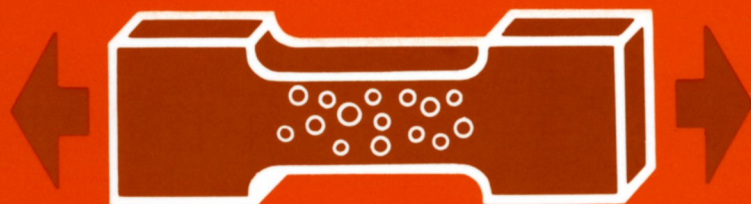


# PHYSIQUE ET MECANIQUE DE L'ENDOMMAGEMENT



Groupe de Réflexion Endommagement  
GRECO Grandes Déformations et Endommagement

Edité par :  
**F. Montheillet et F. Moussy**

les éditions  
  
de physique

Extrait de la publication

# Physique et Mécanique de l'Endommagement

publié sous la direction de  
Frank MONTHEILLET et François MOUSSY

Groupe de Réflexion Endommagement  
RCP Endommagement  
GRECO Grandes Déformations

- 1986 -

les éditions  
  
de physique

Avenue du Hoggar,  
Zone Industrielle de Courtabœuf,  
B.P. 112,  
F-91944 Les Ulis Cedex, France

# Physique et mécanique de l'endommagement

Ce livre est un ouvrage collectif. Il résulte de la collaboration de chercheurs provenant d'horizons divers; universitaires et industriels, mécaniciens et métallurgistes, membres du Groupe de Réflexion Endommagement et pour la plupart du GRECO Grandes Déformations et Endommagement.

Les différents chapitres ont été rédigés par B. Baudelet (chapitre I), F. Moussy (chapitre II), J. P. Cordebois et J. Lemaitre (chapitre III), F. Montheillet et P. Gilormini (chapitre IV), J. M. Jalinier (chapitre V), F. Mudry et F. Moussy (chapitre VI).

L'homogénéisation et la coordination des textes, ainsi que la préparation matérielle du manuscrit ont été assurées par F. Montheillet et F. Moussy.

## Avant-propos

J'ai un réel plaisir à préfacer un livre aussi opportun et novateur!

Un plaisir, car depuis des années la France est comme une seconde patrie pour ma famille et moi-même, et car j'ai la plus haute estime pour mes amis et collègues français ainsi que pour la Science Française;

Un livre opportun, car il s'inscrit dans l'effort général consacré dans le monde entier à l'amélioration de la qualité et des propriétés d'emploi des pièces métalliques;

Un livre novateur, car il propose une vision d'ensemble qui se fonde comme il se doit sur un juste équilibre entre les *sœurs ennemies* que sont la métallurgie physique et la mécanique des milieux continus.

Je vois le développement de l'endommagement comme l'histoire de deux personnages qui ne peuvent cohabiter tout en étant inséparables, en l'occurrence l'inclusion et la cavité. La première est dure et plutôt masculine, la seconde est douce et plus féminine. L'inclusion, au caractère renfermé, ne fait pas parler d'elle tant qu'on la laisse tranquille. Contrainte par le changement et sous la poussée des événements, elle finit par céder et enfante son *alter ego* la cavité, au caractère plus expansif. Mais voici que la jeune cavité grandit et commence à penser mener sa propre vie. Le jour vient finalement où elle n'a plus besoin de sa mère l'inclusion. Elle ressent peu à peu une attirance grandissante envers ses semblables et brûle de quitter son foyer pour aller vivre en communauté. Hélas, ces nouvelles liaisons finissent par se dégrader et la rupture est inévitable, dénouement dramatique digne des tragédies de l'antique Hellas. Et nous ne sommes même pas certains de connaître le coupable!

Les différentes étapes de la vie de nos deux personnages, depuis l'amorçage, puis la croissance, la coalescence et enfin la rupture, sont clairement décrites dans ce livre. Lors de la lecture des différents chapitres, j'ai été frappé par l'esprit de synthèse dont font preuve les auteurs, rassemblant et décrivant en un volume les contributions d'un grand nombre de chercheurs venant de plusieurs horizons tant scientifiques que géographiques. Lorsque l'on y ajoute la rigueur et la logique que l'on est en droit d'attendre du pays de Descartes, cela donne un livre extrêmement instructif et de lecture agréable, plaisir que j'invite maintenant le lecteur à partager.

Le 15 janvier 1986.

J. J. Jonas,

Université McGill, Montréal, Québec, Canada.



## Remerciements

Ce livre est issu d'un travail de recherches effectué dans le cadre du Groupe de Réflexion "Endommagement" de la Commission d'Emboutissage (Société Française de Métallurgie). A ce titre les auteurs remercient Monsieur G. Pomey, Directeur Délégué à l'IRSID, d'une part pour avoir été l'instigateur de ce Groupe de Réflexion, d'autre part pour le soutien constant qu'il leur a apporté tout au long de la réalisation de cet ouvrage. Les auteurs remercient également Messieurs S. Blouet, M. Entringer, D. Rault et D. Rouby pour leur contribution à la rédaction de certains chapitres. Ce livre a bénéficié d'acquis du GRECO "Grandes Déformations et Endommagement" et du GIS "Mise en Forme" .

