

**Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris**

**THESE**

Présentée par  
**Pierre-Olivier Bouchard**

En vue de l'obtention du titre de  
**Docteur**  
de

**l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris**  
Spécialité « Sciences et Génie des Matériaux »

**CONTRIBUTION A LA MODELISATION NUMERIQUE  
EN MECANIQUE DE LA RUPTURE  
ET STRUCTURES MULTIMATERIAUX**

Soutenue le 20 septembre 2000

Devant le jury composé de

M. Philippe Destuynder	Président & Rapporteur
M. Milan Jirásek	Rapporteur
Mme Isabelle Tovená	Examineur
M. Jean-Loup Chenot	Examineur
M. François Bay	Directeur de thèse
M. Yvan Chastel	Directeur de thèse

# CONTRIBUTION A LA MODELISATION NUMERIQUE EN MECANIQUE DE LA RUPTURE ET STRUCTURES MULTIMATERIAUX

Dans le contexte industriel actuel, la modélisation numérique apparaît comme un outil nécessaire, entraînant des gains de temps et d'argent importants. Le logiciel FORGE2 Multimateriaux a été développé dans ce cadre, afin de modéliser des matériaux élastoplastiques ou élasto-viscoplastique en grandes déformations.

Nous présentons dans ce mémoire les développements qui ont été réalisés pour permettre de prendre en compte et de gérer plusieurs sous-domaines et plusieurs matériaux, en insistant sur les difficultés liées à la gestion des contours et du remaillage. Nous présentons également les outils numériques introduits pour modéliser la propagation quasi-statique de fissures dans le maillage. Pour cela, nous introduisons les paramètres caractéristiques classiques en mécanique de la rupture, et nous les étudions pour une fissure statique. La méthode  $G\theta$ , permettant de calculer avec précision le taux de restitution d'énergie, est développée et comparée à d'autres méthodes. Nous abordons ensuite l'amorçage et la propagation quasi-statique de fissures en présentant et en comparant trois critères de propagation : le critère de la contrainte normale maximale, le critère de la densité d'énergie de déformation minimale et le critère du taux de restitution d'énergie maximal. Une attention particulière est portée aux problèmes de remaillage et de structure du maillage en pointe de fissure. La caractéristique multimatériaux du code permet également d'étudier la propagation de fissures dans des matériaux composites. Les exemples d'application proposés montrent la robustesse des développements effectués et offrent de nombreuses perspectives intéressantes.

Enfin nous utilisons les différents outils présentés pour étudier les mécanismes de déformation et de rupture lors du compactage de tubes en zircaloy 4. Une étude expérimentale est menée en parallèle afin de valider les résultats numériques, et d'étudier l'influence de l'oxydation sur les propriétés mécaniques du zircaloy 4.

## **Mots Clés :**

Maillage Multi-domaines      Structures multimatériaux      Remaillage automatique

Mécanique de la Rupture      Méthode  $G\theta$       Propagation de Fissures

Zircaloy 4

# NUMERICAL MODELLING IN FRACTURE MECHANICS AND MULTIMATERIALS STRUCTURES

In today's industrial environment, numerical modelling is being increasingly used in order to optimise industrial processes and reduce manufacturing costs. These objectives can be achieved only if we can get an in-depth understanding of material behaviour during mechanical loading cycles. FORGE2 Multimaterials software has been developed within this framework to model large deformation of elastic-plastic or elastic-viscoplastic materials.

In this thesis, we present the numerical tools that have been developed to model multiple fields and multiple materials, with a special attention to meshing and automatic remeshing techniques. We also introduce the numerical tools implemented to model crack propagation in a mesh. In order to do so, we introduce classical fracture mechanics parameters, and different techniques to compute them for a static crack. The  $G\theta$  method is implemented to compute the strain energy release rate with accuracy. We then study different criteria to model the stages of crack initiation and crack propagation. Three crack propagation criteria are compared : the maximum circumferential stress criterion, the minimum strain energy density criterion, the maximum strain energy release rate criterion. Special attention has been paid to the mesh topology at the crack tip and numerous examples are presented to show the robustness and the accuracy of our technique.

Finally, we apply our different developments to the study of strain and fracture mechanisms of zircaloy 4 tubes under compaction. An experimental study is also performed to validate our numerical results and to study the influence of oxidation on the mechanical properties of zircaloy 4 tubes.

## **Key words :**

Multiple fields meshing      Multimaterials structures      Automatic remeshing

Fracture Mechanics       $G\theta$  Method      Crack Propagation

Zircaloy 4

# **TABLE DES MATIERES**

**I. TECHNIQUES DE MAILLAGE POUR DES GEOMETRIES COMPLEXES**

**I.1. Introduction** \_\_\_\_\_ 3

**I.2. Résolution mécanique** \_\_\_\_\_ 4

**I.2.1. Les équations de la mécanique pour un matériau élasto-viscoplastique** \_\_\_\_\_ 4

**I.2.2. Formulation incrémentale du problème** \_\_\_\_\_ 8

**I.2.3. La discrétisation spatiale du problème** \_\_\_\_\_ 11

**I.2.4. La résolution du système** \_\_\_\_\_ 12

**I.3. Maillage et remaillage automatique** \_\_\_\_\_ 14

**I.3.1. Le maillage multi-domaines** \_\_\_\_\_ 14

**I.3.2. Le remaillage automatique** \_\_\_\_\_ 19

**I.4. Gestion du contact pour des multimatériaux** \_\_\_\_\_ 20

**I.4.1. L'élaboration de composites** \_\_\_\_\_ 20

**I.4.2. Stratégie de gestion des contours** \_\_\_\_\_ 21

**I.4.3. Application** \_\_\_\_\_ 26

**I.5. Méthodes de résolution pour des multimatériaux** \_\_\_\_\_ 27

**I.5.1. Etude d'un assemblage collé** \_\_\_\_\_ 27

**I.5.2. Etude de conditionnement** \_\_\_\_\_ 29

**I.5.3. La méthode du gradient conjugué préconditionné** \_\_\_\_\_ 34

**I.6. Bilan** \_\_\_\_\_ 39

**II. ANALYSE MECANIQUE D'UNE PIECE FISSUREE**

**II.1. Motivations** \_\_\_\_\_ 40

**II.2. Etude Bibliographique** \_\_\_\_\_ 41

**II.2.1. Historique** \_\_\_\_\_ 41

**II.2.2. Hypothèses et cadre de l'étude** \_\_\_\_\_ 42

**II.2.3. Approche locale** \_\_\_\_\_ 47

**II.2.4. Approche globale ou énergétique** \_\_\_\_\_ 50

**II.2.5. Bilan** \_\_\_\_\_ 59

**II.3. Développement d'outils numériques pour la modélisation d'une fissure** \_\_\_\_\_ 61

**II.3.1. Maillage concentrique** \_\_\_\_\_ 61

**II.3.2. Eléments singuliers** \_\_\_\_\_ 63

**II.3.3. Bilan** \_\_\_\_\_ 68

<i>II.4. Calcul du taux de restitution d'énergie</i>	69
II.4.1. Implémentation de la méthode $G\theta$	69
II.4.2. Comparaison de différentes méthodes	71
II.4.3. Influence du maillage pour la méthode $G\theta$	77
II.4.4. Bilan	79
<i>II.5. Application à l'adhérence d'un assemblage collé</i>	80
II.5.1. Description de l'essai	80
II.5.2. Résultats	83
II.5.3. Bilan	86
<i>II.6. Conclusion</i>	87

