

MÉMOIRE DE MAÎTRISE

Développement des méthodes de calcul et de mesure de la courbe J - R
d'un composite polymère particulaire propergol

par

Luc Giasson

Étudiant à la maîtrise en ingénierie

21 mars 2003



Mise en garde/Advice

Afin de rendre accessible au plus grand nombre le résultat des travaux de recherche menés par ses étudiants gradués et dans l'esprit des règles qui régissent le dépôt et la diffusion des mémoires et thèses produits dans cette Institution, **l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** est fière de rendre accessible une version complète et gratuite de cette œuvre.

Motivated by a desire to make the results of its graduate students' research accessible to all, and in accordance with the rules governing the acceptance and diffusion of dissertations and theses in this Institution, the **Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** is proud to make a complete version of this work available at no cost to the reader.

L'auteur conserve néanmoins la propriété du droit d'auteur qui protège ce mémoire ou cette thèse. Ni le mémoire ou la thèse ni des extraits substantiels de ceux-ci ne peuvent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

The author retains ownership of the copyright of this dissertation or thesis. Neither the dissertation or thesis, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

CETTE PAGE FUT LAISSÉE BLANCHE INTENTIONNELLEMENT

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES ILLUSTRATIONS	IV
LISTE DES TABLEAUX.....	VII
LISTE DES SYMBOLES ET ACRONYMES	IX
RÉSUMÉ	XI
REMERCIEMENTS	XIII
1.0 INTRODUCTION	1
1.1 GÉNÉRALITÉS ET OBJECTIFS.....	1
1.2 PLAN DU MÉMOIRE.....	3
2.0 REVUE BIBLIOGRAPHIQUE.....	5
2.1 RAPPEL HISTORIQUE DE LA MÉCANIQUE DE LA RUPTURE	5
2.2 MÉTHODES DE CARACTÉRISATION DE LA RÉSISTANCE À LA RUPTURE.....	10
3.0 DEVELOPPEMENT THÉORIQUE	13
3.1 L'INTÉGRALE DE CONTOUR J	13
3.2 CALCUL DE L'INTÉGRALE J PAR LA MÉTHODE DES ÉLÉMENTS FINIS.....	14
3.2.1 <i>Étapes de calculs</i>	14
3.3 VÉRIFICATION DE LA MACRO JIN1.....	20
3.3.1 <i>Solutions analytiques</i>	21
3.3.2 <i>Modèle ANSYS</i>	24
3.3.3 <i>Résultats</i>	26
3.4 MESURE EXPÉRIMENTALE DE J	28
4.0 CARACTÉRISATION DU COMPORTEMENT UNIAXIAL	30
4.1 LES TEMPÉRATURES ET LES VITESSES DE DÉPLACEMENT DU TABLIER.....	31
4.2 COMPORTEMENT UNIAXIAL MESURÉ.....	33
4.3 TRANSFORMATIONS EN CONTRAINTES VRAIES ET DÉFORMATIONS VRAIES	34

4.4	LISSAGE ET PARAMÈTRES DE RAMBERG-OSGOOD	36
4.5	ANALYSES D'ERREURS.....	39
5.0	CARACTÉRISATION DU COMPORTEMENT DE RÉSISTANCE J-R	42
5.1	ÉPROUVETTE DE CARACTÉRISATION	42
5.2	FABRICATION DES ÉPROUVETTES DE CARACTÉRISATION.....	44
5.3	ACQUISITION DE DONNÉES EXPÉRIMENTALES	47
5.3.1	<i>Méthode avec éprouvettes multiples.....</i>	<i>49</i>
5.3.2	<i>Méthode avec éprouvette unique.....</i>	<i>51</i>
5.4	RÉDUCTION DES DONNÉES EXPÉRIMENTALES	53
5.4.1	<i>Modélisation de l'éprouvette en tension fissurée sur le côté modifiée.....</i>	<i>54</i>
5.4.2	<i>Analyse de convergence</i>	<i>57</i>
5.5	CONDITIONS DES TESTS.....	58
5.6	RÉSULTATS POUR LES MÉTHODES AVEC ÉPROUVETTES MULTIPLES ET UNIQUE	59
5.6.1	<i>Paramètres de Merkle-Corten η.....</i>	<i>59</i>
5.6.2	<i>Courbes J-R à 22°C et 20 mm/min.....</i>	<i>60</i>
5.6.3	<i>Courbes J-R à 50°C et 20 mm/min.....</i>	<i>64</i>
5.6.4	<i>Courbes J-R à -30°C et 20 mm/min.....</i>	<i>65</i>
5.6.5	<i>Courbes J-R à -30°C et 200 mm/min.....</i>	<i>68</i>
5.7	COMPARAISON AVEC LES COURBES DE TRACTION.....	70
6.0	CONCEPTION D'UNE ÉPROUVETTE DE VALIDATION.....	74
6.1	GRADIENT DE DÉFORMATION.....	74
6.2	MODÉLISATION ET OPTIMISATION DE L'ÉPROUVETTE DE VALIDATION.....	76
6.3	ANALYSE DE CONVERGENCE.....	84
7.0	VALIDATION DE LA MÉTHODE D'ANALYSE ET CARACTÉRISATION ..	86
7.1	CONDITIONS DE TESTS	88
7.2	TEST À 22°C ET 20 MM/MIN.....	88
7.3	TEST À 50°C ET 20 MM/MIN.....	92
7.4	TEST À -30°C ET 20 MM/MIN.....	94
7.5	TEST À -30°C ET 200 MM/MIN.....	97
7.6	COMPARAISON À 22°C ET 20 MM/MIN.....	99

7.7 COMPARAISON À 50°C ET 20 MM/MIN	100
7.8 COMPARAISON -30°C ET 20 MM/MIN	101
7.9 COMPARAISON À -30°C ET 200 MM/MIN	102
7.10 DISCUSSIONS	103
8.0 CONCLUSIONS	104
9.0 TRAVAUX FUTURS	106
10.0 RÉFÉRENCES.....	107
ANNEXE A – MÉTHODE DU TRAVAIL ESSENTIEL DE RUPTURE W_E.....	113
A.1 THÉORIE DE LA MÉTHODE DU TRAVAIL ESSENTIEL DE RUPTURE	113
A.2 LES TEMPÉRATURES ET LES VITESSES DE DÉPLACEMENT DU TABLIER	116
A.3 MESURE DU TRAVAIL ESSENTIEL DE RUPTURE	117
ANNEXE B – COMPORTEMENT UNIAXIAL DU PROPERGOL	122
ANNEXE C – FICHIERS DE COMMANDE APDL COMMUNS	127
ANNEXE D – FICHIERS DE COMMANDE ADPL POUR PANNEAU M-T	147
ANNEXE E – FICHIERS DE COMMANDE ADPL POUR ÉPROUVETTE DE CARACTÉRISATION.....	164
ANNEXE F – FICHIERS DE COMMANDE APDL POUR ÉPROUVETTE DE VALIDATION	178

LISTE DES ILLUSTRATIONS

FIGURE 2.1 – TROU ELLIPTIQUE DANS UNE PLAQUE INFINIE.....	6
FIGURE 2.2 – ÉNERGIE LIBÉRÉE PAR UN ALLONGEMENT Δa	8
FIGURE 2.3 – ÉNERGIE LIBÉRÉE	9
FIGURE 2.4 – ÉPROUVETTE EN FLEXION FISSURÉE SUR LE CÔTÉ (SENB)	12
FIGURE 2.5 – ÉPROUVETTE COMPACTE EN TENSION (CT)	12
FIGURE 3.1 – INTÉGRALE DE CONTOUR J	13
FIGURE 3.2 – EXEMPLE DE CHEMINS ARBITRAIRES	16
FIGURE 3.3 – PANNEAU M-T	21
FIGURE 3.4 – QUART DE PANNEAU M-T	24
FIGURE 3.5 – COMPARAISON DES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES.....	26
FIGURE 4.1 – ÉPROUVETTE DE TYPE JANNAF CLASSE C	31
FIGURE 4.2 – COURBES DE TRACTION	36
FIGURE 4.3 – DÉPLACEMENT DES COURBES DE TRACTION	37
FIGURE 5.1 – ÉPROUVETTE EN TENSION FISSURÉE SUR LE CÔTÉ (SENT)	43
FIGURE 5.2 – ÉPROUVETTE EN TENSION FISSURÉE SUR LE CÔTÉ (SENT) MODIFIÉE	44
FIGURE 5.3 – COUTEAU SERVANT À DÉCOUPER LES ÉPROUVETTES	45
FIGURE 5.4 – DISPOSITIF SERVANT À TAILLER LES FISSURES INITIALES.....	45
FIGURE 5.5 – COURONNE ENTOURANT L'ARBRE SUPÉRIEUR	46
FIGURE 5.6 – COURBE DE RÉSISTANCE J - R TYPIQUE.....	48
FIGURE 5.7 – COURBE DE TRACTION D'UNE ÉPROUVETTE FISSURÉE	49
FIGURE 5.8 – LONGUEUR DE LA FISSURE a EN FONCTION DE L'ALLONGEMENT ΔL	50
FIGURE 5.9 – SCHÉMA DE L'ÉQUIPEMENT DE TEST	51
FIGURE 5.10 – IMAGE PRISE À PARTIR DU SYSTÈME VIDÉO.....	53
FIGURE 5.11 – MODÈLE DE L'ÉPROUVETTE DE CARACTÉRISATION	55
FIGURE 5.12 – DÉGÉNÉRATION D'UN ÉLÉMENT QUADRILATÈRE À 8 NŒUDS.....	56
FIGURE 5.13 – MAILLAGE AUTOUR DE LA POINTE D'UNE FISSURE	56
FIGURE 5.14 – INTÉGRATION NUMÉRIQUE	60
FIGURE 5.15 – COURBES J - R À +22°C ET 20 MM/MIN	62
FIGURE 5.16 – COURBES J - R À +50°C ET 20 MM/MIN	65

FIGURE 5.17 – COURBES J-R À -30°C ET 20 MM/MIN.....	67
FIGURE 5.18 – COURBES J-R À -30°C ET 200 MM/MIN.....	69
FIGURE 5.19 – FORCES DE RÉACTION SUR L'ÉPROUVETTE DE CARACTÉRISATION	70
FIGURE 5.20 – COURBES DE TRACTION DES ESSAIS JR1 À JR4.....	71
FIGURE 5.21 – COURBES DE TRACTION DES ESSAIS JR5 À JR7.....	72
FIGURE 5.22 – COMPORTEMENTS NON LINÉAIRES DIFFÉRENTS	73
FIGURE 6.1 – ÉPROUVETTE AVEC GRADIENT DE DÉFORMATION.....	75
FIGURE 6.2 – ÉPROUVETTE UTILISÉ PAR LIU	77
FIGURE 6.3 – ÉPROUVETTE DE VALIDATION ORIGINALE.....	77
FIGURE 6.4 – MODÈLE DE L'ÉPROUVETTE DE VALIDATION	79
FIGURE 6.5 – CONTRAINTES PRINCIPALES MAXIMALES EN FONCTION DU RAYON	82
FIGURE 6.6 – ÉPROUVETTE DE VALIDATION.....	83
FIGURE 6.7 – CONTRAINTES PRINCIPALES S1.....	83
FIGURE 7.1 – IMAGE VIDÉO DE L'ÉPROUVETTE DE VALIDATION.....	87
FIGURE 7.2 – VALIDATION À +22°C ET 20 MM/MIN.....	90
FIGURE 7.3 – VALIDATION À +50°C ET 20 MM/MIN.....	93
FIGURE 7.4 – VALIDATION À -30°C ET 20 MM/MIN	95
FIGURE 7.5 – VALIDATION À -30°C ET 200 MM/MIN	98
FIGURE 7.6 – COMPARAISON À +22°C ET 20 MM/MIN	99
FIGURE 7.7 – COMPARAISON À +50°C ET 20 MM/MIN	100
FIGURE 7.8 – COMPARAISON À -30°C ET 20 MM/MIN.....	101
FIGURE 7.9 – VALIDATION À -30°C ET 200 MM/MIN	102
FIGURE A.1 – ZONES DE DISSIPATION DU TRAVAIL	114
FIGURE A.2 – RELATION LINÉAIRE ENTRE w_F ET L	115
FIGURE A.3 – ÉPROUVETTE POUR LA MESURE DE w_E	118
FIGURE A.4 – CHARGE EN FONCTION DU DÉPLACEMENT DU TABLIER POUR LES ESSAIS EWF	119
FIGURE A.5 – TRAVAIL ESSENTIEL DE RUPTURE	120
FIGURE B.1 – COMPORTEMENT UNIAXIAL À 22C ET 2 MM/MIN	122
FIGURE B.2 – COMPORTEMENT UNIAXIAL À 22C ET 20 MM/MIN	123
FIGURE B.3 – COMPORTEMENT UNIAXIAL À 22C ET 200 MM/MIN	123

FIGURE B.4 – COMPORTEMENT UNIAXIAL À 50C ET 20 MM/MIN	124
FIGURE B.5 – COMPORTEMENT UNIAXIAL À -10C ET 20 MM/MIN	124
FIGURE B.6 – COMPORTEMENT UNIAXIAL À -30C ET 2 MM/MIN	125
FIGURE B.7 – COMPORTEMENT UNIAXIAL À -30C ET 20 MM/MIN	125
FIGURE B.8 – COMPORTEMENT UNIAXIAL À -30C ET 200 MM/MIN	126
FIGURE B.9 – COMPORTEMENT UNIAXIAL À -40C ET 20 MM/MIN	126

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 2.1 – MÉTHODES À PARAMÈTRE DE RUPTURE UNIQUE.....	10
TABLEAU 3.1 – FACTEUR GÉOMÉTRIQUE H_I POUR $N = 5$, ÉTAT PLAN DE CONTRAINTES.....	24
TABLEAU 3.2 – PROPRIÉTÉS DES MATÉRIAUX	25
TABLEAU 3.3 – RÉSULTATS (ANALYTIQUES ET NUMÉRIQUES) AVEC $P = 200$ N.....	27
TABLEAU 3.4 – RÉSULTATS (ANALYTIQUES ET NUMÉRIQUES) AVEC $P = 50$ N.....	27
TABLEAU 3.5 – RÉSULTATS (ANALYTIQUES ET NUMÉRIQUES) AVEC $P = 10$ N.....	27
TABLEAU 4.1 – CONDITIONS DE CARACTÉRISATION DU COMPORTEMENT UNIAXIAL	33
TABLEAU 4.2 – MODULE DE YOUNG ET ϵ_0	38
TABLEAU 4.3 – PARAMÈTRES DE RAMBERG-OSGOOD	39
TABLEAU 4.4 – INFLUENCE DE N ET A À 22°C ET 2 MM/MIN	40
TABLEAU 4.5 – INFLUENCE DE N ET A À 22°C ET 20 MM/MIN.....	40
TABLEAU 4.6 – INFLUENCE DE N ET A À -30°C ET 200 MM/MIN.....	41
TABLEAU 5.1 – DONNÉES OBTENUES AVEC LES ÉPROUVETTES FISSURÉES SIMPLES	53
TABLEAU 5.2 – RÉSULTATS DE L'ANALYSE DE CONVERGENCE	57
TABLEAU 5.3 – CONDITIONS DE TESTS	58
TABLEAU 5.4 – MÉTHODE À ÉPROUVETTES MULTIPLES À $+22^\circ\text{C}$ ET 20 MM/MIN	61
TABLEAU 5.5 – MÉTHODE À ÉPROUVETTE UNIQUE À $+22^\circ\text{C}$ ET 20 MM/MIN	62
TABLEAU 5.6 – MÉTHODE À ÉPROUVETTES MULTIPLES À $+50^\circ\text{C}$ ET 20 MM/MIN	64
TABLEAU 5.7 – MÉTHODE À ÉPROUVETTE UNIQUE À $+50^\circ\text{C}$ ET 20 MM/MIN	64
TABLEAU 5.8 – MÉTHODE À ÉPROUVETTES MULTIPLES À -30°C ET 20 MM/MIN.....	66
TABLEAU 5.9 – MÉTHODE À ÉPROUVETTE UNIQUE À -30°C ET 20 MM/MIN.....	66
TABLEAU 5.10 – MÉTHODE À ÉPROUVETTES MULTIPLES À -30°C ET 200 MM/MIN.....	68
TABLEAU 5.11 – MÉTHODE À ÉPROUVETTE UNIQUE À -30°C ET 200 MM/MIN.....	68
TABLEAU 5.12 – NOMS DES ESSAIS	71
TABLEAU 6.1 – RÉSULTATS AVEC UNE COUPE DE 6.5 MM.....	80
TABLEAU 6.2 – RÉSULTATS AVEC UNE COUPE 7.0 MM.....	80
TABLEAU 6.3 – RÉSULTATS AVEC UNE COUPE 7.5 MM.....	80
TABLEAU 6.4 – RÉSULTATS AVEC UNE COUPE 8.0 MM.....	80
TABLEAU 6.5 – RÉSULTATS AVEC UNE COUPE 8.5 MM.....	81

TABLEAU 6.6 – RÉSULTATS AVEC UNE COUPE 9.0 MM	81
TABLEAU 6.7 – ANALYSE DE CONVERGENCE DE L'ÉPROUVETTE DE VALIDATION	84
TABLEAU 7.1 – DONNÉES OBTENUES AVEC LES ÉPROUVETTES DE VALIDATION.....	87
TABLEAU 7.2 – CONDITIONS EXPÉRIMENTALES POUR LA VALIDATION	88
TABLEAU 7.3 – ESSAIS DE VALIDATION V1.....	89
TABLEAU 7.4 – ESSAI DE VALIDATION V2	89
TABLEAU 7.5 – ESSAI DE VALIDATION V3	90
TABLEAU 7.6 – ESSAI DE VALIDATION V4	92
TABLEAU 7.7 – ESSAI DE VALIDATION V5	92
TABLEAU 7.8 – ESSAI DE VALIDATION V6	93
TABLEAU 7.9 – ESSAI DE VALIDATION V9	94
TABLEAU 7.10 – ESSAI DE VALIDATION V13	94
TABLEAU 7.11 – ESSAI DE VALIDATION V14	95
TABLEAU 7.12 – ESSAI DE VALIDATION 10	97
TABLEAU 7.13 – ESSAI DE VALIDATION V11	97
TABLEAU 7.14 – ESSAI DE VALIDATION V12	98
TABLEAU A.1 – CONDITION EXPÉRIMENTALE POUR LA MESURE DE w_E	117
TABLEAU A.2 – MESURE DU TRAVAIL DE RUPTURE	120

LISTE DES SYMBOLES ET ACRONYMES

Les dimensions des symboles sont indiquées entre crochets [].

<u>Acronymes</u>	<u>Définition</u>
APDL	ANSYS Parametric Design Language
ASTM	American Society for Testing and Materials
CCD	Charge-couple device
DENT	Double Edge Notched Tension
LVDT	Linear Voltage Differential Transformer
NTSC	National Television System Committee
SENT	Single Edge Notched Tension
VHS	Format vidéo standard des magnétoscope
S-VHS	Format video amélioré

<u>Symbole</u>	<u>Définition</u>
a	Longueur de la fissure [m]
a_0	Longueur initiale de la fissure [m]
a_{eff}	Longueur efficace de la fissure [m]
b	Longueur du ligament non-fissuré [m]
b_0	Longueur initiale du ligament non-fissuré [m]
B	Épaisseur de l'éprouvette [m]
E	Module de Young [Pa]
η	Paramètre de Merkle-Corten [-]
J	Intégrale de contour J [J/m^2]
J_{tot}	Énergie totale de rupture [J/m^2]
J_{el}	Portion élastique de l'énergie totale de rupture [J/m^2]
J_{pl}	Portion plastique de l'énergie totale de rupture [J/m^2]

$K_I(a)$	Coefficient d'intensité de contrainte à une longueur de fissure a [Pa√m]
$K_I(a_{eff})$	Coefficient d'intensité de contrainte à une longueur de fissure a_{eff} [Pa√m]
P	Charge de tension [kg]
α, n	Paramètres de Ramberg-Osgood [-]
e	Déformation de l'ingénieur [m/m]
ε	Déformation vraie [m/m]
ε_0	Déformation vraie de référence [m/m]
ΔL	Déplacement du tablier [m]
T	Température [°C]
σ	Contrainte de l'ingénieur [Pa]
σ_T	Contrainte vraie [Pa]
σ_0	Contrainte vraie de référence [m/m]

RÉSUMÉ

Les combustibles solides, nommés « proergols », contenus dans les moteurs-fusées sont sujet à un vieillissement lors de l'entreposage sur de longues périodes. Ce vieillissement favorise l'apparition de fissures radiales dans les moteurs-fusées. Pour prédire l'avancement de ces fissures, il faut tout d'abord bien connaître le comportement en rupture des proergols. Cette étude a donc été réalisée, entre autre, pour développer une méthode permettant de caractériser la résistance à la rupture d'un matériau composite polymère particulière proergol. Une revue de la littérature a d'abord été effectuée pour relever les méthodes de caractérisation déjà existantes.

Parmi les différentes théories retrouvées dans la littérature, celle de l'intégrale de contour J a été retenue. Pour en faire son calcul avec le logiciel d'éléments finis ANSYS, nous avons développé une routine spéciale. Cette routine a été vérifiée en comparant les résultats numériques avec des solutions provenant des équations analytiques qui existent pour certaines géométries d'éprouvette.

Les propriétés mécaniques du proergol ont été mesurées pour différentes températures et vitesses de déformation. Pour réduire le grand nombre de données obtenues, nous avons utilisé la loi de comportement de Ramberg-Osgood. Les différents paramètres de Ramberg-Osgood ont été déterminés par le logiciel Table Curve 2D pour chaque combinaison de température et de vitesse de déformation.

La théorie de l'intégrale de contour J a ensuite été utilisée pour le développement d'une méthode de caractérisation de la résistance à la rupture appropriée au cas d'un composite polymère particulière proergol. En fait, deux méthodes ont été développées : On utilise soit une ou plusieurs éprouvettes. Les résultats ont montré que la méthode à éprouvette unique produit des données plus consistantes. Une première série de courbes de résistance à la rupture J - R furent tracées à l'aide de ANSYS et d'expériences en laboratoire sur des éprouvettes en tension fissurées sur le côté (aussi connues comme étant les éprouvettes « SENT »).

Des éprouvettes fissurées plus complexes présentant un gradient de déformation ont été ensuite conçues. Ces éprouvettes nommées « éprouvettes de validation » ont été optimisées avec le logiciel ANSYS. Puisque la fissure est placée au centre des éprouvettes, elles ont permis de tracer deux nouvelles série de courbe J - R . Une série pour la pointe gauche de la fissure et une autre pour la pointe droite de la fissure.

Les différentes séries de courbes J - R ont été comparées les unes aux autres. Ces comparaisons permettent de valider et de vérifier la concordance entre les résultats de l'intégrale J provenant de la méthode de caractérisation développée et les résultats de l'intégrale J provenant du comportement en rupture des éprouvettes fissurées complexes. Ces comparaisons montrent que les courbes J - R des éprouvettes complexes avec gradient de déformation sont très semblables aux courbes J - R caractéristiques obtenues en premier lieu à partir des éprouvettes SENT et de la méthode à éprouvette unique.

On peut conclure que les données de rupture sont compatibles. La méthode de calcul et de mesure de la courbe J - R peut donc être combinée avec les résultats provenant des éprouvettes de caractérisation fabriquées en propergol pour prédire la propagation des fissures dans des structures complexes comme des moteurs-fusées si un algorithme de propagation existe.

REMERCIEMENTS

La réalisation de cette thèse de maîtrise a été rendue possible grâce à la participation et à l'aide de plusieurs personnes. Que ce soit sur le plan financier, technique ou moral, j'ai pu compter sur eux durant tous les instants. Je tiens particulièrement à les en remercier.

Merci tout spécial aux gens du Centre de Recherche pour la Défense Valcartier (CRDV) pour leur appui. Je pense notamment à M. Frank Wong, Ph.D. Par sa connaissance très élevée du sujet étudié, il a su me guider dans la réalisation de ce projet. Il s'est toujours montré disponible et m'a beaucoup supporté. Il m'a partagé son expertise et il a porté un regard critique à mon travail, m'aidant ainsi à progresser. Il s'est également assuré de la disponibilité des équipements et installations du CRDV. Je remercie également les gens de l'atelier mécanique et tout particulièrement, Michel Kervarec, de m'avoir assisté dans la réalisation des expériences en laboratoire.

Merci aux gens de l'Université du Québec à Rimouski et plus spécialement à M. Jean Brousseau, Ph.D. de m'avoir fait confiance. Il a été mon mentor durant toutes mes études en génie et j'admire son attitude positive. J'apprécie son professionnalisme et sa rigueur. Je remercie M. Brousseau de m'avoir transmis le goût des études graduées.

Merci à tous les membres de ma famille qui m'ont encouragé et supporté financièrement durant toute la durée de mes études universitaires. Enfin, un merci très spécial à ma tendre épouse Isabel pour son support moral tout au long de la réalisation de ce projet. Merci de croire en moi et de m'encourager chaque jour à me dépasser.

1.0 INTRODUCTION

1.1 Généralités et objectifs

Il est bien connu que l'entreposage de matériel divers sur de longues périodes est souvent responsable des dommages et du vieillissement. Les armes que possèdent les forces armées des pays du monde entier n'échappent malheureusement pas à cette réalité. Parmi ces armes, on retrouve une grande quantité de moteurs-fusées à propergol solide qui passent la majeure partie de leur vie utile dans des entrepôts où ils sont sujets à des variations de température et d'humidité relative.

Lors de la fabrication des moteurs-fusées, le propergol, qui est un composite particulière, est habituellement coulé à une température d'environ 60°C. Celui-ci se solidifie par la création d'un réseau de polymère réticulé après un certain temps. Lorsque le moteur-fusée est refroidi à une température plus basse, des contraintes internes sont induites par la contraction thermique du propergol. Avec les variations répétées des conditions d'entreposage, des fissures radiales peuvent apparaître dans le bloc de propergol. Lors de la mise à feu des moteurs-fusées, les fissures exposées à la forte pression peuvent se propager rapidement. Parce que la présence des fissures augmente la surface de combustion et que la pression interne du moteur-fusée est proportionnelle à la surface de combustion, la propagation des fissures conduit à une surcharge de pression dans le moteur-fusée ainsi qu'à un potentiel élevé de défaillance catastrophique [1].

Une étude [2] a récemment été réalisée au Centre de Recherche pour la Défense Valcartier (CRDV) dans le but de développer une méthode permettant de prédire ce type de défaillance pour des propergols solides. Les résultats de cette étude ont montrés que l'allongement des fissures a été sous-estimé dans un moteur-fusée parce que la résistance à la rupture du propergol avait été surévaluée au départ par l'éprouvette de caractérisation. Cette surévaluation fut attribuée à la différence entre l'état des contraintes à la fissure dans l'éprouvette de caractérisation et l'état des contraintes à la fissure dans le moteur-fusée.

Comme les éprouvettes utilisées pour caractériser la résistance à la rupture étaient relativement minces, on retrouvait à la fissure un état de contraintes planes. Un moteur-fusée est relativement long comparé à son diamètre. C'est pourquoi, dans le cas des fissures radiales, on y retrouve un état de déformations planes à la fissure. Cette étude propose comme conclusion que l'état des contraintes à la fissure de l'éprouvette de caractérisation d'un matériau doit être du même type que celui à la fissure d'une structure dont on veut étudier la propagation.

Nous avons entrepris une nouvelle étude pour vérifier si l'intégrale J , et la méthode pour la calculer quantifie précisément l'énergie autour d'une fissure pour un état de contrainte bien contrôlé. Cette nouvelle étude est effectuée avec une éprouvette de caractérisation ou l'état de contrainte à la fissure est compatible avec l'état de contrainte à une fissure qui se trouve dans une structure avec une géométrie complexe. Pour garantir la compatibilité entre des résultats de rupture provenant de l'éprouvette de caractérisation et la structure complexe, l'étude des fissures dans un propegol sera faite dans un état de contrainte plane parce qu'il est plus facile à créer expérimentalement. Si l'étude montre que les résultats de l'intégrale J pour une structure complexe, fissurée et dans un état de contrainte plane, concordent avec l'intégrale J calculée pour une éprouvette de caractérisation dans ce même état, l'applicabilité de la méthode d'analyse de l'intégrale J pour prédire la propagation d'une fissure dans un état de déformation plane ou d'autres est plus assurée.

Les objectifs de cette étude consistent à :

- Relever dans la littérature et discuter les méthodes permettant de caractériser la résistance à la rupture des matériaux composites particuliers.
- Vérifier que l'algorithme choisi pour calculer l'intégrale J dans le logiciel d'éléments finis produit des résultats exacts dans les conditions prévues dans cette étude.
- Déterminer la résistance à la rupture d'un propegol avec une éprouvette de caractérisation pour une gamme de températures et taux de déformations à l'aide d'une ou plusieurs méthodes de caractérisation.

- Concevoir une structure complexe ou la fissure est dans un état de contrainte plane afin de vérifier la concordance entre les résultats de l'intégrale J provenant de l'éprouvette de caractérisation et les résultats de l'intégrale J provenant de cette structure complexe.

1.2 Plan du mémoire

Le chapitre 2 présente la revue de la littérature. Un rappel des principes de base de la mécanique de la rupture s'y trouve. Les méthodes de caractérisation de la résistance à la rupture relevées y sont énumérées et discutées.

Au chapitre 3, on retrouve la théorie utilisée dans cette étude. Essentiellement, il sera question de la théorie de l'intégrale de contour J . On y retrouve sa définition, ses formulations, son calcul par la méthode des éléments finis ainsi que sa mesure expérimentale. Une section sera consacrée à la précision des calculs faits avec le logiciel d'éléments finis ANSYS pour obtenir l'intégrale de contour J . On trouve également dans ce chapitre une section traitant de la modélisation dans ANSYS.

Le chapitre 4 présente les résultats des expériences réalisées pour caractériser le comportement uniaxial du propergol sous des conditions de température et déformation différente. La réduction des données de contrainte et de déformation en paramètres de Ramberg-Osgood fait également partie de cette section.

Le chapitre 5 présente la procédure utilisée pour caractériser la résistance à la rupture du propergol avec les éprouvettes de caractérisation. La fabrication des éprouvettes et l'acquisition des données expérimentales sont aussi traitées. Les courbes J - R obtenues à différentes températures et taux de déformation sont présentées.

Le chapitre 6 présente la géométrie de la structure complexe conçue. Cette structure est aussi appelée l'éprouvette de validation. On y discute de sa géométrie en expliquant

comment elle a été optimisée à l'aide de ANSYS. Au chapitre 7, les résultats des essais de validation sont présentés et discutés. Les résultats de résistance J - R obtenus avec les éprouvettes de caractérisation sont ensuite comparés avec les résultats J - R obtenus avec les éprouvettes de validation.

Les conclusions de cette étude sont présentées au chapitre 8. Le chapitre 9 suggère des développements futurs pour la méthode d'analyse alors que les références se trouvent au chapitre 10.

À la fin de ce document, on trouve une série d'annexes. L'annexe A présente une théorie dont l'utilisation fut assez limitée lors de cette étude, mais qui demeure tout de même importante. Il s'agit de la théorie du Travail Essentiel de Rupture (Essential Work of Fracture). On trouve également dans cette annexe une description des expériences réalisées selon cette méthode et des graphiques présentant les résultats expérimentaux obtenus. L'annexe B présente les graphiques de toutes les données obtenues lors de la caractérisation du comportement uniaxial du propérol. Les fichiers de code APDL pour ANSYS 5.6 se trouvent aux annexes C à F.

2.0 REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

2.1 Rappel historique de la mécanique de la rupture

Il y a plusieurs siècles, Léonard de Vinci a réalisé des travaux sur la résistance de différents câbles d'acier. Il a mesuré la résistance d'échantillons de câbles et a noté que celle-ci diminue avec l'augmentation de la longueur des échantillons [3 p.11]. Puisqu'un échantillon plus long correspond à un volume de matière plus grand, la probabilité d'y retrouver des défauts augmente. L'ingénieur conclut donc que la présence de défauts dans les matériaux contrôle leur résistance. Bien que ces observations ne soient que qualitatives, elles permettent d'anticiper ce qui cause les ruptures.

Même si les défauts dans les matériaux sont généralement très petits, leur contribution à réduire la résistance globale des structures est parfois très grande. Théoriquement, la rupture d'une structure ne peut se produire sans que les contraintes au niveau atomique excèdent la force cohésive du matériau. Il semble donc que les défauts réduisent la résistance globale en augmentant les contraintes locales [3].

C'est en 1913 qu'Inglis [3 p.107] s'intéresse au phénomène de concentration des contraintes provoqué par les défauts en analysant l'effet d'un trou elliptique dans une plaque. Ses analyses sont réalisées sur une plaque possédant un trou de longueur $2a$ et de hauteur $2b$ telle qu'illustrée à la figure 2.1. Les charges sont appliquées dans la direction perpendiculaire à l'axe $2a$. Il observe alors que les contraintes à l'extrémité de l'axe $2a$ (point A) sont données par la relation :

$$\sigma_A = \sigma \left(1 + \frac{2a}{b} \right). \quad [2.1]$$

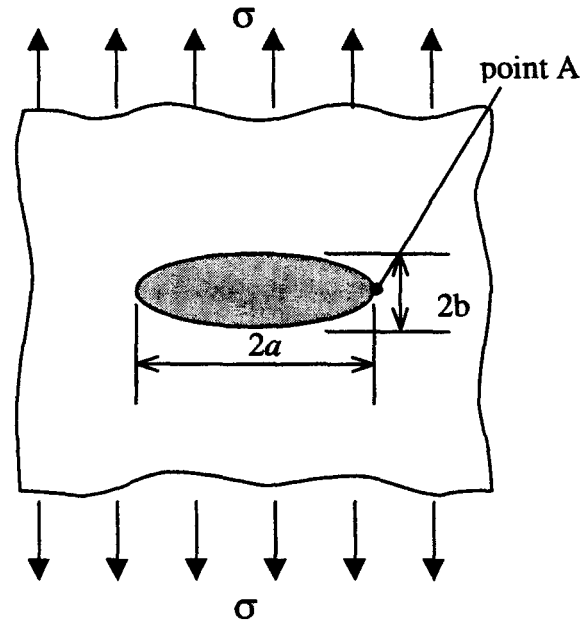


FIGURE 2.1 – Trou elliptique dans une plaque infinie

Lorsque $a \gg b$, les contraintes au point A deviennent très grandes. Dans le cas d'une fissure pointue ($b \rightarrow 0$), l'équation 2.1 prévoit des contraintes infinies. Puisqu'un matériau ne peut supporter des contraintes infinies, l'équation 2.1 suppose qu'une fissure pointue provoque la rupture d'une structure sous une charge infinitésimale. Cette observation motiva Griffith [4] à développer une théorie de rupture basée sur l'énergie plutôt que sur les contraintes locales.

Comme hypothèse de base, Griffith suppose que l'énergie totale dans une structure fissurée ne peut que diminuer ou rester stable lorsque la fissure croît. Sa théorie repose sur l'équation d'équilibre énergétique 2.2 pour un accroissement de la surface de la fissure dA .

$$\frac{dE}{dA} = \frac{d\Pi}{dA} + \frac{dW_s}{dA} = 0 \quad [2.2]$$

Où E est l'énergie totale, Π est l'énergie potentielle et W_s est le travail requis pour créer une nouvelle surface A .

C'est à partir de ce modèle que Irwin proposa en 1956 [3] une approche énergétique des ruptures nommée *taux de libération d'énergie* G (strain energy release rate). Le paramètre G est, en fait, une mesure de l'énergie disponible pour la propagation d'une fissure.

$$G = -\frac{d\Pi}{dA} \quad [2.3]$$

Ainsi, l'avancement d'une fissure se produit lorsque G atteint une valeur critique. L'expression de cette valeur critique est donnée par l'équation 2.4.

$$G_c = \frac{dW_s}{dA} \quad [2.4]$$

Pour bien comprendre le concept du *taux de libération d'énergie* G , il faut se rappeler que l'énergie potentielle d'un corps élastique est définie comme suit :

$$\Pi = U - F \quad [2.5]$$

où U est l'énergie de déformation emmagasinée dans le corps et F est le travail provoqué par les forces externes. Physiquement, le taux de libération d'énergie peut être vu comme étant le rapport entre l'énergie libérée par l'avancement d'une fissure dans une plaque soumise à un déplacement fixe dU et l'augmentation de la surface fissurée $dA = B\Delta a$. La figure 2.2 montre bien la quantité d'énergie libérée dU par une structure soumise à un étirement Δl suite à un allongement Δa de la longueur de la fissure.

Dans le cas de la figure 2.2, le taux de libération d'énergie G peut s'exprimer par l'équation suivante :

$$G = -\frac{1}{B} \left(\frac{dU}{da} \right)_{\Delta l} = -\frac{\Delta l}{2B} \left(\frac{dP}{da} \right)_{\Delta l} . \quad [2.6]$$

Où B est l'épaisseur de l'éprouvette et Δl est l'allongement de celui-ci lorsqu'il est soumis à une charge P . Pour les matériaux linéaires élastiques, le taux de libération d'énergie G peut être relié avec le coefficient d'intensité de contrainte K_I par la relation 2.7.

$$G = \frac{K_I^2}{E'} \quad [2.7]$$

Où

$$E' = E \text{ pour une structure en contrainte plane} \quad [2.8]$$

et

$$E' = \frac{E}{(1-\nu^2)} \text{ pour une structure en déformation plane} \quad [2.9]$$

et ν est le coefficient de Poisson.

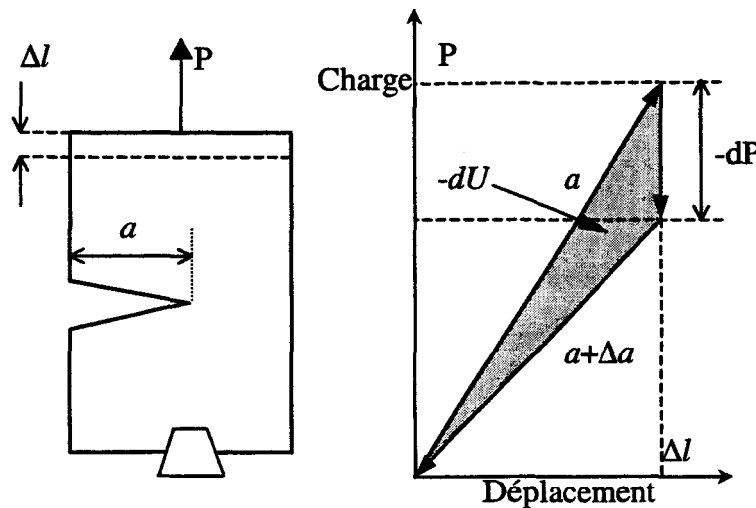


FIGURE 2.2 – Énergie libérée par un allongement Δa

Le coefficient d'intensité de contrainte K_I est un paramètre largement utilisé dans la mécanique de la rupture linéaire élastique (LEFM). Cependant, le domaine d'application de la LEFM demeure très limité puisque cette théorie n'admet que très peu de déformation plastique à la pointe d'une fissure. Même si Irwin a développé une méthode permettant d'étendre la validité du facteur d'intensité de contrainte K_I à des cas où il y a présence de déformation plastique à la pointe d'une fissure, la LEFM demeure inutilisable avec des

matériaux élastiques plastiques tels les matériaux composites particuliers comme les propergols.

C'est en adaptant le concept du taux de libération d'énergie G de Griffith au cas des matériaux non linéaires élastiques que Rice a développé l'intégrale de contour J . Rice a également montré que l'intégrale de contour J est l'équivalent du taux de libération d'énergie non linéaire [5]. La définition de l'intégrale de contour J demeure la même que celle de G et peut donc s'exprimer de la façon suivante :

$$J = - \frac{d\Pi}{dA} \quad [2.10]$$

La figure 2.3 montre la quantité d'énergie dU qui est libérée par une éprouvette d'un matériau non linéaire élastique lors de l'allongement Δa de la longueur de la fissure.

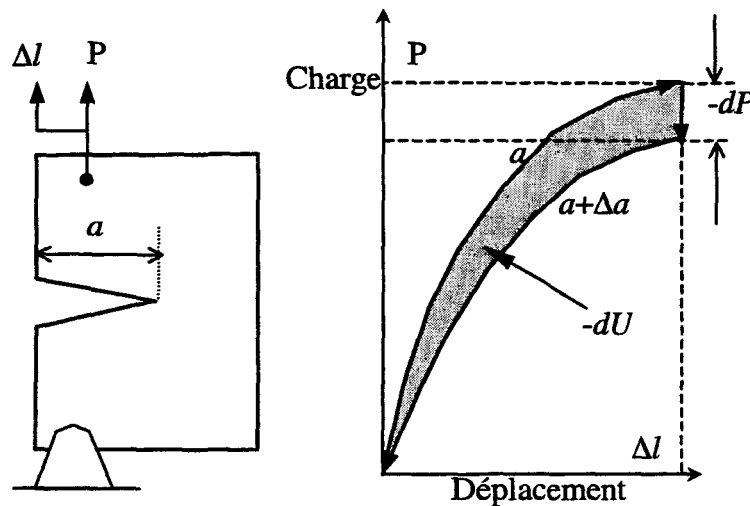


FIGURE 2.3 – Énergie libérée

La définition plus détaillée de l'intégrale de contour J fait l'objet du chapitre 3.

2.2 Méthodes de caractérisation de la résistance à la rupture

D'après ce que l'on trouve dans la littérature, il existe plusieurs méthodes de caractérisation de la résistance à la rupture. Cependant, on peut regrouper ces méthodes selon deux catégories. Les méthodes appartenant à la première catégorie se concentrent sur l'obtention d'un paramètre de rupture unique tandis que celles de la seconde catégorie permettent d'obtenir des courbes de résistance.

Les méthodes de caractérisation développées dans le but d'obtenir un paramètre de rupture unique sont présentées dans le tableau 2.1.

TABLEAU 2.1 – Méthodes à paramètre de rupture unique

Méthode	Paramètre	Unités
ASTM E813-81	J_{IC}	kJ/m^2
ASTM E813-87	J_{IC}	kJ/m^2
Méthode de l'hystérésis	J_{IC}	kJ/m^2
Travail Essentiel de Rupture	w_e	kJ/m^2

Comme on peut le remarquer, les unités de ces paramètres sont toutes les mêmes et trois de ces méthodes permettent de mesurer la valeur du même paramètre. De plus, la méthode du Travail Essentiel de Rupture (Essential Work of Fracture) permet d'obtenir un paramètre de rupture dont la valeur est sensée être la même que celle de J_{IC} pour une éprouvette de même épaisseur testée dans les mêmes conditions (température et taux de déformation). Ces paramètres de rupture sont des mesures de l'énergie par unité de surface nécessaire à l'initiation de l'avancement d'une fissure ou plutôt à la création de nouvelles surfaces. Plus de détails sur la signification de ces paramètres sont présentés un peu plus loin dans ce document.

Toujours selon la littérature, il semble qu'en Amérique, il n'existe que deux méthodes développées spécifiquement dans le but d'obtenir une courbe de résistance. Ces méthodes

sont celles de l'ASTM E1152-95 [6] (*Test Method for Determining J-R Curves*) et de l'ASTM D6068-96 [7] (*Standard Test Method for Determining J-R Curves of Plastic Materials*). Parmi les méthodes présentées dans le tableau précédent, certaines méthodes permettent également de tracer des courbes de résistance. Il s'agit des méthodes ASTM E813-81 [8] et ASTM E813-87 [9]. La seconde méthode (E813-87, *Standard Test Method for J_{IC} , A Measure of Fracture Toughness*) n'est qu'une révision de la première. Cependant, les changements apportés à la méthode originale (E813-81) ont un effet sur la valeur mesurée du paramètre J_{IC} . La dernière version de cette méthode porte le numéro E813-89 [10]. Les courbes de résistance obtenues par ces méthodes sont très courtes en terme d'allongement Δa de la longueur de la fissure. Leur usage demeure donc très limité.

Les essais normalisés E-1152 [6], D-6068 [7] et ASTM E-813 [8, 9, 10], proposent deux types d'éprouvettes à utiliser. Ces essais normalisés donnent également les équations permettant de calculer J à partir de la mesure de l'énergie dissipée et de la mesure de la longueur initiale de la fissure pour chaque type d'éprouvette.

Le premier type est l'éprouvette en flexion fissurée sur le côté (Single Edge Notched Bend). Plusieurs auteurs ont utilisé ce type d'éprouvette [11 à 26]. La figure 2.4 montre cette éprouvette ainsi que son montage. Le paramètre de Merkle-Corten η est égal à 2 pour ce type d'éprouvette. Ainsi, on peut calculer l'intégrale de contour J à partir de l'équation 2.11.

$$J = \frac{\eta U}{B(W - a_0)} = \frac{2U}{B(W - a_0)} \quad [2.11]$$

Le second type est l'éprouvette compacte en tension CT (Compact Tension). Dans la littérature, certains auteurs ont utilisé ce type d'éprouvette [26 à 28]. La figure 2.5 montre cette éprouvette. Le paramètre de Merkle-Corten η pour une éprouvette compacte en tension CT, est égal à $2 + 0.522 b_0/W$ où b_0 est la longueur du ligament non fissuré ($W - a_0$). L'équation 2.11 devient donc :

$$J = \frac{\left(2 + 0.522 \frac{b_0}{W}\right) U}{B(W - a_0)} \quad [2.12]$$

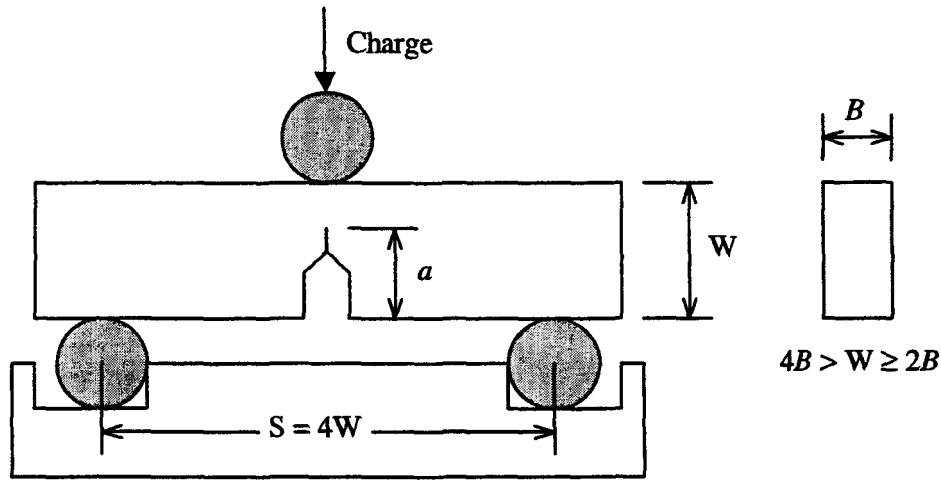


FIGURE 2.4 – Éprouvette en flexion fissurée sur le côté (SENB)

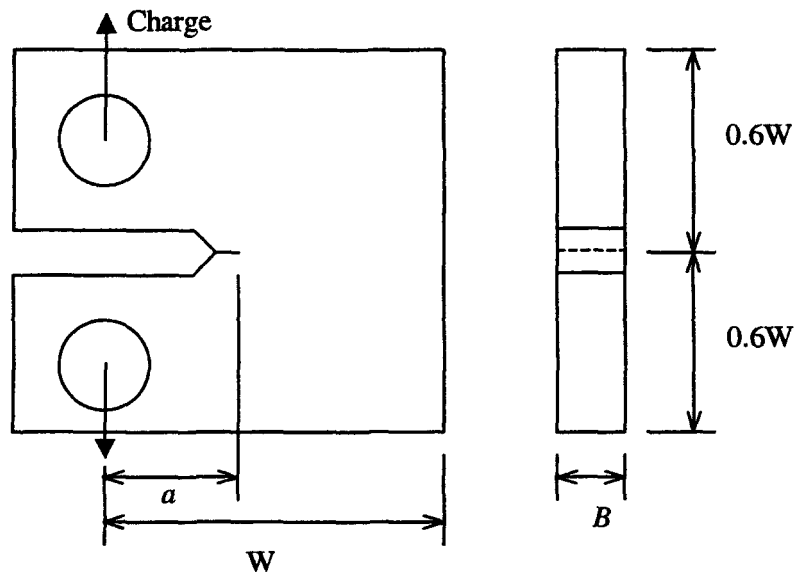


FIGURE 2.5 – Éprouvette compacte en tension (CT)

D'autres types d'éprouvette sont aussi utilisés dans la littérature. Il s'agit des panneaux M-T (fig. 3.3) [29, 30], des éprouvettes SENT (fig. 5.1) [25, 31 à 36] et DENT [24, 30, 37 à 41].

3.0 DEVELOPPEMENT THÉORIQUE

3.1 L'intégrale de contour J

L'intégrale de contour J est un concept basé sur l'énergie qui fut développé par Rice [5]. Pour un chemin arbitraire anti horaire Γ autour de la pointe d'une fissure telle que montrée à la figure 3.1, l'intégrale J est donnée par l'équation suivante :

$$J = \int_{\Gamma} \left(W dy - T_i \frac{\partial u_i}{\partial x} ds \right). \quad [3.1]$$

Où W est la densité d'énergie de déformation qui est définie par :

$$W = \int_0^{\varepsilon_{ij}} \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}, \quad [3.2]$$

et

σ_{ij} est le tenseur des contraintes;

ε_{ij} est le tenseur des déformations;

$T_i = \sigma_{ij} \cdot n_j$ est le vecteur de traction en un point du contour;

n_j est un vecteur unitaire normal au contour Γ ;

u_i est le vecteur de déplacement en un point du contour;

ds est un élément d'arc de Γ .

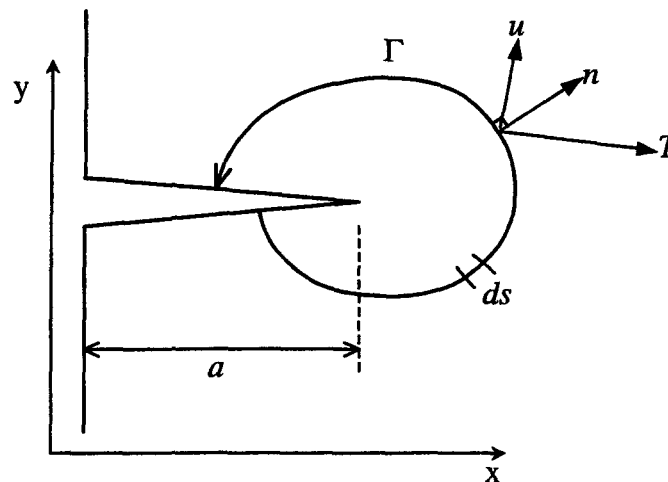


FIGURE 3.1 – Intégrale de contour J

Rice [5] a montré que la valeur de l'intégrale de contour J est indépendante du chemin d'intégration autour de la pointe de la fissure.

3.2 Calcul de l'intégrale J par la méthode des éléments finis

Il est possible de calculer l'intégrale de contour J à l'aide d'un logiciel d'éléments finis comme ANSYS même s'il n'existe pas de commande préprogrammée à cette fin. Il faut tout d'abord obtenir la solution des contraintes et des déplacements du modèle suite à l'application des charges et des conditions aux frontières. Les données de cette solution peuvent être traitées pour obtenir la valeur de l'intégrale de contour J en utilisant des commandes de post-traitement. Le calcul de l'intégrale de contour J avec ANSYS a été automatisé à l'aide d'un fichier de commande nommé Jin1 [42].

Le calcul de l'intégrale de contour J se fait en solutionnant l'équation 3.3 pour un chemin d'intégration prédéfini Γ :

$$J = \int_{\Gamma} W dy - \int_{\Gamma} \left(T_i \frac{\partial u_i}{\partial x} \right) ds . \quad [3.3]$$

Où :

$$T_i = \sigma_{ij} n_j \quad [3.4]$$

3.2.1 Étapes de calculs

Les étapes suivantes expliquent comment se fait le calcul de l'intégrale de contour J en donnant des explications à chaque étape ainsi que les commandes en langage APDL de ANSYS 5.6. Ces commandes proviennent du fichier de commande Jin1 que l'on retrouve à l'annexe C.

1. Obtenir une solution

Le calcul de l'intégrale de contour J peut s'effectuer sur n'importe quelle simulation déjà résolue. Il suffit de récupérer la solution pour débiter le traitement. La commande suivante permet de récupérer une solution existante.

```
RESUME, Solution01, db, d:\travail\ANSYS
```

2. Définir un chemin pour l'intégration

Une fois que l'on a récupéré la solution, il faut définir le ou les chemins d'intégration pour faire le calcul de l'intégrale de contour J . Lors de cette étude, six chemins d'intégration ont été définis autour des fissures. La valeur de J a été calculée pour chaque chemin et seule la moyenne a été conservée afin de réduire la quantité de données.

Les lignes qui suivent montrent comment se définit dans ANSYS un chemin faisant le tour d'une fissure située aux coordonnées cartésiennes 0,0,0.

```
LP1=NODE(2,0,0)           ! Obtention du numéro du nœud au point 1
LP2=NODE(2,2,0)           ! Obtention du numéro du nœud au point 2
LP3=NODE(-2,2,0)          ! Obtention du numéro du nœud au point 3
LP4=NODE(-2,0,0)          ! Obtention du numéro du nœud au point 4
LPATH,LP1,LP2,LP3,LP4    ! Définition d'un chemin passant par les points
                          ! 1 à 4
```

La figure 3.2 montre quatre exemples de chemins arbitraires utilisables pour calculer J .