Enfin les auteurs tiennent à exprimer leur reconnaissance à Madame E. Bresson pour la qualité de la frappe du texte ainsi que pour la constance de son humeur (bonne en l'occurrence), ceci malgré les multiples modifications inhérentes, certes, aux inévitables homogénéisations et corrections apportées par les relecteurs.



## Notations

- $a$  distance moyenne entre inclusions voisines  
 $b$  vecteur de Burgers  
 $D$  endommagement  
 $\mathbf{D}$  tenseur d'endommagement (ordre 4)  
 $d$  densité  
 $E$  module d'Young  
 $\tilde{E}$  module d'Young du matériau endommagé  
 $E_p$  module d'Young plastique équivalent  
 $E_r$  énergie de rupture  
 $f_v$  fraction volumique de cavités  
 $m$  coefficient de sensibilité à la vitesse  
 $n$  coefficient d'érouissage  
 $P$  poids  
 $p$  pression hydrostatique ( $= -\sigma_m$ )  
 $R$  rayon d'une inclusion ou d'une cavité sphérique ou cylindrique  
 $R_a$  rayon de la zone d'accommodation  
 $\mathbf{S}$  tenseur déviateur des contraintes  
 $S$  section nominale; surface d'une inclusion  
 $\tilde{S}$  section réelle  
 $t$  épaisseur d'une inclusion aplatie  
 $u$  champ de vitesse  
 $V$  volume  
 $w$  énergie par unité de volume  
 $w_d$  énergie de décohésion par unité de surface  
 $Z$  réduction d'aire à la rupture  
 $\alpha$  rapport des contraintes principales en contraintes planes ( $\alpha = \sigma_2/\sigma_1$ )  
 $\gamma$  cisaillement  
 $\gamma_I, \gamma_M, \gamma_{IM}, \gamma_P$  énergies de surface: inclusion, matrice, interface inclusion-matrice, paroi de dislocations  
 $\delta$  déformabilité relative inclusion/matrice  $\left( \delta = \frac{\dot{\varepsilon}_I}{\dot{\varepsilon}_\infty} \right)$   
 $\varepsilon_e$  déformation élastique  
 $\varepsilon_e$  tenseur de déformation élastique  
 $\varepsilon_p$  ou  $\varepsilon$  déformation plastique



$\bar{\varepsilon}_p$ ou $\bar{\varepsilon}$	déformation plastique équivalente
$\dot{\bar{\varepsilon}}_p$ ou $\dot{\bar{\varepsilon}}$	vitesse de déformation plastique équivalente
$\dot{\varepsilon}_p$	tenseur de vitesse de déformation plastique
$\bar{\varepsilon}$	déformation équivalente de la matrice "à l'infini"
$\bar{\varepsilon}_I, \dot{\bar{\varepsilon}}_I$	déformation, vitesse de déformation dans l'inclusion
$\bar{\varepsilon}_M, \dot{\bar{\varepsilon}}_M$	déformation, vitesse de déformation dans la matrice
$\varepsilon_1, \varepsilon_2$	déformations suivant les axes 1 et 2
$\bar{\varepsilon}_R$	déformation plastique équivalente à la rupture
$\varepsilon_v$	déformation de la cavité
$\lambda$	rapport de forme d'une inclusion
$\lambda, \mu$	coefficients de Lamé
$\nu$	coefficient de Poisson; déformation relative inclusion/matrice ( $\nu = \bar{\varepsilon}_I/\bar{\varepsilon}_\infty$ )
$\rho$	masse volumique; paramètre caractérisant un chemin de déformation ( $\rho = \dot{\varepsilon}_2/\dot{\varepsilon}_1$ )
$\rho_d$	densité de dislocations
$\rho_I$	nombre d'inclusions par unité de volume
$\Sigma$	plasticité relative d'une inclusion
$\sigma$ ou $\sigma_0$	contrainte d'écoulement
$\sigma_e$	limite d'élasticité initiale en traction uniaxiale
$\Delta\sigma$	variable d'écroutissage isotrope
$\sigma_\infty$	contrainte d'écoulement de la matrice à l'infini
$\sigma_I^c$	contrainte de rupture de l'inclusion
$\sigma_n$	contrainte normale à l'interface inclusion/matrice
$\tilde{\sigma}$	contrainte effective (Kachanov)
$\sigma$	tenseur des contraintes
$\tilde{\sigma}$	tenseur des contraintes effectives
$\bar{\sigma}$	contrainte équivalente (von Mises)
$\sigma_m$	contrainte moyenne ( $\sigma_m = 1/3\text{Tr}\sigma$ )
$\tau$	contrainte d'écoulement
$\mathbf{1}$	tenseur unité (ordre 2)
$\mathbf{M}$	tenseur unité (ordre 4).

