

UNIVERSITE DE BLIDA
INSTITUT DE MECANIQUE
Option : Construction Mécanique



MEMOIRE DE MAGISTER

Présenté par : Mr Mouloud BOUMAHDI
Ingénieur d'état diplômé de l'INES Mécanique de Blida
Directeur de mémoire : Mr M. GACEB

Thème

DEVELOPPEMENT D'UN SYSTEME EXPERT POUR LA
PREVENTION, LE DIAGNOSTIC ET LA RESOLUTION
DES PROBLEMES DE RUPTURE FRAGILE

Présenté devant le jury :

Président :

Mr N. BACHA Maître de conférences UST/Blida

Examineurs :

Mr K. CHAOUI Maître de conférences U/Annaba

Mr M. HADJI Maître de conférences UST/Blida

Mr N. MESRATI Maître de conférences ENP/Alger

Rapporteur :

Mr M.GACEB Chargé de cours U/Boumerdès

Résumé

*La présente étude concerne le développement d'un système expert appelé **Struct-Expert**, pour le diagnostic des ruptures des pièces ou structures mécaniques. L'étude est limitée aux problèmes de rupture fragile. Le système comporte deux parties majeures. La première partie, constitue un système d'information qui fait le calcul des paramètres caractéristiques (K , G , J , ...) concernant la rupture fragile, le calcul est basé sur deux approches. La première est basée sur les solutions disponibles. La deuxième par l'introduction de cinq facteurs de correction. La deuxième partie constitue le système expert développé par l'utilisation d'un outil de développement des systèmes expert appelé (**CLIPS**). Le mode de représentation des connaissances est basé sur les règles de production. Dans cette étude on a démontré que le diagnostic des ruptures par les systèmes experts peut être utilisé avec succès, pour assurer la sûreté de fonctionnement.*

Abstract

*The present study concerns the development of an expert system called **Struct-expert**, for the diagnosis of fractures of the pieces or mechanical structures. The study is limited to problems of brittle fracture. The system involves two major parts. The first part, constitute a system of information that makes the calculation of the characteristic parameter (K , G , J ,...) concerning the brittle fracture, the calculation is based on two approaches. The first is based on the available solutions. The second by the introduction of five factors of correction. The second part constitutes the practiced system developed by the utilization of a tool of systems expert development called (**CLIPS**). The fashion of knowledge representation is based on rules of production. In this study we demonstrated that the diagnosis of fractures by systems experts can be used with success, to assure the safety of working.*

REMERCIEMENTS

*Je tiens à exprimer toute ma profonde gratitude à Monsieur: **GACEB MOHAMED** Pour m'avoir guidé et orienté durant la réalisation de ce travail.*

*Je remercie très sincèrement Monsieur: **N.BACHA** pour l'honneur qu'il m'a fait de présider le jury de mon mémoire.*

*Je remercie Monsieur: **K.CHAOUI**, Monsieur: **M.HADJI** et Monsieur: **N.MESRATI** d'avoir accepté d'être membre jury.*

*Mes remerciements vont également à mes amis **M.OULDZMIRLI** et **M.TECDANTI** pour leurs aides.*

Mes remerciements vont aussi à l'ensemble du corps de l'institut de mécanique qui ont contribué à mon encadrement durant la graduation et la poste-graduation.

Je tiens également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

TABLE DES MATIERES

Notations.....	I
Liste des figures.....	III
Liste des tableaux.....	IV

Introduction.....	I
--------------------------	----------

Chapitre 1 : Notions Essentielles de Mécanique de la Rupture

1.1. Introduction.....	4
1.2. Processus de fissuration.....	6
1.3. Rupture fragile.....	9
1.3.1. Effet d'entaille.....	9
1.3.2. Effet d'environnement.....	9
1.3.3. Effet de la vitesse de mise en charge.....	10
1.4. Mode de rupture.....	10
1.5. La philosophie de conception en mécanique de la rupture.....	11
1.6. Les critères de rupture fragile.....	12
1.7. Essentiel des critères de rupture fragile.....	13
1.7.1. Critère de facteur d'intensité de contrainte.....	14
1.7.2. Critère de taux de restitution d'énergie G	15
1.7.3. Critère de déplacement d'ouverture des lèvres de la fissure δ	16
1.7.4. Critère de l'intégral J	17
1.7.5. Critère des courbes R	18
1.7.6. Concept de FEDDERSEN.....	20
1.7.7. Approche des deux critères.....	22
1.7.8. Méthode E.P.R.I.....	24
1.7.9. Critère de bifurcation des fissures.....	24
1.7.9.1. Critère de la contrainte tangentielle maximale.....	25
1.7.9.2. Critère du minimum de la densité de l'énergie de déformation.....	26
1.7.9.3. Critère du maximum du taux de restitution d'énergie.....	27

Chapitre 2 : Notions Essentielles de Système Expert

2.1. Introduction.....	30
------------------------	----

2.2. Domaines d'application.....	30
2.3. Résultats attendus d'un système expert.....	31
2.3.2. Assistance de l'expert.....	31
2.3.3. Formation, enseignement.....	31
2.3.4. Recueil, Conservation, Sauvegarde de connaissances.....	31
2.4. Les intervenants.....	32
2.5. L'architecture d'un système expert.....	32
2.6. Les formalismes de représentation.....	33
2.6.1. Les règles de production.....	34
2.7. Le développement d'un système expert.....	36
2.7.1. Analyse des connaissances.....	36
2.7.2. Maquettage et prototype.....	37
2.7.3. Test et validation.....	37
2.7.4. Evolution et maintenance.....	37
2.8. Les outils de développement.....	38

Chapitre 3 : Procédures d'expertise des ruptures

3.1. Introduction.....	39
3.2. Examen visuel.....	39
3.3. Collecte de données.....	40
3.4. Examen macroscopique.....	42
3.5. Examen microscopique.....	42
3.5.1. Coalescence de pores.....	43
3.5.2. Clivage.....	43
3.5.3. Fracture inter-granulaire.....	43
3.5.4. Rupture par fatigue.....	43
3.6. Formulation des hypothèses et leur vérification.....	44
3.7. Le rapport d'analyse.....	45

Chapitre 4 : Déroulement du système « Struct-Expert »

4.1. Introduction.....	48
4.2. Déroulement du projet.....	48
4.2.1. Analyse préalable.....	49

4.2.1.1. Fixer le cadre de l'étude et les objectifs	49
4.2.1.2. Choisir un domaine d'application.....	50
4.2.2. Conception.....	50
4.2.2.1. Modélisation du système	50
4.2.2.1.1. Acquisition des connaissances.....	50
4.2.2.1.2. Analyse de la connaissance	52
4.2.2.2. Analyse fonctionnelle.....	56
4.2.3. Développement.....	57
4.2.3.1. Codage de la base de connaissances.....	57
4.3. Déroulement du raisonnement.....	60
4.4. Extensions possibles pour l'application	61

Chapitre 5 : Rapport d'Expertise

5.1. Expertise d'une matrice	64
5.1.1. Description du composant	64
5.1.2. Examen de rupture.....	65
5.1.3. Propriétés du matériau.....	66
5.1.4. Mécanique de la mise en charge de la matrice	66
5.1.5. Session d'utilisation du STRUCT-EXPERT.....	67
5.1.6. Synthèse et conclusion.....	70
5.1.7. Rapport d'expertise.....	70
5.2. Expertise d'une butée de fin de course.....	72
5.2.1. Description du composant	72
5.2.2. Examen de rupture.....	72
5.2.3. Propriétés du matériau.....	73
5.2.4. Examen macroscopique.....	73
5.2.5. Etude mécanique.....	74
5.2.6. Synthèse et conclusion.....	74

Conclusion	76
-------------------------	----

Références bibliographiques	77
--	----

Annexes	80
----------------------	----

Annexe A1: Solutions concernant les facteurs de concentration de contraintes.....	80
--	----

Annexe A2: Solutions concernant les facteurs d'intensité de contraintes.....	82
Annexe A3: Récapitulation des critères de ruine.....	89
Annexe B : Calcul rapide du facteur d'intensité de contrainte.....	90
Annexe C : Corrélation ténacité K_{Ic} / Résilience K_v	94
Annexe D : Structure du programme STRUCT-EXPERT.....	95
Annexe E : Outil de développement CLIPS.....	100

Notations

- a Longueur de la fissure
- a_c Longueur de la fissure critique
- b_0 Paramètre caractéristique du défaut
- E Module de Young
- G Taux de restitutions d'énergie
- G_{Ic} Taux de restitution d'énergie critique
- J Intégrale de contour indépendant de la forme du contour
- J_{Ic} Intégrale critique
- K_I, K_{II}, K_{III} Facteurs d'intensité de contraintes relatifs aux trois mode I, II, III
- K_{Ic} Facteur d'intensité de contraintes critique correspondant à la rupture fragile par fissuration brutale
- K_c^* Ténacité apparente selon Irwin
- K_r, S_r Paramètres de rupture
- R_e Limite élastique
- r_y Rayon de la zone plastique au sens d'irwin
- $S(\theta)$ Densité de l'énergie de déformations
- $W(\epsilon)$ Energie de déformation
- δ C.O.D Déplacement d'ouverture des lèvres de la fissure (Crack Opening Displacement)
- γ Energie de surface
- γ_p Energie plastique de déformation
- λ Coefficient de lamé
- μ Coefficient de cisaillement de lamé
- ν Coefficient de poisson
- θ_0 Angle de bifurcation de la fissure
- σ_y Limite du seuil = R_e lors du chargement initial

- σ_c Contrainte appliquée critique
- σ_{PF} Contrainte locale près de la fissure
- σ_N Contrainte nominale sur le ligament
- σ_∞ Contraint appliquée au loin

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Schéma représentant les différents degrés de plastification.....	5
Figure 1.2 : Modes fondamentaux de rupture.....	10
Figure 1.3 : Philosophie de conception	12
Figure 1.4 : Définition de C.O.D.....	16
Figure 1.5 : Définition de la courbe R	19
Figure 1.6 : Le concept de FEDDERSEN	21
Figure 1.7 : Schéma de l'approche des deux critères.....	23
Figure 2.1 : Architecture d'un système expert.....	33
Figure 2.2 : Schéma de structure.....	34
Figure 3.1 : Les lignes concentriques	44
Figure 3.2 : Organigramme d'expertise	47
Figure 4.1 : L'arbre de décision de la solution PF1.....	53
Figure 4.2 : Graphe de dépendance pour les facteurs d'intensité de contrainte.....	54
Figure 4.3 : Graphe de dépendance pour les facteurs de concentration de contrainte...	54
Figure 4.4 : Graphe de dépendance pour le choix d'un critère de ruine.....	55
Figure 4.5 : Graphe de dépendance pour le choix d'une corrélation ténacité/résilience.	55
Figure 4.6 : Déroulement d'une session.....	56
Figure 5.1 : Vue schématique d'une matrice pour compression de poudre	64
Figure 5.2 : Une matrice pour compression de poudre après rupture brutale.....	65
Figure 5.3 : Agrandissement de la figure 5.2 montrant la fissure en onglet de pouce à partir de laquelle s'est initiée la rupture rapide.....	65
Figure 5.4 : Position relative axe A et la butée.....	72
Figure 5.5 : Les deux butées.....	73
Figure 5.6 : Modification géométrique.....	75
Figure D1 : Environnement du programme STRUCT-EXPERT.....	95
Figure D2 : Organigramme du programme STRUCT-EXPERT.....	96
Figure D3 : Menu pour calculer le facteur d'intensité de contrainte.....	96
Figure D4 : Menu pour calculer le facteur d'intensité de contrainte	96
Figure D5 : Menu pour calculer le facteur théorique de concentration de contrainte...	98
Figure D6 : Menu pour choisir un matériau.....	98
Figure D7 : Menu de l'outil CLIPS.....	99
Figure D8 : Menu de l'outil CLIPS-EDIT.....	99

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Types de rupture en fonction de comportement du matériau et de type d'évolution de la fissure.....	8
Tableau 5.1 : Rapport d'expertise.....	71
Tableau 5.2 : Les butées examinées.....	72
Tableau 5.3 : La composition chimique du matériau XC38.	73
Tableau 5.4 : La dureté HB du matériau XC38.	73
Tableau 5.5 : Mécanisme de rupture	74
Tableau 5.6 : Facteur de concentration de contrainte K_t	74
Tableau A1 : Solutions disponibles pour calculer le facteur théorique de concentration De contrainte.....	81
Tableau A2 : Solutions disponibles pour calculer le facteur d'intensité de contrainte...88	
Tableau A3 : Récapitulation de principal critères de ruine concernant la rupture fragile	89
Tableau C1 : Corrélation ténacité / résilience.....	94

Introduction

La rupture d'une pièce ou structure mécanique peut avoir plusieurs sortes de conséquences défavorables :

- Des conséquences économiques du fait de l'indisponibilité de la structure rompue et du fait qu'il est nécessaire de la réparer ou de la reconstruire,
- Des conséquences sur l'environnement,
- Des conséquences sur la santé des personnes,
- Des conséquences sociales et politiques.

De nombreux accidents ont montré que la présence de certains défauts, dans une pièce ou structure mécanique, peuvent conduire à des ruptures brutales et parfois catastrophiques. L'expérience montre que ces ruptures relèvent du phénomène : fissure naissant sur des défauts métallurgiques ou mécaniques et se propageant à grande vitesse lorsque le système de chargement et le milieu créent des conditions favorables.

Bien que ce type de rupture, c'est-à-dire rupture fragile, soit bien moins fréquent que les ruptures par fatigue, instabilité ou plastification, il ne peut être ignoré. En effet, de telles ruptures peuvent que difficilement être détectées d'avance, car elles se produisent avec peu ou pas de déformation plastique préalable. Par ailleurs, une fois initiée, la rupture fragile se propage à une vitesse telle que toute action corrective est impossible.

Les conséquences défavorables de ces ruptures posent des problèmes de conception et d'analyse. Pour faire l'analyse correspondante l'ingénieur devra disposer de modèles mécaniques d'endommagement. Il devra connaître des données sur les lois de comportement des matériaux de sa structure et sur les chargements qu'elle subit. Il devra enfin traiter ces modèles et données au moyen de méthodes appropriées. Par ailleurs, même en présence de toutes les données concernant le problème seuls les experts peuvent les exploiter de façon optimale et objective.

Une connaissance intime des différents phénomènes régissant les pièces ou les structures mécaniques est absolument indispensable pour entreprendre le diagnostic d'une défaillance.

Le diagnostic des pièces ou structures mécaniques fissurées a pour vocation première de détecter et localiser une défaillance des pièces ou structures mécaniques, et joue un rôle primordial par sa contribution à la détection rapide ou précoce, de façon à faire gagner des points de disponibilité et de productivité dans l'outil de production.

Le diagnostic est devenu une discipline majeure, relayée sur le terrain par des technologies modernes (Intelligence artificielle).

Parmi les méthodes de diagnostic on cite le diagnostic par systèmes experts. Ils font partie de ce que l'on appelle l'intelligence artificielle. L'objet de cette discipline peut être définie comme la conception et la réalisation de programmes informatiques résolvant des problèmes pour lesquels on ne dispose pas de solutions algorithmiques.

Le but de la présente étude est de développer un système expert qui visera à mettre à la disposition de l'utilisateur trois outils importants :

- Outil de prévention des ruptures fragiles,
- Outil de diagnostic des structures fissurées,
- Outil de résolution des problèmes de ruptures fragiles.

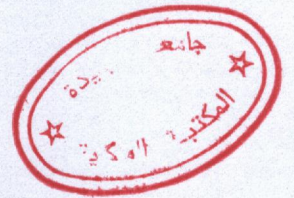
On y démontrera par ailleurs que le diagnostic des pièces ou structures mécaniques fissurées par les systèmes experts peut être utilisé avec succès, pour gagner la sûreté de fonctionnement.

Les objectifs suivants sont ciblés :

- Aider les ingénieurs confrontés aux problèmes de rupture à mieux dimensionner les structures industrielles durant la conception pour parer à de telles ruptures.
- Assister les contrôleurs lors d'inspections de routine à prendre les bonnes décisions concernant l'aptitude des structures fissurées à continuer leur service.
- Accélérer les analyses et les calculs de routine se rapportant à ce phénomène.
- Banaliser l'analyse de rupture pour être à portée du non expert en la matière.

Le présent mémoire aborde les thèmes suivants :

- Dans le premier chapitre un rappel est proposé sur les notions essentielles de mécanique de la rupture fragile,
- Le deuxième chapitre expose les notions essentielles de systèmes expert,
- Le troisième chapitre décrit la procédure d'expertise des structures,
- Le quatrième chapitre expose les différentes phases du déroulement du projet de notre future système expert **Struct-Expert**,
- Le cinquième chapitre expose deux exemples d'expertise.



Chapitre 1

Notions Essentielles de Mécanique de la Rupture

1.1. Introduction

La rupture de composants fissurés peut se produire de diverses manières comme le montre la figure 1.1, relative à un panneau avec une fissure centrale et soumis à une contrainte globale σ_g . suivant l'étendue de la zone plastique en fond de fissure, on distingue quatre cas :

A. $\sigma_{PF} > R_e > \sigma_N > \sigma_g$, zone plastique limitée

Dans ce cas, la zone plastique en fond de fissure est très limitée. La rupture se produit par une propagation rapide et instable de la fissure. Ce domaine est typiquement celui de la **mécanique linéaire élastique de la rupture**. Figure 1.1.A

B. $\sigma_{PF} > R_e \sim \sigma_N > \sigma_g$, zone plastique étendue confinée

La plasticité est relativement sans toutefois atteindre le bord libre de l'échantillon. Ce domaine est typiquement celui de la **mécanique élastoplastique des ruptures**. Toutefois la mécanique linéaire des ruptures avec une correction dite de zone plastique peut donner une propagation stable à ce problème. La propagation rapide est précédée par une propagation stable plus ou moins importante. Figure 1.1.B.

C. $\sigma_{PF} > \sigma_N \sim R_e > \sigma_g$, zone plastique étendue non confinée

Dans ce cas la plasticité s'étend largement et atteint le bord libre et est donc non confinée. Ce régime est celui de l'**instabilité plastique**. Figure 1.1.C.

D. $\sigma_{PF} > \sigma_N > \sigma_g > R_e$, zone plastique généralisée

La plasticité se développe largement dans toute la structure, entraînant un écrouissage appréciable dans le ligament. Ce régime est celui de la ruine plastique et peut être traité à l'aide du concept d'analyse limite ou par le concept de déchirement si la propagation stable demeure le mode de ruine essentiel. Figure 1.1.D.

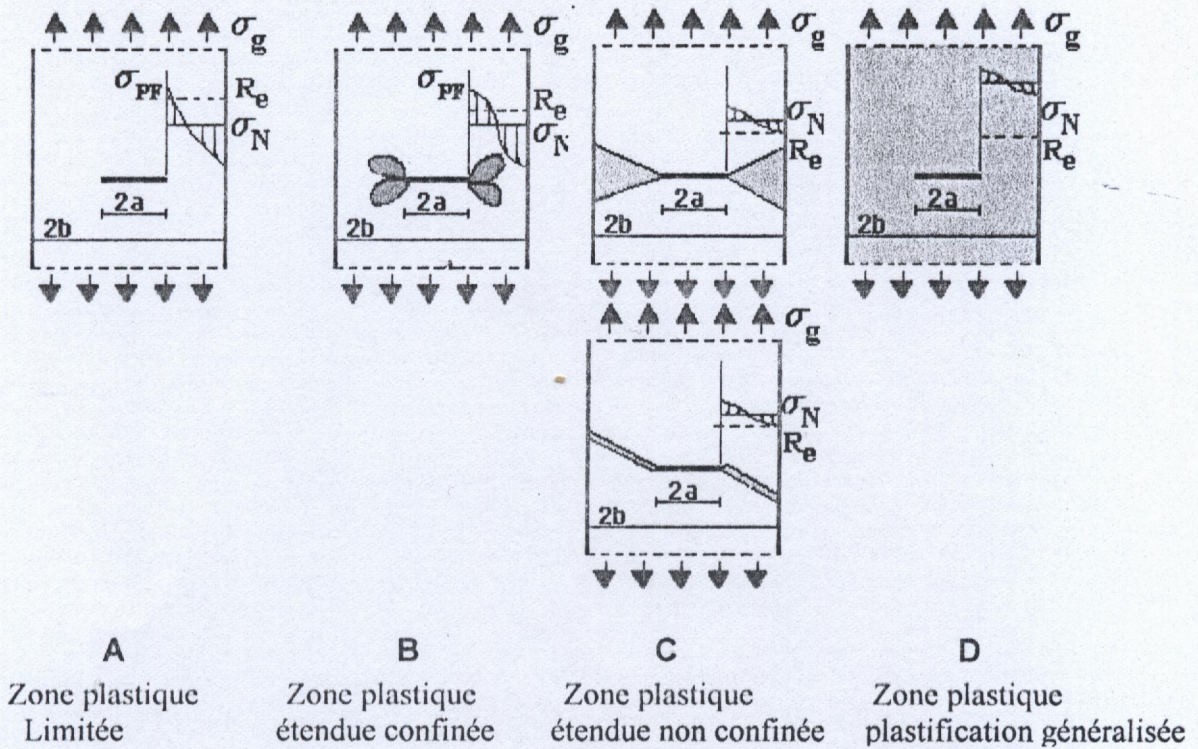


Figure 1.1 Schéma représentant les différents degrés de plastification

Une séparation quantitative des phases A, B et C ou D a été proposé par HAHN et SARRATE. [7]

1. Régime de la mécanique linéaire élastique des ruptures

$$0 \leq \left(\frac{K_C^*}{R_e} \right)^2 \frac{1}{a} \leq 12 \tag{1.1}$$

2. Régime de la mécanique élastoplastique des ruptures

$$12 \leq \left(\frac{K_C^*}{R_e} \right)^2 \frac{1}{a} \leq 7 \tag{1.2}$$

3. Régime de ruine plastique

$$7 \leq \left(\frac{K_c^*}{R_e} \right)^2 \frac{1}{a} \quad (1.3)$$

Avec

K_c^* = Ténacité apparente selon Irwin

$$K_c^* = \sigma_c \sqrt{\pi \cdot a_{\text{eff}}} f\left(\frac{a}{w}\right) \quad (1.4)$$

$$a_{\text{eff}} = a + r_y \quad (1.5)$$

a_{eff} : la longueur de fissure effective,

$f\left(\frac{a}{w}\right)$: la correction géométrique,

Allen [7] a proposé de définir la longueur effective expérimentalement. Il a été envisagé de limiter cette correction à :

$$a_{\text{eff}} = 1.3.a \quad (1.6)$$

1.2. Processus de fissuration

Il est généralement admis que la fissuration se produit dans un matériau suivant quatre étapes [1] :

Etape 01 :

La première étape est la plastification locale au voisinage des défauts et singularités géométriques ou matérielles. Le degré de la singularité a une influence primordiale sur l'ampleur de la zone plastique ainsi que sur la concentration de la contrainte. Lors d'un chargement répété, il y a écrouissage. Cet écrouissage conduit à élever la contrainte seuil σ_y . Le matériau se trouvant au voisinage de la pointe du défaut

ou de la singularité, se comportera alors comme un matériau à haute résistance, entraînant la création d'une première fissure.

Etape 02 :

La deuxième étape est celle de la formation des fissures. Cette étape peut être déclenchée par des traitements de surfaces, des traitements ou chargement thermique générant des contraintes résiduelles dépassant le seuil plastique. On peut également avoir des formations de fissures à partir d'un chargement mécanique statique ou variable.

Etape 03 :

La troisième étape est celle de la propagation des fissures réelles naissantes. Cette propagation peut être brutale ou progressive. Souvent on assiste à une propagation progressive faisant augmenter la taille de la fissure jusqu'à atteindre une taille critique (correspondant à la résistance intrinsèque du matériau à la fissuration), entraînant une propagation brutale.

Plusieurs lois de propagation de fissure ont été proposées [1], et donnent généralement la vitesse de propagation en fonction des grandeurs mécaniques calculées pour chaque dimension de la fissure propageante et en fonction des grandeurs intrinsèques du matériau mesurées expérimentalement. On peut distinguer quatre types de propagation de fissure résumés dans le tableau 1.1.

