'accrochage offre au multimatériau en question une bonne endurance pour la fatigue thermique. Les couches qu'on a étudiées sont élaborées par la méthode thermochimique appelée "Slurry coating", et sont à base d'aluminium et de zinc.

Notons que cette gamme pourra être étendue si les caractéristiques des couches sont connues.

- **Un substrat à base d'acier de type XC38.**

le cycle thermique imposé dans les expériences est le suivant :

- température maximale = 650 °C.
- Température minimale = air ambiant.

- Temps de chauffage = 10 mn = 600 sec.
- Temps de refroidissement = 4 mn = 240 sec.

Quant aux dimensions des couches, elles sont données comme suit :

- Epaisseur du substrat = 5mm.
- Epaisseur des couches d'accrochage = en moyenne de 0.1mm.
- Epaisseur du revêtement = 0.4mm.

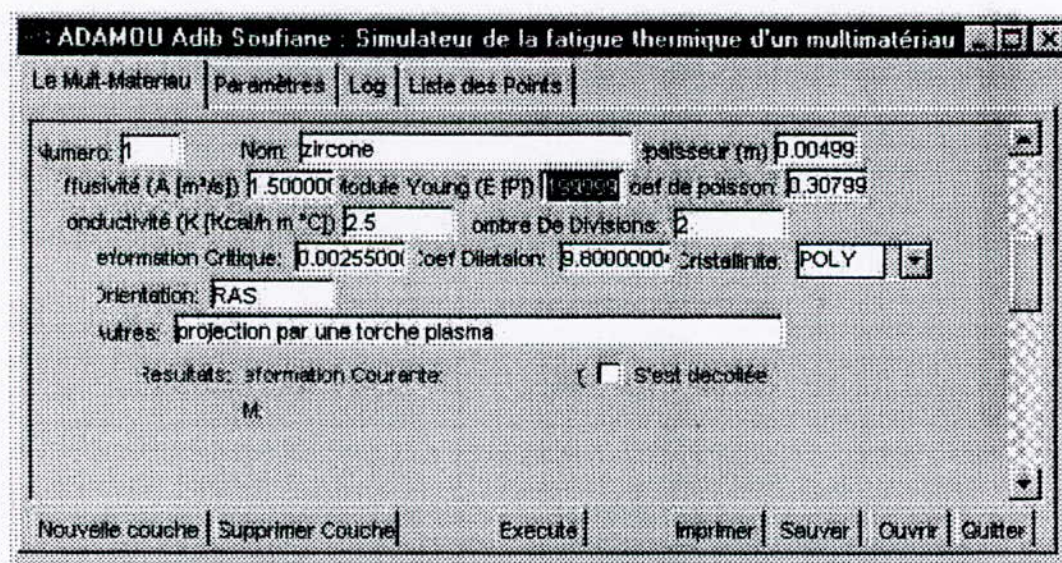
a) Procédure 1 : " Multimatériau sans couche d'accrochage "

En premier lieu, on effectue une simulation d'un essai de fatigue thermique sur un multimatériau sans couche d'accrochage.

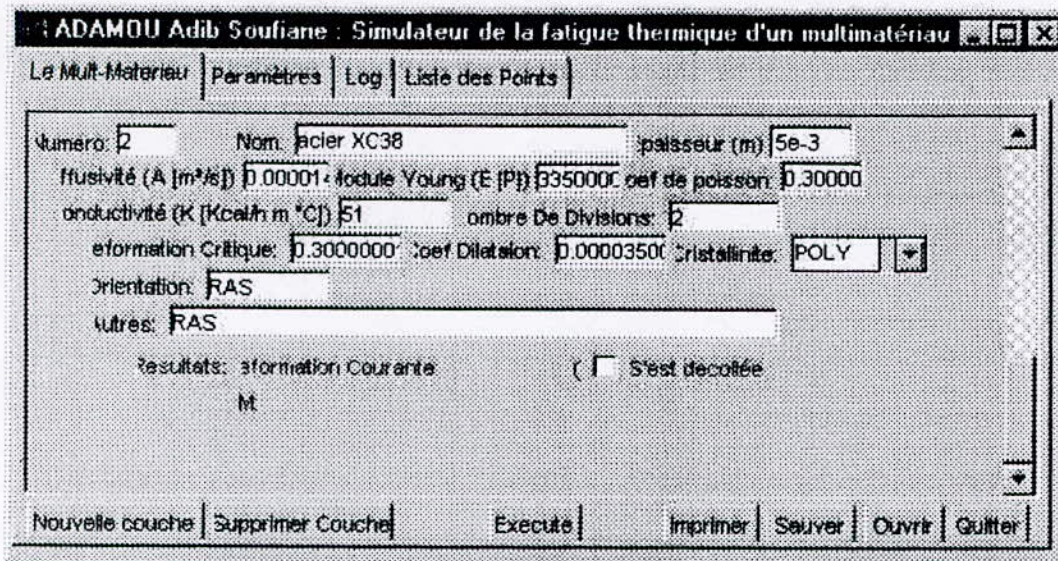
L'expérience [25] a révélé un décollement après 8 cycles, en ce qui nous concerne, nous allons étendre cette expérience tout en variant la température du substrat lors de l'élaboration.