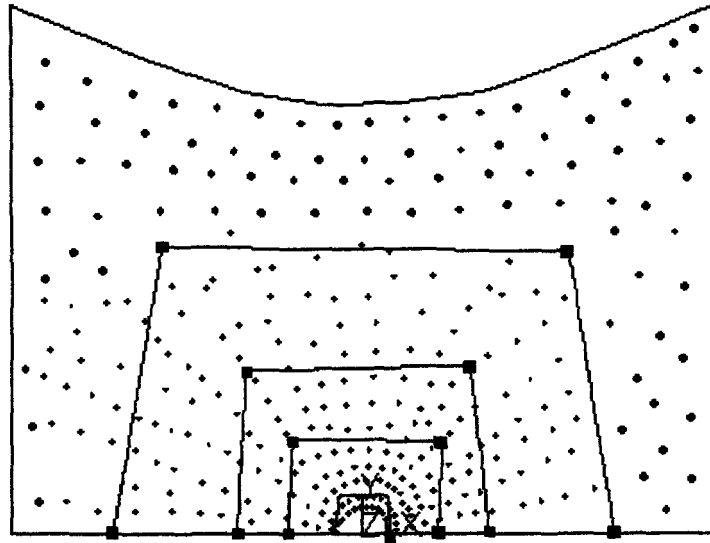


FIGURE 3.2 – Exemple de chemins arbitraires

3. Récupérer l'énergie de déformation et le volume par élément

Avant de faire l'intégration de J au long du chemin prédéfini, il faut commencer par calculer les valeurs de W , T_x , T_y , du_x/dx et du_y/dx que l'on retrouve dans l'équation 3.3. Pour faire le calcul de W , il faut tout d'abord obtenir l'énergie de déformation et le volume de chaque élément. Les lignes de commande qui suivent permettent d'inscrire ces informations dans une table d'éléments.

```
ETABLE,,SENE      ! Place l'énergie de déformation dans la table
ETABLE,,VOLU     ! Place le volume des éléments dans la table
```

4. Calculer la densité d'énergie de déformation par élément

ANSYS possède un jeu de commande permettant de faire différentes opérations arithmétiques entre les divers éléments placés dans une table d'éléments. Le calcul de la densité d'énergie de déformation W peut se calculer à l'aide de l'équation 3.5.

$$W = \frac{SENE}{VOLU} = SENE \times VOLU^{-1} \quad [3.5]$$

La ligne de commande suivante permet de calculer la densité d'énergie de déformation telle que définie dans l'équation 3.5.

```
SEXP,W,SENE,VOLU,1,-1
```


5. Interpoler la densité d'énergie de déformation sur le chemin d'intégration prédéfini.

Il est possible avec ANSYS d'interpoler le long d'un chemin les valeurs calculées aux nœuds et aux éléments voisins de celui-ci. Parmi les valeurs que l'on peut interpoler le long d'un chemin, on retrouve les déplacements en direction x , y et z (u_x , u_y et u_z) ainsi que les valeurs calculées dans les tables d'éléments telles que celles de W . La ligne de commande suivante permet d'interpoler la densité d'énergie de déformation W calculée à l'étape précédente sur le chemin d'intégration.

```
PDEF, W, ETAB, W
```

6. Intégrer par rapport à y

Lorsque la densité d'énergie de déformation est connue le long d'un chemin, on peut en faire son intégration à l'aide de la ligne de commande suivante :

```
PCALC, INTG, J, W, YG
```

7. Assigner le résultat à un paramètre.

Le résultat de l'intégration réalisée à l'étape précédente doit être conservé dans un paramètre. Ce paramètre est le premier terme de l'équation 3.3. La ligne de commande qui suit permet de lire la valeur de l'intégrale et de la placer dans une variable nommée JA par exemple.

```
*GET, JA, PATH, 0, LAST, J
```

8. Appliquer les composantes des contraintes σ_x , σ_y , et τ_{xy} sur le chemin d'intégration

Pour calculer T_i de l'équation 3.3, on utilise l'équation 3.4. Pour mieux comprendre l'équation 3.4, il est nécessaire de la décomposer. On obtient alors les équations 3.6 et 3.7.

$$T_x = \sigma_x n_x + \tau_{xy} n_y \quad [3.6]$$

$$T_y = \tau_{xy} n_x + \sigma_y n_y \quad [3.7]$$

Comme on peut le voir aux équations 3.6 et 3.7, il est nécessaire d'interpoler sur le chemin d'intégration les contraintes en direction x et y (σ_x et σ_y) ainsi que le cisaillement τ_{xy} . Les lignes de commande qui suivent permettent de faire ces interpolations.

PDEF, SX, S, X

PDEF, SY, S, Y

PDEF, SXY, S, XY

9. Déterminer un vecteur unitaire perpendiculaire au chemin d'intégration.

Les équations 3.6 et 3.7 montrent également qu'il faut connaître les composants n_x et n_y du vecteur unitaire perpendiculaire au chemin d'intégration pour calculer T_x et T_y . Pour appliquer ces composants sur le chemin, on utilise la commande suivante :

PVECT, NORM, NX, NY, NZ

10. Calculer les expressions T_x et T_y

On peut calculer les composants du vecteur de traction T_x et T_y à l'aide des équations 3.6 et 3.7. Les lignes de commandes suivantes permettent de faire ces calculs.

PCALC, MULT, TX1, SX, NX ! Premier terme de l'équation 3.6

PCALC, MULT, TX2, SXY, NY ! Second terme de l'équation 3.6

PCALC, ADD, TX, TX1, TX2 ! Addition des deux termes

PCALC, MULT, TY1, SXY, NX ! Premier terme de l'équation 3.7

PCALC, MULT, TY2, SY, NY ! Second terme de l'équation 3.7

PCALC, ADD, TY, TY1, TY2 ! Addition des deux termes

11. Déplacer le chemin d'intégration

Pour calculer les dérivées du vecteur de déplacement (du_x/dx et du_y/dx) que l'on retrouve dans le second terme de l'équation 3.3, il faut déplacer le chemin d'intégration d'un léger incrément (dx) dans les directions positive et négative de x . Pour faire cela, il faut suivre les sous-étapes suivantes :

- On calcule la distance de déplacement du chemin. On peut raisonnablement déplacer le chemin de 0.1% de sa longueur totale.

```
*GET, DX, PATH, 0, LAST, S
```

```
DX=DX/1000
```

- On déplace le chemin d'une distance $-dx/2$ sur l'axe x et on applique le déplacement u_x et u_y sur le chemin. On peut nommer ces déplacements UX1 et UY1 par exemple.

```
PCALC, ADD, XG, XG, , , , -DX/2
```

```
PDEF, UX1, U, X
```

```
PDEF, UY1, U, Y
```

- On déplace à nouveau le chemin d'une distance dx dans la direction positive de x (ce qui veut dire $+dx/2$ par rapport à la position originale). On applique ensuite les déplacements u_x et u_y sur le chemin. On peut nommer ces déplacements UX2 et UY2.

```
PCALC, ADD, XG, XG, , , , DX
```

```
PDEF, UX2, U, X
```

```
PDEF, UY2, U, Y
```

- On replace le chemin à sa position originale et on calcule les quantités $(UX2-UX1)/dx$ et $(UY2-UY1)/dx$. On peut nommer ces quantités C1 et C2 par exemple.

```
PCALC, ADD, XG, XG, , , , -DX/2
```

```
C=1/DX
```

```
PCALC, ADD, C1, UX2, UX1, C, -C
```

```
PCALC, ADD, C2, UY2, UY1, C, -C
```

12. Intégrer le second terme de l'équation 3.3

En utilisant les quantités calculées aux étapes 10 et 11, on calcule le terme entre parenthèses de l'équation 3.3 et on intègre le résultat par rapport à un incrément de distance ds sur le chemin. Cette intégration nous donne le second terme de l'équation 3.3.

```
PCALC, MULT, C1, TX, C1
PCALC, MULT, C2, TY, C2
PCALC, ADD, C1, C1, C2
PCALC, INTG, J, C1, S
```

13. Calculer J

Une fois les 12 étapes précédentes complétées, il ne reste plus qu'à soustraire les deux termes de l'équation 3.3 pour obtenir la valeur de l'intégrale de contour J . Les lignes de commande suivante permettent de faire cette opération.

```
*GET, JB, PATH, 0, LAST, J
JINT=JA-JB
```

3.3 Vérification de la macro Jin1

Dans le but de vérifier le bon fonctionnement de la macro Jin1 réalisée pour calculer l'intégrale de contour J , nous avons simulé le cas d'un panneau mince fissuré au centre (panneau M-T). Puisqu'il existe des équations analytiques pour calculer J dans le cas du panneau M-T [3], nous avons comparé les résultats de simulations aux valeurs obtenues à l'aide de ces équations. Une fois que la macro Jin1 est validée, nous pouvons l'utiliser avec ANSYS pour analyser d'autres géométries même s'il n'existe pas d'équations analytiques pour réduire les données expérimentales en valeurs de J . La figure 3.3 montre le cas utilisé en simulation avec ANSYS.

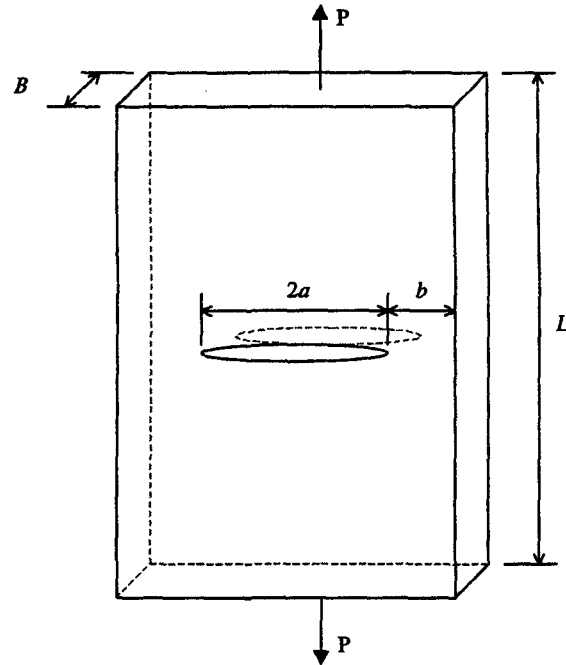


FIGURE 3.3 – Panneau M-T

3.3.1 Solutions analytiques

Les solutions analytiques permettant de calculer J séparent cette valeur en deux composantes.

$$J_{tot} = J_{el} + J_{pl} \quad [3.8]$$

Où

J_{tot} = énergie totale de rupture (J/m^2),

J_{el} = portion élastique de l'énergie de rupture (J/m^2),

J_{pl} = portion plastique de l'énergie de rupture (J/m^2).

La portion élastique J_{el} est calculée en utilisant une équation provenant de la mécanique linéaire de la rupture.

$$J_{el} = \frac{K_I^2(a_{eff})}{E'} \quad [3.9]$$

Où $K_I^2(a_{eff})$ est le coefficient d'intensité de contrainte calculé pour une fissure de longueur efficace a_{eff} et E' est donné par une des expressions suivantes :

$$E' = E \text{ en contrainte plane,} \quad [3.10]$$

$$E' = \frac{E}{(1-\nu^2)} \text{ en déformation plane.} \quad [3.11]$$

Le coefficient d'intensité de contrainte pour un panneau M-T est donné par les équations 3.12 et 3.13.

$$K_I(a_{eff}) = \frac{P}{B\sqrt{W}} f(a_{eff}/W) \quad [3.12]$$

$$f(a_{eff}/W) = \sqrt{\frac{\pi a_{eff}}{4W} \sec \frac{\pi a_{eff}}{2W} \left[1 - 0.025 \left(\frac{a_{eff}}{W} \right)^2 + 0.006 \left(\frac{a_{eff}}{W} \right)^4 \right]} \quad [3.13]$$

Où

P = force appliquée (N),

B = épaisseur de l'éprouvette (m),

W = largeur de l'éprouvette (m),

a_{eff} = longueur effective de la fissure (m).

Les déformations plastiques à la pointe de la fissure ont pour effet de diminuer sa longueur apparente. On peut tenir compte de ces déformations en calculant la longueur effective de la fissure à l'aide de l'équation 3.14.

$$a_{eff} = a + \frac{1}{1 + (P/P_0)^2} \frac{1}{\beta\pi} \left(\frac{n-1}{n+1} \right) \left(\frac{K_I(a)}{\sigma_0} \right) \quad [3.14]$$

Où

$P_0 = 2Bb \sigma_0$ (N),

b = longueur du ligament non fissuré (m),

n = paramètre de Ramberg-Osgood (-),

σ_0 = contrainte de référence (Pa),

$\beta = 2$ pour l'état plan de contraintes et 6 pour l'état plan de déformations (-),
 $K_I(a)$ = coefficient d'intensité de contrainte à une longueur de fissure a (Pa-√m).

Pour calculer J_{el} , il faut tout d'abord calculer K_I à partir d'une longueur de fissure a dans les équations 3.12 et 3.13. Ensuite, la longueur effective a_{eff} doit être calculée à l'aide de l'équation 3.14. La valeur finale de K_I est recalculée en utilisant la valeur de a_{eff} dans les équations 3.12 et 3.13. Cette nouvelle valeur de K_I est finalement substituée dans l'équation 3.9 pour obtenir J_{el} .

La portion plastique J_{pl} est calculée en utilisant l'équation 3.15.

$$J_{pl} = \alpha \varepsilon_0 \sigma_0 \frac{ba}{W} h_1 \left(\frac{a}{W}, n \right) \left(\frac{P}{P_0} \right)^{n+1} \quad [3.15]$$

Où

α, n = paramètres de Ramberg-Osgood (-),

ε_0 = déformation de référence (-),

σ_0 = contrainte de référence (Pa),

W = largeur de l'éprouvette (m),

a = longueur de la fissure (m),

$P_0 = 2Bb\sigma_0$ (N),

P = force appliquée (N),

h_1 = facteur géométrique évalué à a/W et n (-).

Le facteur géométrique h_1 a été calculé par élément finis pour une série de rapport a/W et de paramètre de matériau n . Ces facteurs se trouvent dans des tableaux donnés à la référence [3]. Pour un paramètre de matériau n de 5.0 et pour un état plan de contraintes, on retrouve les valeurs données dans le tableau 3.1.

TABLEAU 3.1 – Facteur géométrique h_I pour $n = 5$, état plan de contraintes.

a/W	h_I
0.125	4.47
0.250	3.20
0.375	2.35
0.500	1.81
0.625	1.41
0.750	1.21
0.875	1.08

3.3.2 Modèle ANSYS

Pour simplifier la modélisation du panneau M-T, nous avons fait un usage approprié de sa symétrie. Ainsi, seulement le quart du modèle a été modélisé. Le nombre total d'éléments étant plus petit, cela réduit le temps de calcul. La figure 3.4 montre le modèle utilisé.

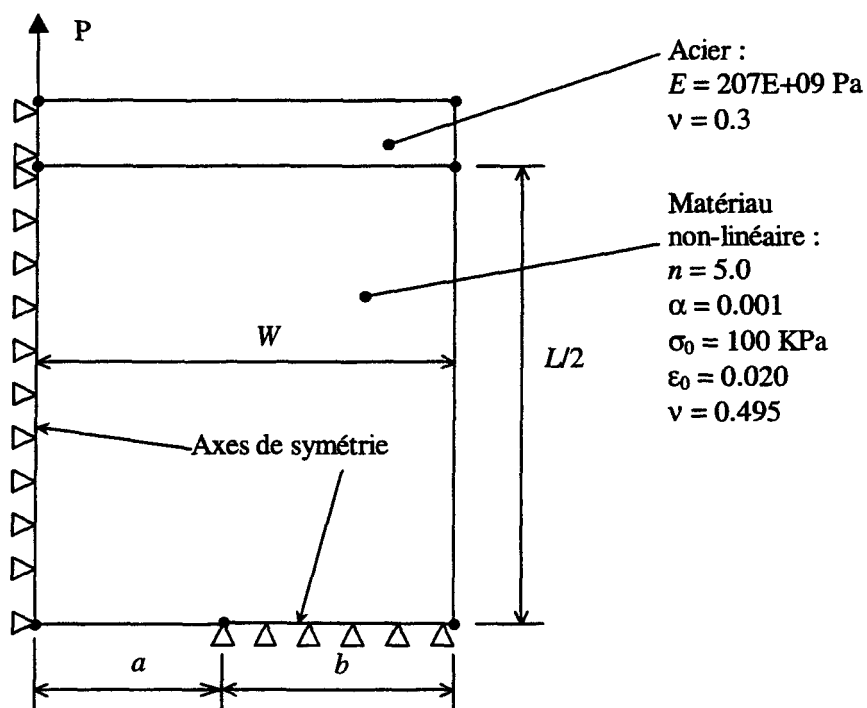


FIGURE 3.4 – Quart de panneau M-T

Comme on peut le voir sur la figure 3.4, deux matériaux sont présents dans le modèle. Le premier matériau a un comportement mécanique non linéaire imitant quelque peu le comportement du propergol. Le second matériau est une plaque d'acier que nous avons ajoutée afin de pouvoir appliquer une charge de tension ponctuelle P sans créer de grandes déformations locales. Les propriétés attribuées aux matériaux sont résumées dans le tableau 3.2.

TABLEAU 3.2 – Propriétés des matériaux

Matériau	Propriétés
Non linéaire	$\alpha = 0.001$ $n = 5.0$ $\sigma_0 = 100 \text{ kPa}$ $\epsilon_0 = 20.0E-03$ $E = 5.0 \text{ GPa}$ $\nu_{\text{panneau}} = 0.495$
Acier	$E = 207 \text{ GPa}$ $\nu_{\text{acier}} = 0.300$

Les variables α , n , σ_0 et ϵ_0 sont des paramètres de la loi de comportement de Ramberg-Osgood. Cette loi de comportement est présentée en détail au chapitre 4. Ces paramètres sont transformés dans une forme utilisable dans ANSYS à l'aide d'un fichier Excel qui calcule 50 points de la courbe de traction. Les données sont présentées dans un fichier texte dont le format est directement lisible par ANSYS. Ce fichier se nomme MATTEST.IN et il est présenté à l'annexe D.

Les propriétés non linéaires présentées dans le tableau 3.2 ont été choisies afin de ressembler aux propriétés du propergol dans au moins 2 conditions soit 22°C et 2 mm/min et 50°C et 20 mm/min. Les propriétés mécaniques du propergol sont caractérisées au chapitre 4. La figure 3.5 montre bien la ressemblance entre les propriétés du propergol et celles créées pour valider la macro Jin1.

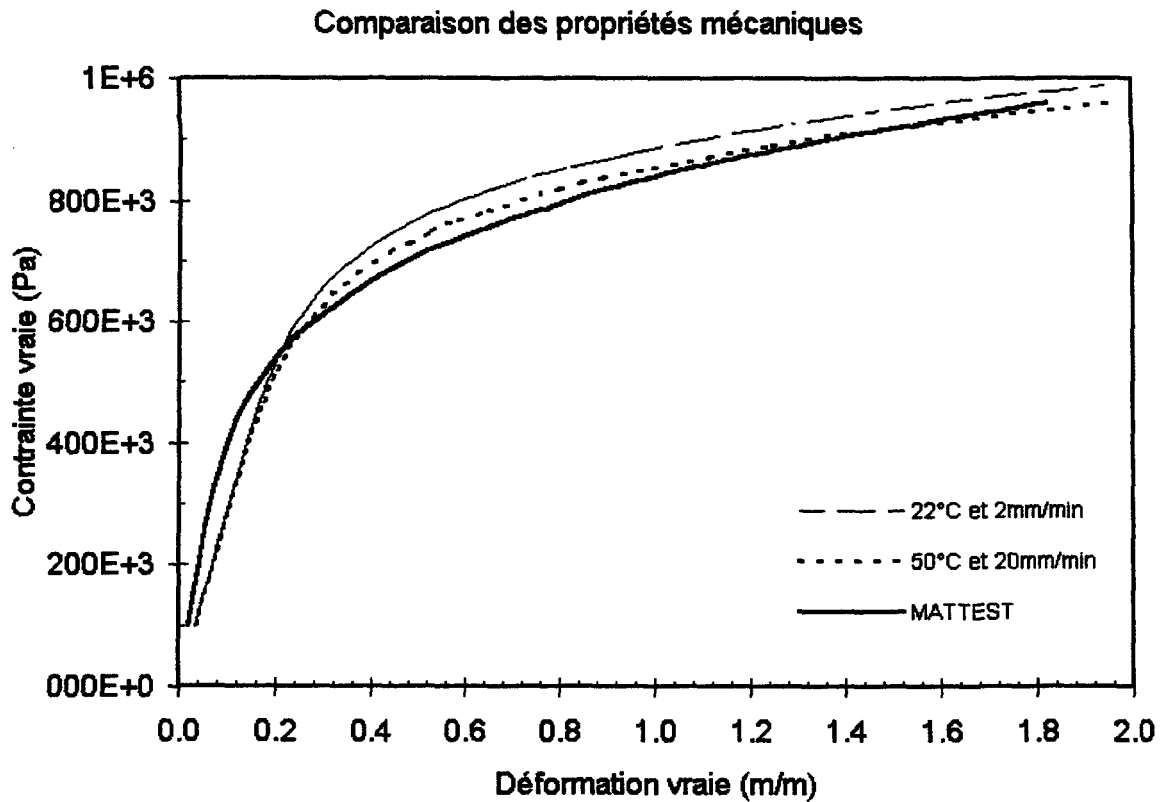


FIGURE 3.5 – Comparaison des propriétés mécaniques

3.3.3 Résultats

Le panneau simulé a une largeur W de 40 mm, une longueur de 100 mm et une épaisseur de 12.7 mm tout comme les éprouvettes que nous avons utilisés pour caractériser la résistance à la rupture. Les tableaux 3.3, 3.4 et 3.5 présentent les résultats obtenus pour des charges appliquées de 200, 50 et 10 N respectivement.

TABLEAU 3.3 – Résultats (analytiques et numériques) avec P = 200 N

a/W	a	b	$J_{el}(a_{eff})$	J_{pl}	J_{tot}	J_{tot} (ANSYS)	Erreur %
0,125	0,005	0,035	152,326E+0	5,071E+0	157,397E+0	154,455E+0	-1,87
0,250	0,010	0,030	318,701E+0	15,692E+0	334,393E+0	324,896E+0	-2,84
0,375	0,015	0,025	528,079E+0	43,014E+0	571,093E+0	546,946E+0	-4,23
0,500	0,020	0,020	827,194E+0	134,805E+0	961,999E+0	912,376E+0	-5,16
0,625	0,025	0,015	1,318E+3	553,160E+0	1,871E+3	1,824E+3	-2,52
0,750	0,030	0,010	2,302E+3	4,326E+3	6,628E+3	6,617E+3	-0,16
0,875	0,035	0,005	5,279E+3	144,142E+3	149,421E+3	150,621E+3	0,80

TABLEAU 3.4 – Résultats (analytiques et numériques) avec P = 50 N

a/W	a	b	$J_{el}(a_{eff})$	J_{pl}	J_{tot}	J_{tot} (ANSYS)	Erreur %
0,125	0,005	0,035	8,256E+0	1,238E-3	8,257E+0	8,780E+0	6,33
0,250	0,010	0,030	17,593E+0	3,831E-3	17,597E+0	18,239E+0	3,65
0,375	0,015	0,025	29,577E+0	10,501E-3	29,587E+0	29,545E+0	-0,14
0,500	0,020	0,020	47,082E+0	32,911E-3	47,115E+0	45,175E+0	-4,12
0,625	0,025	0,015	76,683E+0	135,049E-3	76,818E+0	71,171E+0	-7,35
0,750	0,030	0,010	137,827E+0	1,056E+0	138,883E+0	126,815E+0	-8,69
0,875	0,035	0,005	325,466E+0	35,191E+0	360,657E+0	343,609E+0	-4,73

TABLEAU 3.5 – Résultats (analytiques et numériques) avec P = 10 N

a/W	a	b	$J_{el}(a_{eff})$	J_{pl}	J_{tot}	J_{tot} (ANSYS)	Erreur %
0,125	0,005	0,035	311,109E-3	79,233E-9	311,109E-3	346,898E-3	11,50
0,250	0,010	0,030	659,413E-3	245,195E-9	659,414E-3	722,042E-3	9,50
0,375	0,015	0,025	1,096E+0	672,089E-9	1,096E+0	1,172E+0	6,86
0,500	0,020	0,020	1,715E+0	2,106E-6	1,715E+0	1,792E+0	4,52
0,625	0,025	0,015	2,726E+0	8,643E-6	2,726E+0	2,811E+0	3,10
0,750	0,030	0,010	4,785E+0	67,589E-6	4,785E+0	4,899E+0	2,37
0,875	0,035	0,005	11,467E+0	2,252E-3	11,469E+0	11,483E+0	0,12

En observant ces résultats, on peut voir que la plus grande erreur relative mesurée entre les valeurs de J calculées par ANSYS et celles calculées à l'aide des équations analytiques est

de 11.50%. Il faut constater que cette erreur apparaît lorsque la charge P est aussi faible que 10 N (tableau 3.5). À cette charge, l'intégrale de contour J calculée par les équations analytiques est très petite et il est donc plus facile de faire une grande erreur relative même si l'erreur absolue est faible. Cette affirmation peut être vérifiée en regardant les résultats obtenus lorsque la charge appliquée P est égale à 200 N (tableau 3.3). On peut voir que l'erreur relative est plus faible dans ce cas.

3.4 Mesure expérimentale de J

C'est par une série d'articles [43, 44, 45] que Landes et Begley contribuent au développement d'une première méthode expérimentale pour mesurer la valeur critique J_{IC} . Leur technique nécessite l'utilisation de plusieurs éprouvettes. Ces éprouvettes doivent également avoir une fissure initiale de longueur différente. La préparation des éprouvettes doit par conséquent être plus difficile à cause de la nécessité de tailler des fissures de longueurs différentes dans chacun des éprouvettes. Cette première méthode ne permet pas de tracer une courbe de résistance J - R .

Rice, Paris et Merkle [46] développent plus tard une méthode améliorée pour mesurer expérimentalement J_{IC} . Cette nouvelle méthode permet de relier par une équation J et l'aire sous la courbe de traction qui est l'énergie. Pour une éprouvette en flexion 3 points, ils trouvèrent l'équation 3.16.

$$J = \frac{2}{Bb_0} \int_0^{\Delta l} Pd\Delta l \quad [3.16]$$

Où

B = épaisseur de l'éprouvette,

b_0 = longueur initiale du ligament non fissuré,

P = charge appliquée à l'éprouvette,

Δl = allongement de l'éprouvette.

Merkle et Corten [47] montrent qu'une correction à l'équation 3.16 est nécessaire afin d'accommoder les éprouvettes compactes en tension (CT) ainsi que d'autres types d'éprouvettes qui ne sont pas soumis à une flexion pure. La correction à utiliser est fonction de la longueur du ligament non fissuré b_0 , de la charge appliquée P et du déplacement Δl . L'effet de cette correction fut de remplacer le 2 dans l'équation 3.16 par un paramètre η qui dépend de la géométrie de l'éprouvette. Normalement, la valeur de η se situe entre 1.0 et 2.4.

Dans les essais normalisés ASTM, on calcule J à l'aide de l'équation 3.17.

$$J = \frac{\eta U}{B(W - a_0)} \quad \text{où } U = \int_0^{\Delta l} P d\Delta l \quad [3.17]$$

où η est le paramètre de Merkle-Corten [47] et a_0 est la longueur initiale de la fissure. Nous verrons plus tard au chapitre 5 que la valeur du paramètre de Merkle-Corten est connue pour les éprouvettes normalisées par ASTM mais ne s'applique pas aux éprouvettes utilisées dans cette étude. Les paramètres de Merkle-Corten peuvent être déduits si l'intégrale J , l'énergie emmagasinée et la géométrie de l'éprouvette sont connus.

4.0 CARACTÉRISATION DU COMPORTEMENT UNIAXIAL

La caractérisation du comportement uniaxial d'un matériau est essentielle à toute analyse de contrainte sur une structure. Cette caractéristique est généralement mesurable en étirant à l'aide d'une machine d'essai de traction une éprouvette dont la longueur initiale et la section sont connues. Les données recueillies permettent ensuite de tracer une courbe de traction.

D'après ce que l'on peut lire dans le rapport de Erickson et Wong [2], la caractérisation d'un propergol a déjà été réalisée au CRDV. Les résultats présentés dans ce rapport ont servi de guide pour déterminer les paramètres d'expérience à utiliser lors de cette nouvelle étude.

Le type d'éprouvette que nous avons utilisé pour caractériser le comportement mécanique du propergol est le JANNAF de classe C (Joint Army Navy NASA Air Force) [48]. C'est d'ailleurs le type d'éprouvette qui est souvent utilisé dans la littérature lorsqu'il est question de propergol. La figure 4.1 montre une éprouvette de type JANNAF classe C.

Le propergol est un matériau composite particulière constitué d'une matrice et de particules. La matrice du propergol que nous avons utilisé est faite d'un polymère polybutadiène à terminaisons hydroxyles (PBHT). Les particules d'oxydants sont de type perchlorate d'ammonium avec une distribution de taille tri-modale de 17, 200 et 400 microns. Ces oxydants ont été mélangés avec le polymère pour avoir un composite avec 87% de volume de particules par rapport à 13% de volume de polymère. Le propergol à l'état visqueux est chauffé à 60°C pour créer un réseau de polymère réticulé. C'est ce réseau réticulé qui donne au propergol son comportement caoutchouteux et viscoélastique.

Les éprouvettes JANNAF sont utilisées sans extensomètre. Certains calculs sont par contre nécessaires pour obtenir l'allongement réel de la partie uniforme de l'éprouvette. La longueur efficace de cette éprouvette est de 86,49 mm [48]. Ainsi, avec un déplacement du

tablier de 8,65 mm, une déformation de 10% est calculée en divisant le déplacement par la longueur efficace.

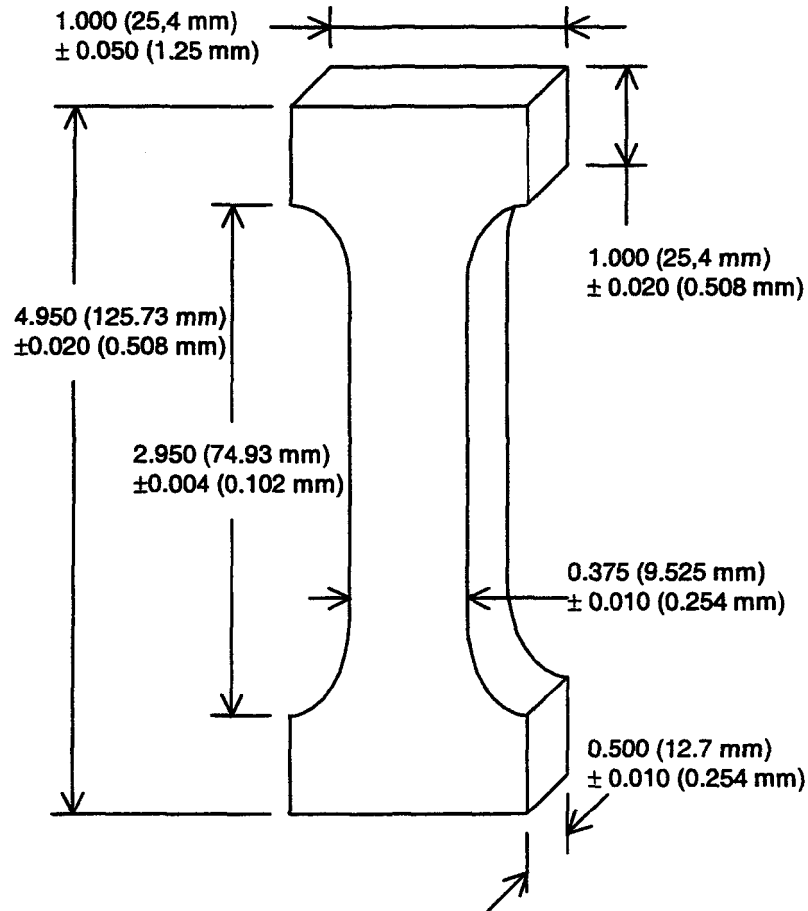


FIGURE 4.1 – Éprouvette de type JANNAF classe C

4.1 Les températures et les vitesses de déplacement du tablier

La plage de température utilisée dans la première étude [2] allait de -50°C à $+50^{\circ}\text{C}$. Les températures qui furent utilisées étaient de -50°C , -45°C , -30°C , $+22^{\circ}\text{C}$ et $+50^{\circ}\text{C}$. Les températures choisies dans cette nouvelle étude sont de -40°C , -30°C , -10°C , $+22^{\circ}\text{C}$ et $+50^{\circ}\text{C}$.

Les vitesses de déplacement du tablier qui furent utilisées par Erickson et Wong [2] étaient de 5, 50 et 500 mm/min. Ces valeurs sont justifiées du fait que le comportement mécanique du propergol varie peu pour une variation faible du taux de déformation. En fait, passer de 5 mm/min à 10 mm/min ne serait pas suffisant pour que l'on note un véritable changement du comportement uniaxial. C'est pour cette raison qu'il est important d'utiliser un rapport aussi élevé que 10 entre deux vitesses de déplacement des mâchoires.

Dans la littérature, plusieurs auteurs tels que Chang-Bing [14, 15], Hashemi [12, 37], Heino [38], Marchal [40] et Ming-Luen [17, 19] ont utilisé une vitesse de déplacement du tablier de 2 mm/min sur des éprouvettes d'environ 100 mm de long. Cette vitesse est utilisée si souvent que cela semble être devenu un standard. Pour cette raison, nous avons utilisé cette valeur à la place de 5 mm/min.

Puisque la vitesse maximale du déplacement du tablier de la machine d'essai de traction que nous avons utilisée est de 500 mm/min, il est préférable d'utiliser une vitesse plus lente. Les essais réalisés à une vitesse plus lente vont prendre plus de temps. Notre système vidéo utilisé dans la section 5.3.2 sera donc en mesure de suivre plus adéquatement la progression de la fissure au cours de l'essai; l'enregistreur vidéo ne pouvant conserver que 30 images par seconde. En fait, on peut tracer les courbes *J-R* avec plus de précision si on possède un plus grand nombre d'images.

Pour les raisons mentionnées dans les paragraphes précédents, les vitesses de déplacement du tablier choisies sont 2, 20 et 200 mm/min. Le tableau 4.1 présente les neuf combinaisons de conditions expérimentales qui ont été utilisées pour caractériser le comportement uniaxial du propergol. Chaque condition a fait l'objet de 3 essais. Ainsi, 27 essais ont été réalisés au total.

Afin de mesurer l'effet de la température sur le comportement uniaxial, il est préférable de couvrir la plage des températures allant de -40°C à $+50^{\circ}\text{C}$. Pour diminuer le nombre d'essais à réaliser, nous avons utilisé uniquement la vitesse de déplacement du tablier de 20 mm/min. Cette vitesse permet de réaliser les essais dans un temps raisonnable.

TABLEAU 4.1 – Conditions de caractérisation du comportement uniaxial

Vitesse du tablier	-40°C	-30°C	-10°C	+22°C	+50°C
2 mm/min		X		X	
20 mm/min	X	X	X	X	X
200 mm/min		X		X	

Pour être en mesure de quantifier l'effet du taux de déformation, il est bon d'utiliser les trois vitesses de déplacement du tablier. Toujours dans le but de réduire le nombre d'expériences à réaliser, nous avons utilisé seulement deux températures, soit +22°C et -30°C.

4.2 Comportement uniaxial mesuré

Le comportement uniaxial du propergol a été mesuré sur une machine d'essai de traction de marque « Instron » modèle 4222R. Au cours des essais sur les éprouvettes JANNAF, la charge et l'allongement ont été mesurés à des intervalles de temps très rapprochés. Les taux d'acquisition des données varient entre 10 et 20 points par secondes. Les données récoltées permettent de tracer la courbe de traction de chaque éprouvette.

À partir de la mesure de la section originale de l'éprouvette et de la charge appliquée, on peut calculer les contraintes de l'ingénieur. Ces contraintes s'expriment en Pascal (N/m²) et ne tiennent pas compte du changement de section lors de l'essai de traction. La contrainte de l'ingénieur est donnée par la relation 4.1.

$$\sigma = P/A_0 \quad [4.1]$$

où P est la charge de tension appliquée et A_0 est la section initiale de l'éprouvette.

À partir des mesures de l'allongement obtenues lors des essais de traction et de la longueur initiale de l'éprouvette, on peut calculer sa déformation. Puisque le calcul de cette déformation est très simple et que d'autres phénomènes tels que les changements de section et de volume ne sont pas pris en compte, on nomme cette déformation « la déformation de l'ingénieur ». La déformation de l'ingénieur est donnée par l'équation 4.2.

$$e = \frac{\Delta L}{L_0} \quad [4.2]$$

Où ΔL est l'allongement et L_0 est la longueur initiale de l'éprouvette.

4.3 Transformations en contraintes vraies et déformations vraies

Les logiciels d'éléments finis, tels ANSYS, utilisent les contraintes et déformations vraies plutôt que les contraintes et déformations de l'ingénieur. C'est parce qu'elles représentent le « vrai » comportement mécanique du matériau que ces logiciels utilisent ces quantités. Il est donc nécessaire de transformer les données mesurées lors des essais de traction en contraintes vraies et déformations vraies. Pour ce faire, on utilise les équations 4.3 et 4.4.

$$\varepsilon = \int_{L_0}^{L_f} \frac{\Delta L}{L} = \ln(1 + e) \quad [4.3]$$

Où ε est la déformation vraie et e est la déformation de l'ingénieur.

La relation entre la contrainte de l'ingénieur et la contrainte vraie est habituellement basée sur un comportement incompressible. Puisque le propergol est un matériau composite particulière, son comportement compressible a été pris en compte par le biais d'un paramètre de dilatation volumique $\Delta V/V$ [49].

$$\sigma_r = \frac{\sigma(1+e)}{1+(\Delta V/V)} \quad [4.4]$$

où

- σ_T = contrainte vraie [Pa],
 σ = contrainte de l'ingénieur [Pa],
 e = déformation de l'ingénieur [m/m],
 $\Delta V/V$ = dilatation volumique moyenne (0.03) [m³/m³].

La figure 4.2, montre le comportement uniaxial mesuré lors des différents essais de traction. Il faut noter que les données de contraintes et de déformations ont été transformées en contraintes vraies et en déformations vraies. Les courbes de traction en pointillés sont les courbes obtenues à chacun des essais. Les courbes en ligne continue avec des points sont celles obtenues par le lissage de l'ensemble des données recueillies pour chaque condition de test. Il est important de mentionner que ce lissage est absolument nécessaire pour définir les propriétés non linéaires du propergol dans ANSYS. Les résultats obtenues pour chaque éprouvette se trouvent également dans l'annexe B.

On peut remarquer à la figure 4.2 que le propergol est un matériau dont le comportement mécanique dépend grandement de la température et de la vitesse de déplacement du tablier auxquelles il est testé. Règle générale, on peut dire que plus il est froid, plus les contraintes sont grandes pour une déformation donnée. On peut également dire que plus la vitesse de déplacement du tablier est grande plus les contraintes sont grandes pour une déformation donnée.

Certaines combinaisons de température et de vitesse de déplacement du tablier peuvent reproduire un comportement mécanique semblable. C'est d'ailleurs le cas pour les éprouvettes caractérisées à 22°C et 2 mm/min et celles caractérisées à 50°C et 20 mm/min.

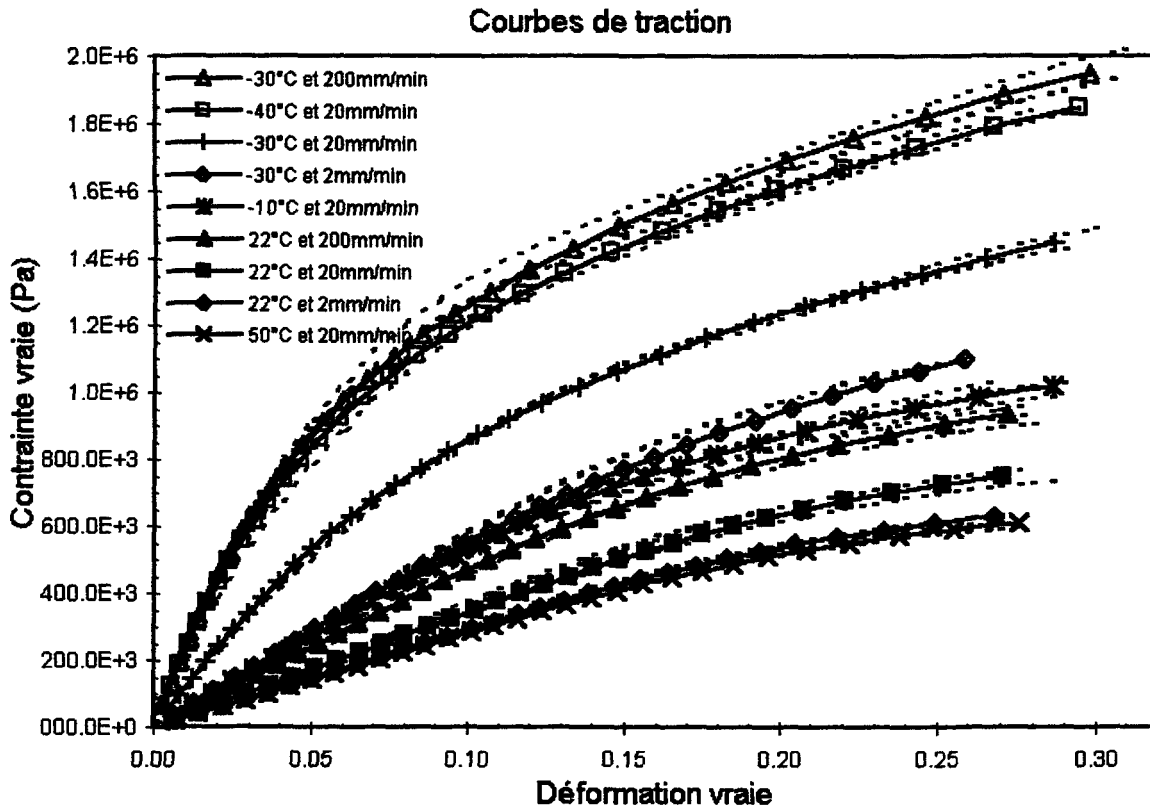


FIGURE 4.2 – Courbes de traction

4.4 Lissage et paramètres de Ramberg-Osgood

Tel que mentionné plutôt, un lissage des données obtenues par les essais de traction a été effectué. Pour faire ce lissage, nous avons utilisé le logiciel Table Curve 2D avec la loi de comportement de Ramberg-Osgood [50]. Cette loi est donnée par l'équation 4.5.

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{\sigma}{\sigma_0} + \alpha \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n \quad [4.5]$$

Où

ε = déformation vraie [m/m],

σ = contrainte vraie [Pa],

- ε_0 = déformation vraie de référence [m/m],
 σ_0 = contrainte vraie de référence [Pa],
 α, n = paramètres de Ramberg-Osgood [-].

Nous avons choisi d'utiliser cette loi de comportement parce que les formules qui existent dans la littérature [3] pour calculer l'intégrale de contour J pour certains types d'éprouvettes utilisent les paramètres de Ramberg-Osgood. Pour effectuer les régressions non linéaires que ces lissages imposent, le logiciel Table Curve 2D utilise l'algorithme de Levenberg-Marquardt [51].

Avant de faire le lissage, nous avons d'abord déterminé les valeurs de σ_0 et ε_0 . Pour ce faire nous avons calculé le module de Young de toutes les éprouvettes en faisant une régression linéaire. Cette régression a été effectuée sur les portions de données situées entre 100 et 200 kPa des courbes présentant la contrainte-vraie en fonction de la déformation-vraie. Les données situées entre 0 et 100 kPa ont été supprimées puisque dans cette plage de donnée, les déformations enregistrées sont faussées. En fait, il existe toujours un jeu entre l'éprouvette et la mâchoire qui le retient à la machine d'essais de traction.

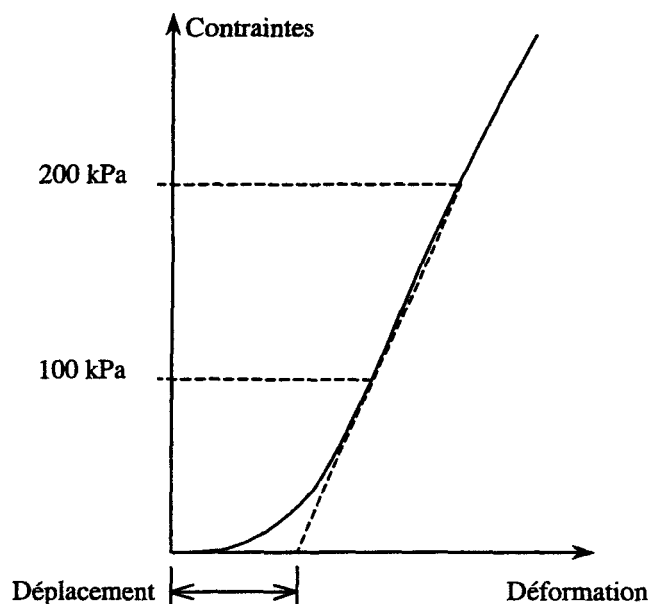


FIGURE 4.3 – Déplacement des courbes de traction

Lorsque l'on commence les essais, ce jeu est repris et les données de déformation sont exagérées. Les données supprimées ont été remplacées par une série de points calculés à l'aide du module de Young évalué entre 100 et 200 kPa. Pour assurer que la courbe commence bien à l'origine, nous avons du faire un déplacement tel que montré à la figure 4.3. La valeur de σ_0 a été évaluée à 100 kPa et ϵ_0 est calculé en divisant σ_0 par le module de Young moyen mesuré. Le tableau 4.2 montre les modules de Young calculés pour chaque éprouvette.

TABLEAU 4.2 – Module de Young et ϵ_0

Temp.	Vitesse (mm/min)	Module de Young (Pa)				σ_0	ϵ_0
		Test1	Test2	Test3	Moyenne		
22	2	2.944E+6	2.842E+6	2.924E+6	2.903E+6	100.000E+3	0.034443
22	20	3.456E+6	3.210E+6	3.607E+6	3.424E+6	100.000E+3	0.029202
22	200	4.986E+6	4.486E+6	4.830E+6	4.767E+6	100.000E+3	0.020977
50	20	2.779E+6	2.780E+6	2.867E+6	2.809E+6	100.000E+3	0.035602
-10	20	5.182E+6	5.427E+6	5.557E+6	5.389E+6	100.000E+3	0.018558
-30	2	5.095E+6	6.242E+6	5.980E+6	5.772E+6	100.000E+3	0.017324
-30	20	11.765E+6	11.730E+6	12.558E+6	12.018E+6	100.000E+3	0.008321
-30	200	24.987E+6	23.514E+6	23.150E+6	23.884E+6	100.000E+3	0.004187
-40	20	19.711E+6	24.584E+6	23.947E+6	22.748E+6	100.000E+3	0.004396

Le tableau 4.3 présente les paramètres de Ramberg-Osgood obtenus suite au lissage des données.

TABLEAU 4.3 – Paramètres de Ramberg-Osgood

Temp. (°C)	Vitesse (mm/min)	σ_0 (Pa)	ϵ_0	α		n	
				Moyenne	Écart type	Moyenne	Écart type
22	2	100E+3	0.034443	1.236E-6	264.327E-9	7.609795	0.119232
22	20	100E+3	0.029202	635.612E-9	223.315E-9	7.366134	0.178253
22	200	100E+3	0.020977	12.873E-6	4.978E-6	5.614328	0.177517
50	20	100E+3	0.035602	3.015E-6	548.221E-9	7.307420	0.103572
-10	20	100E+3	0.018558	15.195E-6	1.579E-6	5.492206	0.046025
-30	2	100E+3	0.017324	296.428E-6	55.738E-6	3.962922	0.081780
-30	20	100E+3	0.008321	2.832E-3	72.141E-6	3.314967	0.009871
-30	200	100E+3	0.004187	1.664E-3	155.471E-6	3.483572	0.032319
-40	20	100E+3	0.004396	1.593E-3	43.678E-6	3.539845	0.009739

4.5 Analyses d'erreurs

Afin de mesurer l'importance du paramètre de Ramberg-Osgood n et de la longueur de la fissure a sur le calcul de l'intégrale de contour J , nous avons fait plusieurs analyses par éléments finis supplémentaires. En fait, nous avons calculé J à l'aide de ANSYS pour un allongement de 10 mm d'une éprouvette en tension fissurée sur le côté (aussi connu comme étant une éprouvette « Single Edge Notch Tension » ou SENT modifiée). Pour quantifier l'influence du paramètre n , nous avons fait varier celui-ci entre n moins un écart type et n plus un écart type (voir tableau 4.3). Puisque nous estimons les erreurs dans les mesures de longueur de fissure à ± 0.1 mm, nous avons fait varier la longueur de la fissure de 5 mm à 5.2 mm. Les tableaux 4.4 à 4.6 présentent les résultats obtenus. Erickson et Wong [2] ont déterminé auparavant que l'équation de Ramberg-Osgood est plus sensible aux variations de n que de α . C'est pour cette raison que seuls les effets de n et de la longueur de fissure a sont étudiés ici.

TABLEAU 4.4 – Influence de n et a à 22°C et 2 mm/min

Nom	Déplacement du tablier (m)	Température (°C)	Vitesse (mm/min)	Longueur fissure (m)	n	J (J/m ²)
Sim13	0.010	22	2	0.0050	7.610	724.918
Sim14	0.010	22	2	0.0050	7.491	721.621
Sim15	0.010	22	2	0.0050	7.729	728.731
Sim16	0.010	22	2	0.0052	7.610	752.858
Sim17	0.010	22	2	0.0052	7.491	749.521
Sim18	0.010	22	2	0.0052	7.729	756.797

$$\text{Erreur relative} = (757-722)/722*100 = 4.85\%$$

TABLEAU 4.5 – Influence de n et a à 22°C et 20 mm/min

Nom	Déplacement du tablier (m)	Température (°C)	Vitesse (mm/min)	Longueur fissure (m)	n	J (J/m ²)
Sim07	0.010	22	20	0.0050	7.366	853.086
Sim08	0.010	22	20	0.0050	7.188	846.579
Sim09	0.010	22	20	0.0050	7.544	860.330
Sim10	0.010	22	20	0.0052	7.366	886.306
Sim11	0.010	22	20	0.0052	7.188	879.666
Sim12	0.010	22	20	0.0052	7.544	893.765

$$\text{Erreur relative} = (894-847)/847*100 = 5.55\%$$

TABLEAU 4.6 – Influence de n et a à -30°C et 200 mm/min

Nom	Déplacement du tablier (m)	Température ($^{\circ}\text{C}$)	Vitesse (mm/min)	Longueur fissure a (m)	n	J (J/m^2)
Sim01	0.010	-30	200	0.0050	3.484	4664.328
Sim02	0.010	-30	200	0.0050	3.451	4668.034
Sim03	0.010	-30	200	0.0050	3.516	4661.160
Sim04	0.010	-30	200	0.0052	3.484	4844.425
Sim05	0.010	-30	200	0.0052	3.451	4848.421
Sim06	0.010	-30	200	0.0052	3.516	4841.211

$$\text{Erreur relative} = (4848-4661)/4661*100 = 4.01\%$$

Comme on peut le voir, les erreurs relatives sont de l'ordre de 4 à 5.5%. On considère ces erreurs comme étant acceptables. En fait, ces erreurs représentent des cas extrêmes où sont appliqués ensemble l'erreur maximale sur la longueur de la fissure et un écart type d'erreur sur le n de la loi de Ramberg-Osgood.

5.0 CARACTÉRISATION DU COMPORTEMENT DE RÉSISTANCE J-R

Pour déterminer la résistance à la rupture des propergols, nous avons été dans l'obligation de développer notre propre méthodologie. Ceux-ci sont trop fragiles pour utiliser les méthodes normalisées retrouvées dans la littérature. Pour caractériser la résistance à la rupture des propergols, il est nécessaire d'utiliser une méthode permettant de tracer des courbes *J-R*. Dans la littérature, on retrouve différentes méthodes de caractérisation qui suggèrent l'utilisation de trois types d'éprouvettes standards. Nous présentons ici, un nouveau type d'éprouvette de caractérisation.

5.1 Éprouvette de caractérisation

Les essais de rupture nécessaires pour tracer les courbes *J-R* n'ont pas été réalisés à partir d'éprouvettes standards. Le propergol étant un matériau très mou, il n'est pas possible de lui appliquer un chargement à l'aide de gougeons. Ceux-ci pourraient pénétrer dans l'éprouvette et les données de déplacement seraient faussées. Pour remédier à ce problème, le propergol est mis en tension en collant les extrémités de l'éprouvette à des plaques d'aluminium qui sont ensuite fixées à la machine d'essai de traction. Le type d'éprouvette utilisé ressemble beaucoup à l'éprouvette fissurée sur le côté en tension standard (Single Edge Notched Tension ou SENT) tel que montré à la figure 5.1.

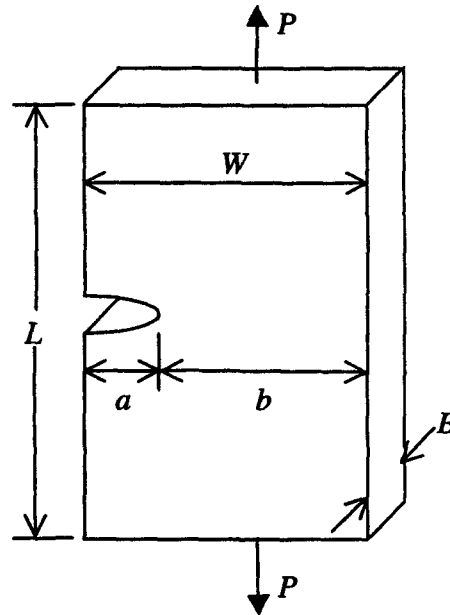


FIGURE 5.1 – Éprouvette en tension fissurée sur le côté (SENT)

L'éprouvette de caractérisation que nous avons utilisée est une version modifiée de l'éprouvette de la figure 5.1 appelée éprouvette SENT modifiée. La figure 5.2 montre l'éprouvette telle que nous l'avons modifiée. La différence entre ces deux éprouvettes est que celle de la figure 5.2 a été taillée dans la portion centrale afin de réduire les contraintes aux extrémités collées sur les plaques d'aluminium. Cette réduction des contraintes assure que la colle utilisée peut supporter la charge appliquée au cours des essais. La figure 5.2 montre que l'éprouvette est mis en tension par l'application d'une force P appliquée au centre de la largeur de l'éprouvette.