Type I : La rupture fragile

Une fissuration brutale provoquant une rupture fragile est une fissuration pour laquelle la loi de comportement du matériau reste dans le domaine élastique linéaire. On peut également envisager dans ce type une loi de comportement élastoplastique mais à petites déformations. On ne parlera pas de vitesse de propagation dans ce type de rupture sinon d'une vitesse de l'ordre de la vitesse du son.

Type II : La rupture ductile

Une fissuration brutale provoquant une rupture ductile est une fissuration pour laquelle la loi de comportement du matériau est généralement élastoplastique à grandes

déformations. Ce type de propagation est peu traité du fait de la difficulté que présente la modélisation des champs mécaniques et de la rareté de ce type dans le domaine industriel.

		Type d'évolution de la fissure	
		Brutale	Progressive
Type de comportement du matériau	Elastique	Rupture Fragile (I)	Rupture par Fatigue à grands nombres de cycles (III)
	Elastoplastique	Rupture Ductile (II)	Rupture par Fatigue à petits nombres de cycles (IV)

Tableau 1.1 Types de rupture en fonction de type de comportement du matériau et de type d'évolution de la fissure

Type III : La rupture par fatigue à grand nombre de cycles

Une fissuration successive à caractère fragile dont la loi de comportement considérée est élastique linéaire et la vitesse de fissuration est lente (10^{-7} à 10^{-4} mm/cycle de chargement) Cette fissuration est constatée sous charge répétée à des contraintes très basses par rapport à la limite élastique.

Type IV : La rupture par fatigue à petit nombre de cycles (Oligocyclique)

Une fissuration progressive ductile dont la loi de comportement considérée est élastoplastique à petites déformations et la vitesse de propagation est relativement rapide. Cette fissuration est provoquée sous charge répétée à des contraintes élevées.

Etape 04 :

Cette étape est celle de la rupture finale à caractère brutale et constitue la dernière étape. Elle peut être accompagnée de grandes déformations généralisées (striction), ou sans déformation importante (rupture fragile)

Les facteurs qui influencent le comportement des matériaux à la rupture par fissuration sont de deux natures : mécanique et métallurgique. Les facteurs mécaniques concernent l'état de déplacements, déformations et contraintes, les conditions d'environnement telle que la température. On entend par facteurs métallurgiques les impuretés, la taille des grains, l'état de surface, etc..... dans la présente étude ne seront traités que les facteurs mécaniques.

1.3. Rupture fragile

Le phénomène de rupture fragile est fréquemment rencontré dans beaucoup d'aspects de la vie ordinaire. Bien que ces ruptures soient en nombre très faible par comparaison avec celles causées par surcharge (plastification) ou instabilité, elles sont particulièrement dangereuses. En effet, elles ne peuvent que difficilement être détectées à l'avance, car elles se produisent avec peu ou pas de déformation préalable. Par ailleurs, une fois initiée la rupture fragile se propage à une vitesse telle (≈ 2000 m/s) que toute action corrective est impossible.[5]

On peut caractériser la rupture fragile par trois facteurs :

1.3.1. Effet d'entaille

Plus un matériau contient des défauts (qui sont dangereux à cause des concentrations de contraintes qui se produisent à leur voisinage), ou plus la géométrie d'une pièce est tourmentée, plus le risque de rupture est élevé.

1.3.2. Effet d'environnement

C'est la température en particulier qui conditionne fortement la nature de la cassure. Plus la température s'abaisse, et plus un matériau devient cassant c'est à dire sujet à une rupture fragile. A l'opposé, plus la température s'élève, on constate que la

rupture s'accompagne d'une plus grande déformation plastique, caractère révélateur d'une rupture ductile.

1.3.3. Effet de la vitesse de mise en charge

Tout accroissement de la vitesse de chargement rend le matériau plus sensible à la rupture fragile. Autrement dit, le matériau se comporte comme s'il avait une résistance plus élevée.

1.4. Mode de rupture

Il est d'usage de considérer trois modes fondamentaux de sollicitation tout autre modes s'en déduisant par des combinaisons linéaires figure 1.2 : Mode I, II et III.

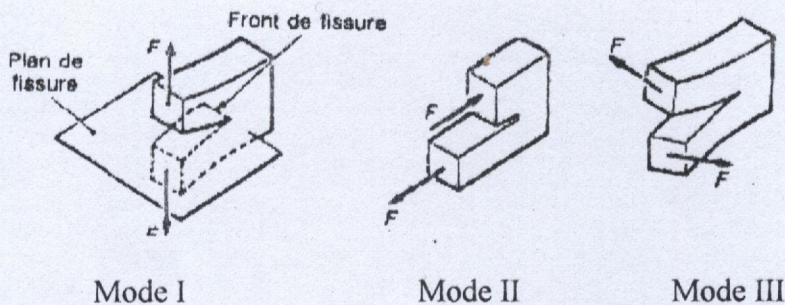


Figure 1.2 Modes fondamentaux de rupture

La figure 1.2 représente les différents modes de chargement d'une fissure : par traction ou par cisaillement. Le mode I : correspond à un mode d'ouverture. Les modes II et III correspondent à des propagations par glissement droit et par glissement vis : le mode II est un mode de cisaillement, perpendiculaire au fond de la fissure alors que le mode III est également un cisaillement mais parallèlement au fond de la fissure.

En ce qui concerne l'extension d'une microfissure pour développer une rupture fragile, c'est le mode I qui est le plus critique. En effet, pour une dimension donnée de défaut, le risque de rupture brutale sera d'autant plus important si l'orientation du défaut

par rapport à la sollicitation extérieure correspond au mode I. Comme dans une structure réelle on ne sait pas, à priori, dans quelle direction un défaut se développera, c'est le mode I qu'il faut considérer lorsqu'on s'intéresse au risque procuré par l'existence d'une fissure. Ceci donnera des résultats conservatifs et place en sécurité.

1.5. La philosophie de conception en mécanique de la rupture

L'usage de la mécanique de la rupture dans la conception d'une pièce ou structure mécanique suit les étapes suivantes :

1. La sélection d'un critère de rupture approprié.
2. L'analyse de contrainte (analytique, numérique ou expérimentale) pour la détermination de la quantité caractéristique (facteur d'intensité de contrainte, intégrale J, déplacement d'ouverture de la fissure C.O.D, le facteur de la densité de l'énergie de déformation) approprié au critère de rupture.
3. Mesure expérimentale de la valeur critique de la quantité caractéristique ou exploitation de bases de données pour les matériaux inventoriés.

Une fois cette information est disponible donc il est possible de calculer :

1. La charge maximale admissible qu'une machine ou un élément de structure peut supporter pour une taille de défaut donné.
2. Ou la taille maximale admissible du défaut pour une charge appliquée donnée.

Trois éléments essentiels existent pour tout jugement relatif à la sécurité du comportement de structure.

1. La géométrie globale et locale,
2. Les conditions aux limites (en forces et en déplacements),
3. Le critère de sécurité (ou de ruine).

L'intervention sur un ou plusieurs éléments permet de redimensionner la structure.

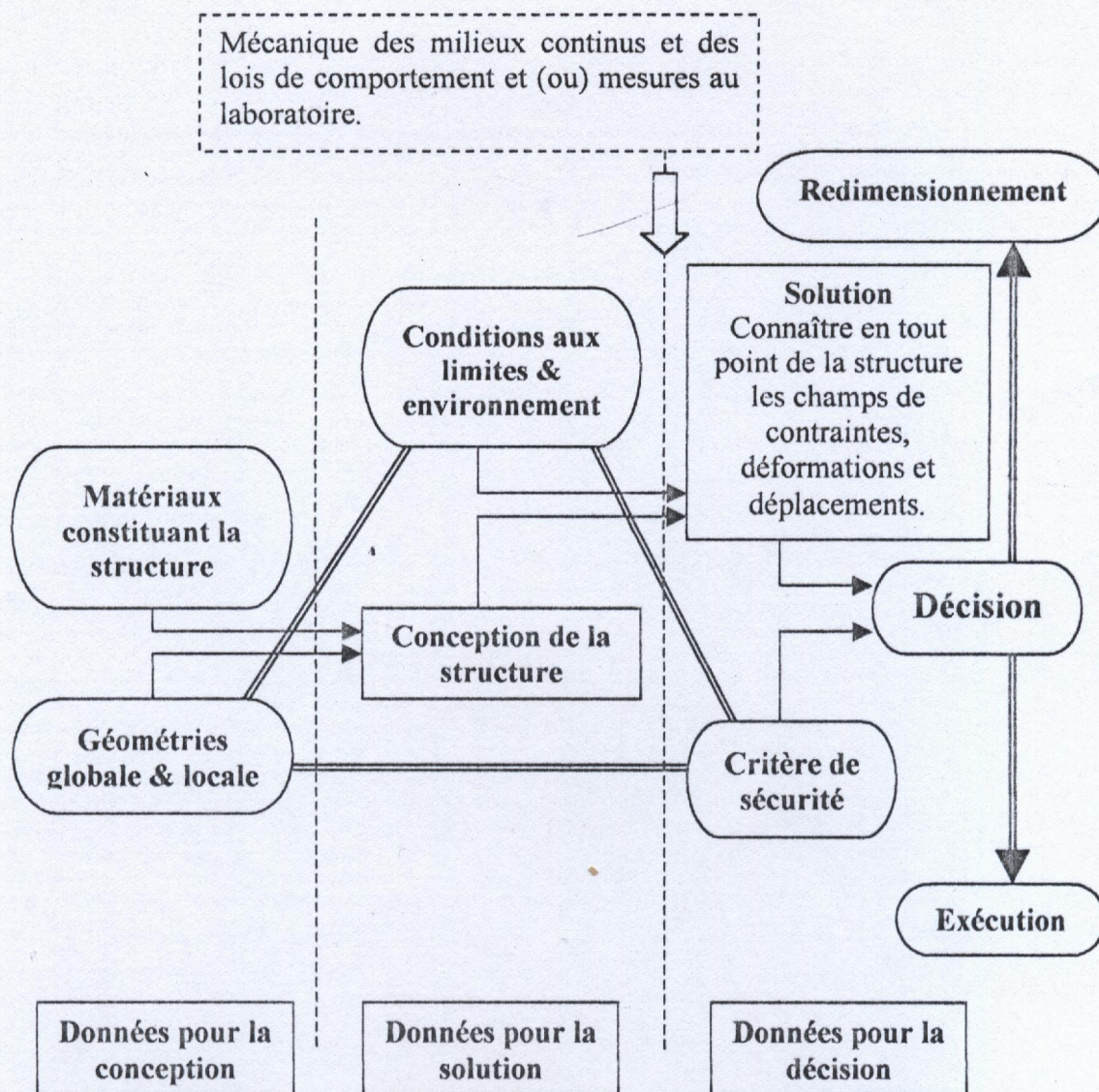


Figure 1.3 La philosophie de conception

1.6. Les critères de rupture fragile

Après la détermination des champs de contraintes, déformations et déplacements dans un milieu fissuré et notamment au voisinage de la pointe de la fissure. Il est nécessaire de prévoir le comportement de la fissure dans le milieu fissuré, autrement dit prévoir sa propagation dans le cadre d'un critère de ruine.

Tout paramètre ou toute valeur issue de plusieurs facteurs caractérisant la propagation d'une fissure, comparé à sa valeur critique (mesurée expérimentalement) peut servir de critère de ruine à condition de déterminer :

1. La valeur critique du chargement qui déclenche la croissance de la fissure,
2. La direction selon laquelle la fissure se propagera.

Le critère de ruine (ou de sécurité) s'inscrit dans la philosophie de conception illustrée schématiquement par la figure 1.3 et conditionne la prise de décision vis à vis de la structure considérée.

1.7. Essentiel des critères de rupture fragile

La littérature [1] montre que toutes les théories classiques de ruines ne tiennent pas compte de l'effet d'entailles qui génèrent des contraintes locales très élevées dépassant presque toujours la limite élastique du matériau localement. Dans le cas des matériaux fragiles (à faibles déformations plastiques), les valeurs très élevées des contraintes locales peuvent provoquer la rupture fragile bien que les contraintes généralisées (au sens des critères classiques) soient inférieures à la limite élastique. D'où il faut pas choisir un matériau seulement au sens de sa résistance à la ruine classique, mais aussi de son comportement vis-à-vis d'une entaille géométrique particulière, voire une fissure.

Ceci nécessite donc la recherche de nouveaux critères de ruine pour les structures fissurées qui associent la taille de la fissure à la résistance à la rupture. Selon la résolution adoptée, on peut utiliser l'un des critères suivants.

1. Critère de facteur d'intensité de contrainte K ,
2. Critère de taux de restitution d'énergie G ,
3. Critère de déplacement d'ouverture des lèvres de la fissure δ (C.O.D),
4. Critère de l'intégral J ,
5. Critère des courbes R ,
6. Concept de FEDDERSEN,
7. Approche des deux critères,
8. Méthode de E.P.R.I,
9. Critère de bifurcation des fissures.

1.7.1. Critère de facteur d'intensité de contrainte [1]

Il est utilisé dans le domaine de la mécanique linéaire élastique. D'une manière générale le facteur d'intensité de contrainte K_I en mode I est exprimé selon l'équation :

$$K_I = \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \cdot \alpha(a) \quad (1.7)$$

$\alpha(a)$ est un facteur de correction géométrique dépendant de la géométrie et des dimensions de la pièce et de la fissure. Lorsque la taille de la fissure est petite par rapport aux dimensions de la pièce, ce facteur tend rapidement vers 1.

Les valeurs des facteurs d'intensité de contrainte sont calculées pour différentes conditions aux limites et géométries de pièces et fissures analytiquement ou par élément finis.

Le facteur critique d'intensité de contrainte K_{Ic} correspond à la force maximum d'instabilité. Cette valeur caractéristique de la ténacité à la rupture du matériau traduit la ruine par fissuration brutale.

$$\text{La rupture aura lieu pour : } K_I \geq K_{Ic}$$

Ce critère est essentiellement utilisé pour un état de déformations planes. Dans le cas de l'état de contraintes planes, le critère d'instabilité K_{Ic} dépend fortement de l'épaisseur. [1]

L'ASTM[5], impose aux éprouvettes utilisées pour la détermination du facteur d'intensité de contrainte d'avoir une épaisseur t et une longueur de fissure a telles que :

$$t, a \geq 2.5 \left(\frac{K_{Ic}}{R_e} \right)^2 \quad (1.8)$$

Ceci correspond imposer à t et a d'être supérieurs à 50 fois la taille de la zone plastique en état de contraintes planes, et 17 fois cette taille en état de déformations planes.

Dans la réalité, le matériau n'est jamais complètement fragile à la pointe de la fissure ou une zone plastique reste présente. Tant que cette zone reste confinée, enserrée

par la zone élastique qui impose son comportement, le critère du facteur d'intensité de contraintes continues de s'appliquer.

1.7.2. Critère de taux de restitution d'énergie G [1]

Ce critère a été établi par GRIFFITH en 1920. « La rupture se produit lorsque l'énergie restituée par l'extension de la fissure est supérieure à l'énergie nécessaire à la surface relative à cette extension. ». Pour un accroissement (da) d'une fissure (a) en milieu plan, ce critère s'écrit :

$$G \geq \gamma \quad \text{condition de rupture fragile}$$

Vers 1950, IRWIN et ORWAN [1] ont émis l'idée selon laquelle l'énergie restituée provient également d'une déformation plastique avant propagation. Ils ont alors ajouté une énergie plastique de déformation (γ_p) à l'énergie de surface (γ) introduit par GRIFFITH.

La rupture s'effectue pour une contrainte maximale telle que :

$$\sigma_{\max} = \sqrt{\frac{E(\gamma_p + \gamma)}{b_0}} \quad (1.9)$$

avec

E : Module de young,

b_0 : Paramètre caractéristique du défaut.

$$\text{La rupture aura lieu pour : } G \geq \gamma + \gamma_p = G_{Ic}$$

G_{Ic} : La valeur critique de G , est le taux de restitution d'énergie nécessaire à la propagation de la fissure. Au dessus de cette valeur, la fissure est instable.

En milieu élastique linéaire :

$$G_I = \frac{1}{E} \cdot K_{Ic}^2 \quad \text{En contraintes planes} \quad (1.10)$$

$$G_I = \frac{1-\nu^2}{E} \cdot K_{Ic}^2 \quad \text{En déformations planes} \quad (1.11)$$

1.7.3. Critère de déplacement d'ouverture des lèvres de la fissure δ [1]

Le déplacement d'ouverture des lèvres de la fissure δ (C.O.D) est par définition l'écartement des lèvres de la fissure à la frontière de la zone plastique. (δ) est calculé dans le domaine élastique linéaire. On considère, pour effectuer ce calcul, une forme circulaire de la zone plastique.

Expérimentalement, (δ) est déterminé à partir de l'écartement des lèvres de la fissure, mesuré à une distance correspondant à la frontière de la zone plastique (δ) s'exprime de la façon suivante :

$$\delta = \frac{4}{\pi} \frac{K_I^2}{E R_e} \quad \text{En contraintes planes} \quad (1.12)$$

$$\delta = \frac{4(1-\nu^2)}{\pi E \sqrt{3} R_e} K_I^2 \quad \text{En déformations planes} \quad (1.13)$$

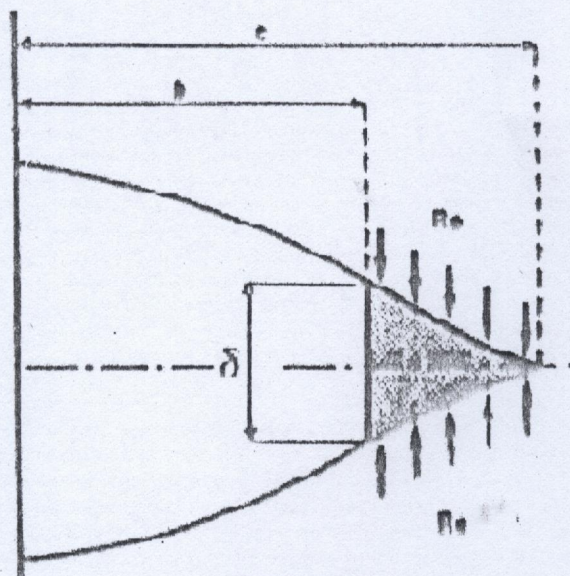


Figure 1.4 Définition de (C.O.D)

D'autres expressions ont été données à partir du modèle de DUGDALE PAR BURDEKIN et STONE. [1]

$$\delta = \frac{8 R_e}{\pi E} \cdot a \cdot \ln \left[\sec \left(\pi \cdot \frac{\sigma_\infty}{R_e} \right) \right] \quad (1.14)$$

Pour le cas de petites déformations plastiques ou $\sigma_\infty \ll R_e$. Cette équation s'écrit :

$$\delta \cong \frac{1}{E} \cdot \frac{K_I^2}{R_e} \quad \text{En contraintes planes} \quad (1.15)$$

$$\delta \cong 0.49 \frac{1}{E} \cdot \frac{K_I^2}{R_e} \quad \text{En déformations planes} \quad (1.16)$$

La rupture apparaît lorsque (δ) dépasse une valeur critique (δ_c) correspondant à la valeur K_{Ic} $\delta \geq \delta_c$

Ce critère représente alors un critère d'amorçage d'une fissure qui peut être considérée comme un critère de rupture fragile car si le chargement est maintenu, une croissance stable de la fissure se change rapidement en fissuration brutale.

1.7.4. Critère de l'intégral J [1]

L'intégrale J étant égale au taux de restitution d'énergie ($G = J$), RICE a proposé un critère pour les problèmes plans sous forme de l'intégrale J. Quand la déformation plastique est généralisée, RICE a démontré que J reste indépendante du contour suivi autour de la pointe de la fissure mais ne peut plus être interprétée comme pour un matériau élastique.

Selon BELGEY et LANDES, le paramètre J aurait pour les matériaux à comportement élastoplastique une signification analogue à celle du facteur d'intensité de contraintes pour les matériaux à comportement élastique linéaire.

Pour une fissure dans un matériau élastique parfaitement plastique, l'intégrale J s'écrit en fonction du déplacement d'ouverture des lèvres de la fissure (δ) comme suit :

$$J = \left(1 + \frac{\pi}{2}\right) \cdot \sqrt{S_{11}} \cdot \delta \quad (1.17)$$

Avec $\sqrt{S_{11}} = \frac{R_e}{2}$ pour une frontière de TRESCA.



D'autre part IRWIN propose :

$$\delta = \frac{4}{\pi} \frac{1}{E R_e} \frac{K_I^2}{R_e} = \frac{4}{\pi} \frac{J}{R_e} \quad \text{En contraintes planes} \quad (1.18)$$

$$\delta = \frac{1}{E R_e} \frac{K_I^2}{R_e} = \frac{J}{R_e} \quad \text{En déformations planes} \quad (1.19)$$

et DUGDALE propose :

$$\delta = \frac{4}{\pi} \frac{(1-\nu^2)}{E} \frac{K_I^2}{\sqrt{3} R_e} = \frac{4}{\pi} \frac{J}{\sqrt{3} R_e} \quad \text{En contraintes planes} \quad (1.20)$$

L'expérience montre que la fissure se met à croître pour une certaine valeur du chargement. Cette croissance devra se produire en domaine plastique non confinée pour une valeur critique (J_c) de l'intégrale J .

La rupture aura lieu pour : $J \geq J_c$

1.7.5. Critère des courbes R [1]

Dans les situations pour lesquelles l'état de contraintes planes est dominant, le critère du facteur d'intensité de contraintes critiques K_{Ic} n'est plus applicable car il

dépend de l'épaisseur de la pièce. On peut alors utiliser la courbe qui relie l'accroissement de la fissure (da) au facteur d'intensité de contraintes ou d'une façon plus générale au chargement appliqué.

BATHIAS donne la définition de la courbe R d'après IRWIN comme indiqué par la figure 1.5.

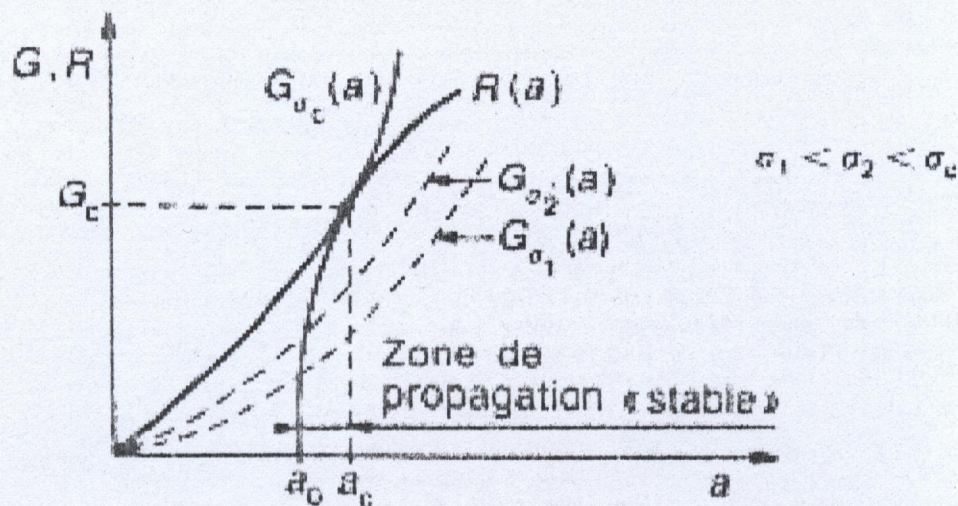


Figure 1.5 Définition de la courbe R.

Cette figure illustre le cas d'un milieu bidimensionnel en mode I de fissuration contenant une fissure centrale de longueur $(2a)$ en contraintes planes. La courbe R (courbe de résistance à la fissuration) étant établie expérimentalement lorsque $G = R$, il y a une instabilité conduisant à la rupture (point D).

La courbe R permet de déterminer directement, à l'aide du graphique, la valeur de la charge correspondant à la rupture brutale ou la dimension initiale du défaut qui provoque la rupture pour une charge donnée. Si l'on connaît la longueur initiale de la fissure, la courbe R du matériau et le taux de restitution d'énergie G , la figure permet de connaître la résistance à la fissuration R et donc le chargement qui provoquera la rupture. Réciproquement, si l'on connaît la charge et donc R , on peut en déduire par translation de la courbe sur l'axe, la dimension de la fissure qui provoquera la rupture pour ce chargement.