### **III. MODELISATION DE LA PROPAGATION QUASI-STATIQUE DE FISSURES**

<i>III.1. Etude bibliographique</i>	88
III.1.1. Critères d'amorçage	88
III.1.2. Critères de bifurcation	89
III.1.3. Critères de stabilité	90
III.1.4. Méthodes numériques utilisées	91
<i>III.2. Amorçage d'une fissure</i>	94
III.2.1. Les outils numériques nécessaires à la localisation et à l'amorçage d'une fissure	94
III.2.2. Amorçage en contrainte critique	96
III.2.3. Amorçage en endommagement critique	96
III.2.4. Application au compactage de coques	97
<i>III.3. Propagation d'une fissure</i>	99
III.3.1. Critère de la contrainte normale maximale	100
III.3.2. Critère de la densité d'énergie de déformation minimale	102
III.3.3. Critère du taux de restitution d'énergie maximal	104
III.3.4. Comparaison	105
III.3.5. Bilan	115
<i>III.4. Applications et développements spécifiques</i>	116
III.4.1. Plaque trouée pré-fissurée	116
III.4.2. Poutres en flexion et formation de débris	117
III.4.3. Procédés à fort cisaillement et contact matière-matière	121
III.4.4. Propagation dans les structures multimatériaux	125
<i>III.5. Conclusion</i>	134

## ***IV. INFLUENCE DE L'OXYDATION DE GAINES EN ZIRCALOY 4 SUR LEURS PROPRIETES MECANIQUES***

<b><i>IV.1. Contexte de l'étude</i></b>	<b><i>136</i></b>
IV.1.1. L'essai spécifique de compactage	138
IV.1.2. Le zircaloy 4 irradié	139
IV.1.3. Recherche du matériau simulant	141
IV.1.4. Bilan et matériau simulant retenu	144
<b><i>IV.2. Modélisation numérique du compactage</i></b>	<b><i>145</i></b>
IV.2.1. Validation de la loi de comportement : dépliage d'un demi-tube	145
IV.2.2. Prise en compte du multi-domaines : compactage de trois tubes superposés	147
IV.2.3. Prise en compte de la fissuration : compactage d'un tube	149
IV.2.4. Etudes de sensibilité	152
IV.2.5. Bilan	153
<b><i>IV.3. Etude et discussion sur l'influence d'une couche d'oxyde</i></b>	<b><i>154</i></b>
IV.3.1. Oxydation du zircaloy 4	154
IV.3.2. Etude expérimentale de l'oxydation de tubes en zircaloy 4 écroui	160
IV.3.3. Modélisation numérique du compactage d'un tube oxydé	169
<b><i>IV.4. Bilan</i></b>	<b><i>175</i></b>

## ***CONCLUSION ET PERSPECTIVES*** ***176***

## ***ANNEXES***

<b><i>A. TECHNIQUES DE MAILLAGE</i></b>	<b><i>A.1</i></b>
A.1. Discrétisation de la frontière	A.1
A.2. Triangulation de Delaunay	A.2
A.3. Régularisation du maillage	A.3
<b><i>B. CHAMPS MECANIQUES A LA POINTE D'UNE FISSURE STATIQUE</i></b>	<b><i>B.1</i></b>
B.1. Facteurs d'intensité de contraintes	B.1
B.2. Justification des éléments singuliers	B.2
<b><i>C. COURBES DE RESISTANCE</i></b>	<b><i>C.1</i></b>
C.1. Courbe de résistance	C.1
C.2. Module de déchirement $T$	C.2

***D. IMPLEMENTATION DU CRITERE DE LA CONTRAINTE NORMALE  
MAXIMALE***\_\_\_\_\_ ***D.1***

***D.1. Exemple d'application symétrique***\_\_\_\_\_ ***D.1***

***D.2. CNM1***\_\_\_\_\_ ***D.2***

***D.3. CNM2***\_\_\_\_\_ ***D.3***

***D.4. CNM3***\_\_\_\_\_ ***D.4***

***D.5. Exemple d'application non symétrique***\_\_\_\_\_ ***D.5***

***D.6. Bilan***\_\_\_\_\_ ***D.7***

***REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES***

# **INTRODUCTION**

Les problèmes rencontrés en mécanique ou en physique conduisent pour la plupart à des systèmes d'équations aux dérivées partielles complexes, avec des conditions aux limites et des conditions initiales spécifiques. Des solutions analytiques approchées existent pour certains problèmes, en général pour le cas de géométries très régulières, et de conditions de chargement simples. Cependant, les problèmes pratiques auxquels sont confrontés les ingénieurs aujourd'hui sont plus complexes et nécessitent en général une résolution approchée par une méthode numérique. Parmi les nombreuses méthodes numériques développées ces dernières années, la méthode des éléments finis est sans aucun doute la méthode la plus utilisée, et celle qui offre le plus de solutions pour un très grand nombre d'applications. Enormément utilisée en mécanique des fluides et en calcul de structures, elle permet également de traiter certains problèmes thermiques, électromagnétiques, ...

Dans certains champs d'application, d'autres méthodes ont été développées, telles que les différences finies, volumes finis, méthodes spectrales, d'éléments frontières ou encore « meshless » (sans maillage). Cependant la méthode des éléments finis reste la méthode la plus universelle, qui regroupe le plus grand nombre d'applications, et qui constitue la base d'un très grand nombre de codes de calcul numérique commercialisés. Cette méthode consiste à transformer le problème aux limites en un problème variationnel, et à approximer l'espace fonctionnel où on cherche la solution. On utilise alors une approximation simple des variables inconnues, afin de transformer les équations aux dérivées partielles continues, en un système d'équations portant sur les variables discrétisées. Ces dernières pouvant être résolues par de nombreuses méthodes numériques.

