

École doctorale n° 432 : **Sciences des Métiers de l'Ingénieur**

Doctorat ParisTech

T H È S E

pour obtenir le grade de docteur délivré par

l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers

Spécialité “ Mécanique et Matériaux ”

présentée et soutenue publiquement par

Anh Tuan TRAN

Le 24 Juin 2011

"ETUDE DU DELAMINAGE EN MODE II DE COMPOSITES UNIDIRECTIONNELS

SOU MIS A DES SOLLICITATIONS RAPIDES:

APPROCHE GLOBALE ET APPROCHE LOCALE"

Directeur de thèse : **Didier BAPTISTE**

Co-directeur de thèse : **Joseph FITOUSSI**

Jury:

M. François HILD, Directeur de recherche au CNRS, LMT, ENS Cachan

M. Malk BENZEGGAGH, Professeur, UTC, Compiègne

M. Fodil MERAGHNI, Professeur, LPMM, ARTS ET METIERS ParisTech, Metz

M. Zouhaier JENDLI, Maître de Conférences, LSM, ESTACA-Campus Ouest, Laval

M. Joseph FITOUSSI, Maître de Conférences, PIMM, ARTS ET METIERS ParisTech, Paris

M. Didier BAPTISTE, Professeur, ARTS ET METIERS ParisTech, Paris

Rapporteur

Rapporteur

Examineur

Examineur

Codirecteur de thèse

Directeur de thèse

**T
H
È
S
E**

REMERCIEMENTS

Ce travail de thèse s'est déroulé à l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers (ENSAM – Paris) au Laboratoire d'Ingénierie des Matériaux (LIM)) restructuré récemment au sein du Laboratoire Procédés et Ingénierie en Mécanique et Matériaux (PIMM). Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou loin à l'aboutissement de cette thèse.

Je voudrais tout d'abord remercier M. Didier BAPTISTE, mon directeur de thèse, pour son chaleureux accueil, pour ses grandes qualités scientifiques et humaines. Ses soutiens et encouragements m'ont permis d'aller de l'avant même lors des moments les plus difficiles.

Je remercie également à M. Joseph FITOUSSI, codirecteur de ce travail, pour son encadrement et ses conseils scientifiques tout le long de ce travail. Et pour la compréhension de l'obstacle de langue qu'il m'a témoignée surtout pendant la rédaction de ce rapport de thèse.

J'exprime ma vive gratitude aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail. Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à Messieurs Fodil MERGAGHNI et Zouhaier JENDLI pour avoir fait partie de ce jury, ainsi qu'à Messieurs François HILD et Malk BENZEGGAGH qui ont accepté le rôle de rapporteur de thèse.

J'adresse également mes vifs remerciements à Michel BOCQUET (bidoc) et Patrick MUREAU (Pepett), deux hommes d'exception. J'associe à ces remerciements tous mes collègues et amis pour les échanges que nous avons eus au cours de ces dernières années. Je pense en particulier aux Tuyét Nhung, Ngọc Lâm, Ngọc Thanh, Trần Thắng, Mậu Lâm, Kiều Thành leurs conseils et encouragements m'ont été précieux.

Pour terminer, ma reconnaissance la plus sincère s'adresse à mes parents, mes sœurs, mes frères qui m'ont toujours soutenu, aussi bien pendant mes études que durant ce travail. Merci d'avoir eu confiance en moi.

Enfin, c'est à Thúy Hà (Hin Hâm), mon épouse, que sont dédiées ces dernières lignes. Je lui témoigne toute ma gratitude pour m'avoir soutenu lors des moments difficiles. Qu'elle sache que son support, sa patience, sa complicité m'ont été très précieux.

Anh Tuan TRAN

Paris, le 18 Avril 2011

Sommaire

Introduction générale.....19

Chapitre I: Positionnement du problème

I.	Chapitre I: Positionnement du problème	25
I.1.	Matériaux composites:.....	27
I.1.1.	Classification des matériaux composites:	27
I.1.2.	Constituants des matériaux composites:	29
I.1.3.	Considérations sur l'usage des matériaux composites:	31
I.2.	Applications aéronautiques des matériaux composites:.....	35
I.3.	Mécanismes de rupture des composites unidirectionnels:	37
I.3.1.	Trois modes de rupture des matériaux composites unidirectionnels: ...	37
I.3.2.	Le délaminage: les phénomènes physiques associés :.....	39
I.4.	Mécanique de la rupture:	42
I.4.1.	Approche locale:	43
I.4.2.	Approche globale:	44
I.4.3.	Relation entre les deux approches:	45
I.5.	Approches du phénomène de délaminage des matériaux composites:	47
I.6.	Approches du phénomène de délaminage dynamique des matériaux composites:	49
I.7.	L'objectif de la thèse:	59

Chapitre II: Matériaux d'étude, approche et moyens expérimentaux

II.	Chapitre 2: Matériaux d'étude, approche et moyens expérimentaux	61
II.1.	Introduction	63
II.2.	Type des essais	64
II.2.1.	Essais de délaminage.....	64
II.2.2.	Choix du type d'essais	65

II.2.3.	Essai CLS en statique.....	65
II.2.4.	Essai de CLS en dynamique	66
II.3.	Matériaux de l'étude.....	68
II.3.1.	Le composite unidirectionnel carbone/époxy.....	68
II.3.2.	Le matériau composite unidirectionnel verre/époxy	70
II.4.	Machine d'essais de traction en grande vitesse.....	72
II.5.	Système de mesure et d'acquisition des données	74
II.5.1.	Introduction	74
II.5.2.	Mesure de déplacements	74
II.5.3.	Mesure de l'effort	75
II.5.4.	Caméra rapide	75
II.5.5.	Technique de mesure de champs locaux de déplacements.....	78
II.5.6.	Outil de synchronisation des signaux :	83
II.6.	Campagne d'essais sur le matériau composite unidirectionnel carbone/époxy	85
II.6.1.	Eprouvette de type CLS.....	85
II.6.2.	Délaminage en mode II dominant.....	87
II.6.3.	Protocole d'essai	88
II.6.4.	Résultats expérimentaux et discussion	90
II.7.	Campagne des essais sur composite UD verre-Epoxy	96
II.7.1.	Eprouvette de type CLS.....	96
II.7.2.	Obtention d'un mode II dominant	98
II.7.3.	Protocole d'essai	99
II.7.4.	Résultats et discussions	101
II.8.	Conclusion du chapitre.....	110

Chapitre III: Méthodes de détermination de la longueur de fissure

III.	Chapitre III: Méthodes de détermination de la longueur de fissure	113
III.1.	Introduction.....	115
III.2.	Outil coupe-fils	116
III.2.1.	Principe de la méthode:	116

III.2.2.	Temps de réponse de la meure par Coupe-fils	118
III.3.	Méthode de contraste.....	120
III.3.1.	Généralité	120
III.3.2.	Application de la méthode de contraste aux essais du matériau composites carbone/époxy:.....	121
III.4.	Une nouvelle méthode d'identification de la longueur réelle de fissure ..	125
III.4.1.	Avantage en grande vitesse de la caméra rapide et de la technique de mesure de champs.....	125
III.4.2.	Méthode d'identification de la longueur réelle de la fissure.....	125
III.4.3.	Vérification de la méthode d'indentification proposée	135
III.4.4.	Incertitude de la méthode d'indentification.....	140
III.4.5.	Application de la méthode d'identification de la longueur de la fissure aux essais sur matériau verre/époxy	142
III.5.	Conclusion du chapitre	147

Chapitre IV: Détermination d'une loi de propagation stable

IV.	Chapitre IV: Détermination d'une loi de propagation stable	149
IV.1.	Introduction.....	151
IV.2.	Sollicitation dynamique des essais CLS	152
IV.3.	Taux de restitution d'énergie: Approche globale	155
IV.3.1.	Mécanique de la rupture pour un matériau isotrope-linéaire.....	155
IV.3.2.	Mécanique de la rupture avec prise en compte de l'anisotropie du matériau composite	160
IV.3.3.	Evaluation du premier terme du taux de restitution d'énergie	162
IV.3.4.	Evaluation du deuxième terme du taux de restitution d'énergie.....	166
IV.3.5.	Taux de restitution d'énergie des essais du matériau composite carbone/époxy	171
IV.3.6.	Taux de restitution d'énergie des essais du matériau composite verre/époxy	176
IV.3.7.	Conclusion partielle concernant l'approche globale	185
IV.4.	Taux de restitution d'énergie: Approche locale	186
IV.4.1.	Principe de base.....	186
IV.4.2.	Mise en œuvre	186

IV.4.3.	Résultats et discussion	191
IV.5.	Loi d'évolution.....	195
IV.5.1.	La loi d'YANG.....	195
IV.5.2.	Application au cas d'étude	200
IV.5.3.	Facteur d'intensité de contraintes identifié par la loi d'YANG	201
IV.5.4.	La forme de la loi d'YANG au cas d'étude	203
IV.5.5.	Loi d'YANG par rapport à deux approches	205
IV.5.6.	Application de la loi d'YANG	206
IV.6.	Conclusion du chapitre	208
Conclusion.....		211
Perspectifs.....		215
Référence.....		217

Liste des figures

Chapitre I:

Figure I.1: Matériau composite dans les structures d'avions [5]	35
Figure I.2: Rupture par flexion de différentes séquences d'empilement: (a) Quasi-isotrope, (b) Unidirectionnel, (c) $\pm 45^\circ$, (d) $0^\circ/90^\circ$ [SMITH 1993]	37
Figure I.3: Ruptures par traction de différentes séquences d'empilement: (a) $0^\circ/90^\circ$ tissu, (b) unidirectionnel, (c) Quasi-isotrope trouée, (d) $0^\circ/90^\circ$ trouée [SMITH 1993] ..	38
Figure I.4: Trois modes de rupture dans un stratifié $0^\circ/90^\circ/0^\circ$ [SMITH 1993]	39
Figure I.5: Evolution de défauts [PAVAN 2004]	40
Figure I.6: Mécanismes d'endommagement accompagnant le délaminage [FRIENDRICH 1989]	41
Figure I.7: 3 modes indépendants de fissuration	42
Figure I.8: Fissure dans un milieu plan	44
Figure I.9: Relation entre G et le cycle de chargement appliqué	45
Figure I.10: Essai de flexion en 3 points [TSAI 2001]	51
Figure I.11: Taux de restitution d'énergie en mode II des essais du composite verre/époxy S2/8553 [TSAI 2001]	51
Figure I.12: Taux de restitution d'énergie en mode II des essais du carbone/époxy AS4/3501-6 [TSAI 2001]	52
Figure I.13: Essai End Load Split (ELS)	52
Figure I.14: Essai End Notched Flexure (ENF)	53
Figure I.15: Essai Mixed-mode Opening Notch Flexure (MONF)	54
Figure I.16: Essai MONF utilisant la barre de Hopkinson améliorée	55
Figure I.17: Essai Double Cantilever Beam (DCB)	58

Chapitre II:

Figure II.1: Essai CLS (Cracked Lap Shear)	65
Figure II.2: Essai CLS à vitesse élevée	66
Figure II.3: Produit pré-impregné carbone/époxy UD M21/T700	69

Figure II.4: Produit final après sortie de cuisson.	70
Figure II.5: Microstructure du matériau de l'étude.....	71
Figure II.6: Schéma synoptique de la machine de traction rapide.	72
Figure II.7: Ensemble de la machine de traction à grande vitesse.....	73
Figure II.8: Mesure de déplacement par fils de laser.....	75
Figure II.9: Caméra de film à grande vitesse.....	76
Figure II.10: Objectif de la caméra rapide.....	77
Figure II.11: Organigramme de la procédure de corrélation mise en place dans CORRELI ^{LMT}	80
Figure II.12: Illustration de la taille de ZOI et de ROI	82
Figure II.13: Schéma d'enregistrement des données	83
Figure II.14: Taille de l'éprouvette	85
Figure II.15: Les éprouvettes découpées	86
Figure II.16: Les talons collés à l'éprouvette.....	87
Figure II.17: Conception de l'essai CLS à vitesse élevée.....	88
Figure II.18: Mesure de la vitesse réelle de sollicitation.....	90
Figure II.19: Comportement typique de l'éprouvette CLS	91
Figure II.20: Force mesurée pendant les essais	92
Figure II.21: Section transversale de l'éprouvette	93
Figure II.22: Microfissures orientées à 45^0 du plan de rupture (mode II) [SMITH 1993]	94
Figure II.23: Faciès de rupture en mode II (I) Hackles, (II) Scallops [SMITH 1993] .	94
Figure II.24: les "Hackles" et les "Scallops" de la surface de rupture des essais réalisés	95
Figure II.25: Eprouvette en composite stratifié UD verre/époxy	97
Figure II.26: Eprouvette avec mouchetis	97
Figure II.27: Le système de guidage de fissuration de mode II dominé	98
Figure II.28: Vidéo de l'essai.....	101
Figure II.29: Image de la surface locale d'éprouvette	102
Figure II.30: Champs de déplacement de l'image de référence.....	103
Figure II.31: Champs de déplacement de l'image déformée.....	104

Figure II.32: Maillage des centres d'imagette ZOI	105
Figure II.33: Déplacement en direction horizontale (mode II) des points de mesure	106
Figure II.34: Déplacement en direction verticale (mode I) des points de mesure ...	107
Figure II.35: surface analysée de l'essai à 0,5m/s.....	108
Figure II.36: maillage de calcul de l'essai à 0,5m/s	108
Figure II.37: Déplacement horizontal (mode II) de l'essai à 0,5 m/s	109
Figure II.38: Déplacement vertical (mode I) de l'essai à 0,5 m/s.....	109

Chapitre III:

Figure III.1: Outil coupe-fils.....	116
Figure III.2: Résistance collée	117
Figure III.3: Signal du coupe-fils	117
Figure III.4: Comparaison de l'amorçage de la fissure détectée par la caméra et par l'outil coupe-fils	118
Figure III.5: L'image de la tête de la fissure en grossissement	120
Figure III.6: Longueur de la fissure identifiée sur plusieurs images consécutives filmées lors d'un essai.....	121
Figure III.7: Mesure de la fissure des essais carbone/époxy	122
Figure III.8: Vitesse instantanée de la fissure en fonction de la vitesse de chargement.	123
Figure III.9: Vitesse moyenne de la fissure en fonction de la vitesse de sollicitation	124
Figure III.10: Image étudiée.....	127
Figure III.11: Champ de déplacement longitudinal déterminé par corrélation d'images.	127
Figure III.12: Maillage formé par les centres des ZOI	128
Figure III.13: Maillage à état initial non déformé.....	128
Figure III.14: Maillage déformé correspondant à l'image étudiée.....	128
Figure III.15: Zone modélisée	129
Figure III.16: Courbe d'évolution de l'écart moyen global du champ de déplacement modélisé par rapport au champ mesuré.....	132
Figure III.17: Formes typiques des courbes ($f_U - a$)	133
Figure III.18: Fonction d'interpolation $f_U = f(a)$	134

Figure III.19: Maillage de la mesure.....	135
Figure III.20: Champ de déplacement horizontal mesuré	135
Figure III.21: Champ de déplacement vertical mesuré	136
Figure III.22: Maillage de la modélisation	136
Figure III.23: Champ de déplacement horizontal modélisé	136
Figure III.24: Champ de déplacement vertical modélisé	137
Figure III.25: Principe de calcul d'incertitude.....	141
Figure III.26: Evolution de la fissure pendant l'essai à 1m/s du matériau composite verre/époxy	144
Figure III.27: Evolution de la fissure pendant l'essai.....	145

Chapitre IV:

Figure IV.1: Quelques notions de base du phénomène de sollicitation dynamique ..	152
Figure IV.2: Forme typique de la courbe chargement-temps	154
Figure IV.3: Cycle de chargement appliqué à une éprouvette.....	156
Figure IV.4: Cas limite de propagation à déplacement constant.....	157
Figure IV.5: Cas limite de propagation à effort constant.....	157
Figure IV.6: Méthode de la complaisance	158
Figure IV.7: Section transversale d'une poutre composite	161
Figure IV.8: Courbe de comportement.....	162
Figure IV.9: Avance de la fissure pendant 2 instants successifs de l'essai	163
Figure IV.10: Décomposition des efforts des parties de l'éprouvette.....	164
Figure IV.11: Chargement pendant Δt	164
Figure IV.12: Approximation de calcul	167
Figure IV.13: Répartition de la vitesse sur le bras chargé à l'instant t.....	167
Figure IV.14: Deux moments successifs de la propagation de la fissure	169
Figure IV.15: Mesure de la vitesse de chargement	171
Figure IV.16: Taux de restitution d'énergie de la campagne d'essais du matériau carbone/époxy en fonction de la vitesse de la fissure.....	172
Figure IV.17: Taux de restitution d'énergie en fonction de la vitesse de chargement (à échelle logarithmique)	173
Figure IV.18: Taux de restitution d'énergie en terme statique	174