Les courbes R ont les propriétés d'indépendance de la longueur initiale de la fissure et du chargement. Une courbe R dépend cependant de l'épaisseur et de la température. BATHIAS donne une formulation développée par WEISS et SENGUPTA de la courbe R :

$$R = [\alpha + \beta (a - a_0)]^{1/\lambda} \quad (1.21)$$

ou' α , β et λ sont des constantes.

Le concept de la courbe R est un outil efficace pour prévoir la rupture fragile des structures bidimensionnelles en contraintes planes.

1.7.6. Concept de FEDDERSEN [1]

Selon SCHUELLER, pour un critère de rupture dans la région plastique, les critères de l'intégrale (J) et du déplacement (δ) d'ouverture des lèvres de la fissure sont souvent utilisés. Cependant, les données de base pour déterminer les paramètres critiques (J_c et δ_c) intrinsèques au matériau sont limités pour pouvoir une analyse statistique.

Le concept de FEDDERSEN est un concept élastoplastique de rupture lie la rupture linéaire élastique et la rupture plastique généralisée. Il ne nécessite que la connaissance de la limite élastique du matériau (R_e) et du facteur d'intensité de contraintes.

Dans le cas d'un milieu bidimensionnel infini en mode I, la relation entre la contrainte critique (σ_c) et la longueur de fissure (a) est représentée sur la figure 1.6.

La ligne droite est donnée par l'équation suivante :

$$\sigma_c = \sigma_y \left[1 - \frac{a(t)}{B} \right] \quad (1.22)$$

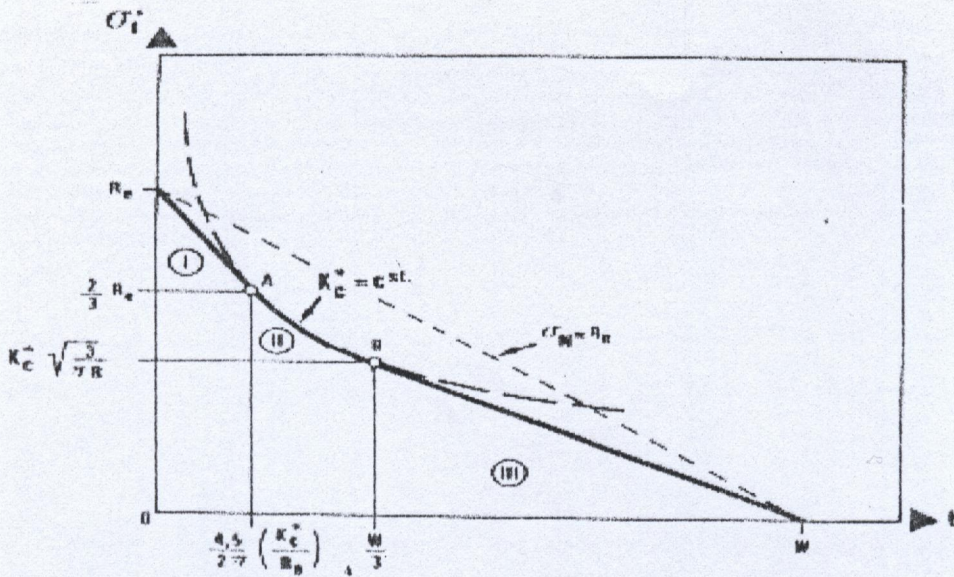


Figure 1.6 le concept de FEDDERSEN

σ_c : La contrainte critique applicable à un ligament non fissuré de la pièce. Elle correspond à la contrainte σ_y seuil, lors d'un chargement initial, $\sigma_y = R_e$.

$a(t)$: La demi-longueur de la fissure au temps t .

B : La demi-largeur de la pièce.

A partir de la détermination De K_{Ic} , dans ce cas, on écrit :

$$\sigma_c = \frac{K_{Ic}}{\sqrt{\pi \cdot a(t)}} \tag{1.23}$$

σ_c : Contrainte critique pour le ligament fissuré selon la mécanique de la rupture linéaire élastique.

FEDDERSEN considère, a priori, que pour des fissures extrêmement petites et de très longues fissures (zone I et III du graphique respectivement), les contrainte σ_∞ supérieures à σ_c provoqueront la rupture pour K_{Ic} donné.

La théorie élastique n'est pas valable pour des fissures de longueur extrêmement grandes. Le critère de rupture illustré par l'hyperbole (1.23) n'est donc utilisable qu'en zone élastique.

FEDDERSEN propose d'établir une courbe continue et régulière, utilisable pour toutes les longueurs de fissures en traçant deux tangentes à l'hyperbole (1.23). Une tangente est établie à partir du point $(0, \sigma_y)$ et l'autre du point $(B, 0)$. Ces deux tangentes définissent une contrainte critique minimale pour laquelle il y a rupture pour les longueurs de fissures extrêmes.

D'après les équations de la droite élastique (1.22), et de la courbe l'hyperbole (1.23), les efforts de fissuration de FEDDERSEN dans lesquels σ_c s'écrit comme suit :

$$\sigma_c = \sigma_y \left[1 - \frac{4\pi}{27} \left(\frac{\sigma_y}{K_{Ic}} \right)^2 \cdot a(t) \right] \quad \text{Pour l'intervalle I} \quad (1.24)$$

$$\sigma_c = \frac{K_{Ic}}{\sqrt{\pi \cdot a(t)}} \quad \text{Pour l'intervalle II} \quad (1.25)$$

$$\sigma_c = \frac{3}{2} K_{Ic} \frac{\sqrt{3}}{8\pi} \left[1 - \frac{a(t)}{B} \right] \quad \text{Pour l'intervalle III} \quad (1.26)$$

Selon SCHUELLER, le concept de FEDDERSEN permet la détermination d'un critère de rupture, pour toutes les longueurs de fissures. Défini par une courbe unique, ce critère donne la contrainte critique minimale applicable et va dans le sens de la sécurité.

1.7.7. Approche des deux critères [1]

Comme le concept de FEDDERSEN, cette approche est valable en élasticité et en élastoplasticité. Elle est le fruit d'études sur des parties de cuves sous pression en acier ferritique. L'approche des deux critères est illustrée par un diagramme d'estimation de la rupture définissant une **zone de rupture** et une **zone de non-rupture**.

L'estimation de la rupture s'effectue par l'emplacement d'un point de fonctionnement P de coordonnées (S_r, K_r) , dans l'une ou l'autre de ces deux zones. (S_r) est le rapport de la contrainte appliquée à la contrainte de rupture et (K_r) est le rapport du facteur d'intensité de contrainte issu de la contrainte appliquée à celui issu de la contrainte de rupture (autrement dit K_{Ic}).

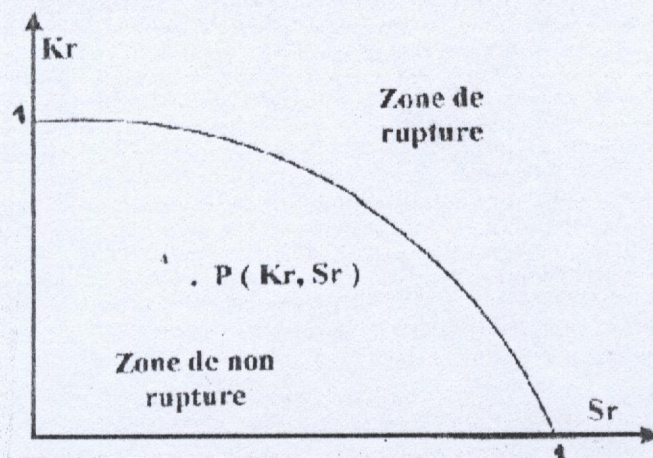


Figure 1.7 Schéma de l'approche des deux critères

SHUELLER donne, l'expression (K_r) en fonction de (S_r) selon différents auteurs :

$$K_r = \frac{S_r}{\sqrt{\frac{8}{\pi^2} \log \sec \left(\frac{\pi S_r}{2} \right)}} \quad \text{Selon BURDEKIN et STONE} \quad (1.27)$$

$$K_r = \sqrt{1 - S_r^2} \quad \text{Selon FOLIAS} \quad (1.28)$$

$$K_r = \sqrt{\cos \left(\frac{\pi S_r}{2} \right)} \quad \text{Selon LARSON et BERNARD} \quad (1.29)$$

$$K_r = \frac{2 S_r}{\log \left[\frac{1 + S_r}{1 - S_r} \right]} \quad \text{Selon DUGADLE} \quad (1.30)$$

Les équations représentatives de la limite de rupture ont été affinées pour prendre en compte les matériaux à ténacité K_{Ic} élevée. Les diagrammes obtenus montrent que K_r tend vers zéro quand S_r tend vers l'infini.

L'approche des deux critères et le concept de FEDDERSEN peuvent être reliés directement si l'on exprime K_r en fonction du chargement et le chargement en fonction de la longueur de la fissure.

1.7.8. Méthode E.P.R.I [1]

La méthode de E.P.R.I, (Electro Power Research Institute), consiste à utiliser pour un matériau donné et pour une géométrie donnée, des abaques permettant à partir de la courbe $(J - \Delta a)$ (l'intégrale J – accroissement de la longueur de la fissure) de déterminer la charge maximale admissible. Cette charge maximale correspond à la courbe isocharge J fonction de Δa tangente à la courbe $(J - \Delta a)$ du matériau. De cette charge maximale, on peut en déduire la valeur de l'extension de la fissure au maximum de la charge et de la valeur de J correspondante.

La résolution de l'ensemble des équations est simple et la construction de ces abaques peut se faire rapidement à partir de programmes fonctionnant sur micro-ordinateur. Cette méthode est applicable à différents types d'éprouvettes. Il faut cependant tenir compte du fait que la courbe $(J - \Delta a)$ du matériau dépend de la géométrie des éprouvettes.

1.7.9. Critère de bifurcation des fissures [1]

Après avoir déterminé les facteurs d'intensité de contraintes numériquement ou analytiquement d'une part, et la ténacité K_{Ic} expérimentalement d'autre part, le critère de bifurcation doit déterminer :

1. L'angle de bifurcation (θ_0) par rapport à l'axe de la fissure,
2. Si les facteurs d'intensité de contraintes sont tels qu'une combinaison de ces facteurs rend la fissure instable et la fait propager.

Pour la fissuration en mode I, lorsque $K_I \geq K_{Ic}$, la fissure devient instable.

Pour le cas d'un mode mixte (mode I et mode II) de fissuration, le critère de bifurcation exige donc une relation entre K_I et K_{II} , d'une part, et K_{Ic} d'autre part, cette relation s'écrit sous la forme :

$$F(K_I, K_{II}, K_{Ic}) = 0 \quad (1.31)$$

Dans l'absence d'un critère qui fait l'unanimité, et afin d'effectuer la comparaison avec les résultats expérimentaux, nous avons retenu trois critères de bifurcation parmi les plus largement répondus.

1. Critère de la contrainte tangentielle maximale, basé sur une interprétation physique du phénomène,

2. Critère du minimum de la densité de l'énergie de déformation, s'établit à partir de la densité de l'énergie de déformation,

3. Critère du maximum du taux de restitution d'énergie, s'établit à partir du taux de restitution d'énergie.

1.7.9.1. Critère de la contrainte tangentielle maximale

L'énoncé de ce critère est le suivant : la bifurcation s'amorce à l'extrémité de la fissure dans la direction ($\theta = \theta_0$) perpendiculaire à la direction de la plus grande contrainte tangentielle $\sigma_{\theta\theta}$ correspondant à :

$$\sigma_{\theta\theta} \sqrt{2 \cdot \pi \cdot r} = K_{Ic} \quad (1.32)$$

Ceci se traduit par :

$$\sigma_{\theta\theta} \Big|_{\theta=\theta_0} > 0, \quad \frac{\partial \sigma_{\theta\theta}}{\partial \theta} \Big|_{\theta=\theta_0} = 0, \quad \frac{\partial^2 \sigma_{\theta\theta}}{\partial \theta^2} \Big|_{\theta=\theta_0} < 0 \quad (1.33)$$

Compte tenu l'équation de $\sigma_{\theta\theta}$ en coordonnées polaires :

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{1}{4\sqrt{2\pi r}} \left[K_I \left(3\cos\frac{\theta}{2} + \cos\frac{3\theta}{2} \right) - 3K_{II} \left(\sin\frac{\theta}{2} + \sin\frac{3\theta}{2} \right) \right] \quad (1.34)$$

On déduit :

$$\frac{\cos\theta_0}{2} [K_I \sin\theta_0 + K_{II} (3\cos\theta_0 - 1)] = 0 \quad (1.35)$$

Cette équation a deux solutions :

$\theta_0 = \pm \pi$. Qui constitue une solution triviale et,

$$[K_I \sin\theta_0 + K_{II} (3\cos\theta_0 - 1)] = 0 \quad (1.36)$$

D'où l'angle de bifurcation θ_0 , peut être déduit comme suit :

$$\operatorname{tg}\theta_0 = \frac{1}{4} \frac{K_I}{K_{II}} \pm \frac{1}{4} \sqrt{\left(\frac{K_I}{K_{II}} \right)^2 + 8} \quad (1.37)$$

On cherche (θ_0) angle de bifurcation tel que :

$$\sigma_{\theta\theta} \sqrt{2\pi r} = K_{Ic} \quad (1.38)$$

La rupture est obtenue selon ce critère pour :

$$\frac{K_I}{K_{Ic}} \cos^3 \frac{\theta_0}{2} - \frac{K_{II}}{K_{Ic}} \cos \frac{\theta_0}{2} \sin \theta_0 = 1 \quad (1.39)$$

Cette condition correspond alors à la rupture fragile par fissuration brutale dans la direction (θ_0) en milieu élastique linéaire.

1.7.9.2. Critère du minimum de la densité de l'énergie de déformation

Selon ce critère proposé par SIH en 1972 [1], la fissure initiale bifurque dans la direction (θ_0) pour laquelle la densité de l'énergie de déformations est minimale pour

un $r = r_0$ donné. Autrement dit, $S(\theta_0)$ est minimale. La rupture fragile intervient quand ce minimum atteint plusieurs angles de bifurcation, ce qui nécessite la connaissance approximative du chargement local et d'avoir une idée de la direction de propagation, d'autre part, les minima relatives de la forme $S(\theta)$ sont peu marquées, ce qui rend délicate la recherche de (θ_0) dans les cas de chargements complexes.

On peut montrer que l'énergie de déformation $W(\varepsilon)$ s'écrit sous la forme :

$$W(\varepsilon) = \frac{S(\theta)}{r} = \frac{1}{\pi \cdot r} \left(a_{11} K_I^2 + 2 \cdot a_{12} K_I K_{II} + a_{22} K_{II}^2 \right) \quad (1.40)$$

Avec :

$$\begin{aligned} a_{11} &= \frac{1}{16 \cdot \mu} (3 - 4 \cdot \nu - \cos \theta) (1 + \cos \theta) \\ a_{12} &= \frac{1}{16 \cdot \mu} (2 \cdot \sin \theta) (\cos \theta - 1 + 2 \cdot \nu) \\ a_{22} &= \frac{1}{16 \cdot \mu} [4(1 - \nu)(1 - \cos \theta) + (3 \cdot \cos \theta - 1)(1 + \cos \theta)] \end{aligned} \quad (1.41)$$

On cherche (θ_0) angle de bifurcation tel que :

$$\frac{dS}{d\theta} = 0 \Rightarrow S_{\min} = S(\theta_0) \quad (1.42)$$

La rupture est obtenue selon ce critère pour :

$$\frac{4 \cdot \mu}{1 - 2 \cdot \nu} \left[a_{11} \left(\frac{K_I}{K_{Ic}} \right)^2 + a_{12} \left(\frac{K_I \cdot K_{II}}{K_{Ic}} \right) + a_{22} \left(\frac{K_{II}}{K_{Ic}} \right)^2 \right] = 1 \quad (1.43)$$

1.7.9.3. Critère du maximum du taux de restitution d'énergie

Ce critère reprend la notion de taux de restitution d'énergie G déjà utilisée par GRIFFITH, mais il se place dans un cadre d'étude plus général, celui de la présentant une bifurcation.

Pour une fissure ayant déjà une bifurcation, les angles définissent des facteurs d'intensité de contraintes pour l'extrémité de la branche secondaire,

Soit $K_I^*(\theta)$ et $K_{II}^*(\theta)$ lorsque (S) tend vers zéro.

$$\begin{Bmatrix} K_I^*(\theta) \\ K_{II}^*(\theta) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} K_I \\ K_{II} \end{Bmatrix} \quad (1.44)$$

Ces deux facteurs sont exprimés en fonction de K_I et K_{II} avant bifurcation selon les expressions suivantes :

k_{11} , k_{12} , k_{21} , k_{22} dépendent uniquement de (θ)

Le critère est fondé sur l'expression du taux de restitution d'énergie pour une bifurcation d'angles (θ) , soit en contraintes planes :

$$G = \frac{1}{E} \left[K_I^{*2}(\theta) + K_{II}^{*2}(\theta) \right] \quad (1.45)$$

La détermination de l'angle de bifurcation peut alors s'obtenir de deux conditions rigoureusement équivalentes :

1. La propagation correspond au maximum de G , soit $\frac{\partial G}{\partial \theta} = 0$,
2. La propagation s'effectue localement en mode $K_I^*(\theta)$ pur, soit : $K_{II}^*(\theta) = 0$.

Hussain et autre [1] ont proposé une solution à ce problème plan, où le taux de restitution s'écrit comme suit, en négligeant la variation du travail des efforts extérieurs.

$$G(\theta) = \frac{\partial W(\varepsilon)}{\partial a} = \frac{4}{E} \left(\frac{1}{3 + \cos^2 \theta} \right)^2 \left(\frac{1 - \frac{\theta}{\pi}}{\frac{\theta}{\pi}} \right)^{\frac{\theta}{\pi}} \left(\frac{\frac{\theta}{\pi}}{1 + \frac{\theta}{\pi}} \right) \left[(1 + 3\cos^2 \theta) K_I^2 + 8\sin\theta\cos\theta K_I K_{II} + (9 - 5\cos^2 \theta) K_{II}^2 \right] \quad (1.46)$$

La rupture est obtenue selon ce critère pour :

$$4 \left(\frac{1}{3 + \cos^2 \theta_0} \right)^2 \left(\frac{1 - \frac{\theta_0}{\pi}}{1 + \frac{\theta_0}{\pi}} \right)^{\frac{\theta_0}{\pi}}$$

$$\left[(1 + 3 \cos^2 \theta_0) \left(\frac{K_I}{K_{Ic}} \right)^2 + 8 \sin \theta_0 \cos \theta_0 \frac{K_I K_{II}}{K_{Ic}^2} + (9 - 5 \cos^2 \theta_0) \left(\frac{K_I}{K_{Ic}} \right)^2 \right] = 1$$

(1.47)

L'expérience montre que ces critères conduisent à une très bonne précision pour les matériaux élastiques fragiles contenant une fissure réelle, soumis à un chargement quasi-statique.

Par contre, pour les matériaux ductiles, soumis à des cycles de charges répétées, il ne saurait être question de les utiliser sans un examen attentif des valeurs auxquelles ils conduisent vis à vis des résultats expérimentaux.

Chapitre 2

Notions Essentielles de Système Expert

2.1. Introduction

Un système expert est un programme informatique destiné à résoudre un problème précis à partir d'une analyse et d'une représentation des connaissances et du raisonnement d'un (ou plusieurs) spécialistes de ce problème. [19]

Un système expert est construit à partir de l'analyse d'un savoir. Il va donc,

- Contenir des connaissances sur un domaine donné,
- Percevoir une réalité à mettre en regard de ces connaissances,
- Mettre en œuvre un raisonnement, utilisant ces connaissances, destiné à conduire à la solution du problème posé.

2.2. Domaines d'application

Selon plusieurs études les principaux domaines d'application des systèmes experts sont :

- Le diagnostic,
- La planification,
- La conception,
- Le contrôle de processus,
- La formation,
- La gestion de configuration,
- Et, plus généralement, diverses formes d'aide à la décision.

Parmi ces domaines, les applications de diagnostic se taillent la part du lion puisqu'elles représentent environ 50% des développements de systèmes experts. [19]

2.3. Résultats attendus d'un système expert[19]

La réalisation d'un système expert peut être envisagée avec des objectifs très variés.

2.3.1. Diffusion d'un savoir

C'est le plus souvent l'idée qui préside à l'écriture d'un système expert : rendre la connaissance, l'expertise sur un domaine accessible sur le terrain de façon à limiter autant que faire se peut le recours à l'expert avec les problèmes de disponibilité, de délai d'intervention... que cela pose.

2.3.2. Assistance de l'expert

En effet, le système, même il reste moins puissant que l'expert, s'il n'a pas ses qualités d'intuition, d'imagination, peut lui fournir une aide appréciable en étant beaucoup plus systématique, en n'oubliant pas certaines hypothèses même peu probables, en se chargeant de l'aspect fastidieux de certaines études afin que l'expert puisse consacrer son talent aux aspects plus délicats pour lesquels il est indisponible.

2.3.3. Formation, enseignement

La disponibilité des systèmes expert peut aussi en faire des outils de formation. D'une part, en soumettant des cas, des variantes, au systèmes et en comparant leurs réponse aux siennes, les élèves ont à leur disposition un professeur au savoir étendu. De plus, sous certaines réserves (importantes), un système expert peut « expliquer » ce qu'il fait et comment il atteint ses buts.

2.3.4. Recueil, Conservation, Sauvegarde de connaissances

Un système expert est un recueil de connaissances. Il peut donc être utilisé pour archiver celle-ci puis la consulter selon les besoins, même en dehors d'une utilisation opérationnelle du système expert. Une idée souvent mentionnée consiste aussi à envisager un système expert pour conserver le savoir d'un expert, conduit, lui, à se retirer (changement de poste, départ en retraite, etc).

2.4. Les intervenants

Le développement d'un système expert fait appel à différentes catégories de compétences. On distingue :

- **L'expert** : celui qui dispose des connaissances (le savoir et le savoir-faire), qui sait résoudre le problème pour lequel on envisage un système expert. De plus, comme tout être humain, un expert dispose de capacités d'abstraction, de raisonnement de bon sens....qu'il utilise pour construire et exploiter au mieux son expertise.

- **Le cogniticien** : celui qui va, à partir des connaissances de l'expert, concevoir la mise en forme du problème,

- **L'informaticien** : celui qui écrit le système (au sens informatique),

- **L'utilisateur** : celui qui utilise le système expert dans des conditions réelles.

Notons que, l'utilisateur étant rarement un expert, la prise en compte de ses besoins , de son attente et de ces compétences spécifiques est élément essentiel d'un développement de système expert.

2.5. L'architecture d'un système expert[20]

Le noyau du système expert est constitué de trois éléments :

1. Des connaissances rassemblées dans la base de connaissances sous un certain formalisme.
2. Un mécanisme de raisonnement appelé moteur d'inférences.
3. Des stratégies de fonctionnement, ou méta-connaissances.

Autour de ce noyau, s'ajoutent des éléments qui servent au fonctionnement journalier du système. Nous trouvons :

1. L'interface utilisateur

Elle est le lien entre l'utilisateur final et le noyau du système expert. Son rôle est de traduire les commandes que lui donne l'utilisateur, et d'afficher les informations (questions du système expert, résultats).

2. L'interface avec le système d'information

Elle fait le lien avec le reste de l'informatique. Le système expert doit pouvoir utiliser des informations issues de la base centrale de données, faire effectuer des calculs ou exécuter une procédure par un ordinateur extérieur, communiquer des résultats à d'autres programmes.

3. Les outils de développement et de maintenance du système

Il servent à :

- La saisie et la modification de la connaissance (éditeur),
- La visualisation des connaissances,
- Eventuellement, l'acquisition automatique des connaissances,
- L'aide à la mise à jour (recherche d'information, vérification de cohérence).