# Table des Matières

<b>PHYSIQUE ET MÉCANIQUE DE L'ENDOMMAGEMENT</b>	<b>1</b>
<b>AVANT-PROPOS</b>	<b>3</b>
<b>REMERCIEMENTS</b>	<b>5</b>
<b>NOTATIONS</b>	<b>7</b>
<b>I INTRODUCTION: DOMMAGES ET INTÉRÊTS</b>	<b>13</b>
<b>II MÉTHODES D'OBSERVATION ET DE MESURE DE L'ENDOMMAGEMENT</b>	<b>19</b>
I. Introduction.	19
II. Méthodes de mesure de l'endommagement.	23
III. Mesures directes de l'endommagement: observation.	23
III.1. Observation d'éprouvettes préalablement polies puis déformées.	26
III.2. Observation d'éprouvettes préalablement déformées puis polies.	33
III.3. Examen des faciès de rupture.	43
III.4. Microscopie Electronique en Transmission (MET).	47
III.5. Conclusions sur les méthodes directes de description et de mesure de l'endommagement.	50
IV. Mesures indirectes de l'endommagement: mesure d'un paramètre physique.	51
IV.1. Mesure de densité.	52
IV.2. Variation du module d'Young et du coefficient de Poisson (cf. III.II.1b).	60
IV.3. Emission acoustique.	64
IV.4. Méthodes électriques.	70
IV.5. Mesure par absorption d'hydrogène.	74
IV.3. Mesure directe de variation de volume par jauges de déformation.	77

IV.7.	Méthodes de diffusion aux petits angles: méthodes SAXS (Small Angle X-Ray Scattering) et SANS (Small Angle Neutron Scattering). . . . .	79
IV.8.	Autres méthodes. . . . .	81
IV.9.	Conclusions sur les méthodes indirectes de mesure de l'endommagement. . . . .	82
V.	Conclusions. . . . .	83
<b>III MODÉLISATION MÉCANIQUE DE L'ENDOMMAGEMENT</b>		<b>85</b>
I.	Variable continue d'endommagement. . . . .	85
I.1.	Homogénéisation. . . . .	85
I.2.	Définition d'une variable d'endommagement. . . . .	86
I.3.	Thermodynamique. . . . .	89
II.	Couplage déformation-endommagement. . . . .	98
II.1.	Elasticité couplée à l'endommagement. . . . .	99
II.2.	Plasticité couplée à l'endommagement (Lemaître et Chaboche, 1978; Chaboche, 1978). . . . .	102
III.	Modèles d'évolution de l'endommagement. . . . .	103
III.1.	Modèles isotropes en contrainte (Lemaître et Chaboche, 1978). . . . .	103
III.2.	Modèle tridimensionnel isotrope en déformation (Lemaître, 1984). . . . .	106
IV.	Modélisations anisotropes. . . . .	108
IV.1.	Endommagement anisotrope en chargement radial (Hayhurst et Leckie, 1973; Martin et Leckie, 1972; Rabotnov, 1971; Goel, 1975). . . . .	109
IV.2.	Approche thermodynamique (Chaboche, 1979). . . . .	109
IV.3.	Approche énergétique. . . . .	111
V.	Exemple d'application des théories de l'endommagement ductile au formage des métaux. . . . .	117
V.1.	Cas des trajets de déformation radiaux. . . . .	117
V.2.	Cas des trajets de chargement quelconques. . . . .	117
<b>IV AMORÇAGE DE L'ENDOMMAGEMENT</b>		<b>121</b>
I.	Introduction. . . . .	121
II.	Où et quand apparaît l'endommagement? . . . . .	122
II.1.	Les sites d'amorçage. . . . .	122
II.2.	L'instant d'amorçage. . . . .	144
III.	Différentes formes de l'amorçage. . . . .	145
III.1.	Les mécanismes élémentaires de l'amorçage. . . . .	146
III.2.	Amorçage sur les sulfures de manganèse. . . . .	153
III.3.	Amorçage sur les nodules de plomb. . . . .	160
IV.	Modélisation de l'amorçage. . . . .	161