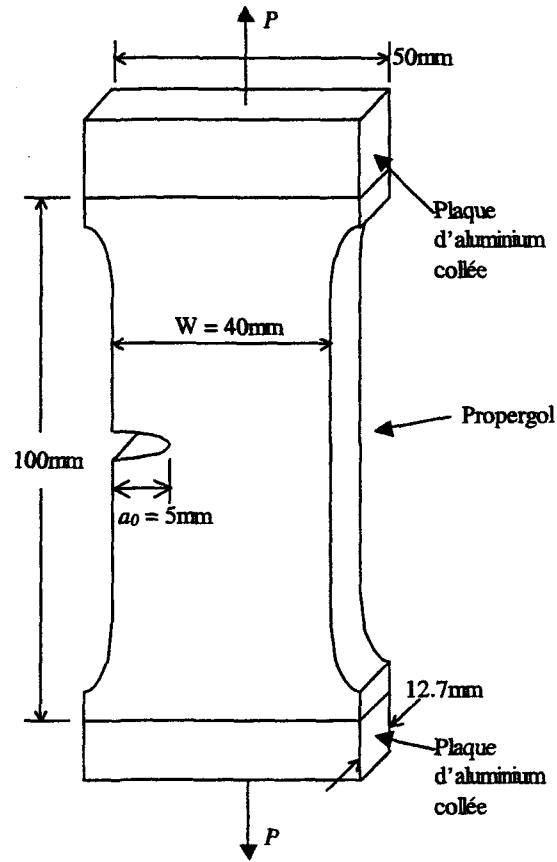


FIGURE 5.2 – Éprouvette en tension fissurée sur le côté (SENT) modifiée

5.2 Fabrication des éprouvettes de caractérisation

Les éprouvettes de caractérisation sont fabriquées à partir de plaquettes d'environ 140 x 140 mm. Pour les tailler, on utilise un couteau spécialement conçu à cet effet. Les plaquettes ont été usinées et elles ont une épaisseur très précise de 12.7 mm soit 0.500 pouce. Comme l'éprouvette est plus petite que les plaquettes disponibles, on peut facilement tailler deux éprouvettes par plaquettes. Cependant, il n'y a pas assez de place sur les plaquettes pour en fabriquer un troisième. La figure 5.3 montre le couteau utilisé pour découper nos éprouvettes à l'emporte-pièce.

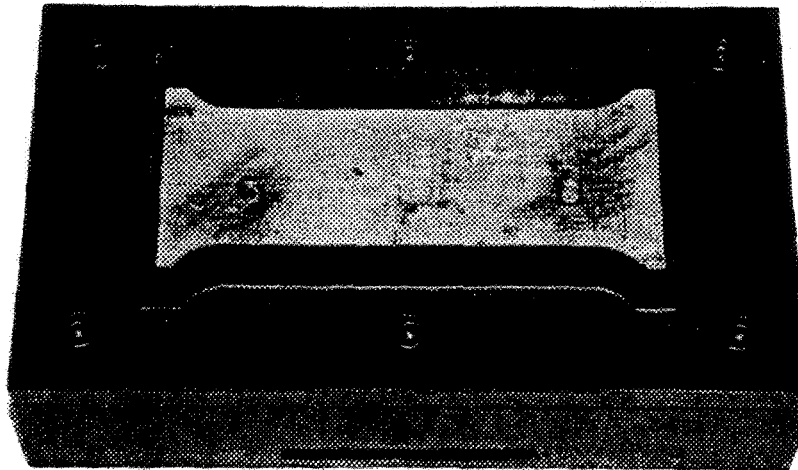


FIGURE 5.3 – Couteau servant à découper les éprouvettes

Pour tailler la fissure initiale, a_0 égal à 5 mm, sur le côté de l'éprouvette, nous avons fait l'usage d'un appareil spécialement conçu pour cette tâche. Celui-ci permet de déplacer verticalement une lame très affilée à la manière d'une guillotine. L'éprouvette est placée sous la lame de sorte que l'extrémité de celle-ci va créer une fissure de la bonne profondeur. La figure 5.4 illustre le dispositif fabriqué.

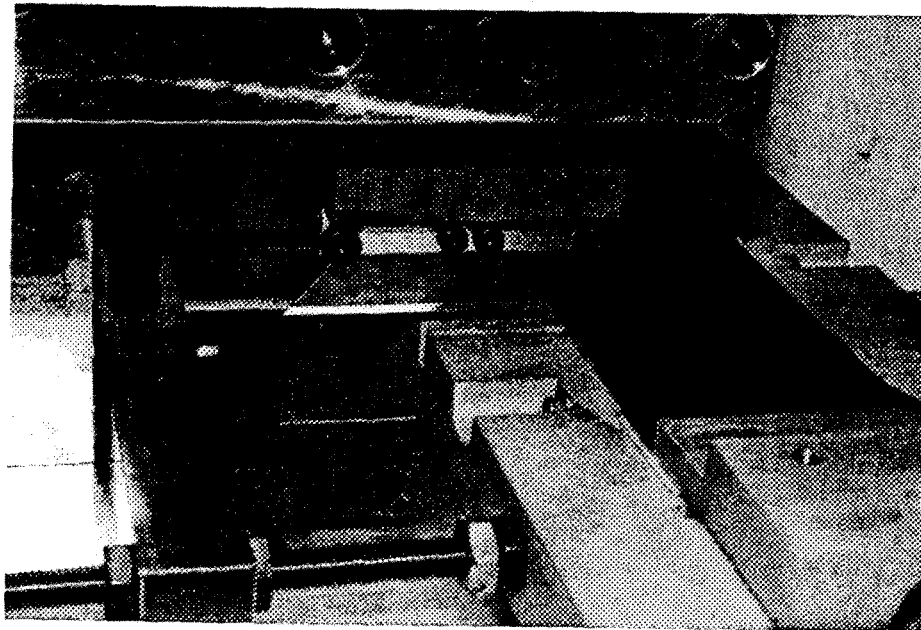


FIGURE 5.4 – Dispositif servant à tailler les fissures initiales

Il est connu que les éprouvettes collées ne résistent pas très bien à des températures aussi basses que -50°C . Lors de tests en laboratoire, il a été observé que la colle devient fragile à une température de -50°C . Puisque que nous allons utiliser des éprouvettes collées pour tracer les courbes J - R et effectuer la validation, il est préférable de ne pas descendre à une température plus basse que -40°C afin d'éviter le décollement des éprouvettes.

Comme il y a plus de matière du côté non fissuré que du côté fissuré, on peut imaginer qu'un couple est créé lors de la propagation de la fissure. Pour garder la ligne de force toujours centrée sur l'éprouvette, nous avons placé une couronne sur l'arbre supérieur de la machine d'essai de traction. Cette couronne assure aussi que les plaques d'aluminium collées à l'éprouvette vont se déplacer tout en restant toujours parallèles. La figure 5.5 montre la couronne que nous avons utilisée pour limiter le déplacement horizontal de l'éprouvette.

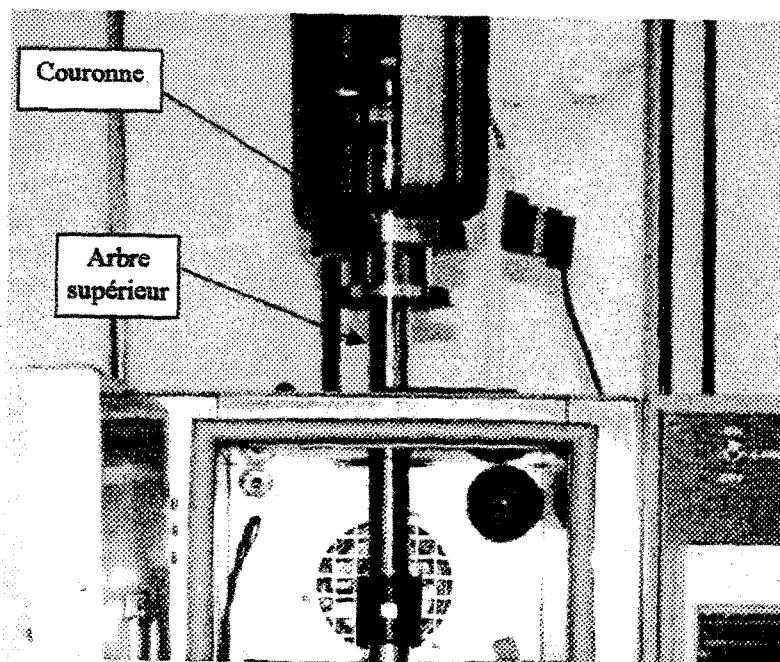


FIGURE 5.5 – Couronne entourant l'arbre supérieur

L'arbre supérieur est libre de se déplacer verticalement à l'intérieur de la couronne, car celle-ci est munie de roulements à billes pour réduire le frottement au minimum. Puisque, la couronne est également fixée au tablier de la machine à essai de traction, il n'y

pratiquement pas de déplacement de l'arbre supérieur à l'intérieur de la couronne. Le faible déplacement est uniquement dû à l'allongement de la cellule de charge sur laquelle l'arbre supérieur est maintenu.

Le choix d'une telle éprouvette de caractérisation offre l'avantage d'être plus facilement utilisable avec la méthode du Travail Essentiel de Rupture (voir Annexe A). Aussi, ces éprouvettes sont simples à fabriquer et la longueur de la fissure est facilement mesurable par une technique simple expliquée à la section 5.3.1.

5.3 Acquisition de données expérimentales

Certaines méthodes de caractérisation de la résistance à la rupture relevées dans la littérature permettent de tracer des courbes de résistance. Contrairement aux méthodes à paramètre de rupture unique, les courbes de résistance ne permettent pas uniquement de prédire les conditions auxquelles une fissure va se propager. Elles permettent aussi de prévoir l'avancement de la fissure à mesure que l'énergie totale emmagasinée à la pointe de la fissure est libérée par la création de nouvelles surfaces. Les courbes de résistance sont souvent appelées « courbe J - R » où J représente la valeur de l'intégrale de contour J et R représente la résistance à la rupture. La figure 5.6 illustre une courbe de résistance J - R typique.

Puisque J est une mesure de l'énergie disponible à la création de nouvelles surfaces, on peut comprendre de la figure 5.6 qu'il faut sans cesse que cette énergie augmente pour allonger davantage la fissure. La figure 5.6 montre également un paramètre de rupture unique nommé J_{IC} qui correspond au point où la propagation stable de la fissure débute. Une procédure détaillée permettant de mesurer ce paramètre de rupture est donnée dans la documentation des essais normalisés ASTM E813 [8, 9 et 10]. Bien que ce paramètre puisse nous indiquer la valeur de J pour laquelle la fissure va commencer à se propager, il ne nous procure pas d'information quant à la progression future de la fissure. C'est pour

cette raison que notre méthodologie de caractérisation est basée sur l'utilisation de courbes de résistance J - R .

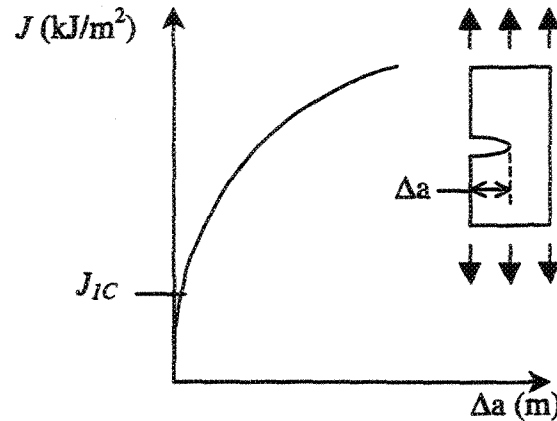


FIGURE 5.6 – Courbe de résistance J - R typique

Pour obtenir une courbe de résistance J - R , il faut réaliser des expériences avec des éprouvettes fissurées. Quelques méthodes relevées dans la littérature, que nous avons présentées au chapitre 2 suggèrent des éprouvettes normalisées. Pour ces éprouvettes, il existe des formules permettant de calculer J à partir de mesures expérimentales. Ces mesures sont l'énergie dissipée U par l'éprouvette au cours de l'essai et la mesure de l'allongement de la fissure obtenue. La figure 5.7 montre l'énergie dissipée U par une éprouvette fissurée au cours d'un essai de traction où il est soumis à une charge P provoquant un allongement Δl (du point 1 au point 2). Lorsque la charge est enlevée, la courbe de traction se dirige vers le point 3 plutôt que vers le point 1 étant donné l'allongement de la fissure et les dommages plastiques dans le matériau. L'aire sous la courbe de traction est l'énergie dissipée par l'éprouvette fissurée.

Lorsque qu'il n'existe pas d'équation pour calculer J à partir de l'énergie dissipée U et de l'allongement de la fissure Δa , il faut déterminer J à l'aide de simulations par éléments finis. C'est ce qui a été fait au cours de cette étude puisque nous avons utilisé des éprouvettes dont la géométrie est différente des éprouvettes ASTM [6, 7, 8, 9, 10].

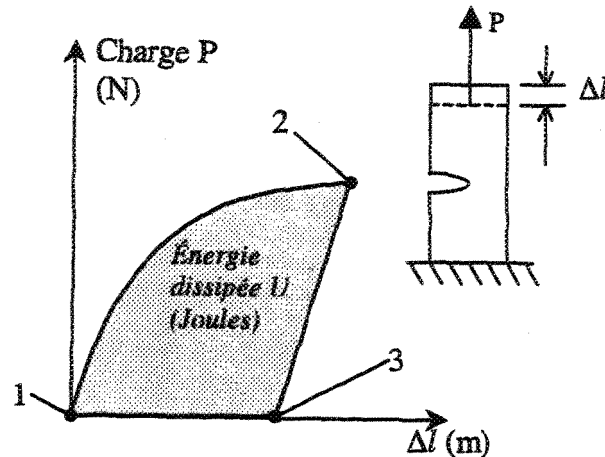


FIGURE 5.7 – Courbe de traction d'une éprouvette fissurée

Pour calculer J à l'aide de simulations par éléments finis, il faut connaître la charge appliquée P (ou le déplacement Δl) ainsi que la longueur de la fissure correspondante. Pour obtenir ces informations, nous avons utilisé deux méthodes. La première est une méthode utilisant plusieurs éprouvettes alors que la seconde nécessite une seule éprouvette. Les pages qui suivent présentent en détail ces deux méthodes.

5.3.1 Méthode avec éprouvettes multiples

Nous avons soumis chaque éprouvette fissurée à un allongement Δl différent à l'aide d'une machine à essai de traction. Après avoir déchargé l'éprouvette, l'allongement de la fissure provoqué a été mesuré à l'aide d'un vernier dont la précision est estimée à ± 0.1 mm. La figure 5.8 montre comment progresse la longueur de la fissure en fonction de l'allongement appliqué par la machine d'essai de traction Δl .

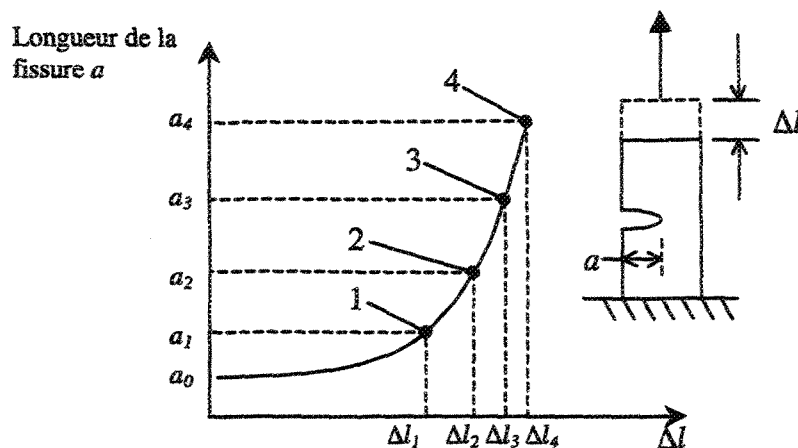


FIGURE 5.8 – Longueur de la fissure a en fonction de l'allongement Δl

Dans la figure 5.8, on peut voir que la longueur de la fissure s'allonge avec l'augmentation du déplacement du tablier. Puisque la pente de cette courbe représente la vitesse de propagation de la fissure, on peut réaliser que celle-ci accélère à mesure que l'on étire l'éprouvette.

La technique à éprouvettes multiples consiste à charger les éprouvettes à des allongements différents Δl et à mesurer la longueur de l'allongement de la fissure Δa . L'ASTM D6068-96 suggère de préparer un minimum de 5 éprouvettes. Nous en avons préparé 10 pour chaque série d'essais. Il est important de prendre soin de les fabriquer de sorte qu'ils ont tous les mêmes dimensions. Les fissures initiales doivent également avoir la même longueur pour chaque éprouvette. À chaque essai, on suit une procédure en cinq étapes.

- Allonger l'éprouvette (par un déplacement du tablier de la machine d'essai de traction) d'une distance Δl qui devrait produire un allongement de la fissure Δa . Une bonne façon de procéder consiste à étirer l'éprouvette jusqu'à ce qu'il y ait une baisse significative de la charge enregistrée.
- Décharger l'éprouvette et mesurer la longueur de la fissure. Dans le cas du propergol, de l'encre diluée est injectée dans l'ouverture de la fissure afin d'en noircir les deux surfaces. L'encre pénètre jusqu'au fond de la fissure par capillarité.
- Une fois que l'encre est sèche, briser l'éprouvette pour exposer les surfaces noircies.

- Mesurer la longueur de la fissure à l'aide d'un vernier en prenant soin de ne pas serrer l'éprouvette, car il se déforme très facilement. La précision de la mesure obtenue est estimée à ± 0.5 mm.
- Déterminer les allongements Δl à appliquer aux prochaines éprouvettes pour obtenir les allongements de la fissure Δa désirés.

5.3.2 Méthode avec éprouvette unique

Tel que présenté à la figure 5.8, il existe une relation entre la longueur de la fissure et l'allongement de l'éprouvette. Pour obtenir un plus grand nombre de points de cette courbe, nous avons utilisé une seconde méthode. Bien que la méthode développée demande l'utilisation d'une seule éprouvette, elle exige une grande quantité d'appareils de test. La figure 5.9 présente le schéma de l'équipement utilisé avec cette méthode.

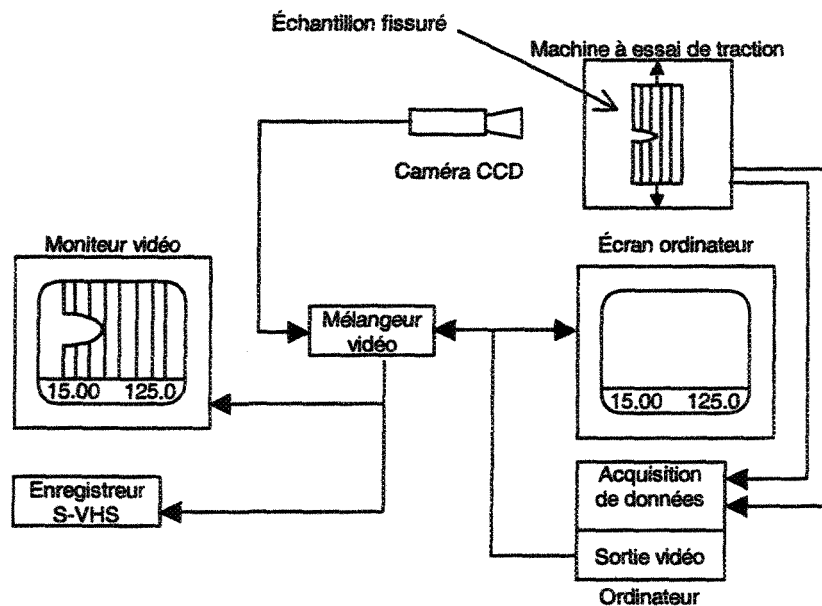


FIGURE 5.9 – Schéma de l'équipement de test

Un ordinateur équipé d'une carte d'acquisition de données est branché sur la machine d'essai de traction. La carte d'acquisition de données reçoit un signal analogique de la

cellule de charge ainsi qu'un signal analogique d'un LVDT qui mesure le déplacement du tablier de la machine d'essai de traction. Ces signaux sont lus et interprétés par le logiciel LabView. Les valeurs du déplacement et de la charge sont ensuite affichées au bas d'un moniteur vidéo par le biais d'une carte vidéo équipée d'une sortie vidéo NTSC.

Le signal d'une caméra CCD montée devant l'éprouvette est mélangé avec celui provenant de la carte vidéo afin de superposer l'image de l'éprouvette aux données obtenues de la machine d'essai de traction. Au cours de l'essai, le signal résultant et l'image de la fissure est enregistré sur cassette par un enregistreur S-VHS de qualité professionnelle. La figure 5.10 montre une image de ce que l'on obtient du système vidéo.

On peut remarquer dans la figure 5.10 que des lignes verticales ont été tracées sur l'éprouvette fissurée. Ces lignes sont espacées les unes des autres d'une distance de 5 mm. Elles permettent de connaître l'avancement de la fissure en fonction du déplacement du tablier. Au bas de l'image à gauche, on retrouve le temps en seconde depuis le début de l'essai. Au centre, on peut voir le déplacement du tablier de la machine à essais de traction en millimètre. À côté du déplacement, on retrouve la charge mesurée par la cellule de charge en kilogramme. À la droite, un graphique présente la progression de la charge par rapport au déplacement.

Le film ainsi réalisé peut être visionné au ralenti (ou image par image) autant de fois que désiré afin de prendre en note les charges et les déplacements du tablier Δl correspondant aux différentes longueurs de fissure. Le tableau 5.1 montre un exemple de données recueillies par le visionnement du court film réalisé.

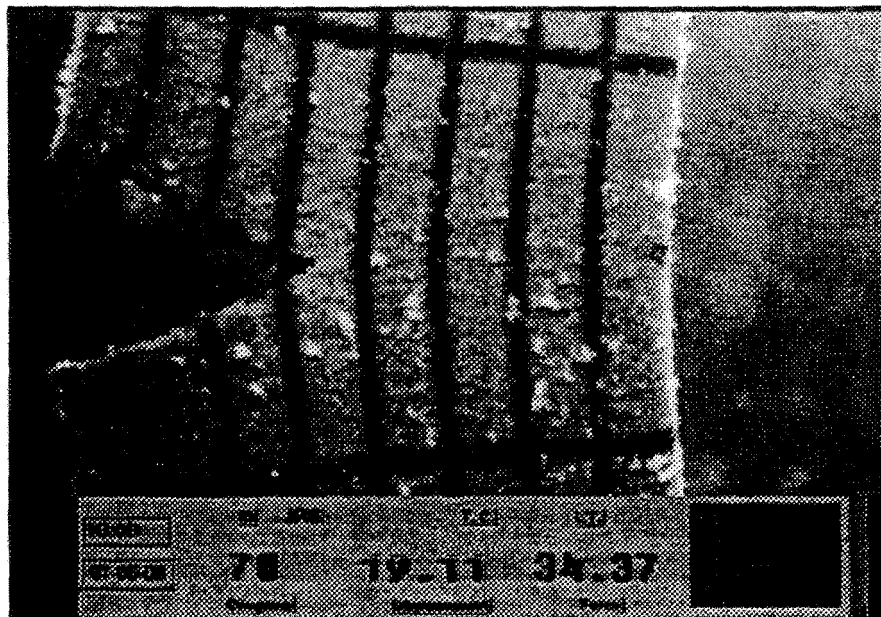


FIGURE 5.10 – Image prise à partir du système vidéo

TABLEAU 5.1 – Données obtenues avec les éprouvettes fissurées simples

Longueur de la fissure (mm)	Déplacement du tablier Δl (mm)
5	13.0
10	14.4
15	15.9
20	16.8
25	17.5
30	18.1
35	18.3

5.4 Réduction des données expérimentales

Le propergol est un matériau dont les propriétés mécaniques sont très dépendantes de la température et du taux de déformation. De plus, ces propriétés sont hautement non linéaires (voir figure 4.2). Ainsi, nous avons mesuré ses propriétés mécaniques à l'aide de plusieurs

séries d'essais de traction à des températures et des vitesses de déplacement du tablier différentes. Ces propriétés ont ensuite été introduites dans le logiciel ANSYS. Ainsi, il est possible de faire des analyses par éléments finis à des conditions de température et de vitesse de déplacement du tablier qui correspondent assez fidèlement au comportement du propergol dans des conditions réelles.

Pour tracer les courbes J - R , le logiciel d'éléments finis ANSYS a été utilisé pour modéliser l'éprouvette et calculer numériquement l'intégrale J en fonction de la longueur de la fissure a . Les détails de la méthode de calcul de J par éléments finis sont donnés au chapitre 3. Le déplacement du tablier de la machine d'essai de traction est simulé par l'application d'un allongement Δl . Ensuite, il faut réaliser une analyse de convergence. Les sous-sections qui suivent présentent ces deux étapes.

5.4.1 Modélisation de l'éprouvette en tension fissurée sur le côté modifiée

La figure 5.11 montre le modèle de l'éprouvette que nous avons utilisé avec ANSYS. On peut y remarquer que seulement la moitié supérieure du modèle a été modélisée à cause de la symétrie de l'éprouvette. Le fait que la charge soit toujours perpendiculaire à la ligne de symétrie, grâce à l'usage de la couronne sur la machine d'essai de traction, simplifie beaucoup la modélisation. Cela permet aussi de réduire le nombre total de nœuds et d'éléments et par conséquent réduire le temps de calcul.

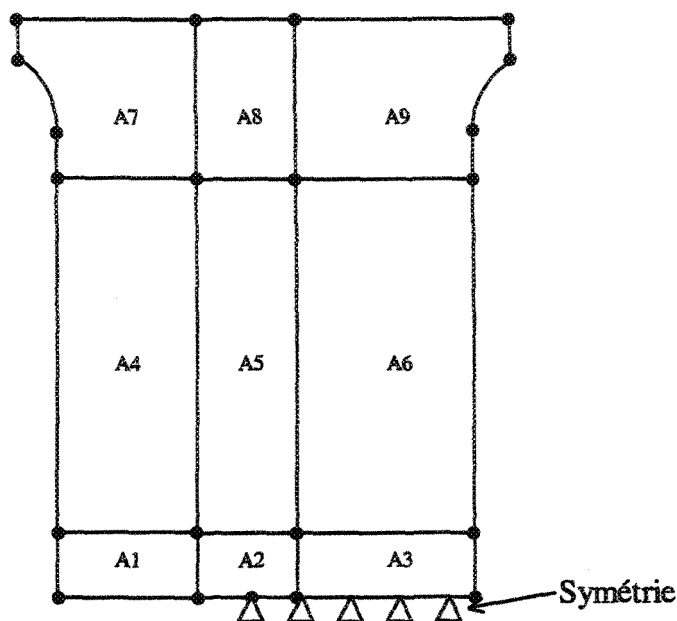


FIGURE 5.11 – Modèle de l'éprouvette de caractérisation

On peut aussi remarquer sur la figure 5.11 que le modèle est divisé en 9 régions distinctes. Nous avons créé ces divisions dans le but de simplifier le maillage et pour pouvoir contrôler la taille des éléments dans chacune des divisions. Les points noirs sur la figure 5.11 représentent ce que l'on nomme dans ANSYS des « keypoints » (points clés en français). Ces points ont été placés au tout début de la création du modèle. Ensuite, on a créé les lignes reliant ces points de façon à former les aires numérotées de 1 à 9. Un maillage d'éléments a ensuite été appliqué sur ces aires. Les fichiers de commande APDL de ANSYS 5.6 placés à l'annexe E montrent les diverses commandes utilisées pour créer ce modèle.

Pour évaluer correctement la valeur de l'intégrale J , il est impératif d'utiliser des éléments spéciaux autour de la pointe de la fissure. Ces éléments sont spéciaux puisqu'ils sont dégénérés du fait que certains de leurs nœuds sont déplacés au quart de la longueur de l'élément. Ceux-ci sont utilisés afin de reproduire la singularité $1/\sqrt{r}$ typique aux fissures. Ceci améliore de beaucoup la précision des simulations. Les éléments à 8 nœuds sont fréquemment utilisés dans les problèmes ayant trait aux fissures. La figure 5.12 montre

comment un élément à 8 nœuds peut être transformé afin de créer une singularité à la pointe de la fissure.

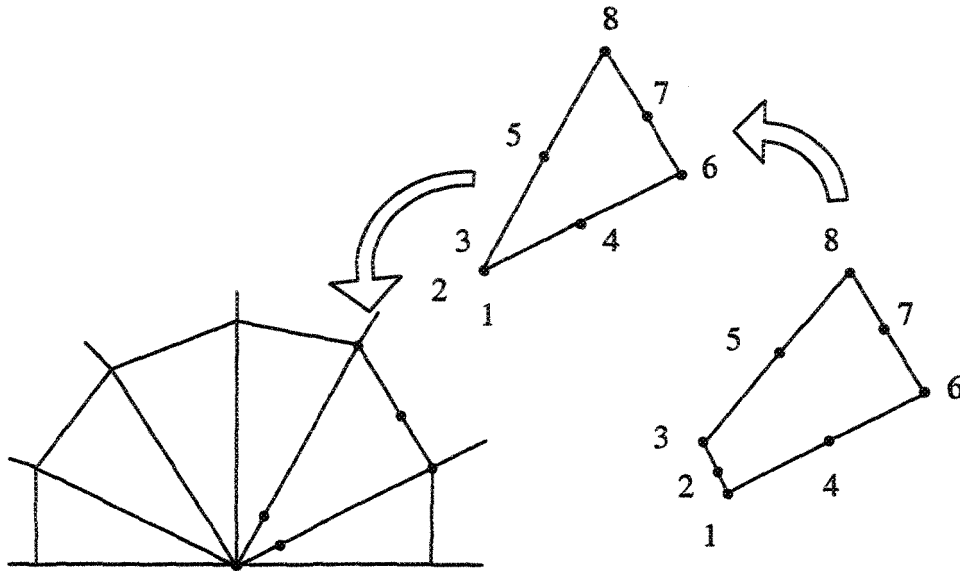


FIGURE 5.12 – Dégénération d'un élément quadrilatère à 8 nœuds

La figure 5.13 montre le maillage qui a été utilisé dans l'aire A2 (figure 5.13).

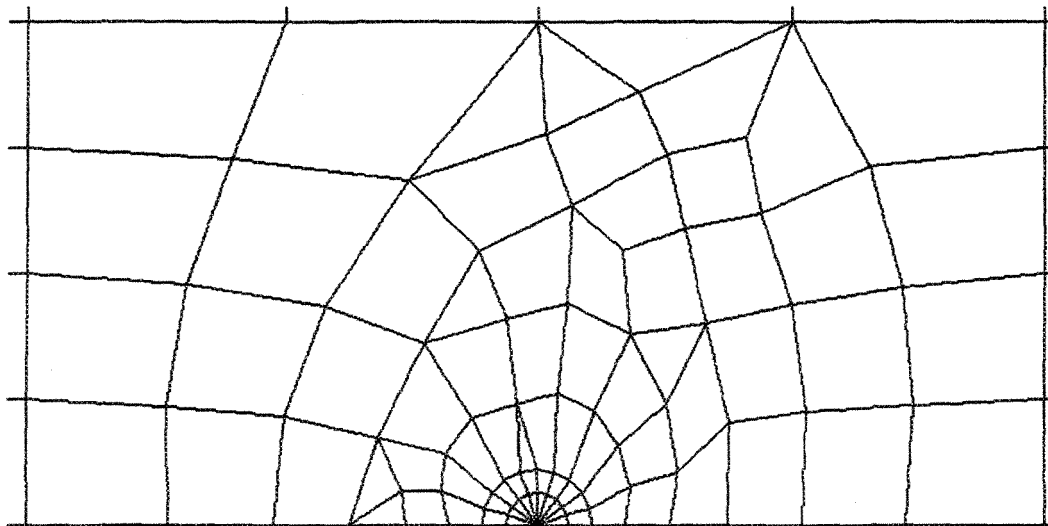


FIGURE 5.13 – Maillage autour de la pointe d'une fissure

5.4.2 Analyse de convergence

Pour déterminer la taille des éléments du maillage à utiliser, une analyse de convergence a été réalisée. Pour ce faire, nous avons fait varier la taille maximale de tous les éléments entre 0.5 et 1.5 mm tout en conservant le déplacement du tablier et la longueur de la fissure à 10 mm. Les propriétés mécaniques du propergol utilisées lors des simulations sont celles mesurées à 22°C et 20 mm/min. La valeur de l'intégrale de contour J fut conservée pour chaque simulation.

Comme on peut le voir dans le tableau 5.2, les valeurs de l'intégrale de contour J calculées à chaque simulation sont très semblables. Le plus gros écart mesurable est donné par :

$$\text{Écart} = \frac{J_{\max} - J_{\min}}{J_{\min}} \times 100 = \frac{1585.582 - 1575.111}{1575.111} \times 100 = 0.665\% . \quad [5.3]$$

TABLEAU 5.2 – Résultats de l'analyse de convergence

Nom de la simulation	Déplacement du tablier (m)	Longueur de la fissure (m)	Taille des éléments (m)	Intégrale de contour J calculée (J/m^2)
Conv01	0,010	0,010	0,0015	1577,190
Conv02	0,010	0,010	0,0014	1577,580
Conv03	0,010	0,010	0,0013	1585,582
Conv04	0,010	0,010	0,0012	1575,111
Conv05	0,010	0,010	0,0011	1575,866
Conv06	0,010	0,010	0,0009	1578,240
Conv07	0,010	0,010	0,0008	1578,840
Conv08	0,010	0,010	0,0007	1580,885
Conv09	0,010	0,010	0,0006	1578,776
Conv10	0,010	0,010	0,0005	1581,603

On comprend donc, à la lumière de ce faible écart, que tous ces maillages sont appropriés et que la solution converge bien. Nous avons donc décidé d'utiliser un maillage dont la taille

des éléments les plus gros est de 1 mm. De cette façon, on obtient une solution suffisamment détaillée tout en maintenant un temps total de calcul raisonnable.

5.5 Conditions des tests

Pour minimiser le nombre d'éprouvettes à fabriquer, il est préférable de choisir soigneusement les combinaisons de température et de vitesse de déplacement du tablier à utiliser. Tel que mentionné à la section 4.3 de ce document, il est possible d'observer un comportement uniaxial identique pour deux combinaisons de températures et de vitesses de déplacement du tablier. Pour éviter cette situation, nous avons sélectionné les conditions expérimentales parmi deux zones encadrées du tableau 5.3. La première zone (en bas à gauche) représente les combinaisons de vitesses lentes et de températures chaudes tandis que la seconde zone représente les combinaisons de vitesses rapides et de températures froides. En choisissant des conditions expérimentales à l'intérieur de ces deux zones, on évite de faire des tests qui pourraient produire des courbes *J-R* identiques. Les conditions expérimentales que nous avons sélectionnées sont indiquées par des X dans le tableau 5.3.

TABLEAU 5.3 – Conditions de tests

Vitesse	-40°C	-30°C	-10°C	+22°C	+50°C
2 mm/min					
20 mm/min		X		X	X
200 mm/min		X			

Comme on peut le voir dans le tableau, nous avons utilisé 4 conditions d'essais. Pour chacune de ces conditions, 12 éprouvettes ont été nécessaires. De ces éprouvettes, 10 ont été utilisés avec la méthode à éprouvettes multiples et 2 avec la méthode à éprouvette unique (section 5.3.2). Ainsi, nous avons réalisé 48 expériences sur les panneaux de caractérisation.

5.6 Résultats pour les méthodes avec éprouvettes multiples et unique

5.6.1 Paramètres de Merkle-Corten η

Normalement, la valeur de J est calculée directement à partir de la charge, du déplacement et du paramètre de Merkle-Corten (η). Celui-ci est une fonction de la longueur de la fissure et de la géométrie de l'éprouvette. Pour l'éprouvette de caractérisation, les valeurs de η ne sont pas disponibles à cause de sa forme non-standard.

La méthode à éprouvettes multiples nous permet de déduire la valeur du paramètre de Merkle-Corten η puisque l'aire sous la courbe de traction est disponible pour chaque éprouvette. En isolant η dans l'équation 5.1 on obtient l'équation 5.4.

$$\eta = \frac{JB(W - a_0)}{U} = \frac{JBb_0}{U} \quad [5.4]$$

Pour chaque éprouvette, il faut calculer l'aire sous la courbe de traction. Pour ce faire, la méthode d'intégration numérique du trapèze a été utilisée. La méthode du trapèze consiste à calculer l'aire sous la courbe en faisant la sommation des aires individuelles formées par chacun des points de la courbe. La figure 5.14 montre que l'aire sous la courbe est donnée par la somme des aires A0, A1, A2 et A3.

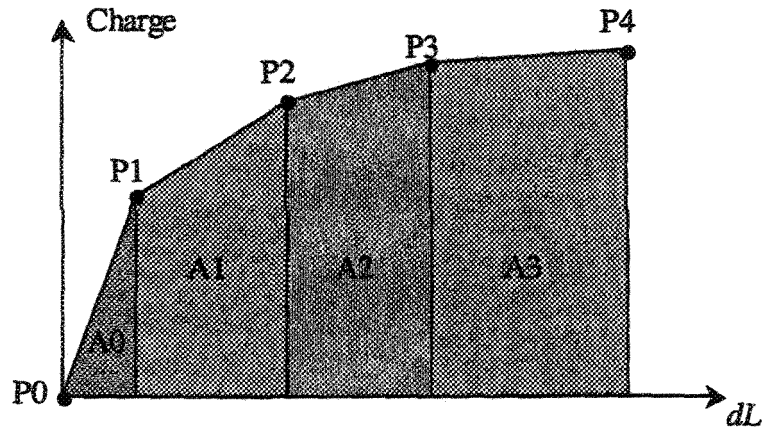


FIGURE 5.14 – Intégration numérique

Les sections 5.6.2 à 5.6.5 présentent les résultats obtenus lors des essais de caractérisation de la résistance à la rupture. Les courbes *J-R* obtenues avec la méthode à éprouvettes multiples sont comparées à celles obtenues à l'aide de la méthode à éprouvette unique et de notre système vidéo.

5.6.2 Courbes *J-R* à 22°C et 20 mm/min

Le tableau 5.4 présente les résultats obtenus par la méthode à éprouvettes multiples à une température de 22°C et une vitesse de 20 mm/min. Les éprouvettes ont été conditionnées pour au moins 30 minutes avant de les tester.

Les valeurs du paramètre de Merkle-Corten η ont été calculées à l'aide de l'équation 5.4. Comme la valeur de η n'est pas constante, on peut en déduire que l'éprouvette que nous avons choisie n'est pas une éprouvette appropriée pour calculer *J* directement à partir de l'équation 5.4. Les éprouvettes utilisées dans les essais standards ASTM ont des valeurs de η pratiquement constantes lorsque la longueur de la fissure représente 50% de la largeur de l'éprouvette (voir eq. 5-1 et 5-2). On comprend maintenant la raison qui a motivé le choix de ces deux types d'éprouvettes par l'ASTM.

TABLEAU 5.4 – Méthode à éprouvettes multiples à +22°C et 20 mm/min

Éprouvette	Déplacement du tablier dL	Longueur de la fissure a	Avancement de la fissure da	Intégrale J	η
Jr1-08	11.00	6.665	1.665	1379	0.58
Jr1-07	13.00	11.290	6.290	2974	0.87
Jr1-10	15.50	12.915	7.915	4620	1.03
Jr1-09	14.00	13.210	8.210	3772	1.00
Jr1-01	15.00	14.560	9.560	4515	1.12
Jr1-06	16.50	23.010	18.010	5547	1.14
Jr1-02	16.00	25.355	20.355	5106	1.13
Jr1-03	17.00	29.520	24.520	5420	1.09
Jr1-04	17.50	29.955	24.955	5684	1.09
Jr1-05	18.00	38.000	33.000	N/A	N/A

Les valeurs de J obtenues sont de l'ordre de 1.3 à 5.7 kJ/m². Ces valeurs semblent très raisonnables pour ce type de matériau à teneur élevée en particules fragiles. Dans des conditions semblable (10mm/min et 20°C), Hashemi [12] a mesuré pour le polypropylène une valeur critique de J_{IC} de 15 kJ/m².

On peut voir dans le tableau 5.4 que la valeur de J et de η n'est pas disponible pour l'éprouvette Jr1-05. Cela est du au fait que lorsque la fissure est très grande, le ligament restant est très mince. Le modèle ANSYS a besoin d'une assez grande quantité d'éléments autour de la pointe de la fissure pour calculer l'intégrale de contour J avec précision. Lorsque le ligament est très mince, il n'est pas possible de placer suffisamment d'éléments autour de la pointe de la fissure. De plus, il faut beaucoup de temps pour obtenir une solution à cause des très grandes déformations dans le ligament restant. Ces déformations rendent la convergence de la solution difficile à atteindre. C'est pour ces raisons que la valeur de l'intégrale J n'a pas été calculée pour cette éprouvette.

TABLEAU 5.5 – Méthode à éprouvette unique à +22°C et 20 mm/min

Éprouvette FJR1			Éprouvette FJR2		
Déplacement du tablier dL	Avancement de la fissure da	Intégrale J	Déplacement du tablier dL	Avancement de la fissure da	Intégrale J
13.0	5	2733	13.0	5	2733
14.4	10	4149	14.6	10	4265
15.9	15	5196	15.8	15	5135
16.8	20	5500	16.8	20	5500
17.5	25	5629	17.5	25	5629
18.1	30	7193	18.0	30	7112

On peut remarquer dans le tableau 5.5 que l'allongement de la fissure da est mesuré à des multiples de 5 mm. En fait, nous avons visionné les films réalisés lors des essais et avons arrêté l'image lorsque la fissure atteignait les lignes verticales tracées à 5 mm d'intervalle sur l'éprouvette. Nous avons alors pris en note le déplacement du tablier.

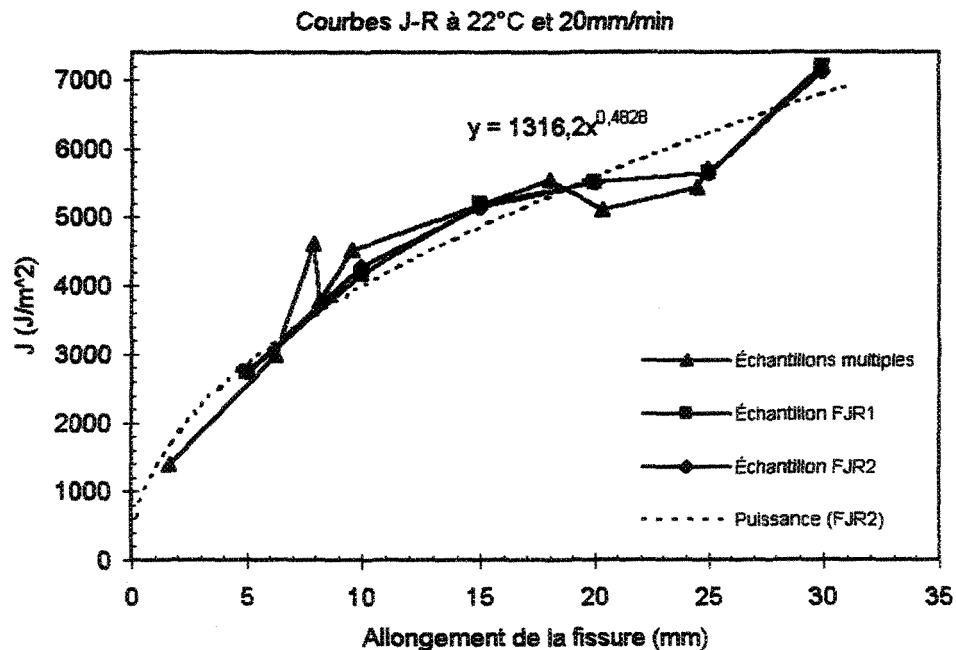


FIGURE 5.15 – Courbes J-R à +22°C et 20 mm/min

La figure 5.15 montre les trois courbes J - R obtenues à 22°C et 20 mm/min. Les courbes tracées à partir des données du système vidéo semblent plus lisses que celle tracée par la méthode à éprouvettes multiples. On peut par contre dire que les courbes sont compatibles et que les résultats sont comparables pour les raisons suivantes :

- Les éprouvettes ont été conditionnées au moins 30 minutes avant de les tester. Ainsi, la différence de température. Ainsi, la différence de température entre chaque éprouvette est gardée au minimum. La température à l'intérieur de la chambre climatique est contrôlée à $\pm 0.5^\circ\text{C}$. Ce petit manque de précision combiné au manque d'exactitude de la mesure de la longueur de la fissure avec le vernier peut expliquer une partie de la variation de la courbe J - R de la méthode à éprouvettes multiples.
- Même si nous avons utilisé le même dispositif pour tailler tous les éprouvettes, il existe de légères différences dans la longueur de la fissure initiale. Cette différence est en partie due à des variations de la largeur des éprouvettes. Les variations mesurées sont d'environ ± 0.2 mm. Ainsi, une éprouvette peut faire 38.6 mm de largeur alors qu'un autre peut faire 39.0 mm. Pour une longueur initiale de fissure a_0 égale à 5 mm et un déplacement du tablier dL identiques, cette variation de la largeur entraîne une variation des contraintes dans la partie non fissurée de l'éprouvette.
- La longueur initiale de la fissure a_0 peut également varier un peu même si le dispositif que nous avons fabriqué pour tailler la fissure initiale limite au maximum les déplacements horizontaux de la lame lorsqu'elle tranche le propergol. Cependant, la position de l'éprouvette sous la lame peut varier un peu en fonction de sa largeur. Cette variation de la position de l'éprouvette entraîne une légère variation de la taille initiale de la fissure. Cette variation est estimée à ± 0.5 mm au maximum.

5.6.3 Courbes J-R à 50°C et 20 mm/min

Le tableau 5.6 montre les résultats obtenus par la méthode à éprouvettes multiples à une température de 50°C et une vitesse de 20 mm/min. On peut constater que les estimations du paramètre de Merkle-Corten [47] obtenues ne sont pas les mêmes que celles obtenues à 22°C et 20 mm/min. Il semble que ce paramètre dépend également de la température du matériau et non uniquement de la géométrie de l'éprouvette et de la longueur de la fissure. Le tableau 5.7 montre les résultats obtenus à l'aide de notre système vidéo.

TABLEAU 5.6 – Méthode à éprouvettes multiples à +50°C et 20 mm/min

Éprouvette	Déplacement du tablier dL	Longueur de la fissure a	Avancement de la fissure da	Intégrale J	η
Jr3-07	13.00	9.390	4.390	2168	1.27
Jr3-05	14.00	13.025	8.025	3079	1.37
Jr3-01	15.00	14.285	9.285	3681	1.55
Jr3-06	15.25	18.615	13.615	3989	1.49
Jr3-02	15.50	24.420	19.420	3974	1.45
Jr3-03	15.75	28.680	23.680	3879	1.30
Jr3-04	16.00	26.820	21.820	4089	1.37
Jr3-08	16.25	23.010	18.010	4401	1.46

TABLEAU 5.7 – Méthode à éprouvette unique à +50°C et 20 mm/min

Éprouvette FJR3			Éprouvette FJR4		
Déplacement du tablier dL	Avancement de la fissure da	Intégrale J	Déplacement du tablier dL	Avancement de la fissure da	Intégrale J
15.4	5	3224	14.4	5	2795
16.8	10	4596	15.9	10	4131
17.7	15	5160	16.7	15	4643
18.6	20	5372	17.3	20	4726
19.0	25	5339	17.7	25	4691
19.3	30	6702	18.0	30	5827

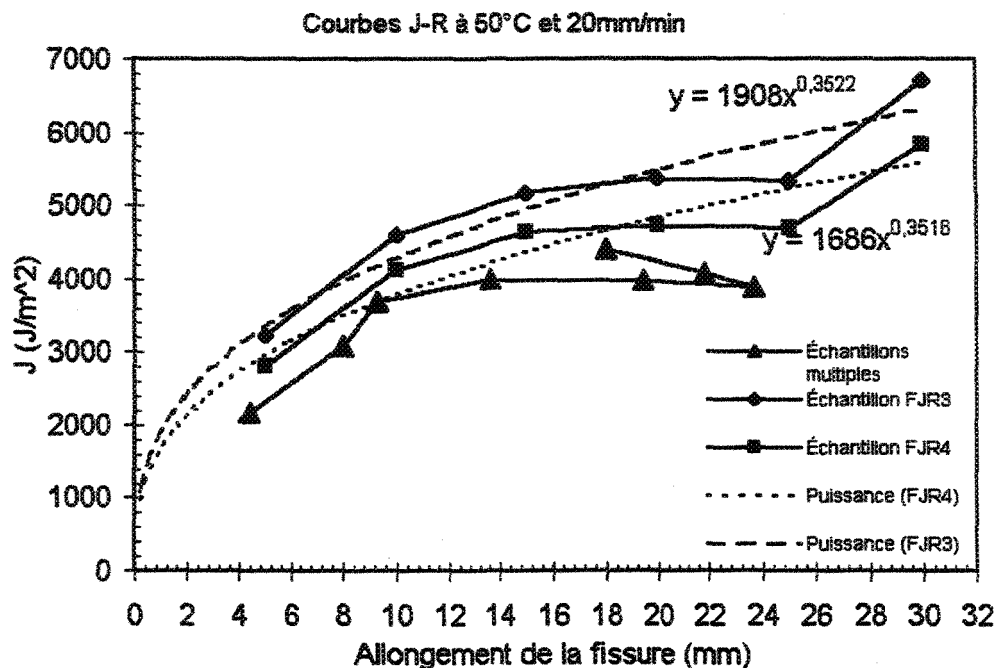


FIGURE 5.16 – Courbes J-R à +50°C et 20 mm/min

La figure 5.16 illustre les trois courbes J -R obtenues à 50°C et 20 mm/min. On peut voir qu'elles ne se superposent pas exactement mais qu'elles sont tout de même assez proches les unes des autres. Les trois courbes semblent avoir la même tendance. Seule la méthode de prise des données de l'allongement de la fissure change.

5.6.4 Courbes J-R à -30°C et 20 mm/min

Le tableau 5.8 présente les résultats obtenus avec la méthode à éprouvettes multiples à une température de -30°C et une vitesse de 20 mm/min. On peut remarquer que les valeurs de J calculées sont beaucoup plus grandes ici que dans les deux cas précédents. Cela est dû au fait que pour une déformation donnée, les contraintes sont beaucoup plus grandes à -30°C qu'à 50°C ou même 20°C.

TABLEAU 5.8 – Méthode à éprouvettes multiples à -30°C et 20 mm/min

Éprouvette	Déplacement du tablier dL	Longueur de la fissure a	Avancement de la fissure da	Intégrale J	η
JR2-01	15.0	8.41	3.41	8845	1.02
JR2-02	16.0	11.82	6.82	11799	1.18
JR2-03	16.5	11.78	6.78	12417	1.18
JR2-04	17.0	13.07	8.07	13383	1.23
JR2-05	17.5	15.90	10.90	14223	1.25
JR2-06	18.0	16.05	11.05	14858	1.29
JR2-07	18.5	18.38	13.38	15282	1.28
JR2-08	19.0	15.21	10.21	16203	1.28
JR2-09	19.5	15.65	10.65	16861	1.20
JR2-10	20.0	17.92	12.92	17283	1.22

Le tableau 5.9 montre les résultats obtenus avec la méthode à éprouvette unique.