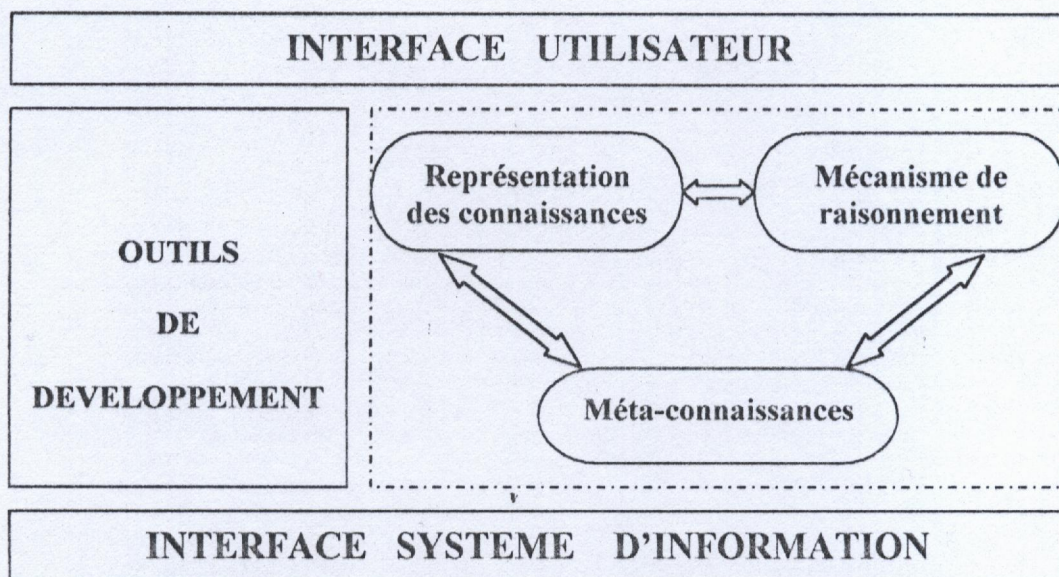


Figure 2.1 Architecture d'un système expert

2.6. Les formalismes de représentation[20]

Le formalisme (ou le mode) de représentation des connaissances est un moyen d'expression de la réalité.

Les différents modes de représentation de la connaissance sont :

1. Calcul logique,
2. Réseau sémantique,
3. Règles de production,
4. Représentations centrées objets (ou frames).

2.6.1. Les règles de production [19]

Le mode de représentation à base de règles de production est le mode le plus utilisé actuellement. Un système à base de règle de production est un ensemble de règle qui sont activés par un mécanisme de raisonnement appelé moteur d'inférences.

Une règle est composé de deux parties. La condition ou prémisse, et l'action ou conclusion.

SI Conditions
ALORS Conclusion.

L'ensemble des règles est rassemblé dans la base de connaissances. Les règles actionnées par le moteur d'inférences travaille sur des faits.

Les faits, rassemblées dans la base de faits, sont en quelque sorte les données sur lesquelles travaillent les règles.

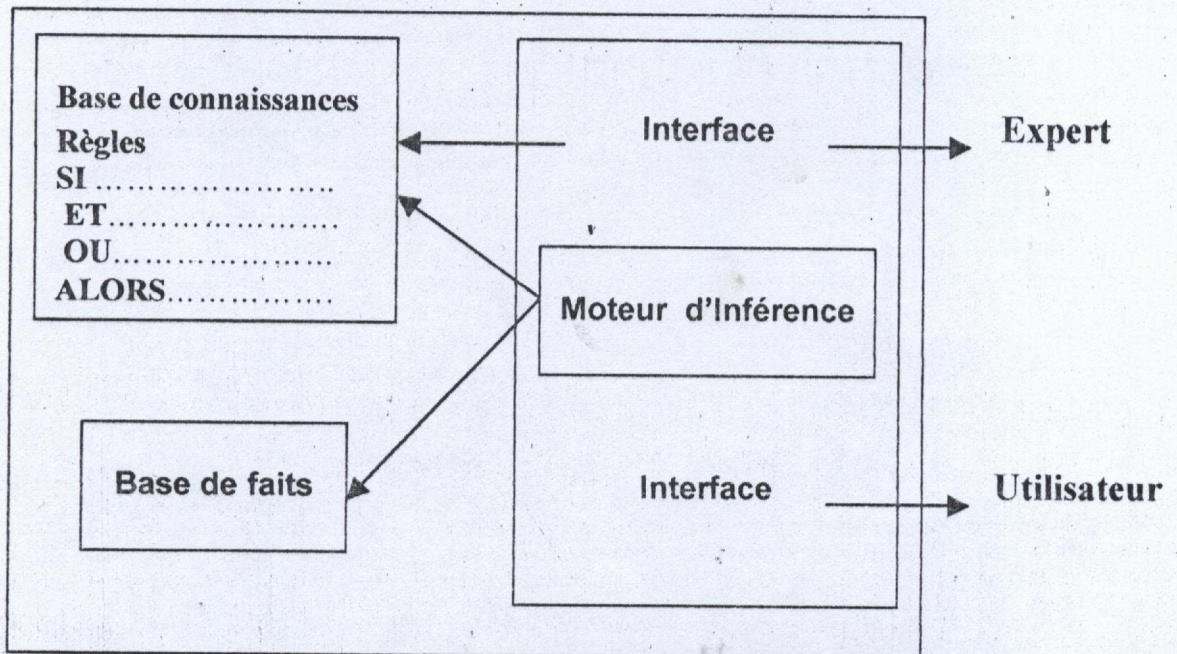


Figure 2.2 Schéma de structure

Le moteur d'inférences est le mécanisme de raisonnement à ce titre, il porte l'aspect dynamique au système. Dans une première approche nous dirons que les règles décrivent le domaine d'expertise et que le moteur d'inférences simule le raisonnement.

Le moteur d'inférences autorise en général deux stratégies de raisonnement :

- Le chaînage avant, ou stratégie dirigée par les faits,
- Le chaînage arrière, ou stratégie dirigée par les buts

On parle de chaînage avant lorsque à chaque cycle, le système considère les règles dont les conditions sont remplies, ajoute les conclusions de ces règles (lesquelles sont alors démontrées) aux faits connus. La combinaison de ces nouveaux faits avec ceux qui existent déjà permet et de poursuivre le raisonnement. Le processus se répète jusqu'à épuisement des règles et on examine alors la base de faits finale pour savoir ce que le système expert a permis de conclure, soit l'on arrive à un fait considéré comme une conclusion suffisante du système.

On parle de chaînage arrière lorsqu'on considère qu'à un moment donné, on cherche à établir la véracité d'un fait. Pour ce faire, à moins que la conclusion attendue fasse déjà partie de la base de faits, auquel cas la démonstration est terminée, on considère les règles permettant de conclure sur ce fait. Il suffit alors que les conditions d'une au moins de ces règles vérifiées pour entraîner la véracité de la conclusion. Ces conditions deviennent de nouveaux faits à établir, ce qui permet d'itérer le processus, soit jusqu'à ce qu'on ne puisse plus faire évoluer la situation (ce qui est un cas d'échec), soit jusqu'à ce qu'ayant reconnu suffisamment de faits avérés on puisse considérer le but comme démontré.

Assez schématiquement, car dans les systèmes experts réels on s'efforce de programmer des garde-fous, on peut indiquer que le risque principale du chaînage avant est la production de faits inutiles ou sans intérêt. Le risque du chaînage arrière est plutôt de perdre du temps à chercher à démontrer des buts par des voies qui n'aboutissent pas. Certains systèmes permettent de passer, lors de différentes étapes de raisonnement du chaînage avant au chaînage arrière. Ces modes de fonctionnement sont désignés sous le vocable de « chaînages mixtes ».

2.7. Le développement d'un système expert [19]

La démarche d'ensemble du développement consiste, à partir d'un objectif à satisfaire pour lequel on envisage le développement d'un système expert, à réaliser un produit logiciel qui résout (le mieux possible) le problème posé, lequel produit devra ensuite « vivre » (validation, installation, utilisation, formation, maintenance....).

La réalisation d'un système expert est un développement informatique et, au même titre que n'importe quel autre, il suit un cycle de vie allant de l'expression d'un besoin à l'exploitation et à la maintenance d'un produit opérationnel validé.

2.7.1. Analyse des connaissances

La première phase de réalisation d'un système expert demande une double familiarisation :

1. Le cogniticien doit s'imprégner du domaine d'expertise considéré, non pour devenir lui même expert, mais pouvoir ensuite mieux planifier le déroulement de l'acquisition des connaissances.
2. Il est très souhaitable que l'expert s'initie à ce que sont les systèmes experts, non pas pour être à même de participer aux aspects modélisation et réalisation informatique mais pour comprendre ce qu'il advient des connaissances qu'on lui demande d'exposer.

Cette première familiarisation permet de déboucher sur la phase de modélisation des connaissances proprement dite.

Le plus souvent, à partir de discussion plus ou moins dirigées entre l'expert et le cogniticien. L'étude de cas, le cogniticien élabore un modèle dans lequel il cherche à faire figurer une description du domaine couvert (vocabulaire, principaux concepts et relations entre ceux-ci), une description du savoir de l'expert et de son savoir-faire (à partir de quoi l'expert raisonne-t-il, et de quelle manière procède-t-il ?).

De nombreuses discussions et retours d'informations sont souvent nécessaires pour obtenir une première modélisation satisfaisante.

Le cogniticien s'efforce ensuite de formaliser le modèle obtenu c'est-à-dire de le traduire dans des structures (ou formalismes) permettant de retranscrire de manière

formelle ce modèle. On notera qu'ici l'activité du cogniticien change d'objet et que celui-ci quitte le domaine de l'analyse abstraite des connaissances pour se tourner vers les techniques de représentation.

2.7.2. Maquettage et prototype

La phase informatique de maquettage consiste alors, après sélection d'un outil logiciel bien adapté, à **implémenter** ces formalismes puis la transcription au travers de ceux-ci du modèle de connaissances.

Un premier maquettage relativement rapide est en général nécessaire pour valider les différents éléments de modélisations et vérifier avec l'expert qu'ils correspondent bien à ce qu'il pouvait attendre.

La maquette pourra ensuite, après d'éventuels ajustements, être étendue (ou réécrite) en fonction de contraintes d'environnement par exemple, à partir de spécifications issues de la maquette) et voir sa base de connaissances complétée pour constituer un prototype du système expert envisagé.

2.7.3. Test et validation

On doit inclure dans cette validation, outre la validation ordinaire du logiciel qu'est le système expert, toutes les actions nécessaires pour s'assurer de la qualité de la base de connaissances constituée.

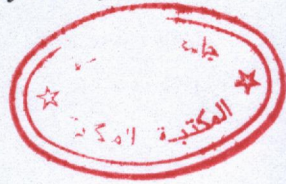
Cette validation a pour but de répondre à des questions telles que :

- Les connaissances figurant dans le système expert correspondent-elles bien à celles qu'a voulu fournir l'expert ?
- Les connaissances figurant dans le système expert permettent-elles bien de réaliser ce qu'on attend du système expert ?

2.7.4. Evolution et maintenance

Dans la plupart des cas, un système expert validé va devoir évoluer au cours du temps une cause courante est l'évolution même des matériel sur lesquels porte le système expert. Des modifications de ceux-ci, si elles ne remettent pas en cause la base

de raisonnement et la plus grande partie des connaissances contenues dans le système, obligent néanmoins à y apporter certains correction et adaptations.



2.8. Les outils de développement[22]

Un outil de développement de système expert est la combinaison d'un mode de représentation de la connaissance et d'un environnement de production. Le premier fournit un cadre pour s'exprimer, le second une aide pour produire un système expert, plusieurs approches sont possibles. On peu à partir de :

1. Langages informatiques classiques (C, Pascal, Ada) et à construire un ensemble d'outils une base de connaissances et un moteur d'inférences qui correspondent parfaitement au problème que l'on veut traiter. C'est l'approche lourde. Le temps, les moyens et les compétences nécessaire sont importants.
2. Langages spécialisés en intelligence artificielle (Lisp, Prolog, Langage orienté objet....) et à construire un système du même type que précédemment. Là aussi, le temps, les moyens et les compétences nécessaire sont importants.
3. Générateurs de systèmes experts (ou outil de développement) peu être défini comme un produit logiciel offrant les moyens (directement ou à travers une activité de programmation) d'exprimer une base de connaissances, de faire-tourner un moteur d'inférences, c'est-à-dire un programme figurant la mise en œuvre du processus de décision, et permettant l'obtention d'un produit exécutable : le système expert.

Chapitre 3

Procédures d'expertise des ruptures

3.1. Introduction

L'examen d'une rupture, permet de déterminer la cause de la rupture, c'est à dire explique pourquoi la conception, la sélection des matériaux ou les procédures de fabrication étaient déficientes ou inadaptées à la situation. Ces explications sont la base de recommandation visant à éviter le renouvellement de ce type de rupture.

Par ailleurs, l'examen de rupture partielle d'une structure permet de déterminer, si celle-ci est encore capable de remplir sa fonction et si d'autres ruptures sont ou non encore à craindre. Malheureusement, il n'existe aucune règle universelle, de sorte que chaque examen est un cas particulier. Cependant, un certain nombre de démarches sont connues à toutes expertises[5], ce sont :

1. Un examen visuel,
2. Une collecte des données,
3. Un examen macroscopique,
4. Un examen microscopique,
5. La formulation des hypothèses et leur vérification.

3.2. Examen visuel[5]

C'est souvent la clé de la rupture. Il permet de déterminer si la structure a conservé ou non son intégrité d'ensemble avant la rupture finale ou si celle-ci est la conséquence de la rupture prématurée d'un élément secondaire sous dimensionné.

La position relative des pièces ou morceaux de pièces permet souvent de déterminer où la rupture a pris source et quelle énergie elle a mis en jeu. De même, les déformations de ces pièces donnent une idée des sollicitations auxquelles elles furent soumises avant rupture.

En toutes circonstances, un nombre de photos d'ensemble doit être pris avant toute autre intervention. Ces photos, doivent aussi bien couvrir aussi bien les parties rompues que celles qui ne le sont pas afin de mieux définir l'ensemble de la structure et aussi s'assurer que d'autres ruptures identiques ne sont pas sur le point de se produire.

3.3. Collecte de données

Avant toute formulation du problème, un maximum de données doit être collecté, même si seulement une fraction d'entre elles sera utilisée, car la plupart de ces données ne sont disponibles que dans un délai assez court après le sinistre : la mémoire des témoins peut ne pas être fidèle, la structure peut être déplacée, modifiée, réparée, les surfaces de ruptures peuvent s'oxyder, enfin certaines données peuvent disparaître avec le temps.

A titre d'illustration des données à recueillir, la liste suivante indique quelques majeures investigations, qui est sous forme d'une série de questions.

1. Le composant cède à une rupture?
2. Si la rupture a entraîné une fissuration ou rupture, est-ce que les sites de l'initiations ont été déterminés ?
3. Est-ce que les fissures sont initiées à la surface ou en dessous de la surface ?
4. Est-ce que la fissuration est associée avec une concentration de contrainte ?
5. Quelle est la longueur actuelle de la fissure ?
6. Quel était l'intensité du chargement ?
7. Quel est le type de chargement : statique, cyclique ou intermittent ?
8. Comment les contraintes ont elle été orientées ?
9. Quel était le mécanisme de la rupture ?

10. Quelle était la température du service approximative au temps de rupture ?
11. Est-ce que la température a contribué à la rupture ?
12. Est-ce que l'usure a contribué à la rupture ?
13. Est-ce que la corrosion a contribué à la rupture ? Quel type de corrosion ?
14. Est-ce que le matériau utilisé est convenable ? Est-ce qu'un meilleur matériau est exigé ?
15. Est-ce que la section traversée était adéquate pour cette classe de service ?
16. Est-ce que la qualité du matériau était acceptable ?
17. Est-ce que les propriétés mécaniques du matériau étaient acceptable ?
18. Est-ce que le composant qui a un défaut a été traité thermiquement correctement ?
19. Est-ce que le composant qui a un défaut a été fabriqué correctement ?
20. Est-ce que le composant qui a un défaut a été assemblé correctement ?
21. Est-ce que le composant a été réparé pendant le service ? Si oui, Est-ce que la réparation a été exécutée correctement ?
22. Est-ce que le composant a été maintenu correctement ? Lubrifié correctement ?
23. Est-ce que la rupture est liée a un abus de service ?
24. Est-ce que la conception du composant peut être améliorée pour prévenir des ruptures similaires ?
25. Est il possible que les ruptures se produisent dans les composants similaires dans le service maintenant ?
Qu'est -ce qui peut être fait pour prévenir leur rupture ?

En général, les réponses sont dérivées d'une combinaison des enregistrements des examens et des testes exposés précédemment.

Cette liste, met l'accent sur la diversité des données à recueillir, ce qui sous-entend que le responsable de l'examen doit s'entourer des compétences nécessaire à l'utilisation ultérieure d'une partie ou de toutes ces informations.

D'autres part, il peut sembler au lecteur non averti que seules les données nécessaires à l'investigation de mécanismes de ruine subtils sont à collecter : il n'en est rien. Au contraire, bien des ruptures à priori inexplicables ne sont en fait que la conséquence de grossières erreurs de conception ou de fabrication.

De nombreux exemples de ruines de structures dues à une mauvaise interprétation des dessins d'exécution peuvent être cités : profilés trop faibles ou au contraire trop lourds, boulons en nombre insuffisant, modification des techniques d'assemblage pour convenance de réalisation sur chantier, etc....

3.4. Examen macroscopique[5]

Le stade de l'expertise est peut être le plus important, car c'est à ce moment que l'investigateur commence à formuler quelques hypothèses sur l'origine des fissures et leur propagation. C'est de cet examen, qui bien souvent ne se fait qu'à la loupe, que découle la sélection des surfaces qui feront l'objet de l'examen microscopique : une erreur à ce stade entraîne sur de fausses pistes ne menant soit à aucune conclusion, soit à des conclusions erronées.

A ce stade de l'examen peuvent être observés certains faciès caractéristiques des surfaces de rupture :

1. Zone inclinées à 45° dues à une rupture ductile,
2. Zone plate et brillante, sur laquelle les facettes des grains sont bien visible, due à une rupture fragile,
3. Chevrons pointant vers l'origine de la rupture,
4. Lignes concentriques indiquant la propagation d'une fissure de fatigue,
5. Zones oxydées, indiquant une fissure existant de longue date, ou un manque de soin des pièces rompues. Si les surfaces de rupture n'ont pas été protégées (par exemple par une laque facile à dissoudre dans un solvant organique n'affectant pas le métal), la corrosion peut les avoir altérées au point de rendre tout examen impossible.

3.5. Examen microscopique[5]

Cet examen s'effectue à des grossissements supérieurs à 100. il est possible de distinguer les différents mécanismes de rupture microscopiques et par conséquent en

déduire les causes métallurgiques et mécaniques probables de la rupture. Les principaux mécanismes que l'on peut ainsi mettre en évidence sont au nombre de quatre, chacun d'eux étant caractérisé par un faciès de rupture particulier.

3.5.1. Coalescence de pores

Il s'agit ici de la rupture de particules fragiles conduisant à la formation de pores au sein du métal, lesquels grossissent et coalescent jusqu'à rupture finale. Le faciès de la surface de rupture fait très nettement apparaître ces pores, lesquels ont des formes d'autant plus allongées que la contrainte de cisaillement est importante.

3.5.2. Clivage

Ce mode de rupture est souvent associé à une rupture fragile. Il met en effet en jeu une faible énergie, car la rupture est transcrystaline le long de plans cristallographiques spécifiques.

3.5.3. Fracture inter-granulaire

Il s'agit là du faciès le plus aisément reconnaissable. La rupture se produit le long des surfaces inter-granulaires et se trouve en général associée à un comportement fragile résultant d'un traitement thermique inadéquat ou improprement appliqué.

3.5.4. Rupture par fatigue

A faible grossissement, la surface de rupture présente des faibles concentriques correspondant aux alternances de chargement.

A fort grossissement apparaissent entre ces lignes une multitude d'autres lignes similaires mais moins marquées qui cette fois correspondent à chaque cycle de chargement. Cette distinction fondamentale est schématiquement illustrée sur les figures ci-dessous.

Le nombre de lignes n_i dans chaque zone i , ainsi que la largeur de chaque zone l_i permettent d'obtenir une estimation de l'amplitude de variation du facteur d'intensité de contrainte ΔK_i lors de ce stade de propagation de la fissure de fatigue, grâce à la loi de

PARIS :

$$\Delta K_i \left(\frac{l_i}{C n_i} \right)^{\frac{1}{n}}$$

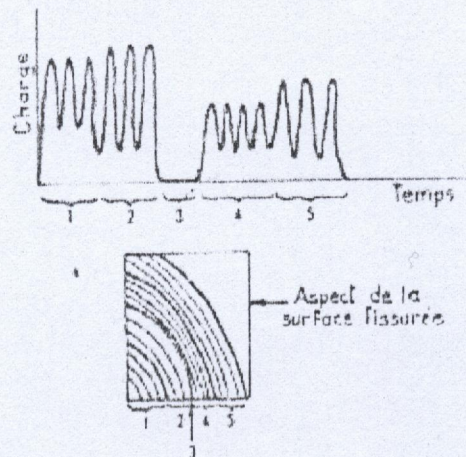


Figure 3.1 Les lignes de concentriques

3.6. Formulation des hypothèses et leur vérification[5]

A ce point de l'examen, il est temps de rassembler toutes les données précédemment collectées et de formuler une ou plusieurs hypothèses quant aux causes de la rupture. L'hypothèse à retenir sera celle qui sera en accord avec la majeure partie des informations possédées. Que toutes ne soient pas en accord avec cette hypothèse ne signifie pas que celle-ci soit fausse. En effet, une incertitude existe toujours quant à la validité des données recueillis ou quant à la formulation quantitative de l'hypothèse. L'investigateur se doit de vérifier. Cependant, que l'éventail des hypothèses envisagées est suffisamment vaste pour contenir la totalité de celles raisonnablement possible.

La meilleure façon de conduire cette vérification est de soumettre le problème à des experts d'horizons divers, chacun d'eux étant évidemment enclin à n'envisager que les hypothèses propres à sa spécialité :

- Le métallurgiste pensera aux problèmes de microstructure,

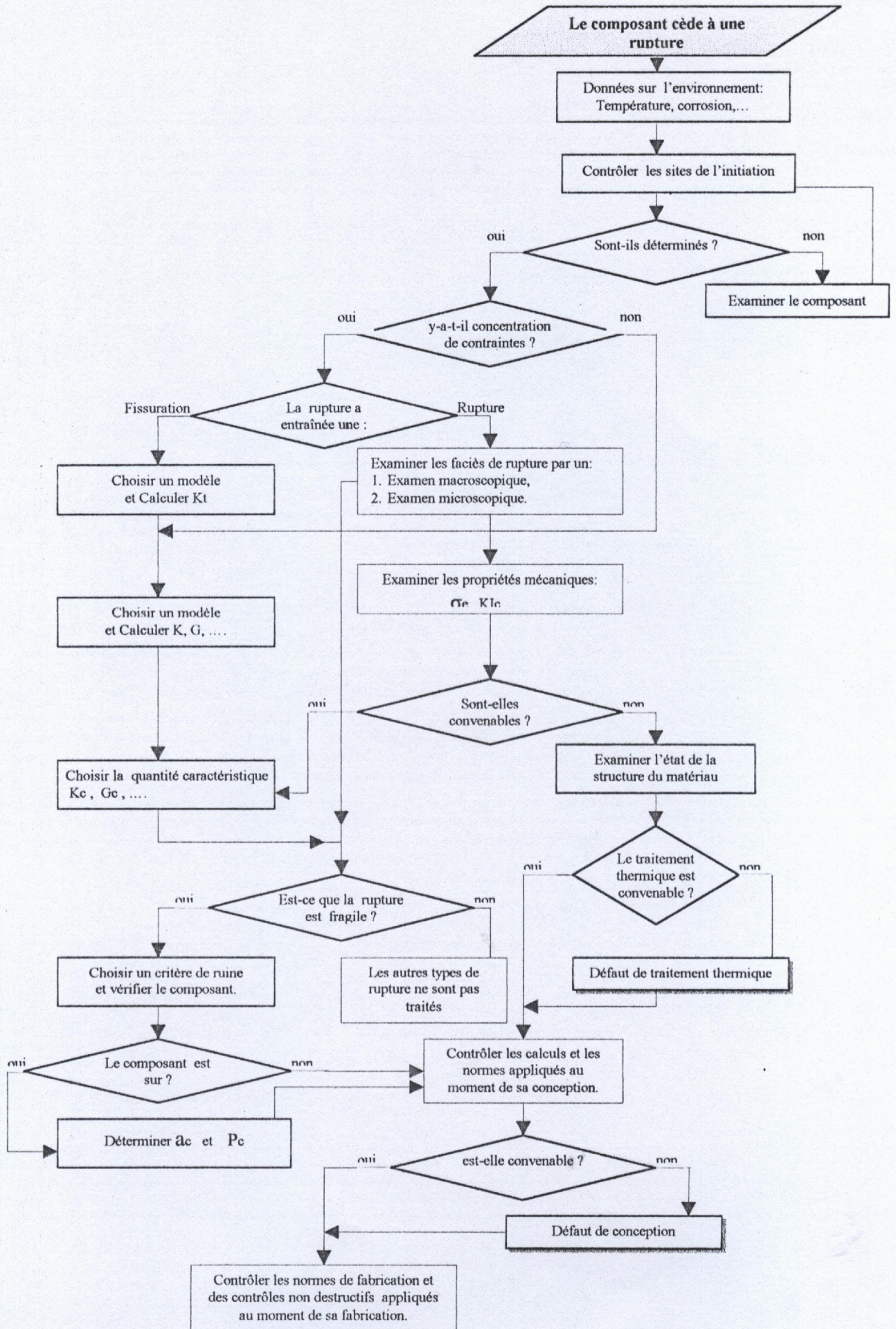
- Le soudeur à ceux de la soudure, et
- L'ingénieur à ceux liés à la conception même de la structure.