Le CEMEF s'est rendu compte très tôt de l'importance de telles méthodes numériques pour la mise en forme des matériaux. Plusieurs codes de calcul ont alors été développés aussi bien en forgeage, qu'en laminage, en remplissage de moule ou encore pour le thermoformage. Chacun de ces codes possèdent leurs propres caractéristiques, mais tous visent à prévoir le chemin de déformation dans un premier temps, puis à améliorer la qualité des pièces finales obtenues.

Dans le cadre du forgeage, le code FORGE2 a été développé au CEMEF à la fin des années 80 [Cescutti 1989]. L'objectif visé alors était triple :

- maîtriser la qualité et la fiabilité de l'écoulement, de façon à prévenir l'apparition de défauts majeurs tels que le repli ;
- maîtriser l'état métallurgique du métal à travers son histoire thermo-mécanique, de façon à pouvoir prédire et contrôler les propriétés mécaniques du produit final ;
- optimiser la gamme de forgeage, à travers une minimisation de la perte de matière et de la densité de défauts, une simplification de la gamme de fabrication, et une augmentation de la durée de vie de l'outillage.

Pour simuler avec précision une opération de forgeage, deux aspects sont particulièrement importants :

- la possibilité de traiter un grand nombre de matériaux à travers des lois de comportement très générales. Ces lois, de type élasto-viscoplastiques, nécessitent une méthode de résolution non linéaire ;
- la nécessité de pouvoir étudier de grandes déformations. Pour cela, une formulation en déplacement de type lagrangien réactualisé, couplée à un remailleur automatique, ont été utilisés.

De nombreux autres développements ont contribué à la robustesse et à la qualité du code FORGE2. Ces dernières années une nouvelle version, visant à modéliser plusieurs sous-domaines et plusieurs matériaux, a été développée sur la base du code FORGE2 : le code FORGE2 Multimatériaux [Magny 1996].

Les études et recherches que nous avons mené en mécanique de la rupture s'appuient sur un certain nombre des concepts mis en œuvre précédemment. Dans ce manuscrit, nous proposons donc de généraliser les **techniques de maillage et remailleur automatique multi-domaines**, et de les utiliser pour **modéliser la propagation quasi-statique de fissures dans un maillage**.

Dans le premier chapitre, nous présentons le code FORGE2 Multimatériaux à travers les équations de la mécanique et leur résolution éléments finis. Nous insistons particulièrement sur les développements numériques effectués sur le mailleur et le remailleur automatique, et qui permettent de gérer plusieurs sous-domaines et plusieurs matériaux. Ces développements procurent une grande souplesse et une bonne maîtrise de la structure du maillage, et vont nous permettre dans la suite de l'étude de modéliser avec précision la propagation de fissures.

Le second chapitre consiste à analyser les champs mécaniques dans une pièce fissurée. Pour cela, nous commencerons par introduire des notions de mécanique de la rupture ainsi que les méthodes numériques les plus utilisées dans ce domaine. Nous montrerons ensuite l'importance du maillage en pointe de fissure pour obtenir une bonne précision sur les champs mécaniques, et les paramètres caractéristiques en mécanique de la rupture.

Dans le troisième chapitre, les outils numériques permettant de modéliser l'amorçage et la propagation quasi-statique de fissures dans un maillage sont présentés. Nous introduisons trois critères de bifurcation de fissures basés sur le champ de contraintes en pointe de fissure, sur la densité d'énergie de déformation et sur le taux de restitution de l'énergie, et nous comparons leurs résultats sur des cas simples. Enfin de nombreux exemples d'applications sont présentés afin de montrer la robustesse et la précision des techniques utilisées.

Le quatrième chapitre consiste à utiliser les différents outils présentés dans les chapitres précédents pour étudier les mécanismes de déformation et de rupture lors du compactage de tubes en zircaloy 4 (matériau utilisé dans l'industrie nucléaire). Une étude expérimentale est menée en parallèle afin de valider les résultats numériques, et afin d'étudier l'influence de l'oxydation sur les propriétés mécaniques du zircaloy 4.

**CONCLUSION  
ET  
PERSPECTIVES**

La Mécanique de la Rupture est un domaine en plein essor, dont l'étude fait appel à différentes disciplines : modélisation mathématique et mécanique, analyse numérique, investigations physiques et métallurgiques, ...

Dans le cadre des structures mono- et multi-matériaux auxquelles nous nous sommes intéressés ici, nous avons cherché à mettre en œuvre cette transdisciplinarité afin de mieux analyser les phénomènes physiques, mécaniques et métallurgiques impliqués dans le problème industriel qui nous intéressait.

A cette occasion, nous avons développé et implémenté des méthodes numériques faisant appel à des concepts dérivant à la fois du calcul de structures en petites déformations et des techniques utilisées pour les grandes déformations ; en particulier les développements liés au remaillage automatique ont permis de faire sauter le verrou lié à la modification topologique du maillage lors de la propagation de fissures. Le code FORGE2®, développé initialement pour la modélisation numérique du forgeage, a été généralisé à la modélisation de structures multimatériaux. Notre travail a consisté à introduire de nouveaux outils numériques permettant de gérer l'apparition et le développement de plusieurs contours et plusieurs sous-domaines lors d'un calcul mécanique, puis d'améliorer le remaillage automatique de façon à modéliser avec précision la propagation de fissures dans un maillage.

Nous avons présenté, dans le premier chapitre, le code FORGE2 Multimatériaux dont la particularité est de pouvoir, à présent, modéliser de façon totalement automatique plusieurs sous-domaines et plusieurs matériaux. Ce code de calcul éléments finis 2D permet de modéliser un ou plusieurs matériaux élasto-viscoplastiques en grandes déformations. Cela nécessite, comme nous l'avons vu, de créer une structure de données de maillage complexe de façon à gérer les intersections des nombreux contours. Nous sommes également confrontés à des problèmes mal conditionnés que nous devons résoudre par des méthodes itératives pré-conditionnées.

Dans le second chapitre, nous avons introduit les bases de la mécanique de la rupture et les méthodes numériques couramment utilisées dans ce domaine. Nous avons montré les difficultés liées à la singularité créée par la pointe d'une fissure. Les développements apportés au mailleur nous permettent de mailler finement et de façon bien structurée le voisinage de la pointe de fissure. Les éléments singuliers avec nœud au quart permettent de rendre compte de la singularité d'ordre  $\frac{1}{2}$  sur les champs mécaniques en pointe de fissure. La méthode  $G\theta$  a été implémentée pour le calcul du taux de restitution d'énergie. Les comparaisons par rapport à d'autres techniques de calcul de  $G$  ont montré la grande précision de cette méthode ainsi que son indépendance par rapport au maillage. Il sera intéressant par la suite de généraliser cette méthode aux structures multimatériaux. Pour cela, il sera nécessaire de gérer convenablement les intersections de la couronne d'intégration et des interfaces entre les différents matériaux.