Figure IV.19: Taux de restitution d'énergie en terme cinétique.....	175
Figure IV.20: Participation de l'effet cinétique au taux de restitution d'énergie pendant l'essai.....	175
Figure IV.21: Maillage de la mesure du champ de déplacement horizontal	177
Figure IV.22: Champ de déplacement horizontal de l'image numéro 40 de l'essai 1m/s	178
Figure IV.23: Champ de déplacement horizontal de l'image numéro 45 de l'essai 1m/s	178
Figure IV.24: Champ de déplacement horizontal de l'image numéro 50 de l'essai 1m/s	179
Figure IV.25: Evolution de la première section	180
Figure IV.26: Evolution de la deuxième section.....	181
Figure IV.27: Evolution de la troisième section	181
Figure IV.28: Extrapolation de l'essai 1m/s	182
Figure IV.29: Vitesses identifiées de chargement	183
Figure IV.30: Taux de restitution d'énergie de la campagne d'essais du matériau verre/époxy	184
Figure IV.31: Effet cinétique par rapport au taux de restitution d'énergie.....	185
Figure IV.32: Variation de longueur de la fissure pendant un essai effectué à 1m/s	187
Figure IV.33: Evolution des champs de déplacements mesurés par Corrélation d'images pour un essai réalisé à 1m/s.....	188
Figure IV.34: Principe de calcul du taux de restitution d'énergie	189
Figure IV.35: Maillage de la zone d'étude.....	190
Figure IV.36: Taux de restitution d'énergie de l'essai 1m/s et de l'essai 3m/s calculés par l'approche locale.....	192
Figure IV.37: Facteur d'intensité K_{II} de l'essai 1m/s et de l'essai 3m/s calculés par l'approche locale	192
Figure IV.38: Comparaison entre l'approche locale et l'approche globale	193
Figure IV.39: Propagation dynamique de la fissure à l'interface bi-matériaux sous chargement en mixte mode	196
Figure IV.40: Facteur d'intensité K_{II} calculés par l'approche locale	201
Figure IV.41: Facteur d'intensité de contraintes K_{II} du composites verre/époxy.....	202
Figure IV.42: Modèle d'YANG pour composite carbone/époxy	203

Figure IV.43: Modèle d'YANG pour composite verre/époxy.....	204
Figure IV.44: Comparaison entre la loi d'YANG et l'approche globale appliquées au composite carbone/époxy	205
Figure IV.45: Comparaison entre la loi d'YANG et l'approche globale appliquées au composite verre/époxy.....	206

Liste des tableaux

Chapitre I:

Tableau I.1: Relation entre les deux approches.....	45
Tableau I.2: Propriétés caractéristiques des matériaux composites	50

Chapitre II:

Tableau II.1: Propriétés du stratifié UD carbone/époxy M21/T700	69
Tableau II.2: Propriétés du matériau composite	70
Tableau II.3: Propriétés de la résine du matériau composite	70
Tableau II.4: Propriétés des fibres	71
Tableau II.5: Relation entre la vitesse et la résolution de la caméra.....	77
Tableau II.6: Géométrie de l'éprouvette en composite UD carbone/époxy.....	86

Chapitre III:

Tableau III.1: Nombre de modélisations par éléments finis.....	131
Tableau III.2: Variation de longueur de la fissure modélisée	131
Tableau III.3: Déplacement horizontal mesuré des nœuds du maillage (en mm)....	138
Tableau III.4: Déplacement horizontal mesuré des nœuds du maillage (en mm)....	138
Tableau III.5: Déplacement horizontal modélisé des nœuds du maillage (en mm).	139
Tableau III.6: Déplacement vertical modélisé des nœuds du maillage (en mm)	139
Tableau III.7: Essai 1m/s	143
Tableau III.8: Essai 3m/s	144

Chapitre IV:

Tableau IV.1: Paramètres caractéristique de sollicitation dynamique	154
Tableau IV.2: Longueur de fissure identifiée à chaque image	187
Tableau IV.3: Comparaison de deux approches.....	193
Tableau IV.4: K_{II} calculé selon l'approche locale et identifié de l'approche locale	202
Tableau IV.5: K_{II} calculé selon l'approche locale et identifié de l'approche locale	202

Introduction générale

Issue d'une alliance entre un "renfort fibreux" (fibre de verre ou de carbone) et un "liant" (résine dite époxy), le matériau composite offre des possibilités inédites dans le champ aéronautique. D'une densité deux fois inférieure à l'aluminium le plus léger des métaux, ce matériau a d'emblée permis des gains de poids considérables. "Sur les nacelles de l'A380, le gain peut être estimé à 1500 kg par rapport à des techniques traditionnelles. C'est autant de gagné pour la "masse marchande", [GIRAULT 2009], souligne Patrick Girault, directeur de la Stratégie et du développement d'Aircelle.

Outre leur légèreté, les matériaux composites organiques sont aussi de précieux alliés pour réduire le bruit et augmenter la fiabilité des équipements. Le gain peut aller de 10 à 20 Décibels. La technique consiste à équiper les moteurs d'une structure sandwich absorbante composée de deux "peaux" en matériau composite qui emprisonnent le bruit grâce à un système alvéolaire en "nid d'abeille".

Ces dernières années, les avancées en matière de simulation numérique ont entraîné des développements considérables dans l'étude des matériaux et de leur modélisation mécanique. A l'heure actuelle, la maîtrise du comportement mécanique de matériaux et de structures en composites sous sollicitations dynamiques constitue un champ de recherche vaste et complexe. Elle est la préoccupation majeure de plusieurs secteurs de l'industrie notamment le transport ou la défense. La modélisation des différents phénomènes physiques caractéristiques du comportement d'un matériau composite subissant une déformation joue un rôle primordial dans le dimensionnement de structures.

Les composites thermodurcissables renforcés par différents types de fibres sont utilisés dans les secteurs des transports, notamment aéronautique et automobile. Il n'existe pas à ce jour de loi de propagation dynamique de la fissure de ces composites prenant en compte, de manière satisfaisante, l'effet cinétique et l'effet dynamique.

L'objectif de la thèse est donc d'étudier le phénomène de fissuration de ces composites thermodurcissables à renforts continus. L'originalité du travail résidera dans la réalisation d'essais mécaniques par mesure des champs cinématiques. Ces champs seront exploités en vue d'identifier les paramètres intrinsèques de la fissuration et d'établir des relations avec la vitesse de sollicitation.

Plusieurs types d'essais seront entrepris. La machine d'essais utilisée sera une machine de traction dynamique rapide permettant des sollicitations jusqu'à 20m/s. Il sera mis en place un système de mesure de champs de déplacement. Les images seront prises au cours de l'essai à l'aide d'une caméra rapide. Le traitement des images par corrélation d'images numériques permettra d'obtenir le champ des déformations en tout point de la surface de l'éprouvette. Plusieurs méthodologies de détermination du taux de restitution d'énergie seront alors évaluées et comparées.

Deux types d'essais de fissuration seront effectués:

1. Essais de traction uni-axiale sur une éprouvette de géométrie de type CLS (Cracked-Lap-Shear) sur matériaux composites carbone/époxy unidirectionnels.

2. Essais de traction uni-axiale sur une éprouvette de géométrie de type CLS (Cracked-Lap-Shear) sur matériaux composites verre/époxy unidirectionnels.

Deux méthodes de mesure permettant de suivre l'évolution de la longueur de la fissure pendant les essais seront appliquées aux deux campagnes d'essais réalisées. Ces deux méthodes de mesure s'appuient sur la capacité de la caméra rapide qui présente l'avantage majeur de pouvoir mesurer les phénomènes rapides.

Deux approches différentes seront utilisées pour calculer le taux de restitution d'énergie : Une approche dite globale et une approche dite locale.

L'approche globale est fondée sur l'étude du bilan énergétique durant les différentes phases des essais. Les calculs s'appuyant sur la théorie des poutres seront appliqués pour calculer "le terme statique" représentatif de l'effet lié matériau sur le taux de restitution d'énergie. "Le terme cinétique" qui représente la partie cinétique du taux de restitution d'énergie, sera aussi évalué. Cette approche globale permet de déterminer l'évolution du taux de restitution d'énergie de chaque essai en fonction de la longueur de la fissure et/ou du temps.

L'approche locale étudie les champs locaux de déplacement de la zone au voisinage de la tête de fissure à l'aide de la caméra rapide et de la technique de mesure de champ par "corrélation d'images". Une modélisation par éléments finis, prenant en compte implicitement l'effet cinétique à travers l'utilisation des champs de déplacements réels mesurés sur les bords de la zone, sera réalisée et donnera accès aux champs locaux de contrainte dans la zone entourant la tête de la fissure. La méthode de l'intégrale de contour sera ensuite appliquée sur les champs de déplacement modélisés pour évaluer le taux de restitution d'énergie. Cette approche permet également de suivre l'évolution du taux de restitution d'énergie pendant les essais en fonction de la longueur de la fissure ou du temps.

La comparaison entre ces deux approches permettra de valider les résultats de calculs.

L'objectif final sera donc de trouver une loi théorique qui permette de représenter correctement le phénomène de fissuration en dynamique lors des essais réalisés. Cette loi théorique devra prendre en compte tous les paramètres qui ont influencé le taux de restitution d'énergie pendant les essais.

Le chapitre I est dédié à présenter le positionnement du problème. Une présentation générale du matériau composite et du rôle des différentes phases (matrice, renfort, charge, interface,...) y sera faite. Les mécanismes de rupture des composites unidirectionnels seront ensuite abordés en insistant sur le phénomène de délaminage de

ce type de matériau. Les approches théoriques de la mécanique de la rupture seront étudiées afin d'avoir une base de connaissances nécessaires. Une bibliographie sur le phénomène de délaminage en statique sera faite suivie des recherches sur le phénomène de délaminage en dynamique. La fin de ce chapitre introduit les objectifs principaux de cette thèse.

Le chapitre II est consacré à une description du matériau composite et du type d'essai utilisé. Ensuite, il sera question d'établir une méthodologie et un protocole pour l'analyse expérimentale. L'approche expérimentale est proposée spécifiquement pour le cas des sollicitations mécaniques rapides. Deux campagnes d'essais sont réalisées. La surface de l'éprouvette pendant les essais est filmée par la caméra rapide. La technique de mesure de champs sera ensuite appliquée pour accéder aux mesures des champs locaux de la zone voisine de la tête de la fissure. Les premières analyses des résultats expérimentaux seront présentées à la fin de ce chapitre. Les résultats présentés constituent la base nécessaire aux développements des chapitres suivants.

Le chapitre III s'intéresse à la mesure de la longueur de la fissure pendant les essais réalisés. Trois méthodes de mesure y sont présentées. La première méthode est fondée sur la mesure d'une variation de tension liée à la rupture de résistances placées tout au long du passage de la fissure. La deuxième et la troisième méthode de mesure exploitent les images enregistrées par la caméra rapide. Il s'agit de la méthode du contraste et la méthode d'identification utilisant les champs locaux obtenus par corrélation d'images. La méthode de contraste traite l'image de la surface de l'éprouvette pour positionner la tête de la fissure, tandis que la seconde méthode permet grâce à l'identification des champs locaux de déplacements autour de la tête de fissure d'identifier la position de cette dernière. Les deux dernières méthodes de mesure sont appliquées à deux campagnes d'essais pour suivre l'évolution de la longueur de la fissure. Les vitesses de propagation sont alors déterminées.

Le chapitre IV présentera deux approches différentes qui permettent de déterminer le taux de restitution d'énergie instantané durant les essais: l'approche globale et l'approche locale. Ces deux approches seront utilisées à chaque essai afin de déterminer l'évolution du taux de restitution d'énergie. L'approche globale est fondée sur l'étude du bilan énergétique, tandis que l'approche locale est basée sur l'utilisation du champ local de déplacement au voisinage de la tête de la fissure. Les résultats de calcul de ces deux approches seront ensuite comparés. L'évolution du taux de restitution d'énergie en fonction de la vitesse de la fissure, de la vitesse de chargement et du temps sera étudiée afin de valider une loi théorique qui permet de représenter correctement le phénomène de fissuration en dynamique des essais réalisés.

Chapitre I:

Positionnement du problème

I.1. Matériaux composites:

Les matériaux composites ont une longue histoire. Ils ne sont pas une nouveauté; ils sont été utilisés dès l'antiquité par l'homme; bois et torchis sont des matériaux composites de la vie quotidienne. On utilise aussi des matériaux composites pour optimiser les performances de certaines armes; par exemple: les arcs mongols, dans lesquels les parties comprimées sont en corne, et les parties tendus en bois, soies collées et tendons de bœuf. Les épées damassées ou sabres japonais dont la lame est en acier et fer doux: la partie en acier est stratifiée comme une pâte feuilletée, orientant les retassures et impuretés dans le sens long puis façonnée en U dans lequel on place le fer doux. Le sabre résiste alors à la flexion et aux chocs.

On voit ainsi prendre forme, à cette époque, la dichotomie toujours actuelle des produits composites à grande diffusion et des pièces composites à hautes performances.

Dans un sens large, le mot "composite" signifie "constitué de deux ou plusieurs parties différentes". Un matériau composite est constitué de l'assemblage de deux matériaux de natures différentes, se complétant et permettant d'aboutir à un matériau dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément.

L'appellation "matériau composite" ou "composite" qui sera précisée dans le cadre de cette thèse est: un matériau composite contient une phase discontinue de renfort plus rigide et plus résistante que la phase continue de la matrice. Par conséquent, ses propriétés mécaniques résultent essentiellement de:

- La nature des constituants et leurs propriétés.
- La géométrie du renfort (forme, élanement), sa distribution (répartition, orientation), ainsi que sa concentration (taux volumique ou massique).

La recherche de nouveaux matériaux composites plus performants pour les applications spatiale et aéronautique a suscité, depuis quelques années, un intérêt grandissant de la part des industriels dans les domaines du transport automobile et ferroviaire.

I.1.1. Classification des matériaux composites:

La classification des matériaux composites peut être effectuée selon plusieurs façons. En fonction de la nature de la matrice, les matériaux composites peuvent se classer selon les trois familles suivantes:

- **Composites à matrice polymérique:** Ce type de composites a été développé surtout pour les applications aéronautiques où la réduction de masse est essentielle. Les polymères sont donc caractérisés par une faible densité, une résistance mécanique relativement faible, et une grande déformation à rupture.

- **Composites à matrice métallique:** Dans ces composites, la matrice est métallique comme l'aluminium ou le titane qui sont renforcés par des renforts généralement non-métalliques, souvent des céramiques. Leurs propriétés mécaniques sont donc meilleures ou plus adaptables au chargement que leurs matrices polymériques. Ils sont largement appliqués dans les fabrications des moteurs d'automobile.

- **Composites à matrice céramique:** Les matériaux céramiques telles que le verre et le carbure de silicium (SiC) sont utilisés pour la matrice de ce type de composite. La matrice peut être associée aux renforts comme des métaux, le carbone, et des céramiques. Ce type de composite est développé dans le but d'améliorer les propriétés mécaniques telles que la ténacité, et la résistance au choc thermique.

Une manière plus utilisée consiste à les classer selon les types des renforts. Les composites sont donc divisés en quatre catégories suivantes:

- **Composites à renforts de fibres:** Les renforts de ce type de composites sont sous forme de fibres. La longueur des fibres est bien supérieure aux dimensions de sa section transversale. Selon leurs applications, les fibres utilisées prennent la longueur de la pièce (fibres continues) ou soit coupées en petite longueur (fibres courtes).

- **Composites stratifiés:** Le composite est constitué par au moins deux couches minces de matériau. Les couches peuvent être composées de différents matériaux monolithiques comme dans les métaux plaqués ou de même matériau composite empilé selon différentes orientations comme pour des stratifiés composites à renforts de fibres longues. Ce dernier devient une classe hybride du composite comportant à la fois le composite à renfort de fibres et la technique de stratification.

- **Composites à renforts de particules:** Le renfort est considéré comme une particule si toutes ses dimensions sont approximativement égales et petites devant les autres dimensions du matériau. Les particules dures sont dispersées aléatoirement dans la matrice moins rigide.

- **Composites à renforts de paillettes:** Les paillettes ont une dimension très faible par rapport aux autres dimensions. La dispersion de ces "particules minces" est généralement aléatoire. Cependant, les paillettes peuvent être rangées parallèlement afin d'avoir des propriétés plus uniformes dans le plan.

I.1.2. Constituants des matériaux composites:

Dans la suite, nous nous intéresserons uniquement aux composites à renfort de fibres longues et à matrices polymériques utilisés, dans la plupart des cas, dans l'industrie aéronautique. Ces matériaux seront parfois appelés "composites fibreux" ou même "composite" par simplicité.