Commençons par insérer les données pour chaque constituant :

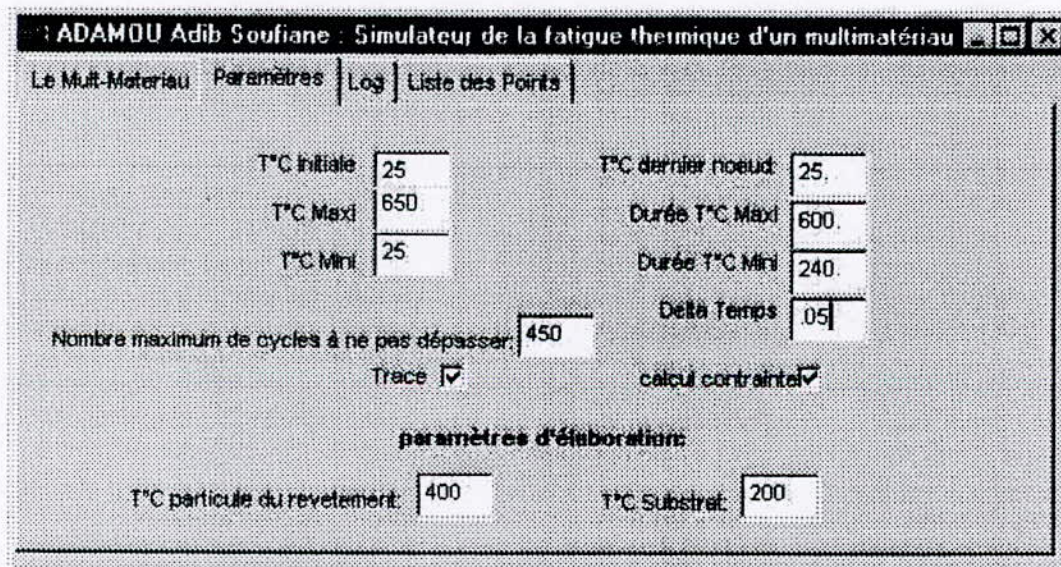
- **Revêtement : Zircon**



- Substrat : XC38

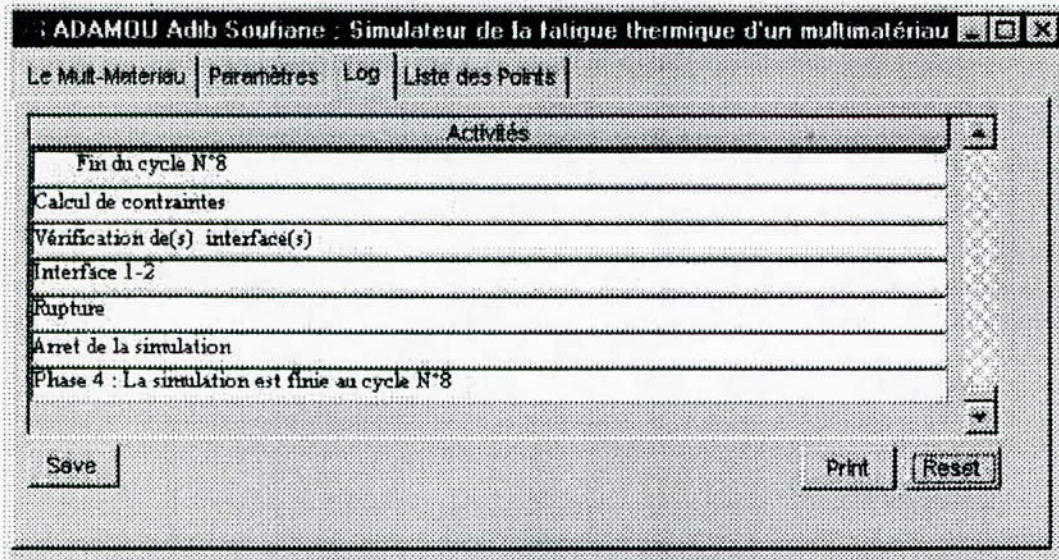


On simule cet essai avec les paramètres du cyclage suivant :



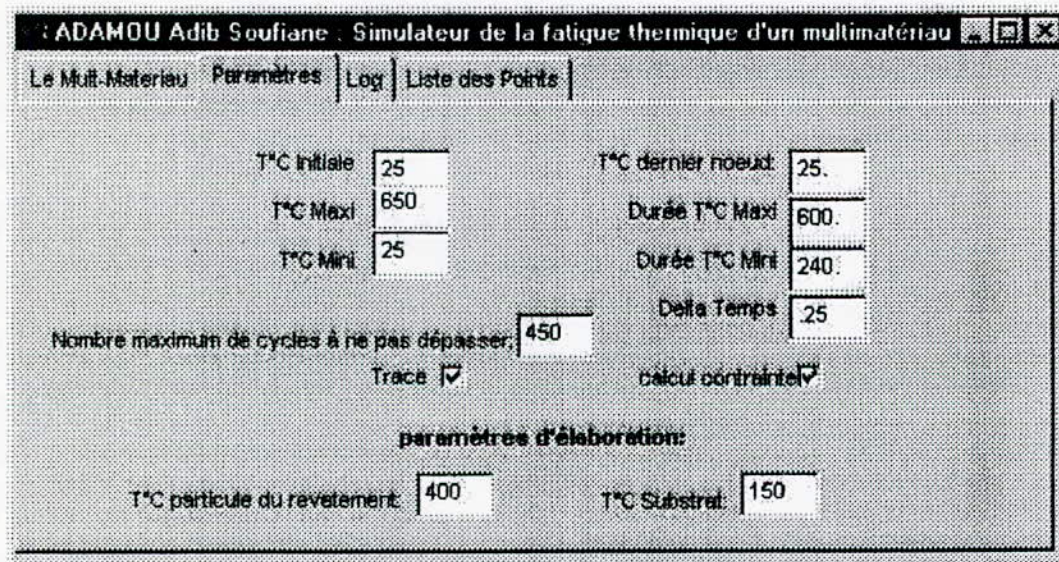
On fait démarrer la simulation : (cliquer sur 'Exexecute')