Dans cette étude nous avons proposé l'organigramme d'expertise (figure 3.2) qui indique quelques majeures investigations.

3.7. Le rapport d'analyse

Il faut que le rapport d'analyse des ruptures soit écrit clairement, brièvement et logiquement. Par expérience le rapport est divisé en sections principales comme suit :

1. Description du composant fissuré,
2. Les conditions de service au moment de la rupture,
3. Histoire du service précédent,
4. Histoire de fabrication et conception du composant,
5. Etude mécanique et métallurgique de rupture,
6. Evaluation métallurgique de la qualité,
7. Sommaire des mécanismes qui ont causé la rupture,
8. Recommandations pour la prévention de ruptures similaires ou pour une correction sur les composants similaires en service.



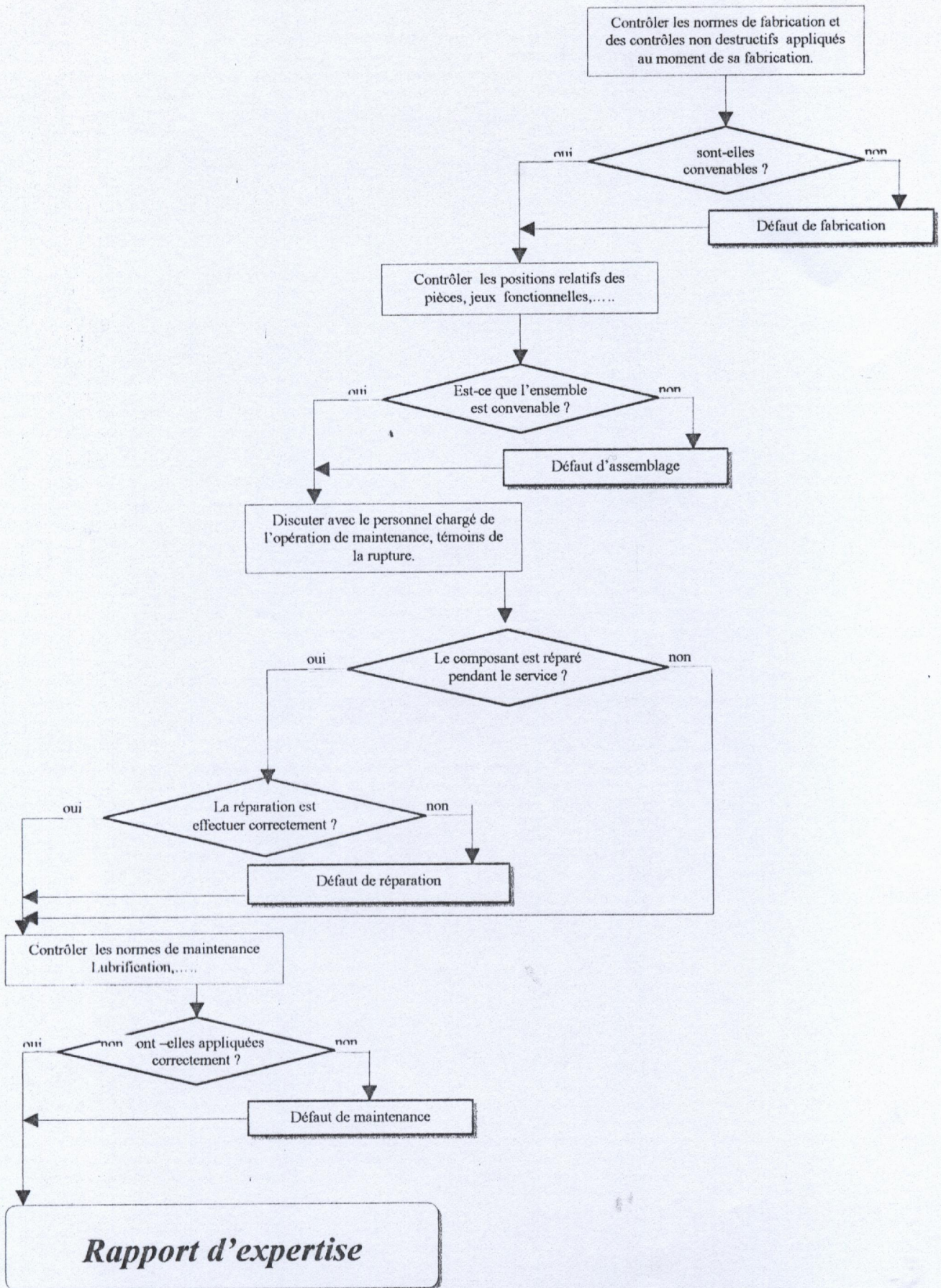


figure 3.2 Organigramme d'expertise

Chapitre 4

Déroulement du système « Struct-Expert »

4.1. Introduction

La vie d'un système expert peut passer par plusieurs phases :

a. La phase initiale

C'est le développement d'un petit système opérationnel qui est en quelque sorte un extrait, un morceau choisi du future système expert. C'est autour de ce petit système opérationnel que l'on construira le système expert opérationnel.

b. La phase d'extension

A partir du petit système opérationnel original, on ajoute des connaissances et des fonctionnalités pour avoir un système expert de plus en plus puissant.

c. La phase de restructuration

A cause de l'évolution technologique ou de limitations du système expert trop contraignantes, il peut être nécessaire de transformer radicalement le système expert initial. C'est un peu la mort du système expert, mais suivi d'une réincarnation.

Chaque phase demande des compétences pointues dans le domaine des systèmes experts.[20]

4.2. Déroulement du projet

La phase initiale du projet peut se décomposer très classiquement en :

- Analyse préalable,

- Conception,
- Développement.

A l'issue de cette phase nous aurons construit un petit système opérationnel.

4.2.1. Analyse préalable

L'analyse préalable a pour but de fixer les règles du jeu. Il faut, pendant cette phase :

4.2.1.1. Fixer le cadre de l'étude et les objectifs que devra atteindre ce système

Le système

IL permettra de diagnostiquer les ruptures des pièces ou structures mécaniques. Il aidera à élaborer une proposition de (solutions pour calculer les facteurs d'intensité de contrainte K , facteur théorique de concentration de contrainte K_t , critères de ruine,...) et adopter une décision d'examen pour éviter le renouvellement de ce type de rupture ou de déterminer si la structure est encore capable de remplir sa fonction et si d'autres ruptures partielles sont ou non encore à craindre. Il servira à élargir la compétence d'un utilisateur non spécialiste, à l'aider à résoudre un problème auquel il est rarement confronté. Il s'agit donc d'un système d'aide à la décision. Il est cependant destiné à être utilisé par une personne ayant l'habitude d'analyser les ruptures.

Les objectifs

1. Rendre plus disponibles les ingénieurs, pour qu'ils puissent consacrer plus de temps aux cas réellement épineux.
2. Accélérer la séquence d'analyse d'une rupture.
3. Acquérir une technologie système expert.

4.2.1.2. Choisir un domaine d'application

Pour obtenir un petit système opérationnel, il faut limiter le champ de l'étude. Dans cette recherche le choix s'est porté sur la rupture fragile. Ce choix permettra par la suite d'étendre facilement le système aux autres types de rupture (ductile, par fatigue,...).

4.2.2. Conception

Par le terme conception, on entend deux choses :

1. Conception d'un système « expert vis à vis d'un domaine d'application ». c'est la phase de modélisation du système.
2. Conception d'un système destiné à être implanté dans une organisation pour y effectuer une tâche précise. C'est la phase d'analyse fonctionnelle.

Cette dualité implique la réalisation simultanée de deux études de conception.

4.2.2.1. Modélisation du système

Il s'agit, dans cette phase, de comprendre les problèmes du domaine d'application choisi, de modéliser le domaine et les méthodes de résolution du problème en s'inspirant du travail de l'expert humain.

Cette étape se décompose en deux parties :

4.2.2.1.1. Acquisition des connaissances

C'est le passage de la connaissance de l'expert au cognitif. La connaissance se trouve partagée entre plusieurs sources.

1. Hand books (ou documents spécialisés) des solutions.
2. Hand books d'analyse des ruptures.
3. Entretien avec l'expert.

Les hand books des solutions analytiques fournissent une liste appréciable de valeurs K_I , K_{II} , K_{III} , K_t pour un nombre de configurations et de chargements, ces valeurs permettent d'appréhender la plus part des situations concrètes, moyennant certaines hypothèses simplificatrices et quelques corrections tenant compte des écarts entre les situations réelles et celles pour lesquelles les solutions sont disponibles.

Pour le calcul du facteur théorique de concentration de contraintes K_t , on recense les critères qui caractérisent les solutions. Une solution est définie par :

Type de solide : Arbre (plein, creux), Plaque,
Type d'entaille : Trou, Entaille (quart de cercle, semi-circulaire, semi-elliptique),
Type de sollicitation : Traction, Flexion, Torsion ou combinaison.

Ces informations ont été complétées de façon ordonnée sous forme de tableau A.1 voir Annexe A.

Pour le calcul des facteurs d'intensité de contrainte K_I , K_{II} , K_{III} , on recense les critères qui caractérisent les solutions. Une solution est définie par :

Type de solide : Arbre (plein, creux),
Plaque (Finie, Semi-infinie, Infinie),
Type d'entaille : Trou, Entaille (quart de cercle, semi-circulaire, semi-elliptique),
Type de fissure : Traversante centrale,
Superficielle traversante,
Superficielle semi-elliptique,
Interne,
Mode de rupture : (Mode I, Mode II, Mode III, Mode mixte).

Ces informations ont été complétées de façon ordonnée sous forme de tableau A.2 voir Annexe A.

Pour choisir un critère de ruine, on recense les critères qui caractérisent un critère de sécurité (ou de ruine). Un critère est défini par :

Mode de rupture : (Mode I , Mode II, Mode III, Mode mixte),
Etat de contraintes : (contraintes planes , déformations planes),
Propriétés du matériau : (σ_e , K_{Ic} , J_c , δ_c , G_c , S_c),

Ces informations ont été complétées de façon ordonnée sous forme de tableau A.3 voir Annexe A.

Pour choisir une corrélation ténacité K_{Ic} et Résilience K_v , on recense les critères qui caractérisent une corrélation, une corrélation est définie par :

Type du matériau : Acier,
Domaine d'application : Palier supérieur ductile de la courbe transition,
Partie basse de la courbe de transition,
Conditions de validité R_e : haute résistance, moyenne résistance,
Utilisation : acier de construction, acier d'appareils à pression.

Ces informations ont été complétées de façon ordonnée sous forme de tableau A.4 voir Annexe A.

Les hand books ne contiennent pas toute la connaissance. Ils décrivent toutes les conditions (par exemple : configuration ,chargement, environnement, les propriétés des matériaux, les méthodes appropriées au calcul des structures,...) concernant différents types de situations. Seuls les experts savent l'utiliser de façon optimale. Ce savoir faire est partie intégrante du système. Donc il faut organiser les entretiens avec des experts.

4.2.2.1.2. Analyse de la connaissance

Lorsque les connaissances ont été extraites (hand books ,expert), il faut les mettre dans un formalisme aisément compréhensible par les experts, pour les valider.

Le formalisme qui paraît à la fois le plus complet et le plus simple à comprendre par un non-informaticien est celui des arbres de décision. Il s'agit d'une arborescence classique, où chaque nœud représente une question, chaque branche représente une

réponse possible à une question, et où chaque feuille représente une conclusion finale d'un raisonnement.

Exemple : pour une solution de type PF1, les conditions sont :

- type de solide = plaque infinie,
- type de fissure = traversante centrale,
- type de sollicitation = Mode I ou Mode II ou Mode III ou Mode Mixte.

On déduit de ces informations un arbre de décision figure 4.1. L'ensemble de solutions est représenté sur la figure 4.2.

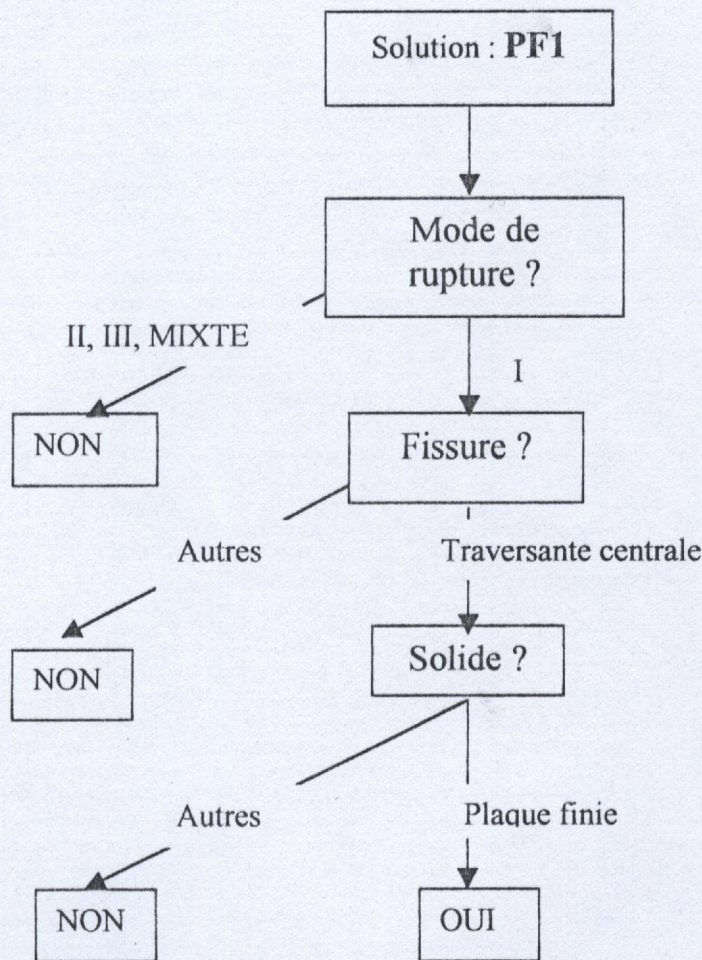


Figure 4.1 Arbre de décision du solution PF1

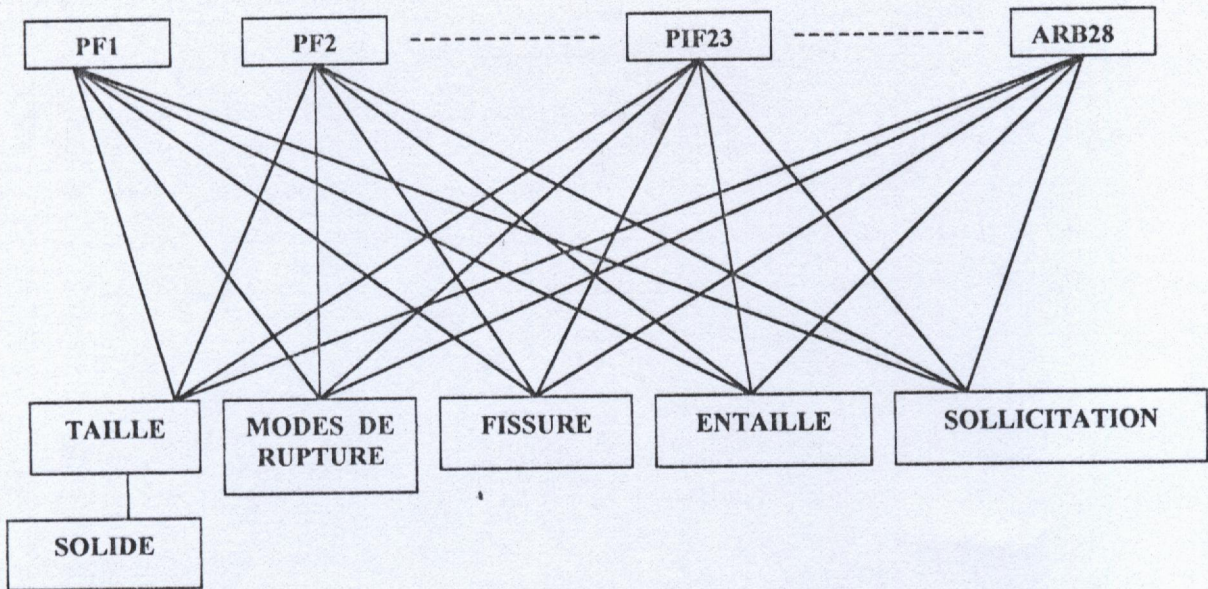


Figure 4.2 Graphe de dépendance, pour les facteurs d'intensité de contrainte.

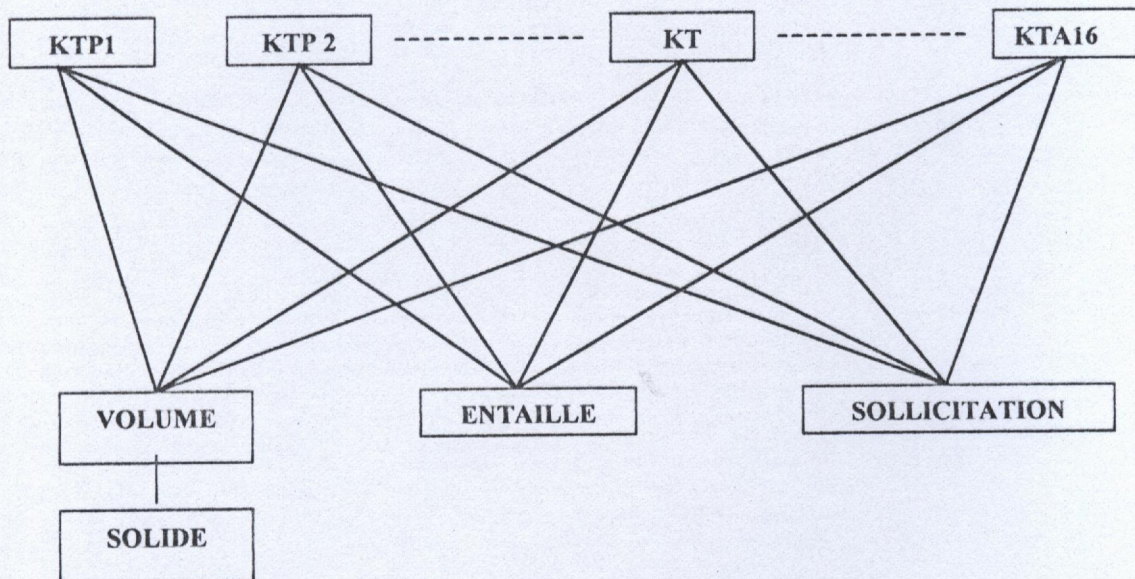


Figure 4.3 Graphe de dépendance, pour le facteur théorique de concentration de contrainte K_t .

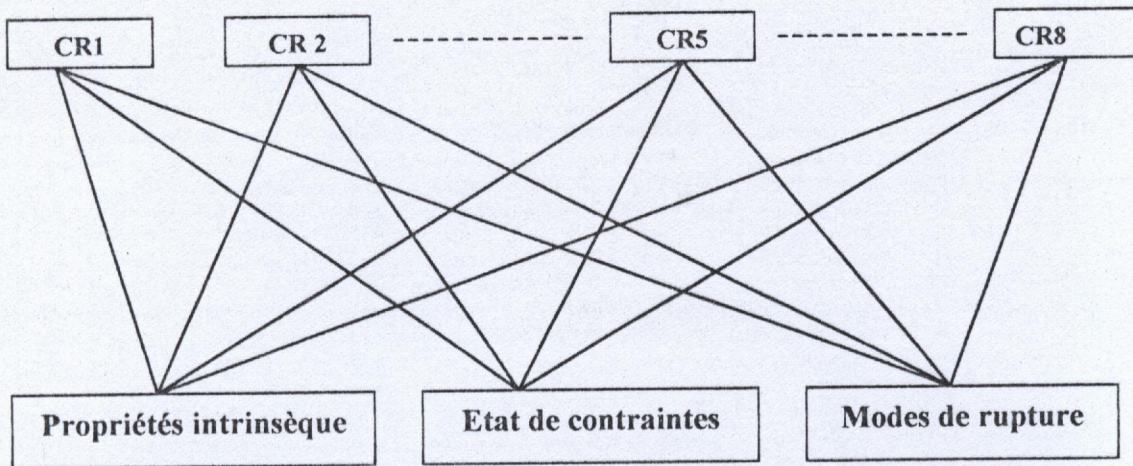


Figure 4.4 Graphe de dépendance, pour le choix d'un critère de sécurité.

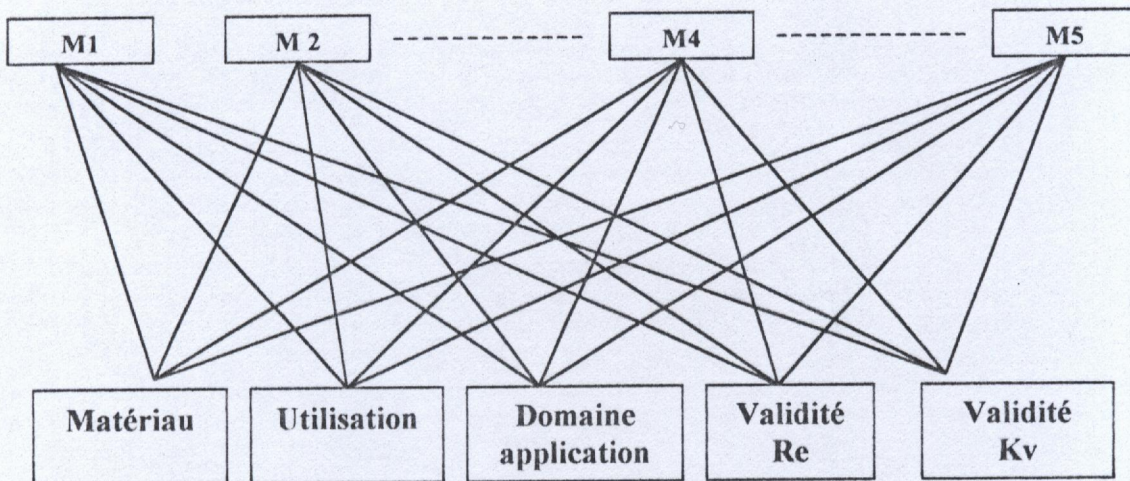


Figure 4.5 Graphe de dépendance pour le choix d'une corrélation ténacité / résilience.

Le cogniticien travaille sur les connaissances transmises par l'expert, les organise de façon à structurer le problème pour qu'il soit transplantable sur la machine.

Ces deux étapes forment un processus itératif. L'expert qui valide avant de passer à une autre notion.

Lorsque tous les critères ont été définis et validés par l'expert, on peut passer à la phase de codage de la base de connaissances.

4.2.2.2. Analyse fonctionnelle[20]

En même temps que le cognicien acquiert la connaissance du problème, il doit réfléchir sur l'aspect « d'application » de son système. Chaque réflexion de ce type doit aboutir à des spécifications fonctionnelles. Elles synthétisent tous les besoins et les contraintes que devra intégrer le système. Il faut reproduire au mieux le dialogue entre un utilisateur et un expert.