Les propriétés mécaniques des composites fibreux sont directement liées à celles de leurs constituants: la fibre, la matrice, ainsi que l'interphase. La résistance et la rigidité d'un matériau composite sont assurées principalement par les fibres qui possèdent des caractéristiques mécaniques beaucoup plus élevées que la matrice. Cette dernière, quant à elle, réunit les fibres et donne la forme géométrique de la structure. La matrice sert également à transférer les efforts mécaniques entre les fibres et les protéger contre les environnements. L'interphase est la zone créée par l'adhérence et la réaction entre les fibres et la matrice. Elle possède des caractéristiques chimiques et mécaniques différentes de celles des fibres et de la matrice.

La disponibilité d'un grand choix de fibres et de matrices permet de réaliser des composites ayant diverses propriétés. Nous présenterons rapidement quelques-uns des constituants les plus couramment utilisés.

A. Les fibres:

La rupture des matériaux à haute résistance ou à haut module est généralement provoquée par la propagation de fissures. Les matériaux en forme de fibre sont intrinsèquement plus résistants à la rupture qu'en forme massive car la taille des défauts est limitée par le diamètre faible. Dans un composite fibreux, la tenue mécanique est assurée principalement par les fibres. Par sa nature filamenteuse, la rupture de quelques fibres a pour résultat la redistribution du chargement sur les autres fibres, ce qui empêche la rupture catastrophique de la structure. Les fibres les plus souvent rencontrées dans les composites sont les suivantes:

- **Fibre de verre:** Ce type de fibre est très répandu dans des applications à basse performance ainsi que des applications haute performance telles que les réservoirs de propulseurs de fusée. Leurs avantages incluent un prix compétitif, une disponibilité, et une résistance élevée. Cependant, à cause de leur rigidité relativement faible, les fibres de verre sont progressivement remplacées par les fibres aramides ou les fibres de carbone dans les applications haute performance.

- **Fibres de carbone:** Actuellement, les fibres de carbone sont les plus répandues pour les matériaux composites hautes performances. Deux avantages principaux de ces fibres sont leur fabrication plus adaptée à la production à grande échelle que d'autres fibres hautes performances et leurs excellentes propriétés mécaniques plus facilement

transférables aux matériaux composites. Leur prix reste toutefois prohibitif pour les produits grand public.

- **Fibres aramides:** Ces fibres appartiennent à la famille des fibres polyamides aromatiques. Elles possèdent une résistance élevée et une rigidité considérablement supérieure à celle des fibres de verre. La tolérance aux dommages est très bonne également. Leurs désavantages incluent une résistance en compression inférieure à celle des fibres de carbone et une adhésion relativement faible aux matrices.

B. Les matrices:

La matrice réunit les fibres par ses caractéristiques cohésives et adhésives. Elle maintient les fibres dans leurs orientations et leurs positions prévues. Ses autres rôles consistent à distribuer les efforts entre les fibres, fournir une résistance à la propagation de fissure, et fournir toutes les résistances en cisaillement du composite. La matrice détermine en général la limite de la température d'utilisation et l'environnement de service du matériau.

Il existe un grand nombre de polymères pouvant servir de matrice aux matériaux composites. Ceux parmi les plus utilisés sont les suivants:

- **Les résines de polyester et de vinylester:**

Ce sont les résines les plus utilisées de toutes les matrices, pour des applications commerciales, industrielles, et de transport. L'adhésion avec les fibres de verre est excellente. Les résines de polyester et de vinylester sont en majeure partie limitées aux applications basses performances à cause d'un problème d'adhésion avec les fibres hautes performances telles qu'en fibres de carbone et aramide.

- **Les résines thermodurcissables:**

Lorsqu'une résine thermodurcissable est soumise à une élévation de température, il se crée des relations chimiques au cours desquelles des liaisons covalentes sont formées entre les chaînes des molécules résultant en un réseau tridimensionnel. Le polymère final se présente sous la forme d'un corps solide et infusible. La polymérisation étant irréversible, ce matériau ne peut être mis en forme qu'une seule fois au moment de sa fabrication.

En règle générale, les matrices thermodurcissables possèdent une faible résistance à l'impact et une faible tenue en température. Les quatre types de résines couramment utilisées dans l'industrie aéronautique sont les époxydes, les bismaléimides, les polyimides, et les phénoliques.

Les époxydes sont les plus utilisés pour la fabrication des structures aéronautiques. Ils possèdent une combinaison d'avantages quasiment imbattables: facilité de manipulation, flexibilité de traitement, de bonnes propriétés mécaniques, et un prix acceptable. Leur

application est cependant limitée à une température maximale comprise entre 80°C et 120°C.

- **Les résines thermoplastiques:**

Les matrices thermoplastiques peuvent être divisées en deux classes selon leurs structures moléculaires: la structure semi-cristalline et la structure amorphe. Ces matrices sont caractérisées par la capacité d'être alternativement ramollies par chauffage au-dessus de la température de fusion ou de ramollissement et durcies par refroidissement. Dans ce cas, la modification de forme et le recyclage du composite sont envisageable. Ces résines possèdent des avantages sur les résines thermodurcissables telles qu'une ténacité améliorée, une déformation à rupture élevée, et une faible absorption d'humidité. De plus, elles ont une durée de stockage illimitée. Cependant, les résines thermoplastiques amorphes présentent des problèmes de résistance aux solvants organiques.

Parmi les résines thermoplastiques, on peut citer la résine polyéther éthercétone (PEEK), la polysulfure de phénylène (PPS), la polyétherimide (PEI), et la polyamide (PA).

C. L'interphase:

La nature de l'adhésion fibre/matrice inclut le verrouillage mécanique, l'attraction électrostatique, l'enchevêtrement moléculaire, et la réaction chimique. L'interphase est constituée de la surface de contact (interphase) fibre /matrice ainsi que de la région d'un volume fini prolongée dans la matrice. Elle peut être considérée comme un constituant du composite car elle possède des propriétés chimiques, physiques, et mécaniques différentes de celles de la fibre et de la matrice. L'interface assure la liaison fibre/matrice et permet le transfert des contraintes de l'une à l'autre sans déplacement relatif. Cependant, l'hypothèse que l'interphase n'a pas d'épaisseur est souvent faite pour faciliter l'analyse micromécanique des composites.

I.1.3. Considérations sur l'usage des matériaux composites:

Dans la conception des produits, il est essentiel d'évaluer et comparer les composites avec les matériaux conventionnels pour bien choisir les matériaux. Les avantages et les inconvénients principaux des matériaux composites sont présentés ci-dessous.

A. Les avantages:

Les avantages les plus cités des matériaux composites incluent:

- **Propriétés mécaniques adaptables:**

Un stratifié est un empilement de plis élémentaires qui se comportent ensemble comme un élément structural. Un pli élémentaire est anisotrope, ou orthotrope dans la plupart des cas, avec la résistance et la rigidité dans la direction des fibres beaucoup plus

élevées que dans des autres directions. Il faut alors associer différentes orientations de fibres afin d'obtenir un composite capable de résister à diverses sollicitations.

Un avantage principal du stratifié composite est que les plis élémentaires peuvent être orientés de telle façon que la résistance dans une direction donnée corresponde aux chargements prévus. La part de matériau dans des directions non-sollicitées est donc minimisée.

- **Haute résistance et haut module:**

Les propriétés mécaniques élevées, notamment la résistance et la rigidité des matériaux composites à hautes performances permettent de répondre aux exigences de l'industrie aéronautique. D'autres industries en profitent également, par exemple la vitesse d'une balle de tennis est plus élevée avec des raquettes en carbone/époxy.

- **Masse:**

Les matériaux composites hautes performances ont une densité de l'ordre de 1,6 contre 2,7 pour les alliages d'aluminium. Selon Airbus, ils autorisent au gain de 10 à 30% sur les éléments de structure. Ce gain de masse permet d'employer des moteurs moins puissants. Ceux-ci consomment moins et permettent de réduire la taille des réservoirs de carburant pour le même cahier des charges de l'avion.

- **Production:**

Les matériaux composites permettent de simplifier l'assemblage de la structure, ce qui compense partiellement leur prix élevé. La réduction du nombre de pièces par rapport aux matériaux conventionnels peut être substantielle. Par exemple, un tronçon de fuselage qui réclame typiquement mille pièces et plusieurs milliers de fixations est fabriqué en un seul morceau pour le Boeing 787. Sur la chaîne d'assemblage final, l'avion complet devrait voir le jour en trois contre onze jours pour un Boeing 737.

- **Maintenance:**

Les composites ont besoin de moins d'entretien que les alliages métalliques. D'une part, ils ne sont pas sensibles à la corrosion. D'autre part, la tenue en fatigue est très bonne. Par exemple, l'intervalle entre deux révisions complètes du Boeing 787, qui utilise massivement des matériaux composites, est porté à douze ans au lieu de dix ans sur un Boeing 777.

B. Les inconvénients:

Bien que les avantages des matériaux composites soient impressionnants, ces matériaux ne sont pas une solution miracle pour toutes les applications. Des inconvénients ou des problèmes existent et peuvent empêcher leur usage. Les inconvénients les plus courants sont les suivants:

- **Coût:**

Les matériaux composites hautes performances ont été développés principalement pour répondre aux besoins de la communauté aérospatiale qui sont très exigeants au niveau de la technologie et de la sécurité. Par conséquent, l'élargissement de la science des composites aux produits plus populaires (de grande consommation) est lent. Le coût des matériaux composites reste élevé.

- **Conception et analyse:**

Les matériaux composites sont souvent à la fois hétérogènes et anisotropes. Ces deux caractéristiques sont différentes des celles de la plupart des matériaux classiques qui ont été largement étudiés. C'est pourquoi, ils nécessitent de nouvelles approches, généralement plus compliquées, pour la conception et l'analyse des structures.

L'hétérogénéité impose l'analyse d'au moins de deux points de vue: la micromécanique et la macro-mécanique. De plus, les matériaux anisotropes nécessitent plus de propriétés mécaniques que les matériaux isotropes pour établir les relations contrainte-déformation.

Pour les stratifiés, la rupture se produit de plusieurs façons différentes. Il est donc difficile d'établir une théorie de résistance qui tienne compte de tous les modes de rupture et de leurs interactions. Par conséquent, la détermination des résistances est plus compliquée et nécessite des vérifications expérimentales. De plus, la résistance d'un stratifié peut être influencée par les contraintes inter-laminaires au voisinage des bords libres.

- **Assemblage:**

Les matériaux composites sont généralement plus fragiles que les matériaux métalliques conventionnels. Par conséquent, l'assemblage des pièces en matériaux composites pose toujours du problème de faible résistance à cause de la concentration des contraintes. Les assemblages sont souvent renforcés par des inserts métalliques ou par l'augmentation de l'épaisseur du stratifié qui entraîne une masse supplémentaire pour la structure.

- **Tolérance aux dommages:**

Un des points faibles les plus importants des matériaux composites est la tolérance aux dommages. Des dommages de diverses natures peuvent se produire dans la vie d'une structure, par exemple l'impact, soit en service ou pendant la maintenance, est inévitable.

En règle générale, plus un matériau est ductile, plus il est capable de tolérer un dommage car la ductilité fournit la capacité d'absorber de l'énergie. Par conséquent, les structures métalliques ont tendance se déformer plutôt que de se fracturer sous l'impact. Le caractère fragile des matériaux composites ne permet pas, par contre, de subir l'impact sans avoir d'endommagement [HORTON 1993].

Les dommages sont souvent des fissurations internes de la matrice, indétectables sur la surface de la structure. Ce type de dommages diminue considérablement la résistance en compression de la pièce endommagée. Les dommages des fibres diminuent la résistance en compression ainsi qu'en traction. Les outils pour évaluer la tolérance aux dommages des structures sont un programme d'inspection, l'analyse de la résistance résiduelle, et l'analyse de la propagation des dommages.

I.2. Applications aéronautiques des matériaux composites:

Au début de l'année 1960, une évaluation de l'impact de la fibre de bore et ses matériaux composites a été effectuée par l'armée de l'air des Etats-Unis. Un stratifié unidirectionnel de fibres de bore a été estimé avoir une rigidité supérieure à celle de l'acier pour seulement un quart de masse. Cela a provoqué une fameuse prévision que les immeubles construits avec un tel matériau pourraient être cinq fois plus hauts et la travée des ponts cinq fois plus longue. Bien que cette prévision ne se soit réalisée pas, elle a lancé les matériaux composites dans des applications aéronautiques sérieuses. Une nouvelle classe de composites appelée les composites hautes performances (advanced composites), basée sur les fibres de bore et subséquemment les fibres de carbone, a été en développement intensif depuis [TSAI 2005].

Les mots "haute performance" sont utilisés pour distinguer les composites à fibres très résistantes et très rigides comme le bore et le carbone. Les composites carbone/époxy ont connu la plus grande utilisation dans cette classe. Tandis que les fibres de verre ne sont pas très résistantes, leur rigidité n'est pas suffisamment élevée pour l'usage des structures primaires d'avions [TSAI 2005].

La première utilisation majeure du composite bore/époxy fut l'empennage horizontal du Grumman F-14 [JONES 1975]. Dès lors, l'usage des éléments structuraux en composites a continué à augmenter autant en aviation militaire que civile. La figure I.1 présente la croissance rapide de l'utilisation des matériaux composites dans les structures d'avions.

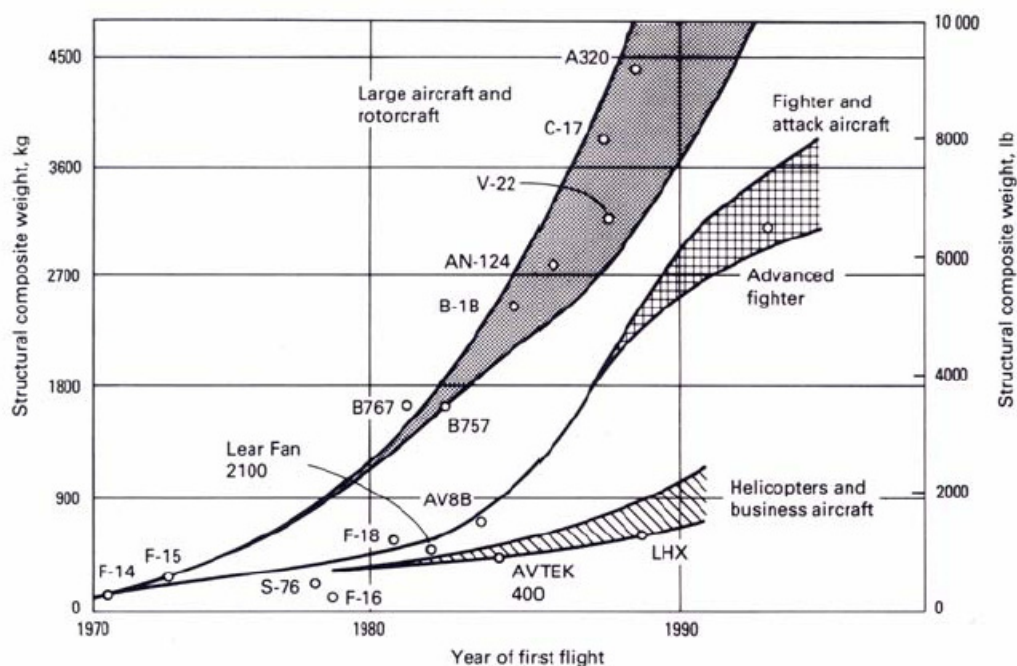


Figure I.1: Matériau composite dans les structures d'avions

Dans la génération actuelle des avions civils, l'Airbus A380 (première livraison en 2007) contient des matériaux composites jusqu'à 22% de la masse structurale [Airbus 2007]. L'illustration la plus marquante concerne la comparaison entre le Boeing 777 (première livraison en 1995) et le Boeing 787 [Boeing 2007]. En pourcentage de la masse structurale, le Boeing 777 contient 12% de composites et 50% d'aluminium tandis que le Boeing 787 a monté sur 50% de composites et 20% d'aluminium. Boeing est le premier grand constructeur à aller aussi loin dans l'utilisation des matériaux composites.

La transition des matériaux composites de l'expérience de laboratoire à l'usage pratique dans la production des avions militaires et civils est une réalité. Des progrès ont passé de l'aviation militaire à l'aviation commerciale, et aujourd'hui à la communauté d'aviation générale. Ces progrès représentent la croissance de la confiance en l'usage des composites et la reconnaissance des avantages en termes de coût et de performance associés à ces matériaux.

I.3. Mécanismes de rupture des composites unidirectionnels:

Le matériau composite à renforts de fibres longues est très répandu dans les applications où la réduction de masse est critique. Plus l'utilisation d'un matériau est élargie, plus la probabilité de rupture éventuelle est augmentée. La capacité à caractériser les ruptures, par exemple en termes d'identification des modes de rupture, des paramètres caractéristiques, ou des valeurs critiques à la rupture, est essentielle pour assurer l'intégrité des pièces en service et pour la conception des futurs produits.