- On consulta l'anglet "Log"

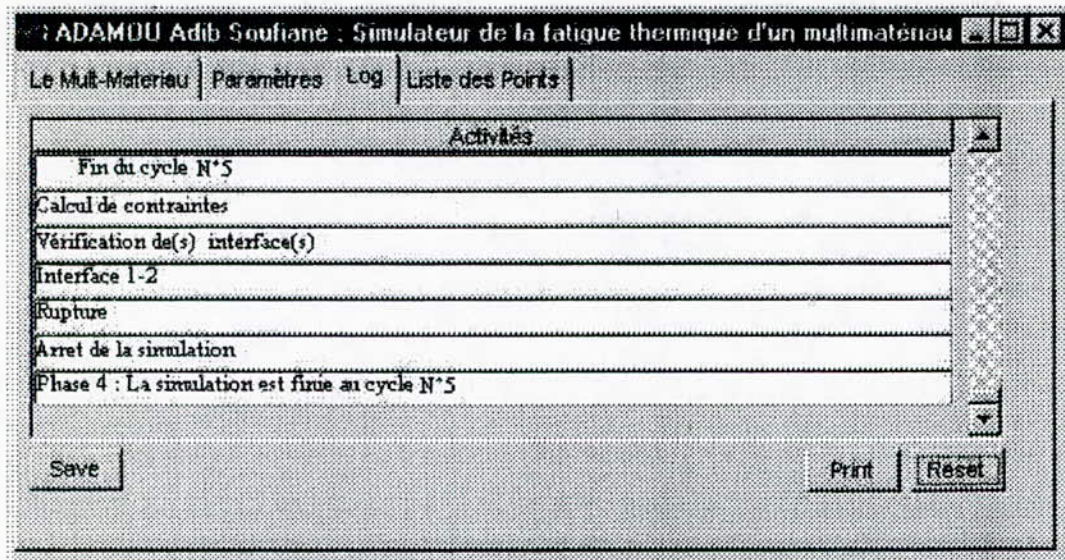


Comme c'est indiqué, on a un décollement après le huitième cycle.

Pour les nouveaux paramètres suivants : (changement de la température du substrat lors de l'élaboration)



On aura un décollement au cinquième cycle.

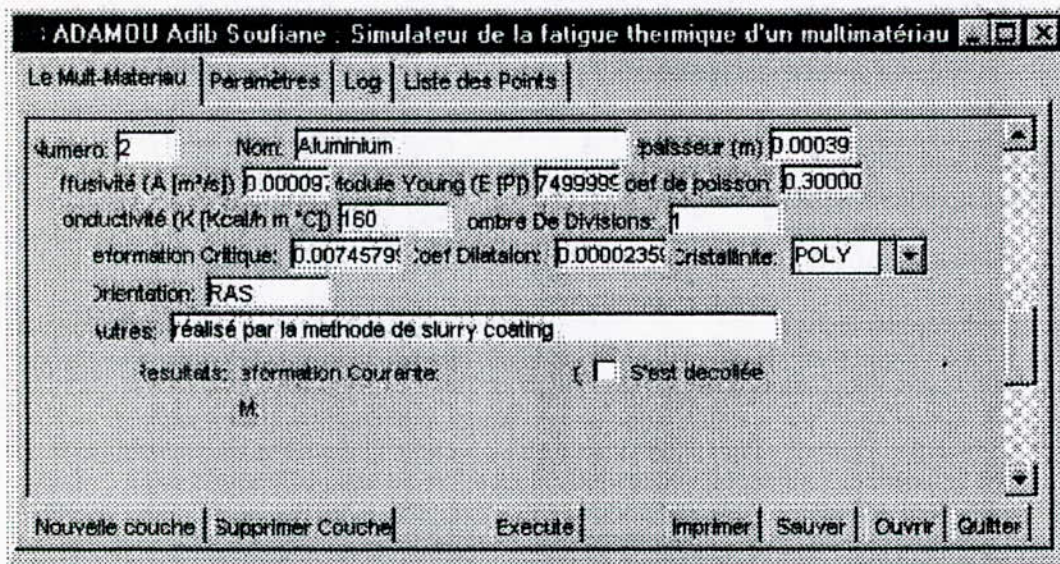


- On peut remarquer l'influence de la température du substrat pendant l'élaboration, une température plus grande de ce dernier peut augmenter son endurance.
- Cette influence peut s'expliquer par le fait qu'un gradient de température élevé induit des contraintes résiduelles plus importantes comparées à celles générées par des gradients moins importants.

L'influence des contraintes résiduelles (du type micro) est connue d'être la cause du rétrécissement du domaine élastique des matériaux, ainsi que la diminution de leur endurance.