TABLEAU 5.9 – Méthode à éprouvette unique à -30°C et 20 mm/min

FJR5			FJR6		
Déplacement du tablier dL	Avancement de la fissure da	Intégrale J	Déplacement du tablier dL	Avancement de la fissure da	Intégrale J
16.0	5	10928	14.8	5	9589
17.9	10	14782	18.4	10	15432
20.1	15	17192	20.3	15	17449
22.4	20	19172	22.5	20	19299
23.5	25	20588	23.8	25	20990
25.3	30	30186	25.3	30	30186

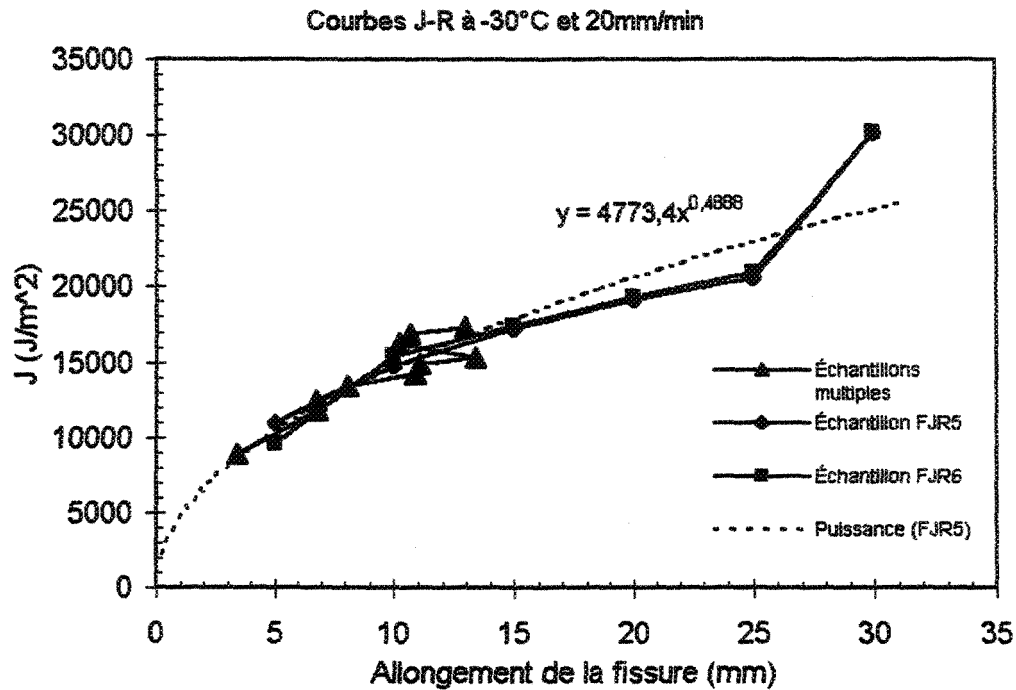


FIGURE 5.17 – Courbes J-R à -30°C et 20 mm/min

La figure 5.17 montre les trois courbes *J-R* obtenues à -30°C et 20 mm/min. On s'aperçoit que la courbe *J-R* de la méthode à éprouvettes multiples est beaucoup plus courte que les deux autres en terme d'allongement de la fissure. En fait, cela est uniquement dû au fait que les éprouvettes n'ont pas été soumises à des allongements dL assez grands. Par crainte de rompre totalement les éprouvettes et de perdre les données, nous avons été conservateurs dans le choix des déplacements du tablier dL appliqués. Cela démontre assez bien que la méthode à éprouvettes multiples nécessite une bonne expérience du comportement en rupture du matériau testé. Il faut déterminer le déplacement dL à appliquer pour provoquer un allongement de la fissure da qui n'est ni trop court (c'est notre cas) ni trop long pour ne pas briser l'éprouvette complètement.

5.6.5 Courbes J-R à -30°C et 200 mm/min

Le tableau 5.10 présente les résultats obtenus avec la méthode à éprouvettes multiples à une température de -30°C et une vitesse de 200 mm/min. On peut remarquer que les valeurs de J calculées sont encore plus grandes ici que celles calculées dans le cas précédent. Cela s'explique par le fait que pour une déformation donnée, les contraintes sont plus grandes lorsque le taux de déformation est plus grand.

TABLEAU 5.10 – Méthode à éprouvettes multiples à -30°C et 200 mm/min

Éprouvette	Déplacement du tablier dL	Longueur de la fissure a	Avancement de la fissure da	Intégrale J	η
Jr4-01	19.0	16.18	11.18	22884	1.26
Jr4-02	20.0	19.08	14.08	23780	1.19
Jr4-03	21.0	25.48	20.48	23764	1.09
Jr4-04	21.5	24.08	19.08	24779	1.08
Jr4-05	22.0	25.65	20.65	25374	1.09
Jr4-06	22.5	25.83	20.83	26196	1.11
Jr4-07	23.5	28.06	23.06	28279	1.20
Jr4-08	24.5	29.48	24.48	31484	1.26
Jr4-10	25.0	32.06	27.06	36180	1.40
Jr4-09	25.5	37.37	32.37	47577	1.78

TABLEAU 5.11 – Méthode à éprouvette unique à -30°C et 200 mm/min

FJR7		
Déplacement du tablier dL	Avancement de la fissure da	Intégrale J
17.2	5	18916
21.1	10	27126
22.7	15	28685
24.7	20	30898
26.3	25	35090
27.5	30	51738

Dans le tableau 5.11, on peut remarquer que seuls les résultats de l'éprouvette FJR7 sont disponibles pour la méthode à éprouvette unique. En fait, un problème d'éclairage lors de l'essai sur l'éprouvette FJR8 a rendu impossible la mesure de la longueur de la fissure à l'aide du système vidéo.

La figure 5.18 montre les deux courbes J - R obtenues. Il semble y avoir un écart considérable entre les deux courbes. Cet écart atteint pratiquement 20% par endroits. Cependant, il est plus important de remarquer que les deux courbes se ressemblent beaucoup et qu'elles ont la même tendance. Cependant, il aurait été préférable d'avoir plus de courbes J - R afin de préciser la tendance de celle-ci.

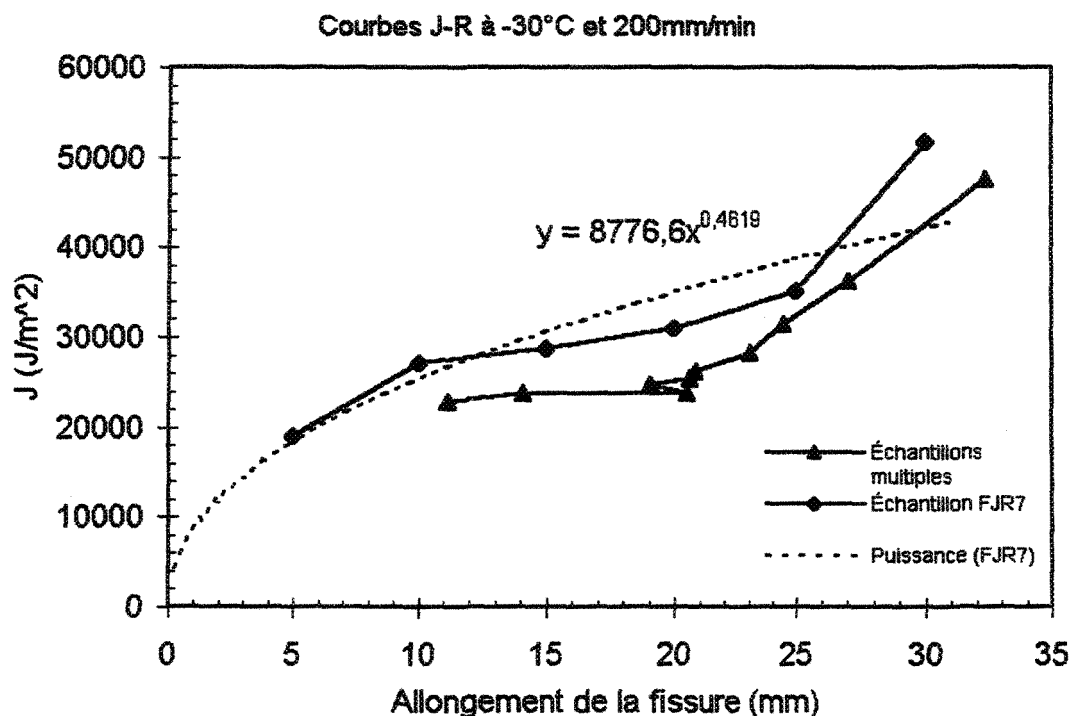


FIGURE 5.18 – Courbes J - R à -30°C et $200\text{mm}/\text{min}$

Les figures 5.15, 5.16, 5.17 et 5.18 montrent que les données obtenues avec la méthode à éprouvette unique et le système vidéo fournissent les valeurs de longueur de fissure et résistance à la fracture plus lisse et consistante. Donc, cette méthode n'est pas seulement plus robuste, mais elle permet de réaliser l'acquisition de données expérimentales plus rapidement.

5.7 Comparaison avec les courbes de traction

Afin de vérifier si le modèle non linéaire que nous avons utilisé permet de simuler fidèlement le comportement réel du matériau, nous avons fait une comparaison avec les courbes de traction obtenues lors des essais de rupture. Pour ce faire, nous avons calculé les charges correspondantes à tous les déplacements du tablier que nous avons simulés. Pour calculer ces charges, nous avons fait la somme de toutes les forces de réaction en direction y des nœuds qui forment l'extrémité de l'éprouvette. La figure 5.19 illustre les forces de réaction utilisées dans le calcul.

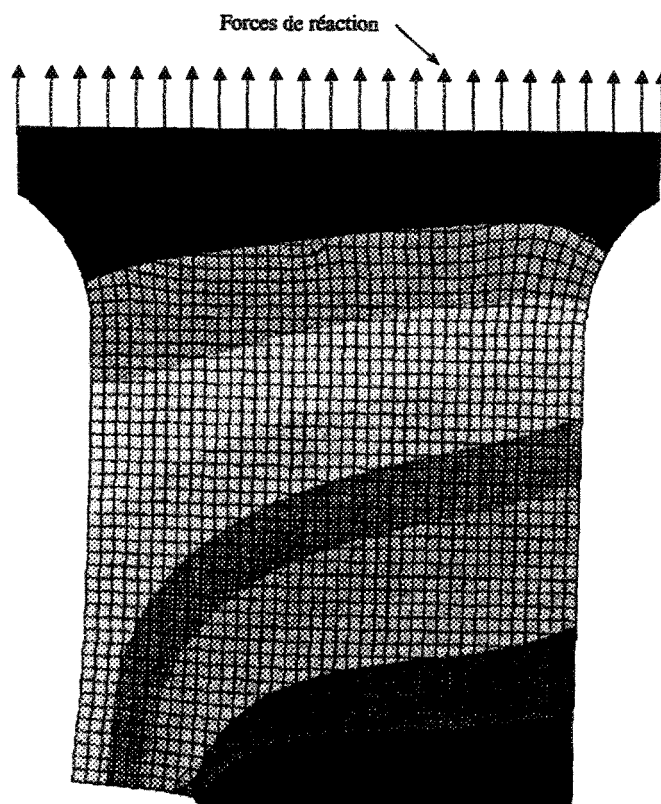


FIGURE 5.19 – Forces de réaction sur l'éprouvette de caractérisation

Les résultats de ces calculs de vérification sont montrés dans les figures 5.20 et 5.21. On peut y remarquer facilement qu'il existe des différences entre les courbes de traction calculées par le modèle ANSYS et celles mesurées lors des essais de rupture mais les tendances sont semblables.

Le tableau 5.12 présente les noms des essais utilisés pour chaque conditions de test.

TABLEAU 5.12 – Noms des essais

Nom de l'essai	Température (°C)	Vitesse (mm/min)
JR1 et JR2	22	20
JR3 et JR4	50	20
JR5 et JR6	-30	20
JR7	-30	200

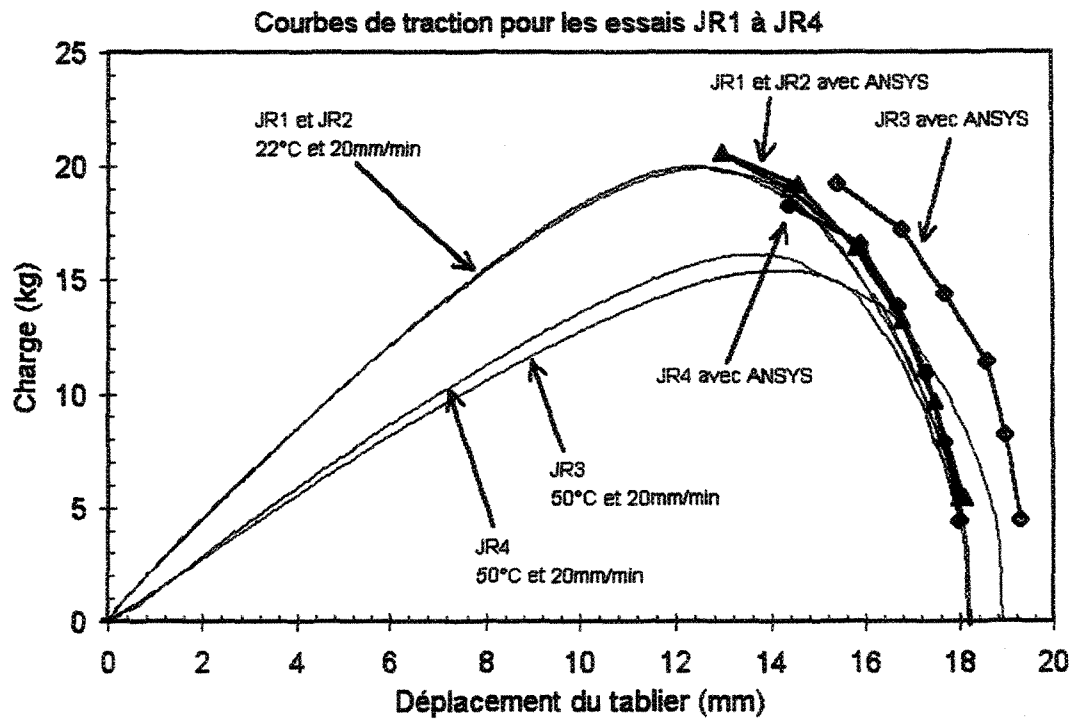


FIGURE 5.20 – Courbes de traction des essais JR1 à JR4

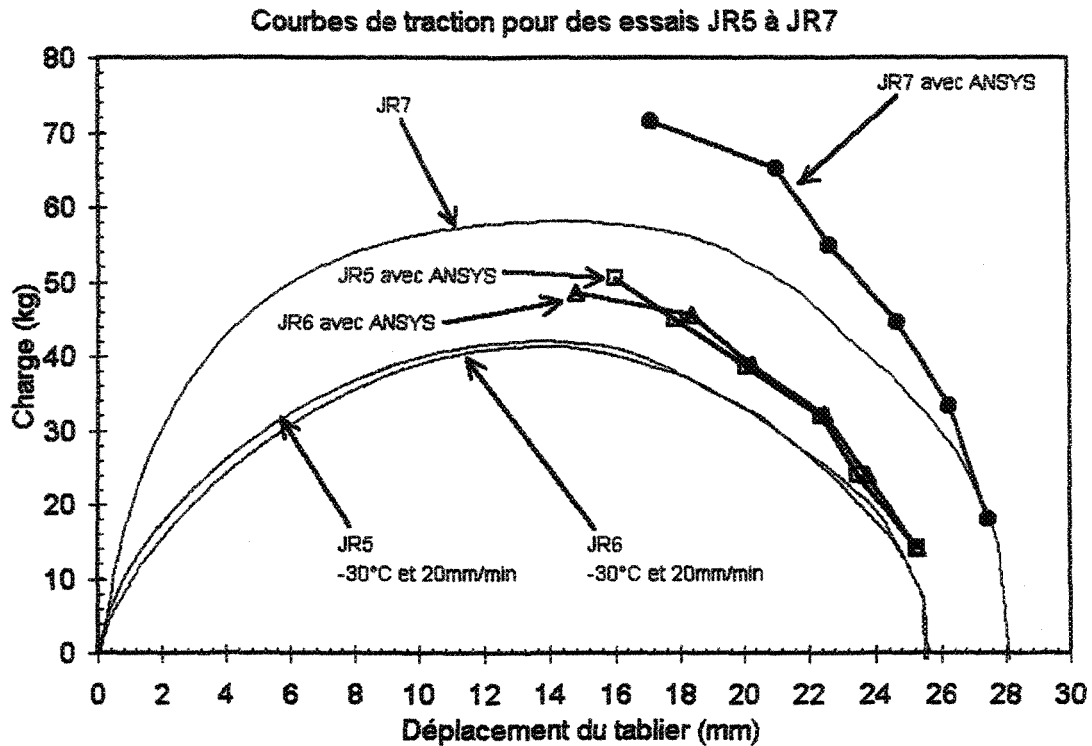


FIGURE 5.21 – Courbes de traction des essais JR5 à JR7

Il existe cependant une raison qui permet d'expliquer ces différences. En fait, il semble que cela soit dû à la loi de comportement utilisée pour modéliser le propergol. Lors des essais de traction uniaxial (figure 4.2), nous avons vu qu'au-delà d'environ 30% de déformation les éprouvettes de propergol ne peuvent plus maintenir la charge appliquée et se brisent. La loi de Ramberg-Osgood ne reproduit pas tout à fait ce type de comportement lorsque les déformations sont très grandes. Plutôt que de diminuer, les contraintes augmentent tant et aussi longtemps que les déformations augmentent. Cela a pour effet d'accroître la charge calculée. La figure 5.22 illustre bien cette différence entre les deux comportements non linéaires.

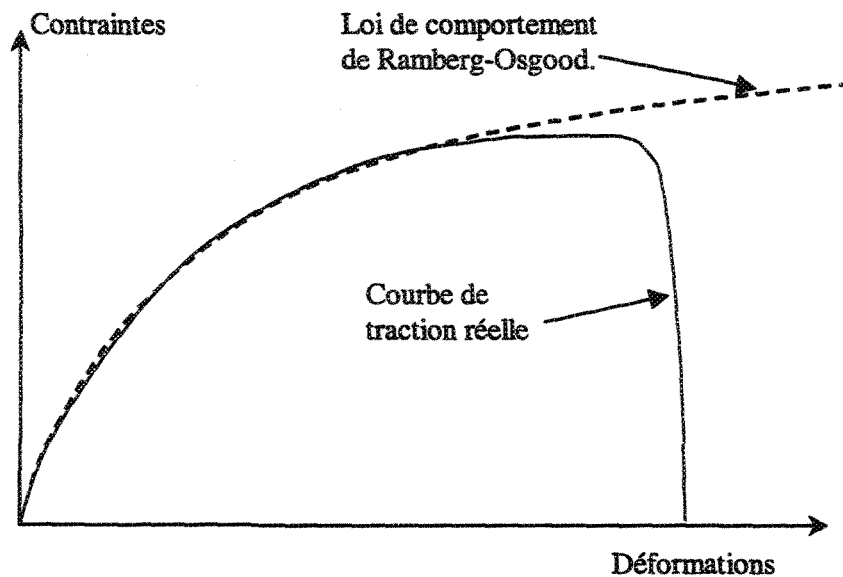


FIGURE 5.22 – Comportements non linéaires différents

Pour réduire cette différence, nous avons tenté d'utiliser une loi de comportement mixte. C'est à dire, non linéaire élastique jusqu'à 30% de déformation et parfaitement plastique par la suite. Cela a permis d'obtenir de meilleurs résultats. Cependant, il est difficile de faire converger le calcul par élément finis et le temps nécessaire pour obtenir une solution est très long. Il semble donc que cette solution ne soit pas tout à fait envisageable pour améliorer la précision des calculs.

6.0 CONCEPTION D'UNE ÉPROUVETTE DE VALIDATION

Les éprouvettes que nous avons présentées jusqu'ici ont une géométrie relativement simple. Ils sont donc appropriés pour faire les tests de caractérisation. Cette section présente les différentes étapes de la conception de l'éprouvette de validation. Puisque cette éprouvette a une géométrie plus complexe, elle permet de vérifier la concordance entre les résultats de l'intégrale J provenant d'une éprouvette de caractérisation et les résultats de l'intégrale J provenant d'une éprouvette avec une géométrie et champs de déformation plus complexe. Si cette concordance existe, nous devrions être capable de reproduire numériquement le comportement en rupture J - R mesuré avec les éprouvettes de caractérisation à partir des informations mesurées avec les éprouvettes de validation.

Étant donné que l'état de contrainte plane existe dans l'éprouvette de caractérisation, l'éprouvette de validation devrait être aussi fabriqué d'une plaque mince pour reproduire ce même état. Pour avoir un champ de déformation différent ou non-uniforme, un gradient de déformation peut être imposé en variant la géométrie de l'éprouvette. Cette section discute de la conception de l'éprouvette de validation.

6.1 Gradient de déformation

La définition du gradient de déformation utilisée dans cette étude découle de l'équation suivante :

$$e(x) = e_0(1 + \text{Gradient} \cdot x). \quad [6-1]$$

Où $e(x)$ est la déformation de l'ingénieur au point x et e_0 est la déformation de l'ingénieur à l'origine.

Pour être en mesure d'utiliser correctement cette équation, il faut obligatoirement que l'éprouvette soit étiré dans la direction y d'un système cartésien de coordonnées tel que celui montré à la figure 6.1.

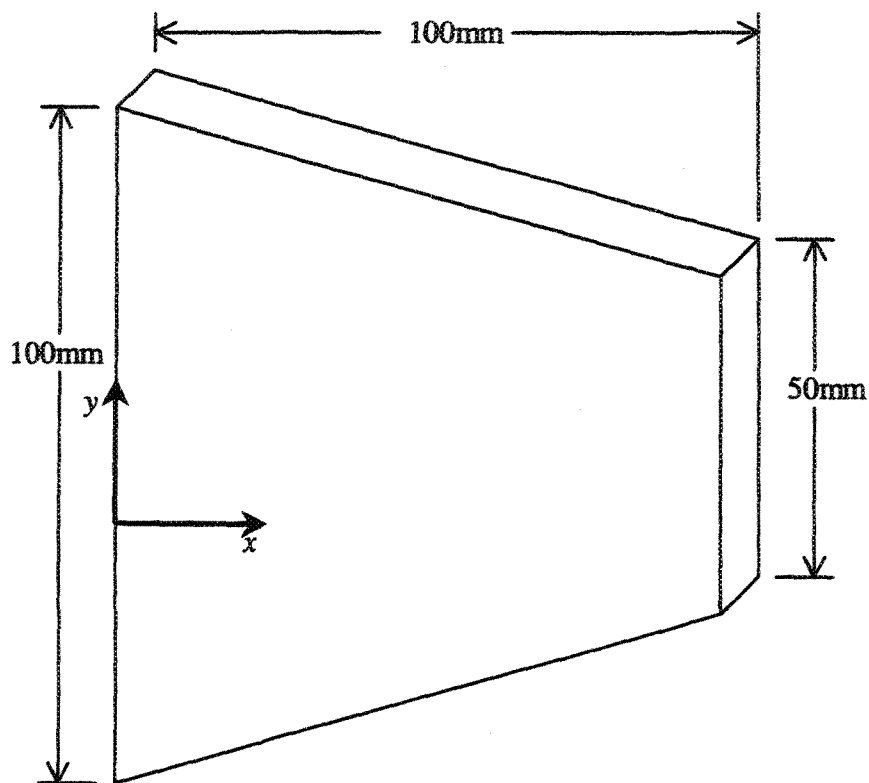


FIGURE 6.1 – Éprouvette avec gradient de déformation

L'équation 6-1 permet de déterminer la déformation de l'ingénieur en direction y pour tout point situé sur l'axe x en autant que l'on connaisse la déformation de l'ingénieur e_0 en un point de l'axe x et le gradient de déformation. Si on ne connaît pas celui-ci, on peut le calculer à l'aide de 2 points de l'équation 6-1. Supposons qu'on étire l'éprouvette de la figure 6.1 d'une distance de 1 mm sur toute sa longueur. Le côté droit de l'éprouvette (celui de 50 mm) sera déformé de 2% alors que le côté gauche (celui de 100 mm) sera déformé de seulement 1%. Si on suppose également que ce 1% de déformation constitue la valeur de e_0 dans l'équation 6-1, 2% sera égal à $e(100)$. Puisque l'on connaît maintenant 2 points, on peut ainsi calculer la valeur du gradient de déformation en manipulant l'équation 6-1.

$$\text{Gradient} = \frac{\left[\frac{e(x)}{e_0} - 1 \right]}{x} = \frac{\left[\frac{0.02}{0.01} - 1 \right]}{100} = \frac{1}{100} = 0.01/\text{mm} \quad [6-2]$$

On peut également le calculer directement à partir des dimensions de l'éprouvette à l'aide de l'équation suivante :

$$\text{Gradient} = \frac{\left[\frac{h_{gauche}}{h_{droite}} - 1 \right]}{W} = \frac{\left[\frac{100}{50} - 1 \right]}{100} = \frac{1}{100} = 0.01/\text{mm}. \quad [6-3]$$

Où

h_{gauche} est la hauteur du côté gauche de l'éprouvette,

h_{droite} est la hauteur du côté droit de l'éprouvette,

W est la largeur de l'éprouvette.

6.2 Modélisation et optimisation de l'éprouvette de validation

L'éprouvette de validation fut inspirée d'un article écrit par Liu [29] en 1990. Dans cet article, Liu utilise une éprouvette de propergol présentant un gradient de déformation telle que celle illustrée à la figure 6.2. Liu a utilisé la mécanique linéaire de la rupture pour tracer des courbes du coefficient d'intensité de contrainte K_I en fonction de l'avancement des fissures Δa . Ces courbes portent le nom de « courbes de résistance K-R ». Il a observé que les courbes obtenues sont indépendantes de la longueur initiale de la fissure. Il observa également que le gradient de déformation de l'éprouvette a un effet négligeable sur la courbe de résistance K-R. Dans notre étude, la mécanique linéaire de la rupture n'est pas utilisée, car on sait qu'elle n'est plus valide lorsque les déformations plastiques sont importantes. Nous avons plutôt utilisé la théorie de l'intégrale de contour J pour tracer des courbes de résistance J-R.

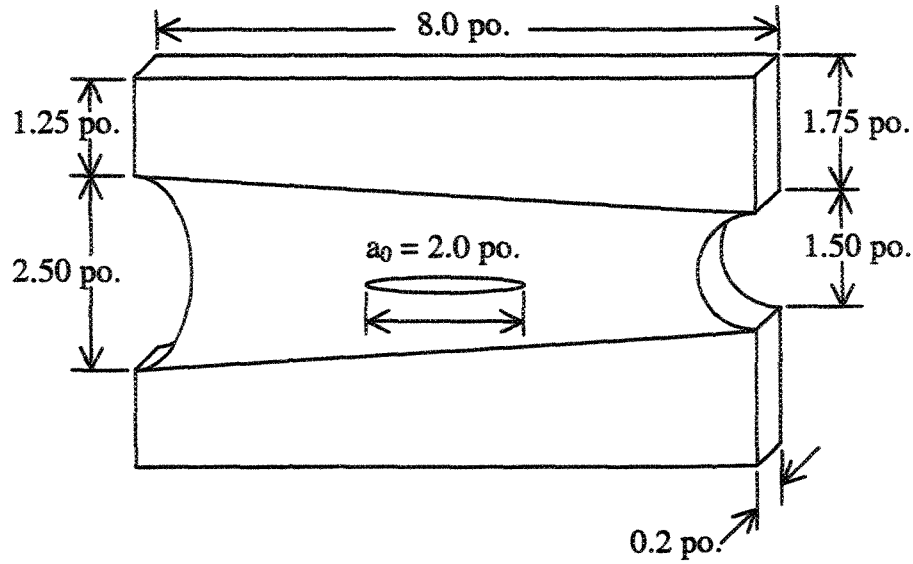


FIGURE 6.2 – Éprouvette utilisé par Liu

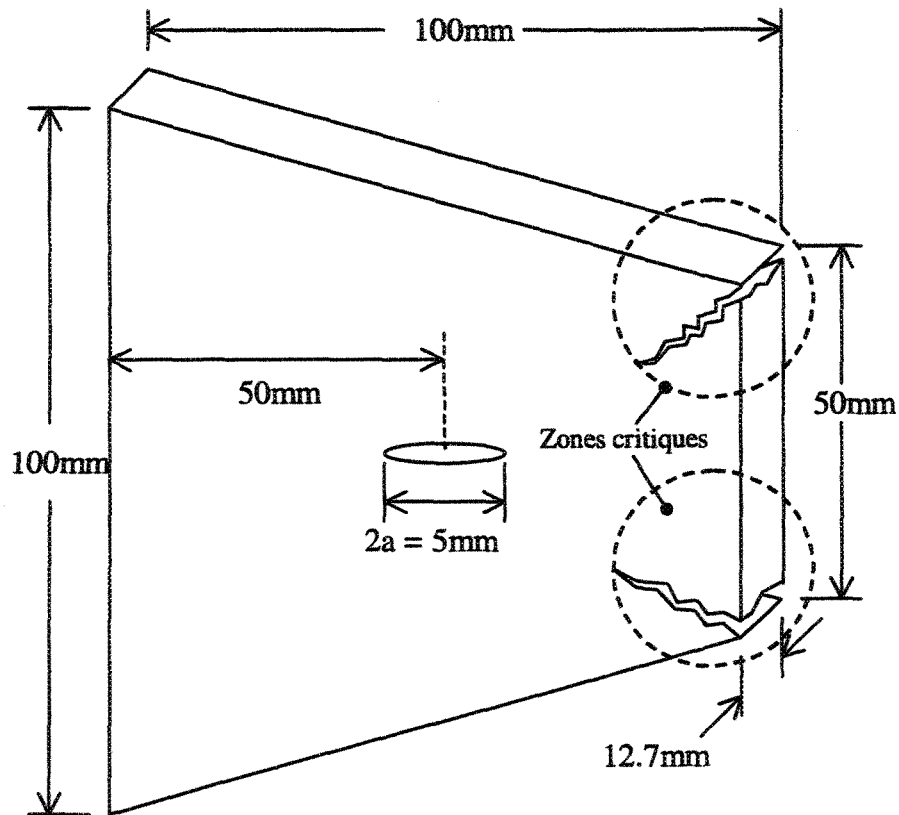


FIGURE 6.3 – Éprouvette de validation originale

Comme on peut le voir sur la figure 6.2, le gradient de déformation n'est pas très grand. En utilisant l'équation 6-3, on peut calculer la valeur du gradient de déformation utilisé par Liu.

$$\text{Gradient} = \frac{\left[\frac{2.5}{1.5} - 1 \right]}{8 \cdot 25.4} = 0.003281 / \text{mm} \quad [6-4]$$

À la figure 6.3, on peut voir l'éprouvette telle qu'imaginée au début de sa conception. Avant de fabriquer une grande quantité d'éprouvettes, quelques essais préliminaires ont été réalisés. Ces essais ont permis de réaliser que la géométrie de l'éprouvette provoque de fortes concentrations des contraintes dans les coins inférieur et supérieur droits tel que montré par les cercles pointillés de la figure 6.3. Lors des essais préliminaires, les deux coins se sont déchirés avant que la fissure du centre ne s'allonge. Il a donc fallu apporter quelques changements à la géométrie de l'éprouvette afin de diminuer les contraintes dans ces deux régions. Pour ce faire, nous avons commencé par réduire un peu le gradient de déformation en ajoutant 10 mm de longueur du côté droit. Le côté droit fait maintenant 60 mm de long ce qui donne un nouveau gradient de déformation de :

$$\text{Gradient} = \frac{\left[\frac{100}{60} - 1 \right]}{100} = 0.006667 / \text{mm} . \quad [6-3]$$

Ce gradient de déformation est légèrement supérieur au double de celui utilisé par Liu. Même après ce changement de géométrie, les analyses par éléments finis ont montré que les contraintes étaient encore trop élevées dans les coins. Nous avons donc choisi d'entailler le côté droit et de placer des arrondis pour réduire les contraintes. Plusieurs autres analyses par éléments finis nous ont permis de déterminer les dimensions optimales de l'entaille et de l'arrondi. Nous avons choisi de laisser le centre de la fissure à 50 mm de distance du côté gauche de l'éprouvette afin de réduire le nombre de paramètres à optimiser. Bien qu'il soit préférable de placer la fissure au centre de l'éprouvette pour des raisons esthétiques, cela semble assez difficile à réaliser. En fait, lorsque le centre de la fissure est déplacé vers la gauche, cela retarde le début de l'avancement de la pointe droite de la fissure. Il est nécessaire que cet avancement débute aussitôt que possible afin de réduire les contraintes

dans les coins supérieur et inférieur droits. Le modèle ANSYS que nous avons créé pour faire l'optimisation est montré à la figure 6.4.

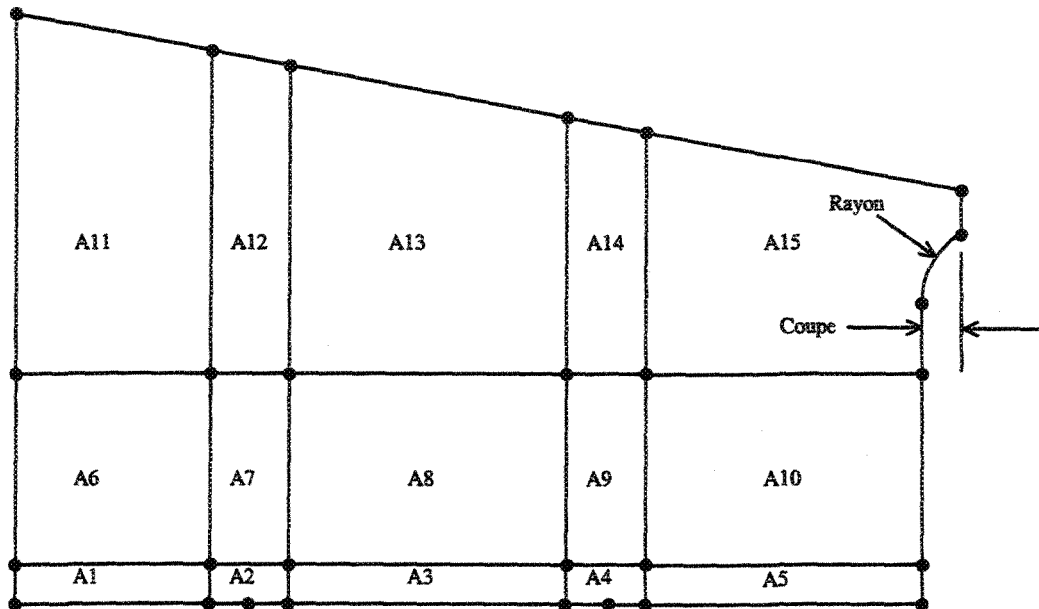


FIGURE 6.4 – Modèle de l'éprouvette de validation

On peut remarquer que le modèle a été divisé en 15 sections. Celles-ci permettent de contrôler plus efficacement la taille et la forme des éléments créés lors du maillage. Les aires A2 et A4 contiennent des éléments dégénérés permettant de simuler les pointes de la fissure. Les figures 5.14 et 5.15 montrent des maillages semblables à ceux utilisés dans les aires A2 et A4.

On peut également voir à la figure 6.4 les paramètres que nous avons fait varier lors de l'optimisation de la géométrie. Les résultats obtenus lors des différentes analyses par éléments finis sont présentés dans les tableaux 6.1 à 6.6.

TABLEAU 6.1 – Résultats avec une coupe de 6.5 mm

Simulation	Rayon	J_{gauche}	J_{droite}	Max. S1	Max. SXY
1	0.008	1498.18	1712.26	825441	294570
2	0.009	1498.26	1712.64	808209	285864
3	0.010	1498.28	1712.84	790498	273376
4	0.011	1498.26	1712.91	776029	266117
5	0.012	1498.21	1712.88	762247	274906

TABLEAU 6.2 – Résultats avec une coupe 7.0 mm

Simulation	Rayon	J_{gauche}	J_{droite}	Max. S1	Max. SXY
6	0.008	1502.68	1717.10	827182	296410
7	0.009	1502.75	1717.42	807581	286091
8	0.010	1502.77	1717.58	790735	272876
9	0.011	1502.75	1717.63	776312	286109
10	0.012	1502.70	1717.60	824817	302335

TABLEAU 6.3 – Résultats avec une coupe 7.5 mm

Simulation	Rayon	J_{gauche}	J_{droite}	Max. S1	Max. SXY
11	0.008	1502.31	1716.09	827892	296387
12	0.009	1502.42	1716.58	808340	286402
13	0.010	1502.45	1716.84	792252	273061
14	0.011	1502.43	1716.94	777598	265746
15	0.012	1502.37	1716.93	763676	256945

TABLEAU 6.4 – Résultats avec une coupe 8.0 mm

Simulation	Rayon	J_{gauche}	J_{droite}	Max. S1	Max. SXY
16	0.008	1502.08	1715.50	825931	294966
17	0.009	1502.22	1716.11	808682	285974
18	0.010	1502.26	1716.44	792461	274728
19	0.011	1502.24	1716.57	777774	266447
20	0.012	1502.17	1716.57	765771	258166

TABLEAU 6.5 – Résultats avec une coupe 8.5 mm

Simulation	Rayon	J_{gauche}	J_{droite}	Max. S1	Max. SXY
21	0.009	1484.62	1697.94	807308	286278
22	0.010	1484.66	1698.28	791231	273369
23	0.011	1484.63	1698.43	777660	266243
24	0.012	1484.55	1698.42	765478	258371
25	0.013	1484.44	1698.31	754387	250088

TABLEAU 6.6 – Résultats avec une coupe 9.0 mm

Simulation	Rayon	J_{gauche}	J_{droite}	Max. S1	Max. SXY
26	0.009	1480.07	1692.97	806242	286172
27	0.010	1480.12	1693.39	791270	274647
28	0.011	1480.08	1693.57	777867	266976
29	0.012	1480.00	1693.58	765870	258753
30	0.013	1479.88	1693.47	754985	251653

Pour chaque analyse, nous avons simulé un allongement de 10 mm de l'éprouvette. Puisque nous utilisons la symétrie de l'éprouvette pour réduire le modèle, nous avons dû simuler un déplacement de 5 mm en direction y du côté supérieur de l'éprouvette. Afin de faire les calculs plus rapidement, nous avons utilisé une loi de comportement linéaire élastique plutôt que d'utiliser le vrai comportement non linéaire du matériau. Le module de Young a été estimé à 3.424 MPa pour une température de 22°C et une vitesse de 20 mm/min. Cela a pour effet de prédire des contraintes beaucoup plus élevées qu'elles ne le sont en réalité pour un tel allongement. Par conséquent, les valeurs de J sont également surévaluées.

Dans les tableaux 6.1 à 6.6, on retrouve les valeurs surévaluées de J aux pointes gauche et droite de la fissure. On peut remarquer que les différentes coupes et différents rayons appliqués n'ont pas de très grands effets sur les valeurs de J . Puisque la valeur de J à la pointe droite de la fissure ne change pas beaucoup, cela nous laisse croire que l'optimisation ne retarde pas le début de l'allongement de la fissure.

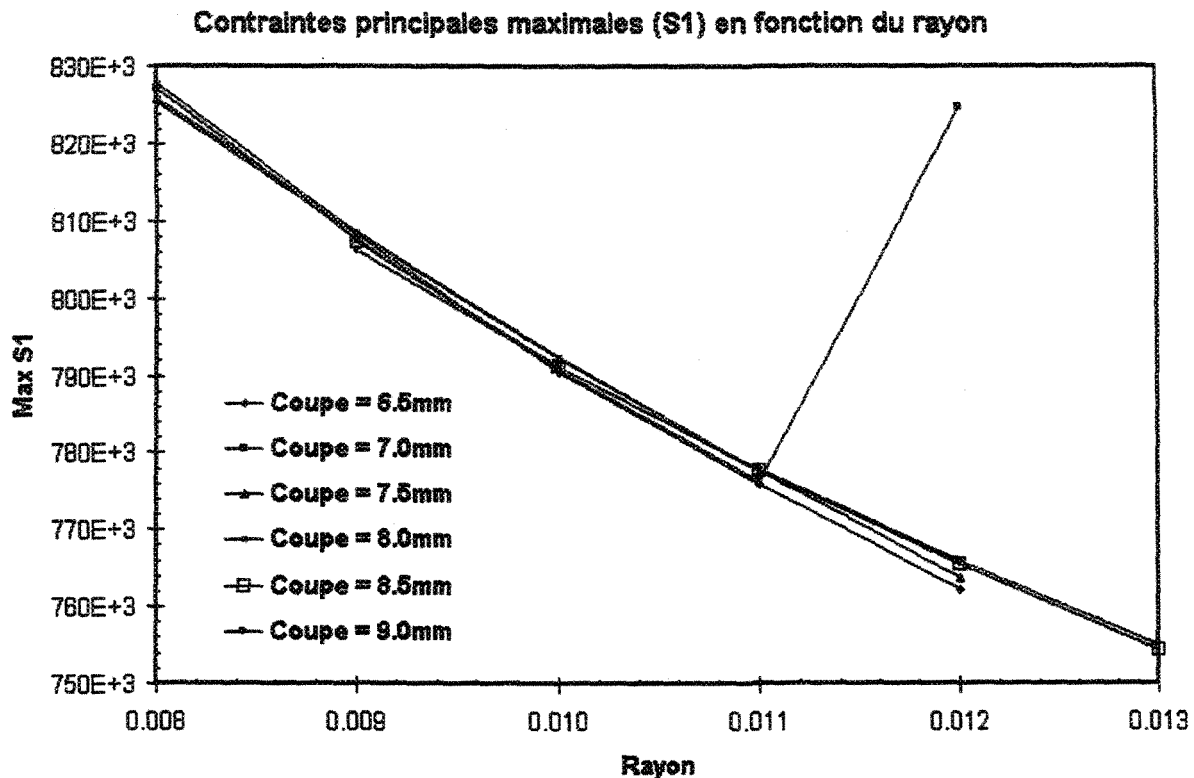


FIGURE 6.5 – Contraintes principales maximales en fonction du rayon

On retrouve également dans les tableaux 6.1 à 6.6 les valeurs de la contrainte principale maximale $S1$ et du cisaillement maximal en direction xy . Ces valeurs ont été prises parmi les éléments situés à l'intérieur de l'aire A15 de la figure 6.4. On peut remarquer qu'en général, plus le rayon utilisé est grand, moins les contraintes principales sont grandes. La figure 6.5 montre bien l'effet du rayon sur la valeur de la contrainte principale maximale. On peut comprendre qu'en général, plus le rayon de l'arrondi et la profondeur de l'entaille sont grands, plus les contraintes principales maximales sont petites. Ainsi, nous avons déterminé que pour ne pas trop modifier les dimensions générales de l'éprouvette, il valait mieux s'en tenir à un rayon de 12 mm et une profondeur d'entaille de 8.5 mm. La figure 6.6 montre la géométrie finale telle qu'optimisée.

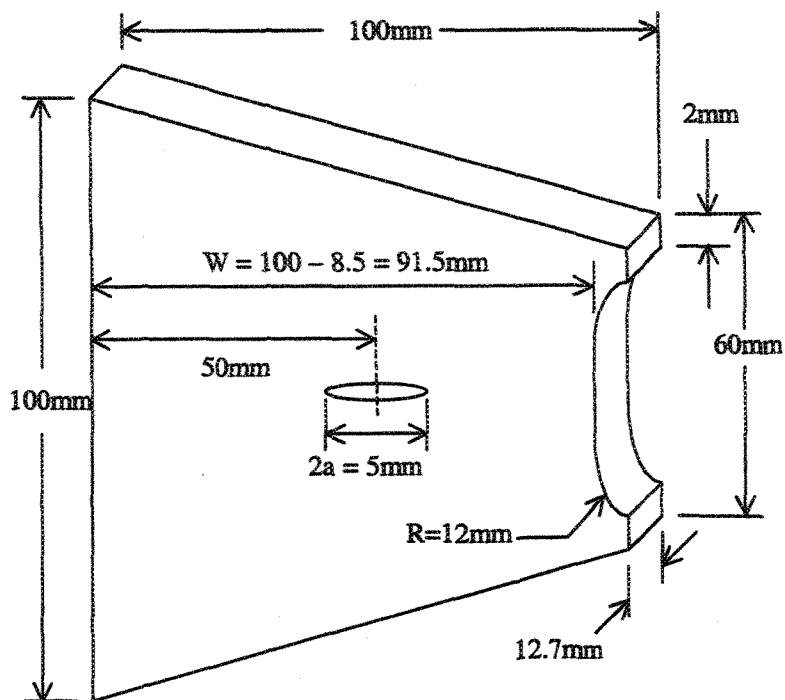


FIGURE 6.6 – Éprouvette de validation

La figure 6.7 montre bien que les contraintes principales les plus élevées de la zone A15 (figure 6.4) ne sont plus situées dans le coin supérieur droit, mais plutôt à quelque part au long de l'arrondi.

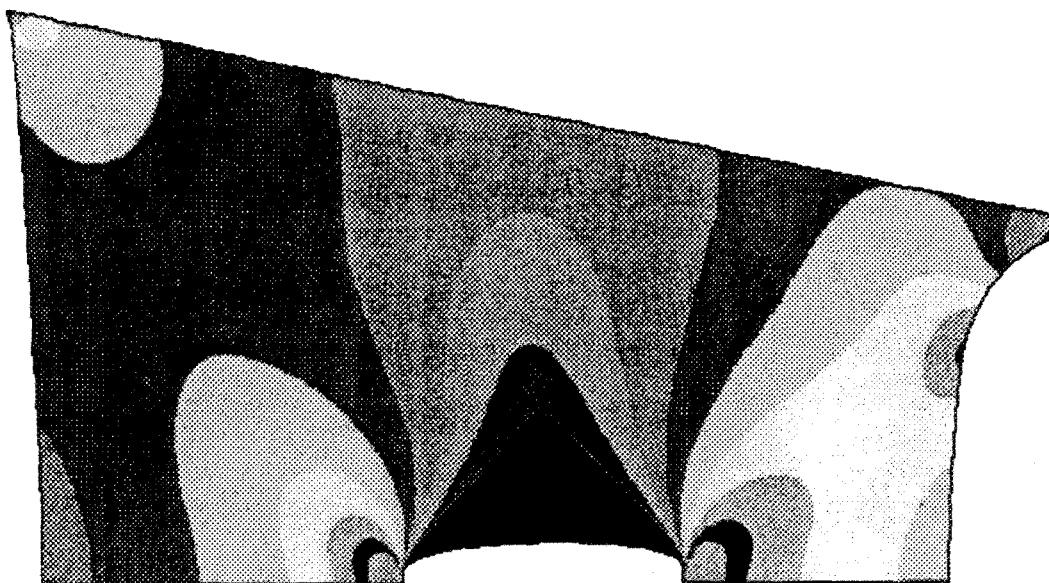


FIGURE 6.7 – Contraintes principales S1

6.3 Analyse de convergence

Pour choisir la taille des éléments les plus gros du maillage, une analyse de convergence a été réalisée. Le tableau 6.7 présente les résultats de cette analyse.

TABLEAU 6.7 – Analyse de convergence de l'éprouvette de validation

Nom de la simulation	ΔL (m)	a_{gauche} (m)	a_{droite} (m)	Taille des éléments (m)	J_{gauche} (J/m ²)	J_{droite} (J/m ²)
Conv01	0.010	0.005	0.005	0.0020	1116.350	1234.356
Conv02	0.010	0.005	0.005	0.0018	1138.200	1228.046
Conv03	0.010	0.005	0.005	0.0016	1139.117	1242.112
Conv04	0.010	0.005	0.005	0.0014	1139.538	1231.553
Conv05	0.010	0.005	0.005	0.0012	1142.000	1235.901
Conv06	0.010	0.005	0.005	0.0010	1155.235	1249.990
Conv07	0.010	0.005	0.005	0.0008	1146.544	1239.122
Conv08	0.010	0.005	0.005	0.0007	1154.749	1240.080
Conv09	0.010	0.005	0.005	0.0006	1148.287	1236.180
Conv10	0.010	0.005	0.005	0.0005	1155.111	1239.365

Comme on peut le voir, seule la taille des éléments a été changée entre chaque simulation. À chaque fois, un allongement de l'éprouvette de 10 mm a été simulé. De plus, la longueur des fissures est demeurée à 5 mm durant toute l'analyse de convergence.

La valeur de l'intégrale de contour J fut utilisée comme critère de convergence. Les écarts maximaux de J_{gauche} et J_{droite} sont donnés par :

$$\text{Écart}_{gauche} = \frac{J_{max} - J_{min}}{J_{min}} \times 100 = \frac{1155.235 - 1116.350}{1116.350} \times 100 = 3.48\%$$

$$\text{Écart}_{droite} = \frac{J_{max} - J_{min}}{J_{min}} \times 100 = \frac{1249.990 - 1228.046}{1228.046} \times 100 = 1.79\%$$

Les écarts mesurés ici sont plus grands que ce qui a été observé plus tôt au chapitre 5 (section 5.4.2). Cela est tout simplement dû au fait que lors de cette nouvelle analyse de convergence, nous avons utilisé des maillages plus gros qu'au chapitre 5 (2.0 mm au lieu de 1.5 mm). Puisque les écarts sont assez faibles, il semble que toutes les tailles d'éléments simulées sont utilisables. Nous avons donc choisi d'utiliser des éléments de 1 mm de grosseur puisque cette taille permet d'obtenir une bonne résolution. De plus, le temps nécessaire pour calculer la solution par éléments finis demeure raisonnable.

7.0 VALIDATION DE LA MÉTHODE D'ANALYSE ET CARACTÉRISATION

Lorsque l'éprouvette de validation est étirée, les contraintes induites sont plus élevées du côté droit que du côté gauche. Par conséquent, la pointe droite de la fissure se déplace plus rapidement que la pointe gauche. Malgré cette différence, on pose les deux hypothèses suivantes :

- Les courbes de résistance $J-R_{\text{Gauche}}$ et $J-R_{\text{Droite}}$ sont semblables.
- Ces courbes de résistance sont également semblables à la courbe de résistance $J-R$ caractéristique de l'éprouvette en tension fissurée sur le côté.

La fissure gauche qui correspond avec le côté plus long de l'éprouvette est toujours placée à gauche et la fissure droite qui correspond avec le côté le plus court de l'éprouvette est toujours placée à droite. Pour vérifier les deux hypothèses, nous avons tracé les deux courbes $J-R$ suite à des essais en laboratoire sur des éprouvettes de validation. Nous avons également utilisé le même système vidéo que celui utilisé pour la seconde méthode de caractérisation de la résistance à la rupture.

Tout comme pour le premier type d'éprouvette, nous avons tracé des lignes verticales espacées de 5 mm sur l'éprouvette de validation. Ces lignes nous ont permis de mesurer simplement l'avancement des pointes gauche et droite de la fissure. Le tableau 7.1 montre un exemple de données obtenues suite au visionnement d'un film produit à l'aide de notre système vidéo et la figure 7.1 présente une image obtenue avec ce même système. On remarque dans la figure que les coins supérieur et inférieur droits ont bien résistés lors des essais de rupture grâce à l'optimisation de la géométrie effectuée avec ANSYS.

TABLEAU 7.1 – Données obtenues avec les éprouvettes de validation

Δa_{droite} (mm)	Δa_{gauche} (mm)	Δl (mm)
2.0	2.5	12.2
6.5	7.5	14.3
9.5	12.5	15.0
13.5	17.5	15.9
16.5	22.5	16.6
19.5	27.5	17.0
21.5	32.5	17.3
22.5	37.5	17.4

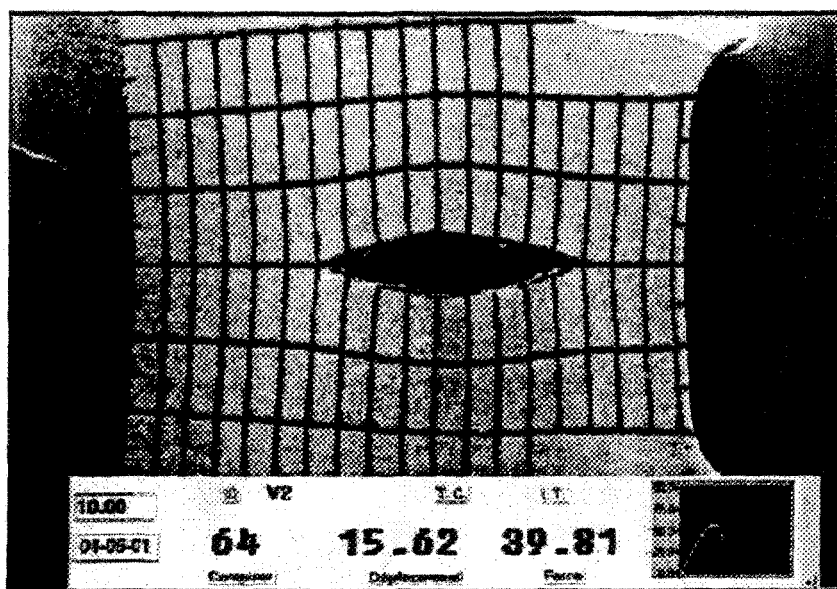


FIGURE 7.1 – Image vidéo de l'éprouvette de validation

7.1 Conditions de tests

Les essais de rupture ont été réalisés aux mêmes conditions que celles utilisées avec les éprouvettes en tension fissurées sur le côté. Cependant, seule la méthode à éprouvette unique fut appliquée. Le tableau 7.2 présente les conditions expérimentales utilisées lors de la validation.

TABLEAU 7.2 – Conditions expérimentales pour la validation

Vitesse	-40°C	-30°C	-10°C	+22°C	+50°C
2 mm/min					
20 mm/min		✓		✓	✓
200 mm/min		✓			

Puisque que nous avons répété les expériences 3 fois pour chaque condition, nous avons fait 12 expériences en tout. Pour plus de sécurité, 15 éprouvettes ont d'abord été fabriquées. Pour chaque essai, nous avons mesuré a et ΔL et on a calculé les valeurs de J_{Gauche} et J_{Droite} correspondant avec ANSYS.

7.2 Test à 22°C et 20 mm/min

Les analyses par éléments finis réalisées aux chapitres 3, 5 et 6, nous permettent de croire que les résultats obtenus avec ANSYS sont également valables pour l'analyse de l'éprouvette de validation. Les résultats des essais de validation à une température de 22°C et une vitesse de 20 mm/min sont montrés dans les tableaux 7.3, 7.4 et 7.5.