IV.1.	Généralités. . . . .	161
IV.2.	Critères utilisant la mécanique des milieux continus. . . . .	165
IV.3.	Critères utilisant la métallurgie physique. . . . .	173
IV.4.	Discussion: domaine de validité des critères. . . . .	176
V.	Prévision de l'amorçage. . . . .	177
<b>V CROISSANCE DE L'ENDOMMAGEMENT</b>		<b>183</b>
I.	Problèmes physiques de la croissance de l'endommagement. . . . .	183
I.1.	Cavité libre. . . . .	183
I.2.	Cavité avec particule. . . . .	184
I.3.	Fragmentation. . . . .	184
I.4.	Problèmes mixtes. . . . .	185
I.5.	Morphologie des cavités. . . . .	185
II.	Mesures expérimentales de la croissance de l'endommagement. . . . .	188
II.1.	Méthodes de mesure. . . . .	188
II.2.	Influence du matériau. . . . .	188
II.3.	Influence du trajet de chargement. . . . .	189
II.4.	Influence d'une pression hydrostatique surimposée. . . . .	189
II.5.	Influence du mécanisme d'endommagement. . . . .	190
II.6.	Influence de la direction de sollicitation. . . . .	190
III.	Modèles et lois de croissance. . . . .	192
III.1.	Lois phénoménologiques. . . . .	192
III.2.	Modélisations. . . . .	194
III.3.	Synthèse des modèles présentés. . . . .	211
<b>VI OBSERVATIONS ET MODÉLISATION DU STADE FINAL DE LA RUPTURE DUCTILE</b>		<b>213</b>
I.	Observations expérimentales. . . . .	214
I.1.	Caractéristiques de la rupture ductile. . . . .	214
I.2.	Evolution des grandeurs macroscopiques juste avant la rupture: un phénomène catastrophique. . . . .	215
I.3.	Description macroscopique de la rupture. . . . .	216
I.4.	Analyses micrographiques. . . . .	219
I.5.	Analyse des surfaces de rupture. . . . .	220
II.	Prévision de la rupture ductile. Modélisation. . . . .	222
II.1.	Critères de rupture ne faisant pas intervenir l'endommagement. . . . .	223
II.2.	Critères de rupture faisant intervenir l'endommagement sous une forme simplifiée. . . . .	225
II.3.	Critères de rupture faisant intervenir explicitement l'endommagement du matériau. . . . .	228
II.4.	Analyse statistique du problème. . . . .	229
III.	Plasticité des milieux poreux et modélisation de la rupture ductile. . . . .	230

III.1.	Nature du problème posé. . . . .	230
III.2.	Approches existantes, développées sur des matériaux non métalliques et métalliques frittés. . . . .	231
III.3.	Approches relatives aux métaux et alliages sans (ou à très faible) porosité initiale. . . . .	235
III.4.	Une nouvelle analyse du phénomène de rupture. . . . .	241
<b>BIBLIOGRAPHIE</b> . . . . .		<b>245</b>
<b>INDEX</b> . . . . .		<b>253</b>

## CHAPITRE I

### Introduction: dommages et intérêts

L'histoire de l'endommagement a commencé par la fin..., c'est-à-dire par l'étude de la rupture de matériaux.

En fait, le concept d'endommagement est né dans deux familles: vers 1956 chez des physiciens métallurgistes français de l'Institut de Recherche de la Sidérurgie (I.R.S.I.D.), Ch. Crussard, G. Henry, J. Plateau, afin d'interpréter certains faciès de rupture qu'ils étaient les premiers à observer; vers 1958 chez des mécaniciens russes, L. M. Kachanov principalement, et aussi Y. N. Rabotnov, afin de prévoir le temps au bout duquel se rompt un matériau sous fluage.

Malgré la quasi-simultanéité de ces événements, chaque famille mena ses recherches dans l'ignorance des travaux développés par l'autre. En ce temps pas très lointain, la distance qui séparait les physiciens et les mécaniciens était bien plus grande que celle qui sépare Paris de Moscou! La métallurgie physique et la mécanique n'étaient pas encore des *sœurs ennemies*, elles s'ignoraient!

Un des premiers intérêts de ce livre est de réunir parmi les auteurs, des scientifiques de la seconde génération, issus de chacune des deux familles de pensée. Mais ne brûlons pas les étapes!

En peu d'années, de 1956 à 1958, l'équipe de l'IRSID fit un nombre impressionnant de découvertes:

- des cavités ou des microfissures se forment dans des matériaux au niveau des inclusions ou des précipités au cours de la déformation plastique. En fait, de telles cavités avaient déjà été mises en évidence en 1955 par J. D. Lubahn sur une coupe transversale réalisée au voisinage de la rupture et observée au microscope métallographique;
- cet endommagement, terme non utilisé par les auteurs, peut apparaître dès les premiers stades de la déformation plastique;
- ces cavités ou microfissures sont amorcées, soit par des décohésions au niveau des interfaces matrice-inclusion, soit par fragmentation des inclusions ou des précipités;
- ces cavités croissent au cours de la déformation plastique et leurs formes dépendent du mode de sollicitation mécanique;
- leur coalescence conduit à la rupture à faciès ductile, même si la déformation plastique préalable est faible;
- les faciès des ruptures ductiles et fragiles obtenus après déformation plastique ainsi que les faciès de rupture par fatigue, furent étudiés en détail

et comparés. La microfractographie était née, le terme ayant été proposé pour la première fois par Ch. Crussard dès 1956;