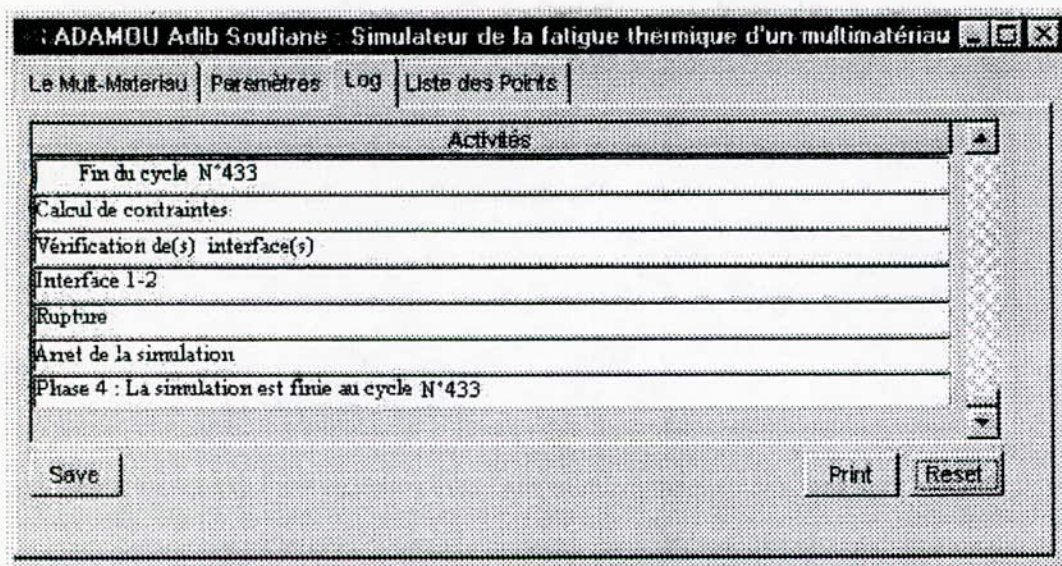
b) Procédure 2 : " Couche d'accrochage en aluminium "

La première procédure nous stimule à confirmer sur l'importance de l'introduction d'au moins une couche d'accrochage, ceci va permettre un gradient de propriétés moins élevé ainsi qu'une diminution des contraintes d'élaboration sachant que les couches d'accrochage sont élaborées par un procédé thermo-chimique. Pour ce cas on introduit une couche d'accrochage à base d'aluminium pur :



L'expérience[25] a montré que le nombre de cycles à la rupture est de **400 cycles** avec la mention que le décollement s'est produit **partiellement**, cela veut dire qu'il existe une anisotropie au niveau de l'interface ou même une localisation d'une fissuration consécutive au mode d'élaboration .

En effet après l'exécution du programme on a eu :

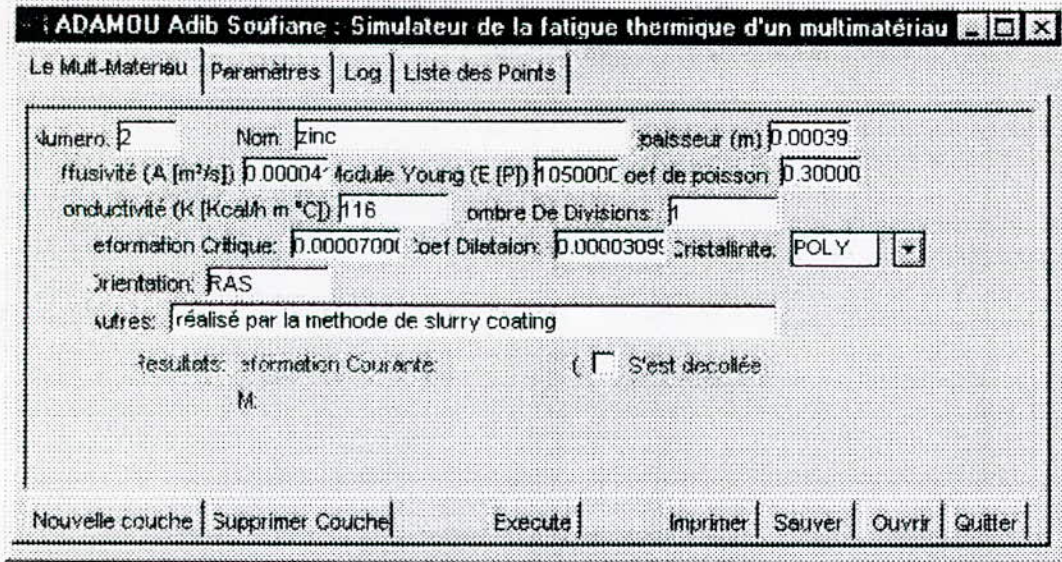


Le nombre de cycles est: *433 cycles*.

- L'introduction de l'aluminium comme couche d'accrochage a amélioré et d'une manière très appréciable l'endurance du multimatériau.
- L'amélioration de l'endurance du multimatériau avec une couche d'accrochage à base d'aluminium fait augmenter l'endurance principalement à cause de la bonne conductivité de cet élément. Ce qui fait diminuer le gradient de température ainsi que le module d'élasticité relativement bas. Ceci implique une génération de contraintes de faibles amplitudes, sans oublier la limite élastique relative à ce dernier.