TABLEAU 7.3 – Essais de validation V1

Δa_{droite} (mm)	Δa_{gauche} (mm)	ΔL (mm)	J_{gauche} (J/m ²)	J_{droite} (J/m ²)
2.5	2.0	12.2	1746	1887
7.5	6.5	14.3	3775	4344
12.5	9.5	15.0	4620	5597
17.5	13.5	15.9	5274	6688
22.5	16.5	16.6	5647	7390
27.5	19.5	17.0	5776	7840
32.5	21.5	17.3	5856	8945
37.5	22.5	17.4	5850	10887

TABLEAU 7.4 – Essai de validation V2

Δa_{droite} (mm)	Δa_{gauche} (mm)	ΔL (mm)	J_{gauche} (J/m ²)	J_{droite} (J/m ²)
2.5	2.5	12.0	1743	1890
7.5	6.5	13.5	3357	3865
12.5	10.5	14.6	4397	5357
17.5	13.5	15.1	4792	6095
22.5	16.5	15.7	5102	6708
27.5	19.5	16.2	5291	7210
32.5	20.5	16.6	5470	8300
37.5	21.5	16.7	5460	10210

TABLEAU 7.5 – Essai de validation V3

Δa_{droite} (mm)	Δa_{gauche} (mm)	ΔL (mm)	J_{gauche} (J/m ²)	J_{droite} (J/m ²)
2.5	2.0	11.5	1525	1647
7.5	5.5	12.9	3001	3429
12.5	10.5	14.2	4161	5084
17.5	12.5	14.9	4688	5939
22.5	16.5	15.6	5041	6635
27.5	19.5	16.1	5230	7132
32.5	21.5	16.4	5313	8105
37.5	22.0	16.5	N/A	N/A

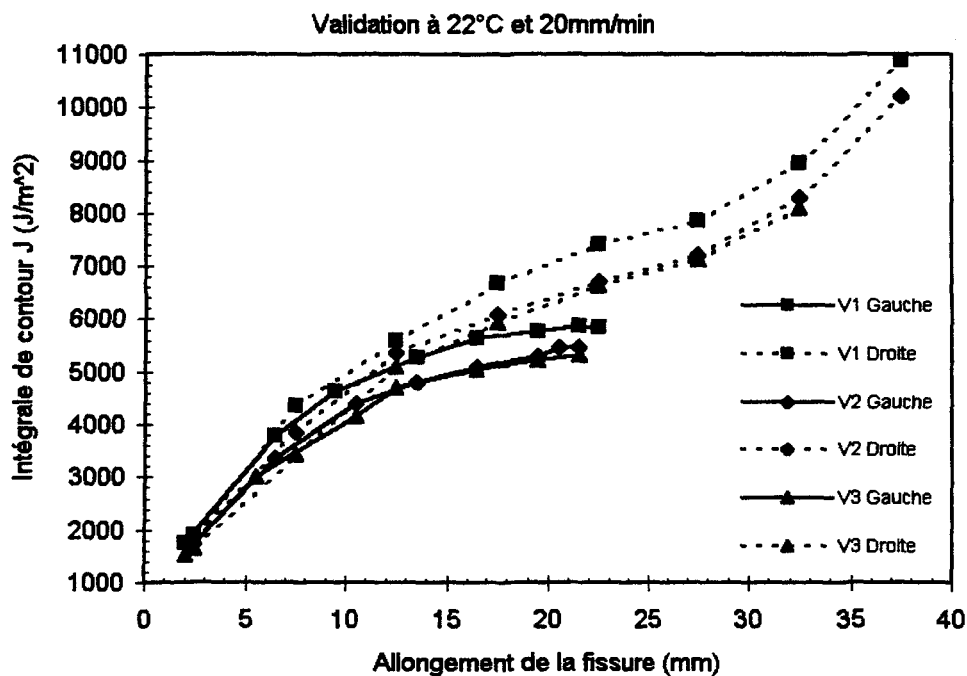


FIGURE 7.2 – Validation à +22°C et 20 mm/min

La figure 7.2 montre graphiquement les différents résultats obtenus à 22°C et 20 mm/min. Les courbes J -R de la pointe droite de la fissure de l'éprouvette de validation sont en pointillés alors que celles de la pointe gauche sont en trait continu.

On peut remarquer sur la figure 7.2 que les courbes *J-R* provenant de la pointe droite de la fissure en pointillés ont des valeurs plus élevées que celles provenant de la pointe gauche. Bien que ce phénomène fut un peu inattendu, il ne reste pas sans explications pertinentes. En fait, on peut supposer que cela est dû au taux de déformation qui est différent entre le côté gauche et le côté droit de l'éprouvette de validation. Cette différence est causée par le fait que le côté droit de l'éprouvette est beaucoup plus court que le côté gauche. Par exemple, lorsque l'éprouvette est étirée à une vitesse de 20 mm/min, le côté gauche qui fait 100 mm de longueur est déformé au taux de 20% par minute alors que le côté droit qui ne fait que 60 mm de longueur est déformé au taux de 33% par minute soit 66% plus rapide. Au départ de l'essai, les deux pointes de la fissure sont près du centre de l'éprouvette et cette région est déformée à un seul taux. Ce n'est que plus tard, lorsque les fissures sont plus longues, qu'une différence apparaît dans les taux de déformation. On peut observer ce phénomène dans la figure 7.2 par le fait que les courbes sont très rapprochées pour de petits allongements de la fissure et qu'à mesure que les fissures s'allongent, les courbes se séparent.

7.3 Test à 50°C et 20 mm/min

Les résultats obtenus à une température de 50°C et une vitesse de 20 mm/min sont montrés dans les tableaux 7.6, 7.7 et 7.8.

TABLEAU 7.6 – Essai de validation V4

Δa_{droite} (mm)	Δa_{gauche} (mm)	ΔL (mm)	J_{gauche} (J/m ²)	J_{droite} (J/m ²)
1.5	2.5	12.4	1420	1531
2.5	4.5	13.2	2005	2207
7.5	7.5	14.4	3181	3691
12.5	12.5	15.2	3873	4782
17.5	14.5	15.6	4136	5279
22.5	16.5	16.0	4314	5637
27.5	19.5	16.3	4364	5924
32.5	21.5	16.6	4433	6758
37.5	22.5	16.7		

TABLEAU 7.7 – Essai de validation V5

Δa_{droite} (mm)	Δa_{gauche} (mm)	ΔL (mm)	J_{gauche} (J/m ²)	J_{droite} (J/m ²)
2.5	2.5	11.5	1307	1417
7.5	6.5	12.8	2470	2844
12.5	9.5	13.8	3217	3902
17.5	13.5	14.3	3536	4504
22.5	16.5	14.8	3729	4925
27.5	18.5	15.1	3817	5192
32.5	19.5	15.3	3858	5814
37.5	20.5	15.4		

TABLEAU 7.8 – Essai de validation V6

Δa_{droite} (mm)	Δa_{gauche} (mm)	ΔL (mm)	J_{gauche} (J/m ²)	J_{droite} (J/m ²)
2.5	2.5	12.4	1552	1683
7.5	7.5	14.1	3051	3538
12.5	10.5	14.7	3641	4432
17.5	12.5	15.2	3947	5009
22.5	15.5	15.5	4093	5334
27.5	18.5	15.9	4198	5680
32.5	19.5	16.1	4245	6401
37.5	20.5	16.2		

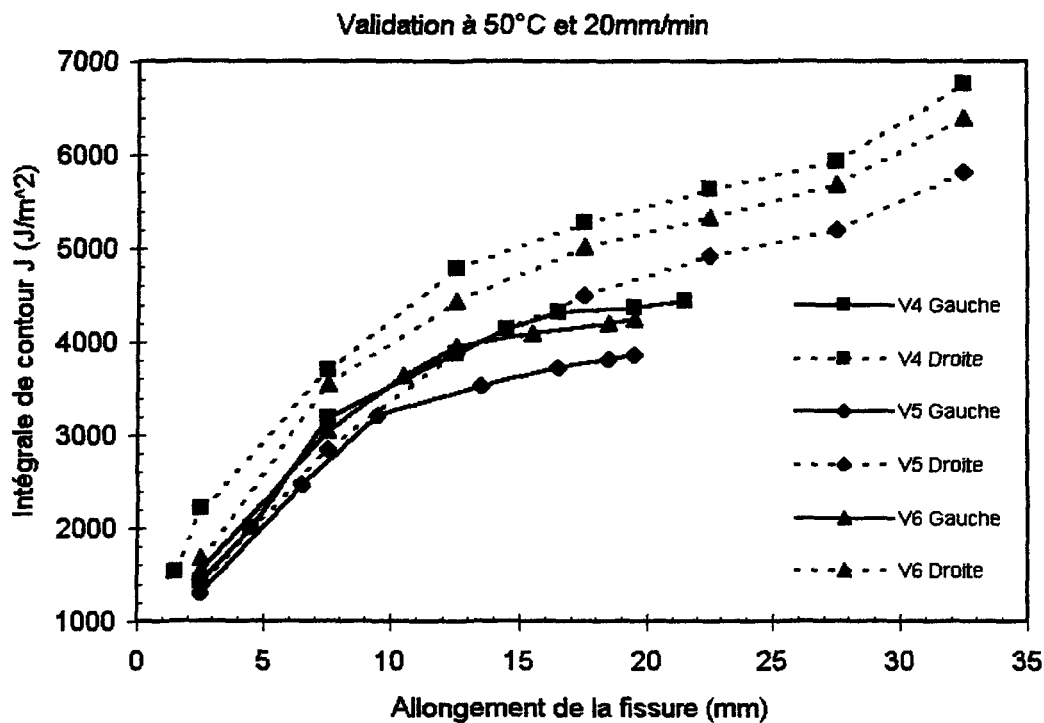


FIGURE 7.3 – Validation à +50°C et 20 mm/min

La figure 7.3 présente graphiquement les résultats obtenus lors des trois essais de validation V4, V5 et V6. Encore une fois, on peut remarquer que les courbes J -R de la pointe de droite de la fissure ont des valeurs plus élevées que celles de la pointe gauche. On explique cette

différence entre les courbes J - R de gauche et les courbes J - R de droite par le fait que le taux de déformation n'est pas le même des deux côtés de l'éprouvette.

7.4 Test à -30°C et 20 mm/min

Les résultats obtenus à une température de -30°C et une vitesse de 20 mm/min sont montrés dans les tableaux 7.9, 7.10 et 7.11.

TABLEAU 7.9 – Essai de validation V9

Δa_{droite} (mm)	Δa_{gauche} (mm)	ΔL (mm)	J_{gauche} (J/m^2)	J_{droite} (J/m^2)
2.5	2.5	12.8	4848	5261
7.5	6.5	15.9	10189	11677
12.5	11.5	18.1	13991	16881
17.5	14.5	19.4	15886	19707
22.5	17.5	20.6	17333	21895
27.5	20.5	21.5	18266	23578
32.5	21.5	22.1	18897	26338
37.5	22.5	22.3		

TABLEAU 7.10 – Essai de validation V13

Δa_{droite} (mm)	Δa_{gauche} (mm)	ΔL (mm)	J_{gauche} (J/m^2)	J_{droite} (J/m^2)
2.5	2.5	13.1	5037	5466
7.5	7.5	15.5	9939	11468
12.5	10.5	17.0	12681	15220
17.5	15.5	18.5	14724	18391
22.5	17.5	19.6	16069	20339
27.5	18.5	20.2	16752	21522
32.5	22.5	21.4	17941	25083
37.5	24.5	21.7		

TABLEAU 7.11 – Essai de validation V14

Δa_{droite} (mm)	Δa_{gauche} (mm)	ΔL (mm)	J_{gauche} (J/m ²)	J_{droite} (J/m ²)
2.5	2.5	12.8	4848	5261
7.5	6.5	15.7	9987	11446
12.5	9.5	17.9	13711	16342
17.5	13.5	19.3	15810	19507
22.5	15.5	20.2	16969	21246
27.5	18.5	21.0	17770	22791
32.5	20.5	21.9	18705	26004
37.5	22.5	22.2		

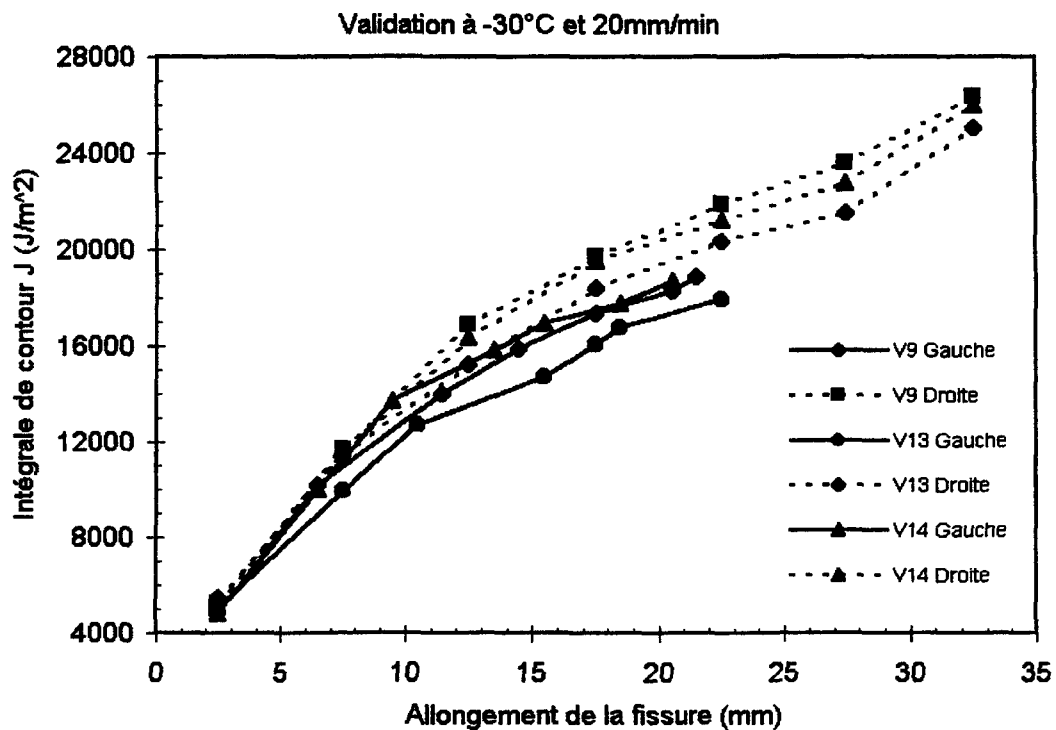


FIGURE 7.4 – Validation à -30°C et 20 mm/min

La figure 7.4 présente les résultats obtenus lors des essais de validation V9, V13 et V14. Les essais avec les éprouvettes V7 et V8 ont été remplacés par les essais avec les éprouvettes V13 et V14 à cause d'un problème d'éclairage lors des essais. Dans cette

figure, on peut remarquer que les courbes J - R de la pointe droite de la fissure ont des valeurs plus élevées que celles de la pointe gauche. Encore une fois, on peut supposer que la différence dans les taux de déformation est responsable de cet écart entre les courbes J - R .

Les grandes valeurs de J atteintes par les courbes de résistance semblent être dues à la température. En fait, nous savons depuis le chapitre 5 que le propergol est plus résistant à basse température qu'à haute température. En comparant les tableaux 7.3 à 7.8 avec les tableaux 7.9 à 7.11, on peut remarquer que les déplacements du tablier nécessaires pour provoquer un allongement de la fissure sont beaucoup plus grands à basse température. Or voici que lorsque les déplacements du tablier sont grands, la différence entre le taux de déformation du côté gauche et celui du côté droit a tendance à diminuer. Exemple : Si le déplacement du tablier est de 20 mm, le côté gauche mesure maintenant 120 mm alors que le côté droit mesure 80 mm. Si la vitesse du tablier est de 20 mm/min, on peut dire que le côté droit se déforme à cet instant à un taux de 16.7%/min (20 mm/120 mm). Le côté droit lui se déforme à un taux de 25%/min (20 mm/80 mm) soit 49.7% de plus rapide que le côté gauche. Au début de l'essai, cette différence était de 66%.

7.5 Test à -30°C et 200 mm/min

Les résultats obtenus à une température de -30°C et une vitesse de 200 mm/min sont montrés dans les tableaux 7.12, 7.13 et 7.14.

TABLEAU 7.12 – Essai de validation 10

Δa_{droite} (mm)	Δa_{gauche} (mm)	ΔL (mm)	J_{gauche} (J/m ²)	J_{droite} (J/m ²)
2.5	2.5	12.9	7594	8262
7.5	5.5	15.4	14118	16100
12.5	8.5	17.7	19389	22917
17.5	13.5	19.3	22491	27489
22.5	17.5	20.3	24025	29842
27.5	19.5	21.0	25051	31623
32.5	21.5	22.1	26703	36756
37.5	22.5	22.3		

TABLEAU 7.13 – Essai de validation V11

Δa_{droite} (mm)	Δa_{gauche} (mm)	ΔL (mm)	J_{gauche} (J/m ²)	J_{droite} (J/m ²)
2.5	2.5	12.1	6889	7494
7.5	7.5	15.4	14552	16820
12.5	11.5	17.0	18371	22115
17.5	13.5	18.3	20847	25511
22.5	16.5	19.0	21938	27212
27.5	19.5	20.5	24208	30586
32.5	21.5	20.8	24503	33735
37.5	22.5	21.3		

TABLEAU 7.14 – Essai de validation V12

Δa_{droite} (mm)	Δa_{gauche} (mm)	ΔL (mm)	J_{gauche} (J/m ²)	J_{droite} (J/m ²)
2.5	2.5	12.7	7416	8068
7.5	6.5	17.3	17011	19517
12.5	10.5	19.8	22845	27272
17.5	11.5	20.7	24970	30152
22.5	15.5	22.0	27100	33311
27.5	17.5	22.8	28308	35436
32.5	19.5	23.4	29078	39900
37.5	21.5	23.7		

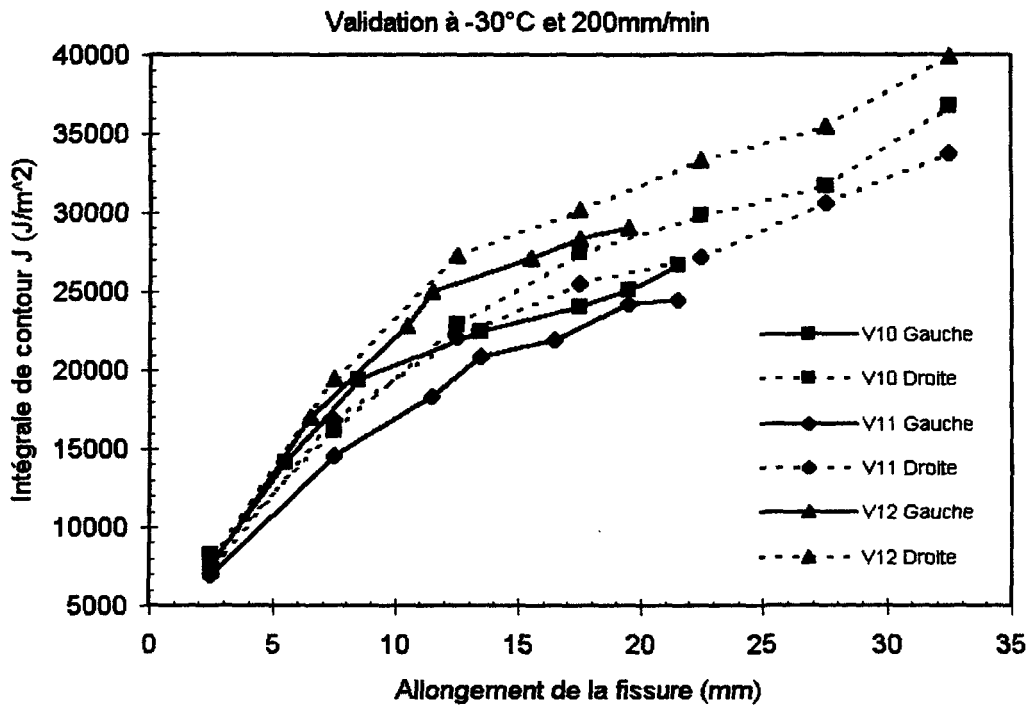


FIGURE 7.5 – Validation à -30°C et 200 mm/min

La figure 7.5 présente les résultats obtenus lors des essais de validation V10, V11 et V12. On peut remarquer dans cette figure que les courbes J - R du côté droit sont pratiquement semblables aux courbes J - R du côté gauche mis à part le fait que ces dernières soient moins longues.

7.6 Comparaison à 22°C et 20 mm/min

La figure 7.6 permet de comparer les différentes données de rupture enregistrées à une température de 22°C et une vitesse de 20 mm/min. En pointillés, on retrouve les courbes présentées à la figure 7.2. En trait plein, on retrouve les courbes de résistance J - R présentées à la figure 5.15.

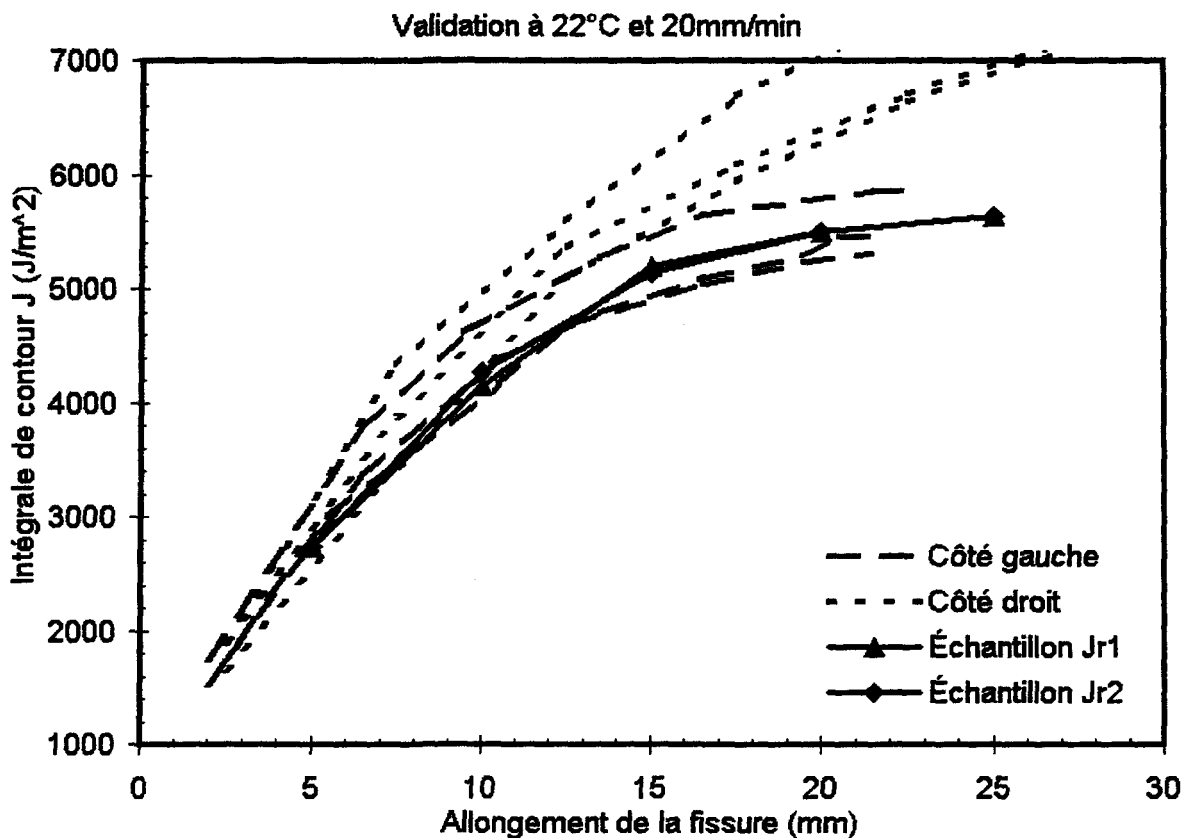


FIGURE 7.6 – Comparaison à +22°C et 20 mm/min

Comme on peut le voir sur la figure 7.6, les courbes tracées par la pointe gauche des éprouvettes de validation sont très semblables aux courbes Jr1 et Jr2 obtenues à partir des éprouvettes de caractérisation. Cela semble normal puisque les éprouvettes de caractérisation et le côté gauche des éprouvettes de validation ont tous une longueur de 100 mm.

7.7 Comparaison à 50°C et 20 mm/min

La figure 7.7 permet de comparer les différentes données de rupture enregistrées à une température de 50°C et une vitesse de 20 mm/min. En pointillés, on retrouve les courbes présentées à la figure 7.3. En trait plein, on retrouve les courbes de résistance J - R présentées à la figure 5.16.

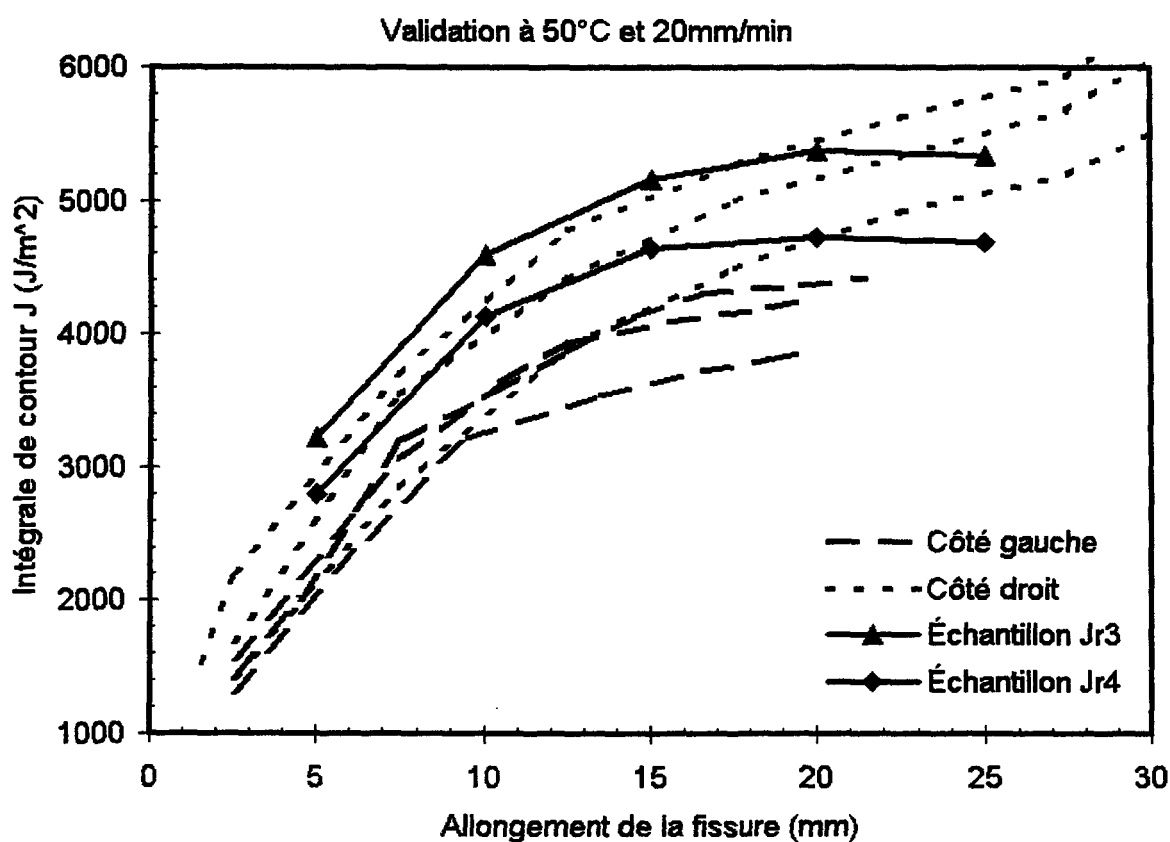


FIGURE 7.7 – Comparaison à +50°C et 20 mm/min

On peut observer que les courbes J - R des éprouvettes de validation ne tombent pas tout à fait sur les courbes Jr3 et Jr4. Le comportement mesuré du côté droit des éprouvettes de validation est assez proche du comportement caractérisé par les éprouvettes Jr3 et Jr4. On peut donc dire que les données de rupture obtenues des éprouvettes de validation sont tout de même compatibles avec les données obtenues des éprouvettes de caractérisation.

7.8 Comparaison -30°C et 20 mm/min

La figure 7.8 permet de comparer les différentes données de rupture enregistrées à une température de -30°C et une vitesse de 20 mm/min. En pointillés, on retrouve les courbes présentées à la figure 7.4. En trait plein, on retrouve les courbes de résistance *J-R* présentées à la figure 5.17.

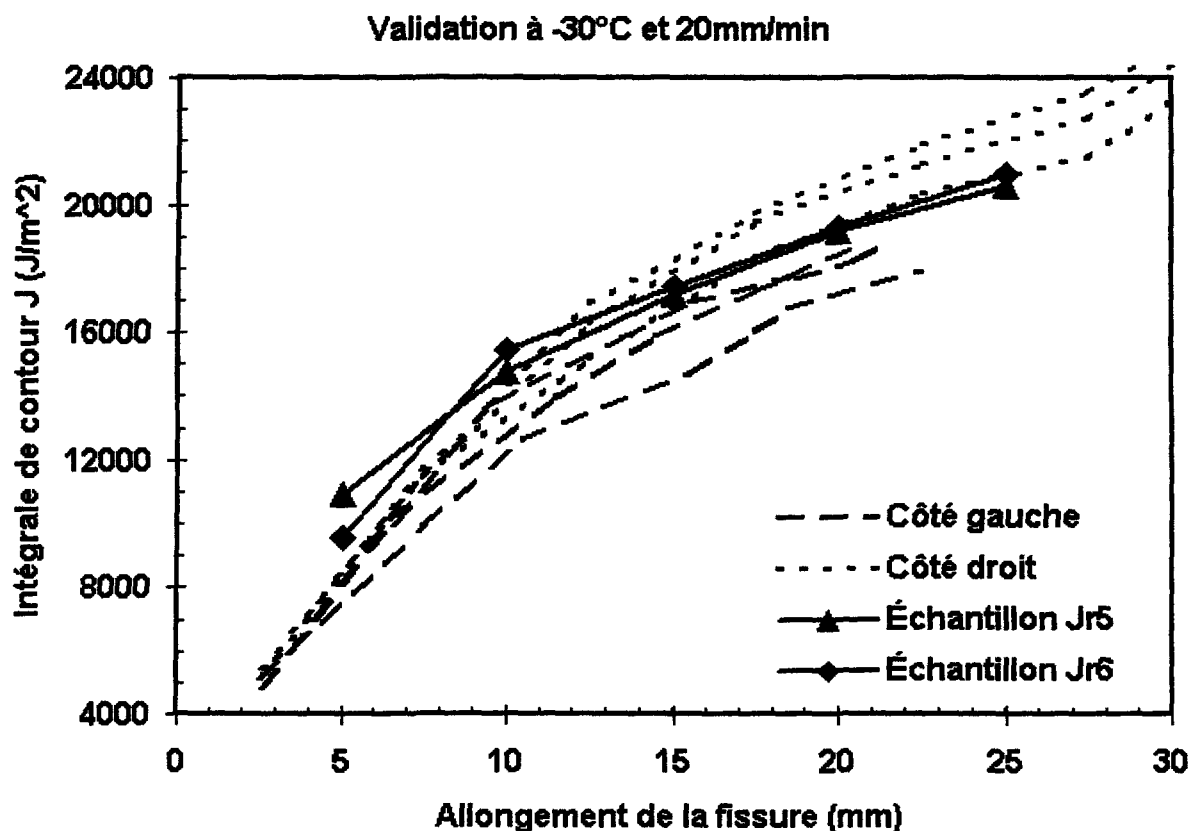


FIGURE 7.8 – Comparaison à -30°C et 20 mm/min

On peut voir à la figure 7.8 que les courbes de résistance obtenues des éprouvettes de validation sont très semblables aux courbes caractéristiques de résistance Jr5 et Jr6. D'ailleurs, c'est probablement le meilleur exemple de concordance des résultats que nous avons obtenu. Il semble donc que les données de rupture sont compatibles dans ces conditions de température et de vitesse de déplacement du tablier.

7.9 Comparaison à -30°C et 200 mm/min

La figure 7.9 permet de comparer les différentes données de rupture enregistrées à une température de -30°C et une vitesse de 200 mm/min. En pointillés, on retrouve les courbes présentées à la figure 7.5. En trait plein, on retrouve les courbes de résistance J -R présentées à la figure 5.18.

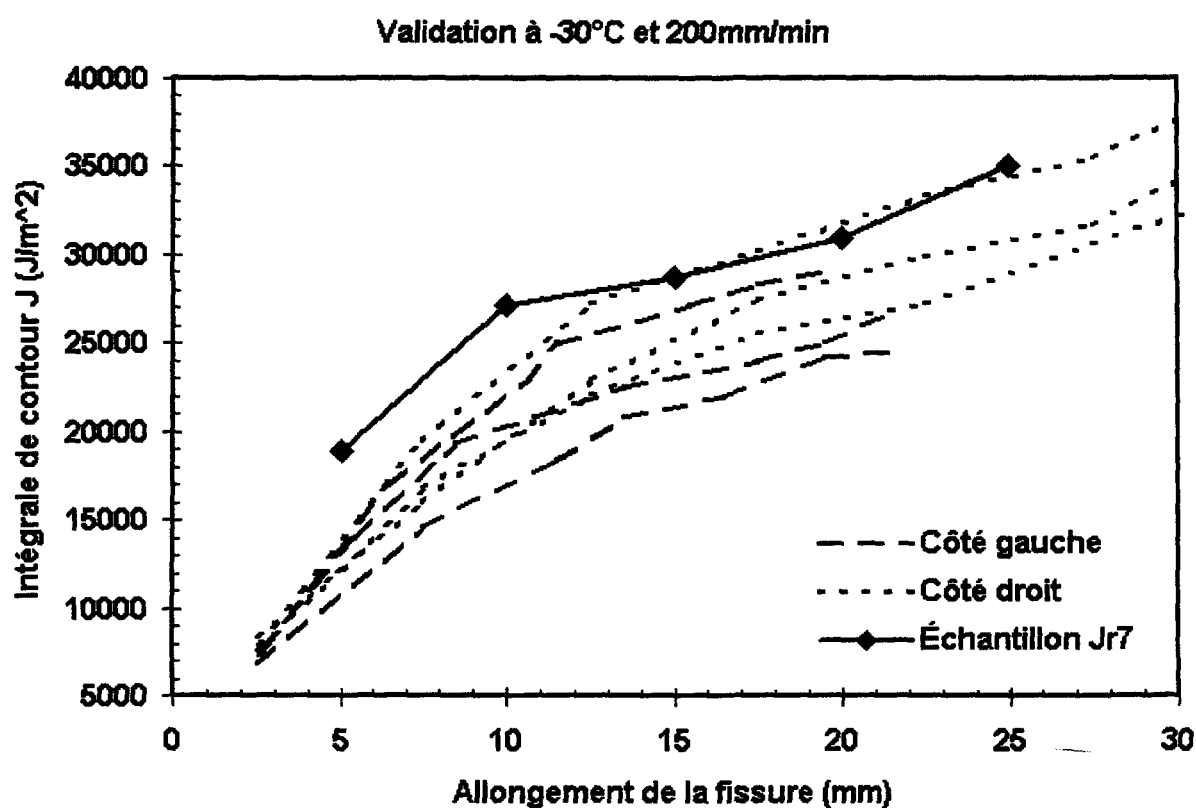


FIGURE 7.9 – Validation à -30°C et 200 mm/min

Dans la figure 7.9, on peut voir que les courbes de résistance obtenues avec les éprouvettes de validation ont des valeurs légèrement plus faibles que la courbe de résistance caractéristique Jr7. Il est cependant difficile de juger de l'importance de cette observation puisque seule la courbe de résistance Jr7 est disponible pour faire la comparaison. Il serait préférable d'avoir plus d'une courbe afin de conclure quelque chose de valide.

7.10 Discussions

La concordance des courbes de résistance à la rupture montrées dans les figures 7.6 à 7.9 n'est pas parfaite. La différence dans le taux de déformation des côtés gauche et droit de l'éprouvette de validation explique en partie le fait que les courbes ne concordent pas mieux. Cependant, la compatibilité des données de rupture observée permet tout de même de conclure que les fissures dans ce type de matériau se propagent selon la courbe caractéristique de résistance à la rupture J - R et ne dépend pas de la géométrie de l'éprouvette. Il semble également que le gradient de déformation de l'éprouvette de validation a eu un effet sur le comportement en rupture du propergol en créant un taux de déformation différent sur chaque côté de la fissure.

Même s'il y a des différences, les résultats de J - R calculés avec les données provenant des éprouvettes de validation sont compatibles avec les résultats de J - R calculés avec les éprouvettes de caractérisation. Cette concordance montre qu'il est impératif, avec ces matériaux, de reproduire dans les éprouvettes de caractérisation l'état de contrainte qui existe dans la structure complexe étudiée. Il est aussi important de reproduire le taux de déformation. Quand l'état de contrainte et le taux de déformation sont reproduits, la méthode pour calculer l'intégrale J dans des propergols peut être combinée avec les résultats provenant des éprouvettes de caractérisation fabriquées en propergol pour prédire la propagation des fissures dans des structures complexes comme des blocs de propergol dans des moteurs-fusées si un algorithme de propagation existe.

8.0 CONCLUSIONS

Le premier objectif de cette étude consistait à relever dans la littérature et discuter les méthodes permettant de caractériser la résistance à la rupture des matériaux composites particuliers comme des propergols solides. Pour ce faire, une revue de la littérature a d'abord été réalisée afin de relever les méthodes existantes. Elle a aussi servi à rédiger un rappel historique de la mécanique de la rupture. La revue de la littérature permet de réaliser que les méthodes disponibles n'étaient pas directement applicables et qu'il était donc nécessaire de développer une méthode plus appropriée pour caractériser des propergols solides. La majorité des méthodes existantes utilisent la théorie de l'intégrale de contour J et nous avons choisi d'utiliser cette théorie pour développer notre méthode. En fait, la méthode développée pour caractériser la résistance à la rupture du propergol découle directement de l'utilisation de courbes de résistance J - R .

Les valeurs de l'intégrale J furent calculées à l'aide du logiciel d'éléments finis ANSYS. Celui-ci simule correctement le propergol puisque ses propriétés mécaniques non linéaires ont été modélisées à l'intérieur du logiciel. L'algorithme permettant de calculer l'intégrale J a été vérifié en faisant des comparaisons entre les résultats numériques et les solutions analytiques existantes pour le cas d'une éprouvette en tension fissurée à son centre. Les résultats ont montré que l'erreur relative entre la solution numérique et la solution analytique est faible. Donc, nous pouvons obtenir des résultats valides avec ANSYS puisque le comportement mécanique du matériau est exactement déterminé et modélisé.

Le troisième objectif de l'étude consistait à déterminer la résistance à la rupture d'un propergol pour une gamme de températures et taux de déformations à l'aide d'une ou plusieurs méthodes d'analyse applicables. D'abord, il a fallu caractériser le comportement uniaxial du propergol à l'aide de plusieurs expériences sur une machine d'essais de traction. Ensuite, l'éprouvette en tension fissurée sur le côté (connu comme étant l'éprouvette « SENT ») a été sélectionnée pour caractériser la résistance à la rupture du propergol pour quatre combinaisons de température et de vitesse de déplacement du tablier de la machine

d'essai de traction. La méthode à éprouvettes multiples et la méthode à éprouvette unique ont été utilisées dans les expériences. Nous avons calculé l'intégrale J aux allongements et longueurs de fissure mesurées avec l'éprouvette SENT. Ainsi, nous avons obtenu des courbes de résistance J - R pour chacune de ces quatre conditions. Les résultats ont montré que la méthode de l'éprouvette unique produit des données plus consistantes.

Enfin, notre dernier objectif était de concevoir une éprouvette de validation présentant un gradient de déformation afin de vérifier la concordance entre les résultats de l'intégrale J provenant de la méthode de caractérisation et les résultats de l'intégrale J provenant du comportement en rupture mesuré sur l'éprouvette de validation. Des simulations par éléments finis ont servi à optimiser la géométrie de l'éprouvette qui comporte notamment une fissure en son centre et un gradient de déformation. Le gradient provoque un taux de propagation différent sur chaque côté de la fissure. À l'aide de la machine d'essai de traction, nous avons obtenu d'autres courbes de résistance J - R pour les deux directions de propagation de la fissure en évaluant l'intégrale J aux déformations et longueurs de fissures mesurées pendant les expériences. Ces nouvelles courbes furent comparées aux courbes caractéristiques de la résistance à la rupture mesurées plus tôt sur les éprouvettes SENT. Bien qu'il semble exister des différences minimales entre les deux séries de courbes de résistance, on peut conclure que ces données de rupture sont compatibles. Cette concordance montre qu'il est impératif, avec ces matériaux, de reproduire dans les éprouvettes de caractérisation l'état de contrainte qui existe dans la structure complexe étudiée. Il est aussi important de reproduire le taux de déformation. Quand l'état de contrainte et le taux de déformation sont reproduits, la méthode pour calculer l'intégrale J dans des propergols peut être combinée avec les résultats provenant des éprouvettes de caractérisation fabriquées en propergol pour prédire la propagation des fissures dans des structures complexes comme des blocs de propergol dans des moteurs-fusées si un algorithme de propagation existe.

9.0 TRAVAUX FUTURS

Suite à cette étude, il pourrait être intéressant de développer un algorithme qui permettrait de prédire l'avancement des fissures dans des structures complexes où il existe, par exemple, un gradient de déformation. Puisque l'on connaît maintenant le comportement en rupture du propegol, il est possible d'utiliser ces informations pour prédire si, dans une situation de chargement donné, la fissure présente sur la structure va se propager ou non. Il serait même possible de prédire la longueur que la fissure va atteindre. Pour ce faire, il semble nécessaire que l'algorithme soit intégré à un logiciel d'éléments finis tel que ANSYS afin de pouvoir trouver par une méthode itérative la longueur de la fissure qui est en équilibre entre la valeur de l'intégrale J associée au chargement et la résistance à la rupture du matériau.

10.0 RÉFÉRENCES

- 1) Wong, F.C., *Evaluation of a Pseudo Analysis Method for Rapid Thermal Cooling and Pressurisation Loading of an Instrumented Solid Rocket Motor*, DREV TR-2000-188, March 2001.
- 2) Erickson, D.C., Wong, F.C., *Failure prediction of solid rocket motors on thermal cooldown*, DREV-TR 2000-025.
- 3) Anderson, T.L., *Fracture Mechanics Fundamentals and Applications*, CRC Press, Boca Raton, 1991.
- 4) Griffith, A.A., *The Phenomena of Rupture and Flow in Solids*, Philosophical Transactions, Series A, Vol. 221, 1920, pp. 163-198.
- 5) Rice, J.R., *A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks*, J. of Strain Analysis, Vol. 1, 1966, pp. 145-153.
- 6) E1152-95, *Standard Test Methods for Determining J-R Curves of Plastic Materials*, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1995.
- 7) D6068-96, *Standard Test Method for Determining J-R Curves of Plastic Materials*, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1996.
- 8) E813-81, *Standard Test Method for J_{1C} , A Measure of Fracture Toughness*, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1981.
- 9) E813-87, *Standard Test Method for J_{1C} , A Measure of Fracture Toughness*, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1987.

- 10) E813-89, *Standard Test Method for J_{IC} , A Measure of Fracture Toughness*, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1989.
- 11) Bloyer, D.R., Venkateswara Rao, K.T., Ritchie, R.O., *Fracture Toughness and R-Curve Behavior of Laminated Brittle-Matrix Composites*, Metall Mater Trans A, v. 29, n. 10, p.2483-2496, 1998.
- 12) Hashemi, S., Williams, J.G., *Fracture Characterization of Tough Polymers Using the J Method*, Polym Eng Sci, v. 26, n. 11, p. 760-767, 1986.
- 13) Huang, D.D., Williams, J.G., *Comments on « Fracture Toughness of Impact Modified Polymers Based on the J-Integral »*, Polym Eng Sci, v. 30, n. 21, p. 1341-1344, 1990.
- 14) Chang-Bing Lee, Ming-Luen Lu, Feng-Chih Chang, *Fracture Toughness of High-Impact Polystyrene Based on Three J-Integral Methods*, J Appl Polym Sci, v. 47, n. 10, p.1867-1880, 1993.
- 15) Chang-Bing Lee, Feng-Chih Chang, *Toughening Behavior of Elastomer-Modified Polycarbonates Based on the J-Integral*, Polym Eng Sci, v. 32, n. 12, p. 792-803, 1992.
- 16) Shing-Chung Wong, Yiu-Wing Mai, *Essential Fracture Work of Short Fiber Reinforced Polymer Blends*, Polym Eng Sci, v. 39, n. 2, p. 356-364, 1999.
- 17) Ming-Luen Lu, Kuo-Chan Chiou, Feng-Chih Chang, *Effect of Temperature on Fracture Toughness of PC/ABS Based on J-Integral and Hysteresis Energy Methods*, J Appl Polym Sci, v. 62, p. 863-874, 1996.
- 18) Ming-Luen Lu, Kuo-Chan Chiou, Feng-Chih Chang, *Fracture Toughness Characterization of a PC/ABS Blend Under Different Strain Rates By Various J-Integral Methods*, Polym Eng Sci, v. 36, n. 18, p. 2289-2295, 1996.

- 19) Ming-Luen Lu, Kuo-Chan Chiou, Feng-Chih Chang, *Fracture Toughness of Acrylonitrile-Butadiene-Styrene by J-Integral Methods*, Polym Eng Sci, v. 35, n. 18, p. 1433-1439, 1995.
- 20) Ming-Luen Lu, Kuo-Chan Chiou, Feng-Chih Chang, *Fracture Toughness of PC/PBT Blend Based on J-Integral Methods*, J Appl Polym Sci, v. 56, p. 1065-1075, 1995.
- 21) Narisawa, I., Takemori, M.T., *Fracture Toughness of Impact-Modified Polymers Based on the J-Integral*, Polym Eng Sci, v. 29, n. 10, p. 671-678, 1989.
- 22) Pascaud, R.S., Evans, W.T., *Critical Assessment of Methods for Evaluation J_{IC} for a Medical Grade Ultra High Molecular Weight Polyethylene*, Polym Eng Sci, v. 37, n. 1, p. 11-17, 1997.
- 23) Rimnac Clare M., Wright Timothy M., Klein Robert W., *J Integral Measurements of Ultra High Molecular Weight Polyethylene*, Polym Eng Sci, v. 28, n. 24, p. 1586-1589, 1988.
- 24) Levita, G., Parisi, L., Marchetti, A., Bartolommei, L., *Effects of Thickness on the Specific Essential Work of Fracture of Rigid PVC*, Polym Eng Sci, v. 36, n. 20, p. 2534-2541, 1996.
- 25) Hashemi, S., *Fracture Behavior of Glass Bead-Filled Poly(Oxymethylene) Injection Molding*, Polym Eng Sci, v. 36, n. 13, p. 1807-1820, 1996.
- 26) Sridharan, N.S., Broutman, L.J., *Fracture Analysis of Acrylonitrile-Butadiene-Styrene Resins*, Polym Eng Sci, v. 22, n. 12, p. 760-765, 1982.
- 27) So Paul K., Broutman, J., *The Fracture Behavior of Surface Embrittled Polymers*, Polym Eng Sci, v. 26, n. 17, p. 1173-1179, 1986.

- 28) Campbell, J.P., Venkateswara Rao, K.T., Ritchie, R.O., The Effect of Microstructure on Fracture Toughness and Fatigue Crack Growth Behavior in γ -Titanium Aluminide Based Intermetallics, *Metall Mater Trans A*, v.30, n. 3, p.563-577, 1999.
- 29) Liu, C.T., *Crack Growth Behavior in a Composite Propellant with Strain Gradients – Part II*, *J Spacecraft Rockets*, v. 27, n. 6, p. 647-652, 1990.
- 30) Faucher Bernard, *Crack Length and J-Integral Expressions for Specimens Loaded in Tension*, *J Test Eval*, v. 22, n. 1, p.30-35, 1994.
- 31) Bazhenov, S., *Stable crack growth in ductile polymers*, *J Mater Sci*, v. 32, n. 3, p.797-802, 1997.
- 32) Chang-Sik Ha, Youngkyoo Kim, Won-Jei Cho, *Fracture Mechanics Investigation on the PP/EPDM/Ionomer Ternary Blends Using J-Integral by Locus Method*, *J Appl Polym Sci*, v. 51, n. 8, p.1381-1388, 1994.
- 33) Liu, C.T., *Crack Growth Behavior in a Solid Propellant*, *Eng Fract Mech*, v. 56, n. 1, p. 127-135, 1997.
- 34) Nakajima, N., Liu, J.L., *Fracture Toughness of PVC/NBR Blends Evaluated by the J-Integral*, *Rubber Chem Technol*, v. 66, n. 4, p. 634-645, 1993.
- 35) Pegoretti, A., Marchi, A., Ricco, T., *Determination of the Fracture Toughness of Thermoformed Polypropylene Cups by the Essential Work Method*, *Polym Eng Sci*, v. 37, n. 6, p. 1045-1052, 1997.
- 36) Strebel, J.J., Moet, A., *Time-Dependent Fracture Toughness Measure for Polyethylene*, *J Appl Polym Sci*, v. 52, n. 12, p. 1815-1821, 1994.

- 37) Hashemi, S., *Work of Fracture of PBT/PC Blend : Effect of Specimen Size, Geometry, and Rate of Testing*, Polym Eng Sci, v. 37, n. 5, p. 912-921, 1997.
- 38) Heino, M., Hietaoja, P., Seppälä, J., Harmia, T., Freidrich, K., *Studies on Fracture Behavior of Tough PA6/PP Blends*, J Appl Polym Sci, v.66, n. 12, p. 4289-2220, 1997.
- 39) Chun-Hsin Liu, Nairn John A., *Using the Essential Work of Fracture Method for Studying Physical Aging in Thin, Ductile, Polymeric Films*, Polym Eng Sci, v. 38, n. 1, p. 186-193, 1998.
- 40) Marchal, Y., Oldenhove, B., Daoust, D., Legras, R., Delannay, F., *Characterization of the Fracture Toughness of Rubber-Toughened Polypropylene Thin Plates*, Polym Eng Sci, v. 38, n. 12, p. 2063-2071, 1998.
- 41) Jingshen Wu, Yiu-Wing Mai, *The Essential Fracture Work Concept for Toughness Measurement of Ductile Polymers*, Polym Eng Sci, v. 36, n. 18, p. 2275-2288, 1996.
- 42) Solecki, J.S., *Fracture Mechanics*, ANSYS Rev. 4.4 Tutorial, May 1, 1989.
- 43) Landes, J.D., Begley, J.A., *The J-Integral as a Fracture Criterion*, Fracture Toughness, ASTM STP 514, Part II, American Society of Testing and Materials, 1971, pp.1-23.
- 44) Landes, J.D., Begley, J.A., *The Effect of Specimen Geometry on J_{IC}* , Fracture Toughness, ASTM STP 514, Part II, American Society of Testing and Materials, 1971, pp. 24-39.
- 45) Landes, J.D., Begley, J.A., *Test Results from J-Integral Studies: An Attempt to Establish a J_{IC} Testing Procedure*, Fracture Analysis, ASTM STP 560, American Society of Testing and Materials, 1974, pp. 170-186.

- 46) Rice, J.R., Paris, P.C., Merkle, J.G., *Some Further Results of J-Integral Analysis and Estimates*, Progress in Flaw Growth and Fracture Toughness Testing, ASTM STP 536, American Society of Testing and Materials, 1973, pp. 231-245.
- 47) Merkle, J.G., Corten, H.T., *A J-Integral Analysis for the Compact Specimen, Considering Axial Force as Well as Bending Effects*, ASME Paper No. 74-PVP-33, American Society of Mechanical Engineers, 1974.
- 48) *Uniaxial Tensile Tests at Constant Strain Rate*, ICRPG Solid Propellant Mechanical Behavior Manual, CPIA Pub. 21, Section 4.3.2, 1970.
- 49) Wong, F.C., Ait-Kadi, A., *Analysis of particle composite behavior based on non-linear elasticity and modulus degradation theory*, J. Mater. Sci., Vol. 32, p.5019-5034, 1999.
- 50) Ramberg, W., Osgood, W.R., *Description of Stress-Strain Curves by Three Parameters*, NACA TN No. 902, July 1943.
- 51) Press, W.H., Teukolsky, S.A., Vetterling, W.T., Flannery, B.P., *Numerical Recipes*, 2nd Ed. Cambridge University Press, New York, NY, p.678-682, 1992.

ANNEXE A – MÉTHODE DU TRAVAIL ESSENTIEL DE RUPTURE w_e

La méthode du Travail essentiel de rupture (Essential Work of Fracture) fut originalement suggérée par Broberg (Broberg, K.B., *J. Mech. Phys. Solids*, vol.19, n.407, 1971). Il avait expliqué la progression stable des fissures par le fait que le flux d'énergie dissipé dans une zone définie près de la pointe de la fissure ne peut être maintenu (à moins que l'on augmente la charge) à cause de l'augmentation constante de la plastification de la zone externe qui consomme beaucoup d'énergie. Cela explique également l'existence d'une courbe de résistance. Le travail total de rupture de n'importe quelle fissure qui s'allonge contient deux types de travail. Le travail dissipé dans la zone plastique (non essentiel) et le travail essentiel dissipé dans le plan de l'allongement de la fissure. C'est en trouvant une façon élégante de séparer ces deux types de travail que Cotterell et Mai (Mai, Y.-W., Cotterell, B., *Int. J. Fract.*, vol.32, n.105, 1986) ont développé la méthode du travail essentiel de rupture telle que connue aujourd'hui.

A.1 Théorie de la méthode du Travail essentiel de rupture

En tant que méthode alternative à l'intégrale de contour J, la méthode du travail essentiel de rupture a été utilisée avec succès pour déterminer la résistance à la rupture de plusieurs matériaux ductiles. Cette méthode repose sur l'hypothèse que lorsqu'une structure fissurée est chargée, le procédé de rupture et les déformations plastiques apparaissent dans deux régions différentes. On nomme la première région la zone interne de rupture et la seconde zone se nomme la zone externe plastique. La figure A-1 montre où se situent ces deux zones.