- les premières études d'émissions acoustiques au cours d'essais mécaniques (durant la formation des bandes de Piobert Lüders, pendant le développement du phénomène Portevin-Chatelier, au moment de la rupture fragile ou ductile), en collaboration avec J. B. Lean, furent publiées et présentées aux Journées d'Automne de la Société Française de Métallurgie en 1958. Le président de la session fit la remarque suivante: "Il me semble important de souligner qu'une méthode nouvelle, utilisant les ondes sonores comme moyen de détection, a été utilisée. Certes, l'interprétation des résultats est délicate..." *Nihil novi sub sole!*

Toutes ces découvertes ont été établies par un grand nombre d'observations car il fallait déjouer les accusations de *fausses images* (artefacts). Ces accusations firent couler beaucoup d'encre... des industries réputées pouvaient-elles produire des aciers s'endommageant?

Toute cette aventure scientifique a débuté, lorsque cette équipe de l'IR-SID a réussi, en 1956, à mettre au point une nouvelle technique de répliques capables de reproduire les faciès tourmentés des ruptures à faciès ductile et fragile et pouvant être observées au microscope électronique par transmission, un 50 kV!

Depuis 1950, beaucoup de chercheurs avaient tenté en vain cette observation. En ce temps, le microscope électronique à balayage n'existait pratiquement pas et le microscope électronique à transmission était utilisé pour des observations de surface reproduites sur des répliques. Cette technique avait permis en 1952 à D. Kuhlmann-Wilsdorf d'observer des lignes de glissement sur une surface polie avant déformation plastique, R. M. Fisher en 1953 avait pu extraire par réplique des précipités qu'il avait identifiés par diffraction électronique. On ne savait pas faire de lames minces, les premières datent, d'ailleurs, de cette époque: R. Castaing observa en 1956 pour la première fois des zones de Guinier-Preston dans un alliage Al-Cu; P. Hirsch, R. Horne, M. Whelan (1956) et les mêmes associés à W. Bollmann (1957) virent les premières lignes de dislocations et leur mouvement, qu'ils enregistrèrent grâce à une caméra placée sur le microscope électronique.

Une pause relative suivit cette période dense en événements scientifiques. Dès la fin des années 60 et au cours des années 70, c'est surtout hors de France que des physiciens et des mécaniciens développèrent des modèles pour interpréter l'amorçage des cavités. (K. Tanaka, 1970; M. F. Ashby, 1966; A. S. Argon, 1975; S. H. Goods et L. M. Brown, 1979) et leur croissance (F. A. McClintock, 1968; J. R. Rice et D. M. Tracey, 1969; B. Budiansky, J. W. Hutchinson et S. Slutsky, 1982).

En Russie, les travaux de L. M. Kachanov semblent avoir été plus modestes. Il eut surtout le mérite de proposer pour la première fois une variable continue, reliée à la densité des défauts produits par endommagement, variable qu'il introduisit dans une relation permettant de prévoir le temps de rupture d'un matériau sous fluage. Malgré l'intérêt scientifique et techno-

logique important d'une telle formulation, on ne trouve plus rien jusqu'en 1970.

Après 1970 et pendant quelques années, des relations écrites, en termes de contraintes ou de déformations, ont été établies pour rendre compte de l'évolution du paramètre endommagement au cours de la déformation des matériaux. Ces lois ont été établies dans le cadre de la thermodynamique des processus irréversibles et identifiées dans de nombreuses situations: fatigue à faible nombre ou à grand nombre de cycles, fluage, fatigue-fluage, déformation plastique. Plusieurs mécaniciens français et étrangers ont joué un rôle important: dès 1970 et indépendamment Y. Hult, F. Leckie, J. Lemaitre, puis vers 1975... Hayhurst, S. Murakami, J. L. Chaboche (Lemaitre et Chaboche, 1985).

L'histoire de la dernière décade a été marquée par une collaboration active entre des physiciens et des mécaniciens français dans le domaine de la mécanique de l'endommagement, terme inventé vers 1970. En effet, dans le domaine des matériaux, cette science est sans nul doute celle où la métallurgie physique, la thermodynamique et la mécanique sont tant liées qu'il serait vain de développer des approches dissociées. L'échelle des phénomènes de l'ordre du micron est adaptée ou plus exactement... inadaptée aux physiciens métallurgistes et aux mécaniciens du solide, puisqu'elle est trop grande pour les premiers et un peu petite pour les seconds.

Actuellement, deux groupements lient des physiciens et des mécaniciens français dans des programmes de recherches sur l'endommagement:

- Le Groupement de Recherches Coordonnées "Grandes Déformations et Endommagement" regroupe plus de 25 équipes de recherches de l'Université et du C.N.R.S. Depuis le démarrage vers 1980, un langage commun a pu être établi, des programmes interactifs sont en cours, des résultats intéressants ont été obtenus. Ce groupement fait l'objet de la convoitise de nombreux scientifiques de pays étrangers, réputés innovateurs, qui n'ont pas réussi à vivre une telle synergie.