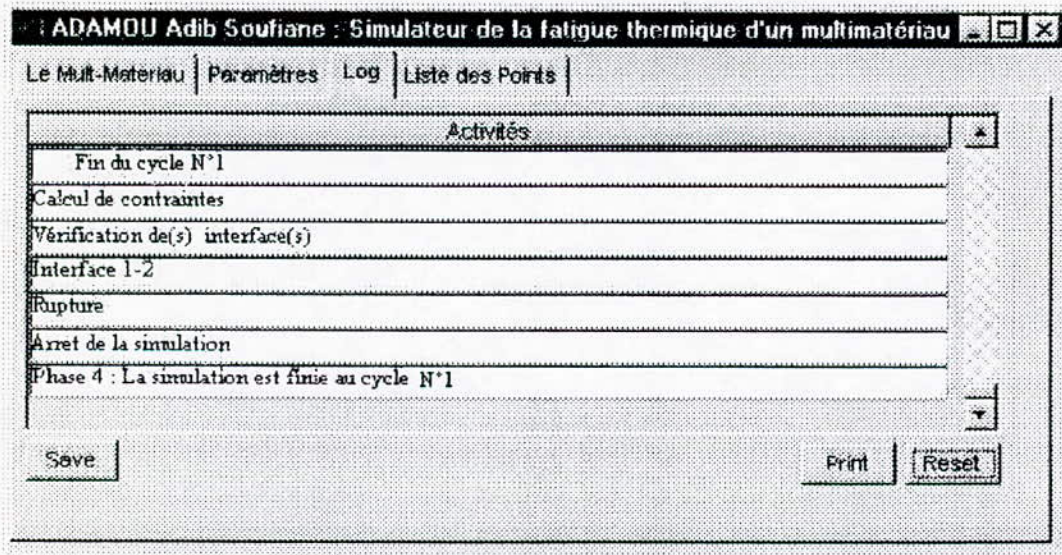
c) Procédure 3 : " Couche d'accrochage à base de zinc "

Pour faire une comparaison sur l'efficacité d'une couche d'accrochage par rapport à une autre, on fait introduire une couche d'accrochage à base de zinc pur :



Pour ce multimatériau, l'expérience[25] révèle un décollement au bout des premiers cycles, sans que le nombre de cycles n soit mentionné.

En ce qui nous concerne :



Le décollement a eu lieu après *1 cycle*.

- Bien que l'on ait introduit une couche d'accrochage, l'endurance reste médiocre relativement à un multimatériau sans couche d'accrochage.

- Le zinc présente une conductivité moins élevée par rapport à l'aluminium, mais en fait, on ne pourra imputer la mauvaise tenue vis à vis de la fatigue thermique de ce multimatériau à ce paramètre, mais plutôt à son module d'élasticité élevé ainsi que sa faible limite élastique qui est au plus 7 E-5 .

Le zinc en tant que métal n'est pas utilisé comme élément renforçant l'adhérence ou l'endurance mais plutôt employé comme revêtement afin d'éviter la corrosion, et il n'est jamais utilisé à l'état pur mais allié la plupart du temps avec l'aluminium. En plus de tout cela, le zinc présente l'inconvénient de fluer à la température ambiante.

d) Procédure 4: " Variation du cycle thermique "

On fait varier les températures minimale et maximale pour le multimatériau sans couche d'accrochage.

- **Température minimale :**

On fait augmenter la température minimale à $200 \text{ }^\circ\text{C}$.

- Le nombre de cycle pour le décollement est : *15 cycles*.
- L'endurance du multimatériau est améliorée.

- L'amélioration de l'endurance du multimatériau est due à l'augmentation de la température minimale, cela bien entendu fait diminuer le gradient de température et par conséquent les contraintes résiduelles. A l'échelle de l'expérimentation, l'interprétation de ce fait prend une autre dimension, celle de la diminution du module d'élasticité à haute température.

- **Température maximale :**

Le simulateur tel qu'il a été conçu ne peut déceler des changements de phases ou prédire une température maximale pour laquelle les constituants peuvent exercer leur fonction convenablement.

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

Les techniques d'essais à températures élevées ont évolué en même temps que l'intensification des études portant sur la compréhension et la simulation des mécanismes d'endommagements par fatigue. Le perfectionnement de ces techniques de prédiction dans la technologie d'élaboration des multimatériaux a directement influencé l'amélioration du rendement des machines travaillant dans des conditions hostiles.

A l'heure actuelle, les multimatériaux sont les seuls matériaux adéquats à la construction d'organes dans le sens de la création d'une couche protectrice ou d'une barrière de température ou bien dans le cas général le traitement de surface.

Cette étude s'inscrivait dans le contexte général de la réalisation d'un simulateur à caractère pronostique orienté pour les matériaux à gradients fonctionnels (gradients de propriétés).

Cette étude nous permet de dégager les paramètres d'influence directe sur le phénomène de la fatigue thermique : la conductivité thermique, le module d'élasticité et le coefficient d'expansion thermique, qui dans notre cas se réduit au coefficient de dilatation.

En ce qui concerne le module d'élasticité, il est souhaitable qu'il soit le plus faible possible, car un module élevé implique des contraintes élevées.

L'importance du coefficient d'expansion thermique pour une pièce soumise à la fatigue anisotherme vient du fait que les contraintes internes seraient provoquées justement par la dilatation différenciée dans la pièce due aux gradients de températures ($\Delta \epsilon_s = \epsilon \alpha \Delta T$).

Enfin, une conductivité thermique (K) élevée provoquera des gradients thermiques moins importants et par conséquent moins de contraintes. La densité est aussi une propriété importante, mais surtout pour la tenue en fluage.

Il existe aussi des paramètres qui influent mais indirectement sur le phénomène de la fatigue thermique qui sont des paramètres qui concernent les dimensions de la pièce en particulier l'épaisseur, la fréquence du cyclage thermique, la température maximale et minimale du cyclage ainsi que le mode d'élaboration.