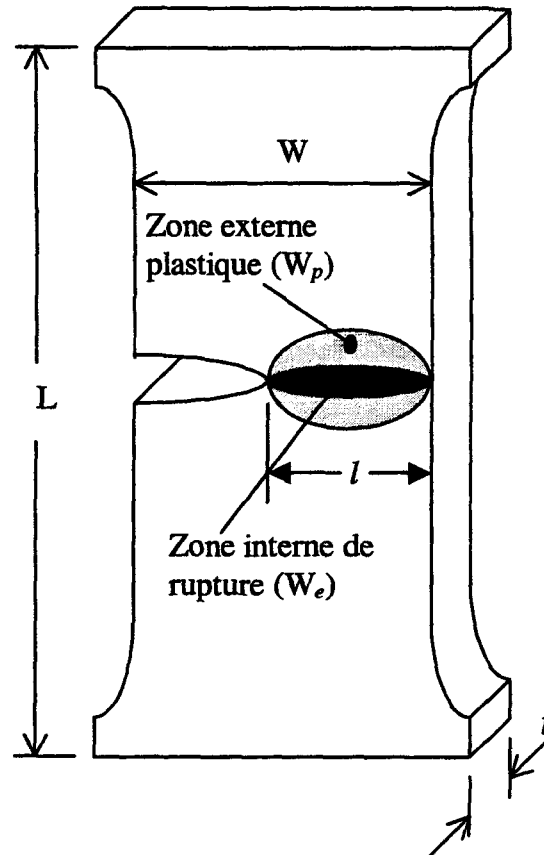


FIGURE A.1 – Zones de dissipation du travail

Durant la propagation des fissures, la majorité du travail dissipé va dans la zone externe plastique et n'est donc pas directement associé au processus de rupture. Seul le travail qui est dissipé dans la zone interne de rupture se révèle être une propriété du matériau. Ainsi, le travail total, W_f , doit être séparé en deux parties. C'est-à-dire le travail essentiel de rupture (W_e) et le travail non essentiel de rupture (W_p). Le travail essentiel de rupture est dissipé dans la zone interne de rupture alors que le travail non essentiel de rupture est dissipé dans la zone externe plastique. Le travail total de rupture est donc donné par :

$$W_f = W_e + W_p .$$

Physiquement, W_e est le travail requis pour créer deux nouvelles surfaces et il est consommé dans le procédé de rupture impliqué (décollement, rupture de fibre, etc.). Essentiellement, W_e est une énergie de surface et pour une épaisseur donnée il est

proportionnel à la longueur du ligament l . W_p est une énergie de volume et est proportionnel à l^2 . Le travail total de rupture peut également être exprimé sous la forme :

$$W_f = w_e tl + \beta w_p tl^2 .$$

En normalisant, le travail spécifique total de rupture, w_f , est donné par :

$$w_f = \left(\frac{W_f}{tl} \right) = w_e + \beta w_p l .$$

où w_e et w_p sont respectivement le travail essentiel de rupture spécifique et le travail non essentiel de rupture spécifique. β est un facteur de forme de la zone externe plastique. On peut remarquer que l'équation donnant w_f est une équation du premier ordre. La pente de la droite est donc une fonction de la géométrie de l'éprouvette. La figure suivante montre la relation existant entre w_f et l .

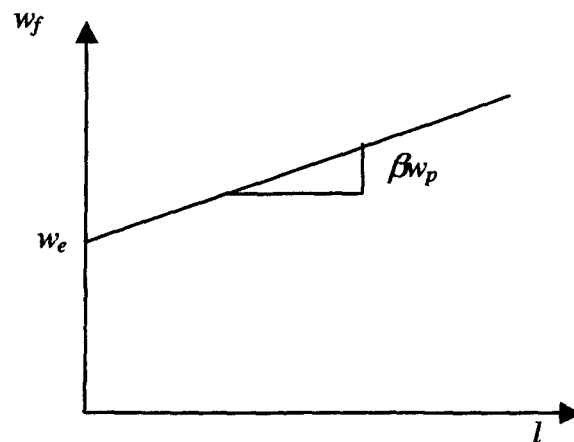


FIGURE A.2 – Relation linéaire entre w_f et l

Dans une étude réalisée en 1996, Levita (Levita, G., Parisi, L., Marchetti, A., Bartolommei, L., *Effects of Thickness on the Specific Essential Work of Fracture of Rigid PVC*, Polym Eng Sci, v. 36, n. 20, p. 2534-2541, 1996) a montré que, tout comme J_{1C} , le travail essentiel

de rupture w_e est indépendant de l'épaisseur de l'éprouvette. De plus, il mentionne que les valeurs de w_e obtenues sont très semblables à celles de J_{1C} obtenues aux mêmes conditions avec les méthodes ASTM. Levita arrive à la conclusion que les deux méthodes sont compatibles.

Hashemi (Hashemi, S., *Work of Fracture of PBT/PC Blend: Effect of Specimen Size, Geometry, and Rate of Testing*, Polym Eng Sci, v. 37, n. 5, p. 912-921, 1997) a plus tard étudié l'effet de plusieurs paramètres sur w_e telles que la taille de l'éprouvette, sa géométrie et la vitesse de déplacement du tablier. De cette étude, Hashemi a fait plusieurs observations. La première est que la taille de l'éprouvette n'a pas d'effet sur w_e . Il constate également que la taille de l'éprouvette n'a pas d'effet sur la pente de la droite de régression βw_p . Il prouve ainsi que le mode de rupture et la forme de la zone plastique ne sont pas influencés par la taille de l'éprouvette.

Hashemi a également comparé les valeurs de w_e obtenues avec des éprouvettes de type SENT à celles obtenues avec des éprouvettes de type DENT. Bien qu'il existe de légères différences entre les valeurs, il conclut que la forme de l'éprouvette n'a pas d'effet notable sur w_e .

C'est en réalisant des essais à des vitesses de 2, 5, 15, 25 et 50 mm/min qu'il observa que les valeurs obtenues de w_e restaient sensiblement les mêmes. Il conclut donc que la vitesse de déplacement du tablier n'a pas d'effet sur le travail essentiel de rupture w_e .

A.2 Les températures et les vitesses de déplacement du tablier

Au début de l'étude, il avait été prévu de vérifier pour les propergols toutes les affirmations de Hashemi. Cependant, cette méthode a le gros désavantage de consommer beaucoup d'éprouvettes et pour cette raison, il a été décidé de mesurer la valeur de w_e pour une seule condition. Le tableau suivant montre donc parmi les conditions possibles celle qui a été retenue.

TABLEAU A.1 – Condition expérimentale pour la mesure de w_e

Vitesse	-40°C	-30°C	-10°C	+22°C	+50°C
2 mm/min					
20 mm/min				X	
200 mm/min					

Ce choix de température a été fait parce que l'éprouvette n'a presque pas besoin d'être conditionnée puisqu'elle est déjà à la température de la pièce. Quant au choix de 20 mm/min comme vitesse de déplacement du tablier, il permet de faire les expériences dans un temps raisonnable.

A.3 Mesure du travail essentiel de rupture

Tel que montré dans le tableau précédent, le travail essentiel de rupture a été mesuré à une température de 22°C à une vitesse de déplacement du tablier de 20 mm/min. L'éprouvette utilisée est de type SENT modifié telle que montrée à la figure A-3.

Ces éprouvettes sont taillées à l'aide du même couteau utilisé plutôt pour fabriquer les éprouvettes servant à tracer les courbes *J-R* (figure 5.5). La fissure est également taillée de la même façon qu'auparavant, c'est-à-dire en utilisant la guillotine montrée à la figure 5.6. Cependant, au lieu d'être taillée à la même longueur pour toutes les éprouvettes, dix longueurs différentes de fissures sont nécessaires. Comme on peut le voir dans la figure précédente, les longueurs de fissure s'étendent de façon presque uniforme sur toute la largeur de l'éprouvette.

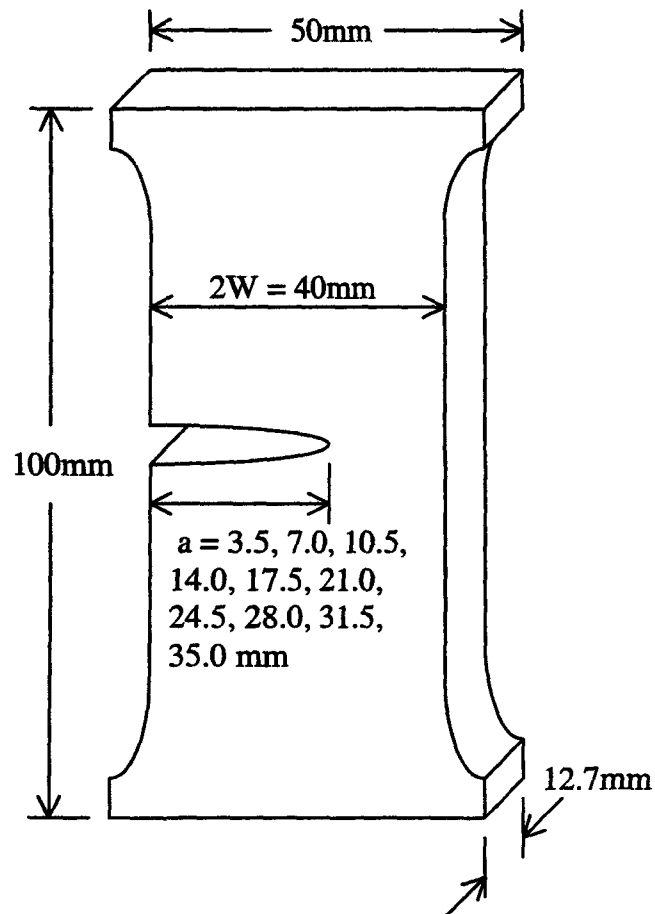


FIGURE A.3 – Éprouvette pour la mesure de w_e

Un soin particulier est nécessaire pour manipuler ces éprouvettes fissurées. Surtout lorsque la fissure est très longue, il faut faire attention de ne pas briser le ligament restant avant même de faire le test sur la machine d'essai de traction. Ainsi, nous avons fabriqué un support spécial permettant de maintenir solidairement les deux extrémités en aluminium collées à l'éprouvette. Ce support est installé avant de tailler l'éprouvette et il est enlevé une fois que l'éprouvette est bien en place dans la chambre climatisée de la machine d'essai de traction. La figure suivante montre les courbes de la charge en fonction du déplacement du tablier obtenues lors des 10 essais réalisés pour la mesure du travail essentiel de rupture.

Charge en fonction du déplacement du tablier pour les essais EWF

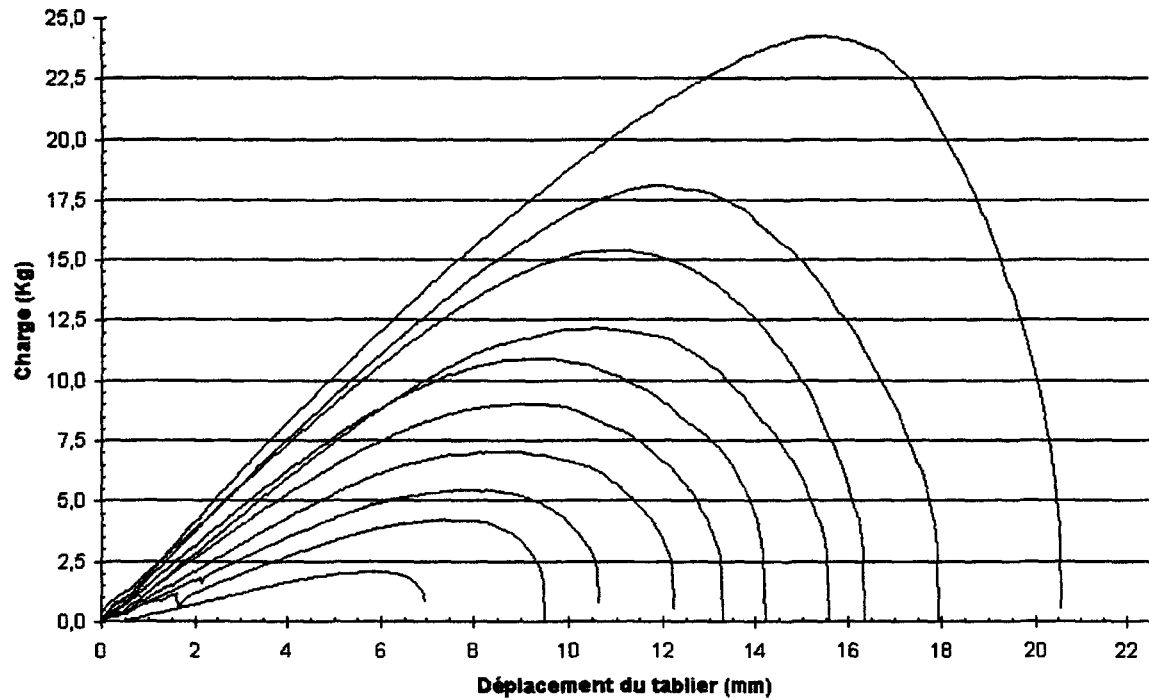


FIGURE A.4 – Charge en fonction du déplacement du tablier pour les essais EWF

La courbe dont la charge atteint pratiquement 25 kilogrammes est celle obtenue avec l'éprouvette ayant la fissure la plus courte. C'est à dire environ 3.5 mm. Ainsi, plus la fissure est longue moins la charge maximale est élevée de même que l'énergie totale nécessaire pour briser l'éprouvette. Le tableau suivant montre justement les résultats des cas traités.

TABLEAU A.2 – Mesure du travail de rupture

Éprouvette	Largeur (mm)	a0 haut (mm)	a0 bas (mm)	a0 moyen (mm)	b (mm)	A (m ²)	Énergie (J)	Travail de rupture (J/m ²)
EWF01	40,00	3,4	3,3	3,4	36,6	465,328E-6	3,082	6624
EWF02	40,00	6,9	6,9	6,9	33,1	420,180E-6	2,034	4841
EWF03	40,00	10,8	10,7	10,7	29,3	371,729E-6	1,626	4373
EWF04	40,00	14,1	14,2	14,1	25,9	328,740E-6	1,222	3716
EWF05	40,00	17,3	17,3	17,3	22,7	288,608E-6	1,025	3551
EWF06	40,00	20,9	20,9	20,9	19,1	243,078E-6	0,785	3230
EWF07	40,00	24,2	24,0	24,1	15,9	201,740E-6	0,565	2800
EWF08	40,00	28,2	28,1	28,2	11,8	150,432E-6	0,373	2482
EWF09	40,00	31,1	31,2	31,1	8,9	112,522E-6	0,248	2205
EWF10	40,00	35,3	35,2	35,3	4,7	59,944E-6	0,082	1367

Travail de rupture en fonction de la longueur du ligament

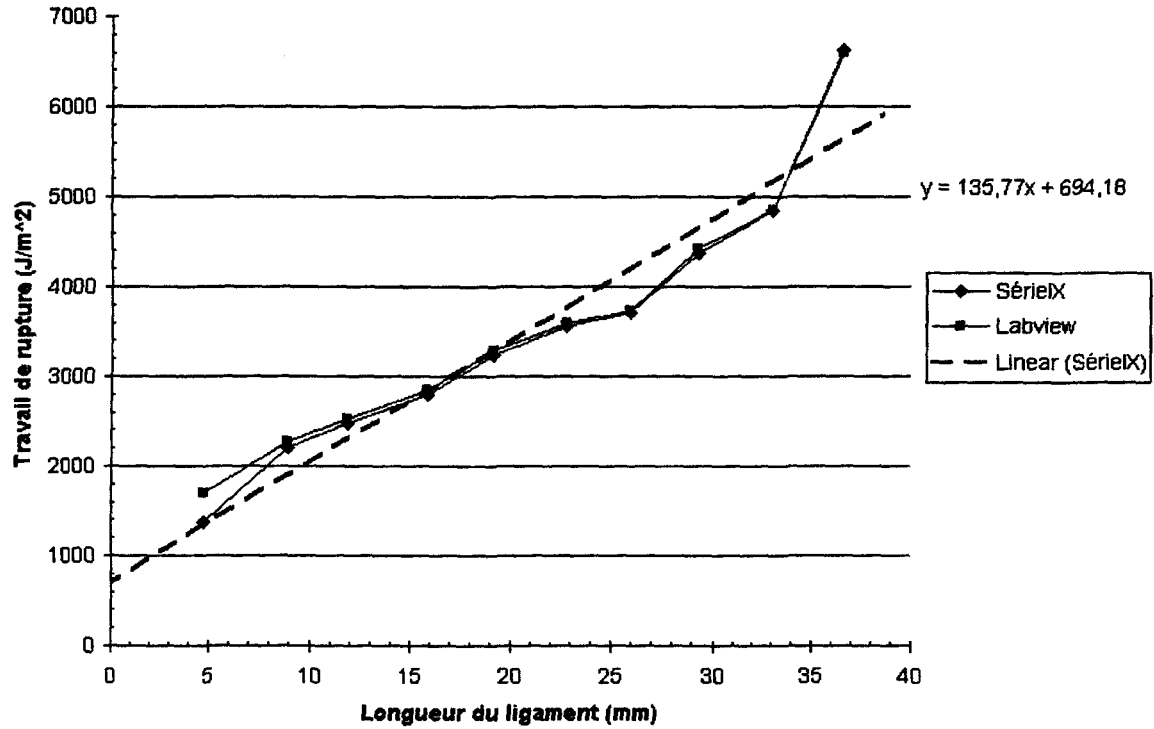
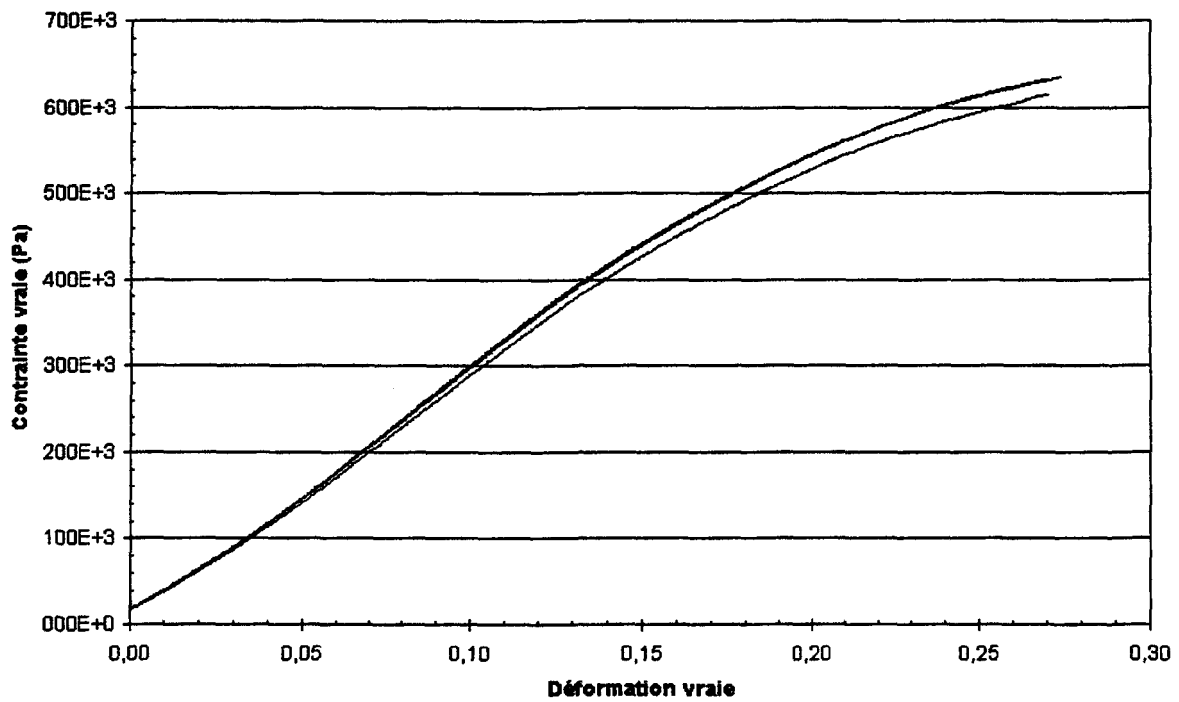


FIGURE A.5 – Travail essentiel de rupture

Parce que les tests ont tous été réalisés à 22°C et 20 mm/min, on peut comparer la figure A-5 à la figure 5.17. On y remarque que les valeurs obtenues du travail de rupture et de J sont très semblables. Les plus grandes valeurs sont aux alentours de 7000 J/m² alors que les valeurs les plus petites sont aux environs de 1000 J/m². La figure A-5 montre que la valeur du travail essentiel de rupture est de 694 J/m². Cette valeur représente le montant minimum d'énergie que l'on doit retrouver autour de la pointe de la fissure pour produire un avancement de celle-ci. Si on place cette valeur dans la figure 5.17, on réalise que la valeur obtenue à la figure A-5 est très réaliste.

ANNEXE B – COMPORTEMENT UNIAXIAL DU PROPERGOL**Contraintes vraies en fonction des déformations vraies à 22°C et 2mm/min****FIGURE B.1 – Comportement uniaxial à 22C et 2 mm/min**

Contraintes vraies en fonction des déformations vraies à 22°C et 20mm/min.

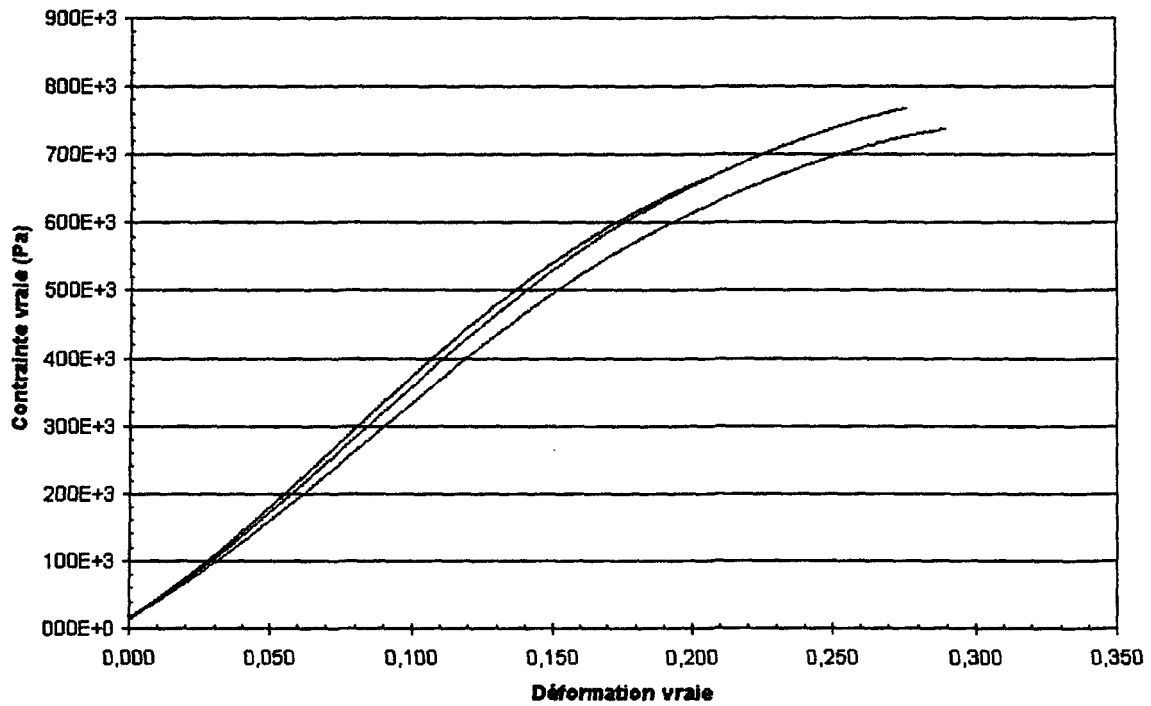


FIGURE B.2 – Comportement uniaxial à 22C et 20 mm/min

Contraintes vraies en fonction des déformations vraies à 22°C et 20mm/min.

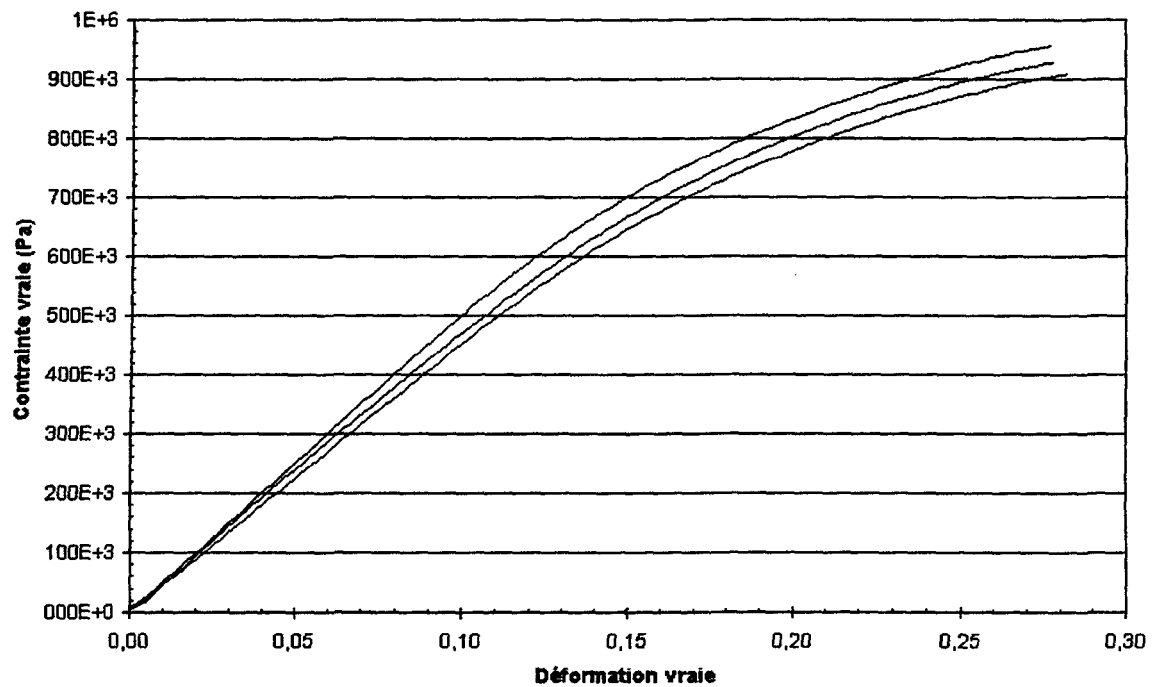


FIGURE B.3 – Comportement uniaxial à 22C et 200 mm/min

Contraintes vraies en fonction des déformations vraies à 50°C et 20mm/min.

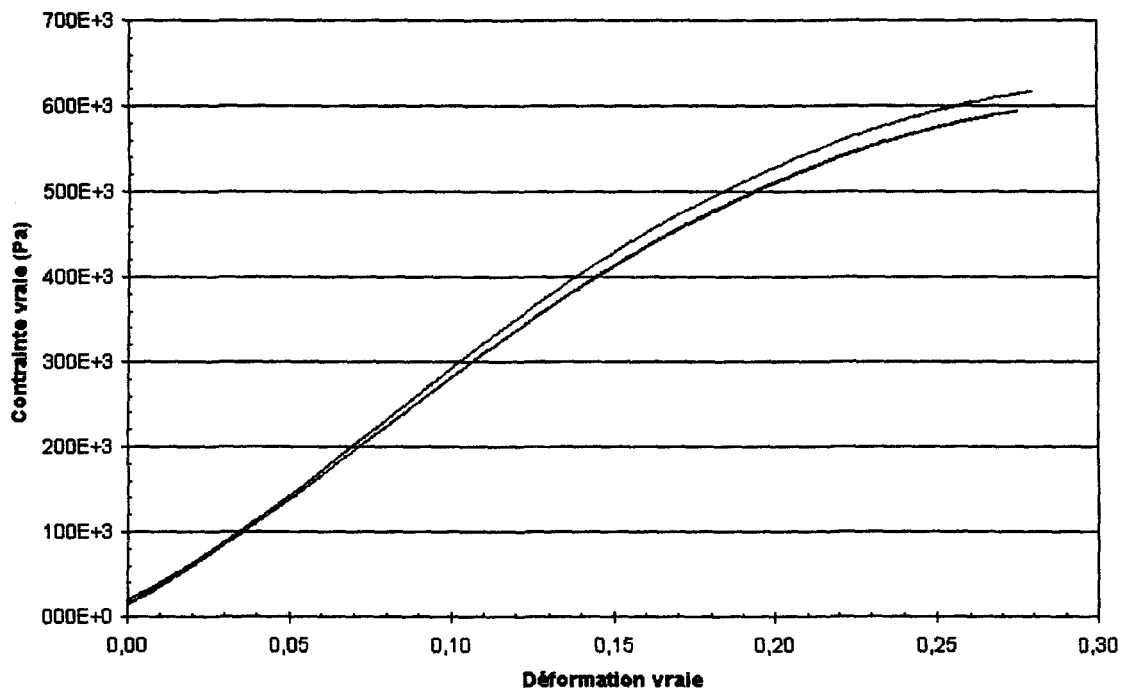


FIGURE B.4 – Comportement uniaxial à 50C et 20 mm/min

Contraintes vraies en fonction des déformations vraies à -10°C et 20mm/min.

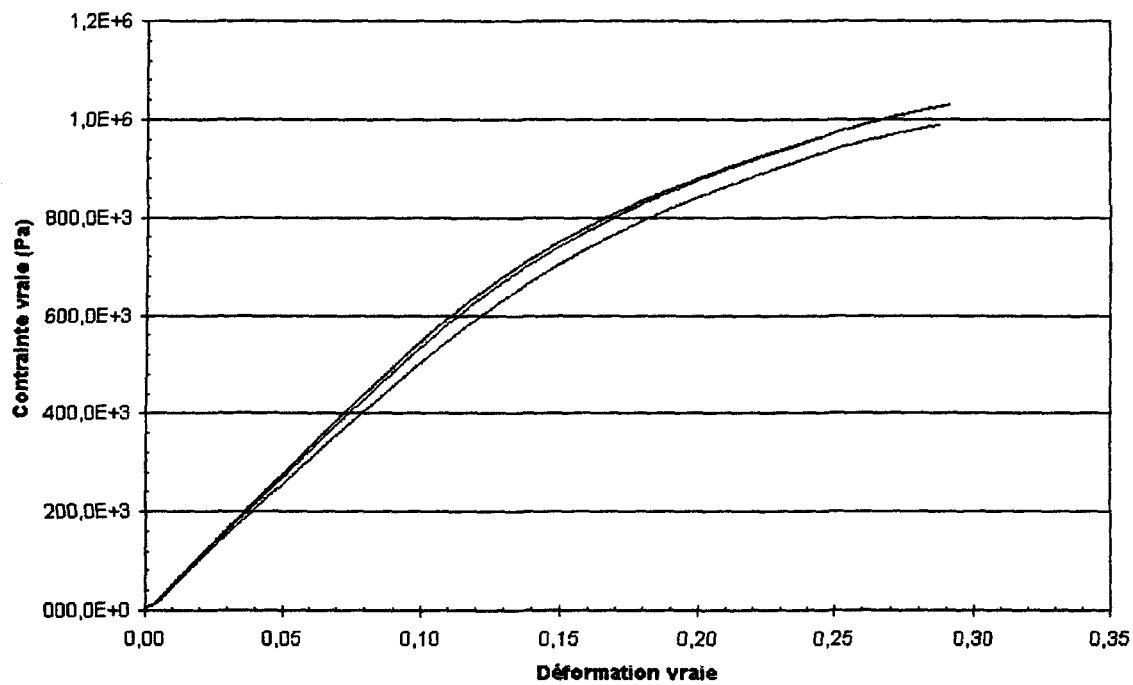


FIGURE B.5 – Comportement uniaxial à -10C et 20 mm/min

Contraintes vraies en fonction des déformations vraies à -30°C et 2mm/min.

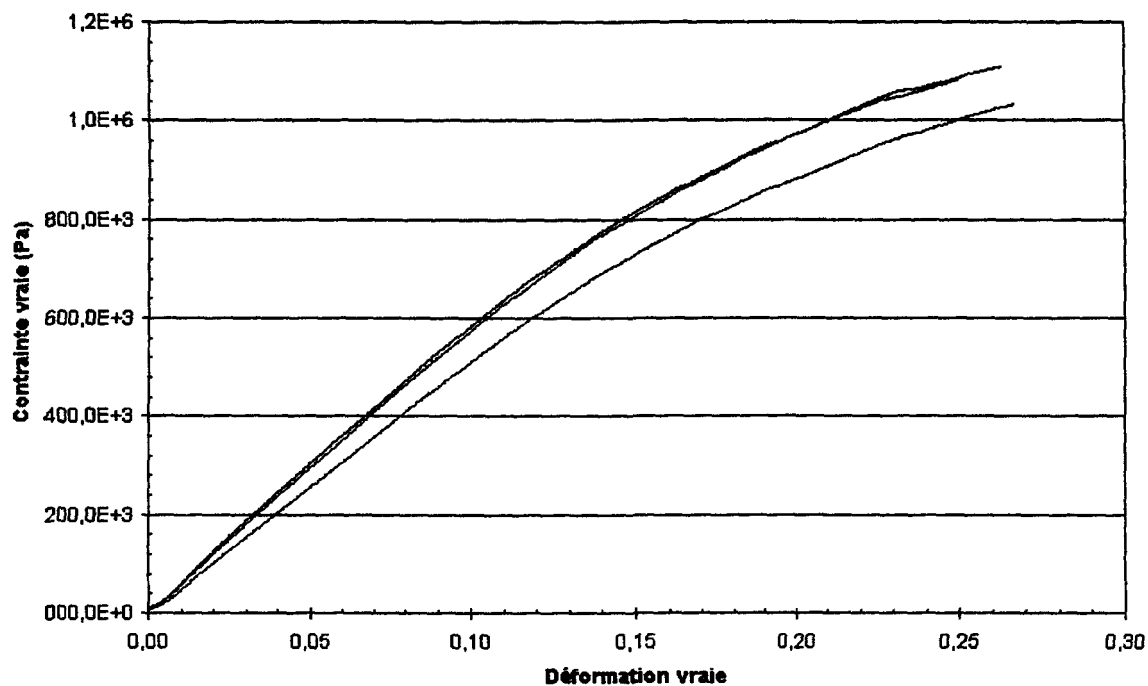


FIGURE B.6 – Comportement uniaxial à -30C et 2 mm/min

Contraintes vraies en fonction des déformations vraies à -30°C et 20mm/min.

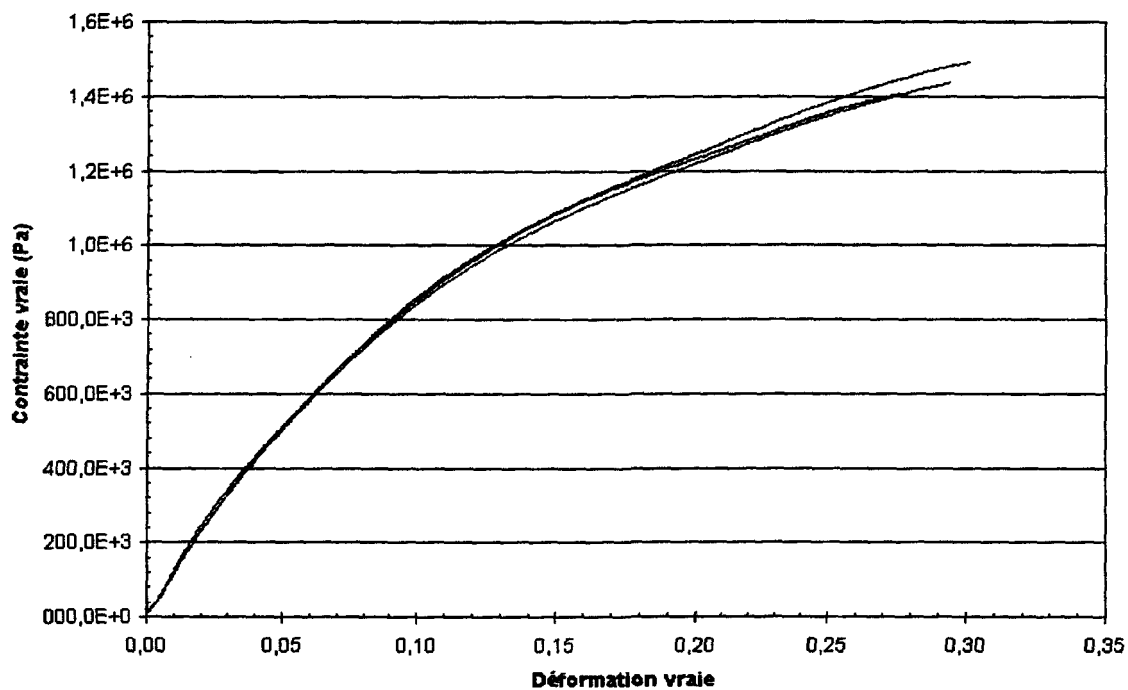


FIGURE B.7 – Comportement uniaxial à -30C et 20 mm/min

Contraintes vraies en fonction des déformations vraies à -30°C et 200mm/min .

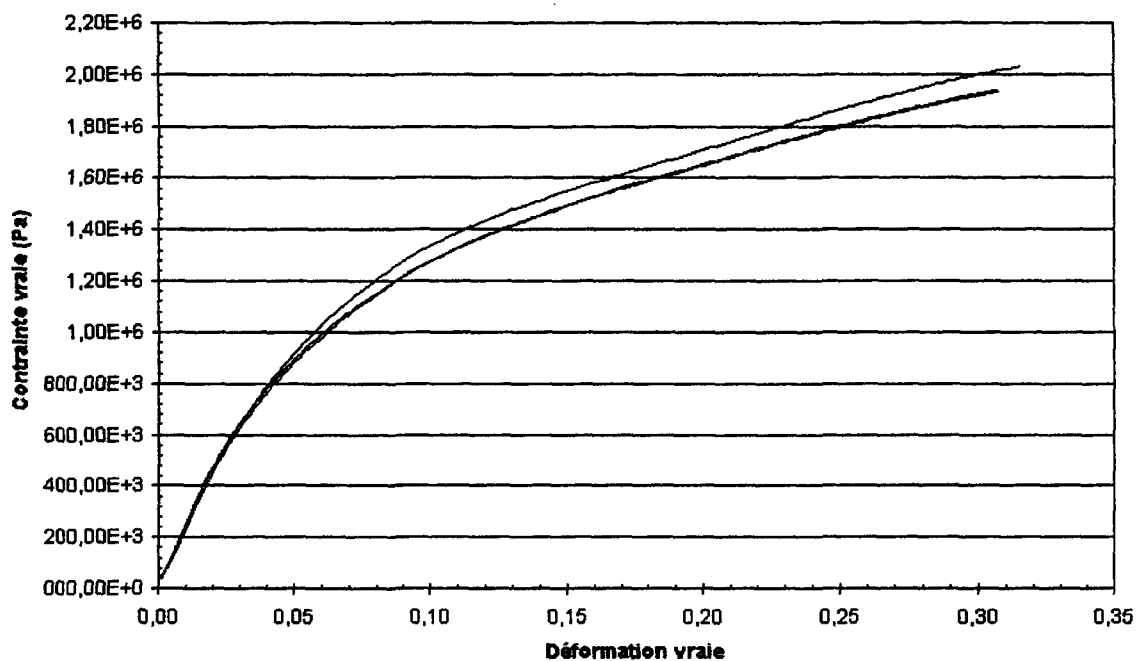


FIGURE B.8 – Comportement uniaxial à -30°C et 200 mm/min

Contraintes vraies en fonction des déformations vraies à -40°C et 20mm/min .

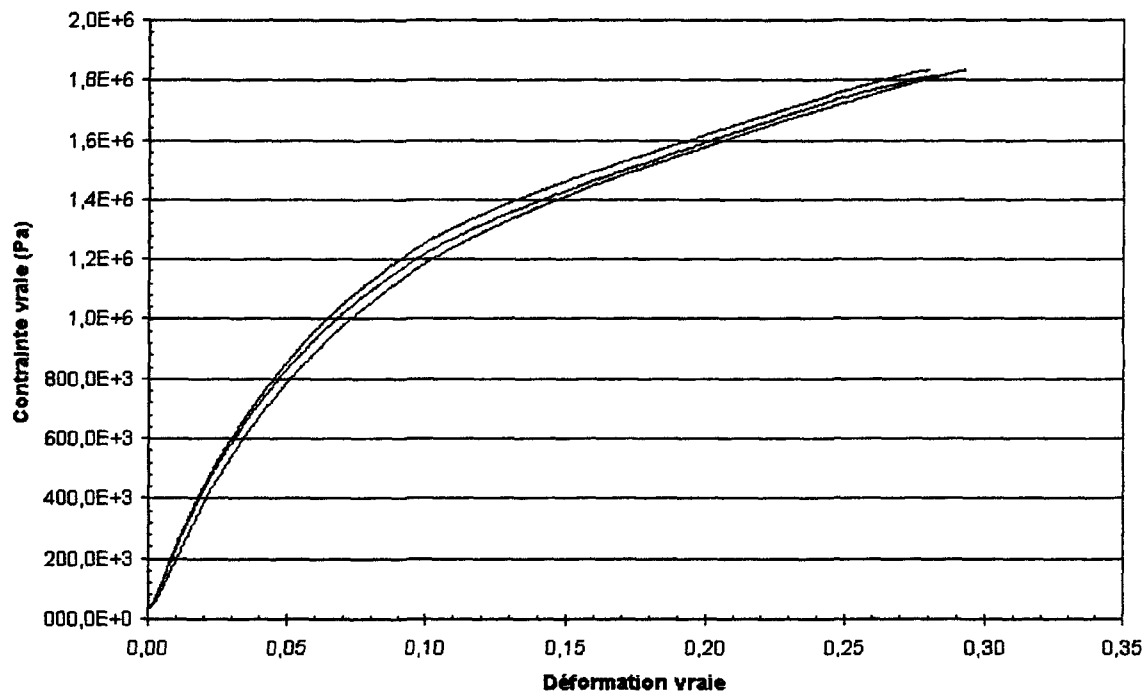


FIGURE B.9 – Comportement uniaxial à -40°C et 20 mm/min

ANNEXE C – FICHIERS DE COMMANDE APDL COMMUNS

Fichier Matprop.in

```

*CREATE,MATPROP, ,%Drive1%\%repla%\%replb%
/COM, *****
/COM,** Début de la macro MATPROP **
/COM,** **
/COM,** Modifiée le 25 mai 2001 **
/COM,** par Luc Giasson **
/COM,** Température: 22 Celcius **
/COM,** Vitesse: 20 mm/min **
/COM, *****
MPDELE,ALL,ALL ! Effacement de tout les matériaux déjà existants
TBDELE,ALL,ALL ! Effacement de toutes les tables de données existantes
/COM,** Matériau 1 **
/COM,** Propergol **
MP,EX,1,3.424421E+6 ! Module de Young a 22C et 20 mm/min
MP,NUXY,1,0.495 ! Coefficient de Poisson du propergol
MP,ALPX,1,4.72e-5*1.8*0 ! Coefficient d'expansion thermique
/COM,** Matériau 2 **
/COM,** Acier **
MP,EX,2,207E+9 ! Module de Young de l'acier
MP,NUXY,2,0.3 ! Coefficient de Poisson de l'acier
MP,ALPX,2,0.0 ! Coefficient d'expansion thermique
*END

```

Fichier Matprop1.in

```

*CREATE,MATPROP1, ,%Drive1%\%repla%\%replb%
/COM, *****
/COM,** Début de la macro MATPROP1 **
/COM,** **
/COM,** Modifiée le 25 mai 2001 **
/COM,** pour le propergol 7L057 **
/COM,** par Luc Giasson **

```

```

/COM,** Temperature: 22 Celcius    **
/COM,** Vitesse: 2 mm/min          **
/COM,*****
!
MPDELE,ALL,ALL ! Effacement de tout les matériaux déjà existants
TBDELE,ALL,ALL ! Effacement de toutes les tables de données existantes
/COM,***** Matériau 1 *****
/COM,***** Propergol *****
MPTEMP,1,22.0
MP,EX,1,2.903344E+6           ! Module de Young
MP,NUXY,1,0.495              ! Coefficient de Poisson
MP,ALPX,1,4.72e-5*1.8*0      ! Coefficient d'expansion thermique
TB,MISO,1,1,50
TBTEMP,22
TBPT,DEFI, 34.443043E-3, 100.000000E+3 ! Point #1
TBPT,DEFI, 40.699125E-3, 118.163265E+3 ! Point #2
TBPT,DEFI, 46.955397E-3, 136.326531E+3 ! Point #3
TBPT,DEFI, 53.212087E-3, 154.489796E+3 ! Point #4
TBPT,DEFI, 59.469611E-3, 172.653061E+3 ! Point #5
TBPT,DEFI, 65.728685E-3, 190.816327E+3 ! Point #6
TBPT,DEFI, 71.990462E-3, 208.979592E+3 ! Point #7
TBPT,DEFI, 78.256726E-3, 227.142857E+3 ! Point #8
TBPT,DEFI, 84.530135E-3, 245.306122E+3 ! Point #9
TBPT,DEFI, 90.814522E-3, 263.469388E+3 ! Point #10
TBPT,DEFI, 97.115274E-3, 281.632653E+3 ! Point #11
TBPT,DEFI, 103.439782E-3, 299.795918E+3 ! Point #12
TBPT,DEFI, 109.797985E-3, 317.959184E+3 ! Point #13
TBPT,DEFI, 116.203017E-3, 336.122449E+3 ! Point #14
TBPT,DEFI, 122.671953E-3, 354.285714E+3 ! Point #15
TBPT,DEFI, 129.226686E-3, 372.448980E+3 ! Point #16
TBPT,DEFI, 135.894932E-3, 390.612245E+3 ! Point #17
TBPT,DEFI, 142.711380E-3, 408.775510E+3 ! Point #18
TBPT,DEFI, 149.718993E-3, 426.938776E+3 ! Point #19
TBPT,DEFI, 156.970483E-3, 445.102041E+3 ! Point #20
TBPT,DEFI, 164.529965E-3, 463.265306E+3 ! Point #21
TBPT,DEFI, 172.474805E-3, 481.428571E+3 ! Point #22
TBPT,DEFI, 180.897673E-3, 499.591837E+3 ! Point #23
TBPT,DEFI, 189.908818E-3, 517.755102E+3 ! Point #24
TBPT,DEFI, 199.638586E-3, 535.918367E+3 ! Point #25
TBPT,DEFI, 210.240173E-3, 554.081633E+3 ! Point #26
TBPT,DEFI, 221.892655E-3, 572.244898E+3 ! Point #27
TBPT,DEFI, 234.804294E-3, 590.408163E+3 ! Point #28

```



```

TBPT,DEFI, 249.216136E-3, 608.571429E+3 ! Point #29
TBPT,DEFI, 265.405924E-3, 626.734694E+3 ! Point #30
TBPT,DEFI, 283.692334E-3, 644.897959E+3 ! Point #31
TBPT,DEFI, 304.439559E-3, 663.061224E+3 ! Point #32
TBPT,DEFI, 328.062247E-3, 681.224490E+3 ! Point #33
TBPT,DEFI, 355.030818E-3, 699.387755E+3 ! Point #34
TBPT,DEFI, 385.877178E-3, 717.551020E+3 ! Point #35
TBPT,DEFI, 421.200842E-3, 735.714286E+3 ! Point #36
TBPT,DEFI, 461.675480E-3, 753.877551E+3 ! Point #37
TBPT,DEFI, 508.055924E-3, 772.040816E+3 ! Point #38
TBPT,DEFI, 561.185626E-3, 790.204082E+3 ! Point #39
TBPT,DEFI, 622.004614E-3, 808.367347E+3 ! Point #40
TBPT,DEFI, 691.557936E-3, 826.530612E+3 ! Point #41
TBPT,DEFI, 771.004642E-3, 844.693878E+3 ! Point #42
TBPT,DEFI, 861.627297E-3, 862.857143E+3 ! Point #43
TBPT,DEFI, 964.842056E-3, 881.020408E+3 ! Point #44
TBPT,DEFI, 1.082209E+0, 899.183673E+3 ! Point #45
TBPT,DEFI, 1.215445E+0, 917.346939E+3 ! Point #46
TBPT,DEFI, 1.366433E+0, 935.510204E+3 ! Point #47
TBPT,DEFI, 1.537235E+0, 953.673469E+3 ! Point #48
TBPT,DEFI, 1.730109E+0, 971.836735E+3 ! Point #49
TBPT,DEFI, 1.947517E+0, 990.000000E+3 ! Point #50
/COM,***** Fin de la macro MATPROP1 *****
*END

```

Fichier Matprop2.in

```

*CREATE,MATPROP2, ,%Drive1%\%repla%\%replb%\
/COM,*****
/COM,** Début de la macro MATPROP2 **
/COM,**
/COM,** Modifiée le 25 mai 2001 **
/COM,** pour le propergol 7L057 **
/COM,** par Luc Giasson **
/COM,** Température: 22 Celcius **
/COM,** Vitesse: 20 mm/min **
/COM,*****
!
MPDELE,ALL,ALL ! Effacement de tout les matériaux déjà existants

```

```

TBDELE,ALL,ALL ! Effacement de toutes les tables de données existantes
/COM,***** Matériau 1 *****
/COM,***** Propergol *****
MPTEMP,1,22.0
MP,EX,1,3.424421E+6 ! Module de Young
MP,NUXY,1,0.495 ! Coefficient de Poisson
MP,ALPX,1,4.72e-5*1.8*0 ! Coefficient d'expansion thermique
TB,MISO,1,1,50
TBTEMP,22
TBPT,DEFI, 29.202019E-3, 100.000000E+3 ! Point #1
TBPT,DEFI, 35.698037E-3, 122.244898E+3 ! Point #2
TBPT,DEFI, 42.194189E-3, 144.489796E+3 ! Point #3
TBPT,DEFI, 48.690667E-3, 166.734694E+3 ! Point #4
TBPT,DEFI, 55.187837E-3, 188.979592E+3 ! Point #5
TBPT,DEFI, 61.686354E-3, 211.224490E+3 ! Point #6
TBPT,DEFI, 68.187303E-3, 233.469388E+3 ! Point #7
TBPT,DEFI, 74.692400E-3, 255.714286E+3 ! Point #8
TBPT,DEFI, 81.204237E-3, 277.959184E+3 ! Point #9
TBPT,DEFI, 87.726595E-3, 300.204082E+3 ! Point #10
TBPT,DEFI, 94.264827E-3, 322.448980E+3 ! Point #11
TBPT,DEFI, 100.826322E-3, 344.693878E+3 ! Point #12
TBPT,DEFI, 107.421056E-3, 366.938776E+3 ! Point #13
TBPT,DEFI, 114.062239E-3, 389.183673E+3 ! Point #14
TBPT,DEFI, 120.767071E-3, 411.428571E+3 ! Point #15
TBPT,DEFI, 127.557615E-3, 433.673469E+3 ! Point #16
TBPT,DEFI, 134.461794E-3, 455.918367E+3 ! Point #17
TBPT,DEFI, 141.514523E-3, 478.163265E+3 ! Point #18
TBPT,DEFI, 148.758991E-3, 500.408163E+3 ! Point #19
TBPT,DEFI, 156.248097E-3, 522.653061E+3 ! Point #20
TBPT,DEFI, 164.046051E-3, 544.897959E+3 ! Point #21
TBPT,DEFI, 172.230159E-3, 567.142857E+3 ! Point #22
TBPT,DEFI, 180.892786E-3, 589.387755E+3 ! Point #23
TBPT,DEFI, 190.143530E-3, 611.632653E+3 ! Point #24
TBPT,DEFI, 200.111600E-3, 633.877551E+3 ! Point #25
TBPT,DEFI, 210.948418E-3, 656.122449E+3 ! Point #26
TBPT,DEFI, 222.830452E-3, 678.367347E+3 ! Point #27
TBPT,DEFI, 235.962300E-3, 700.612245E+3 ! Point #28
TBPT,DEFI, 250.580024E-3, 722.857143E+3 ! Point #29
TBPT,DEFI, 266.954762E-3, 745.102041E+3 ! Point #30
TBPT,DEFI, 285.396610E-3, 767.346939E+3 ! Point #31
TBPT,DEFI, 306.258811E-3, 789.591837E+3 ! Point #32
TBPT,DEFI, 329.942234E-3, 811.836735E+3 ! Point #33

```

```

TBPT,DEFI, 356.900188E-3, 834.081633E+3 ! Point #34
TBPT,DEFI, 387.643556E-3, 856.326531E+3 ! Point #35
TBPT,DEFI, 422.746274E-3, 878.571429E+3 ! Point #36
TBPT,DEFI, 462.851175E-3, 900.816327E+3 ! Point #37
TBPT,DEFI, 508.676192E-3, 923.061224E+3 ! Point #38
TBPT,DEFI, 561.020952E-3, 945.306122E+3 ! Point #39
TBPT,DEFI, 620.773762E-3, 967.551020E+3 ! Point #40
TBPT,DEFI, 688.919009E-3, 989.795918E+3 ! Point #41
TBPT,DEFI, 766.544981E-3, 1.012041E+6 ! Point #42
TBPT,DEFI, 854.852122E-3, 1.034286E+6 ! Point #43
TBPT,DEFI, 955.161747E-3, 1.056531E+6 ! Point #44
TBPT,DEFI, 1.068925E+0, 1.078776E+6 ! Point #45
TBPT,DEFI, 1.197734E+0, 1.101020E+6 ! Point #46
TBPT,DEFI, 1.343328E+0, 1.123265E+6 ! Point #47
TBPT,DEFI, 1.507609E+0, 1.145510E+6 ! Point #48
TBPT,DEFI, 1.692651E+0, 1.167755E+6 ! Point #49
TBPT,DEFI, 1.900709E+0, 1.190000E+6 ! Point #50
/COM,***** Fin de la macro MATPROP2 *****
*END