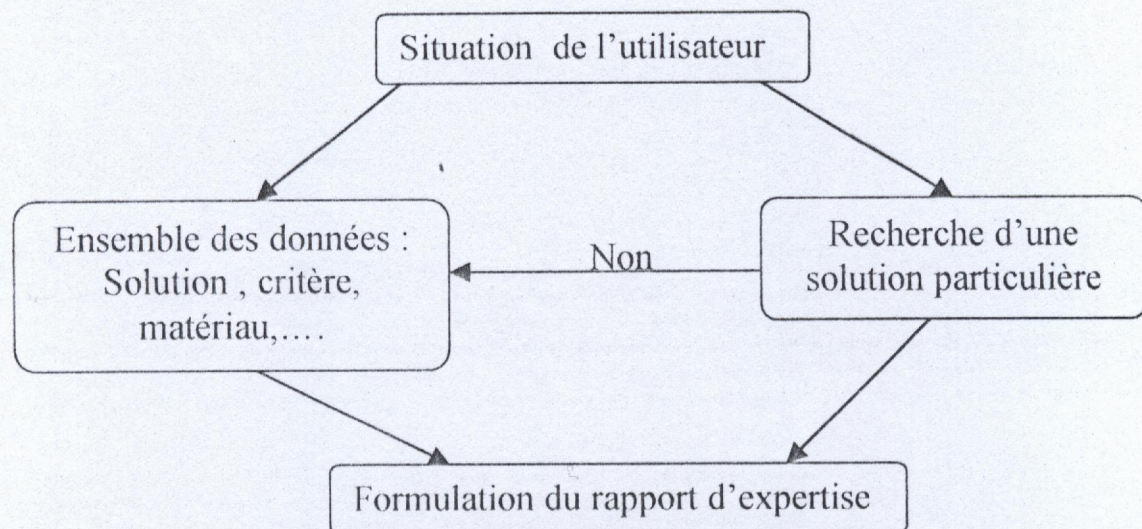


Figure 4.6 déroulement d'une session

L'utilisateur peut avoir une question sur la situation, ou chercher à savoir quelles sont les situations les plus intéressantes.

Le rapport d'expertise consiste à proposer des solutions pour prévenir la rupture dans les composants similaires.

Pour cela, le système sera composé :

- Des modules d'expertise. Ce sont, en fait, des règles de production, et un moteur d'inférences qui permet de faire fonctionner le système.
- Des modules externes. Ils contiennent les différentes procédures de calcul qui peuvent être utilisées au cours d'une expertise. Ces procédures sont :

1. La procédure de calcul des quantités caractéristiques (K, G, S, ...).
2. La procédure de vérification de critère de ruine.

3. La procédure de calcul du facteur théorique de concentration de contrainte.
4. une base donnée pour le choix d'un matériau.

4.2.3. Développement [20]

Il s'agit dans cette phase de passer de la représentation conceptuelle précédente à un code compréhensible par la machine. Cette phase va être liée aux caractéristiques de l'outil de développement. Il faudra choisir cet outil, le maîtriser et représenter le modèle dans le formalisme de l'outil. Chaque fois qu'un élément du problème, qui a été isolé et défini dans la phase précédente, peut être implanté sur la machine, il doit être sans attendre les autres sous-problèmes.

Si, dans la phase de conception, on a réussi à isoler un certain nombre de sous-problèmes et à les développer séparément, alors la phase d'intégration sera importante mais facile. Si, au contraire, le problème ne peut se décomposer facilement alors la phase d'implantation aura phagocyté la phase d'intégration et la mise au point risque d'être difficile.

A chaque étape de l'intégration s'effectuent des validations partielles des modules. On construit un système complexe avec des éléments de complexité moindre et validés préalablement.

4.2.3.1. Codage de la base de connaissances

La traduction des arbres de décision en règles de production se fait très facilement. Dans notre cas, il suffit de répertorier les critères de sélection la partie prémisses (ou conditions), et déplacer la solution correspondant dans la partie conclusion.

Par exemple : l'arbre de décision de la figure 4.1 se code en :

- SI solide = plaque,
- ET taille = finie,
- ET la fissure = traversante centrale,
- ET mode de rupture = mode I,

OU mode de rupture = Mode II
 OU mode de rupture = Mode III
 OU mode de rupture = Mode Mixte .
ALORS la solution = PF1.



La règle est traduit en un code interne de type CLIPS sous la forme :

```
(defrule sol-pf1
  (and
    (solide plaque)
    (taille finie)
    (fissure traversante centrale)
    (or(mode 1) (mode 2) (mode 3) (mode mixte)))
  =>
  (printout t          "          PF1.PLAQUE FINIE          " crlf))
```

Après codage de l'ensemble des solutions présentées dans la figure 4.2.a notre base de connaissances se présente comme cela.

R1 : la solution PF1.

SI solide = plaque,
ET taille = finie,
ET fissure = traversante centrale,
ET mode de rupture = mode I pur,
OU mode de rupture = mode II pur ,
OU mode de rupture = mode III pur ,
OU mode de rupture = mode mixte,
ET chargement = répartie.

ALORS la solution = PF1.

R2 : la solution PF2.

SI solide = plaque,
ET taille = finie,
ET fissure = traversante centrale,
ET mode de rupture = mode I pur,

OU mode de rupture = mode II pur ,
OU mode de rupture = mode III pur ,
OU mode de rupture = mode mixte,
ET chargement = concentré.
ALORS la solution = PF2.

R3 : pour la solution PF3.
.....

R11 : la solution PF11.

SI le solide = plaque avec trou,
ET l'espace = finie,
ET la fissure = superficielle,
ET le mode de rupture = mode I pur,
ALORS la solution = PF11.
.....

R32 : pour la solution ARB27.
.....

R33: la solution ARB28.

SI solide = arbre plein,
ET fissure = superficielle traversante,
ET mode de rupture = mode I pur,
OU mode de rupture = mode III pur ,
OU mode de rupture = mode mixte .
ALORS la solution = ARB28.

La base de connaissances comporte des règles avec plusieurs rôles différents. On y trouve :

- les règles de détermination de :
 1. solution pour calculer K_I , K_{II} , K_{III} ,
 2. solution pour calculer K_t ,
 3. critère de ruine,

4. corrélation entre K_{Ic} et KV .

- les règles de contrôle.

Les règles de détermination sont celles du type exposé dans l'exemple précédent. Elles permettent de trouver la solution et le critère correspond à la situation.

Les règles de contrôle permettent de démarrer une session ou de la terminer, de lancer des procédures de calcul (calcul K , ...).

4.3. Déroulement du raisonnement

L'utilisation des règles de production se fait du point de vue de l'auteur du système expert par la mise en œuvre de ce qu'on appelle un mécanisme de chaînage. Ce mécanisme a pour rôle d'activer à leur tour les règles utiles pour faire avancer le raisonnement vers sa conclusion.

Dans notre cas, le moteur fonctionne en chaînage avant, à chaque cycle, le système considère les règles dont les conditions sont remplies, ajoute les conclusions de ces règles (lesquelles sont démontrées) aux faits connus.

Nous voyons, à partir de notre système, qu'il y a une interaction entre le système et son utilisateur puisque ce dernier doit répondre à des questions. Donc il faut que l'interface soit conviviale pour pouvoir se servir efficacement de ce système.

Pour cela, il peut assigner à chaque fait le libellé de question que le système affichera lorsqu'il aura besoin de renseignements.

Par exemple :

Question (solide) = « quel est le type du solide ? ».

De plus, on a indiqué au système les valeurs autorisées pour le paramètre solide. Cela évitera à l'utilisateur de répondre une valeur qui ne sera pas comprise par le système (exemple : valeur (solide) = (Plaque, Arbre)

Par exemple, sur l'écran s'affichera

> Quel est le type du solide ?

1- Plaque,

2- Arbre.

Choisit 1 – 2 ->

4.4. Extensions possibles pour l'application

Après le premier codage de la base de connaissances on pense déjà aux extensions qu'il pourra ajouter.

▪ Si on veut ajouter une nouvelle solution, par exemple un nouveau type du solide, consiste à rajouter une nouvelle règle. Avant de coder et d'intégrer cette nouvelle règle à la base de connaissance, on devra faire attention aux caractéristique de la nouvelle solution.

Si elle est complètement originale c'est à dire s'il n'y a qu'une seule solution admissible pour un ensemble de critères donné, alors on pourra coder et ajouter directement la règle.

Si, au contraire pour un ensemble de critères donné, il existe plusieurs solutions possibles, on devra dire au moteur de rechercher toutes les solutions possibles et non pas de s'arrêter dès qu'une solution convient. Sinon la solution située à la fin de la base de règles ne sera jamais obtenue.

Exemple

Pour les critères (plaque finie, traversante, I, II, III ,mixte) , la solution **PF1** apparaît dans la liste des solutions, mais cette solution peut être pas favorable pour la solution actuelle. Il faut donc autoriser une solution de rechange. La règle sera :

R4 : pour la solution PF4.

SI solide = plaque,

ET taille = finie,

ET fissure = traversante centrale,

ET mode de rupture = mode I pur,

OU mode de rupture = mode II pur ,

OU mode de rupture = mode III pur ,

OU mode de rupture = mode mixte,
ET chargement = répartie.
ALORS la solution = PF4.
ET afficher « solution de remplacement ».

Le moteur proposera lorsque le cas se présentera les deux solutions (PF1 , PF4), avec un commentaire associé à la solution de remplacement.

- Si on veut ajouter un nouveau critère, on devra rechercher dans la base les règles concernées par ce nouveau critère et y ajouter une clause définissant les conditions d'emploi du critère ou créer de nouvelles règles.

Exemple

Le critère type de chargement intervient dans le choix de la solution

R1 : pour la solution PF1.

SI le solide = plaque,
ET l'espace = finie,
ET la fissure = traversante,
ET le mode de rupture = mode I pur,
OU le mode de rupture = mode II pur ,
OU le mode de rupture = mode III pur ,
OU le mode de rupture = mode mixte ,
ET le chargement = uniformément répartie.

ALORS la solution = PF1.

Après quelques changements, la base perdra son caractère très symétrique, mais elle représentera mieux la réalité.

- Si on veut ajouter un groupe de règles qui permettrait de mieux définir le critère « mode de rupture ». dans ce cas, on définit un fait « mode de rupture ». qui peut prendre les valeurs (traction, flexion, torsion, combinaison) et qui aidera à définir la notion mode de rupture.

Exemple

SI le chargement = traction,

OU le chargement = flexion,

ET « ouverture de la fissure ».

ALORS le mode de rupture = mode I.

Le moteur d'inférence évalue les règles dans un certain ordre. Il faut donc placer les règles dans l'ordre déterminé par la logique de fonctionnement du moteur.

Chapitre 5

Rapport d'Expertise

5.1. Expertise d'une matrice [8]

5.1.1. Description du composant

La matrice de la figure 5.1 est conçue pour faire des alliages supraconducteurs, les alliages sont obtenus en mélangeant les constituants sous forme de poudres métalliques et en comprimant dans la matrice sous une pression aussi élevée que possible. Cette méthode donne un lingotin de métal qui est alors fritté (porté à haute température pour provoquer l'adhésion entre elles des particules), et tiré sous forme d'un fil fin.

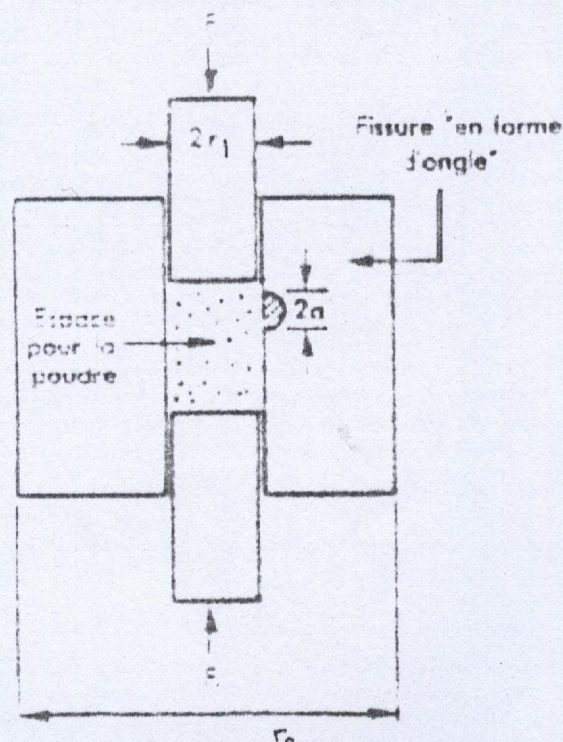


Figure 5.1 Vue schématique d'une matrice pour compression de poudre en fonctionnement

Plus la pression dans la matrice est élevée, plus le lingotin est dense et meilleur est le produit final.

Pour augmenter la pression, il a été fabriqué une nouvelle matrice d'un acier spécial qui pouvait être traité thermiquement (chauffé puis trempé à l'huile) pour donner une limite élastique très élevée.

La matrice se rompt au premier usage et ce, à la moitié de la charge de sécurité prévue à la conception.

5.1.2. Examen de rupture[8]

examen de la surface de rupture montre une fissure en forme « ongle de pouce », s'initiant à la surface intérieure.

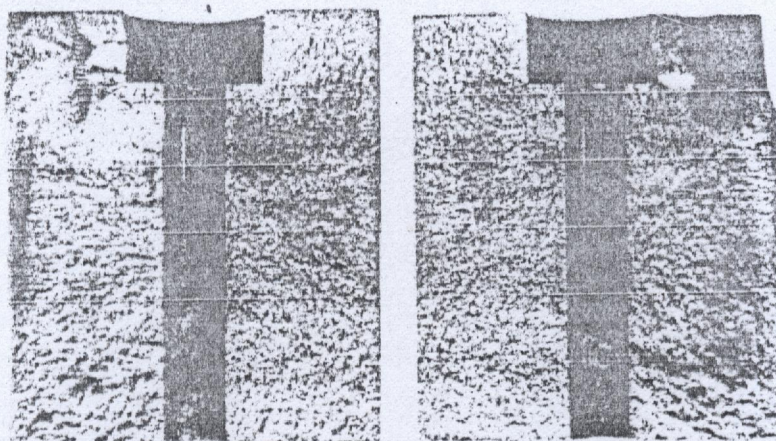


Figure 5.2 Une matrice pour compression de poudres après rupture brutale

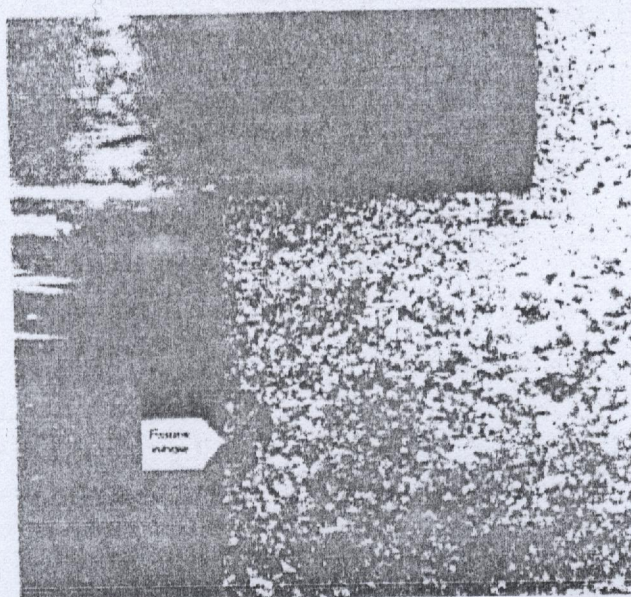


Figure 5.3 Agrandissement de la figure 5.2 montrant la fissure en ongle de pouce à partir de laquelle s'est initiée la rupture rapide

5.1.3. Propriétés du matériau [8]

Une série d'essais de dureté a montré que la dureté moyenne du matériau dont la matrice est fait vaut :

$$H = 612 \text{ Kg/mm}^2 = 9.81.612 \text{ MPa}$$

Et comme $\sigma_e = H/3$ on obtient $\sigma_e = 2000 \text{ MPa}$

Un échantillon du même acier (au chrome, moyenne teneur en carbone) ayant subit un traitement thermique pour obtenir cette dureté à une ténacité K_c de :

$$K_c = 22 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}.$$

5.1.4. Mécanique de la mise en charge de la matrice [8]

La contrainte de traction , qui tend à ouvrir la fissure, dans un récipient cylindrique à paroi épaisse sous pression est donnée par :

$$\sigma_t = p \cdot \frac{\left(\frac{1}{r^2} + \frac{1}{r_0^2} \right)}{\left(\frac{1}{r_i^2} - \frac{1}{r_0^2} \right)} \quad (5.1)$$

$$\text{Pour } r = r_i \quad \sigma_t = 1,06 P \quad (5.2)$$

Les dimensions de la matrice sont visibles sur la figure 5.1 les dimensions importantes sont : $r_i = 6.4 \text{ mm}$, $r_0 = 38 \text{ mm}$, $a = 1.2 \text{ mm}$.

Si l'on s'impose un facteur de sécurité de 3, la matrice peut être utilisée sans risque de plastification sous une pression de :

$$\sigma_t = 3.1,06.P \Rightarrow P = 630 \text{ MPa} \quad \text{et c'était la pression autorisée.}$$

La matrice s'est rompue à la moitié de cette pression par rupture rapide à partir de la fissure en forme d'ongle de taille $a = 1,2 \text{ mm}$.

La pression dans la matrice à laquelle une fissure de taille : $a = 1,2 \text{ mm}$ devient instable , déterminée par le programme, $P = 450 \text{ MPa}$,

5.1.5. Session d'utilisation du *STRUCT-EXPERT*

CLIPS > (Reset)

CLIPS > (Run)

Système Expert Pour Le Diagnostic Des Problèmes

De Rupture Fragile

Pour exécuter , simplement Load, reset et run.

CLIPS > Est-ce que Le composant cède à une rupture (Oui/Non)? O

CLIPS > Quel est la température du service approximative au temps de rupture. T[C°] = ?

CLIPS > Est-ce que le composant qui a un défaut a été dans un milieu agressif(Oui/Non)?N

CONTROLLER LES SITES DE L'INITIATION

CLIPS > Est-ce que les sites sont déterminés (Oui/Non)?O

CLIPS > Est-ce que la rupture est associée à une concentration de contraintes(Oui/Non)?N

On va choisir un modèle similaire au composant.

CLIPS > Est-ce que le composant qui a un défaut est:

- 1) Une plaque
- 2) Un arbre
- 3) Quitter le programme

Choisit 1 - 3 -> 1

CLIPS > Est-ce que la rupture a entraîné une :

- 1- Fissuration.
- 2- Rupture.

Choisit 1 - 2 -> 1

CLIPS > Est-ce que la plaque par rapport la fissure est :

- 1) Finie
- 2) Semi-Infinie
- 3) Infinie
- 4) Quitter le programme

Choisit 1 - 4 -> 2

CLIPS > Est-ce que la fissure est :

- 1) Interne
- 2) Traversante centrale
- 3) Traversante Superficielle
- 4) Superficielle semi-elliptique
- 5) Quitter le programme

Choisit 1 - 5 -> 4

CLIPS > Est-ce que le chargement est:

- 1) Statique
- 2) Cyclique
- 3) Intermittent

Choisit 1 - 3 -> 1

CLIPS > Est-ce que le chargement est:

- 1) Répartie
- 2) Concentré
- 3) Quitter le programme

Choisit 1 - 3 -> 1

CLIPS > Est-ce que les contraintes sont orientées selon le mode de rupture:

- 1) I
- 2) II
- 3) III
- 4) Mixte
- 5) Quitter le programme

Choisit 1 - 5 -> 1

ON RECOMMANDE LE(S) MODELES(S) SUIVANT(S):

- PSIF22

On va choisir un critère de sécurité pour vérifier la structure

CLIPS > Quel est l'état de contraintes :

- 1) Déformations planes
- 2) Contraintes planes
- 3) Quitter le programme

Choisit 1 - 3 -> 1

CLIPS > Quel sont les propriétés du matériau disponibles:

- 1) Re et/ou KIc
- 2) GIc
- 3) dc
- 4) Jc
- 5) Sc
- 6) KV
- 7) Quitter le programme

Choisit 1 - 7 -> 1

ON RECOMMANDE LE(S) CRITERE(S) SUIVANT(S):

CR1: Facteur d'intensité de contrainte K

CLIPS > Est-ce que le composant qui a un défaut est sûr (Oui/Non)?N

CONTROLLER LES CALCULS ET LES NORMES APPLIQUES

AU MOMENT DE SA CONCEPTION

CLIPS >Est-ce que la conception du composant est convenable (Oui/Non)?O

CONTROLLER LES NORMES DE FABRICATIONS ET LES CONTROLES
NON DESTRUCTIFS APPLIQUES AU MOMENT DE SA FABRICATION

CLIPS> Est-ce que la fabrication du composant est convenable(Oui/Non)? O

CLIPS > Est-ce que le composant qui a un défaut a été fonctionné
correctement(Oui/Non)? O

CONTROLLER LES POSITIONS RELATIFS DES PIECES, JEUX FONCTIONNELS...

CLIPS > Est-ce que l'assemblage est convenable (Oui/Non)? O

DISCUTER AVEC LE PERSONNEL CHARGE DE L'OPERATION DE
MAINTENANCE, TEMOINS DE LA RUPTURE.

CLIPS > Est-ce que le composant est réparé pendant le service(Oui/Non)? N

CONTROLLER LES NORMES DE MAINTENANCE:lubrification....

CLIPS > Est-ce que le composant a été maintenu (ou lubrifier)
correctement(Oui/Non)? O

***** RECOMMANDATIONS *****

POUR PREVENIR LA RUPTURE DES COMPOSANTS SIMILAIRES
DANS LE SERVICE MAINTENANT IL FAUT :

- MODIFIER LE MATERIAU
- AMELIORER LES PROPRIETES MECANIQUES DU MATERIAU

5.1.6. Synthèse et conclusion [8]

- Le traitement de l'acier était inadapté, ce qui a eu pour conséquence un K_c très faible, et l'acier contient d'autre part des défauts anormalement grand (probablement dus à une fissuration par l'hydrogène),
- La rupture à était beaucoup plus faible que la charge de plastification globale.

La solution est : soit de soumettre l'acier un traitement thermique susceptible d'élever K_c et ce aux dépens de σ_e , ou bien (c'est la solution préférable) de faire la matrice dans un acier pour enceinte sous pression.

5.1.7. Rapport d'expertise

Le rapport d'expertise doit être écrit clairement et brièvement. Dans cette étude nous avons proposé le modèle indiqué ci-dessous. (tableau 5.1)

N°.....

Date.....

DIAGNOSTIC DES RUPTURES

Description du composant

La matrice est conçue pour faire des alliages supraconducteurs, les alliages sont obtenus en mélangeant les constituants sous forme de poudres métalliques et en comprimant dans la matrice sous une pression aussi élevée que possible.

Lieu d'utilisation

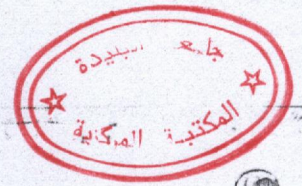
Désignation	Indéterminé	Déterminé		Observations
		BON	MAUVAIS	
• Etat d'environnement	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
• Etat des propriétés mécaniques (matériau)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
• Etat des traitements thermiques	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
• Etat de conception	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
• Etat de fabrication	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
• Etat de fonctionnement	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
• Etat d' assemblage	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
• Etat de réparation	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
• Etat de maintenance	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Interventions recommandées

- soumettre l'acier un traitement thermique susceptible d'élever K_c et ce aux dépens de σ_e .
- Changer le matériau

Tableau 5.1 Rapport d'expertise

5.2. Expertise d'une butée de fin de course



5.2.1. Description du composant

La butée est une pièce sous forme d'un épaulement destiné à limiter le mouvement de la table longitudinale d'une fraiseuse de type FN10 (HMT LIMITED PINJOR INDE). La butée est fixée sur le support de la table longitudinale avec deux vis M8x1.25. L'axe A (voir Figure 5.4) exerce un effort P sur la butée, cette effort peut être considéré identique à la force de coupe de la fraise et qui pratiquement [32] difficile de déterminer leur intensité. La rupture se produit lorsque la butée reste céder à l'action de l'effort P qui augmente progressivement.