- **Influence des températures minimales et maximales du cycle**

Les résultats ont démontré une augmentation de la vie en FT suite à l'élévation de la température minimale (T_{\min}) du cycle. Cependant, l'augmentation de la température maximale (T_{\max}), a un effet beaucoup plus néfaste pour la résistance à la FT, mais qui reste indécélable en ce qui concerne notre simulateur. Cependant, on peut effectuer une étude sur chaque constituant afin de prévoir la température maximale pour laquelle il peut exercer ses fonctions aux quelles il a été orienté.

La température maximale peut provoquer une certaine instabilité des constituants du point de vue changement de phase ou réaction avec le milieu extérieur.

- **Influence de la température initiale du multimatériau**

Cette influence est évidente, une température plus élevée permet aux multimatériaux une durée de vie plus prolongée, car les contraintes thermiques qui seront générées après le cyclage thermique seront moindres à cause de la valeur du gradient thermique qui n'est pas grande. , l'expérience montre qu'à des températures élevées le module d'élasticité décroît et les contraintes thermiques qui se produisent seront moins importantes.

- **Influence du mode d'élaboration**

Ce point n'a pas été détaillé dans notre étude à cause du manque de données concernant les paramètres de projection entre autre la distance de projection, la température de sortie et l'énergie qui se produit au contact des particules avec le substrat, ainsi que l'énergie qui se produit lors de l'écrasement des particules projetées avec le substrat ? Néanmoins l'influence du mode d'élaboration peut être mise en évidence en ne tenant compte que des températures du substrat ainsi que des particules au moment de la déposition, d'après les résultats obtenus dans ce sens, on s'est rendu compte que la température du substrat au moment de l'élaboration (projection) est très importante. Cette température est inversement proportionnelle à la valeur des contraintes résiduelles, qui elles favorisent une mauvaise tenue vis à vis de la fatigue thermique en faisant diminuer le domaine élastique

du revêtement et précipiter sa déformation pour atteindre le domaine plastique. D'autre part l'expérience a montré que le préchauffage du substrat évite la génération de fissures. La relaxation des contraintes résiduelles est un moyen efficace pour diminuer l'amplitude de ces contraintes, sauf qu'en réalité un phénomène néfaste accompagne ce traitement : c'est l'amorçage de micro fissures.

- **Endurance et adhérence**

Les résultats dégagés jusqu'ici, que ce soit des résultats numériques ou expérimentaux nous laissent conclure avec circonspection qu'une bonne adhérence n'implique pas une bonne endurance et le contraire pour le contraire, c'est pour cette raison que les expérimentateurs optent pour des essais de fatigue thermomécanique afin de mieux situer cette relation (si elle existe).

- **Recommandations et travaux futurs**

Dans cette étude, nous nous sommes attachés à expliquer de la manière la plus exhaustive le phénomène de la fatigue thermique, qui reste encore un domaine peu traité du côté expérimental surtout lorsqu'il s'agit d'éventuelles interactions qui peuvent exister entre la fatigue thermique et l'oxydation ou le fluage qui font diminuer la durée de vie des matériaux en général et les multimatériaux spécialement.

Pour cela, nous recommandons d'étudier la fatigue thermique selon cet axe afin d'enrichir ce modeste travail.

Références bibliographiques

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Stendhal, "Mémoires d'un Touriste", Lausanne, Editions Rencontre.
- [2] H.J. Gough, "The Fatigue of Metals", 1st ed., London, Scott, Greenwood & Son, 1924.
- [3] H.F. Moore and J.B. Koppers, "The Fatigue of Metals (with chapter on the fatigue of wood and of concrete)", 1st ed., New York, McGraw-Hill Book Company, Inc., 1927.
- [4] R.E. Peterson, Nature of fatigue of metals, Mechanical engineering, vol. 72, n° 5, 1950, pp. 371-375.
- [5] R.E. Peterson, Discussions of a century ago concerning the nature of fatigue and a review of some of the subsequent researches concerning the mechanism of fatigue, ASTM Bulletin, n° 164, 1950, pp. 50-56.
- [6] W.A.J. Albert, Über Treibseile am Harz, Archiv für Mineralogie, Geognosie, Bergbau und Hüttenkunde, vol. 10, 1838, pp. 215-234.
- [7] J.V. Poncelet, "Introduction a la mécanique industrielle, physique ou expérimentale", 2ème Ed., 1841, pp. 295-299.
- [8] R.A. Smith, The Versailles railway accident of 1842 and the first research into metal fatigue, in "Fatigue 90", 1990, pp. 2033-2041.
- [9] J.Y. Mann, The historical development of research on the fatigue of materials and structures, The Journal of the Australian Institute of Metals, vol. 3, n° 3, 1958, pp. 222-241.
- [10] W.J.M. Rankine, On the causes of the unexpected breakage of the journals of railway ayles; and on the means of preventing such accidents by observing the law of continuity in their construction, Min. Proc. Instn civ. Engrs, vol. 2, 1843, pp. 105-108.
- [11] F. Braithwaite, On the fatigue and consequent fracture of metals, Min. Proc. Instn. civ. Engrs, vol. 13, 1854, pp. 463-475.
- [12] A. Wöhler, Ueber die Festigkeits-Versuche mit Eisen und Stahl, Zeitschrift für Bauwesen, vol. 8, 10, 13, 16 et 20, 1860-70. (Un résumé en anglais du travail de Wöhler est donné dans Engineering, vol. 11, 1871).