I.3.1. Trois modes de rupture des matériaux composites unidirectionnels:

La rupture des composites stratifiés peut se produire de plusieurs façons très complexes. Les modes de rupture dépendent de la stratification et de la direction du chargement par rapport à l'orientation des fibres. Les figure I.2 et figure I.3 montrent les allures des ruptures par flexion et par traction respectivement.

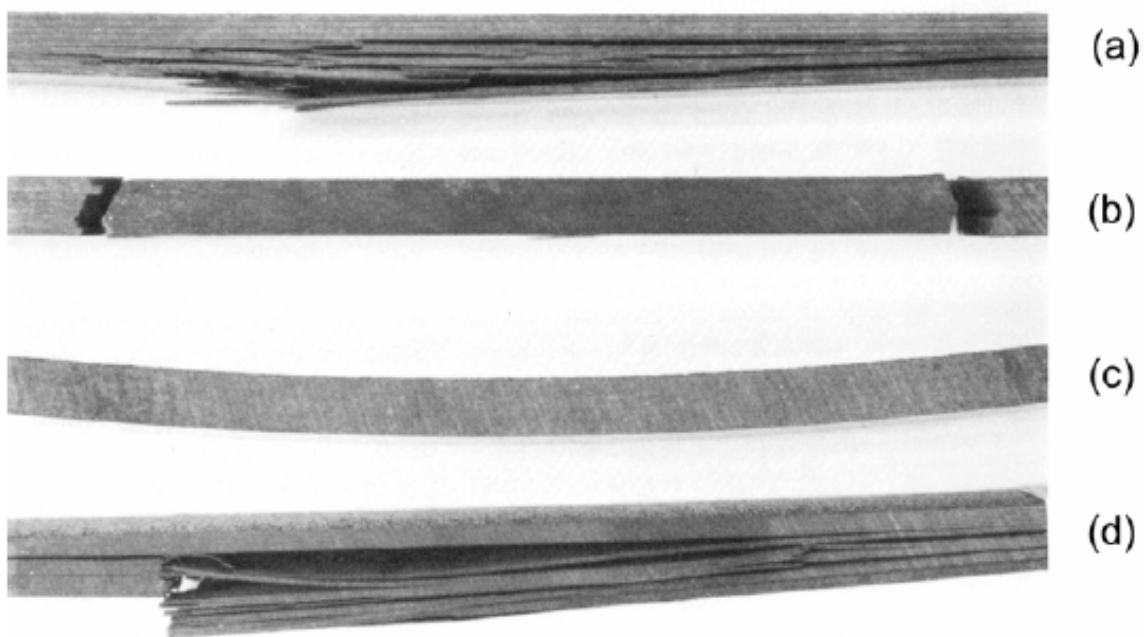


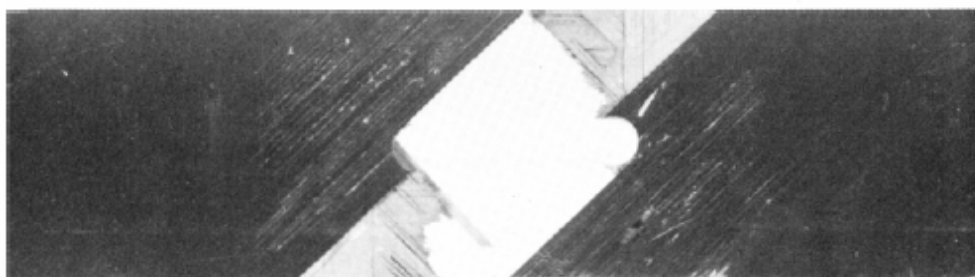
Figure I.2: Rupture par flexion de différentes séquences d'empilement: (a) Quasi-isotrope, (b) Unidirectionnel, (c) $\pm 45^\circ$, (d) $0^\circ/90^\circ$ [SMITH 1993]



(a)



(b)



(c)



(d)

Figure I.3: Ruptures par traction de différentes séquences d'empilement: (a) $0^\circ/90^\circ$ tissu, (b) unidirectionnel, (c) Quasi-isotrope trouée, (d) $0^\circ/90^\circ$ trouée [SMITH 1993]

La description de la rupture à l'échelle du pli est relativement efficace pour le classement des mécanismes de rupture. Les stratifiés à renforts de fibres longues présentent trois types de rupture: rupture intra-laminaire, rupture inter-laminaire, et rupture trans-laminaire [SMITH 1993]

Ces trois modes de rupture présentés à la figure I.4, définissent le plan de rupture par rapport aux constituants du matériau. La rupture intra-laminaire se trouve à l'intérieur d'un pli tandis que la rupture inter-laminaire décrit une rupture entre deux plis adjacents. La rupture trans-laminaire est orientée transversalement à l'orientation de fibres dans le pli endommagé.

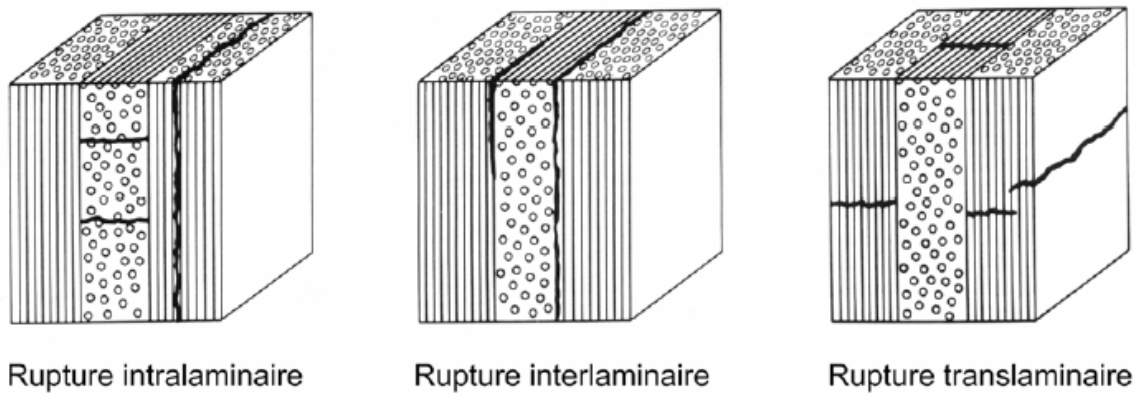


Figure I.4: Trois modes de rupture dans un stratifié 0°/90°/0° [SMITH 1993]

La rupture intra-laminaire est due principalement à la faible résistance de la matrice et de l'adhérence entre la matrice et les fibres. Elle est provoquée par les contraintes dans le plan du stratifié. Un pli se détériore par la contrainte résultante en traction dans la direction normale aux fibres. Ce type de rupture est donc couramment appelée la "fissure transverse". Normalement, cette fissuration de la matrice se produit bien avant la rupture de fibre.

La rupture inter-laminaire se produit dans l'interface entre deux plis d'un stratifié. La surface de rupture montre, en général, la rupture de la matrice et la décohésion fibre/matrice. Ces mécanismes impliquent peu de rupture de fibres. Comme pour les matériaux métalliques, la rupture peut être en mode I(ouverture), mode II(cisaillement), mode III(cisaillement anti-plan) ou une combinaison des trois modes.

La rupture trans-laminaire concerne la rupture de fibres. Les surfaces de rupture sont donc généralement marquées par la morphologie rugueuse des bouts de fibres. En effet, la contrainte à rupture des fibres est plus importante que celle de tous les autres constituants d'un composite stratifié. Par conséquent, ce mécanisme de rupture entraîne souvent la rupture totale du stratifié. La rupture trans-laminaire peut être séparée en deux modes selon les chargements: la rupture en traction et le micro-flambage en compression. La rupture peut être provoquée par un mode individuel ou une combinaison des deux modes.

I.3.2. Le délaminage: les phénomènes physiques associés

L'un des avantages majeurs des composites stratifiés à renforts de fibres longues est la capacité d'orienter les fibres de chaque pli afin d'avoir les propriétés, souvent la résistance et la rigidité, adaptées aux chargements dans les directions prévues. Malgré d'excellentes propriétés dans le plan, les stratifiés présentent un problème propre aux matériaux réalisés par stratification: la rupture inter-laminaire. Ce mécanisme de rupture se caractérise par un décollement ou une décohésion entre les plis du stratifié. Il est couramment appelé le "délaminage".

Un stratifié soumis à un chargement présente différentes étapes de dégradation. Dans le scénario d'évolution des défauts le plus "classique" [PAVAN 2004], la matrice et l'interface fibre/matrice sont les premières à se détériorer (figure I.5-a). Les premiers défauts sont donc la microfissuration de la matrice et la décohésion fibre/matrice à l'échelle microscopique. Ensuite, ces défauts s'agrandissent de façon stable à l'échelle du pli par coalescence (figure I.5-b), les micro-défauts se rejoignent pour former des fissurations transverses. Les fissures transverses peuvent parvenir à l'interface des plis et provoquer le délaminage sous l'effet des contraintes inter-laminaires (figure I.5-c). Ces défauts et leur évolution dépendent de l'empilement, du nombre de plis, du chargement, et de la taille de la forme de la structure considérée.

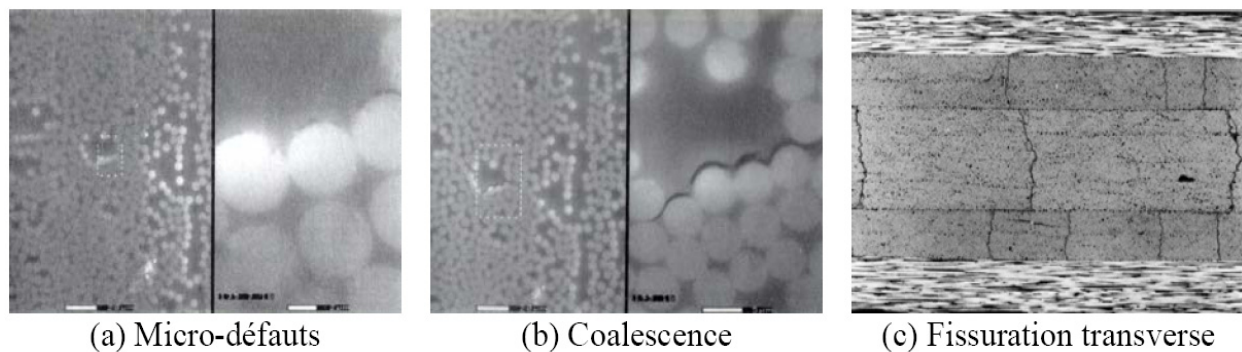


Figure I.5: Evolution de défauts [PAVAN 2004]

Les micro-mécanismes principaux de l'endommagement qui accompagnent un délaminage sont présentés schématiquement dans la figure I.6. Ils incluent:

- Zone endommagée: la forte concentration de contraintes autour de la pointe de fissure provoque une zone endommagée où se trouvent la déformation plastique et/ou des microfissures de la matrice.
- Fissure latérale: Après le passage de la fissure, les microfissures dans la zone endommagée peuvent se transformer en des fissures latérales de la matrice autour du plan de délaminage.
- Pontage de fibres: La présence de fissures au dessus ou en dessous du plan de délaminage facilite la création de ponts de fibres reliant les deux surfaces délaminées. Certains ponts de fibres se rompent pendant l'avancée du délaminage.

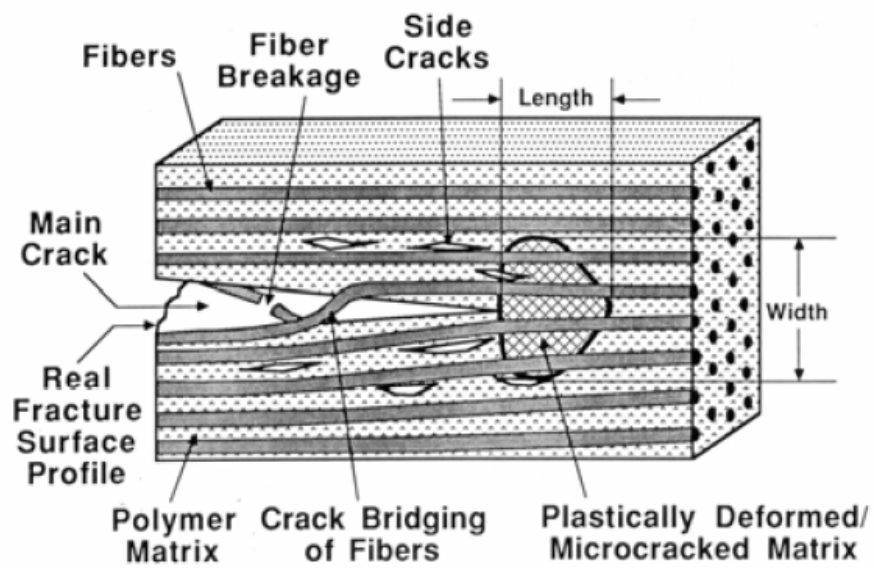


Figure I.6: Mécanismes d'endommagement accompagnant le délaminage [FRIENDRICH 1989]

I.4. Mécanique de la rupture:

La mécanique de la rupture est une science qui permet d'étudier le comportement d'une structure avec des défauts. De façon conventionnelle, la mécanique de la rupture suppose qu'une structure n'est jamais sans défaut. La présence des défauts peut être sous forme de fissures internes ou de fissure à la surface. L'analyse en mécanique de la rupture corrèle des paramètres provenant du chargement, de la géométrie, et du matériau. Puis, elle prévoit les conditions pour lesquelles une fissure peut se propager et éventuellement entraîner la rupture complète de la structure.

La fissuration est un phénomène de séparation irréversible d'un milieu continu. On distingue en 3 modes principaux de fissuration (figure I.7).

- Mode I: mode d'ouverture, le champ de déplacement relatif des lèvres de la fissure est défini par la discontinuité:

$$\langle u_1 \rangle = 0, \langle u_2(x_1) \rangle \neq 0, \langle u_3 \rangle = 0$$

- Mode II: mode de cisaillement plan:

$$\langle u_1(x_2) \rangle \neq 0, \langle u_2 \rangle = 0, \langle u_3 \rangle = 0$$

- Mode III: Mode de cisaillement anti-plan:

$$\langle u_1 \rangle = 0, \langle u_2 \rangle = 0, \langle u_3(x_3) \rangle \neq 0$$

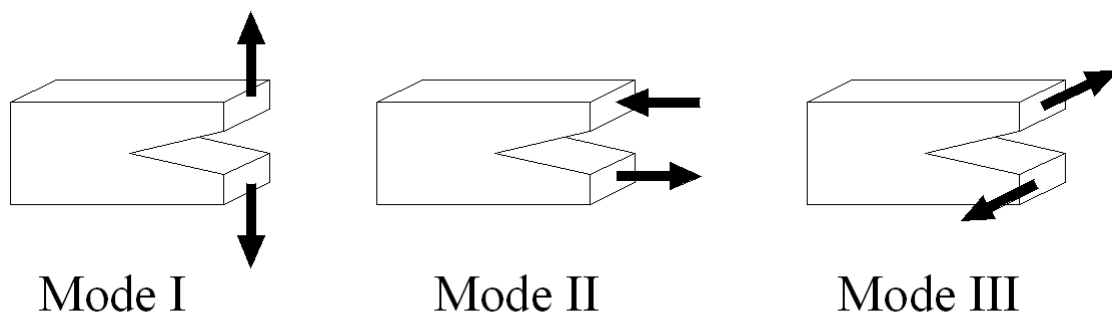


Figure I.7: 3 modes indépendants de fissuration

En Mécanique Élastique Linéaire de la Rupture (MELR), il y a 2 approches possibles: l'approche locale et l'approche globale.

L'approche locale consiste à déterminer les paramètres de mécanique de la rupture à l'aide des champs de contraintes et de déformations locaux en pointe de fissure. Pour définir ces champs en pointe de fissure, nous utiliserons la notion de facteurs d'intensité des contraintes.

L'approche globale considère que la propagation de fissure est un phénomène dissipateur d'énergie. Selon la théorie de Griffith, l'énergie consommée est la différence

entre l'état énergétique du système avant et après fissuration. Cette énergie peut s'assimiler à une énergie de surface.

Dans la suite, on présentera systématiquement les définitions de base de ces 2 notions.

I.4.1. Approche locale:

Cette approche consiste à caractériser le champ de contraintes et de déplacements autour de la pointe de la fissure. Le concept de facteur d'intensité de contraintes (K) caractérise l'intensité de la singularité du champ des contraintes à la pointe de la fissure et est proportionnelle à la discontinuité du déplacement des lèvres de la fissure. Il est défini respectivement en mode I, mode II et mode III de fissuration. La valeur de K dépend du chargement, des propriétés du matériau et des paramètres géométriques de l'éprouvette comme la longueur initiale de la fissure. Cette approche est centrée sur le critère de propagation en contrainte, et indique que la fissure se propage lorsque la valeur de K atteint sa valeur critique K_c .