- Un groupe d'orientation assez informel réunit sur le thème de l'endommagement une dizaine d'équipes de recherches de l'Université et de l'Industrie. Ce groupement a été créé à l'initiative de la Commission Française d'Emboutissage rattachée sur le plan français à la Société Française de Métallurgie et sur le plan international à l'International Deep Drawing Research Group. Ce groupement a notamment développé des modèles originaux qui permettent d'interpréter les caractéristiques des courbes limites à la striction et à la rupture, en tenant compte de l'endommagement.

Ce livre est un des fruits de cette politique de recherche concertée; sa rédaction a été suggérée par G. Pomey, Directeur à L'I.R.S.I.D., là où furent développés les travaux français que nous avons relatés.

Ce livre n'est pas le point final de tous ces travaux, c'est une étape après quelques années de coopération.

Ce livre ne réunit pas tous les domaines de recherches qui sont couverts au sein de ces groupements. Il est limité à la physique et à la mécanique de



l'endommagement qui apparaît et évolue au cours de la déformation plastique à froid des matériaux métalliques. Les autres modes de déformation sont exclus. Le rôle joué par l'endommagement, par exemple dans le développement d'instabilités plastiques qui mène à la striction et à la rupture, n'est pas non plus considéré, malgré l'intérêt des modèles développés.

D'autres livres pourront être écrits pour compléter celui-ci à condition que d'autres ou les mêmes soient tentés par une nouvelle aventure livresque...!

Les cavités et microfissures s'amorcent au niveau des inclusions ou des précipités, croissent et finissent par coalescer pour conduire à la rupture à faciès ductile, histoire relatée avec beaucoup d'humour par J. J. Jonas dans l'avant-propos. Cette évolution doit pouvoir être suivie, analysée et caractérisée par des fonctionnelles plus ou moins complexes. L'observation est une mesure directe de l'endommagement, le suivi de certains paramètres physiques dont la variation est influencée par l'évolution de l'endommagement est une mesure indirecte. Toutes ces mesures coïncident-elles, quels sont leurs domaines d'utilisation, les fonctionnelles obtenues sont-elles représentatives du rôle joué par l'endommagement au cours de la déformation plastique? Le chapitre II tente de répondre à toutes ces questions.

Le chapitre III constitue, à la différence de tous les autres, une approche purement mécanique dans la tradition des premiers travaux de L. M. Kachanov. Dans ce chapitre, on montrera qu'une définition relativement simple du paramètre endommagement permet d'obtenir des lois couplées entre ce paramètre et les déformations élastique et plastique. Les lois proposées sont justifiées par la thermodynamique des processus irréversibles. Les coefficients de ces lois peuvent être identifiés sur des essais de déformation dans le domaine élastique, en raison de la forme choisie pour le potentiel thermodynamique dans lequel d'une part, l'élasticité et la plasticité ne sont pas couplées, et d'autre part, seule la partie élastique est sensible à l'endommagement. Les modélisations anisotropes sont évidemment complexes et plus difficiles à identifier. Cependant, le cas isotrope est assez performant pour conduire à des formulations utilisables, notamment dans les calculs de structures.

Le chapitre IV est consacré à l'amorçage de l'endommagement, sujet particulièrement difficile car les données expérimentales sont peu sûres. De plus, différents mécanismes sont possibles, suivant le mode de sollicitations mécaniques, la nature de la matrice, la nature la forme et la taille des précipités ou inclusions. Le nombre élevé de critères d'amorçage qui ont été proposés depuis celui de J. Gurland et J. Plateau (1963) traduit bien la difficulté du problème; les auteurs de ce chapitre ajouteront le leur. Le problème n'est cependant pas clos. Chacun des critères traduit une partie de la réalité. Les progrès espérés devraient venir d'une meilleure modélisation des états hétérogènes de contraintes et de déformations dans les inclusions ou précipités et à leur voisinage dans la matrice. Malgré leurs imperfections, ces critères permettent d'avoir une idée du nombre de cavités amorcées aux différentes étapes de l'histoire de la déformation. Ces nombres ont leur importance; trop de théories qui prennent en compte l'endommagement supposent le nombre

de cavités amorcées constant et réduisent l'évolution de l'endommagement à la croissance des cavités.