- [13] J.I. Mann, "Bibliography on the Fatigue of Materials, Components and Structures", 1st Ed., vol. 1-4, Oxford, Pergamon Press Ltd. , 1970.
- [14] J.A. Ewing and J.C.W. Humfrey, The fracture of metals under repeated alternations of stress, Phil. Trans. (A), vol. 200, 1902, pp. 241-250.
- [15] N. Shute, "No Highway", New York, Heinemann, 1948.
- [16] S. Surahs, "Fatigue of Materials", Cambridge, University Press, 1991.
- [17] P. Poubanne, "Étude et Modélisation du Comportement Mécanique d'un Superaliage Monocristallin pour Aube de Turbines" (note technique), n° 5, ONERA, Chatillon, 1989.
- [18] R.P. Skelton, Crack initiation and growth in simple metal components during thermal cycling, in "Fatigue at High Temperatures", R.P. Skelton (ed.), New York, Elsevier Science Publishers Ltd. , 1983, pp. 1-62.
- [19] H. Cohen, G.F.C. Rogers and H.I.H. Saravanamuttoo, "Gas Turbine Theory", 3rd Ed., Harlow, Longman Scientific & Technical, 1987.
- [20] R. Viswanathan and A.C. Dolbec, Life assessment technology for combustion turbine blades, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, vol. 109, 1987, pp. 115-123.
(Rapport en portugais), n° 035-PMR-E/88, Ministério da Aeronáutica, São José dos Campos, SP, Brésil, 1988.
- [21] F.R. Morral, Superalloys - mini history and bibliography, CIM bulletin, vol. 84, n° 953, 1991, pp. 68-70.
- [22] Jean-marie, Jean-Paul BAILON et Jacques MASOUNNAVE – Des Matériaux, Editions de l'Ecole Polytechnique de MONTREAL, 1986, pp.174-177, 230-234.
- [23] Nadir MESRATI – Réalisation et analyse de l'adhérence dans des multimatériaux type Al[Si] – ZrO₂ et graphite – Métal ou céramique, thèse de doctorat, 1989.
- [24] E.GILLET – G.LEGRESSUS – M.GILLET, journ. Chim, phy. , 1987,84,2,167.
- [25] Gausseem SAIF – Mise au point et caractérisation de couches intermédiaires permettant l'accrochage entre un alliage métallique et une céramique projetée plasma, thèse de Doctorat, 1991.

- [26] F.C. Lea, Tensile tests of materials at high temperatures, *The engineer*, 1923, pp. 182-183.
- [27] H.J. Tapsell and B.A. Bradley, Mechanical tests at high temperature on a non-ferrous alloy of nickel and chromium, *Engineering*, 1925, pp. 614-747.
- [28] J. McKeown, Fatigue testing with particular reference to tests at elevated temperatures, *Bgham Metall. Soc.*, vol. 27, n° 4, 1947, pp. 423-442.
- [29] L.F. Coffin Jr., The answers are important because..., *Product Engineering*, 1957, pp. 175-179.
- [30] R.B. Johnson, High-temperature problems in aircraft jet engines and turbo-superchargers, *Metal Progress*, vol. 59, 1951, pp. 503-510.
- [31] P.R. Toolin and N.L. Mochel, The high-temperature fatigue strength of several gas turbine alloys, *Proc. Amer. Soc. Test. Mater.*, vol. 47, 1947, pp. 677-694.
- [32] R.P. Kroon, Turbine blade fatigue testing, *Mechanical Engineering*, vol. 62, 1940, pp. 531-535.
- [33] A.R. Edwards, Fatigue problems in the gas turbine aero engine, in "a symposium held in Melbourne University", December, 1946, pp. 383-394.
- [34] R. Brunetaud and J. Thiery, Les problèmes de fatigue oligocyclique à chaud dans les turboréacteurs aéronautiques, in "Specialists Meeting on Low Cycle High Temperature Fatigue", AGARD Conference Proceedings N° 155, Washington, D.C., 21-26 April, 1974.
- [35] M.J. Verrilli, M.G. Castelli, J. Bressers and R.L.T. Oehmke, Standardization activities in TMF test methodologies, in "81st Meeting of the AGARD Structures and Materials Panel", Bamff, Canada 2-4 October, 1995, pp. 4(1)-4(11).
- [36] J. Gayda, T.P. Gabb, R.V. Miner and G.R. Halford, Bithermal low cycle fatigue behaviour of a NiCoCrAlY-coated single crystal superalloy, in "1987 TMS-AIME Annual Meeting", The Metallurgical Society, Denver, Colorado, February 22-26, 1987, pp. 179-198.
- [37] T. Müller and V. Gerold, Isothermal and bithermal fatigue of a directionally solidified Ni-based superalloy, *Scripta Metallurgica et Materialia*, vol. 26, 1992, pp. 1343-1348.