Le remaillage multimatériaux a été adapté, dans le chapitre 3, à la modélisation de la propagation d'une ou de plusieurs fissures dans un maillage. Sa grande souplesse permet de conserver un maillage concentrique, avec raffinement évolutif et couronne d'intégration à la tête de chaque fissure. Les trois critères de bifurcation implémentés ont été comparés sur de nombreux exemples. Ils donnent tous les trois de bons résultats, mais le critère de la densité d'énergie de déformation minimale semble être assez sensible à la qualité du maillage. Le critère du taux de restitution d'énergie maximal, à partir de la méthode  $G\theta$ , donne de bons résultats indépendamment de la qualité du maillage. Cependant, la validité de la méthode  $G\theta$  pour le calcul du taux de restitution de l'énergie n'est justifiée en élastoplasticité que si il n'y a pas de déchargement. Or un incrément de fissure correspond à un déchargement local, et on ne peut donc pas modéliser la propagation quasi-statique dans un matériau élastoplastique à l'aide de cette méthode. Enfin le critère de la contrainte normale maximale est simple, facilement implémentable, et donne de bons résultats. Il offre de plus l'avantage de pouvoir être utilisé pour des matériaux élastoplastiques dans le cadre de la plasticité confinée. Cependant le calcul de la direction de propagation provient des champs mécaniques locaux en pointe de fissure, et il est donc indispensable d'y avoir un maillage fin. Les nombreux exemples d'applications montrent la robustesse et la précision des techniques introduites.

Enfin le chapitre 4, à vocation applicative, nous a permis de mettre en pratique tous les outils numériques présentés dans les chapitres précédents. Nous avons modélisé le compactage de tubes en zircaloy 4, de façon à étudier les mécanismes de déformation et de rupture lors de l'essai de compactage. Nous avons également mené en parallèle une étude expérimentale du compactage de tubes en zircaloy 4 écroui, puis de tubes en zircaloy 4 écroui oxydé. Cette étude fut très enrichissante d'un point de vue expérimental, puisqu'elle nous a permis d'étudier de façon beaucoup plus fine les mécanismes de rupture. Les observations réalisées au Microscope Electronique à Balayage ont montré l'importance de l'oxydation sur la rupture des tubes en zircaloy 4. Elles permettent ainsi de déterminer un ensemble de phénomènes microscopiques qu'il serait souhaitable de modéliser pour obtenir de meilleurs résultats sur le compactage de tubes oxydés : interface métal-oxyde ondulée, contraintes résiduelles dues à l'oxydation très importantes, fragilisation du matériau par la présence d'hydrures, anisotropie de la zircone, ... Une fois tous ces phénomènes pris en compte, notre connaissance approximative de certaines propriétés du matériau (ténacité de l'interface métal-oxyde, taux de porosité dans la zircone, ...) risque d'être le facteur limitant. A partir d'un code de calcul numérique prenant en compte ces nombreux phénomènes, il sera alors envisageable d'améliorer notre connaissance matériau grâce à une analyse inverse sur des paramètres tels que la contrainte à rupture de la zircone ou de l'interface métal-oxyde.

La conjonction des techniques développées et utilisées dans ces quatre chapitres nous a ainsi permis de mettre au point un outil d'analyse efficace et complètement automatique en mécanique de la rupture. Les perspectives envisageables à partir d'un tel outil sont très nombreuses :

- Un couplage endommagement-mécanique de la rupture. Si la plupart des auteurs se contentent d'utiliser l'une ou l'autre de ces deux approches, nous pensons pour notre part qu'il serait très intéressant de les coupler de façon à modéliser le processus complet de rupture d'une pièce : dégradation des propriétés mécaniques du matériau dû à la croissance et à la coalescence de cavités (endommagement) et conduisant à la propagation d'une macro-fissure dans la pièce (mécanique de la rupture). Cela nécessiterait à la fois d'introduire des lois d'endommagement couplées au comportement mécanique du matériau, et de généraliser certaines des méthodes numériques déjà implémentées aux matériaux élastoplastiques.
- La modélisation de la propagation pour des applications à fort cisaillement (usinage, découpage). Pour ces applications, nous avons montré que les critères de propagation classiques n'étaient pas adaptés, et qu'il fallait plutôt s'orienter vers des critères basés sur le taux de cisaillement maximum. Pour parvenir à modéliser la fissuration dans de telles zones fortement cisillées, il sera important par la suite de gérer convenablement le contact des lèvres de la fissure. Pour ces applications, le fait de pouvoir modéliser la séparation complète de la pièce en deux maillages distincts représente également une avancée significative.
- La propagation de fissures dans des pièces multimatériaux. Nous avons montré des exemples de propagation dans des pièces contenant des inclusions. Cette caractéristique peut être très intéressante en génie civil pour des propagations dans le béton, ou encore pour des propagations dans des pièces composites ou multicouches. La propagation d'une fissure au travers d'une interface entre deux matériaux constituerait une avancée significative en modélisation numérique de la mécanique de la rupture et offrirait un vaste champ d'applications industrielles.

**REFERENCES**  
**BIBLIOGRAPHIQUES**

[Argelès 1993] M. Argelès – Corrosion du Zy4 en milieux aqueux entre 25°C et 360°C : effet de la radiolyse sur la croissance des couches minces d'oxyde, Thèse de doctorat de l'INPG, 1993.

[Arnott et al. 1995] D.R. Arnott et M.R. Kindermann – Constant displacement rate method for testing adhesive bonds, *J. Adhesion*, 48, pp. 85-100, 1995.

[Attigui 1997] M. Attigui – Modélisation du comportement dynamique des structures fissurées par la mécanique de la rupture, Thèse de doctorat de l'université de Limoges, Décembre 1997.

[Averty 1997] X. Averty – Caractéristiques Mécaniques à Température Ambiante du Zircaloy Irradié, *Rapport DMT n°97/153, LECM n°97/026*, Septembre 1997.

[Axelsson 1976] O. Axelsson – A class of iterative methods for finite element equations, *Comp. Meth. in Appl. Mech. and Engng.*, Vol. 9, pp. 123-137, 1976.

[Ballatore et al. 1990] E. Ballatore, A. Carpinteri, G. Ferrara et G. Melchiorri – Mixed mode fracture energy of concrete, *Engng. Fract. Mech.*, Vol. 35, N°1/2/3, pp. 145-157, 1990.

[Baouch 1998] D. Baouch – Validation numérique des paramètres de fissuration en élastoplasticité, Thèse de doctorat de l'Université Blaise Pascal Clermont II, 1998.