Dans un milieu élastique, les valeurs du facteur d'intensité de contraintes permettent de déterminer complètement les champs de contraintes et aussi de déplacements de la structure fissurée. Si l'on connaît les composantes non nulles des contraintes et des déplacements, on peut déterminer les facteurs d'intensité des contraintes. Les expressions suivantes donnent les relations entre le facteur d'intensité de contraintes et les champs de contraintes et de déplacements pour les milieux fissurés plans (figure I.8):

$$K_I = \lim_{r \rightarrow 0} (\sigma_{ij} \sqrt{2\pi r}) = \lim_{r \rightarrow 0} \left(\frac{E}{8C_2} \sqrt{\frac{2\pi}{r}} \langle u_2 \rangle \right)$$

$$K_{II} = \lim_{r \rightarrow 0} (\sigma_{ij} \sqrt{2\pi r}) = \lim_{r \rightarrow 0} \left(\frac{E}{8C_2} \sqrt{\frac{2\pi}{r}} \langle u_1 \rangle \right)$$

avec:

$$C_2 = I \text{ en contraintes planes}$$

$$C_2 = I - \nu^2 \text{ en déformations planes}$$

$$K_{III} = \lim_{r \rightarrow 0} (\sigma_{ij} \sqrt{2\pi r}) = \lim_{r \rightarrow 0} \left(\frac{E}{8(I + \nu)} \sqrt{\frac{2\pi}{r}} \langle u_3 \rangle \right)$$

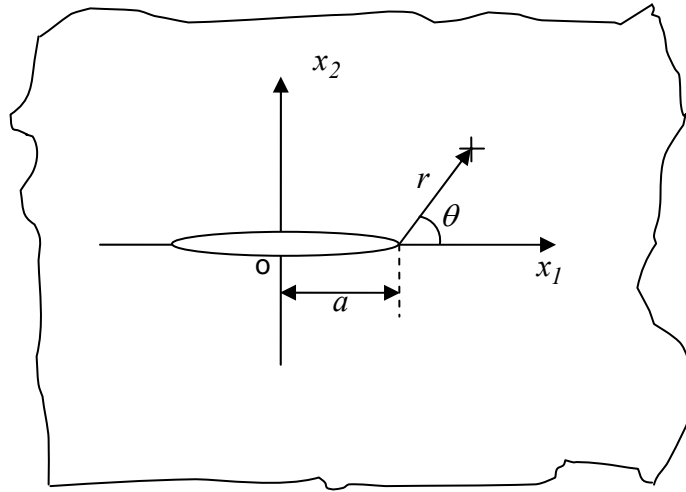


Figure I.8: Fissure dans un milieu plan

I.4.2. Approche globale:

La force motrice de la propagation est l'énergie de création des deux surfaces de la fissure, nommée G . G est appelé taux de restitution d'énergie. Par définition, le taux de restitution d'énergie représente l'énergie nécessaire pour faire progresser une unité de surface de la fissure. Cette énergie est apportée par le chargement extérieur et sa valeur critique G_c décide la création de surfaces. En effet, le critère de propagation de fissure correspondant s'écrit:

$$G_c = 2\gamma_s$$

avec γ_s l'énergie spécifique de création de deux surfaces de la fissure dans le matériau.

Considérons une pièce du matériau possédant une fissure de la longueur initiale a se propageant d'un incrément de surface ΔA , le taux de restitution d'énergie correspond à:

$$\left\{ \begin{array}{l} G = - \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta W}{\Delta A} = - \frac{\partial W}{\partial A} \\ W = W_e + W_{ext} \end{array} \right.$$

où W est l'énergie potentielle totale, W_e est l'énergie de déformation élastique, $W_e = \int \sigma : \varepsilon$, W_{ext} est l'énergie potentielle des forces extérieures, ∂A est l'incrément de surface correspondant à l'avancée de la fissure.

Du point de vue graphique (figure I.9), $G\Delta A$ peut être représenté par l'aire de triangle $\overline{012}$ de la courbe de comportement de la pièce entre deux états (1, 2) de la fissure.

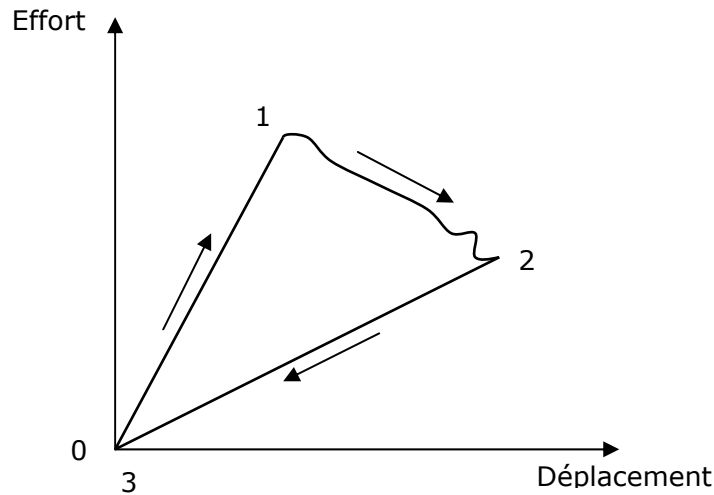


Figure I.9: Relation entre G et le cycle de chargement appliqué

I.4.3. Relation entre les deux approches:

On considère une structure fissurée soumise à un chargement en 3 modes I, II, III. L'état de contraintes planes décrit l'état de la structure à laquelle les dimensions de fissure sont très petites par rapport aux dimensions de la structure. L'état de déformations planes correspond aux structures ayant une grande dimension en direction z par rapport aux autres directions (x, y) .

En Mécanique Élastique Linéaire de la Rupture, les relations entre les deux approches précédentes sont établies pour un matériau isotrope par l'intermédiaire du module d'élasticité E et du coefficient de Poisson ν . Le tableau I.1 exprime cette relation pour les 3 modes différents de la fissuration.

	Etat contraintes planes:	Etat de déformations planes:
Mode mixte (I, II, III)	$G = \frac{K_I^2 + K_{II}^2}{E} + \frac{1+\nu}{E} K_{III}^2$	$G = \frac{1-\nu^2}{E} (K_I^2 + K_{II}^2) + \frac{1+\nu}{E} K_{III}^2$
Mode I	$G_I = \frac{K_I^2}{E}$	$G_I = \frac{1-\nu^2}{E} K_I^2$
Mode II	$G_{II} = \frac{K_{II}^2}{E}$	$G_{II} = \frac{1-\nu^2}{E} K_{II}^2$
Mode III	$G_{III} = \frac{1+\nu}{E} K_{III}^2$	$G_{III} = \frac{1+\nu}{E} K_{III}^2$

Tableau I.1: Relation entre les deux approches

La différence principale entre les deux approches est que le premier concept de taux de restitution d'énergie G relève d'un critère énergétique de rupture tandis que le second concept de facteur d'intensité de contraintes K utilise les champs de contraintes autour de la pointe de fissure.

L'approche globale est capable d'introduire plusieurs modes de chargement (traction/compression/cisaillement) afin d'aboutir à un seul critère de rupture.

I.5. Approches du phénomène de délaminage des matériaux composites:

A l'origine, la mécanique de la rupture a été développée pour les matériaux homogènes isotropes. Cependant, elle est couramment utilisée pour caractériser la résistance au délaminage des matériaux composites [O'BRIEN 1998]. Des essais de mode I ont été réalisés sur les composites depuis les années 1960 [DAVIES 1999].

Pour le délaminage des matériaux composites, l'analyse est principalement basée sur la mécanique élastique linéaire de la rupture adaptée aux matériaux anisotropes [WILLIAMS 1989]. La rupture est donc de type "fragile", c'est-à-dire que le point de rupture se trouve dans la partie linéaire de la courbe effort-déplacement. L'endommagement est supposé confiné dans une zone assez petite par rapport aux autres dimensions. Cette zone est limitée de telle manière que le comportement mécanique macroscopique reste linéaire [GONG 1992].

Dans la littérature, le concept du taux de restitution d'énergie est couramment utilisé pour caractériser le délaminage des stratifiés composites [WILLIAMS 1989] [ASTM 1994] [DAVIES 1999]. La résistance au délaminage est mesurée en termes de G_c associé à l'amorçage et à la propagation du délaminage [O'BRIEN 1998].

L'approche énergétique (approche globale) présente des avantages par rapport à l'approche en contraintes (approche locale). Le taux de restitution d'énergie est relativement facile à déterminer par des méthodes expérimentales ou analytiques ce qui permet d'éviter d'étudier le champ de contrainte très complexe à l'extrémité de la fissure. De plus, les formules analytiques du facteur d'intensité de contrainte pour les matériaux anisotropes sont rarement disponibles.

Par son caractère global, l'approche énergétique est applicable à la rupture de tous les matériaux fragiles, qu'ils soient isotropes ou anisotropes, homogènes ou hétérogènes. En effet, lorsqu'une fissure se propage dans un milieu homogène orthotrope sous un chargement en mode mixte I+II, le facteur d'intensité de contraintes peut être déterminé à partir du taux de restitution d'énergie [GONG 1992] [WILLIAMS 1989].

Le développement de la mécanique de la rupture classique pour les matériaux composites nécessite le traitement de deux questions principales: l'inhomogénéité et l'anisotropie. L'anisotropie est prise en compte par l'élasticité anisotrope et l'inhomogénéité peut être traitée par des considérations dimensionnelles [WILLIAMS 1989]. L'approche énergétique permet de contourner ces problèmes en gardant le sens physique du problème.

La notion de zone endommagée en pointe de fissure est particulièrement importante dans l'analyse linéaire élastique parce qu'elle détermine la quantité d'énergie dissipée. La déformation plastique, typique pour les matériaux métalliques, est remplacée par

l'endommagement caractéristique des matériaux composites. Les types d'endommagement dans cette zone peuvent être la microfissuration, le décollement entre la matrice et les fibres, la rupture de fibres, ainsi que la déformation plastique de la matrice.

L'influence de la zone endommagée sur la valeur de G_c a été constatée et la question de la limite de validité de la Mécanique élastique linéaire de la rupture pour le délaminage des composites stratifiés a été posée [GONG 1992]. Une estimation de l'étendue de cette zone par un essai de traction est proposée par [WILLIAMS 1989], mais elle invoque l'analyse du champ de contraintes que l'on cherche à éviter. Enfin, peu de résultats sont publiés concernant la relation quantitative entre la zone endommagée et la résistance au délaminage des composites.

Par conséquent, la majorité des travaux dans le domaine de la caractérisation du délaminage se base sur l'hypothèse que l'endommagement est confiné dans une zone petite par rapport aux autres dimensions. Cette hypothèse est généralement partagée par tous pour l'empilement purement unidirectionnel et la notion de zone endommagée est donc ignorée dans les normes ou protocoles de norme concernant la détermination de la ténacité au délaminage des stratifiés composites unidirectionnels [ASTM 1994] [BLACKMAN 2001] [BRUNNER 2001] [DAVIES 2001].

I.6. Approches du phénomène de délaminage dynamique des matériaux composites:

La résistance du matériau composite vis-à-vis du délaminage est un caractère important qui est largement étudié par les chercheurs. En effet, le phénomène de délaminage (fissuration à l'interface entre plis d'orientations différentes) est un des modes d'endommagement prédominants dans les matériaux composites. Le développement du délaminage provoque une baisse progressive de la raideur suivie de la rupture totale de la structure [Tsai, 2001].

La rupture sous chargement statique du matériau composite a été largement étudiée par plusieurs auteurs. Par contre, le comportement en dynamique du phénomène de fissuration de ce type de matériau n'a pas encore reçu suffisamment d'attention.

Par ailleurs, les essais normalisés pour l'étude du phénomène de délaminage du matériau composite sont très nombreux. Parmi ceux-ci, l'essai de type DCB (Double Cantilever Beam) caractérise le mode I de délaminage, l'essai de type ENF (End-Notched Flexure) et l'essai de type ELS (End-Loaded Split) sont utilisés pour étudier le mode II. Le mode mixte est ciblé par les essais: l'essai SCB (Single Cantilever Beam), l'essai MMF (Mixed-Mode Flexure), l'essai CLS (Cracked-Lap Shear), l'essai MMB (Mixed Mode Bending), l'essai ADCB (Asymmetric Double Cantilever Beam). Le choix de l'essai satisfaisant pour l'étude du phénomène de délaminage dynamique n'est donc pas toujours facile.

Grady et Sun [Grady 1986] ont réalisé des essais d'impact sur le matériau composite T300/934 carbone/époxy. Le mode II dominant de délaminage a été observé par une caméra grande vitesse. La modélisation en 2 dimensions par éléments finis a été utilisée afin de décrire l'impact et de calculer le taux de restitution d'énergie au moment d'amorçage de la fissure. [Cairns 1992] ont testé le phénomène de délaminage en statique et en dynamique avec les essais des éprouvettes de type ENF (end-notched flexure). Lors d'essais de délaminage en dynamique, la vitesse de propagation de la fissure n'a pas été mesurée et le taux de restitution d'énergie a été calculé par une approche en statique.

Aliyu et Daniel [Aliyu 1985] ont utilisé des éprouvettes de type DCB (Double cantilever beam) pour étudier le mode I de délaminage du matériau composite unidirectionnel AS4/3501-6 carbone/époxy. La vitesse de propagation de la fissure atteint 51mm/s. Ils ont montré que la résistance au délaminage augmente avec la vitesse de fissuration. Yaniv et Daniel [Yaniv 1988] ont utilisé les essais de type DCB modifié qui produisent une vitesse de fissuration allant jusqu'à 26m/s et ont trouvé que la résistance de délaminage augmente proportionnellement avec la vitesse de fissuration jusqu'à 1m/s et à partir de cette vitesse de fissuration, la résistance diminue avec l'augmentation de la vitesse de fissuration. Pour les travaux d'Aliyu et Daniel [Aliyu 1985] et de Yaniv et Daniel [Yaniv

1988], les éprouvettes ont été sollicitées à l'aide d'une machine de type Instron et les calculs réalisés ont été basés sur la théorie des poutres.

Lambros et Rosakis [Lambros 1997, 01] ont étudié le phénomène de délaminage sous l'effet d'un impact à faible vitesse pour un matériau composite fragile, quasi-isotrope, carbone/époxy. La fissuration a été observée par des moyens optiques s'appuyant sur la photographie à grande vitesse. La vitesse de propagation de la fissure trouvée pourrait montrer jusqu'à 1500m/s. En revanche, les paramètres intrinsèques de la fissuration comme le taux de restitution d'énergie ou les facteurs d'intensité de contraintes ne sont pas déterminés. Dans un autre travail de Lambros et Rosakis [Lambros 1997, 02] la fissuration à grande vitesse a été analysée sur un matériau composite unidirectionnel carbone/époxy par la méthode de flexion trois points. La surface de la plaque de composite a été observée en appliquant la méthode CGS qui permet de récupérer les signaux de réflexion des rayons incidents. Les signaux récupérés ont été analysés afin de calculer le déplacement hors-plan de la surface de l'éprouvette pendant l'essai. Grâce aux valeurs identifiées du déplacement dans la troisième direction, le facteur d'intensité de contraintes a été calculé en appliquant le formulaire présenté dans le travail de Liu et al [LIU]. La variation du facteur d'intensité de contraintes au cours de l'essai a été obtenue. La vitesse de propagation de la fissure allant jusqu'à 900m/s, des effets dynamiques importants ont été observés et enregistrés.

Afin de trouver la relation entre la ténacité et la vitesse de propagation de fissure, Guo et Sun [Guo 1998] ont utilisé des éprouvettes de type DCB normées pour générer une vitesse élevée de propagation de fissure en mode I d'un matériau composite à matrice polymère. Ils ont montré que la ténacité dynamique, selon le mode I du matériau composite unidirectionnel AS4/3501-6 est quasiment égale à celle en statique. Cette remarque n'est valable que pour une vitesse de propagation de fissure inférieure à 200m/s.

Tsai [TSAI 2001] a publié une méthode permettant de calculer le taux de restitution d'énergie pour les essais sur matériau composite unidirectionnel. Cette méthode a été appliquée à deux types de matériaux composites: le composite verre/époxy S2/8553 et le composite carbone/époxy AS4/3501-6. Leurs propriétés caractéristiques sont présentées dans le tableau I.2.