- [38] G.R. Halford, M.J. Verrili, S. Kalluri, F.J. Ritzert, R.E. Duckert and F.A. Holland, Thermomechanical and bithermal fatigue behavior of cast B1900+Hf and wrought Haynes 188, in "Advances in Fatigue Lifetime Predictive Techniques, ASTM STP 1122", American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1992, pp. 120-142.
- [39] D.J. Smith, Behaviour of short cracks at elevated temperatures, in "NATO-ASI : Mechanical Behaviour of Materials at High Temperature", Sesimbra, Portugal, September 12-22, 1995.
- [40] L. Lindé, "Thermo-Mechanical and Low Cycle Fatigue Behaviour of High Temperature Alloys", PhD thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 1996.
- [41] O.H. Basquin, The exponential law of endurance tests, Proc. Amer. Soc. Test. Mater., vol. 10, 1910, pp. 625-630.
- [42] L.F. Coffin Jr., A study of the effects of cyclic thermal stresses on a ductile metal, Transactions of the ASME, n° 53-A76, 1954, pp. 931-949.
- [43] S.S. Manson, "Behavior of materials under conditions of thermal stress" (Technical Report), n° 2933, NACA, July 1953.
- [44] W.J. Ostergren, A damage function and associated failure equations for predicting hold time and frequency effects in elevated temperature, low cycle fatigue, Journal of testing and evaluation, vol. 4, n° 5, 1976, pp. 327-339.
- [45] D.A. Spera, What is thermal fatigue?, in "Thermal Fatigue of Materials and Components, ASTM STP 612", American Society for Testing and Materials, 1976, pp. 3-9.
- [46] D.L. Harper, Application of induction heating to high-temperature fatigue testing, American Society for testing and materials, vol. 63, 1963, pp. 684-691.
- [47] L.F. Coffin Jr. and R.P. Wesley, Apparatus for study of effects of cyclic thermal stresses on ductile metals, Transactions of the ASME, n° 53-A77, 1954, pp. 923-930.
- [48] J.M.C. Duhamel, Mémoires de l'Institut de France, vol. 5, 1838.
- [49] D.K. Chernov, Zhur. Russ. Met. Obshchestva, 1915.
- [50] S.V. Serensen and P.I. Kotov, On method of thermal fatigue testing (a review), Industrial Laboratory, vol. 24, n° 9, 1959, pp. 1221-1232.
- [51] W. Boas and R.W.K. Honeycombe, Thermal fatigue of metals, Nature, vol. 153, 1944, pp. 494-495.

- [52] L.F. Coffin Jr., Design aspects of high-temperature fatigue with particular reference to thermal stress, Transactions of the ASME, n° 54-A252, 1956, pp. 527-532.
- [53] E. Glenny, J.E. Northwood, S.K.W. Shaw and T.A. Taylor, A technique for thermal-shock and thermal-fatigue testing based on the use of fluidized solids, Journal of the institute of metals, vol. 87, 1958-59.

- [54] A.E. Carden, Fatigue at elevated temperatures: a review of test mettons, in "Fatigue at elevated temperatures, ASTM STP 520", American Society for Testing and Materials, 1973, pp. 195-223.
- [55] T.C. Yen, Thermal fatigue - A critical review, WRC Bulletin series, vol. 72, 1961, pp. 1-12.
- [56] S. Taira, M. Ohnami and H. Minata, Thermal fatigue combined with mean stress, in "The 5th Japan Congress on Testing Materials - Metallic Materials", 1961, pp. 45-49.
- [57] Y.F. Balandin and A.V. Gugin, Thermal fatifue tests with a superimposed mechanical load, Industrial laboratory, vol. 30, n° 10, 1964, pp. 1254-1255.
- [58] M. Kawamoto, Thermal fatigue behaviour of steels subjected to cyclic mechanical strain independently, in "Japan congress on testing materials", 1963, pp. 30-33.
- [59] A.I. Ivanov and B.F. Trakhtenberg, Device for testing metals for thermomechanical fatigue, Industrial laboratory, vol. 34, n° 1, 1968, pp. 738-739.
- [60] M.J. Donachie Jr., R.P. Brody and E.F. Bradley, Miniature airfoils test thermal fatigue of aircraft gas turbine alloys, SAE Journal, vol. 75, n° 2, 1967, pp. 90-93.
- [61] G.N. Tret'yachenko, A.P. Voloschenko, L.V. Kravchuk and R.I. Kuriat, Device for testing materials under thermal and mechanical cyclic loads, Instiute of strength problems at the academy of sciences of the UkrSSR, vol. 34, n° 12, 1967, pp. 1522-1524.
- [62] L. Rémy, Thermal-mechanical fatigue and thermal fatigue experiments, in "NATO-ASI : Mechanical Behaviour of Materials at High Temperature", Sesimbra, Portugal, September 12-22, 1995.

- [63] S.W. Hopkins, Low-Cycle Thermal Mechanical Fatigue Testing, in "Thermal Fatigue of Materials and Components, ASTM STP 612", American Society for Testing and Materials, 1976, pp. 157-169.
- [64] H. Sehitoglu, Thermo-mechanical deformation of engineering alloys and components - experiments and modelling, in "NATO-ASI : Mechanical Behaviour of Materials at High Temperature", Sesimbra, Portugal, September 12-22, 1995.
- [65] D.J. Smith, Aspects on the assessment of the mechanical behaviour of metallic materials at high temperature, in "NATO-ASI : Mechanical Behaviour of Materials at High Temperature", Sesimbra, Portugal, September 12-22, 1995.
- [66] F.KREITH – Transmission de la chaleur et thermodynamique – MASSON ET C^{ie} ÉDITEURS 1967 .
- [67] Frank P.INCROPERA , David P.DEWITT - Fundamentals of heat and mass transfer John Wiley & Sons - 4^e édition .
- [68] S.L Crouch , A.M.Starfield – Boundary element in solid mechanics ; Allen et Unwin 1983.