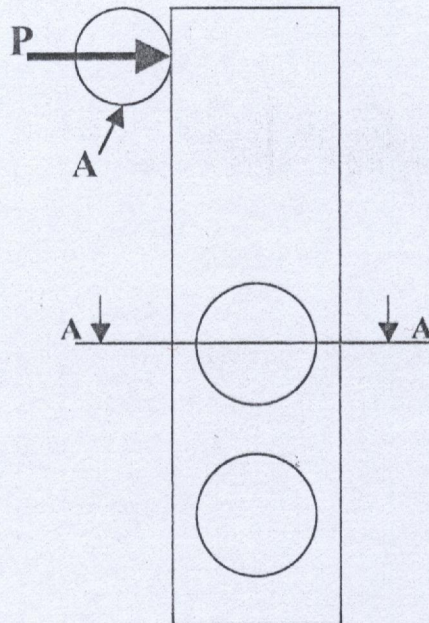


Figure 5.4 Position relative axe A et butée

5.2.2. Examen de rupture

Deux butées ont été examiné (voir tableau 5.2).

Pièce 01	Traitée thermiquement	Zone de rupture A-A toute la section
Pièce 02	Non traitée thermiquement	Zone de rupture A-A (½) section.

Tableau 5.2 Les butées examinées

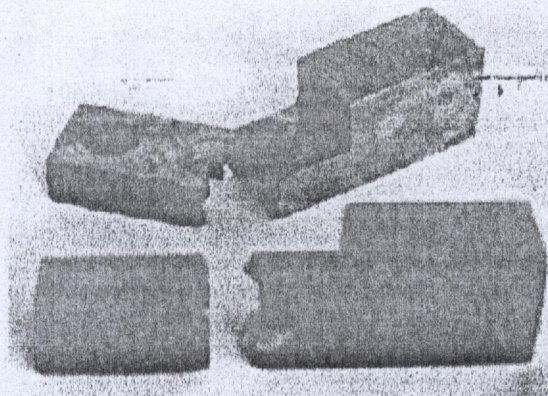


Figure 5.5 Les deux butées

5.2.3. Propriétés du matériau

L'analyse spectrochimique de deux butées réalisé sur un spectromètre type DV4 a donné la composition chimique suivante voir tableau 5.3

	C	Si	Mn	P	S	Cr
Pièce traitée	0.37%	0.46%	0.58%	/	/	0.10%
Pièce non traitée	0.36%	0.21%	0.47%	/	/	0.13%

Tableau 5.3 La composition chimique du matériau XC38

La dureté HB du matériau est :

	HB
Pièce traitée	172
Pièce non traitée	182

Tableau 5.4 La dureté HB du matériau XC38

5.2.4. Examen macroscopique

L'examen macroscopique des butées permet de déterminer les faciès caractéristiques de rupture, ainsi que le mécanisme de rupture. Les résultats sont présentées dans le tableau 5.5.

Pièce	Faciès caractéristique de rupture	Mécanisme de rupture
Butée traitée thermiquement	Zone plate	Rupture fragile
Butée non-traitée thermiquement	Zone inclinée 45°	Rupture ductile

Tableau 5.5 Mécanismes de rupture

5.2.5. Etude mécanique

De point de vue de conception [18] la butée présente une forte concentration de contrainte. Cela exige de modifier leur géométrie et leur dimensions.

Pour modifier les dimensions de la butée deux conditions sont imposées :

1. Le rayon des trous r reste fixe,
2. La partie supérieure conserve sa géométrie pour éviter le changement de la course de la table.

5.2.6. Synthèse et conclusion

L'examen macroscopique montre que, pour la butée traitée thermiquement, le mécanisme de rupture est fragile et que le facteur propices à ce type de rupture c'est l'effet d'entaille qui crée des concentrations de contraintes locales. Ce qui exige de diminuer cette concentration en modifiant la géométrie de la partie inférieure de la pièce comme montre la figure 5.6.

Quelques résultats de K_t , sont obtenus par l'utilisation de notre programme, sont présentés dans le tableau ci-dessous. Pour le rayon de trou $r = 7.25$ mm.

La butée traitée thermiquement	Pour la solution indiquée par la figure 5.6		
	Butée 01	Butée 02	Butée 03
$a = 9.35$ et $b = 8.85$ (mm) $K_t = 1.8723$	$a = b = 15$ (mm) $K_t = 1.02416$	$a = 20$ et $b = 15$ (mm) $K_t = 0.95166$	$a = 20$ et $b = 20$ (mm) $K_t = 1.0181$

Tableau 5.6 Facteur de concentration de contraintes K_t

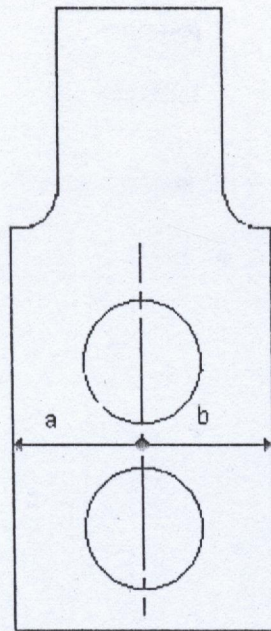


Figure 5.6 modification géométrique

Conclusion

Le présent système expert a été adapté au diagnostic des ruptures des pièces mécaniques. Cette étude est limitée aux défaillances liées à la rupture fragile en tenant compte des facteurs mécaniques.

Le système comporte deux parties majeures. La première partie représente le système d'information. Ce système comporte les points suivants:

- Calcul des paramètres caractéristiques (K, G, S, ...),
- Calcul du facteur théorique de concentration de contrainte,
- Les critères de ruine,
- Calcul des paramètres critiques,
- Base de données pour les matériaux.

La deuxième partie représente le système expert. On a utilisé l'outil de développement (CLIPS). La représentation des connaissances est basée sur les règles de production, le moteur d'inférence travaille en chaînage avant.

Malgré la pauvreté des données intégrées dans le système, les résultats de cette étude indiquent l'importance de diagnostiquer les ruptures des pièces mécaniques par les systèmes experts et que la puissance de ces systèmes réside dans la connaissance spécifique au domaine du problème c'est à dire que les systèmes puissants sont ceux qui contiennent le plus de connaissances.

Pour les travaux futurs, nous proposons les points suivants :

- Traiter les facteurs métallurgiques,
- Etendre le système aux autres types de rupture (ductile, par fatigue, ...),
- Effectuer les calcul par des méthodes numériques. En particulier, la méthode des éléments finis,
- Elargir la base de données des matériaux,
- Organiser les entretiens avec les experts dans le domaine de mécanique de la rupture.

Références bibliographiques

- [1] **Naman Recho**, " Rupture par fissuration des structures.", Hermès, Paris, 1995.
- [2] **E.E.Gdoutos**, "Fracture mechanics criteria and applications.", Kluwer academic publishers, 1990.
- [3] **Jack.A.Collins**, " Failure of materials in mechanical design : Analysis, prediction, prevention.", John wiley & Sons, USA, 1993.
- [4] **D. R.J.Owen, A.J.Fawkes**, " Engineering fracture mechanics : numerical methods and applications.", Pineridge press limited, 1983.
- [5] **B.Barthélémy**, " Notions pratiques de mécanique de la rupture.", Eyrolles, 1980.
- [6] **René labbens**, " Introduction à la mécanique de la rupture.", Pluralis , 1980.
- [7] **Pluinage**, " Mécanique elasto-plastique de la rupture : critère d'amorçage. ", Cepadues, 1989.
- [8] **Michael F.ASHBY, David R.H.JONES**, " Matériaux tome1: Propriétés et applications.", Dunod, Paris, 1996.
- [9] **G.Fantozzi**, "Rupture des matériaux .", 1^e et 2^e partie, Institut national des sciences appliquées (I.N.S.A) de lyon (1989).
- [10] **H.A.Richard, M.Kuna**, "Théoretical and experimental study of superimposed fracture modes I,II,and III. ", Engineering fracture méchanics, vol 35 n°06,Pergmon press ,USA, 1990.
- [11] **N.Miyazaki,T.Ikeda ,T.Munakata**, "Stress intensity factor analysis by combination of boundary element and finit element methods. ", Engineering fracture méchanics, vol 36 n°01, Pergmon press ,USA, 1990.

- [12] **H.Guo,N.I.Aziz** , L.C.Schmidt, "Linear elastic crack tip modelling by the displacement discontinuity method. ", Engineering fracture mechanics, vol 36 n°06, Pergmon press ,USA, 1990.
- [13] **Hong Qichao** , Chai Guozhong , "Stress intensity factor of nozzle corner cracks . ", Engineering fracture mechanics, vol 36 n°05, Pergmon press ,USA, 1990.
- [14] **Jiuan Lu, Henr-paul Lieurade**, "Concentration de contraintes . ", Technique d'ingénieur ,Traité génie mécanique , BM5040.
- [15] **Jean-Luc Engerand**, "Mécanique de la rupture. ", Technique d'ingénieur ,Traité Mécanique et Chaleur , B5060 pp1-11.
- [16] **H.Koneczny, J.J Janosh, S.Debiez**, "Définition d'une base de données matériaux pour les constructions soudées lourdes par caractérisation expérimentale de Ténacité / Résilience. ", Revue Française de Mécanique, N°1997-1, Troisième conférence nationale sur l'intégrité des structures ,Cedex , Paris..
- [17] **Qingfen Li, Shenchai Hu, Xinji Pan**, " Effects of crack depth and shape on fracture toughness in a spring steel . ", Engineering fracture mechanics, vol 36 n°01,pp.1-7, Pergmon press ,USA, 1990.
- [18] **J.P.Faurie, P.Monnier, A.Nikulari, R.Sutterlint**, "Guide du dessinateur les concentrations de contraintes.", CETIM, 1996.
- [19] **Gilles Zwingelstein**, " Diagnostic des défaillances théorie et pratique pour les systèmes industriels. ", Hermès, Paris, 1995.
- [20] **R.Briand**, " Méthode de développement de systèmes experts.", Eyrolles, Paris, 1988.
- [21] **Gallouin**, " Transfert de connaissance : systèmes experts techniques et méthodes.", Eyrolles, Paris, 1988.
- [22] **Hervé GALLAIRE**, " Systèmes Experts.", Techniques de l'ingénieur, Traité informatique, H 1990, pp1-11.

[23] **Lavriere**, “ Intelligence artificielle, Tome 2 : Représentation de connaissances.”, Eyrolles, Paris, 1988.

[24] **Aubert (Jean, Pascal)**, “ Pratiquer l’intelligence artificielle.”, Eyrolles, Paris, 1985.

[25] **H.Farreny**, “ Les systèmes experts principes et exemples.”, Cepadues, Toulouse, 1989.

[26] **Joseph.C.Giarratano**, “ The CLIPS user’s guide.”, version 6.10, august 5th 1998.

[27] Third conference on CLIPS proceedings (Electronic version), Lyndon.B. Johson space center, 12-14 September 1994.

[28] The CLIPS reference manual, Volum I : The basic programming guide, Version 6.10, August 5th 1998.

[29] The CLIPS reference manual, Volum II : The advanced programming guide, Version 6.10, August 5th 1998.

[30] The CLIPS reference manual, Volum III: The interfaces guide, Version 6.10, August 5th 1998.

[31] **William.H.Press, Brian.P.Flannery, Saul.A.Teukolsky,William.T.Vetterling**, “ Numerical recipes : the art of scientific computing.”, Cambridge university press, USA, 1986.






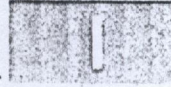

[32] **CAMPA , ROLLET**, “Technologie professionnelle générale pour les mécaniciens.”, Tome III : Procédés d’usinage , Edition FOUCHER , PARIS.

[33] Reference manual , “Quick Start , C++Builder 5.0.”, USA, 2000.

[34] Reference manual , “Devlopper’s guide , C++Builder 5.0.”, USA, 2000.

Annexe A : Quelques solutions disponibles

A.1. Solutions disponibles pour calculer le facteur théorique de concentration de contrainte référence [18]

Type de sollicitation	Type du solide	Type de l'entaille	Solution = modèle
Traction, Flexion	Plaque	Entaille un quart de cercle	 KTP1
Traction, Flexion	Plaque	Entaille un quart de cercle	 KTP2
Traction, Flexion	Plaque	Entaille semi-circulaire	 KTP3
Traction, Flexion	Plaque	Entaille semi-circulaire	 KTP4
Traction, Flexion	Plaque	Trou	 KTP5
Traction, Flexion	Plaque	Trou	 KTP6
Traction	Plaque	Plusieurs Trou	 KTP7

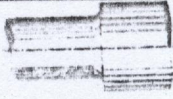
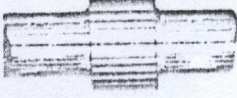
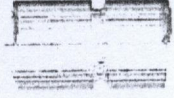
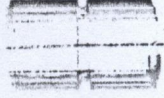
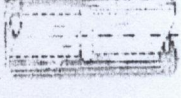
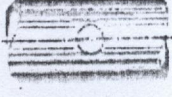
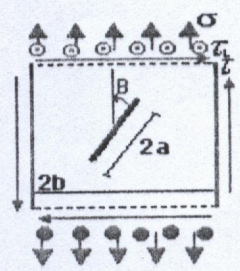
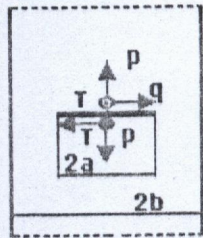
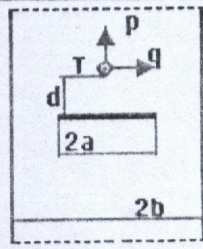
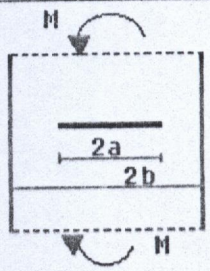
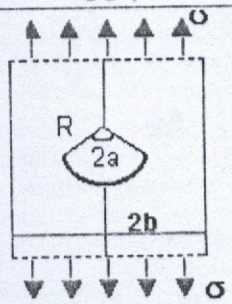
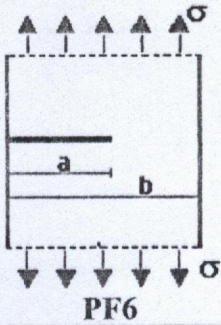
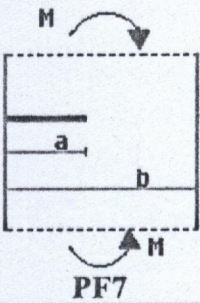
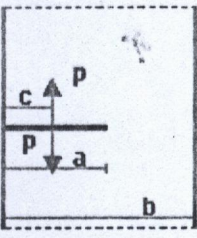
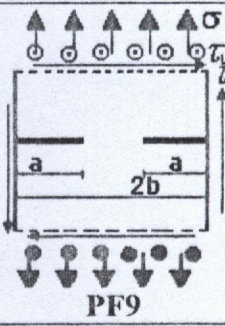
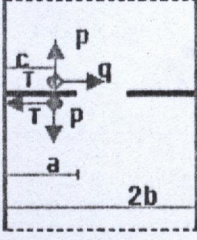
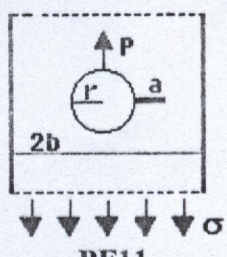
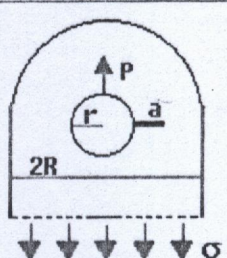
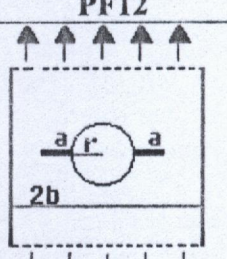
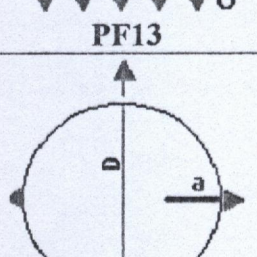
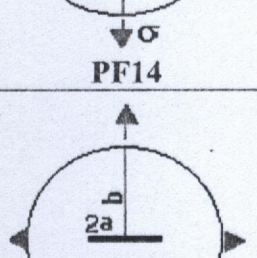
Traction, Flexion, Torsion	Arbre	Entaille un quart de cercle	 KTA1
Traction, Flexion, Torsion	Arbre	Entaille un quart de cercle	 KTA2
Traction, Flexion, Torsion	Arbre	Entaille semi-circulaire	 KTA3
Traction, Flexion, Torsion	Arbre creux	Entaille semi-circulaire	 KTA4
Traction, Flexion, Torsion	Arbre creux	Entaille semi-circulaire	 KTA5
Traction, Flexion, Torsion	Arbre creux	Trou	 KTA6

Tableau A1 Solutions disponibles pour calculer le facteur théorique de concentration de contrainte

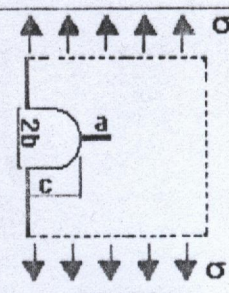
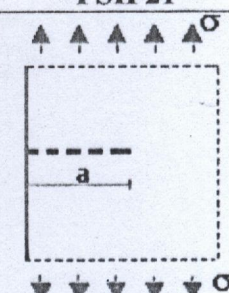
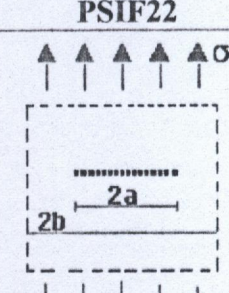
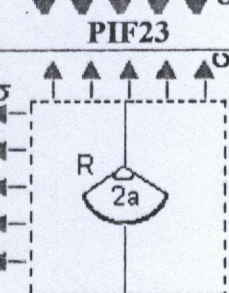
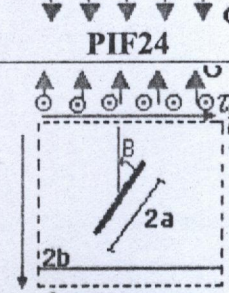
A2. Solutions disponibles pour calculer les facteurs d'intensité de contrainte
[5],[12],[13],[15]

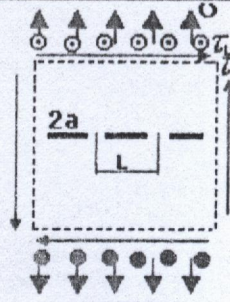
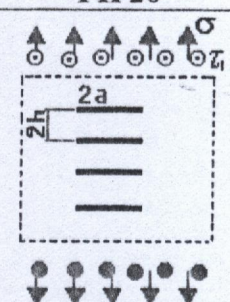
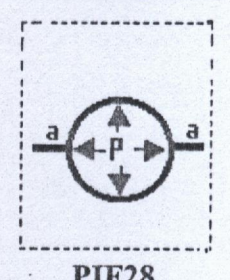
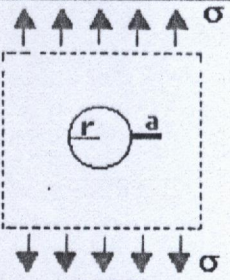
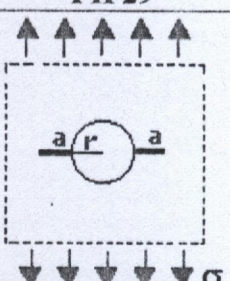
Type de solide	Entaille	Type de fissure	Mode de rupture	Solution = modèle
Plaque finie	Sans	Traversante centrale	I,II,III,Mixte	 <p>PF1</p>
Plaque finie	sans	Traversante centrale	I,II,III,Mixte	 <p>PF2</p>
Plaque finie	sans	Traversante centrale	I,II,III,Mixte	 <p>PF3</p>
Plaque finie	sans	Traversante centrale	I	 <p>PF4</p>
Plaque finie	sans	Traversante centrale	I,II	 <p>PF5</p>

Type de solide	Entaille	Type de fissure	Mode de rupture	Solution = modèle
Plaque finie	Sans	Superficielle traversante	I	 <p>PF6</p>
Plaque finie	sans	Superficielle traversante	I	 <p>PF7</p>
Plaque finie	sans	Superficielle traversante	I	 <p>PF8</p>
Plaque finie	sans	Superficielle traversante	I,II,III,Mixte	 <p>PF9</p>
Plaque finie	sans	Superficielle traversante	I,II,III,Mixte	 <p>PF10</p>

Type de solide	Entaille	Type de fissure	Mode de rupture	Solution = modèle
Plaque finie	Sans	Superficielle traversante	I	 <p>PF11</p>
Plaque finie	sans	Superficielle traversante	I	 <p>PF12</p>
Plaque finie	sans	Superficielle traversante	I	 <p>PF13</p>
Plaque finie	sans	Superficielle traversante	I	 <p>PF14</p>
Plaque finie	sans	Traversante centrale	I	 <p>PF15</p>

Type de solide	Entaille	Type de fissure	Mode de rupture	Solution = modèle
Plaque semi-infinie	Sans	Superficielle traversante	I,II	<p>PSIF16</p>
Plaque semi-infinie	sans	Superficielle traversante	I,II,III,Mixte	<p>PSIF17</p>
Plaque semi-infinie	sans	Superficielle traversante	I,II,III,Mixte	<p>PSIF18</p>
Plaque semi-infinie	sans	Superficielle traversante	I,II,III,Mixte	<p>PSIF19</p>
Plaque semi-infinie	sans	Superficielle traversante	I,II	<p>PSIF20</p>

Type de solide	Entaille	Type de fissure	Mode de rupture	Solution = modèle
Plaque semi-infinie	entaille	Superficielle traversante	I	 <p>PSIF21</p>
Plaque semi-infinie	sans	Superficielle semi-elliptique	I	 <p>PSIF22</p>
Plaque infinie	sans	interne	I	 <p>PIF23</p>
Plaque infinie	sans	Traversante centrale	I,II	 <p>PIF24</p>
Plaque infinie	sans	Traversante centrale	I,II,III,Mixte	 <p>PIF25</p>

Type de solide	Entaille	Type de fissure	Mode de rupture	Solution = modèle
Plaque infinie	Sans	Traversante centrale	I,II,III,Mixte	 <p>PIF26</p>
Plaque infinie	sans	Traversante centrale	I,II	 <p>PIF27</p>
Plaque infinie	sans	Traversante centrale	I,II,III,Mixte	 <p>PIF28</p>
Plaque infinie	sans	Traversante Superficielle	I	 <p>PIF29</p>
Plaque infinie	sans	Traversante Superficielle	I	 <p>PIF30</p>

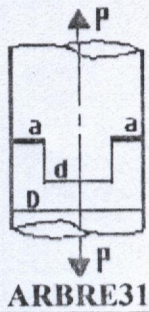
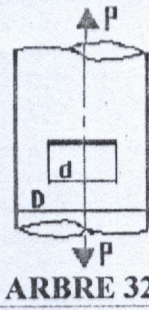
Type de solide	Entaille	Type de fissure	Mode de rupture	Solution = modèle
Arbre plein	sans	Superficielle traversante	I	 <p>ARBRE 31</p>
Arbre plein	sans	interne	I	 <p>ARBRE 32</p>

Tableau A2 Solutions disponibles pour calculer les facteurs d'intensité de contrainte

A.3. Récapitulation de principal critères de ruine concernant la rupture fragile

	Critère de rupture	propriété intrinsèque du matériau	état de contraintes	Modes de rupture
CR1	Facteur d'intensité de contraintes K	K_{Ic}	Déformations planes	I, II, III
CR2	Taux de restitution d'énergie G	G_{Ic}	Déformations planes Contraintes planes	I, II, III
CR3	le déplacement d'ouverture des lèvres de la fissure(C.O.D)	δ_c	Déformations planes Contraintes planes	I, II, III
CR4	L'intégrale J	J_c	Déformations planes Contraintes planes	I, II, III
CR5	Approche des deux critères (K_r , S_r)	K_{Ic}	Indéterminé	I
CR6	Critère de bifurcation	K_{Ic}	Indéterminé	Mode mixte (I+II)
CR7	Critère de bifurcation (G)	K_{Ic}	Indéterminé	Mode mixte (I+II)
CR8	Critère de bifurcation (S)	S_c , K_{Ic}	Indéterminé	Mode mixte (I+II)
CR9	Concept de FEDDERSEN pour déterminer σ_c	σ_c , K_{Ic}	Indéterminé	I

Tableau A.3 Récapitulation de principal critères de ruine concernant la rupture fragile

Annexe B : Calcul rapide du facteur d'intensité de contrainte en mode I [5]

On suppose que toute situation peut se ramener au problème de GRIFFITH, moyennant cinq termes correctifs, le facteur d'intensité de contraintes peut s'écrire :

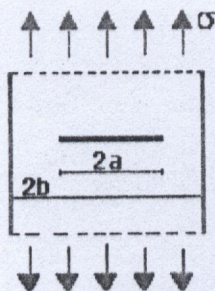
$$K_I = \sigma \sqrt{\pi \cdot a} \cdot F_1 \cdot F_2 \cdot F_3 \cdot F_4 \cdot F_5 \quad (B,1)$$

1. **Facteur de correction F_1** : tient compte de la surface libre à l'origine de la fissure.