Composite unidirectionnel verre/époxy S2/8553							
E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	E_3 (GPa)	G_{12} (GPa)	G_{13} (GPa)	ν_{12}	ν_{13}	ρ (kg/m ³)
43,3	12,7	12,7	4,46	4,46	0,29	0,29	2100
Composite unidirectionnel carbone/époxy AS4/3501-6							
E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	E_3 (GPa)	G_{12} (GPa)	G_{13} (GPa)	ν_{12}	ν_{13}	ρ (kg/m ³)
142	10,3	10,3	7,2	7,2	0,27	0,27	1580

Tableau I.2: Propriétés caractéristiques des matériaux composites

Cette méthode de calcul est basée sur le couplage entre la mesure expérimentale avec le calcul par éléments finis. L'essai de fissuration est réalisé en utilisant des éprouvettes

de type ENF (278mm de longueur, 12,7mm de largeur et 11,6mm d'épaisseur). L'éprouvette a été chargée à une vitesse de déplacement égale à 0,025mm/s. La propagation de la fissure est suivie par un système de 16 résistances collées tout au long de la direction de fissuration. Les résistances sont en aluminium et elle présentent une largeur de 0,6mm. Elles sont placées à une distance de 3mm l'une par rapport à l'autre (figure I.10).

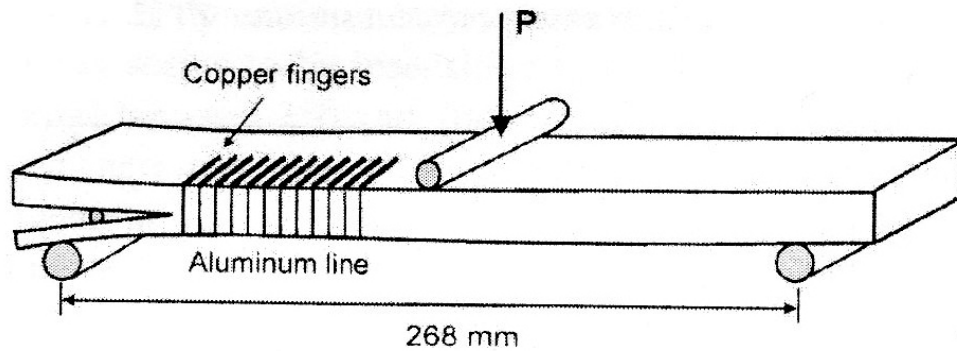


Figure I.10: Essai de flexion en 3 points [TSAI 2001]

La fissuration des essais est ensuite simulée en deux dimensions par éléments finis en utilisant les données qui sont mesurées pendant les essais (longueur de la fissure, effort). Le taux de restitution d'énergie est calculé à chaque pas de propagation de la fissure par la méthode dite « modified crack closure ».

Les résultats de calcul de taux de restitution d'énergie de deux types de matériau composite sont présentés sur la figure I-11 et la figure I-12.

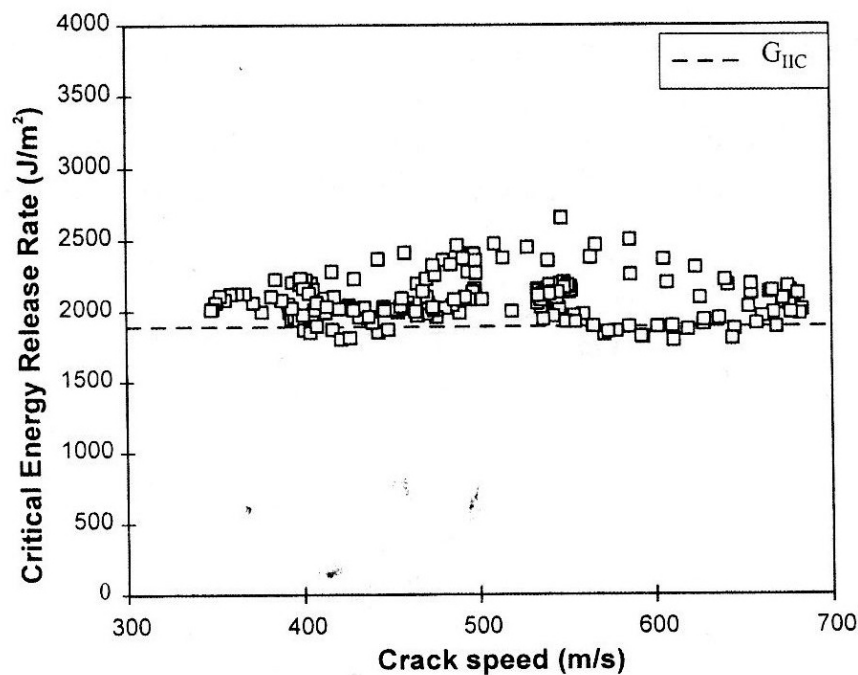


Figure I.11: Taux de restitution d'énergie en mode II des essais sur composite verre/époxy S2/8553 [TSAI 2001]

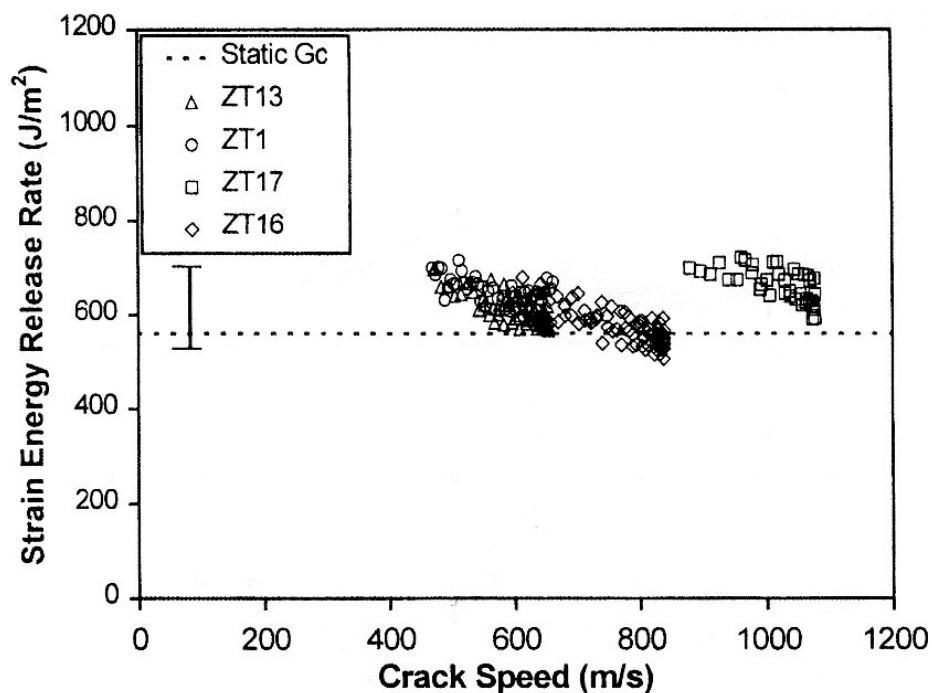


Figure I.12: Taux de restitution d'énergie en mode II des essais sur carbone/époxy AS4/3501-6 [TSAI 2001]

La vitesse maximale de propagation mesurée est de 700m/s pour le composite verre/époxy et de 1200m/s pour le composite carbone/époxy. Les résultats du travail ont montré un taux de restitution d'énergie en mode II stable jusqu'à la vitesse maximale mesurée. Pour les deux types du composite utilisés, le taux de restitution d'énergie n'est pas affecté de manière significative par la vitesse de propagation de la fissure.

Dans un autre travail, afin d'étudier le phénomène de fissuration en dynamique en mode mixte pour les essais de type MONF (Mixed-mode Opening Notch Flexure) (figure I.15) Wosu et al. [WOSU 2005] ont utilisé les formulaires de Hashemi [HASHEMI 1990] développés pour les essais de type ELS (End-Loaded Split) (figure I.13) et les essais de type ENF (End-Notched Flexure) (figure I.14) en quasi-statique.

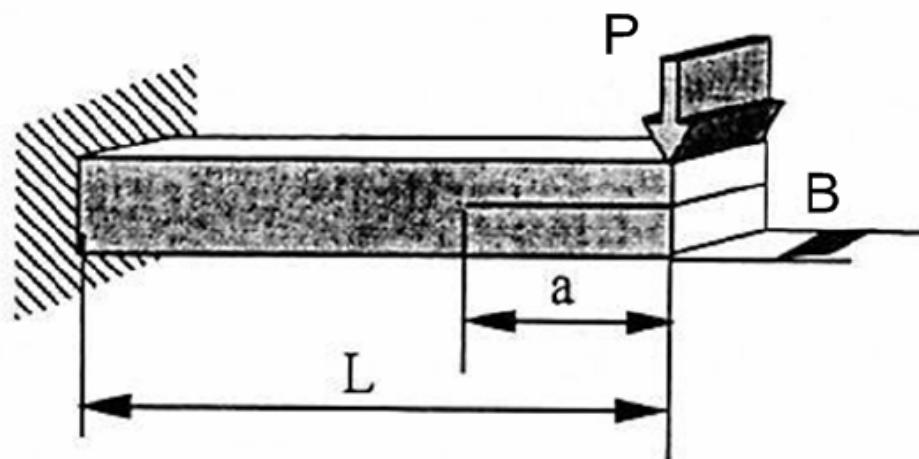


Figure I.13: Essai End Load Split (ELS)

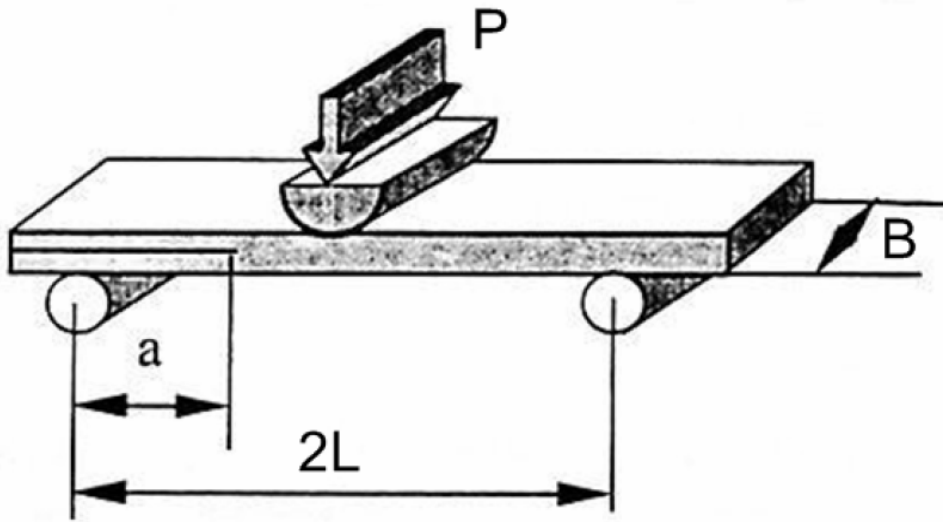


Figure I.14: Essai End Notched Flexure (ENF)

Le travail de Hashmi utilise la théorie des poutres pour une plaque symétrique possédant une pré-fissure. Il a montré que le taux de restitution d'énergie selon le mode I et le mode II (correspond à chaque type de essai utilisé) peuvent être calculés par:

$$G_I^{ELS} = \frac{1}{4} \frac{P^2 (a + \chi h)^2}{BE_{II}I} \quad \text{Eq I-1}$$

$$G_{II}^{ENF} = \frac{3}{16} \frac{P^2 (a + \chi h)^2}{BE_{II}I} \quad \text{Eq I-2}$$

où:

a est longueur de la fissure

I est le moment d'inertie, $I = \frac{Bh^3}{12}$

χ est coefficient qui prend en compte l'effet de rotation, l'effet de déflexion autour de la tête de fissure. Ce coefficient est calculé par:

$$\chi = \left[\frac{E_{II}}{11G_{I3}} \left(3 - 2 \left(\frac{\Gamma}{1 + \Gamma} \right)^2 \right) \right]^{1/2} \quad \text{et} \quad \Gamma = \frac{1,18 \sqrt{E_{II}E_{22}}}{G_{I3}}$$

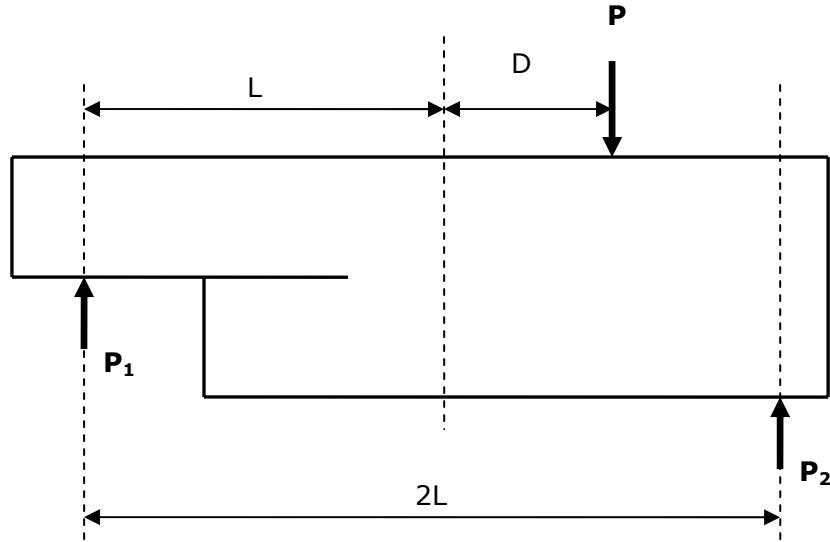


Figure I.15: Essai Mixed-mode Opening Notch Flexure (MONF)

La force appliquée est définie par [ZHANG 1999]:

$$P_I = \frac{P_m(L-D)}{2L}$$

$$P_2 = \frac{P_m(L+D)}{2L}$$

où: P_m est la force critique qui correspond au pic de la courbe force-déplacement à l'instant t_m du temps, $P_m(t) = E_0 A \varepsilon_t(t_m)$. D définit la position où le chargement est appliqué.

En remplaçant P de l'équation I.1 et de l'équation I.2 par $P_m(t)$, il a trouvé le taux de restitution d'énergie pour chacun des deux modes de fissuration:

$$G_I^m = \frac{1}{4} \frac{(E_0 A \varepsilon_t(t_m))^2 (a + \chi h)^2 (L-D)^2}{E_{II} B^2 h^3 L^2} \quad \text{Eq I-3}$$

$$G_{II}^m = \frac{9}{16} \frac{(E_0 A \varepsilon_t(t_m))^2 (a + \chi h)^2 (L+D)^2}{E_{II} B^2 h^3 L^2} \quad \text{Eq I-4}$$

Wosu et al. [WOSU 2005] ont constaté que le taux de restitution d'énergie total de l'essai MONF est égal à la somme de ces deux termes selon deux modes de fissuration constitués:

$$G_T = G_I^m + G_{II}^m \quad \text{Eq I-5}$$

Ce travail a été effectué pour un matériau composite carbone/époxy unidirectionnel. Les éprouvettes de type MONF ont été fabriquées et l'essai a été réalisé en utilisant un dispositif de barres de Hopkinson amélioré (figure I.16).

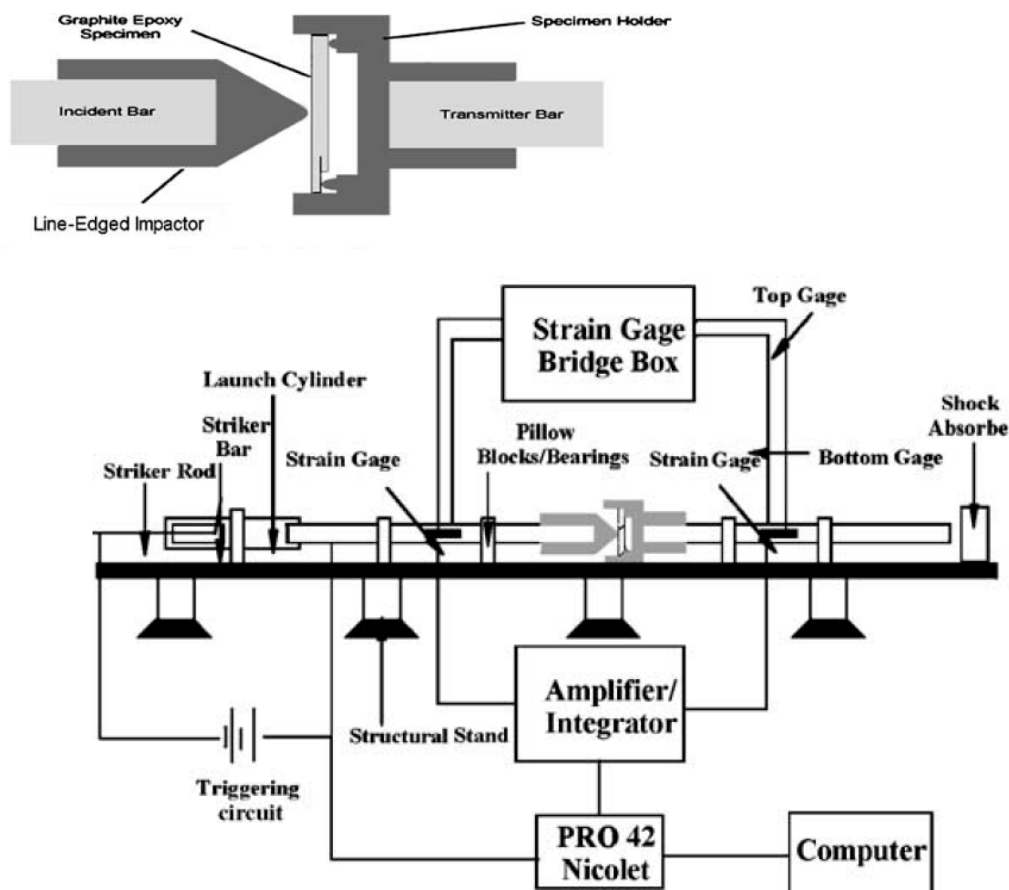


Figure I.16: Essai MONF utilisant la barre de Hopkinson améliorée

Les résultats de ce travail a montré qu'à faible énergie d'impact, le taux de restitution d'énergie est presque constant et à haute énergie d'impact, le taux de restitution d'énergie diminue lentement par rapport à la vitesse de fissuration et reste égal à la valeur critique de la propagation en grande vitesse de fissuration.