```

Fichier Matprop4.in

```

*CREATE,MATPROP4,,%Drive1%\%repla%\%replb%\
/COM,*****
/COM,** Début de la macro MATPROP4 **
/COM,** **
/COM,** Modifiée le 25 mai 2001 **
/COM,** pour le propergol 7L057 **
/COM,** par Luc Giasson **
/COM,** Température: 50 Celcius **
/COM,** Vitesse: 20 mm/min **
/COM,*****
!
MPDELE,ALL,ALL ! Effacement de tout les matériaux déjà existants
TBDELE,ALL,ALL ! Effacement de toutes les tables de données existantes
/COM,***** Matériau 1 *****
/COM,***** Propergol *****
MPTEMP,1,50.0
MP,EX,1,2.808822E+6 ! Module de Young

```

```
MP,NUXY,1,0.495           ! Coefficient de Poisson
MP,ALPX,1,4.72e-5*1.8*0   ! Coefficient d'expansion thermique
TB,MISO,1,1,50
TBTEMP,50
TBPT,DEFI, 35.602107E-3, 100.000000E+3 ! Point #1
TBPT,DEFI, 41.850864E-3, 117.551020E+3 ! Point #2
TBPT,DEFI, 48.099996E-3, 135.102041E+3 ! Point #3
TBPT,DEFI, 54.349905E-3, 152.653061E+3 ! Point #4
TBPT,DEFI, 60.601290E-3, 170.204082E+3 ! Point #5
TBPT,DEFI, 66.855291E-3, 187.755102E+3 ! Point #6
TBPT,DEFI, 73.113682E-3, 205.306122E+3 ! Point #7
TBPT,DEFI, 79.379108E-3, 222.857143E+3 ! Point #8
TBPT,DEFI, 85.655382E-3, 240.408163E+3 ! Point #9
TBPT,DEFI, 91.947853E-3, 257.959184E+3 ! Point #10
TBPT,DEFI, 98.263833E-3, 275.510204E+3 ! Point #11
TBPT,DEFI, 104.613119E-3, 293.061224E+3 ! Point #12
TBPT,DEFI, 111.008586E-3, 310.612245E+3 ! Point #13
TBPT,DEFI, 117.466889E-3, 328.163265E+3 ! Point #14
TBPT,DEFI, 124.009260E-3, 345.714286E+3 ! Point #15
TBPT,DEFI, 130.662418E-3, 363.265306E+3 ! Point #16
TBPT,DEFI, 137.459601E-3, 380.816327E+3 ! Point #17
TBPT,DEFI, 144.441718E-3, 398.367347E+3 ! Point #18
TBPT,DEFI, 151.658650E-3, 415.918367E+3 ! Point #19
TBPT,DEFI, 159.170682E-3, 433.469388E+3 ! Point #20
TBPT,DEFI, 167.050101E-3, 451.020408E+3 ! Point #21
TBPT,DEFI, 175.382949E-3, 468.571429E+3 ! Point #22
TBPT,DEFI, 184.270948E-3, 486.122449E+3 ! Point #23
TBPT,DEFI, 193.833612E-3, 503.673469E+3 ! Point #24
TBPT,DEFI, 204.210543E-3, 521.224490E+3 ! Point #25
TBPT,DEFI, 215.563928E-3, 538.775510E+3 ! Point #26
TBPT,DEFI, 228.081250E-3, 556.326531E+3 ! Point #27
TBPT,DEFI, 241.978205E-3, 573.877551E+3 ! Point #28
TBPT,DEFI, 257.501866E-3, 591.428571E+3 ! Point #29
TBPT,DEFI, 274.934065E-3, 608.979592E+3 ! Point #30
TBPT,DEFI, 294.595038E-3, 626.530612E+3 ! Point #31
TBPT,DEFI, 316.847321E-3, 644.081633E+3 ! Point #32
TBPT,DEFI, 342.099916E-3, 661.632653E+3 ! Point #33
TBPT,DEFI, 370.812730E-3, 679.183673E+3 ! Point #34
TBPT,DEFI, 403.501311E-3, 696.734694E+3 ! Point #35
TBPT,DEFI, 440.741878E-3, 714.285714E+3 ! Point #36
TBPT,DEFI, 483.176655E-3, 731.836735E+3 ! Point #37
TBPT,DEFI, 531.519534E-3, 749.387755E+3 ! Point #38
```

```

TBPT,DEFI, 586.562061E-3, 766.938776E+3 ! Point #39
TBPT,DEFI, 649.179766E-3, 784.489796E+3 ! Point #40
TBPT,DEFI, 720.338843E-3, 802.040816E+3 ! Point #41
TBPT,DEFI, 801.103190E-3, 819.591837E+3 ! Point #42
TBPT,DEFI, 892.641828E-3, 837.142857E+3 ! Point #43
TBPT,DEFI, 996.236699E-3, 854.693878E+3 ! Point #44
TBPT,DEFI, 1.113291E+0, 872.244898E+3 ! Point #45
TBPT,DEFI, 1.245337E+0, 889.795918E+3 ! Point #46
TBPT,DEFI, 1.394047E+0, 907.346939E+3 ! Point #47
TBPT,DEFI, 1.561240E+0, 924.897959E+3 ! Point #48
TBPT,DEFI, 1.748894E+0, 942.448980E+3 ! Point #49
TBPT,DEFI, 1.959155E+0, 960.000000E+3 ! Point #50
/COM,***** Fin de la macro MATPROP4 *****
*END

```

Fichier Matprop7.in

```

*CREATE,MATPROP7,,%Drive1%\%repla%\%replb%\
/COM,*****
/COM,** Début de la macro MATPROP7 **
/COM,**
/COM,** Modifiée le 25 mai 2001 **
/COM,** pour le propergol 7L057 **
/COM,** par Luc Giasson **
/COM,** Température: -30 Celcius **
/COM,** Vitesse: 20 mm/min **
/COM,*****
!
MPDELE,ALL,ALL ! Effacement de tout les matériaux déjà existants
TBDELE,ALL,ALL ! Effacement de toutes les tables de données existantes
/COM,***** Matériau 1 *****
/COM,***** Propergol *****
MPTEMP,1,-30.0
MP,EX,1,11.983843E+6 ! Module de Young
MP,NUXY,1,0.495 ! Coefficient de Poisson
MP,ALPX,1,4.72e-5*1.8*0 ! Coefficient d'expansion thermique
TB,MISO,1,1,50
TBTEMP,-30
TBPT,DEFI, 8.344569E-3, 100.000000E+3 ! Point #1

```

TBPT,DEFI, 13.251060E-3, 157.959184E+3 ! Point #2
TBPT,DEFI, 18.268907E-3, 215.918367E+3 ! Point #3
TBPT,DEFI, 23.454350E-3, 273.877551E+3 ! Point #4
TBPT,DEFI, 28.868695E-3, 331.836735E+3 ! Point #5
TBPT,DEFI, 34.577523E-3, 389.795918E+3 ! Point #6
TBPT,DEFI, 40.650155E-3, 447.755102E+3 ! Point #7
TBPT,DEFI, 47.159256E-3, 505.714286E+3 ! Point #8
TBPT,DEFI, 54.180526E-3, 563.673469E+3 ! Point #9
TBPT,DEFI, 61.792459E-3, 621.632653E+3 ! Point #10
TBPT,DEFI, 70.076139E-3, 679.591837E+3 ! Point #11
TBPT,DEFI, 79.115072E-3, 737.551020E+3 ! Point #12
TBPT,DEFI, 88.995042E-3, 795.510204E+3 ! Point #13
TBPT,DEFI, 99.803987E-3, 853.469388E+3 ! Point #14
TBPT,DEFI, 111.631888E-3, 911.428571E+3 ! Point #15
TBPT,DEFI, 124.570673E-3, 969.387755E+3 ! Point #16
TBPT,DEFI, 138.714133E-3, 1.027347E+6 ! Point #17
TBPT,DEFI, 154.157844E-3, 1.085306E+6 ! Point #18
TBPT,DEFI, 170.999096E-3, 1.143265E+6 ! Point #19
TBPT,DEFI, 189.336831E-3, 1.201224E+6 ! Point #20
TBPT,DEFI, 209.271584E-3, 1.259184E+6 ! Point #21
TBPT,DEFI, 230.905431E-3, 1.317143E+6 ! Point #22
TBPT,DEFI, 254.341939E-3, 1.375102E+6 ! Point #23
TBPT,DEFI, 279.686122E-3, 1.433061E+6 ! Point #24
TBPT,DEFI, 307.044397E-3, 1.491020E+6 ! Point #25
TBPT,DEFI, 336.524546E-3, 1.548980E+6 ! Point #26
TBPT,DEFI, 368.235680E-3, 1.606939E+6 ! Point #27
TBPT,DEFI, 402.288204E-3, 1.664898E+6 ! Point #28
TBPT,DEFI, 438.793783E-3, 1.722857E+6 ! Point #29
TBPT,DEFI, 477.865316E-3, 1.780816E+6 ! Point #30
TBPT,DEFI, 519.616903E-3, 1.838776E+6 ! Point #31
TBPT,DEFI, 564.163822E-3, 1.896735E+6 ! Point #32
TBPT,DEFI, 611.622499E-3, 1.954694E+6 ! Point #33
TBPT,DEFI, 662.110488E-3, 2.012653E+6 ! Point #34
TBPT,DEFI, 715.746446E-3, 2.070612E+6 ! Point #35
TBPT,DEFI, 772.650110E-3, 2.128571E+6 ! Point #36
TBPT,DEFI, 832.942280E-3, 2.186531E+6 ! Point #37
TBPT,DEFI, 896.744795E-3, 2.244490E+6 ! Point #38
TBPT,DEFI, 964.180515E-3, 2.302449E+6 ! Point #39
TBPT,DEFI, 1.035373E+0, 2.360408E+6 ! Point #40
TBPT,DEFI, 1.110448E+0, 2.418367E+6 ! Point #41
TBPT,DEFI, 1.189530E+0, 2.476327E+6 ! Point #42
TBPT,DEFI, 1.272747E+0, 2.534286E+6 ! Point #43

```

TBPT,DEFI, 1.360227E+0, 2.592245E+6 ! Point #44
TBPT,DEFI, 1.452097E+0, 2.650204E+6 ! Point #45
TBPT,DEFI, 1.548487E+0, 2.708163E+6 ! Point #46
TBPT,DEFI, 1.649528E+0, 2.766122E+6 ! Point #47
TBPT,DEFI, 1.755352E+0, 2.824082E+6 ! Point #48
TBPT,DEFI, 1.866090E+0, 2.882041E+6 ! Point #49
TBPT,DEFI, 1.981875E+0, 2.940000E+6 ! Point #50
/COM,***** Fin de la macro MATPROP7 *****
*END

```

Fichier Matprop8.in

```

*CREATE,MATPROP8,,%Drive1%\%repla%\%replb%\
/COM,*****
/COM,** Début de la macro MATPROP8 **
/COM,** **
/COM,** Modifiée le 25 mai 2001 **
/COM,** pour le propergol 7L057 **
/COM,** par Luc Giasson **
/COM,** Température: -30 Celcius **
/COM,** Vitesse: 200 mm/min **
/COM,*****
!
MPDELE,ALL,ALL ! Effacement de tout les matériaux déjà existants
TBDELE,ALL,ALL ! Effacement de toutes les tables de données existantes
/COM,***** Matériau 1 *****
/COM,***** Propergol *****
MPTEMP,1,-30.0
MP,EX,1,23.843766E+6 ! Module de Young
MP,NUXY,1,0.495 ! Coefficient de Poisson
MP,ALPX,1,4.72e-5*1.8*0 ! Coefficient d'expansion thermique
TB,MISO,1,1,50
TBTEMP,-30
TBPT,DEFI, 4.193968E-3, 100.000000E+3 ! Point #1
TBPT,DEFI, 7.223273E-3, 171.428571E+3 ! Point #2
TBPT,DEFI, 10.321722E-3, 242.857143E+3 ! Point #3
TBPT,DEFI, 13.535493E-3, 314.285714E+3 ! Point #4
TBPT,DEFI, 16.917969E-3, 385.714286E+3 ! Point #5
TBPT,DEFI, 20.528810E-3, 457.142857E+3 ! Point #6

```

TBPT,DEFI,	24.433308E-3,	528.571429E+3	! Point #7
TBPT,DEFI,	28.701907E-3,	600.000000E+3	! Point #8
TBPT,DEFI,	33.409828E-3,	671.428571E+3	! Point #9
TBPT,DEFI,	38.636763E-3,	742.857143E+3	! Point #10
TBPT,DEFI,	44.466621E-3,	814.285714E+3	! Point #11
TBPT,DEFI,	50.987315E-3,	885.714286E+3	! Point #12
TBPT,DEFI,	58.290571E-3,	957.142857E+3	! Point #13
TBPT,DEFI,	66.471768E-3,	1.028571E+6	! Point #14
TBPT,DEFI,	75.629798E-3,	1.100000E+6	! Point #15
TBPT,DEFI,	85.866928E-3,	1.171429E+6	! Point #16
TBPT,DEFI,	97.288695E-3,	1.242857E+6	! Point #17
TBPT,DEFI,	110.003795E-3,	1.314286E+6	! Point #18
TBPT,DEFI,	124.123988E-3,	1.385714E+6	! Point #19
TBPT,DEFI,	139.764014E-3,	1.457143E+6	! Point #20
TBPT,DEFI,	157.041510E-3,	1.528571E+6	! Point #21
TBPT,DEFI,	176.076937E-3,	1.600000E+6	! Point #22
TBPT,DEFI,	196.993508E-3,	1.671429E+6	! Point #23
TBPT,DEFI,	219.917129E-3,	1.742857E+6	! Point #24
TBPT,DEFI,	244.976334E-3,	1.814286E+6	! Point #25
TBPT,DEFI,	272.302231E-3,	1.885714E+6	! Point #26
TBPT,DEFI,	302.028450E-3,	1.957143E+6	! Point #27
TBPT,DEFI,	334.291091E-3,	2.028571E+6	! Point #28
TBPT,DEFI,	369.228678E-3,	2.100000E+6	! Point #29
TBPT,DEFI,	406.982114E-3,	2.171429E+6	! Point #30
TBPT,DEFI,	447.694641E-3,	2.242857E+6	! Point #31
TBPT,DEFI,	491.511797E-3,	2.314286E+6	! Point #32
TBPT,DEFI,	538.581380E-3,	2.385714E+6	! Point #33
TBPT,DEFI,	589.053409E-3,	2.457143E+6	! Point #34
TBPT,DEFI,	643.080093E-3,	2.528571E+6	! Point #35
TBPT,DEFI,	700.815797E-3,	2.600000E+6	! Point #36
TBPT,DEFI,	762.417007E-3,	2.671429E+6	! Point #37
TBPT,DEFI,	828.042304E-3,	2.742857E+6	! Point #38
TBPT,DEFI,	897.852331E-3,	2.814286E+6	! Point #39
TBPT,DEFI,	972.009771E-3,	2.885714E+6	! Point #40
TBPT,DEFI,	1.050679E+0,	2.957143E+6	! Point #41
TBPT,DEFI,	1.134028E+0,	3.028571E+6	! Point #42
TBPT,DEFI,	1.222223E+0,	3.100000E+6	! Point #43
TBPT,DEFI,	1.315437E+0,	3.171429E+6	! Point #44
TBPT,DEFI,	1.413841E+0,	3.242857E+6	! Point #45
TBPT,DEFI,	1.517610E+0,	3.314286E+6	! Point #46
TBPT,DEFI,	1.626920E+0,	3.385714E+6	! Point #47
TBPT,DEFI,	1.741949E+0,	3.457143E+6	! Point #48


```
TBPT,DEFI, 1.862877E+0, 3.528571E+6 ! Point #49
TBPT,DEFI, 1.989886E+0, 3.600000E+6 ! Point #50
/COM,***** Fin de la macro MATPROP8 *****
*END
```

Fichier JIN1.in

```
*CREATE,JIN1,,%Drive1%\%repla%\%replb%
/COM,*****
/COM,** Début de la macro JIN1 **
/COM,** **
/COM,** Créé par: Luc Giasson **
/COM,** Date: 25 mai 2001 **
/COM,*****
CSYS,0
ETABLE,,SENE !Retreive stain energy
ETABLE,,VOLUME !Retreive volume element
SEXP,W,SENE,VOLUME,1,-1 !Calculate strain energy density
PDEF,W,ETAB,W !Put strain energy density on the path
PCALC,INTG,J,W,YG !Integrate energy W.R.T. Global Y
*GET,JA,PATH,0,LAST,J !Get final value of integral for 1st term of J
PDEF,CLEAR !Clear old path variables
PVECT,NORM,NX,NY,NZ !Define path unit normal vector
PDEF,SX,S,X !Put stress SX on the path
PDEF,SY,S,Y !Put stress SY on the path
PDEF,SKY,S,XY !Put stress SKY on the path
PCALC,MULT,TX1,SX,NX !Calculate traction TX
PCALC,MULT,TX2,SKY,NY !TX = SX*NX + SKY*NY
PCALC,ADD,TX,TX1,TX2 !TX = TX1 + TX2
PCALC,MULT,TY1,SKY,NX !Calculate traction TY
PCALC,MULT,TY2,SY,NY !TY = SKY*NX + SY*NY
PCALC,ADD,TY,TY1,TY2 !TY = TY1 + TY2
*GET,DX,PATH,0,LAST,S !Define path shift as 1% of path lenght
DX=DX/1000 !Changed DX to 0.1% of original DX Seemed to Work
Better
PCALC,ADD,XG,XG,,,,-DX/2 !Shift path from X to X-DX/2 (Global X dir.)
PDEF,UX1,U,X !Define UX at X-DX
PDEF,UY1,U,Y !Define UY at X-DX
PCALC,ADD,XG,XG,,,,DX !Shift path from X-DX/2 to X+DX/2
```

```

PDEF,UX2,U,X           !Define UX at X+DX
PDEF,UY2,U,Y           !Define UY at X+DX
PCALC,ADD,XG,XG,,,,-DX/2 !Shift path to original position
C=(1/DX)
PCALC,ADD,C1,UX2,UX1,C,-C !Calculate derivative C1=DUX/DX
PCALC,ADD,C2,UY2,UY1,C,-C !Calculate derivative C2=DUY/DX
PCALC,MULT,C1,TX,C1      !Define integrand C1=TX*C1=TX*DUX/DX
PCALC,MULT,C2,TY,C2      !C2=TY*DUY/DX
PCALC,ADD,C1,C1,C2       !C1=C1+C2= TX*DUX/DX + TY*DUY/DX
PCALC,INTG,J,C1,S       !Form second integral (W.R.T. path lenght S)
*GET,JB,PATH,0,LAST,J   !Get final value of integral for 2ND term of J
JINT=(JA-JB)            !Add both term
PDEF,CLEAR              !Clear path variables
JA=
JB=
C=
DX=
/COM,** Fin de la macro JIN1 **
*END

```

Fichier JINT.in

```

*CREATE,JINT,,%Drive1%\%repla%\%replb%
/COM,*****
/COM,** Début de la macro JINT          **
/COM,** Cette macro calcule l'intégrale **
/COM,** de contour J autour de la pointe **
/COM,** d'une fissure                   **
/COM,** Créé par: Luc Giasson           **
/COM,** Date: 25 Mai 2001               **
/COM,*****
/COM,** Démarrage du postprocesseur **
/POST1
CSYS,0
/COM,***** Calcul de l'intégrale J sur le chemin 1 *****
NSEL,ALL
LP1=NODE(Tip+Boite/6,0,0)
LP2=NODE(Tip+Boite/6,Boite/6,0)
LP3=NODE(Tip-Boite/6,Boite/6,0)

```

```

LP4=NODE(Tip-Boite/6,0,0)
LPATH,LP1,LP2,LP3,LP4
LP1=
LP2=
LP3=
LP4=
*USE,JIN1
J1=JINT*2
/COM,***** Calcul de l'intégrale J sur le chemin 2 *****
NSEL,ALL
LP1=NODE(Tip+Boite/3,0,0)
LP2=NODE(Tip+Boite/3,Boite/3,0)
LP3=NODE(Tip-Boite/3,Boite/3,0)
LP4=NODE(Tip-Boite/3,0,0)
LPATH,LP1,LP2,LP3,LP4
LP1=
LP2=
LP3=
LP4=
*USE,JIN1
J2=JINT*2
/COM,***** Calcul de l'intégrale J sur le chemin 3 *****
NSEL,ALL
LP1=NODE(Tip+Boite/2,0.0,0)
LP2=NODE(Tip+Boite/2,Boite/2,0)
LP3=NODE(Tip-Boite/2,Boite/2,0)
LP4=NODE(Tip-Boite/2,0.0,0)
LPATH,LP1,LP2,LP3,LP4
LP1=
LP2=
LP3=
LP4=
*USE,JIN1
J3=JINT*2
/COM,***** Calcul de l'intégrale J sur le chemin 4 *****
NSEL,ALL
LP1=NODE(Tip+2*Boite/3,0.0,0)
LP2=NODE(Tip+2*Boite/3,2*Boite/3,0)
LP3=NODE(Tip-2*Boite/3,2*Boite/3,0)
LP4=NODE(Tip-2*Boite/3,0.0,0)
LPATH,LP1,LP2,LP3,LP4
LP1=

```

```

LP2=
LP3=
LP4=
*USE, JIN1
J4=JINT*2
/COM,***** Calcul de l'intégrale J sur le chemin 5 *****
NSEL, ALL
LP1=NODE(Tip+5*Boite/6,0.0,0)
LP2=NODE(Tip+5*Boite/6,5*Boite/6,0)
LP3=NODE(Tip-5*Boite/6,5*Boite/6,0)
LP4=NODE(Tip-5*Boite/6,0.0,0)
LPATH, LP1, LP2, LP3, LP4
LP1=
LP2=
LP3=
LP4=
*USE, JIN1
J5=JINT*2
/COM,***** Calcul de l'intégrale J sur le chemin 6 *****
NSEL, ALL
LP1=NODE(Tip+Boite,0.0,0)
LP2=NODE(Tip+Boite,Boite,0)
LP3=NODE(Tip-Boite,Boite,0)
LP4=NODE(Tip-Boite,0.0,0)
LPATH, LP1, LP2, LP3, LP4
LP1=
LP2=
LP3=
LP4=
*USE, JIN1
J6=JINT*2
/COM,***** Calcul de la moyenne et de l'écart type *****
Javg=(J1+J2+J3+J4+J5+J6)/6
Std2=((J1-Javg)*(J1-Javg))+((J2-Javg)*(J2-Javg))
Std2=Std2+((J3-Javg)*(J3-Javg))+((J4-Javg)*(J4-Javg))
Std2=Std2+((J5-Javg)*(J5-Javg))+((J6-Javg)*(J6-Javg))
/COM,** Effacement des paramètres inutiles
J1=
J2=
J3=
J4=
J5=

```

```

J6=
JINT=
/COM,***** Fin de la macro JINT *****
*END

```

Fichier JINT_L.in

```

*CREATE,JINT_L,,%Drive1%\%repla%\%replb%
/COM,*****
/COM,***** Debut de la macro JINT_L *****
/COM,***** Cette macro calcule l'integrale *****
/COM,***** de contour J autour de la pointe *****
/COM,***** gauche de la fissure *****
/COM,***** Créé par: Luc Giasson *****
/COM,***** Date: 25 mai 2001 *****
/COM,*****
/COM,** Demarrage du postprocesseur **
/POST1
CSYS,0
/COM,***** Calcul de l'integrale J sur le chemin 1 *****
NSEL,ALL
LP1=NODE(LTip-Boite/6,0.0,0)
LP2=NODE(LTip-Boite/6,Boite/6,0)
LP3=NODE(LTip+Boite/6,Boite/6,0)
LP4=NODE(LTip+Boite/6,0.0,0)
LPATH,LP1,LP2,LP3,LP4
LP1=
LP2=
LP3=
LP4=
*USE,JIN1
JL1=JINT*2
/COM,***** Calcul de l'integrale J sur le chemin 2 *****
NSEL,ALL
LP1=NODE(LTip-Boite/3,0.0,0)
LP2=NODE(LTip-Boite/3,Boite/3,0)
LP3=NODE(LTip+Boite/3,Boite/3,0)
LP4=NODE(LTip+Boite/3,0.0,0)
LPATH,LP1,LP2,LP3,LP4

```

```

LP1=
LP2=
LP3=
LP4=
*USE,JIN1
JL2=JINT*2
/COM,***** Calcul de l'integrale J sur le chemin 3 *****
NSEL,ALL
LP1=NODE(LTip-Boite/2,0.0,0)
LP2=NODE(LTip-Boite/2,Boite/2,0)
LP3=NODE(LTip+Boite/2,Boite/2,0)
LP4=NODE(LTip+Boite/2,0.0,0)
LPATH,LP1,LP2,LP3,LP4
LP1=
LP2=
LP3=
LP4=
*USE,JIN1
JL3=JINT*2
/COM,***** Calcul de l'integrale J sur le chemin 4 *****
NSEL,ALL
LP1=NODE(LTip-2*Boite/3,0.0,0)
LP2=NODE(LTip-2*Boite/3,2*Boite/3,0)
LP3=NODE(LTip+2*Boite/3,2*Boite/3,0)
LP4=NODE(LTip+2*Boite/3,0.0,0)
LPATH,LP1,LP2,LP3,LP4
LP1=
LP2=
LP3=
LP4=
*USE,JIN1
JL4=JINT*2
/COM,***** Calcul de l'integrale J sur le chemin 5 *****
NSEL,ALL
LP1=NODE(LTip-5*Boite/6,0.0,0)
LP2=NODE(LTip-5*Boite/6,5*Boite/6,0)
LP3=NODE(LTip+5*Boite/6,5*Boite/6,0)
LP4=NODE(LTip+5*Boite/6,0.0,0)
LPATH,LP1,LP2,LP3,LP4
*USE,JIN1
JL5=JINT*2
/COM,***** Calcul de l'integrale J sur le chemin 6 *****

```

```

NSEL,ALL
LP1=NODE(LTip-Boite,0.0,0)
LP2=NODE(LTip-Boite,Boite,0)
LP3=NODE(LTip+Boite,Boite,0)
LP4=NODE(LTip+Boite,0.0,0)
LPATH,LP1,LP2,LP3,LP4
LP1=
LP2=
LP3=
LP4=
*USE,JIN1
JL6=JINT*2
/COM,***** Calcul de la moyenne et de l'ecart type *****
JLavg=(JL1+JL2+JL3+JL4+JL5+JL6)/6
Std2=((JL1-JLavg)*(JL1-JLavg))+((JL2-JLavg)*(JL2-JLavg))
Std2=Std2+((JL3-JLavg)*(JL3-JLavg))+((JL4-JLavg)*(JL4-JLavg))
Std2=Std2+((JL5-JLavg)*(JL5-JLavg))+((JL6-JLavg)*(JL6-JLavg))
JL1=
JL2=
JL3=
JL4=
JL5=
JL6=
JINT=
/COM,***** Fin de la macro JINT_L *****
*END

```

Fichier JINT_R.in

```

*CREATE,JINT_R, ,%Drive1%\%repla%\%replb%
/COM,*****
/COM,***** Début de la JINT_R *****
/COM,***** Cette macro calcule l'intégrale *****
/COM,***** de contour J autour de la pointe *****
/COM,***** droite de la fissure *****
/COM,***** Créé par: Luc Giasson *****
/COM,***** Date: 25 mai 2001 *****
/COM,*****
/COM,***** Demarrage du postprocesseur *****

```

```
/POST1
CSYS,0
/COM,***** Calcul de l'integrale J sur le chemin 1 *****
NSEL,ALL
LP1=NODE(RTip+Boite/6,0.0,0)
LP2=NODE(RTip+Boite/6,Boite/6,0)
LP3=NODE(RTip-Boite/6,Boite/6,0)
LP4=NODE(RTip-Boite/6,0.0,0)
LPATH,LP1,LP2,LP3,LP4
LP1=
LP2=
LP3=
LP4=
*USE,JIN1
JR1=JINT*2
/COM,***** Calcul de l'integrale J sur le chemin 2 *****
NSEL,ALL
LP1=NODE(RTip+Boite/3,0.0,0)
LP2=NODE(RTip+Boite/3,Boite/3,0)
LP3=NODE(RTip-Boite/3,Boite/3,0)
LP4=NODE(RTip-Boite/3,0.0,0)
LPATH,LP1,LP2,LP3,LP4
LP1=
LP2=
LP3=
LP4=
*USE,JIN1
JR2=JINT*2
/COM,***** Calcul de l'integrale J sur le chemin 3 *****
NSEL,ALL
LP1=NODE(RTip+Boite/2,0.0,0)
LP2=NODE(RTip+Boite/2,Boite/2,0)
LP3=NODE(RTip-Boite/2,Boite/2,0)
LP4=NODE(RTip-Boite/2,0.0,0)
LPATH,LP1,LP2,LP3,LP4
LP1=
LP2=
LP3=
LP4=
*USE,JIN1
JR3=JINT*2
/COM,***** Calcul de l'integrale J sur le chemin 4 *****
```



```

NSEL,ALL
LP1=NODE(RTip+2*Boite/3,0.0,0)
LP2=NODE(RTip+2*Boite/3,2*Boite/3,0)
LP3=NODE(RTip-2*Boite/3,2*Boite/3,0)
LP4=NODE(RTip-2*Boite/3,0.0,0)
LPATH,LP1,LP2,LP3,LP4
LP1=
LP2=
LP3=
LP4=
*USE,JIN1
JR4=JINT*2
/COM,***** Calcul de l'integrale J sur le chemin 5 *****
NSEL,ALL
LP1=NODE(RTip+5*Boite/6,0.0,0)
LP2=NODE(RTip+5*Boite/6,5*Boite/6,0)
LP3=NODE(RTip-5*Boite/6,5*Boite/6,0)
LP4=NODE(RTip-5*Boite/6,0.0,0)
LPATH,LP1,LP2,LP3,LP4
LP1=
LP2=
LP3=
LP4=
*USE,JIN1
JR5=JINT*2
/COM,***** Calcul de l'integrale J sur le chemin 6 *****
NSEL,ALL
LP1=NODE(RTip+Boite,0.0,0)
LP2=NODE(RTip+Boite,Boite,0)
LP3=NODE(RTip-Boite,Boite,0)
LP4=NODE(RTip-Boite,0.0,0)
LPATH,LP1,LP2,LP3,LP4
LP1=
LP2=
LP3=
LP4=
*USE,JIN1
JR6=JINT*2
/COM,***** Calcul de la moyenne et de l'ecart type *****
JRavg=(JR1+JR2+JR3+JR4+JR5+JR6)/6
Std2=((JR1-JRavg)*(JR1-JRavg))+((JR2-JRavg)*(JR2-JRavg))
Std2=Std2+((JR3-JRavg)*(JR3-JRavg))+((JR4-JRavg)*(JR4-JRavg))

```

```
Std2=Std2+((JR5-JRavg)*(JR5-JRavg))+((JR6-JRavg)*(JR6-JRavg))
JR1=
JR2=
JR3=
JR4=
JR5=
JR6=
JINT=
/COM,***** Fin de la macro JINT_R *****
*END
```

ANNEXE D – FICHIERS DE COMMANDE ADPL POUR PANNEAU M-T

Fichier START.IN

```

! Fichier START.IN
/COM,*****
/COM,** Exécution du fichier START.IN          **
/COM,** Ce fichier est utilisé pour exécuter des **
/COM,** analyses durant la nuit.              **
/COM,** Créé par: Luc Giasson                  **
/COM,** Date: 25 Mai 2001                      **
/COM,*****

!/COM, ** Lancement du fichier de commande Test01
!/INPUT,Test01,in,%Drive1%\%repla%\%rep1b%\MTPanel\Input\Batch

/COM, ** Lancement du fichier de commande Test02
/INPUT,Test02,in,%Drive1%\%repla%\%rep1b%\MTPanel\Input\Batch

/COM,*****
/COM,** Fin de la simulation **
/COM,*****

```

Fichier Test02.in

```

! Fichier Test02.IN
/COM,*****
/COM,** Simulation 01 **
/COM,*****
/INPUT,PARAM,in,%Drive1%\%repla%\%rep1b%\MTPanel\Input\Macro
aforce=25          ! Force appliquée sur l'éprouvette (N)
aWRatio=0.125 ! Ratio longueur de la fissure / largeur de l'éprouvette
AFissure=Largeur*aWRatio
*USE,GEO_BASE
*USE,MATTEST

```

```

*USE,GEO_MESH
*USE,SOLVENL
*USE,JINT
*USE,GET_INFO
SAVE,Sim01,db,%Drive2%\%rep2a%\%rep2b%\%rep2c%\%p_proj%\Test02
/COM,*****
/COM,** Fin de la simulation 01 **
/COM,*****

/COM,*****
/COM,** Simulation 02 **
/COM,*****
/INPUT,PARAM,in,%Drive1%\%repla%\%replb%\MTPanel\Input\Macro
Aforce=25      ! Force appliquée sur l'éprouvette (N)
aWRatio=0.250 ! Ratio longueur de la fissure / largeur de l'éprouvette
AFissure=Largeur*aWRatio
*USE,GEO_BASE
*USE,MATTEST
*USE,GEO_MESH
*USE,SOLVENL
*USE,JINT
*USE,GET_INFO
SAVE,Sim02,db,%Drive2%\%rep2a%\%rep2b%\%rep2c%\%p_proj%\Test02
/COM,*****
/COM,** Fin de la simulation 02 **
/COM,*****

/COM,*****
/COM,** Simulation 03 **
/COM,*****
/INPUT,PARAM,in,%Drive1%\%repla%\%replb%\MTPanel\Input\Macro
Aforce=25      ! Force appliquée sur l'éprouvette (N)
aWRatio=0.375 ! Ratio longueur de la fissure / largeur de l'éprouvette
AFissure=Largeur*aWRatio
*USE,GEO_BASE
*USE,MATTEST
*USE,GEO_MESH
*USE,SOLVENL
*USE,JINT
*USE,GET_INFO
SAVE,Sim03,db,%Drive2%\%rep2a%\%rep2b%\%rep2c%\%p_proj%\Test02
/COM,*****

```

```

/COM,** Fin de la simulation 03 **
/COM,*****

/COM,*****
/COM,** Simulation 04 **
/COM,*****
/INPUT,PARAM,in,%Drive1%\%repla%\%replb%\MTPanel\Input\Macro
Aforce=25      ! Force appliquée sur l'éprouvette (N)
aWRatio=0.500 ! Ratio longueur de la fissure / largeur de l'éprouvette
AFissure=Largeur*aWRatio
*USE,GEO_BASE
*USE,MATTEST
*USE,GEO_MESH
*USE,SOLVENL
*USE,JINT
*USE,GET_INFO
SAVE,Sim04,db,%Drive2%\%rep2a%\%rep2b%\%rep2c%\%p_proj%\Test02
/COM,*****
/COM,** Fin de la simulation 04 **
/COM,*****

/COM,*****
/COM,** Simulation 05 **
/COM,*****
/INPUT,PARAM,in,%Drive1%\%repla%\%replb%\MTPanel\Input\Macro
Aforce=25      ! Force appliquée sur l'éprouvette (N)
aWRatio=0.625 ! Ratio longueur de la fissure / largeur de l'éprouvette
AFissure=Largeur*aWRatio
*USE,GEO_BASE
*USE,MATTEST
*USE,GEO_MESH
*USE,SOLVENL
*USE,JINT
*USE,GET_INFO
SAVE,Sim05,db,%Drive2%\%rep2a%\%rep2b%\%rep2c%\%p_proj%\Test02
/COM,*****
/COM,** Fin de la simulation 05 **
/COM,*****

```

```

/COM,*****
/COM,** Simulation 06 **
/COM,*****
/INPUT,PARAM,in,%Drive1%\%repla%\%rep1b%\MTPanel\Input\Macro
Aforce=25      ! Force appliquée sur l'éprouvette (N)
aWRatio=0.750 ! Ratio longueur de la fissure / largeur de l'éprouvette
AFissure=Largeur*aWRatio
*USE,GEO_BASE
*USE,MATTEST
*USE,GEO_MESH
*USE,SOLVENL
*USE,JINT
*USE,GET_INFO
SAVE,Sim06,db,%Drive2%\%rep2a%\%rep2b%\%rep2c%\%p_proj%\Test02
/COM,*****
/COM,** Fin de la simulation 06 **
/COM,*****

/COM,*****
/COM,** Simulation 07 **
/COM,*****
/INPUT,PARAM,in,%Drive1%\%repla%\%rep1b%\MTPanel\Input\Macro
Aforce=25      ! Force appliquée sur l'éprouvette (N)
aWRatio=0.875 ! Ratio longueur de la fissure / largeur de l'éprouvette
AFissure=Largeur*aWRatio
*USE,GEO_BASE
*USE,MATTEST
*USE,GEO_MESH
*USE,SOLVENL
*USE,JINT
*USE,GET_INFO
SAVE,Sim07,db,%Drive2%\%rep2a%\%rep2b%\%rep2c%\%p_proj%\Test02
/COM,*****
/COM,** Fin de la simulation 07 **
/COM,*****

```

Fichier PARAM.IN

```

! Fichier PARAM.IN
/COM,*****
/COM,** Ce fichier contient tout les paramètres communs          **
/COM,** à toutes les simulations.                                **
/COM,** Les paramètres qui diffèrent sont spécifiés par le fichier **
/COM,** "batch" qui lance les commandes.                        **
/COM,*****
FINISH
/CLEAR          ! Effacement de toute la base de donnée

/COM,** Redirection de l'écriture vers la fenêtre de sortie
/OUTPUT,TERM
!/COM,** Redirection de l'écriture vers le fichier de sortie
!/OUTPUT,Output,in,%Drive1%\%repla%\%replb%\MTPanel\Output

/COM,** Définition des chemins (les variables n'enregistrent que 8 caractères)
p_proj='MTPanel'    ! Répertoire de projet

/COM,** Effacement des fichiers avant de commencer
/DELETE,ANSYS,err,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,ANSYS,db,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,ANSYS,emat,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,ANSYS,dbb,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,ANSYS,esav,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,ANSYS,full,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,ANSYS,ldhi,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,ANSYS,mntr,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,ANSYS,osav,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,ANSYS,page,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,ANSYS,r001,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,ANSYS,rdb,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,ANSYS,rst,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,ANSYS,s01,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,Geo_base,,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,Geo_mesh,,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,Get_info,,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,Jin1,,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,Jint,,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,Matprop1,,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,Matprop2,,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,Matprop3,,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,Matprop4,,%Drive1%\%repla%\%replb%

```

```

/DELETE,Matprop5,,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,Matprop6,,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,Matprop7,,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,Matprop8,,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,Matprop9,,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,Mattest1,,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,Mattest2,,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,Mattest3,,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,Mattest,,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,Solve,,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,Solvenl,,%Drive1%\%repla%\%replb%

!
/INPUT,GEO_BASE,%f_ext%,%Drive1%\%repla%\%replb%\%p_proj%\%p_input%\%p_macro%
/INPUT,MATTEST,%f_ext%,%Drive1%\%repla%\%replb%\%p_proj%\%p_input%\%p_macro%
/INPUT,GEO_MESH,%f_ext%,%Drive1%\%repla%\%replb%\%p_proj%\%p_input%\%p_macro%
/INPUT,SOLVE,%f_ext%,%Drive1%\%repla%\%replb%\%p_proj%\%p_input%\%p_macro%
/INPUT,SOLVENL,%f_ext%,%Drive1%\%repla%\%replb%\%p_proj%\%p_input%\%p_macro%
/INPUT,GET_INFO,%f_ext%,%Drive1%\%repla%\%replb%\%p_proj%\%p_input%\%p_macro%
/INPUT,MATPROP1,%f_ext%,%Drive1%\%repla%\%replb%\%p_lib%
/INPUT,MATPROP2,%f_ext%,%Drive1%\%repla%\%replb%\%p_lib%
/INPUT,MATPROP3,%f_ext%,%Drive1%\%repla%\%replb%\%p_lib%
/INPUT,MATPROP4,%f_ext%,%Drive1%\%repla%\%replb%\%p_lib%
/INPUT,MATPROP5,%f_ext%,%Drive1%\%repla%\%replb%\%p_lib%
/INPUT,MATPROP6,%f_ext%,%Drive1%\%repla%\%replb%\%p_lib%
/INPUT,MATPROP7,%f_ext%,%Drive1%\%repla%\%replb%\%p_lib%
/INPUT,MATPROP8,%f_ext%,%Drive1%\%repla%\%replb%\%p_lib%
/INPUT,MATPROP9,%f_ext%,%Drive1%\%repla%\%replb%\%p_lib%
/INPUT,JIN1,%f_ext%,%Drive1%\%repla%\%replb%\%p_lib%
/INPUT,JINT,%f_ext%,%Drive1%\%repla%\%replb%\%p_lib%
/FILNAME,ANSYS,1

/COM,** Conditions de simulation
/COM,** Températures
Aref=22.0           ! Température de référence
Atemp=22.0         ! Température appliquée (C)
/COM,** Géométrie de l'éprouvette
Thick=0.0127      ! Épaisseur de l'éprouvette (m)
Largeur = 0.040   ! Largeur de l'éprouvette (m)
Hauteur = 0.100   ! Hauteur de l'éprouvette (m)
Boite = 0.002     ! Hauteur de la boite contenant le chemin d'intégration
Maille = 0.0010  ! Grosseur du maillage (m)

```



```
Aforce = 5           ! Force appliquée sur l'éprouvette par défaut (N)
/COM,** Fin du fichier Param.in **
```

Fichier GEO_BASE.IN

```
*CREATE,GEO_BASE,,%Drive1%\%repla%\%replb%
/COM,*****
/COM,** Début de la macro GEO_BASE           **
/COM,**                                     **
/COM,** Éprouvette SENT pour tester la macro JIN1 **
/COM,** Créé par: Luc Giasson                 **
/COM,** Date: 25 Mai 2001                     **
/COM,*****
P1X = -Largeur/2
P1Y = 0.0
P2X = P1X+AFissure-Boite
P2Y = 0.0
P3X = P1X+AFissure
P3Y = 0.0
P4X = P3X+Boite
P4Y = 0.0
P5X = Largeur/2
P5Y = 0.0
P6X = P1X
P6Y = Boite
P7X = P2X
P7Y = P6Y
P8X = P4X
P8Y = P6Y
P9X = P5X
P9Y = P6Y
P10X = P1X
P10Y = Hauteur/4
P11X = P2X
P11Y = P10Y
P12X = P4X
P12Y = P10Y
P13X = P5X
P13Y = P10Y
```

```

P14X = P1X
P14Y = Hauteur/2
P15X = P2X
P15Y = P14Y
P16X = P4X
P16Y = P14Y
P17X = P5X
P17Y = P14Y
P18X = P1X
P18Y = P14Y+0.010
P19X = P2X
P19Y = P18Y
P20X = P4X
P20Y = P18Y
P21X = P5X
P21Y = P18Y
/COM,***** Coordonnés X des pointes de la fissure *****
Tip = P3X
/PREP7
/COM,***** Nettoyage de toutes les entités *****
ASEL,ALL          ! Restores the full set of areas
ACLEAR,ALL        !
ADELE,ALL         ! Deletes unmeshed areas
LSEL,ALL          ! Restores the full set of lines
LDELE,ALL         ! Deletes unmeshed lines
KSEL,ALL          ! Restores the full set of keypoints
KDELE,ALL         ! Deletes unmeshed keypoints
/COM,***** Définition des différents types d'éléments *****
/COM,***** Type Element 1 *****
/COM,***** PLANE2 - 2-D 6-Node Structural Solid *****
/COM,***** Plane stress with thickness real constant *****
ET,1,PLANE2,,,3
/COM,***** Type Element 2 *****
/COM,***** PLANE82 - 8-Node Structural Solid *****
/COM,***** Plane stress with tickness real constant *****
ET,2,PLANE82,,,3
/COM,***** Type Element 3 *****
/COM,***** PLANE82 - 8-Node Structural Solid *****
/COM,***** Plane stress without tickness *****
ET,3,PLANE82,,,0
/COM,***** Definition de la constante reelle 1 (Epaisseur) *****
R,1,Thick          ! Real 1 = Thickness

```

```
/COM,***** Definition des points *****
```

```
CSYS,0
```

```
K,1,P1X,P1Y      ! Point 1
K,2,P2X,P2Y      ! Point 2
K,3,P3X,P3Y      ! Point 3
K,4,P4X,P4Y      ! Point 4
K,5,P5X,P5Y      ! Point 5
K,6,P6X,P6Y      ! Point 6
K,7,P7X,P7Y      ! Point 7
K,8,P8X,P8Y      ! Point 8
K,9,P9X,P9Y      ! Point 9
K,10,P10X,P10Y   ! Point 10
K,11,P11X,P11Y   ! Point 11
K,12,P12X,P12Y   ! Point 12
K,13,P13X,P13Y   ! Point 13
K,14,P14X,P14Y   ! Point 14
K,15,P15X,P15Y   ! Point 15
K,16,P16X,P16Y   ! Point 16
K,17,P17X,P17Y   ! Point 17
K,18,P18X,P18Y   ! Point 18
K,19,P19X,P19Y   ! Point 19
K,20,P20X,P20Y   ! Point 20
K,21,P21X,P21Y   ! Point 21
```

```
P1X=
```

```
P2X=
```

```
P3X=
```

```
P4X=
```

```
P5X=
```

```
P6X=
```

```
P7X=
```

```
P8X=
```

```
P9X=
```

```
P10X=
```

```
P11X=
```

```
P12X=
```

```
P13X=
```

```
P14X=
```

```
P15X=
```

```
P16X=
```

```
P17X=
```

```
P18X=
```

```
P19X=
```

P20X=
P21X=
P1Y=
P2Y=
P3Y=
P4Y=
P5Y=
P6Y=
P7Y=
P8Y=
P9Y=
P10Y=
P11Y=
P12Y=
P13Y=
P14Y=
P15Y=
P16Y=
P17Y=
P18Y=
P19Y=
P20Y=
P21Y=

!Eléments dégénérés

KSCON,3,Maille/8,1,8,0.5

/COM,***** Définition des lignes *****

L,1,2 ! Ligne 1
L,2,3 ! Ligne 2
L,3,4 ! Ligne 3
L,4,5 ! Ligne 4
L,1,6 ! Ligne 5
L,2,7 ! Ligne 6
L,4,8 ! Ligne 7
L,5,9 ! Ligne 8
L,6,7 ! Ligne 9
L,7,8 ! Ligne 10
L,8,9 ! Ligne 11
L,6,10 ! Ligne 12
L,7,11 ! Ligne 13
L,8,12 ! Ligne 14
L,9,13 ! Ligne 15
L,10,11 ! Ligne 16

```

L,11,12          ! Ligne 17
L,12,13          ! Ligne 18
L,10,14          ! Ligne 19
L,11,15          ! Ligne 20
L,12,16          ! Ligne 21
L,13,17          ! Ligne 22
L,14,15          ! Ligne 23
L,15,16          ! Ligne 24
L,16,17          ! Ligne 25
L,14,18          ! Ligne 26
L,15,19          ! Ligne 27
L,16,20          ! Ligne 28
L,17,21          ! Ligne 29
L,18,19          ! Ligne 30
L,19,20          ! Ligne 31
L,20,21          ! Ligne 32
/COM,***** Définition des aires *****
A,1,2,7,6        ! Aire 1
A,2,3,4,8,7      ! Aire 2
A,4,5,9,8        ! Aire 3
A,6,7,11,10     ! Aire 4
A,7,8,12,11     ! Aire 5
A,8,9,13,12     ! Aire 6
A,10,11,15,14   ! Aire 7
A,11,12,16,15   ! Aire 8
A,12,13,17,16   ! Aire 9
A,14,15,19,18   ! Aire 10
A,15,16,20,19   ! Aire 11
A,16,17,21,20   ! Aire 12
/COM,***** Fin de la macro GEO_BASE *****
*END

```

FichierMATTEST.IN

```

*CREATE,MATTEST,,%Drive1%\%repla%\%replb%
/COM,*****
/COM,** Début de la macro MATTest **
/COM,** **
/COM,** Modifiée le 25 Mai 2001 **

```

```

/COM,** par Luc Giasson          **
/COM,** pour tester la macro JIN1 **
/COM,*****
!
MPDELE,ALL,ALL ! Effacement de tout les matériaux déjà existants
TBDELE,ALL,ALL ! Effacement de toutes les tables de données existantes
/COM,**** Matériau 1 ****
MPTEMP,1,22.0
MP,EX,1,4.995005E+6          ! Module de Young
MP,NUXY,1,0.495             ! Coefficient de Poisson
MP,ALPX,1,4.72e-5*1.8*0     ! Coefficient d'expansion thermique
TB,MISO,1,1,20
TBTEMP,22
TBPT,DEFI, 20.020000E-3, 100.000000E+3 ! Point #1
TBPT,DEFI, 40.640000E-3, 200.000000E+3 ! Point #2
TBPT,DEFI, 64.860000E-3, 300.000000E+3 ! Point #3
TBPT,DEFI, 100.480000E-3, 400.000000E+3 ! Point #4
TBPT,DEFI, 162.500000E-3, 500.000000E+3 ! Point #5
TBPT,DEFI, 275.520000E-3, 600.000000E+3 ! Point #6
TBPT,DEFI, 476.140000E-3, 700.000000E+3 ! Point #7
TBPT,DEFI, 815.360000E-3, 800.000000E+3 ! Point #8
TBPT,DEFI, 1.360980E+0, 900.000000E+3 ! Point #9
TBPT,DEFI, 2.200000E+0, 1.000000E+6 ! Point #10
TBPT,DEFI, 3.441020E+0, 1.100000E+6 ! Point #11
TBPT,DEFI, 5.216640E+0, 1.200000E+6 ! Point #12
TBPT,DEFI, 7.685860E+0, 1.300000E+6 ! Point #13
TBPT,DEFI, 11.036480E+0, 1.400000E+6 ! Point #14
TBPT,DEFI, 15.487500E+0, 1.500000E+6 ! Point #15
TBPT,DEFI, 21.291520E+0, 1.600000E+6 ! Point #16
TBPT,DEFI, 28.737140E+0, 1.700000E+6 ! Point #17
TBPT,DEFI, 38.151360E+0, 1.800000E+6 ! Point #18
TBPT,DEFI, 49.901980E+0, 1.900000E+6 ! Point #19
TBPT,DEFI, 64.400000E+0, 2.000000E+6 ! Point #20
/COM,** Matériau 2 - Acier **
MP,EX,2,207E9 ! Module de Young de l'acier
MP,NUXY,2,0.3 ! Coefficient de Poisson de l'acier
/COM,**** Fin de la macro MATTEST ****
*END

```

Fichier GEO_MESH.IN

```

*CREATE,GEO_MESH,,%Drive1%\%repla%\%replb%
/COM,*****
/COM,** Début de la macro GEO_MESH **
/COM,** Créé par: Luc Giasson      **
/COM,** Date: 25 Mai 2001        **
/COM,*****
/COM,**** Attribution des matériaux ****
ASEL,S,AREA,,1          ! Sélection de l'aire 1
ASEL,A,AREA,,3,9        ! Sélection des aires 3 à 9
MAT,1                   ! Matériau 1
REAL,1                  ! Real 1
TYPE,2                  ! Type 2 (Plane82)
AATT,1,1,2             ! Matériau 1, Real 1, Type 2
/COM,****
ASEL,S,AREA,,10,12     ! Sélection des aires 10 à 12
MAT,2                   ! Matériau 2
REAL,1                  ! Real 1
TYPE,2                  ! Type 2 (Plane82)
AATT,2,1,2             ! Matériau 2, Real 1, Type 2
/COM,****
ASEL,S,AREA,,2         ! Sélection de l'aire 2
MAT,1                   ! Matériau 1
REAL,1                  ! Real 1
TYPE,2                  ! Type 2 (Plane82)
AATT,1,1,2             ! Matériau 1, Real 1, Type 2
/COM,**** Grosseur des éléments ****
ASEL,S,AREA,,1,12     ! Sélection des aires 1 a 9
MOPT,EXPND,1.0        ! INTERIOR/BOUNDARY SIZE RATIO
MOPT,TRANS,1.0        ! TRANSITION OF ELEMENT SIZE
ESIZE,Maille
MSHAPE,0,2D           ! Mesh with quadrilateral-shaped elements
MSHKEY,1              ! Use mapped meshing
MSHMID,0              ! Element edges are (0=smooth, 1=straight)
/COM,**** Maillage des aires rectangulaires ****
AMESH,5
AMESH,4
AMESH,6
AMESH,8
AMESH,7
AMESH,9

```

```

AMESH,11
AMESH,10
AMESH,12
/COM,***** Maillage des aires restantes *****
MOPT,EXPND,1.0          ! INTERIOR/BOUNDARY SIZE RATIO
MOPT,TRANS,1.0         ! TRANSITION OF ELEMENT SIZE
ESIZE,Maille/2
MSHAPE,0,2D            ! Mesh with quadrilateral-shaped elements
MSHKEY,1               ! Use mapped meshing
MSHMID,0               ! Element edges are (0=smooth, 1=straight)
AMESH,1
AMESH,3
/COM,***** Grosseur des éléments à la pointe de la fissure *****
MOPT,EXPND,0.5         ! INTERIOR/BOUNDARY SIZE RATIO
MOPT,TRANS,4.0        ! TRANSITION OF ELEMENT SIZE
MSHAPE,1,2D           ! Mesh with triangle-shaped elements
MSHKEY,0              ! Use free meshing
MSHMID,0              ! element edges are (0=smooth, 1=straight)
ESIZE,Maille/4        ! SELECT INITIAL ELEMENT SIZE
AMESH,2
SAVE
/COM,***** Fin de la macro GEO_MESH *****
*END

```

Fichier SOLVENL.IN

```

*CREATE,SOLVENL,,%Drivel%\%repla%\%replb%
/COM,*****
/COM,** Début de la macro SOLVENL **
/COM,** Créé par: Luc Giasson      **
/COM,** Date: 25 Mai 2001         **
/COM,*****
/COM,** Démarrage du processeur de solution **
/SOLU
ANTYPE,0,NEW           ! New Static Analysis
/COM,***** Définition des degrés de liberté *****
ASEL,S,AREA,,10,12    ! Sélection des aires 10 a 12
NSLA,S,1              ! Sélection des noeuds appartenant aux éléments
D,ALL,UX,0            ! Fixe tout le noeuds au dessus du modèle