[Barsoum 1976] R.S. Barsoum – On the use of isoparametric finite elements in linear fracture mechanics, *Int. J. for Num. Meth. in Engng.*, Vol. 10, pp. 25-37, 1976.

[Bauvineau 1996] L. Bauvineau – Approche locale de la rupture ductile : application à un acier Carbone-Manganèse. Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 1996.

[Bay et al. 1999] F. Bay, P.O. Bouchard, E. Darque-Ceretti, E. Felder et S. Scotto-Sheriff – Numerical and experimental analysis of a fracture mechanics test for adhesively bonded joints, *J. Adhesion Sci. Technol.*, Vol. 13, N°8, pp. 931-957, 1999.

[Bellet 1994] M. Bellet – Mécanique et thermique des milieux continus, Séminaire de Plasticité, Tome 1, Ch. 1, Sophia Antipolis, Septembre 1994.

[Belytschko et al. 1994] T. Belytschko, L. Gu et Y.Y. Lu – Fracture and crack growth by element free Galerkin method, *Modelling Simul. Mater. Sci. Engng.*, Vol. 2, pp. 519-534, 1994.

[Billot et al. 1989] P. Billot, P. Beslu, A. Giordano et J. Thomazet – Zirconium in the nuclear industry, ASTM STP 1023, San Diego, pp. 165, 1989.

[Bocca et al. 1990] P. Bocca, A. Carpinteri et S. Valente – Size effects in the mixed mode crack propagation : softening and snap-back analysis, *Engng. Fract. Mech.*, Vol. 35, pp. 159-170, 1990.

[Bocca et al. 1991] P. Bocca, A. Carpinteri et S. Valente – Mixed mode fracture of concrete, *Int. J. Solids Structures*, Vol. 27, N°9, pp. 1139-1153, 1991.

[Borouchaki et al. 1997] H. Borouchaki et P.L. George – Aspects of 2D Delaunay mesh generation, *Int. J. for Num. Meth. in Engng.*, Vol. 40, pp. 1957-1975, 1997.

[Bouchard 1997] P.O. Bouchard – Simulation numérique d'un essai d'adhérence adhésif/polymère/acier, *Rapport de fin d'étude*, Ecole Supérieure en Sciences Informatiques, Septembre 1997.

[Bouchard 1998] P.O. Bouchard – Etude numérique et expérimentale du compactage de tubes en zircaloy 4, *Rapport d'avancement d'année probatoire*, CEMEF, Juin 1998.

[Bouchard et al. 1999] P.O. Bouchard, F. Bay, Y. Chastel and I. Tovenà – Experimental and Numerical Analysis of Fracture of Zircaloy4 tubes under compaction, *Acte du 2nd ESAFORM Conference sur le thème « Material Forming »*, Guimaraes (Portugal), Avril 1999.

[Bouchard et al. 2000a] P.O. Bouchard, F. Bay, Y. Chastel et I. Tovenà – Crack propagation modelling using an advanced remeshing technique, to appear in *Computer Meth. In Appl. Mech. and Engng.*

[Bouchard et al. 2000b] P.O. Bouchard, F. Bay, Y. Chastel – Comparison of crack propagation criteria using advanced finite element techniques, submitted to *Int. J. for Num. Meth. in Engng.*

[Bouchard et al. 2000c] P.O. Bouchard, F. Bay, Y. Chastel and I. Tovenà – Influence of oxidation on mechanical properties of zircaloy 4 tubes under compaction, *International Symposium on Mathematical Modeling in Metal Processing and Manufacturing, 39th Annual Conference of Metallurgists*, Ottawa, 20-23 Août 2000.

[Bouchard et al. 2000d] P.O. Bouchard, F. Bay, Y. Chastel – Modelling of discrete crack propagation, *The Fifth International Conference on Computational Structures Technology & The Second International Conference on Engineering Computational Technology*, Leuven, 6-8 Septembre 2000.

[Bouffioux et al. 1995] P. Bouffioux, B. Gabriel, A. Soniak et J.P. Mardon – Influence d'un chargement cyclique sur les propriétés viscoplastiques de tubes de gaine en zircaloy 4, Le zirconium, Journées d'études "propriétés-microstructures", les Editions de Physique, Saclay, pp. 199-208, Avril 1995.

[Bouineau 1999] V. Bouineau – Oxydation des coques et matériaux simulant, *Rapport interne CEA DEC/SH2C/LCG*, janvier 1999.

[Bouyne 1995] E. Bouyne – Propagation et arrêt de fissures dans un acier 2 ¼ de Cr., Rapport de DEA, Centre des Matériaux, Ecole des Mines de Paris, 1995.

[Bradhurst et al. 1970] D.H. Bradhurst, P.M. Heuer – The influence of oxide stress on the breakaway oxidation of Zircaloy-2, *J. of Nuclear Materials*, Vol. 37, pp. 35-47, 1970.

[Brokken 1999] D. Brokken – Numerical modelling of ductile fracture in blanking, PhD thesis of the Eindhoven University of Technology, 1999.

[Bryner 1979] J.S. Bryner – The cyclic nature of corrosion of Zircaloy-4 in 633K water, *J. of Nuclear Materials*, Vol. 82, pp. 84-101, 1979.

[Bui 1973] H.D. Bui – Dualité entre les intégrales de contour. *Compte Rendu Acad. Sciences*, T. 276, Paris, Mai 1973.

[Bui et al. 1981] H.D. Bui et A. Ehrlacher – Propagation of damage in elastic and plastic solids, *Advances in fracture research 2*, Pergamon Press, London 1981.

[Bui et al. 1985] H.D. Bui, J.M. Proix – Découplage des modes mixtes de rupture en thermo-élasticité par des intégrales indépendantes du contour. *Actes du troisième colloque Tendances Actuelles en Calcul de Structures*, Bastia, pp. 631-643, novembre 1985.

[Burlet 1998] H. Burlet – Rappels d'éléments finis, calculs de K, G, J, C\*. *Cours de DEA de Mécanique et Matériaux*, Centre des Matériaux (Evry), Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 1998.

[Bush 1999] M.B. Bush – Prediction of crack trajectory by the boundary element method, *Structural Engng. and Mech.*, Vol. 7, N°6, pp. 575-588, 1999.

[Ceretti 1999] E. Ceretti – Numerical study of segmented chip formation in orthogonal cutting, , *Proceedings (CD-ROM) of the 2nd International Workshop on Modelling of Machining Operations*, Nantes, 25-26 juin, 1999.

[Červenka 1994] J. Červenka – Discrete crack modeling in concrete structures, PhD thesis of the University of Colorado, 1994.

[Chenot 1994] J.L. Chenot – Introduction à la méthode des éléments finis : élasticité et thermique, Séminaire de Plasticité, Tome 1, Ch. 6, Sophia Antipolis, Septembre 1994.