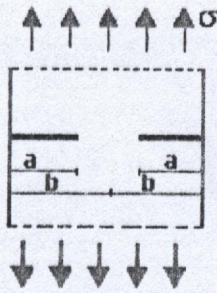
Distribution contrainte / Type de fissure	Distribution uniforme sur la longueur de la fissure	Variation linéaire jusqu'à zéro au fond de la fissure	Concentration à l'origine de la fissure	Décroissement plus rapide que la variation linéaire
Traversante	1.12	1.21	1.3	$1.21 < F_1 < 1.3$
Semi circulaire	1.025	1.085	1.145	$1.085 < F_1 < 1.145$
Quart de cercle	1.38	1.067	0.754	$0.754 < F_1 < 1.067$

2. **Facteur de correction F_2** : tient compte de la surface libre vers laquelle se dirige la fissure, «Espace fini».

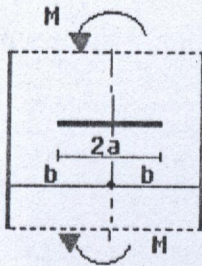
Dans le cas d'une fissure traversante et d'une contrainte de traction uniforme le plan de la fissure.



$$F_2 = \left(\cos \frac{\pi \cdot a}{2b} \right)^{-1/2} \quad (B2)$$

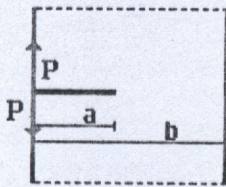


$$F_2 = \left(\frac{2b}{\pi a} \operatorname{tg} \frac{\pi a}{2b} \right)^{1/2} \quad (\text{B3})$$



$$F_2 = \frac{0.752 + 2.02 \frac{a}{b} + 0.37 \left(1 - \sin \frac{\pi a}{2b} \right)^3}{1.122 \cos \frac{\pi a}{2b}} \left(\frac{2b}{\pi a} \operatorname{tg} \frac{\pi a}{2b} \right)^{1/2} \quad (\text{B4})$$

Dans le cas d'une fissure traversante et d'une contrainte concentrée à l'origine de la fissure



$$F_2 = \left(1.297 - 0.297 \cos \frac{\pi a}{2b} \right) \sqrt{\frac{\frac{\pi a}{b}}{\sin \frac{\pi a}{b}}} \quad (\text{B5})$$

Dans le cas d'une fissure semi circulaire : $F_2 = 1.0$.

3. Facteur de correction F_3 : tient compte de la forme de la fissure réelle de la fissure.

Dans le cas d'une fissure elliptique :

$$F_3 = \frac{1}{E(k)} \left[1 - k^2 \sin^2 \beta \right]^{1/4} \quad (\text{B6})$$

avec

$$k^2 = 1 - \left(\frac{a}{b} \right)^2 \quad (\text{B,7})$$

$E(k)$: est intégrale elliptique complète de seconde espèce.

$$E(k) = \int_0^{\pi/2} (1 - k^2 \sin^2 \theta)^{1/2} d\theta \quad (\text{B,8})$$

F_3 est maximale à l'extrémité du petit axe de l'ellipse.

4. Facteur de correction F_4 : tient compte du gradient de contrainte dans le plan de la fissure. Sa détermination fait appel aux fonctions de Green.

$$F_4 = \frac{2^a}{\pi_0} \int \frac{K_t(x)}{\sqrt{a^2 - x^2}} dx \quad (\text{B,9})$$

ou' $K_t(x)$ est le facteur de concentration de contrainte le long du trajet présumé de la fissure.

$$K_t(x) = \frac{\sigma(x)}{\sigma} = \frac{\text{Contrainte maximale actuelle}}{\text{Contrainte nominale}} \quad (\text{B,10})$$

5. Facteur de correction F_5 : tient compte de la zone plastique.

Le facteur de contraintes corrigé de la taille de la zone plastique s'écrit sous la forme :

$$K_{I\text{eff}} = \alpha (a_{\text{eff}}) \sigma \sqrt{\pi a_{\text{eff}}} \quad (\text{B,11})$$

avec :

$$a_{\text{eff}} = a + r_p \quad (\text{B,12})$$

IRWIN conseille de considérer :

$$F_5 = \sqrt{\frac{a_{\text{eff}}}{a}} \quad (\text{B},13)$$

Sachant que :

$$r_p = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K_{Ic}}{R_e} \right)^2 \quad \text{Etat de déformation planes} \quad (\text{B},14)$$

Annexe C : Corrélation ténacité K_{Ic} Résilience KV [16]

D'un point de vue général, les essais de mécanique de la rupture sont longs et coûteux. A l'opposé, il existe les essais classiques de fragilité ou encore essais de résilience de type de CHARPY qui permettent mesurer, à moindre frais, la sensibilité d'un matériau à l'effet d'entaille. Le problème de la détermination expérimentale de la ténacité (K_{Ic} ; C.O.D) serait donc considérablement simplifié si l'on pouvait relier sa valeur à celle de la résilience. Les corrélations retenues de la littérature sont présentées dans le tableau ci-dessous.

	Identification du modèle	Domaine d'application	Corrélation entre K_{Ic} et KV	Condition de validité déterminées par les auteurs
M1	Rolf, Novak, Barso (1970)	Palier supérieur ductile de la courbe de transition KV = f(T)	$\left(\frac{K_{Ic}}{R_e}\right)^2 = 647 \left[100 \left(\frac{KV}{R_e}\right) - 1 \right]$	$770 \leq R_e \leq 1720$ $96 \leq K_{Ic} \leq 1720$ $22 \leq KV \leq 121$
M2	Barson, Rolf (1970)	Palier basse de la courbe de transition KV = f(T)	$\frac{K_{Ic}^2}{E} = 0.222 (KV)^{3/2}$	Acier à moyenne résistance pour appareils à pression
M3	Barson (1975)	Palier basse de la courbe de transition KV = f(T)	$K_{Id}^2 = 0.65 KV$ (dynam) $\Delta = 9.5 - 0.1 R_e$	Acier de construction à moyenne résistance $250 \leq R_e \leq 950$
M4	Sailors, Corten (1972)	Palier basse de la courbe de transition KV = f(T)	$K_{Ic} = 14.6 \sqrt{KV}$	Acier à moyenne résistance
M5	Marandet, Saz Irsid (1985)	Palier basse de la courbe de transition KV = f(T)	$K_{Ic} = 19 \sqrt{KV}$ $TK-Ic100 = 1.4TK28.$	$300 \leq R_e \leq 1000$ KV ≥ 80J cristallinité ≥ 80 à 85% à TK 28j

Tableau C.1 Corrélation K_{Ic} / KV

Annexe D : Structure du programme STRUCT.EXPERT

Le programme STRUCT.EXPERT comporte deux parties majeures , une partie de simulation et l'autre d'information.

D.1. Structure de STRUCT.EXPERT

La figure A.1 indique les sous programmes qui compose les deux parties (information , simulation).

D.2. La partie de simulation

Cette partie est composée d'un outil de développement (CLIPS) sous forme d'un fichier exécutable CLIPSwin.exe , d'une base de connaissances définit par le fichier (EXERT.clp) et d'un éditeur de la base de connaissances sous forme d'un fichier exécutable CLIPsed.exe.

D.3. La partie d'information

Cette partie comporte les programmes de calcul et une base de donnée de matériaux suivants :

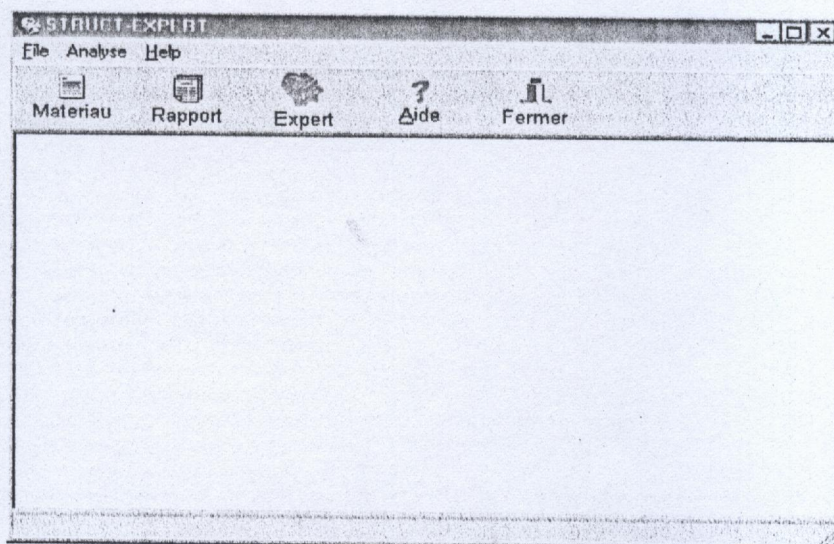


Figure D.1 Programme principal STRUCT.EXPERT

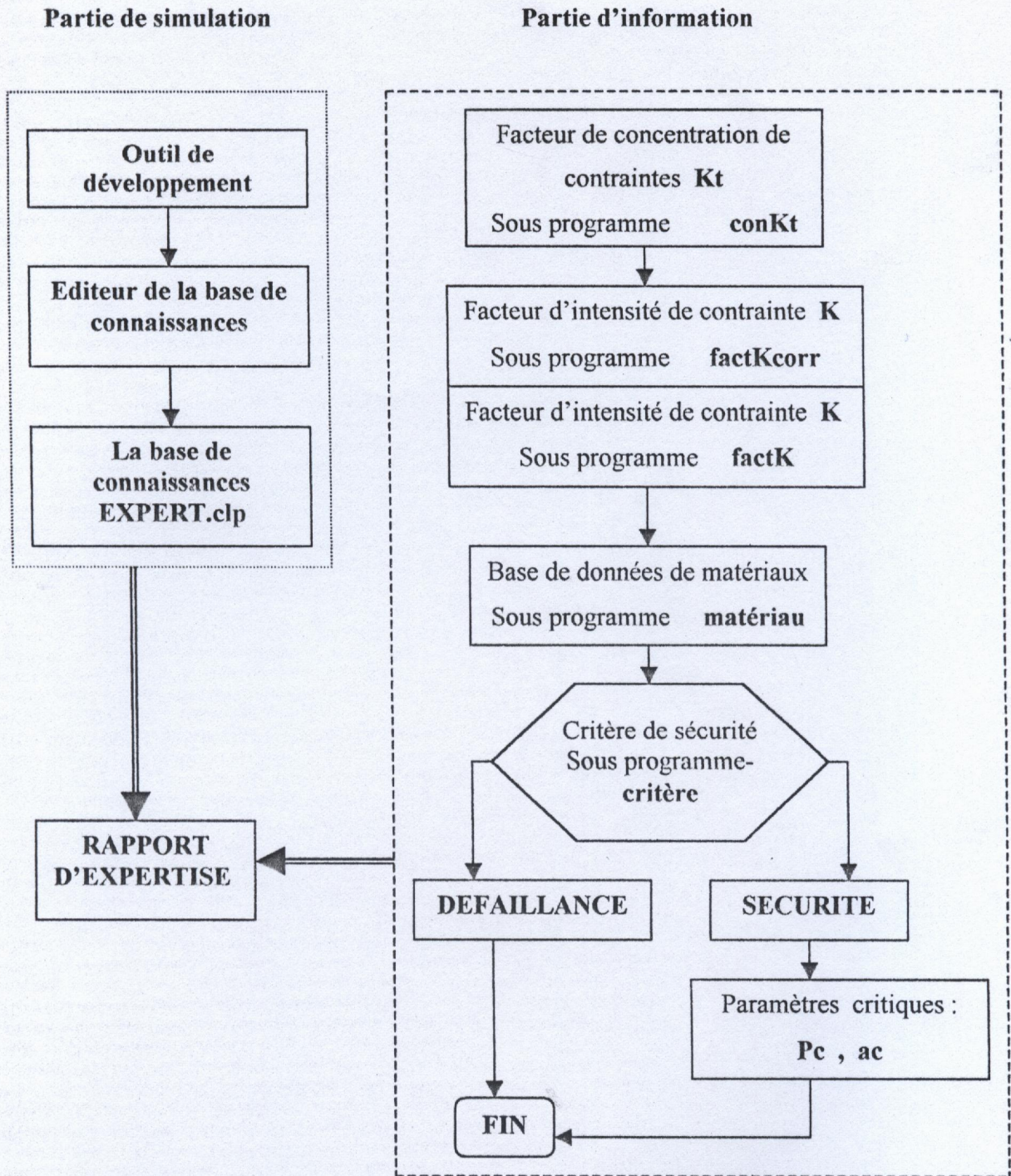


Figure D.2 Organigramme du programme STRUCT.EXPERT

D.4. Calcul du facteur d'intensité de contrainte K

Choisit un modèle , saisit les dimensions et les chargements correspondants pour calculer les quantités caractéristiques K, G, J,...

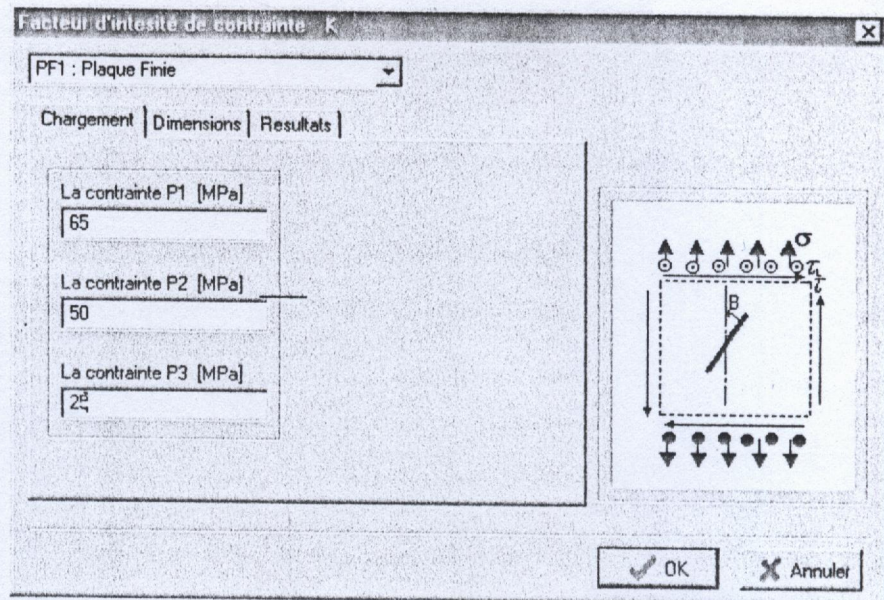


Figure D.3 Menu pour le Calcul du facteur d'intensité de contrainte K

D.5. Calcul du facteur d'intensité de contrainte K par correction

Choisit les facteurs de correction (F1, F2, F3, F4, F5) correspondants, saisit les dimensions et les chargements pour calculer le K_I .

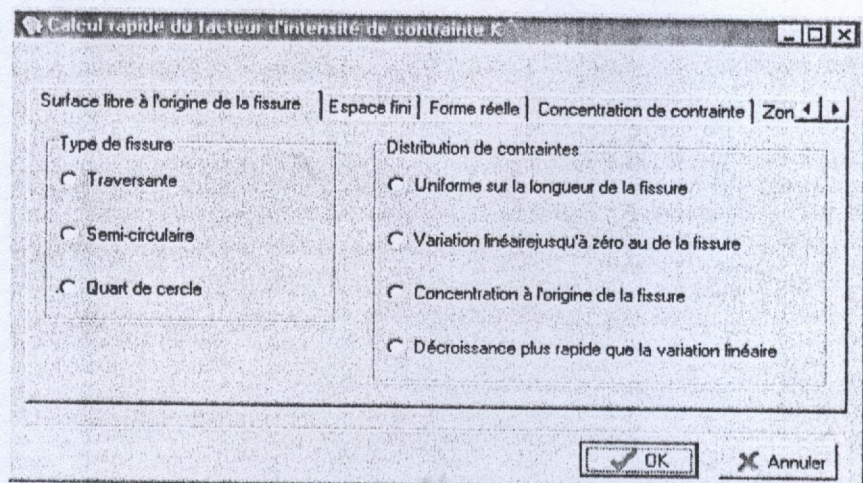


Figure D.4 Menu pour le calcul du facteur d'intensité de contrainte K

D.6. Calcul du facteur théorique de concentration de contraintes K_t

Choisit un modèle , saisit les dimensions et les chargement correspond pour calculer le facteur théorique de concentration de contrainte K_t .

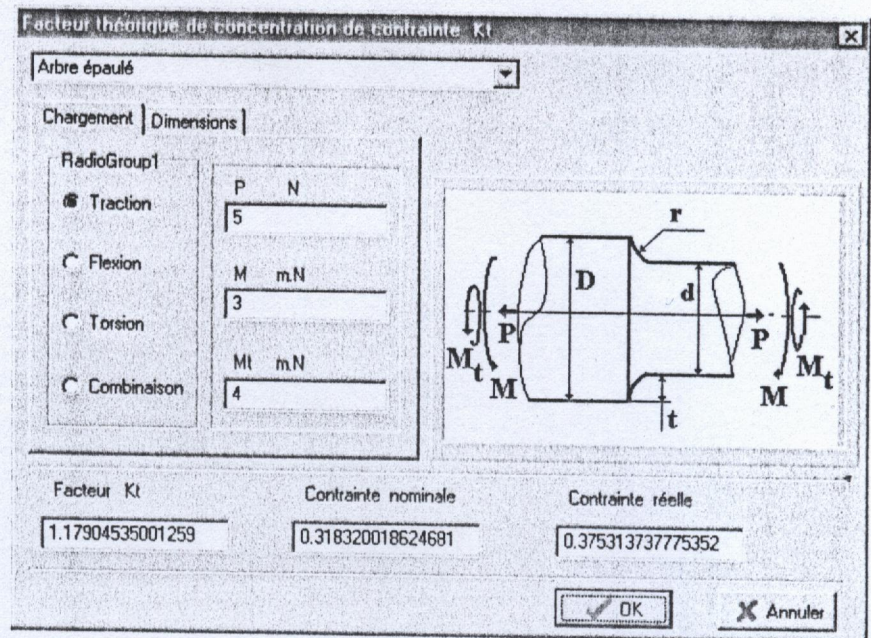


Figure D.5 Menu pour le calcul du facteur K_t

D.7. Base de données des matériaux

Chercher , Choisit , Modifie et Ajoute un matériau. Informations sur le matériau considéré.

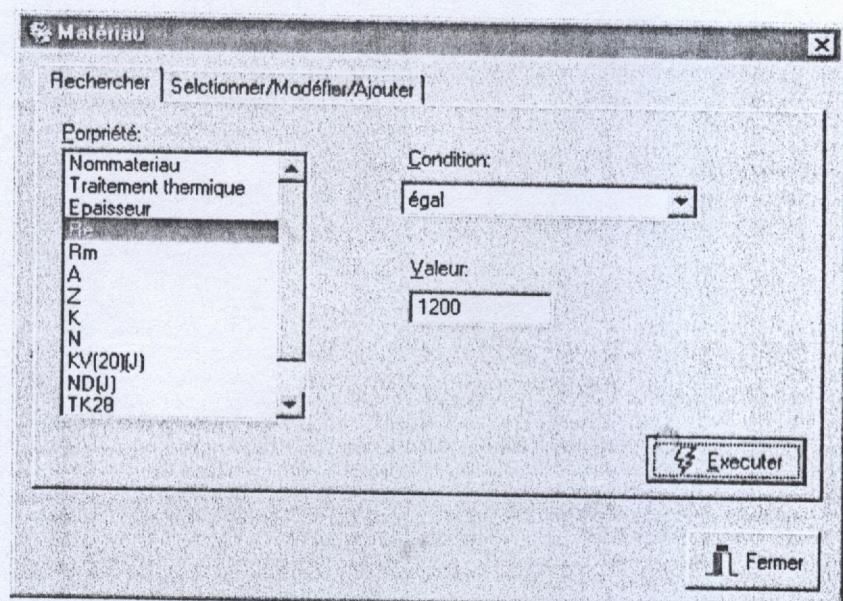


Figure D.6 Menu pour choisir un matériau

D.8. Outil de développement CLIPS

Charge la base de connaissances (expert.clp), initialise la puis exécute .

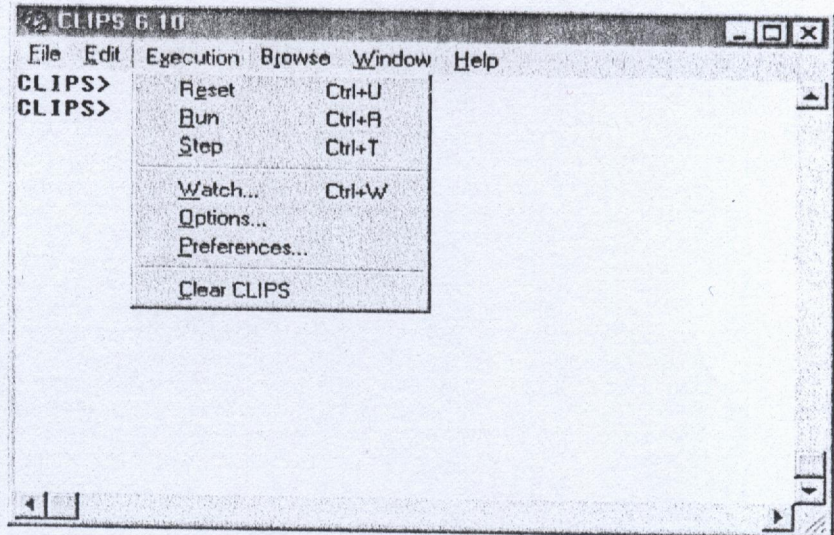


Figure D.7 Menu de CLIPS

D.9. Editeur de la base de connaissances

Edite la base de connaissances, ajoute, modifie les règles d'expertise.

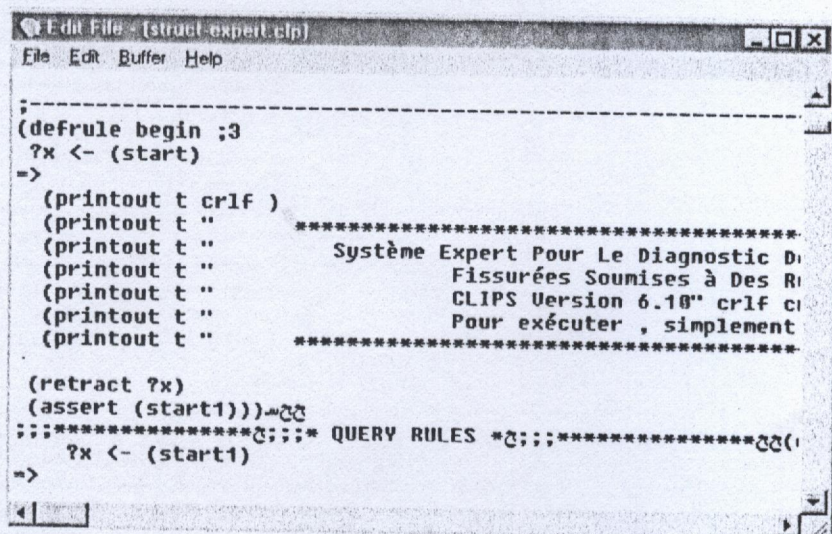


Figure D.8 Menu de CLIPS-EDIT

Annexe E : Outil de développement CLIPS

Le CLIPS est un outil de développement des systèmes experts, développé par « The Software Technology Branch (STB), NAZA / LYNDON .B. JOHNSON SPACE CENTER .

Le CLIPS est conçu pour faciliter le développement des logiciels pour modeler les connaissances ou compétences humaine.

Il y a trois façons pour représenter la connaissance dans le CLIPS :

1. Règles,
2. Deffunctions ou fonctions génériques,
3. Programmation orientée objet.

On peut développer un logiciel on utilise seulement les règles, ou seulement les objets, ou un mélange des objets et règles.

Le CLIPS est aussi conçu pour l'intégrer complètement avec les autres langues tel que C et ADA. En fait, le CLIPS est un acronyme de C Language Integrated Production System.