Enfin, au sein de notre laboratoire (LM3 à l'époque, PIMM aujourd'hui), le travail de Stéphanie Pardo [PARDO 2001] et le travail de Gregor HUG [HUG 2005] ont abordé le phénomène de délaminage dynamique de matériaux composites unidirectionnel en mode I. Les éprouvettes utilisées sont de type DCB. Afin de solliciter des échantillons à des vitesses comprises entre 0,01m/s et 20 m/s, une machine de traction hydraulique à grande vitesse de marque SCHENK a été utilisée. A l'aide d'un système tube-piston cette machine assure une vitesse de déplacement contrôlée. La capacité de cette machine permet d'atteindre des efforts jusqu'à 50kN.

Stéphanie Pardo [PARDO 2001] et Gregor HUG [HUG 2005] ont fondé leurs analyses sur la méthode de la complaisance pour déterminer le taux de restitution d'énergie de leurs matériaux. Leurs démarches débutent par un bilan d'énergie pour l'essai en quasi-statique.

Le bilan énergétique lors d'une avancée de la fissure donnée dans les conditions d'un chargement quasi-statique par :

$$G_I = \frac{1}{b} \frac{\partial W_p}{\partial a} = \frac{1}{b} \left(\frac{\partial W_e}{\partial a} - \frac{\partial W}{\partial a} \right)$$

où W_p est l'énergie potentielle (ou l'énergie de propagation de la fissure), W_e le travail des efforts et W l'énergie de déformation.

La méthode de la complaisance est utilisée pour la détermination du taux de restitution d'énergie à rupture G_{IC} :

$$G_{IC} = \frac{P_c^2}{2b} \frac{dC}{da}$$

où :

P_c est la force externe critique de chargement (début de la propagation de fissures)

C la complaisance, b la largeur de l'éprouvette

$\frac{dC}{da}$ est la variation de la complaisance pour une extension de la fissure

La complaisance de la structure est calculée par l'expression de Wilkins [Wilkins 1982] dans la théorie des poutres qui permet de l'exprimer en fonction de la longueur de la fissure a , telle que :

$$C = ka^n$$

où k et n sont les coefficients qui sont déterminés expérimentalement pour des éprouvettes DCB avec des longueurs de fissures variables. La complaisance C mesurée pour de faibles ouvertures d'éprouvettes est utilisée dans un graphe log-log tel que :

$$\log C = n \log a + \log k$$

L'expression de G_{IC} est évaluée :

$$G_{IC} = \frac{n P_c^2 \delta_c}{2ab}$$

Cette expression est valable en quasi-statique. Pour le cas en grande vitesse, une analyse énergétique complète doit tenir compte de l'énergie cinétique totale, E_c , l'expression du taux de restitution d'énergie en mode I s'exprime alors par :

$$G_I = \frac{1}{b} \frac{\partial W_p}{\partial a} = \frac{1}{b} \left(\frac{\partial W_e}{\partial a} - \frac{\partial W}{\partial a} - \frac{\partial E_c}{\partial a} \right)$$

L'énergie cinétique peut être exprimée d'après la théorie des poutres d'Eulers-Bernoulli. Elle est donnée par :

$$E_c = \frac{1}{2} \rho A \int_0^a \dot{\delta}^2 dx$$

où A est la section de l'éprouvette ($A = b * h$), ρ la densité du matériau, a la longueur de la fissure, $\dot{\delta}$ la vitesse d'ouverture de l'éprouvette.

Smiley et al. [Smiley 1987] déterminent l'énergie cinétique à partir de la théorie des poutres :

$$\frac{\partial E_c}{b \partial a} = \frac{33 \rho h \dot{\delta}^2}{280}$$

La méthode utilisée a permis de calculer l'évolution du taux de restitution d'énergie pendant les essais. Stéphanie Pardo [PARDO 2001], Gregor HUG [HUG 2005] sont arrivés aux conclusions suivantes :

- L'étude du délaminage a montré que le taux de restitution d'énergie critique à l'amorçage et lors de la propagation de la fissuration est insensible à la vitesse d'ouverture. Le mécanisme de fissuration est décrit : les fissures s'amorcent dans la zone riche en fond de fissure, puis se propagent par décohésion des fibres et de la matrice. Ces mécanismes sont typiques d'un délaminage de composite à matrice fragile.
- La dépendance en vitesse du taux de restitution d'énergie d'amorçage est caractérisée de diverses façons par la mécanique de la rupture. Il est important de choisir avec attention le paramètre à utiliser pour caractériser la "vitesse". Le plus réaliste serait de quantifier l'évolution du champ de contrainte ou de déformation en fond de fissure, mais les auteurs affirment que ces données sont difficilement accessibles. Le plus simple serait d'exprimer G_{IC} en fonction de la vitesse d'ouverture de l'éprouvette. Cependant cette quantité globale ne représente pas les conditions de chargement en fond de fissure. En effet, la vitesse d'ouverture peut être constante pendant toute la durée du test, alors que la vitesse de chargement en fond de la fissure décroît lors de la propagation des fissures.

En résumé, les études du phénomène de délaminage en dynamique des matériaux composites dans la littérature ont présenté deux approches principales: l'approche par élément finis utilisant les données mesurées directement, l'approche utilisant les modèles en quasi-statique appliqués aux essais en dynamique. L'objectif final est toujours de pouvoir déterminer l'évolution du taux de restitution d'énergie pendant l'essai en dynamique. Ces deux approches ont montré une relativement bonne performance pour étudier le phénomène de fissuration en dynamique de matériaux composites unidirectionnels. Etant données les vitesses de propagation mises en jeu et la limite des approches présentées, la difficulté est toujours la capacité à mesurer exactement la

longueur de fissure pendant l'essai dynamique. Aucune des méthodes de mesure n'est complètement satisfaisante.

De plus, pour les essais de délaminage dynamique, il est difficile d'atteindre une vitesse élevée avec les éprouvettes de type DCB parce que la partie qui est devant la pointe de fissure ne se déforme pas et ne subit aucun chargement au cours de l'essai (figure I.17). En revanche, les essais de type ENF, CLS avec lesquels l'éprouvette entière est déformée au cours de la propagation de la fissure, permet stocker beaucoup plus d'énergie (figure I.14, I.15). Cette énergie emmagasinée au sein du matériau est ensuite libérée par la propagation de la fissure. Il en résulte que ces types d'essais permettent produire une vitesse de fissuration plus élevée.

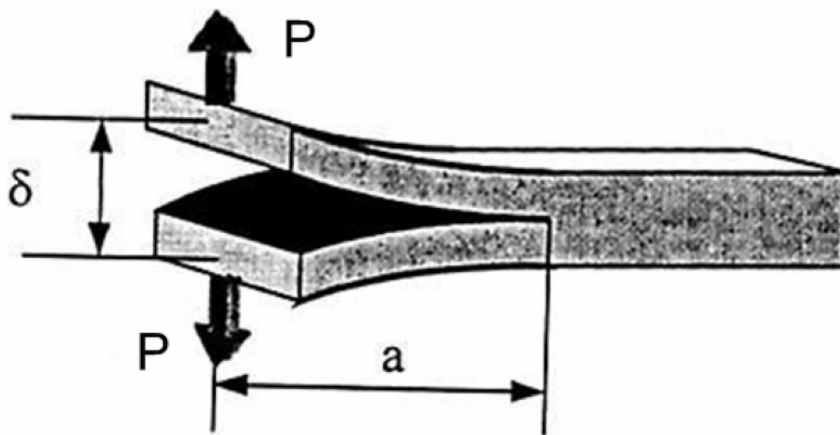


Figure I.17: Essai Double Cantilever Beam (DCB)

I.7. L'objectif de la thèse:

L'objectif principal de cette thèse est de développer une méthodologie permettant de mesurer la longueur de la fissure et de déterminer l'évolution du taux de restitution d'énergie pendant l'essai de délaminage dynamique en mode II des matériaux composites unidirectionnels choisis en fonction de la vitesse de propagation de la fissure. C'est ce que nous appellerons loi d'évolution. Les points qu'il nous paraît souhaitable d'aborder sont:

- Choisir un type d'essai et fabriquer les éprouvettes afin de pouvoir étudier le mode II de fissuration,
- Proposer et comparer des méthodes permettant de mesurer la longueur de fissure pendant l'essai dynamique ainsi que la vitesse de propagation,
- Caractériser complètement le phénomène de délaminage en dynamique,
- Déterminer des approches permettant de mesurer l'évolution du taux de restitution d'énergie par rapport à la vitesse de propagation de la fissuration,
- Déterminer une loi caractérisant cette évolution.

Deux campagnes d'essais de délaminage en dynamique ont été effectuées afin de comparer deux types du matériau composite unidirectionnel différents: carbone/époxy et verre/époxy.

Chapitre II:
Matériaux d'étude, approche et
moyens expérimentaux

II.1. Introduction

Ce deuxième chapitre commence par le choix du type d'essai de délaminage dynamique. Une large réflexion a été menée concernant le phénomène de délaminage présent dans plusieurs types d'essais normés du délaminage afin de pouvoir décider du type d'essais utilisé pour cette thèse. Les conditions de travail et les essais disponibles au laboratoire sont pris en compte dans cette réflexion.

La deuxième partie de ce chapitre est dédiée à la présentation de la caméra rapide et de la machine de traction qui sont utilisées pour réaliser les essais. La machine de traction permet de réaliser des essais de délaminage à grande vitesse, tandis que la caméra rapide pourra filmer la surface de l'éprouvette avec un très grand nombre d'images par une unité de temps. De plus, ces deux machines permettent d'accéder aux mesures de la force et du déplacement en dynamique.

La technique de mesure de champs par corrélation d'images est ensuite étudiée. Cette technique de mesure permet de mesurer les champs de déplacement de la zone locale qui est filmée par la caméra rapide. L'utilisation de cette technique de mesure donne accès à la connaissance de l'évolution de la zone autour de la pointe de la fissure pendant l'essai.

Enfin, deux campagnes d'essais correspondant à deux types de matériau composite unidirectionnel sont réalisées. Les résultats des essais seront présentés et commentés. Les résultats présentés dans ce chapitre constituent la base du développement des travaux présentés aux chapitres III et IV.

II.2. Type des essais

Cette thèse se donne pour objectif d'étudier le phénomène de délaminage en dynamique de matériaux composites unidirectionnels. L'objectif ainsi fixé est nécessaire pour poser ensuite la question de choisir le type d'essai utilisé. C'est l'objectif de ce paragraphe.

II.2.1. Essais de délaminage

Rappelons ici que les stratifiés présentent un problème propre aux matériaux réalisés par stratification: la rupture inter-laminaire. Ce mécanisme de rupture se caractérise par un décollement ou une décohésion entre les plis du stratifié. Il est couramment appelé "délaminage".

Le phénomène de délaminage en statique en mode I, mode II et mode mixte (I, II) du matériau composite unidirectionnel a été largement étudié. Les efforts pour normaliser les tests de délaminage sont menés par trois organisations: l'American Society for Testing and Materials (ASTM), l'European Structural Integrity Society (ESIS), et le Japanese Industrial Standards Organisation (JISO). Les normes internationales sont développées par l'International Standard Organisation (ISO) qui examine les normes soumises par l'ASTM et la JISO. L'ESIS ne publie pas de normes mais elle fournit des protocoles d'essai pris en considération par l'ISO [O'BRIEN 1998]. Les normes concernent principalement les composites à matrice polymère et à renfort de fibres longues.

Les éprouvettes utilisées sont nombreuses en géométrie et en mode de fissuration. On peut distinguer 3 grandes familles d'essais selon le mode de fissuration:

Pour le mode I: l'essai DCB (Double Cantilever Beam), l'essai WIF (Wedge-Insert Flexure). Le mode d'ouverture est le mode de délaminage le plus critique parce qu'il nécessite le moins d'énergie.

Pour le mode II: l'essai ENF (End-Notched Flexure), l'essai ELS (End-Loaded Split), l'essai SENF (Stabilized End Notched Flexure), l'essai 4ENF (Four Point End Notched Flexure). La longueur de délaminage en mode II est très difficile à mesurer visuellement parce que l'ouverture de fissure produite est petite.

Pour le mode mixte: l'essai SCB (Single Cantilever Beam), l'essai MMF (Mixed-Mode Flexure), l'essai CLS (Cracked-Lap Shear), l'essai MMB (Mixed Mode Bending), l'essai ADCB (Asymmetric Double Cantilever Beam), l'essai AMMF (Asymmetric Mixed Mode Flexure). La propagation du délaminage dans les structures composites est généralement due à l'association des modes élémentaires de rupture. Le mode mixte le plus couramment rencontré est le résultat d'une combinaison des deux modes les plus dangereux, c'est-à-dire le mode I et le mode II [MEZIERE 2000]. Par conséquent, il fait

l'objet de plusieurs travaux de recherche, y compris au sein des organismes de normalisation. A notre connaissance, le mode mixte I+III et le mode mixte II+III ne sont pas envisagés à la normalisation dans un proche avenir.

Malgré les normes et protocoles des essais de délaminage, la mesure du taux de restitution d'énergie n'est pas sans ambiguïté. De plus, le phénomène de rupture inter-laminaire dans les matériaux composites soumis à des sollicitations rapides a reçu moins d'attention [Tsai, 2001].

II.2.2. Choix du type d'essai

Conformément à l'objectif de la thèse, laquelle s'engage à étudier le phénomène de délaminage en dynamique des matériaux composites unidirectionnels, et en nous basant sur le travail bibliographique du phénomène de délaminage du matériau composite, ainsi que sur les dispositifs expérimentaux du laboratoire, nous avons choisi la géométrie de type d'essais CLS (Cracked Lap Shear) pour fabriquer les éprouvettes d'essais qui seront utilisées pour les essais de fissuration à vitesse élevée. Ceci fait suite à une première étude réalisée au laboratoire sur les mêmes matériaux soumis au délaminage dynamique en mode I [HUG 2005].

II.2.3. Essai CLS statique

L'essai CLS (Cracked-Lap Shear) a été conçu pour étudier le phénomène de fissuration en mode mixte. Une simple sollicitation en traction uni-axiale permet de faire propager la pré-fissure créée pendant l'échantillonnage des éprouvettes [SZEKRENYES 2003]. En effet, plusieurs chercheurs des dernières années ont utilisé ce type d'essais CLS pour leurs études de caractérisation de la fissuration du matériau composite unidirectionnel [IREMAN 1996] [KYONG 1997] [SZEKRENYES 2003].

L'essai CLS se fonde sur la différence relative de déplacement de deux parties de l'éprouvette que l'on a nommé le "bras libre" et le "bras chargé" et qui sont séparés par la pré-fissure. Le mouvement relatif d'un bras par rapport à l'autre engendre l'effet de cisaillement du matériau selon le plan contenant la fissure (figure II.1).

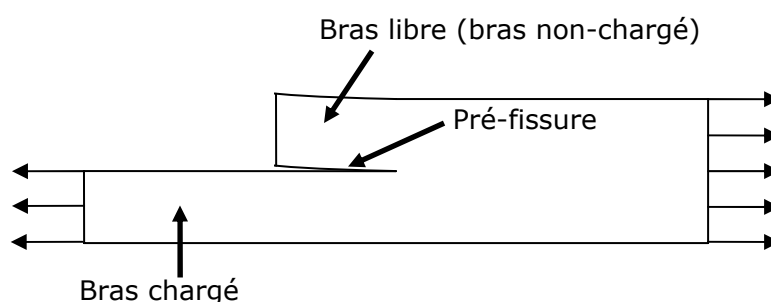


Figure II.1: Essai CLS (Cracked Lap Shear)

Du fait de la présence de la pré-fissure, l'éprouvette de type CLS n'est pas symétrique. L'effort de traction génère donc un moment de flexion sous l'effet de l'asymétrie. La flexion induite fait donc apparaître un mode d'ouverture de fissuration (mode I).