Au cours de l'histoire de la déformation, l'expérience montre que les cavités croissent. Cette croissance dépend de nombreux paramètres: lois de comportement de la matrice, forme de la cavité, rôle de l'inclusion ou du précipité à l'origine de la cavité, interaction entre cavités voisines, trajet de chargement. Plusieurs modèles ont été proposés pour rendre compte de cette croissance. Aucun d'entre eux n'est assez performant pour prendre en compte l'ensemble des paramètres. Dans le chapitre V, ces modèles sont présentés, discutés et comparés. On peut alors constater que dans certaines situations, leurs prévisions sont relativement voisines, l'imprécision des valeurs expérimentales ne permet pas de conclure, d'autant plus que toute comparaison expérience-théorie suppose connu le nombre de cavités amorcées à chaque étape de l'histoire de la déformation! Un intérêt supplémentaire de ce chapitre est la présentation linéarisée du modèle de J. R. Rice et D. M. Tracey lorsque le matériau est soumis à un état plan de contraintes (cas des tôles en emboutissage). Cette linéarisation conduit à une loi de croissance indépendante du chemin de déformation et uniquement fonction de la déformation suivant l'épaisseur de la tôle. Cette loi de croissance, particulièrement simple, approche le modèle de Rice et Tracey à quelques pour cent. Elle est de plus particulièrement intéressante dans les développements analytiques qui prennent en compte la croissance des cavités.

La rupture devient inévitable au terme de cette évolution de l'endommagement. De nombreux auteurs ont depuis longtemps recherché des critères pour prévoir cette fin, car il est bien clair que la connaissance de tels critères est essentielle dans tous les calculs de structure. Cependant, l'abondance de critères de rupture signifie qu'aucun n'est général (et pourrait-il en être autrement quand on connaît la complexité des faits physiques dans les matériaux) et aussi qu'aucun n'est parfaitement satisfaisant dans des conditions données. En revanche, l'apport de la plasticité des milieux poreux, discuté à la fin du chapitre VI, semble être une voie intéressante. Développée au départ pour les matériaux granulaires puis appliquée aux matériaux frittés, cette modélisation doit être adaptée aux matériaux métalliques ayant des taux volumiques d'endommagement de plusieurs ordres de grandeur plus faibles, même au voisinage de la rupture. L'étude critique des modèles proposés pour les matériaux poreux est fouillée; elle ouvre des perspectives nouvelles. Il semble cependant que la maîtrise de la rupture passera par une meilleure connaissance des phénomènes locaux d'instabilité entre les cavités endommageantes. Le chapitre VI sera utile aux lecteurs à la recherche d'une analyse relativement exhaustive de la rupture ductile; il constituera aussi un bon tremplin pour ceux qui souhaiteraient aller plus loin.

Dans ce livre sont présentés, analysés et discutés la plupart des techniques expérimentales, des résultats expérimentaux et des modèles théoriques sur l'endommagement au cours de la déformation plastique. Un certain nombre

de ces techniques, résultats et modèles sont originaux car ils sont les fruits récents de travaux coopératifs menés en France dans ce domaine.

Ce livre est unique dans la littérature scientifique.

Les physiciens métallurgistes, les mécaniciens du solide et les numériciens de l'Université et de l'Industrie qui mènent des travaux dans les domaines de la mise en forme des matériaux, la résistance des structures, la physique et la mécanique de la rupture..., trouveront dans ce livre des éclairages qu'ils pourront intégrer dans leurs études.

Les passionnés de recherches plus fondamentales découvriront des voies à explorer et à conquérir, afin de contribuer à faire progresser...

**la physique et la mécanique de l'endommagement.**

## CHAPITRE II

# Méthodes d'observation et de mesure de l'endommagement

### I. INTRODUCTION.

Lorsque l'on déforme à température ambiante et à vitesse lente un métal ou un alliage métallique depuis un état considéré comme initial jusqu'à un état prédéformé, sa capacité de déformation ou ductilité résiduelle jusqu'à rupture diminue avec l'intensité de la prédéformation. Au cours de la déformation, le métal subit un *endommagement* progressif.

Soit un alliage métallique constitué de deux phases:

- la matrice
- des particules de seconde phase, inclusions ou précipités.

Cet alliage à l'état initial est considéré comme dense, c'est-à-dire qu'il ne contient pas de cavités. Lorsqu'il est déformé, si l'on reprend l'analyse de Lemaître et Chaboche (1978, 1985) (Fig. II.1), après une courte phase d'accommodation, pendant laquelle l'alliage reste dense, il y a, suite au développement des contraintes et des déformations, apparition ou amorçage<sup>1</sup> de vides, soit de fissures bidimensionnelles, soit de cavités tridimensionnelles, cavités apparaissant essentiellement sur les particules de seconde phase. Ces vides croissent au cours de la déformation et coalescent pour former des ruptures locales qui se développent de manière stable ou instable et produisent la rupture finale de la pièce.

Afin de décrire l'évolution de cet endommagement, deux approches sont possibles: approche mécanique et approche physique ou métallurgique.

#### (a) Approche mécanique

Afin de décrire le comportement d'un matériau contenant des cavités à l'aide de grandeurs macroscopiques, le milieu est considéré néanmoins comme continu mais on introduit une variable  $D$  d'endommagement (cf. III.I.2). Cette variable telle qu'elle est introduite par Kachanov (1958) est un paramètre scalaire opérant sur la contrainte de traction en chargement uniaxial

---

<sup>1</sup>en toute rigueur, le mot *initiation* ne peut pas prendre en français le sens de *commencement*, *début*. Nous l'avons donc écarté au profit du mot *amorçage*.