[Chenot et al. 1998] J.L. Chenot et L. Fourment – Numerical formulations and algorithms for solving contact problems in metal forming simulation, *Computational Mech.*, E. Oñate and S.R. Idelsohn (Eds), Barcelona, Spain, 1998.

[Ciarlet 1982] P.G. Ciarlet – Introduction à l'analyse numérique matricielle et à l'optimisation, Editions Dunod, Paris, 1998.

[Comninou 1977] M. Comninou – The interface crack, *J. Appl. Mech.*, pp. 631-636, 1977.

[Cook et al. 1972] T.S. Cook et F. Erdogan – Stresses in bonded materials with a crack perpendicular to the interface, *Int. J. Engrg Sc.*, Vol. 10, pp. 677-697, 1972.

[Coupez 1991] T. Coupez – Grandes transformations et remaillages automatiques, Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, novembre 1991.

[Cozzi 2000] F. Cozzi – Contact matière matière pour la gestion du contact des lèvres d'une fissure, Rapport de projet de fin d'étude ESSI, Avril 2000.

[David et al. 1971] G. David, R. Geschier, C. Roy – Etude de la croissance de l'oxyde sur le zirconium et le Zircaloy-2, *J. of Nuclear Materials*, Vol. 38, pp. 329-339, 1971.

[De Lorenzi 1985] H.G. De Lorenzi – Energy release rate calculations by the finite element method. *Engng. Fracture Mech.*, Vol. 21, N°1, pp. 129-143, 1985.

[Destouches 2000] N. Destouches – Influence de l'oxydation de gaines en zircaloy 4, Rapport de stage IUP de Lorient – CEMEF, Mars 2000.

[Destuynder et al. 1981] Ph. Destuynder, M. Djaoua – Sur une interprétation mathématique de l'intégrale de Rice en théorie de la rupture fragile, *Math. Meth. In the Appl. Sci.*, Vol. 3, pp. 70-87, 1981.

[Destuynder et al. 1983] Ph. Destuynder, M. Djaoua, S. Lescure – Quelques remarques sur la mécanique de la rupture élastique. *J. de Méca. Théorique et Appliquée*, Vol. 2, N°1, pp. 113-135, 1983.

[Dhatt et al.1984] G. Dhatt et G. Touzot – Une présentation de la méthode des éléments finis, *Ed. Maloine*, 1981.

[Ding et al. 1993] Y. Ding, D.O. Northwood – TEM study of the oxide-metal interface formed during corrosion of Zr-2,5wt% Nb pressure tubing, *Mat. Charact.*, Vol. 30, pp. 13-22, 1993.

[Dumas 2000] J. Dumas – Modèles d'endommagement dans les procédés à fort cisaillement et simulation numérique du découpage, Rapport bibliographique de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, CEMEF, Mars 2000.

[Dumont et al. 1994] A. Dumont, J. Thomazet, D. Charquet, J. Senevat – Enhancement of Zircaloy-4 cladding resistance : from AFA to AFA2G, *Proc. of Int. Symp. Fontevraud III*,

« Contribution of materials investigation to the resolution of problems encountered in pressurized water reactors », 1994.

[Ehrlacher 1985] A. Ehrlacher – Contribution à l'étude thermodynamique de la progression de fissure et à la mécanique de l'endommagement brutal, Thèse de doctorat d'état de l'Université Pierre et Marie Curie Paris 6, Février 1985.

[El Abdi 1986] R. El Abdi – Modélisation d'un matériau hétérogène en présence de fissure, Thèse de l'Université de Bordeaux I, 1986.

[Elouard 1993] A. Elouard – Etude numérique par éléments finis de la fissuration avec remaillage automatique – Application à la mécanique des chaussées, Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Avril 1993.

[Erdogan et al. 1963] F. Erdogan et G.C. Sih – On the crack extension in plates under plane loading and transverse shear, *J. Basic Engng.*, Vol. 85, pp. 519-527, 1963.

[Erdogan 1965] F. Erdogan – Stress distribution in bonded dissimilar materials with cracks, *J. Appl. Mech.*, 32, p. 418, 1965.

[Erdogan 1968] F. Erdogan – Crack propagation theories. *Fracture II*, wiley, Y.N. 1968.

[Erdogan 1983] F. Erdogan – Stress intensity factors. *J. of Appl. Mech.*, Vol. 50, pp. 992-1002, 1983.

[Eshelby 1968] J.D. Eshelby – The continuum theory of lattice deffects, *Solid Stat. Physics*, Vol. II, pp. 79-144, 1968.

[Evans 1968] D.J. Evans – The use of preconditionning in iterative methods for solving linear equations with symmetric positive definite matrices, *J. Inst. Math. Applies*, Vol. 4, pp. 295-314, 1968.

[Flemming et al. 1997] M. Flemming, Y. A. Chu, B. Moran et T. Belytschko – Enriched element-free Galerkin methods for crack tip fields, *Int. J. Num. Methods Engng.*, Vol. 40, pp. 1483-1504, 1997.

[Fourment et al. 1997] L. Fourment, A. Oudin, E. Massoni, G. Bittes et C. Le Calvez – Numerical simulation of tool wear in orthogonal cutting, *Proceedings of the First French and German Conference on High Speed Machining*, June 17-18, Metz, France, 1997.

[Fourment et al. 2000] L. Fourment, P.O. Bouchard – Numerical simulation of chip formation and crack propagation during non-steady cutting processes, to appear in *Int. J. of Forming Processes*.

[François et al. 1993] D. François, A. Pineau, A. Zaoui – Comportement mécanique des matériaux. Ed. Hermes, Paris, 1993.

[Gilles et al. 1993] Ph. Gilles, Ph. Mourgue, M. Rochette – Précision du calcul de la force d'extension de fissure G : effets du maillage et avantages de la méthode G- $\theta$ . *Acte du Colloque National en Calcul de Structures*, Ed. HERMES et INRIA, Vol. 2, pp. 639-670, 1993.

[Godlewski 1990] J. Godlewski – Oxydation d'alliages de zirconium en vapeur d'eau : influence de la zircone tétragonale sur le mécanisme de croissance de l'oxyde, Thèse de doctorat de l'Université Technologique de Compiègne, 1990.

[Goijaerts 1999] A. Goijaerts – Prediction of ductile fracture in metal blanking, PhD thesis of the Eindhoven University of Technology, 1999.

[Golub et al. 1983] G.H. Golub et G.A. Meurant – Résolution numérique des grands systèmes linéaires, Eyrolles Paris, 1983.