```



```

LSEL,S,LINE,,3,4           ! Sélection des lignes 3 et 4
ASEL,S,AREA,,2,3         ! Sélection des aires 1 et 2
DL,ALL,,SYMM
LSEL,S,LINE,,5
LSEL,A,LINE,,12
LSEL,A,LINE,,19
LSEL,A,LINE,,26
ASEL,S,AREA,,1
ASEL,A,AREA,,4
ASEL,A,AREA,,7
ASEL,A,AREA,,26
DL,ALL,,SYMM
TREF,Aref                 ! Assign reference temp
TUNIF,Atemp               ! Assigns a uniform temp to all nodes
/COM,***** Application des forces sur le tablier *****
LSEL,S,LINE,,30,32       ! Sélection des lignes 30 a 32
NSLL,S,1
F,ALL,FY,Aforce/(40*2+1) ! Applique la force sur tout les noeuds du dessus
!/COM,***** Déplacement du tablier *****
!LSEL,S,LINE,,30,32      ! Sélection des lignes 30 a 32
!ASEL,S,AREA,,10,12     ! Sélection des aires 10 a 12
!DL,ALL,,UY,DISPLACE/2,1 ! Déplacement du tablier
/COM,***** Commande d'analyse non-linéaire *****
Ctol=0.0001
AUTOTS,ON                ! Use automatic load/time stepping
NEQIT,200                 ! Max number of iterations
CNVTOL,F,,Ctol           ! Set Convergence Tolerance on forces
!CNVTOL,U,,Ctol,1       ! Set Convergence Tolerance on forces
NSUBST,5,10,2,ON        ! Specify number of subsets
LSWRITE,1                ! Writes loadstep data to a file
NROPT,FULL,,ON          ! Specifies full Newton Raphson
/NUMBER,1                 ! Color the numbered items. Do not show the numbers.
/GLINE,ALL,0             ! Solid element outlines (default)
/GST,ON
/COM,***** Calcul de la solution *****
LSEL,ALL
ASEL,ALL
ESEL,ALL
NSEL,ALL
SOLVE                    ! Starts a Solution
/COM,***** Fermeture du processeur de solution *****
FINISH

```

```
/COM,***** Fin de la macro SOLVE *****
*END
```

Fichier GET_INFO.IN

```
*CREATE,GET_INFO, ,%Drive1%\%repla%\%repla%
/COM,*****
/COM,** Debut de la macro GET_INFO **
/COM,** Créé par: Luc Giasson      **
/COM,** Date: 25 Mai 2001         **
/COM,*****
/COM,** Démarrage du post processeur **
/POST1
ESEL,ALL
NSLE,S,ALL      ! Selects those nodes attached to the selected elements
!RSYS,0         ! Activates a coordinate system for printout of display of
results
!CSYS,0         ! Activates a previously defined coordinate system
/COM,***** Sélection du coin inferieur gauche *****
NGET=NODE(-Largeur/2.0,0.0,0)
*GET,CTOD,NODE,NGET,U,Y
/COM,***** Sélection d un point particulier *****
NGET=NODE(-Largeur/2,Hauteur/2,0)
*GET,A_S1,NODE,NGET,S,1
*GET,A_SXY,NODE,NGET,S,XY
*GET,A_UY,NODE,NGET,U,Y
*GET,A_UX,NODE,NGET,U,X
NGET=NODE(Largeur/2,0.0,0)
*GET,B_S1,NODE,NGET,S,1
*GET,B_SXY,NODE,NGET,S,XY
*GET,B_UY,NODE,NGET,U,Y
*GET,B_UX,NODE,NGET,U,X
NGET=
ESEL,ALL
NSLE,ALL
ASEL,ALL
LSEL,ALL
FINISH
*END
```


ANNEXE E – FICHIERS DE COMMANDE ADPL POUR ÉPROUVETTE DE
CARACTÉRISATION

Fichier START.IN

```

! Fichier START.IN
/COM,*****
/COM,** Exécution du fichier START.IN          **
/COM,** Ce fichier est utilisé pour exécuter des **
/COM,** analyses durant la nuit.              **
/COM,** Créé par: Luc Giasson                  **
/COM,** Date: 25 Mai 2001                      **
/COM,*****

!/COM,** Fichier de Test01
!/INPUT,Test01,in,%Drive1%\%repla%\%replb%\SENTMod\Input\Batch

!/COM,** Fichier de TestNL01
!/INPUT,TestNL01,in,%Drive1%\%repla%\%replb%\SENTMod\Input\Batch

!/COM,** Fichier de Video
!/INPUT,Video1,in,%Drive1%\%repla%\%replb%\SENTMod\Input\Batch
!/INPUT,Video2,in,%Drive1%\%repla%\%replb%\SENTMod\Input\Batch
!/INPUT,Video3,in,%Drive1%\%repla%\%replb%\SENTMod\Input\Batch
!/INPUT,Video4,in,%Drive1%\%repla%\%replb%\SENTMod\Input\Batch

/COM,** Fichier de Erreur
/INPUT,Erreur,in,%Drive1%\%repla%\%replb%\SENTMod\Input\Batch

!/COM,** Fichier de calcul de courbe JR
!/INPUT,JR1,in,%Drive1%\%repla%\%replb%\SentMod\Input\Batch
!/INPUT,JR2,in,%Drive1%\%repla%\%replb%\SentMod\Input\Batch
!/INPUT,JR3,in,%Drive1%\%repla%\%replb%\SentMod\Input\Batch
!/INPUT,JR4,in,%Drive1%\%repla%\%replb%\SentMod\Input\Batch
/INPUT,FJR1,in,%Drive1%\%repla%\%replb%\SentMod\Input\Batch
/INPUT,FJR2,in,%Drive1%\%repla%\%replb%\SentMod\Input\Batch
/INPUT,FJR3,in,%Drive1%\%repla%\%replb%\SentMod\Input\Batch

```

```

/INPUT,FJR4,in,%Drive1%\%repla%\%rep1b%\SentMod\Input\Batch
/INPUT,FJR5,in,%Drive1%\%repla%\%rep1b%\SentMod\Input\Batch
/INPUT,FJR6,in,%Drive1%\%repla%\%rep1b%\SentMod\Input\Batch
/INPUT,FJR7,in,%Drive1%\%repla%\%rep1b%\SentMod\Input\Batch
/INPUT,FJR1pp,in,%Drive1%\%repla%\%rep1b%\SentMod\Input\Batch
/INPUT,FJR2pp,in,%Drive1%\%repla%\%rep1b%\SentMod\Input\Batch
/INPUT,FJR3pp,in,%Drive1%\%repla%\%rep1b%\SentMod\Input\Batch
/INPUT,FJR4pp,in,%Drive1%\%repla%\%rep1b%\SentMod\Input\Batch
/INPUT,FJR5pp,in,%Drive1%\%repla%\%rep1b%\SentMod\Input\Batch
/INPUT,FJR6pp,in,%Drive1%\%repla%\%rep1b%\SentMod\Input\Batch
/INPUT,FJR7pp,in,%Drive1%\%repla%\%rep1b%\SentMod\Input\Batch

```

```

/COM,*****
/COM,** Fin de la simulation **
/COM,*****

```

Fichier TestNL01.in

```
! Fichier TestNL01.IN
```

```

/COM,*****
/COM,** Simulation01 **
/COM,*****
/INPUT,PARAM,in,%Drive1%\%repla%\%rep1b%\SentMod\Input\Macro
/COM,** Position et grandeur de la fissure
DISPLACE = 0.010 ! Déplacement du tablier
AFissure = 0.010 ! Longueur de la fissure (m)
/COM,**** Utilisation des macros ****
*USE,GEO_BASE
*USE,MATPROP2
*USE,GEO_MESH
*USE,SOLVENL
*USE,JINT
*USE,GET_INFO
!SAVE,TestNL01,db,%Drive2%\%rep2a%\%rep2b%\%rep2c%\%p_proj%\Test
/COM,** Fin Simulation01 **

```

Fichier PARAM.IN

```

/COM,*****
/COM,** Début du fichier PARAM.IN **
/COM,**                               **
/COM,** Créé par: Luc Giasson      **
/COM,** Date: 25 mai 2001         **
/COM,*****
FINISH
/CLEAR
/COM,** Redirection de l'écriture vers la fenêtre de sortie
/OUTPUT,TERM

/COM,** Définition des chemins (les variables n'enregistrent que 8 caractères)
p_proj='SENTmod'      ! Répertoire de projet

/COM,** Effacement des fichiers avant de commencer
/DELETE,ANSYS,err,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,ANSYS,db,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,ANSYS,emat,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,ANSYS,dbb,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,ANSYS,esav,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,ANSYS,full,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,ANSYS,ldhi,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,ANSYS,mntr,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,ANSYS,osav,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,ANSYS,page,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,ANSYS,r001,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,ANSYS,rdb,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,ANSYS,rst,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,ANSYS,s01,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,Geo_base,,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,Geo_mesh,,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,Get_info,,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,JIN1,,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,JINT,,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,JINT_L,,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,JINT_R,,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,Matprop,,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,Matprop1,,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,Matprop2,,%Drive1%\%repla%\%replb%

```

```

/DELETE,Matprop3,,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,Matprop4,,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,Matprop5,,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,Matprop6,,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,Matprop7,,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,Matprop8,,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,Matprop9,,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,Mat1PP,,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,Mat2PP,,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,Mat3PP,,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,Mat4PP,,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,Mat5PP,,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,Mat6PP,,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,Mat7PP,,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,Mat8PP,,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,Mat9PP,,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,Mat1-2,,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,Mat1-3,,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,Mat2-2,,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,Mat2-3,,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,Mat8-2,,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,Mat8-3,,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,MatTest,,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,SOLVE,,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,SOLVENL,,%Drive1%\%repla%\%replb%
!
/COM,** Compilation des macros
/INPUT,GEO_BASE,%f_ext%,%Drive1%\%repla%\%replb%\%p_proj%\%p_input%\%p_macro%
/INPUT,GEO_MESH,%f_ext%,%Drive1%\%repla%\%replb%\%p_proj%\%p_input%\%p_macro%
/INPUT,SOLVE,%f_ext%,%Drive1%\%repla%\%replb%\%p_proj%\%p_input%\%p_macro%
/INPUT,SOLVENL,%f_ext%,%Drive1%\%repla%\%replb%\%p_proj%\%p_input%\%p_macro%
/INPUT,GET_INFO,%f_ext%,%Drive1%\%repla%\%replb%\%p_proj%\%p_input%\%p_macro%
/INPUT,MATPROP,%f_ext%,%Drive1%\%repla%\%replb%\%p_lib%
/INPUT,MATPROP1,%f_ext%,%Drive1%\%repla%\%replb%\%p_lib%
/INPUT,MATPROP2,%f_ext%,%Drive1%\%repla%\%replb%\%p_lib%
/INPUT,MATPROP3,%f_ext%,%Drive1%\%repla%\%replb%\%p_lib%
/INPUT,MATPROP4,%f_ext%,%Drive1%\%repla%\%replb%\%p_lib%
/INPUT,MATPROP5,%f_ext%,%Drive1%\%repla%\%replb%\%p_lib%
/INPUT,MATPROP6,%f_ext%,%Drive1%\%repla%\%replb%\%p_lib%
/INPUT,MATPROP7,%f_ext%,%Drive1%\%repla%\%replb%\%p_lib%
/INPUT,MATPROP8,%f_ext%,%Drive1%\%repla%\%replb%\%p_lib%
/INPUT,MATPROP9,%f_ext%,%Drive1%\%repla%\%replb%\%p_lib%

```

```

/INPUT,MAT1PP,%f_ext%,%Drive1%\%repla%\%replb%\%p_lib%
/INPUT,MAT2PP,%f_ext%,%Drive1%\%repla%\%replb%\%p_lib%
/INPUT,MAT3PP,%f_ext%,%Drive1%\%repla%\%replb%\%p_lib%
/INPUT,MAT4PP,%f_ext%,%Drive1%\%repla%\%replb%\%p_lib%
/INPUT,MAT5PP,%f_ext%,%Drive1%\%repla%\%replb%\%p_lib%
/INPUT,MAT6PP,%f_ext%,%Drive1%\%repla%\%replb%\%p_lib%
/INPUT,MAT7PP,%f_ext%,%Drive1%\%repla%\%replb%\%p_lib%
/INPUT,MAT8PP,%f_ext%,%Drive1%\%repla%\%replb%\%p_lib%
/INPUT,MAT9PP,%f_ext%,%Drive1%\%repla%\%replb%\%p_lib%
/INPUT,MATTest,%f_ext%,%Drive1%\%repla%\%replb%\%p_lib%
/INPUT,MAT1-2,%f_ext%,%Drive1%\%repla%\%replb%\%p_lib%
/INPUT,MAT1-3,%f_ext%,%Drive1%\%repla%\%replb%\%p_lib%
/INPUT,MAT2-2,%f_ext%,%Drive1%\%repla%\%replb%\%p_lib%
/INPUT,MAT2-3,%f_ext%,%Drive1%\%repla%\%replb%\%p_lib%
/INPUT,MAT8-2,%f_ext%,%Drive1%\%repla%\%replb%\%p_lib%
/INPUT,MAT8-3,%f_ext%,%Drive1%\%repla%\%replb%\%p_lib%
/INPUT,JIN1,%f_ext%,%Drive1%\%repla%\%replb%\%p_lib%
/INPUT,JINT,%f_ext%,%Drive1%\%repla%\%replb%\%p_lib%
/FILNAME,ANSYS,1
/COM,** Conditions de simulation
/COM,** Température
Aref= 22.0           ! Température de référence
Atemp = 22.0        ! Température appliquée (C)
/COM,** Géométrie de l'éprouvette
Thick = 0.0127      ! Épaisseur de l'éprouvette (m)
LargHaut= 0.050     ! Largeur du haut de l'éprouvette (m)
LargCen = 0.0388    ! Largeur du centre de l'éprouvette (m)
Hauteur = 0.100     ! Hauteur totale de l'éprouvette (m)
Rayon=0.012        ! Rayon de l'épaulement (m)
Tete=0.005         ! Epaisseur de la tete de l'éprouvette (m)
Boite=0.002        ! Grandeur de la boite autour de la fissure (m)
Maille=0.001       ! Grosseur du maillage par default (m)

```

Fichier GEO_BASE.IN

```

*CREATE,GEO_BASE,,%Drive1%\%repla%\%replb%
/COM,*****
/COM,** Début de la macro GEO_BASE      **
/COM,** Cette macro sert a construire  **

```



```

/COM,** la geometrie d'un echantillon **
/COM,** pour le calcul des courbes J-R **
/COM,** Créé par: Luc Giasson          **
/COM,** Date: 25 Mai 2001              **
/COM,*****

Coupe=(LargHaut-LargCen)/2
Theta = ACOS((Rayon-Coupe)/Rayon)
/COM,***** Calcul des variables *****
P1X = -LargCen/2
P1Y = 0.0
P2X = P1X+AFissure-Boite
P2Y = 0.0
P3X = P1X+AFissure
P3Y = 0.0
P4X = P1X+AFissure+Boite
P4Y = 0.0
P5X = LargCen/2
P5Y = 0.0
P6X = P1X
P6Y = Boite
P7X = P2X
P7Y = Boite
P8X = P4X
P8Y = Boite
P9X = P5X
P9Y = Boite
P16X = -LargHaut/2
P16Y = Hauteur/2
P17X = P2X
P17Y = P16Y
P18X = P4X
P18Y = P16Y
P19X = LargHaut/2
P19Y = P16Y
P10X = P1X
P10Y = (P16Y-Tete)-(SIN(Theta)*Rayon)
P11X = P2X
P11Y = P10Y
P12X = P4X
P12Y = P10Y
P13X = P5X
P13Y = P10Y

```

```

P14X = P16X
P14Y = P16Y-Tete
P15X = P19X
P15Y = P14Y
P20X = P10X-Rayon
P20Y = P10Y
P21X = P13X+Rayon
P21Y = P10Y
/COM,** Coordonnes X des pointes de la fissure
Tip = P3X
/COM,** Démarrage du préprocesseur de création de modèle
/PREP7
/COM,** Nettoyage de toutes les entites existantes
ASEL,ALL      ! Restores the full set of areas
ACLEAR,ALL    ! Deletes nodes and area elements associated with selected areas
ADELE,ALL     ! Deletes unmeshed areas
LSEL,ALL      ! Restores the full set of lines
LDELE,ALL     ! Deletes unmeshed lines
KSEL,ALL      ! Restores the full set of keypoints
KDELE,ALL     ! Deletes unmeshed keypoints
/COM,** Element 1
/COM,** PLANE2 - 2-D 6-Node Structural Solid
/COM,** Plane stress with thickness real constant
ET,1,PLANE2,,3
/COM,** Element 2
/COM,** PLANE82 - 8-Node Structural Solid
/COM,** Plane stress with tickness real constant
ET,2,PLANE82,,3
/COM,** Element 3
/COM,** PLANE82 - 8-Node Structural Solid
/COM,** Plane stress without tickness
ET,3,PLANE82,,0
/COM,** Definition de la constante reelle 1 (Epaisseur)
R,1,Thick      ! Real 1 = Thickness
/COM,** Définition des points
CSYS,0
K,1,P1X,P1Y    ! Point 1
K,2,P2X,P2Y    ! Point 2
K,3,P3X,P3Y    ! Point 3
K,4,P4X,P4Y    ! Point 4
K,5,P5X,P5Y    ! Point 5
K,6,P6X,P6Y    ! Point 6

```

```
K,7,P7X,P7Y      ! Point 7
K,8,P8X,P8Y      ! Point 8
K,9,P9X,P9Y      ! Point 9
K,10,P10X,P10Y   ! Point 10
K,11,P11X,P11Y   ! Point 11
K,12,P12X,P12Y   ! Point 12
K,13,P13X,P13Y   ! Point 13
K,14,P14X,P14Y   ! Point 14
K,15,P15X,P15Y   ! Point 15
K,16,P16X,P16Y   ! Point 16
K,17,P17X,P17Y   ! Point 17
K,18,P18X,P18Y   ! Point 18
K,19,P19X,P19Y   ! Point 19
K,20,P20X,P20Y   ! Point 20
K,21,P21X,P21Y   ! Point 21

/COM,** Création des éléments dégénérés à la pointe de la fissure
KSCON,3,0.0004,1,8,0.75

/COM,** Définition des lignes
L,1,2            ! Ligne 1
L,2,3            ! Ligne 2
L,3,4            ! Ligne 3
L,4,5            ! Ligne 4
L,1,6            ! Ligne 5
L,2,7            ! Ligne 6
L,4,8            ! Ligne 7
L,5,9            ! Ligne 8
L,6,7            ! Ligne 9
L,7,8            ! Ligne 10
L,8,9            ! Ligne 11
L,6,10           ! Ligne 12
L,7,11           ! Ligne 13
L,8,12           ! Ligne 14
L,9,13           ! Ligne 15
L,10,11          ! Ligne 16
L,11,12          ! Ligne 17
L,12,13          ! Ligne 18
L,14,16          ! Ligne 19
L,11,17          ! Ligne 20
L,12,18          ! Ligne 21
L,15,19          ! Ligne 22
L,16,17          ! Ligne 23
L,17,18          ! Ligne 24
```

```
L,18,19          ! Ligne 25
LARC,13,15,21,Rayon ! Ligne 26
LARC,10,14,20,Rayon ! Ligne 27
/COM,** Définition des aires
A,1,2,7,6        ! Aire 1
A,2,3,4,8,7      ! Aire 2
A,4,5,9,8        ! Aire 3
A,6,7,11,10      ! Aire 4
A,7,8,12,11      ! Aire 5
A,8,9,13,12      ! Aire 6
A,10,11,17,16,14 ! Aire 7
A,11,12,18,17    ! Aire 8
A,12,13,15,19,18 ! Aire 9
/COM,** Effacement des paramètres
Theta=
P1X=
P2X=
P3X=
P4X=
P5X=
P6X=
P7X=
P8X=
P9X=
P10X=
P11X=
P12X=
P13X=
P14X=
P15X=
P16X=
P17X=
P18X=
P19X=
P20X=
P21X=
P1Y=
P2Y=
P3Y=
P4Y=
P5Y=
P6Y=
```

```

P7Y=
P8Y=
P9Y=
P10Y=
P11Y=
P12Y=
P13Y=
P14Y=
P15Y=
P16Y=
P17Y=
P18Y=
P19Y=
P20Y=
P21Y=
/COM,** Fin de la macro GEO_BASE
*END

```

Fichier GEO_MESH.IN

```

*CREATE,GEO_MESH,,%Drive1%\%repla%\%replb%
/COM,*****
/COM,** Début de la macro GEO_MESH **
/COM,** Créé par: Luc Giasson      **
/COM,** Date: 25 Mai 2001        **
/COM,*****
/COM,** Attribution des matériaux
ASEL,S,AREA,,1,9      ! Sélection des aires 1 a 9
MAT,1                 ! Matériau 1
REAL,1                ! Real 1
TYPE,2               ! Type 2
AATT,1,1,2           ! Matériau 1, Real 1, Type 2
/COM,** Grosseur des éléments
ASEL,S,AREA,,1,9      ! Sélection des aires 1 a 9
MOPT,EXPND,1.0        ! INTERIOR/BOUNDARY SIZE RATIO
MOPT,TRANS,1.0        ! TRANSITION OF ELEMENT SIZE
ESIZE,Maille
MSHAPE,0,2D           ! Mesh with quadrilateral-shaped elements
MSHKEY,1              ! Use mapped meshing

```

```

MSHMID,0          ! element edges are (0=smooth 1=straight)
/COM,** Maillage des aires rectangulaires
AMESH,5
AMESH,4
AMESH,6
AMESH,8
/COM,** Maillage de la zone 7
MOPT,EXPND,1.2    ! INTERIOR/BOUNDARY SIZE RATIO
MOPT,TRANS,2.0    ! TRANSITION OF ELEMENT SIZE
MSHAPE,0,2D       ! Mesh with quadrilateral-shaped elements
MSHKEY,0          ! Use free meshing
MSHMID,0          ! Element edges are (0=smooth, 1=straight)
AMESH,7
/COM,** Maillage de la zone 9
MOPT,EXPND,1.2    ! INTERIOR/BOUNDARY SIZE RATIO
MOPT,TRANS,2.0    ! TRANSITION OF ELEMENT SIZE
MSHAPE,0,2D       ! Mesh with quadrilateral-shaped elements
MSHKEY,0          ! Use free meshing
MSHMID,0          ! Element edges are (0=smooth, 1=straight)
AMESH,9
/COM,** Maillage des aires restantes
MOPT,EXPND,1.0    ! INTERIOR/BOUNDARY SIZE RATIO
MOPT,TRANS,1.0    ! TRANSITION OF ELEMENT SIZE
MSHAPE,0,2D       ! Mesh with quadrilateral-shaped elements
MSHKEY,1          ! Use mapped meshing
MSHMID,0          ! Element edges are (0=smooth, 1=straight)
AMESH,1
AMESH,3
/COM,** Grosseur des éléments à la pointe de la fissure
MOPT,EXPND,0.0020 ! INTERIOR/BOUNDARY SIZE RATIO
MOPT,TRANS,4.0    ! TRANSITION OF ELEMENT SIZE
MSHAPE,1,2D       ! Mesh with triangle-shaped elements
MSHKEY,0          ! Use free meshing
MSHMID,0          ! Element edges are (0=smooth, 1=straight)
ESIZE,Maille/4    ! SELECT INITIAL ELEMENT SIZE
AMESH,2
EPLLOT
/COM,** Fin de la macro GEO_MESH
*END

```

Fichier SOLVENL.IN

```

*CREATE,SOLVENL, ,%Drive1%\%repla%\%replb%
/COM,*****
/COM,** Début de la macro SOLVENL **
/COM,** Créé par: Luc Giasson      **
/COM,** Date: 25 Mai 2001        **
/COM,*****
/COM,** Démarrage du processeur de solution
/SOLU
ANTYPE,0,NEW          ! New Static Analysis
/TITLE,Analyse non-linéaire: Courbe J-R
TREF,Aref            ! Assigne la température de référence
TUNIF,ATEMP          ! Assigne la température de tout les noeuds
/COM,** Définition des degres de liberte
LSEL,S,LINE,,23,25    ! Sélection des lignes 23 à 25
NSLL,S,1              ! Selection de tout les noeuds appartenant aux lignes
D,ALL,UX,0            ! Annuler les mouvements en direction X
ASEL,S,AREA,,2,3      ! Sélection des aires 2 et 3
LSEL,S,LINE,,3,4      ! Sélection des lignes 3 et 4
DL,ALL,,SYMM          ! Contrainte de symétrie
/COM,** Déplacement du tablier
LSEL,S,LINE,,23,25    ! Sélection des lignes 23 à 25
NSLL,S,1              ! Selection de tout les noeuds appartant aux lignes
D,ALL,UY,DISPLACE/2  ! Deplacement du tablier en direction Y
/COM,** Commandes d'analyse non-lineaire
Ctol=0.0001
AUTOTS,ON             ! Use automatic load/time stepping
NEQIT,200             ! Max number of iterations
CNVTOL,F,,Ctol        ! Set Convergence Tolerance on forces
NSUBST,10,20,5,ON     ! Specify number of subsets
LSWRITE,1             ! Writes loadstep data to a file
NROPT,FULL,,ON        ! Specifies full Newton Raphson
/PNUM,ELEM,1
/NUMBER,1             ! Color the numbered items. Do not show the numbers.
/GLINE,ALL,0          ! Solid element outlines (default)
/COM,** Calcul de la solution
ASEL,ALL
LSEL,ALL
ESEL,ALL
NSEL,ALL

```

```

SOLVE                ! Demarrage du calcul
/COM,** Fermeture du processeur de solution
FINISH
/COM,** Fin de la macro SOLVENL **
*END

```

Fichier GET_INFO.IN

```

*CREATE,GET_INFO,,%Drive1%\%repla%\%replb%
/COM,*****
/COM,** Début de la macro GET_INFO **
/COM,** Créé par: Luc Giasson      **
/COM,** Date: 25 Mai 2001         **
/COM,*****
/COM,** Démarrage du post processeur
/POST1
/COM,** Sélection du coin inferieur gauche
NGET=NODE(-LargCen/2.0,0.0,0)
*GET,CTOD,NODE,NGET,U,Y
nget=
/COM,** Sélection du coin supérieur gauche
nget=NODE(-LargHaut/2,Hauteur/2,0)
*GET,A_S1,NODE,NGET,S,1
*GET,A_SXY,NODE,NGET,S,XY
*GET,A_UY,NODE,NGET,U,Y
*GET,A_UX,NODE,NGET,U,X
nget=
/COM,** Sélection du coin supérieur droit
nget=NODE(LargHaut/2,Hauteur/2,0)
*GET,B_S1,NODE,NGET,S,1
*GET,B_SXY,NODE,NGET,S,XY
*GET,B_UY,NODE,NGET,U,Y
*GET,B_UX,NODE,NGET,U,X
nget=
/COM,** Sélection d'un point au centre de l'echantillon
nget=NODE(0,Hauteur/4,0)
*GET,C_S1,NODE,NGET,S,1
*GET,C_SXY,NODE,NGET,S,XY
*GET,C_UY,NODE,NGET,U,Y

```



```
*GET,C_UX,NODE,NGET,U,X
lsel,all
nset,all
lset,s,line,,23,25
nset,s,1
FSUM
*Get.Charge,FSUM,FY
nget=
ASEL,ALL
NSEL,ALL
ESEL,ALL
LSEL,ALL
/COM,** Fermeture du postprocesseur
*END
```

ANNEXE F – FICHIERS DE COMMANDE APDL POUR ÉPROUVETTE DE
VALIDATION

Fichier START.IN

```
! Fichier START.IN
/COM, *****
/COM, ** Exécution du fichier START.IN          **
/COM, ** Ce fichier est utilisé pour exécuter des **
/COM, ** analyses durant la nuit.              **
/COM, ** Créé par: Luc Giasson                  **
/COM, ** Date: 25 Mai 2001                      **
/COM, *****

!/COM, ** Lancement du fichier de commande Converge
!/INPUT, Converge, in, %Drive1%\%repla%\%replb%\ValidR\Input\Batch

/COM, ** Lancement du fichier de commande validation
!/INPUT, V1, in, %Drive1%\%repla%\%replb%\ValidR\Input\Batch
!/INPUT, V2, in, %Drive1%\%repla%\%replb%\ValidR\Input\Batch
!/INPUT, V3, in, %Drive1%\%repla%\%replb%\ValidR\Input\Batch
!/INPUT, V4, in, %Drive1%\%repla%\%replb%\ValidR\Input\Batch
!/INPUT, V5, in, %Drive1%\%repla%\%replb%\ValidR\Input\Batch
!/INPUT, V6, in, %Drive1%\%repla%\%replb%\ValidR\Input\Batch
!/INPUT, V13, in, %Drive1%\%repla%\%replb%\ValidR\Input\Batch
!/INPUT, V14, in, %Drive1%\%repla%\%replb%\ValidR\Input\Batch
!/INPUT, V9, in, %Drive1%\%repla%\%replb%\ValidR\Input\Batch
!/INPUT, V10, in, %Drive1%\%repla%\%replb%\ValidR\Input\Batch
!/INPUT, V11, in, %Drive1%\%repla%\%replb%\ValidR\Input\Batch
!/INPUT, V12, in, %Drive1%\%repla%\%replb%\ValidR\Input\Batch
/INPUT, V1pp, in, %Drive1%\%repla%\%replb%\ValidR\Input\Batch
!/INPUT, V2pp, in, %Drive1%\%repla%\%replb%\ValidR\Input\Batch
!/INPUT, V3pp, in, %Drive1%\%repla%\%replb%\ValidR\Input\Batch
!/INPUT, V4pp, in, %Drive1%\%repla%\%replb%\ValidR\Input\Batch
!/INPUT, V5pp, in, %Drive1%\%repla%\%replb%\ValidR\Input\Batch
!/INPUT, V6pp, in, %Drive1%\%repla%\%replb%\ValidR\Input\Batch
!/INPUT, V13pp, in, %Drive1%\%repla%\%replb%\ValidR\Input\Batch
```

```
!/INPUT,V14pp,in,%Drive1%\%repla%\%replb%\ValidR\Input\Batch
!/INPUT,V9pp,in,%Drive1%\%repla%\%replb%\ValidR\Input\Batch
!/INPUT,V10pp,in,%Drive1%\%repla%\%replb%\ValidR\Input\Batch
!/INPUT,V11pp,in,%Drive1%\%repla%\%replb%\ValidR\Input\Batch
!/INPUT,V12pp,in,%Drive1%\%repla%\%replb%\ValidR\Input\Batch
```

```
/COM,*****
/COM,** Fin de la simulation **
/COM,*****
```

Fichier PARAM.IN

```
! Fichier PARAM.IN
/COM,*****
/COM,** Ce fichier contient tout les paramètres communs          **
/COM,** à toutes les simulations.                                  **
/COM,** Les paramètres qui diffèrent sont spécifiés par le fichier **
/COM,** "batch" qui lance les commandes.                         **
/COM,** Créé par: Luc Giasson                                     **
/COM,** Date: 25 Mai 2001                                        **
/COM,*****
FINISH
/CLEAR                ! Effacement de toute la base de donnée

/COM,** Redirection de l'écriture vers la fenêtre de sortie
/OUTPUT,TERM

/COM,** Définition des chemins (les variables n'enregistrent que 8 caractères)
p_proj='ValidR'      ! Répertoire de projet

/COM,** Effacement des fichiers avant de commencer
/DELETE,ANSYS,err,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,ANSYS,db,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,ANSYS,emat,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,ANSYS,dbb,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,ANSYS,esav,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,ANSYS,full,%Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE,ANSYS,ldhi,%Drive1%\%repla%\%replb%
```

```
/DELETE, ANSYS, mntr, %Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE, ANSYS, osav, %Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE, ANSYS, page, %Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE, ANSYS, r001, %Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE, ANSYS, rdb, %Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE, ANSYS, rst, %Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE, ANSYS, s01, %Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE, Geo_base, , %Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE, Geo_mesh, , %Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE, Get_info, , %Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE, Jin1, , %Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE, Jint, , %Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE, Matprop, , %Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE, Matprop1, , %Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE, Matprop2, , %Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE, Matprop3, , %Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE, Matprop4, , %Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE, Matprop5, , %Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE, Matprop6, , %Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE, Matprop7, , %Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE, Matprop8, , %Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE, Matprop9, , %Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE, Mat1pp, , %Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE, Mat2pp, , %Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE, Mat3pp, , %Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE, Mat4pp, , %Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE, Mat5pp, , %Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE, Mat6pp, , %Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE, Mat7pp, , %Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE, Mat8pp, , %Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE, Mat9pp, , %Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE, Mattest, , %Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE, Mat1-2, , %Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE, Mat1-3, , %Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE, Mat2-2, , %Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE, Mat2-3, , %Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE, Mat8-2, , %Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE, Mat8-3, , %Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE, Solve, , %Drive1%\%repla%\%replb%
/DELETE, SolveNL, , %Drive1%\%repla%\%replb%

/COM,** Compilation des macros
```

```

/INPUT,GEO_BASE,%f_ext%,%Drive1%\%repla%\%replb%\%p_proj%\%p_input%\%p_macro%
/INPUT,GEO_MESH,%f_ext%,%Drive1%\%repla%\%replb%\%p_proj%\%p_input%\%p_macro%
/INPUT,SOLVENL,%f_ext%,%Drive1%\%repla%\%replb%\%p_proj%\%p_input%\%p_macro%
/INPUT,SOLVE,%f_ext%,%Drive1%\%repla%\%replb%\%p_proj%\%p_input%\%p_macro%
/INPUT,GET_INFO,%f_ext%,%Drive1%\%repla%\%replb%\%p_proj%\%p_input%\%p_macro%
/INPUT,MATPROP,%f_ext%,%Drive1%\%repla%\%replb%\%p_lib%
/INPUT,MATPROP1,%f_ext%,%Drive1%\%repla%\%replb%\%p_lib%
/INPUT,MATPROP2,%f_ext%,%Drive1%\%repla%\%replb%\%p_lib%
/INPUT,MATPROP4,%f_ext%,%Drive1%\%repla%\%replb%\%p_lib%
/INPUT,MATPROP7,%f_ext%,%Drive1%\%repla%\%replb%\%p_lib%
/INPUT,MATPROP8,%f_ext%,%Drive1%\%repla%\%replb%\%p_lib%
/INPUT,MATPROP9,%f_ext%,%Drive1%\%repla%\%replb%\%p_lib%
/INPUT,MAT1pp,%f_ext%,%Drive1%\%repla%\%replb%\%p_lib%
/INPUT,MAT2pp,%f_ext%,%Drive1%\%repla%\%replb%\%p_lib%
/INPUT,MAT3pp,%f_ext%,%Drive1%\%repla%\%replb%\%p_lib%
/INPUT,MAT4pp,%f_ext%,%Drive1%\%repla%\%replb%\%p_lib%
/INPUT,MAT5pp,%f_ext%,%Drive1%\%repla%\%replb%\%p_lib%
/INPUT,MAT6pp,%f_ext%,%Drive1%\%repla%\%replb%\%p_lib%
/INPUT,MAT7pp,%f_ext%,%Drive1%\%repla%\%replb%\%p_lib%
/INPUT,MAT8pp,%f_ext%,%Drive1%\%repla%\%replb%\%p_lib%
/INPUT,MAT9pp,%f_ext%,%Drive1%\%repla%\%replb%\%p_lib%
/INPUT,JIN1,%f_ext%,%Drive1%\%repla%\%replb%\%p_lib%
/INPUT,JINT_L,%f_ext%,%Drive1%\%repla%\%replb%\%p_lib%
/INPUT,JINT_R,%f_ext%,%Drive1%\%repla%\%replb%\%p_lib%
/FILNAME,ANSYS,1
/COM,** Conditions de simulation
/COM,** Températures
Aref=22.0          ! Température de référence
Atemp=22.0        ! Température appliquée (C)
/COM,** Géométrie de l'éprouvette
Thick=0.0127     ! Épaisseur de l'éprouvette (m)
Largeur = 0.100  ! Largeur de l'échantillon (m)
HGauche = 0.100  ! Hauteur du cote gauche de l'échantillon (m)
HDroite  = 0.060  ! Hauteur du cote droit de l'échantillon (m)
Rayon=0.012     ! Rayon dans les coins de droite (m)
Tete=0.002     ! Épaisseur de la tête (m)
Coupe=0.0085   ! Profondeur de la coupe (m)
/COM,** Position et grandeur de la fissure
Centre = 0.050  ! Position du centre de la fissure (m)
AGauche = 0.0025 ! Longueur de la fissure de gauche (m)
ADroite = 0.0025 ! Longueur de la fissure de droite (m)
Boite = 0.002  ! Distance entre les points de la boite fesant le tour

```

```
Maille = 0.0010          ! Grosseur du maillage (m)
Displace=0.010          ! Déplacement du tablier par défaut (m)
/COM,** Fin du fichier PARAM.in **
```

Fichier GEO_BASE.IN

```
*CREATE,GEO_BASE, ,%Drive1%\%repla%\%rep1b%
/COM,*****
/COM,** Début de la macro GEO_BASE **
/COM,**                               **
/COM,** Créé par: Luc Giasson         **
/COM,** Date: 25 Mai 2001             **
/COM,*****

CrGauche = (Centre-AGauche)    ! Position de la fissure de gauche (m)
CrDroite = (Centre+ADroite)    ! Position de la fissure de droite (m)
Theta = ACOS((Rayon-Coupe)/Rayon)
/COM,***** Calcul des variables *****

P1X = 0.0
P1Y = 0.0
P2X = (Centre-AGauche)-Boite
P2Y = 0.0
P3X = Centre-AGauche
P3Y = 0.0
P4X = (Centre-AGauche)+Boite
P4Y = 0.0
P5X = (Centre+ADroite)-Boite
P5Y = 0.0
P6X = Centre+ADroite
P6Y = 0.0
P7X = (Centre+ADroite)+Boite
P7Y = 0.0
P8X = Largeur-Coupe
P8Y = 0.0
P9X = P1X
P9Y = Boite
P10X = P2X
P10Y = P9Y
P11X = P4X
P11Y = P9Y
```

```

P12X = P5X
P12Y = P9Y
P13X = P7X
P13Y = P9Y
P14X = P8X
P14Y = P9Y
P15X = P1X
P15Y = HDroite/4
P16X = P2X
P16Y = P15Y
P17X = P4X
P17Y = P15Y
P18X = P5X
P18Y = P15Y
P19X = P7X
P19Y = P15Y
P20X = P8X
P20Y = P15Y
P21X = P1X
P21Y = HGauche/2
P26X = Largeur
P26Y = HDroite/2
P22X = P2X
P22Y = P21Y-(P22X*(P21Y-P26Y)/Largeur)
P23X = P4X
P23Y = P21Y-(P23X*(P21Y-P26Y)/Largeur)
P24X = P5X
P24Y = P21Y-(P24X*(P21Y-P26Y)/Largeur)
P25X = P7X
P25Y = P21Y-(P25X*(P21Y-P26Y)/Largeur)
P100X = P20X
P100Y = (P26Y-Tete)-(SIN(Theta)*Rayon)
P101X = P100X+Rayon
P101Y = P100Y
P102X = P26X
P102Y = (P26Y-Tete)
/COM,***** Coordonnes X des pointes de la fissure *****
LTip = P3X
RTip = P6X
/COM,** Démarrage du préprocesseur de création de modèle
/PREP7
/COM,***** Nettoyage de toutes les entites *****

```

```

ASEL,ALL      ! Restores the full set of areas
ACLEAR,ALL    ! Deletes nodes and area elements associated with selected areas
ADELE,ALL     ! Deletes unmeshed areas
LSEL,ALL      ! Restores the full set of lines
LDELE,ALL     ! Deletes unmeshed lines
KSEL,ALL      ! Restores the full set of keypoints
KDELE,ALL     ! Deletes unmeshed keypoints
/COM,** Element 1
/COM,** PLANE2 - 2-D 6-Node Structural Solid
/COM,** Plane stress with thickness real constant
ET,1,PLANE2,,,3
/COM,** Element 2
/COM,** PLANE82 - 8-Node Structural Solid
/COM,** Plane stress with thickness real constant
ET,2,PLANE82,,,3
/COM,** Element 3
/COM,** PLANE82 - 8-Node Structural Solid
/COM,** Plane stress without thickness
ET,3,PLANE82,,,0
/COM,** Définition de la constante réelle 1 (Épaisseur)
R,1,Thick      ! Real 1 = Thickness

/COM,***** Definition des points *****
CSYS,0
K,1,P1X,P1Y      ! Point 1
K,2,P2X,P2Y      ! Point 2
K,3,P3X,P3Y      ! Point 3
K,4,P4X,P4Y      ! Point 4
K,5,P5X,P5Y      ! Point 5
K,6,P6X,P6Y      ! Point 6
K,7,P7X,P7Y      ! Point 7
K,8,P8X,P8Y      ! Point 8
K,9,P9X,P9Y      ! Point 9
K,10,P10X,P10Y   ! Point 10
K,11,P11X,P11Y   ! Point 11
K,12,P12X,P12Y   ! Point 12
K,13,P13X,P13Y   ! Point 13
K,14,P14X,P14Y   ! Point 14
K,15,P15X,P15Y   ! Point 15
K,16,P16X,P16Y   ! Point 16
K,17,P17X,P17Y   ! Point 17
K,18,P18X,P18Y   ! Point 18

```



```
K,19,P19X,P19Y      ! Point 19
K,20,P20X,P20Y      ! Point 20
K,21,P21X,P21Y      ! Point 21
K,22,P22X,P22Y      ! Point 22
K,23,P23X,P23Y      ! Point 23
K,24,P24X,P24Y      ! Point 24
K,25,P25X,P25Y      ! Point 25
K,26,P26X,P26Y      ! Point 26
K,100,P100X,P100Y   ! Point 100
K,101,P101X,P101Y   ! Point 101
K,102,P102X,P102Y   ! Point 102
KSCON,3,Maille/8,1,8,0.75
KSCON,6,Maille/8,1,8,0.75
/COM,***** Definition des lignes *****
L,1,2                ! Ligne 1
L,2,3                ! Ligne 2
L,3,4                ! Ligne 3
L,4,5                ! Ligne 4
L,5,6                ! Ligne 5
L,6,7                ! Ligne 6
L,7,8                ! Ligne 7
L,1,9                ! Ligne 8
L,2,10               ! Ligne 9
L,4,11               ! Ligne 10
L,5,12               ! Ligne 11
L,7,13               ! Ligne 12
L,8,14               ! Ligne 13
L,9,10               ! Ligne 14
L,10,11              ! Ligne 15
L,11,12              ! Ligne 16
L,12,13              ! Ligne 17
L,13,14              ! Ligne 18
L,9,15               ! Ligne 19
L,10,16              ! Ligne 20
L,11,17              ! Ligne 21
L,12,18              ! Ligne 22
L,13,19              ! Ligne 23
L,14,20              ! Ligne 24
L,15,16              ! Ligne 25
L,16,17              ! Ligne 26
L,17,18              ! Ligne 27
L,18,19              ! Ligne 28
```

```
L,19,20          ! Ligne 29
L,15,21          ! Ligne 30
L,16,22          ! Ligne 31
L,17,23          ! Ligne 32
L,18,24          ! Ligne 33
L,19,25          ! Ligne 34
L,20,100         ! Ligne 35
L,21,22          ! Ligne 36
L,22,23          ! Ligne 37
L,23,24          ! Ligne 38
L,24,25          ! Ligne 39
L,25,26          ! Ligne 40
L,102,26         ! Ligne 41
LARC,102,100,101,Rayon ! Ligne 42
/COM,
/COM,***** Definition des aires *****
A,1,2,10,9       ! Aire 1
A,2,3,4,11,10    ! Aire 2
A,4,5,12,11      ! Aire 3
A,5,6,7,13,12    ! Aire 4
A,7,8,14,13      ! Aire 5
A,9,10,16,15     ! Aire 6
A,10,11,17,16    ! Aire 7
A,11,12,18,17    ! Aire 8
A,12,13,19,18    ! Aire 9
A,13,14,20,19    ! Aire 10
A,15,16,22,21    ! Aire 11
A,16,17,23,22    ! Aire 12
A,17,18,24,23    ! Aire 13
A,18,19,25,24    ! Aire 14
A,19,20,100,102,26,25 ! Aire 15
/COM,** Effacement des paramètres
Theta=
P1X=
P2X=
P3X=
P4X=
P5X=
P6X=
P7X=
P8X=
P9X=
```

P10X=
P11X=
P12X=
P13X=
P14X=
P15X=
P16X=
P17X=
P18X=
P19X=
P20X=
P21X=
P22X=
P23X=
P24X=
P25X=
P26X=
P100X=
P101X=
P102X=
P1Y=
P2Y=
P3Y=
P4Y=
P5Y=
P6Y=
P7Y=
P8Y=
P9Y=
P10Y=
P11Y=
P12Y=
P13Y=
P14Y=
P15Y=
P16Y=
P17Y=
P18Y=
P19Y=
P20Y=
P21Y=
P22Y=

```

P23Y=
P24Y=
P25Y=
P26Y=
P100Y=
P101Y=
P102Y=
/COM,** Fin de la macro GEO_BASE
*END

```

Fichier GEO_MESH.IN

```

*CREATE,GEO_MESH, ,%Drive1%\%repla%\%replb%
/COM,*****
/COM,** Début de la macro GEO_MESH **
/COM,**                               **
/COM,** Créé par: Luc Giasson          **
/COM,** Date: 25 Mai 2001              **
/COM,*****
/COM,** Attribution des matériaux
ASEL,S,AREA, ,1,15    ! Sélection des aires 1 à 15
MAT,1                  ! Matériau 1
REAL,1                 ! Réel 1
TYPE,2                 ! Type 2
AATT,1,1,2            ! Matériau 1, Réel 1, Type 2
/COM,** Grosseur des éléments
ASEL,S,AREA, ,1,20    ! Sélection des aires 1 à 15
MOPT,EXPND,1.0        ! INTERIOR/BOUNDARY SIZE RATIO
MOPT,TRANS,1.0        ! TRANSITION OF ELEMENT SIZE
ESIZE,Maille
MSHAPE,0,2D           ! Mesh with quadrilateral-shaped elements
MSHKEY,1               ! Use mapped meshing
MSHMID,1              ! element edges are straight
/COM,** Maillage des aires 6 à 10
AMESH,8
AMESH,9
AMESH,10
AMESH,7
AMESH,6

```

```

/COM,** Maillage de l'aire 15
MOPT,EXPND,1.1          ! INTERIOR/BOUNDARY SIZE RATIO
MOPT,TRANS,1.5         ! TRANSITION OF ELEMENT SIZE
MSHAPE,0,2D           ! Mesh with quadrilateral-shaped elements
MSHKEY,0               ! Use free meshing
MSHMID,0              ! Elements follow the curvature of the boundary
AMESH,15

/COM,** Maillage des aires 11 à 14
MOPT,EXPND,1.0         ! INTERIOR/BOUNDARY SIZE RATIO
MOPT,TRANS,1.0         ! TRANSITION OF ELEMENT SIZE
MSHAPE,0,2D           ! Mesh with quadrilateral-shaped elements
MSHKEY,1               ! Use mapped meshing
MSHMID,1              ! element edges are straight
AMESH,14
AMESH,13
AMESH,12
AMESH,11

/COM,** Grosseur des éléments à la pointe de la fissure
MOPT,EXPND,0.5         ! INTERIOR/BOUNDARY SIZE RATIO
MOPT,TRANS,2.0         ! TRANSITION OF ELEMENT SIZE
ESIZE,Maille/4        ! SELECT INITIAL ELEMENT SIZE
MSHAPE,1,2D           ! Mesh with triangle-shaped elements
MSHKEY,0               ! Use free meshing
MSHMID,1              ! Element edges are straight

/COM,** Maillage des pointes de la fissure
AMESH,2
AMESH,4

/COM,** Grosseur des éléments
MOPT,EXPND,1.0         ! INTERIOR/BOUNDARY SIZE RATIO
MOPT,TRANS,1.0         ! TRANSITION OF ELEMENT SIZE
ESIZE,Maille          ! SELECT INITIAL ELEMENT SIZE
MSHAPE,0,2D           ! Mesh with quadrilateral-shaped elements
MSHKEY,1               ! Use mapped meshing
MSHMID,1              ! element edges are straight

/COM,** Maillage des aires
AMESH,3
AMESH,1
AMESH,5

/COM,** Fin de la macro GEO_MESH **
*END

```

Fichier SOLVENL.IN

```

*CREATE,SOLVENL,,%Drive1%\%repla%\%replb%
/COM,*****
/COM,** Début de la macro SOLVE **
/COM,** **
/COM,** Créé par: Luc Giasson **
/COM,** Date: 25 Mai 2001 **
/COM,*****
/COM,** Démarrage du processeur de solution
/SOLU
ANTYPE,0,NEW ! New Static Analysis
/TITLE,Analyse non-linéaire: Validation
/COM,** Définition des degres de liberté
LSEL,S,LINE,,36,40 ! Sélection des lignes 36 à 40
ASEL,S,AREA,,11,15 ! Sélection des aires 11 à 15
DL,ALL,,UX,0,1 ! Fix top and bottom of void
LSEL,S,LINE,,1,2 ! Sélection des lignes 1 et 2
LSEL,A,LINE,,6,7 ! Sélection des lignes 6 et 7
ASEL,S,AREA,,1,2 ! Sélection des aires 1 et 2
ASEL,A,AREA,,4,5 ! Sélection des aires 4 et 5
DL,ALL,,SYMM
TREF,Aref ! Assigne la température de référence
TUNIF,Atemp ! Assigne la température de tout les noeuds
!/COM,** Application des forces sur le tablier
!LSEL,S,LINE,,36,40 ! Sélection des lignes 36 à 40
!FK,21,FY,Aforce/6 ! xx Newton appliqué sur le point 21
!FK,22,FY,Aforce/6 ! xx Newton appliqué sur le point 22
!FK,23,FY,Aforce/6 ! xx Newton appliqué sur le point 23
!FK,24,FY,Aforce/6 ! xx Newton appliqué sur le point 24
!FK,25,FY,Aforce/6 ! xx Newton appliqué sur le point 25
!FK,26,FY,Aforce/6 ! xx Newton appliqué sur le point 26
/COM,** Déplacement du tablier
LSEL,S,LINE,,36,40 ! Sélection des lignes 36 à 40
ASEL,S,AREA,,11,15 ! Sélection des aires 11 à 15
DL,ALL,,UY,DISPLACE/2,1 ! Déplacement du tablier
/COM,** Commande d'analyse non-linéaire
Ctol=0.0001
AUTOTS,ON ! Use automatic load/time stepping

```

```

NEQIT,200          ! Max number of iterations
CNVTOL,F,,Ctol    ! Set Convergence Tolerance
NSUBST,10,20,5,ON ! Specify number of subsets
LSWRITE,1         ! Writes loadstep data to a file
NROPT,FULL,,ON   ! Specifies full Newton Raphson
/PNUM,ELEM,1
/NUMBER,1         ! Color the numbered items. Do not show the numbers.
/GLINE,ALL,0      ! Solid element outlines (default)
/COM,***** Calcul de la solution *****
LSEL,All          ! Sélection de toutes les lignes
ASEL,All          ! Sélection de toutes les aires
NSEL,ALL          ! Selection de tout les noeuds
SOLVE             ! Starts a Solution
/COM,***** Fermeture du processeur de solution *****
FINISH
/COM,***** Fin de la macro SOLVE *****
*END

```

Fichier GET_INFO.IN

```

*CREATE,GET_INFO,,%Drive1%\%repla%\%replb%
/COM,*****
/COM,** Début de la macro GET_INFO **
/COM,**                               **
/COM,** Créé par: Luc Giasson          **
/COM,** Date: 25 Mai 2001              **
/COM,*****
/COM,** Démarrage du post processeur **
/POST1
ESEL,S,MAT,,1    ! Selects a subset of elements
NSLE,S           ! Selects those nodes attached to the selected elements
RSYS,0           ! Activates a coordinate system for printout of display of results
CSYS,0           ! Activates a previously defined coordinate system
/COM,***** Sélection du coin supérieur gauche *****
NGET=NODE(0.0,HGauche/2,0) ! Point A
*GET,A_S1,NODE,NGET,S,1 ! Retrieves a value and stores it as a user-named
parameter.
*GET,A_SXY,NODE,NGET,S,XY
/COM,***** Sélection du coin supérieur droit *****

```

```

NGET=NODE(Largeur,HDroite/2,0) ! Point B
*GET,B_S1,NODE,NGET,S,1
*GET,B_SXY,NODE,NGET,S,XY
/COM,***** Sélection du centre de la fissure *****
NGET=NODE(Centre,0.0,0) ! Point C
*GET,C_UX,NODE,NGET,U,X
*GET,C_UY,NODE,NGET,U,Y
/COM,***** Sélection de l'aire 15 *****
ASEL,S,AREA,,15
ESLA,S
NSLE,S
NSORT,S,1,1,0 ! Tri les données
*GET,MAX_S1,SORT,0,MAX ! Obtient la valeur maximale
NSORT,S,XY,1,0 ! Tri les données
*GET,MAX_SXY,SORT,0,MAX ! Obtient la valeur maximale
! Calcul de la charge appliquée sur l'éprouvette
esel,all
nset,all
asel,all
lset,all
lset,s,line,,36,40
nset,s,1
FSUM
*get,Charge,FSUM,FY
esel,all ! Sélection de tout les éléments
nset,all ! Sélection de tout les noeuds
asel,all ! Sélection de toutes les aires
lset,all ! Sélection de toutes les lignes
/EDGE,ALL,1
/COLOR,OUTL,BLAC
/COM,** Fermeture du posprocesseur **
FINISH ! Sortie du post-processeur
*END

```