## Index

- Amorçage, *voir* cavité  
contrainte critique d', 168  
critères d', 164  
instant d', 144  
mécanismes d', 146  
modélisation de l', 161  
prévision de l', 177
- Anisotropie, 29-30, 67, 190, 214
- Annihilation (de positrons), 81
- Autoradiographie (à très haute résolution), 81
- Cavités, 85, 86  
amorçage des, 183-185  
axisymétriques, 204-211  
coalescence des, 219, 220-221, 228-229  
croissance des, 183, 221  
cylindriques, 195-198, 208  
forme des, 185-188, 194, 195  
sphériques, 197-204, 207
- Chargement  
quelconque, 117  
radial, 105, 107, 116
- Cisaillement, 216
- Coalescence, *voir* cavité
- Coefficient  
de Poisson, 60  
de Poisson effectif, 108-110
- Comportement  
d'une inclusion, 128  
de la matrice, 194  
rigide parfaitement plastique, 138, 139, 195, 199, 207  
newtonien, 138, 139, 196, 205, 208  
viscoplastique, 140  
visqueux linéaire, *voir* newtonien  
écrouissable linéaire, 202
- Consolidation (d'endommagement), 113, 114
- Constantes (des lois d'endommagement), 86, 93, 106
- Contrainte  
effective, 86, 87, 89, 98, 109  
équivalente d'endommagement, 106  
moyenne, 189
- Couplage, 92, 102, 105, 111, 113
- Courbe (limite)  
de formage, 224  
de rupture, 118, 119
- Critère  
d'endommagement, 91, 93, 94  
de rupture, *voir* rupture, 94, 95, 107
- Croissance, *voir* cavité
- Cupules, 44, 221
- Décohésion (de l'interface inclusion-matrice), 27, 150  
contraintes de, 177  
énergie de, 151
- Découplage (entre les variables), 59, 60, 90
- Densité  
mesures de, 145  
variation relative de, 52-58
- Diffusion (centrale ou aux petits angles, rayons X et neutrons), 79
- Discontinuités, 85
- Dissipation (intrinsèque), 90, 94
- Écrouissable (comportement), 138
- Écrouissage, 58, 59

- Éléments finis, 235, 241
- Émission acoustique, 64
- Endommagement, 223, 228-229
  - amorçage de l', 26
  - anisotrope, 89, 98, 108, 114
  - coalescence de l', 47
  - croissance de l', 47
  - définition de l', 19-23, 51
  - ductile, 99, 102, 115
  - gradient d', 52
  - initial, 43, 144
  - isotrope, 87, 89, 92, 106
  - mesure de l', 23, 46, 97, 98, 107, 108
- Énergie (de surface), 125
- Équivalence
  - en déformation, 88, 97
  - en énergie, 109
- Faciès (de rupture), 43, 47, *voir* rupture
- Fissure, *voir* macrodéfaut
  - suivi de, 71
- Forme (des cavités, des inclusions), *voir* cavités, inclusions
- Hétérogénéité (de déformation), 27, 29
- Homogénéisation, 85, 89
- Hydrogène (absorption d'), 74
- Inclusion, 19, 26, 44, 125
  - déformabilité relative d'une, 135
  - déformation relative d'une, 135, 141
  - densité (d'inclusions), *voir* teneur
  - fissuration des, 147
  - forme des, 130, 132, 214
  - fragmentation des, 147
  - orientation des, 134
  - plasticité relative d'une, 129-130
  - problème de l', 163
  - rapport de forme des, 141, 144, 171
  - site d'une, 132
  - taille des, 214
  - teneur (en inclusions), 127, 128, 214
- Instabilité, 241-244
- Interface
  - énergie d', 143, 144
  - glissement à l', 138, 139
  - inclusion-matrice, 134
- Irréversibilité, 91
- Jauges (de déformation), 77
- Loi
  - de comportement, 231, 236-241
  - d'évolution
  - de l'endommagement, 98, 103-105, 116
  - de normalité (matériaux standards), 98, 116
- Lomer-Cottrell (dislocation de), 123
- Macro-défaut, 216, 219-220, 225
- Matrice, *voir* comportement
- Micro-concentration
  - (de contraintes), 87
- Microdéfaut, 87, 89
- Microfissure, 85, 86, 87, 89, 109, 123, 125
- Modèle
  - de croissance des cavités, 192-195
  - tridimensionnel, 106
- Module
  - effectif, 88, 100, 101-102, 113
  - d'Young, 60-64, 88, 100, 192
- Multiplicateur (d'endommagement), 98, 116
- Normalité (perte de normalité), 232, 233
- Paroi (de dislocations), 124