[Gratacos et al. 1991] P. Gratacos, P. Montmitonnet et J.L. Chenot – An integration scheme for Prandtl-Reuss elastoplastic constitutive equations, *Proceedings of the European Conference on New Advances in Computational Structural Mechanics*, pp. 51-64, Giens, France, Avril 1991.

[Griffith 1920] A.A. Griffith – The phenomena of rupture and flow in solids. *Phil. Trans. Roy. Soc. Of London*, A221, pp. 163-197, 1920.

[Gurson 1977] A.L. Gurson – Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth : Part I – Yield criteria and flow rules for porous ductile media, *Transaction of the ASME*, Janvier 1977.

[Hancock et al. 1993] J.W. Hancock, W.G. Reuter, D.M. Parks – Constraint and toughness parameterized by T. Constraint Effects in Fracture, ASTM STP 1171, Ed. E.M. Hackett, K.H. Schwalbe, R.H. Dodds, pp. 21-40, 1993.

[Hellen 1975] T.K. Hellen – On the method of virtual crack extensions. *Int. J. for Num. Meth. in Engng*, Vol. 9, pp. 187-207, 1975.

[Henshell et al. 1975] R.D. Henshell, K.G. Shaw – Crack tip finite elements are unnecessary, *Int. J. for Num. Meth. in Engng*, Vol. 9, pp. 495-507, 1975.

[Heztenes et al. 1952] M. Heztenes et E. Stieffel – Methods of conjugate gradient for solving linear systems, *J. Res. Nat. Bur. Of Stan.*, Vol. B49, pp. 409-436, 1952.

[Hibbitt 1977] H.D. Hibbitt – Some properties of singular isoparametric elements, *Int. J. for Num. Meth. in Engng*, Vol. 11, N°1, pp. 180-184, 1977.

[Hutchinson 1968] J.W. Hutchinson – Singular behaviour at the end of a tensile crack in a hardening material, *J. Mech. Phys. Solids*, Pergamon Press, Vol. 16, pp. 13-31, 1968.

[Irwin 1957] G.R. Irwin – Analysis of stresses and strains near the end of crack traversing a plate, *J. of Appl. Mech. Transactions*, pp.361-364, 1957.

[Jirásek 1999] M. Jirásek – Numerical modeling of deformation and failure of materials, *Short Course*, Aachen, 3-7 Mai 1999.

[Könke 1995] C. Könke – Damage evolution in ductile materials: from micro- to macro-damage, *Comp. Mech.*, Vol. 15, pp. 497-510, 1995.

[Lascaux et al. 1994] P. Lascaux et R. Théodor – Analyse numérique matricielle appliquée à l'art de l'ingénieur, Masson, Paris, 1994.

[Lemaitre et al. 1988] J. Lemaitre et J.L. Chaboche – Mécanique des matériaux solides, Dunod 2ème édition, Paris, 1988.

[Levin et al. 1975] E.M. Levin, H.F. Mc Murdie – Phase diagrams for ceramists, *The American Ceramic Society*, 1975.

[Liebowitz 1971] H. Liebowitz – Fracture, an advanced treatise, Vol. 3 : *Engng fundamentals and environmental effects*, Academic Press, New York and London, 1971.

[Lin et al. 1988] S.C. Lin, J.F. Abel – Variational approach for a new direct-integration form of the virtual crack extension method, *Int. J. Fract.*, Vol. 38, pp. 217-235, 1988.

[Logé 1999] R. Logé – Influence des conditions thermomécaniques et de la microstructure sur les évolutions de texture cristallographique du zircaloy 4 en mise en forme à chaud, Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, avril 1999.

[Lu et al. 1983] M.C. Lu, F. Erdogan – Stress intensity factors in two bonded elastic layers containing cracks perpendicular to and on the interface, *Engng. Fract. Mech.*, Vol. 18, N°3, pp. 491-506, 1983.

[Maiti et al. 1984] S.K. Maiti, R.A. Smith – Comparison of the criteria for mixed mode brittle fracture based on the preinstability stress-strain field. Part II: pure shear and uniaxial compressive loading, *Int. J. Fract.*, Vol. 24, pp. 5-22, 1984.

[Marchal 1997] Y. Marchal – Mechanics and physics of the ductile fracture of thin plates, Thèse de doctorat de l'université de Louvain-la-Neuve, 1997.

[Marusich et al. 1995], T.D. Marusich et M. Ortiz – Modelling and simulation of high speed machining, *Int. J. for Num. Meth. in Engng*, Vol. 38, pp. 3675-3694, 1995.

[Maugis 1999] D. Maugis – Contact, adhésion et rupture de solides élastiques, Hermann, Paris, Chapitre 5, 2000.

[Meijerink et al. 1977] J.A. Meijerink et H. Van Der Vost – An iterative solution method for linear systems of which the coefficient matrix is a symmetric m-matrix, *Math. Of Comp.*, Vol. 31, N°137, pp. 148-162, 1977.

[Menai 1995] M. Menai – Simulation numérique tridimensionnelle du refroidissement des pièces de fonderie : approche thermomécanique, Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, mars 1995.

[Miannay 1995] D. Miannay – Mécanique de la rupture. Les éditions de Physique, Monographie de Matériologie, Courtabœuf, 1995.

[Montmitonnet 1994] P. Montmitonnet – Simulation des écoulements élastoplastiques par éléments finis, Séminaire de Plasticité, Tome 2, Ch. 8, Sophia Antipolis, Septembre 1994.

[Mulot 1997] S. Mulot – Etude théorique et expérimentale du laminage à pas de pèlerin de tubes en zircaloy 4, Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, février 1997.

[Murakami et al. 1987] Y. Murakami et al. – Stress intensity factors handbook. Pergamon Press, 1987.

[Needleman et al. 1987] A. Needleman and V. Tvergaard – An analysis of ductile rupture modes at a crack tip, *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 35, N° 2, pp. 151-183, 1987.

[Nguyen 1980] Q.S. Nguyen – Méthodes énergétiques en mécanique de la rupture. *J. de Méca.*, Vol. 19, N°2, pp. 363-386, 1980.

[O'Dowd et al. 1994] N.P. O'Dowd, C.F. Shih – Two parameter fracture mechanics : theory and applications. *Fracture Mechanics*, Vol. 24, ASTM STP 1207, Ed. J.D. Landes, D.E. McCabe, J.A.M. Boulet, pp. 21-47, 1994.

[Oyane et al. 1980] M. Oyane, T. Sato, K. Okimoto et S. Shima – Criteria for ductile fracture and their applications, *J. Mech. Working Tech.*, 4, pp. 65-81, 1980.

[Parise 1996] M. Parise – Mécanismes de corrosion des alliages de zirconium, Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, décembre 1996.

[Parks 1974] D.M. Parks – A stiffness derivative finite element technique for determination of crack tip stress intensity factors. *Int. J. Fract.*, Vol. 10, N°4, pp. 487-502, 1974.

[Petit 1990] C. Petit – Modélisation des milieux composites multicouches fissurés par la mécanique de la rupture, Thèse de Doctorat de l'Université de Clermont-Ferrand II, janvier 1990.

[Pilling et al. 1923] N.B. Pilling, R.E. Bedworth – The oxidation of metals at high temperatures, *J. Inst. Metals*, Vol. 29, pp. 529-591, 1923.

[Pineau 1998] A. Pineau – Mécanique élastoplastique de la rupture. *Cours de DEA Mécanique et Matériaux*. Evry, 1998.

[Pluvinage 1989] G. Pluvinage – Mécanique élastoplastique de la rupture « critères d'amorçage », Ed. CEPADUES, Metz, 1989.

[Prat 1994] F. Prat – Etude et modélisation de l'effet de l'hydruration sur le comportement mécanique de composants de structure en zircaloy 4, Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, septembre 1994.

[Rashid 1968] Y.R. Rashid – Ultimate strength analysis of prestressed concrete pressure vessels, *Nuclear Engng and Design*, Vol. 7, pp. 334-344, 1968.

[Rashid 1998] M.M. Rashid – The arbitrary local mesh replacement method : an alternative to remeshing for crack propagation analysis, *Computer Meth. in Appl. Mech. and Engng.*, Vol. 154, pp. 133-150, 1998.

[Reid 1971] J.K. Reid – On the method of conjugate gradients for solution of large sparse systems of linear equation, Academic Press, 1971.

[Rice 1968] J.R. Rice – A path independent integral and the approximate analysis of strain concentrations by notches and cracks. *J. of Appl. Mech.*, Vol. 35, pp. 379-386, 1968.

[Rice et al. 1968] J.R. Rice and G.F. Rosenberg – Plain strain deformation near a crack tip in a power law hardening material, *J. Mech. Phys. Solids*, Pergamon Press, Vol. 16, pp. 1-12, 1968.

[Rousselier 1987] G. Rousselier – Ductile fracture models and their potential in local approach of fracture, *Nucl. Engng. And Design*, Vol. 105, pp. 97-111, 1987.

[Rousselier 1998] G. Rousselier – Approches globales et locales en rupture fragile. *11ème Colloque National MECAMAT*, AUSSOIS, pp.25-29, 1998.

[Roy et al. 1970] C. Roy, B. Burgess – A study of the stresses generated in zirconia films during the oxidation of zirconium alloys, *Oxid. Met.*, Vol. 2, N° 3, pp. 235-261, 1970.

[Saouma et al. 1987] V.E. Saouma, M.L. Ayari et D.A. Leavell – Mixed mode crack propagation in homogeneous anisotropic solids, *Engng. Fract. Mech.*, Vol. 27, N°2, pp. 171-184, 1987.

[Schmit et al. 1990] F. Schmit, D. Bouvart et D. François – Ductile fracture characterization of polycarbonate by the R-curve method, *Int. J. Fract.*, Vol. 43, pp. 83-96, 1990.

[Scotto-Sheriff 1998] S. Scotto-Sheriff – Influence des traitements de surfaces de métal et de polymère sur l'adhérence de joints collés, Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, novembre 1998.

[Sekhon et al. 1993] G.S. Sekhon et J.L. Chenot – Numerical simulation of continuous chip formation during non steady orthogonal cutting, *Engng Comp.*, Vol. 10, pp. 31-48, 1993.

[Shih 1981] C.F. Shih – Relationship between the J-integral and the crack opening displacement for stationary and extending cracks, *J. of Mech. Phys. Solids*, Vol. 29, pp. 305-326, 1981.

[Sih et al. 1964] G.C. Sih et J.R. Rice – The bending of plates of dissimilar materials with cracks, *J. Appl. Mech.*, pp. 477-482, 1964.

[Sih et al. 1974] G.C. Sih, B. Macdonald – Fracture mechanics applied to engineering problems – strain energy density fracture criterion, *Engng Fract. Mech.*, Vol. 6, pp. 361-386, 1974.

[Sih et al. 1981] G.C. Sih, E.P. Chen – Cracks in composite materials, *Mech. of Fract.*, Vol. 6, Martinus nijhoff publishers, 1981.

[Sneddon 1946] I.N. Sneddon – The distribution of stress in the neighborhood of a crack in an elastic solid, *Proc. Roy. Soc. London 187A*, pp. 229-260, 1946.

[Stringer 1970] J. Stringer – Stress generation and relief in growing oxide films, *Cor. Sc.*, Vol. 10, pp. 513-543, 1970.

[Sumi et al. 1995] C.Y. Sumi et Z.N. Wang – Morphological aspects of fatigue crack propagation Part II – effects of stress biaxiality and welding residual stress, 1995.

[Tong et al. 1973] P. Tong, T.H.H. Pian, S.J. Lasry – A hybrid element approach to crack problems in plane elasticity. *Int. J. for Num. Meth. in Engng*, Vol. 7, pp. 297-308, 1973.

[Touratier 1999] M. Touratier – Computational models of chip formation and chip flow in machining in a multi-scale approach. Present status and future needs, *Proceedings (CD-ROM) of the 2nd International Workshop on Modelling of Machining Operations*, Nantes, 25-26 juin, 1999.

[Traën 1999] R. Traën – Simulation numérique de la découpe de tôle par cisaillement, Rapport de stage de fin d'étude CEMEF-USINOR, Septembre 1999.

[Wells 1963] A.A. Wells – Application of fracture mechanics at and beyond general yielding, *British welding J.*, Vol. 10-11, pp. 563-570, 1963.

[Wieghardt 1995] K. Wieghardt – On splitting and cracking of elastic bodies, *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.*, 18, pp. 1371-1405, 1995 (Traduit par H.P. Rossmanith).

[Wriggers 1995] P. Wriggers – Finite element algorithms for contact problems, *Archives of Comp. Meth. in Engng*, Vol. 2, N°4, pp. 1-49, 1995.

[Yiehia et al. 1988] N.A.B. Yehia et M.S. Shephard – Automatic crack growth tracking of bimaterial interface cracks, *Int. J. of Fract.*, Vol. 37, pp. 123-135, 1988.

[Zienkiewicz1979] O.C. Zienkiewicz – La méthode des éléments finis, *traduction de la troisième édition anglaise. Mac Graw Hill*, 1979.

[Zhang 1992] X.B. Zhang – Etude numérique de la propagation de fissures par la mécanique de la rupture, Thèse de Doctorat de l'Université de Clermont-Ferrand II, Juin 1992.