La méthode des essais Cracked-Lap Shear (CLS) a été conçue pour un chargement en quasi-statique, et son extension au domaine des vitesses élevées ou domaine dynamique reste difficile. En quasi-statique, l'éprouvette est fixée sur le mors supérieur d'une machine de traction, et chargée par un deuxième mors à l'autre extrémité. Le chargement est appliqué de façon suffisamment lente pour que l'éprouvette reste toujours en position d'équilibre entre les deux mors. La transmission de l'effort dans le matériau est continue et constante.

II.2.4. Essai de CLS en dynamique

Lorsqu'on augmente la vitesse de traction, l'effet de transmission de l'onde de choc intervient depuis le mors inférieur vers le mors supérieur. L'onde de choc qui se propage vers le mors supérieur est réfléchiée en partie tandis qu'une autre partie est transmise au bâti transversal de la machine d'essais. Il apparaît un phénomène de propagation alternative de l'onde de choc au sein du matériau de l'éprouvette. La durée de l'essai devient très courte et en présence de l'effet d'asymétrie géométrique, le mouvement de rotation induite intervient dès le début de l'essai et s'amplifie jusqu'à la fin de l'essai correspondant à une rupture totale de structure. La figure II.2 précise la direction verticale de chargement pendant l'essai CLS.

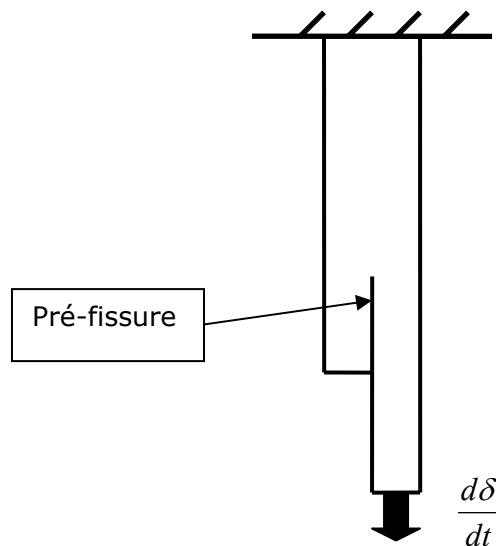


Figure II.2: Essai CLS à vitesse élevée

Du point de vue énergétique, il faut considérer l'effet cinétique, l'effet dynamique présent au cours des essais CLS en dynamique. Ces deux éléments participent à l'amorçage de la pré-fissure ainsi qu'à la propagation de la fissure.

En effet, l'effet cinétique se présente sous forme d'une force d'inertie et dépend fortement de la masse de matériau participant au mouvement. Au cours de la propagation de la fissure, le pourcentage de masse de matériau en mouvement varie avec la longueur de la fissure. Cet effet devra être pris en compte dans notre étude du délaminage dynamique.

De plus, l'onde de choc qui se propage dans le matériau influence aussi et facilite l'amorçage de la propagation de la pré-fissure. La fréquence d'apparition de l'onde à la pointe de la fissure dépend du matériau testé, de la géométrie de l'éprouvette ainsi que du matériau constituant les mors de la machine d'essai. Pendant la fissuration, la résistance de la fissure est fortement influencée par cet effet.

Ces deux éléments principaux du phénomène de délaminage en dynamique ont été étudiés dans le cadre de cette thèse afin de mieux comprendre les phénomènes physiques et les mécanismes. Les facteurs caractéristiques du délaminage dynamique des matériaux composites unidirectionnels seront calculés en prenant en compte la participation de ces deux éléments de manière explicite ou implicite selon le cas.

II.3. Matériaux de l'étude

Nous présentons ici les informations générales relatives aux deux types de matériau composite unidirectionnel utilisés dans le cadre de cette thèse. En effet, le comportement mécanique en rupture d'un matériau composite dépend fortement de ses constituants, de ses propriétés intrinsèques, de la méthode de fabrication, etc.

II.3.1. Le composite unidirectionnel carbone/époxy

Le matériau composite unidirectionnel HexPly® UD/M21/35%/268/T700GC du fournisseur Hexcel Composites [Hexcel composite] a été choisi parce qu'il présente des particularités facilitant la fissuration selon la direction de la longueur de l'éprouvette. Le renfort unidirectionnel et son pourcentage par rapport à la résine contribuent à la grande résistance dans le sens longitudinal et au faible coefficient de Poisson.

Le produit pré-imprégné UD/M21/35%/268/T700GC est utilisé pour fabriquer le caisson central de l'A380, le plus récent modèle d'avion fabriqué par Airbus. L'A380 est le premier avion de ligne qui possède un caisson central de voilure en fibre de carbone, offrant une résistance à la traction supérieure et permettant de réaliser un gain de masse évalué à deux tonnes.

A. Les propriétés physiques des composants du composite UD M21/T700GC

Le pré-imprégné UD/M21/35%/268/T700GC est un stratifié à base de résine époxy HexPly® M21 renforcé par un tissu de fibres longues de carbone T700. La matrice est une résine de polymère thermodurcissable présentant une température de réticulation de 180°C. La matrice HexPly® M21 possède de hautes performances mécaniques pour le choc et une bonne tolérance à l'endommagement. Elle est utilisée dans les structures primaires de l'avion.

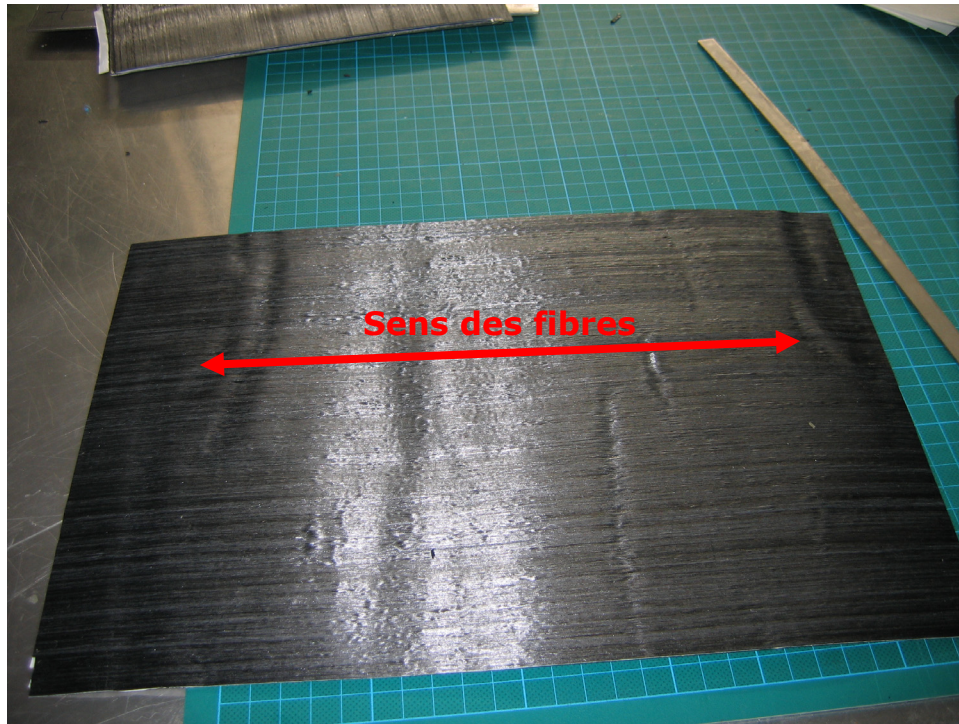


Figure II.3: Produit pré-imprégné carbone/époxy UD M21/T700

Le produit pré-imprégné a une dimension de 300mmx300mm (figure II.1). Il se présente sous forme de feuilles minces d'une épaisseur de 0,262mm. Les fibres sont en carbone et unidirectionnelles. La masse volumique ρ_f des fibres est de 1,8 g/cm³ et celle de la matrice ρ_m est de 1,28 g/m³. La masse volumique d'une feuille de pré-imprégné est de 1,58 g/cm³.

B. Mise en œuvre du matériau composite

Après avoir été découpés selon les dimensions du moule élaboré, les 12 feuilles de pré-imprégné sont drapées dans le moule. Un film en téflon antiadhésif d'épaisseur 100µm est coupé dans des dimensions de 50mm x 300mm et placé entre le 6^{ème} pli et le 7^{ème} pli. Le but est de créer une pré-fissure d'une longueur de 50mm, selon la direction longitudinale des fibres.

La cuisson a été réalisée pendant cinq heures sous une pression de 5 bars et une température de 150°C. Sous l'action de la chaleur, la résine redevient fluide, puis durcit pour obtenir la forme finale. La masse volumique du produit final ρ est de 1,38 g/cm³.

Les propriétés du stratifié sont précisées dans le tableau II.1.

E_1 (N/m ²)	E_2 (N/m ²)	E_3 (N/m ²)	η_{12}	η_{13}	η_{23}	G_{12} (N/m ²)	G_{13} (N/m ²)	G_{23} (N/m ²)
151E9	8,2E9	8,2E9	0,35	0,35	0,35	4,6E9	4,6E9	4,6E9

Tableau II.1: Propriétés du stratifié UD carbone/époxy M21/T700

La figure II.4 présente la plaque de matériau composite unidirectionnel après la sortie du moule de cuisson. La bande de film en téflon apparaît en couleur rouge. Les six premières couches de pré-imprégné sont plus courtes de 30mm par rapport aux six dernières couches afin de permettre de coller ensuite des talons d'éprouvette.

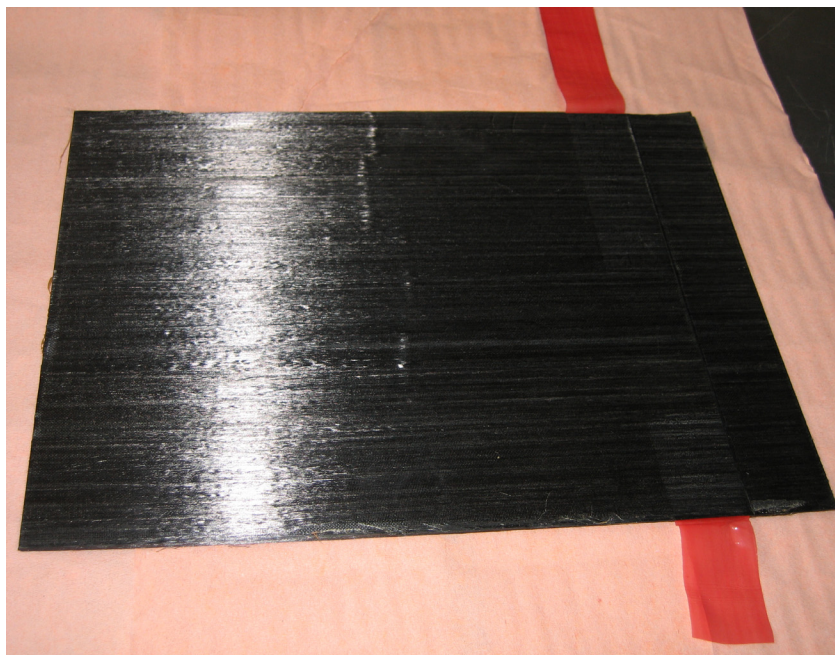


Figure II.4: Produit final après sortie de cuisson.

II.3.2. Le matériau composite unidirectionnel verre/époxy

Dans l'objectif de cette thèse, un deuxième stratifié typique et bien connu a été choisi comme matériau d'étude: un composite unidirectionnel verre/époxy, résine d'époxy renforcée par des fibres de verre de type R. Le matériau a été mis en forme à partir de pré-imprégné, présentant une fraction volumique de 60%. Il n'y a pas d'additif et la densité des plis pré-imprégnés est de 160g/m^2 . Ses propriétés à l'état réticulé données par le fournisseur sont précisées dans le tableau II.2.

E1(GPa)	E2(GPa)	E3(GPa)	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}	G12(GPa)	G13(GPa)	G23(GPa)
42,5	14,6	14,6	0,11	0,11	0,11	5,38	5,38	4,93

Tableau II.2: Propriétés du matériau composite verre/époxy

Selon Tanaka [TANAKA 1973] le comportement de la résine du matériau composite est fragile et selon [KAELBLE 1973] la propriété viscoélastique de la résine de ce type de matériau composite n'est pas importante. Les propriétés de la résine sont fournies par le tableau II.3.

Module d'Young (GPa)	Coefficient de Poisson
3,9	0,41

Tableau II.3: Propriétés de la résine du matériau composite

Le renfort est constitué de fibres de verre de type R unidirectionnelles (R-800). Les fibres de verre sont souvent utilisées du fait de leur faible rapport prix/résistance. Les fibres sont élastiques et fragiles et leur diamètre observé sous MEB (Microscope

Electronique à Balayage) est de l'ordre de 10 μm . Le tableau II.4 indique les propriétés mécaniques de la fibre.

Module d'Young (GPa)	Coefficient de Poisson
73	0,28

Tableau II.4: Propriétés des fibres

Le matériau composite étudié est fabriqué par compression à chaud à partir de plis pré-imprégnés fournis par Composite Distribution à Nantes [VINCENT 1998]. Les plis pré-imprégnés unidirectionnels sont coupés selon la taille du moule 100mm x 220mm. La configuration est un empilement de 16 plis d'orientation identique. Le stratifié est élaboré dans le moule à 175°C sous une pression de 7 bars pendant une heure suivie par quatre heures à 190°C sans pression. La fabrication du matériau composite a été réalisée au Centre d'étude de matériaux plastiques au sein de la société Peugeot. Ce type de matériau composite a été utilisé dans le travail de Devaulx [DEVAULX 1998] et de Mamola [MAMOLA 1998] dans le cadre de leur projet de fin d'étude à l'ENSAM. A masse volumique du matériau est de 1952kg/m³.

Les observations de la microstructure du matériau composite ont été réalisées afin de vérifier les défauts apparus pendant la fabrication, tels que par exemple les dommages des plis extérieurs toujours en contact avec les surfaces du moule ou encore les porosités. Les plaques contenant un défaut ne sont pas utilisées. La figure II.3 présente un bon état de la microstructure du matériau. Les fibres sont bien parallèles et aucune porosité n'a été trouvée.

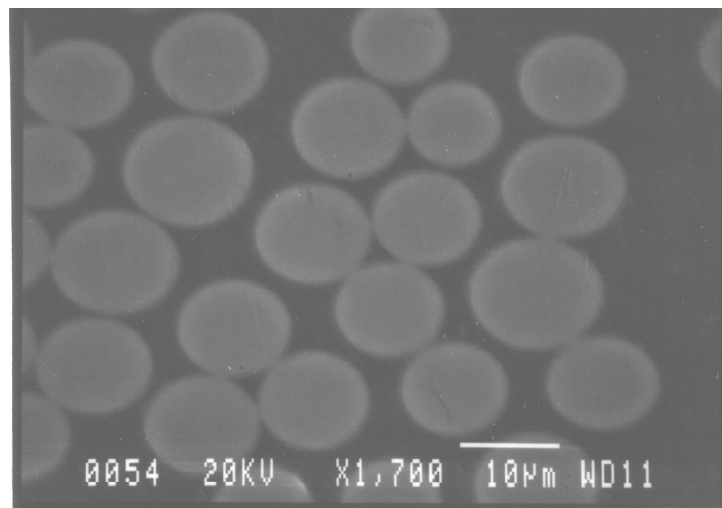


Figure II.5: Microstructure du composite verre/époxy

II.4. Machine d'essai de traction à grande vitesse

Le laboratoire de recherche PIMM est équipé d'une machine de traction à grande vitesse (TGV) de la marque Schenk Hydroplus VHS 5020. Le capteur de force piézo-électrique est d'une capacité de 50 kN. L'asservissement de la machine est assuré par un vérin hydraulique capable d'imposer une vitesse de déplacement pouvant théoriquement atteindre 20m/s. La machine est dotée d'un système de lancement de type tube-coulisseau. Ce système permet, sur une course de 135mm, d'atteindre la vitesse de consigne lors de la phase d'accélération du vérin préalable à mise en charge de l'échantillon (figure II.6). En fin de course, le tube et le coulisseau sont mis en contact et par conséquent le mouvement d'ensemble asservi permet la mise en tension de l'échantillon. La figure II.6 détaille le mécanisme de la machine de traction à grande vitesse.

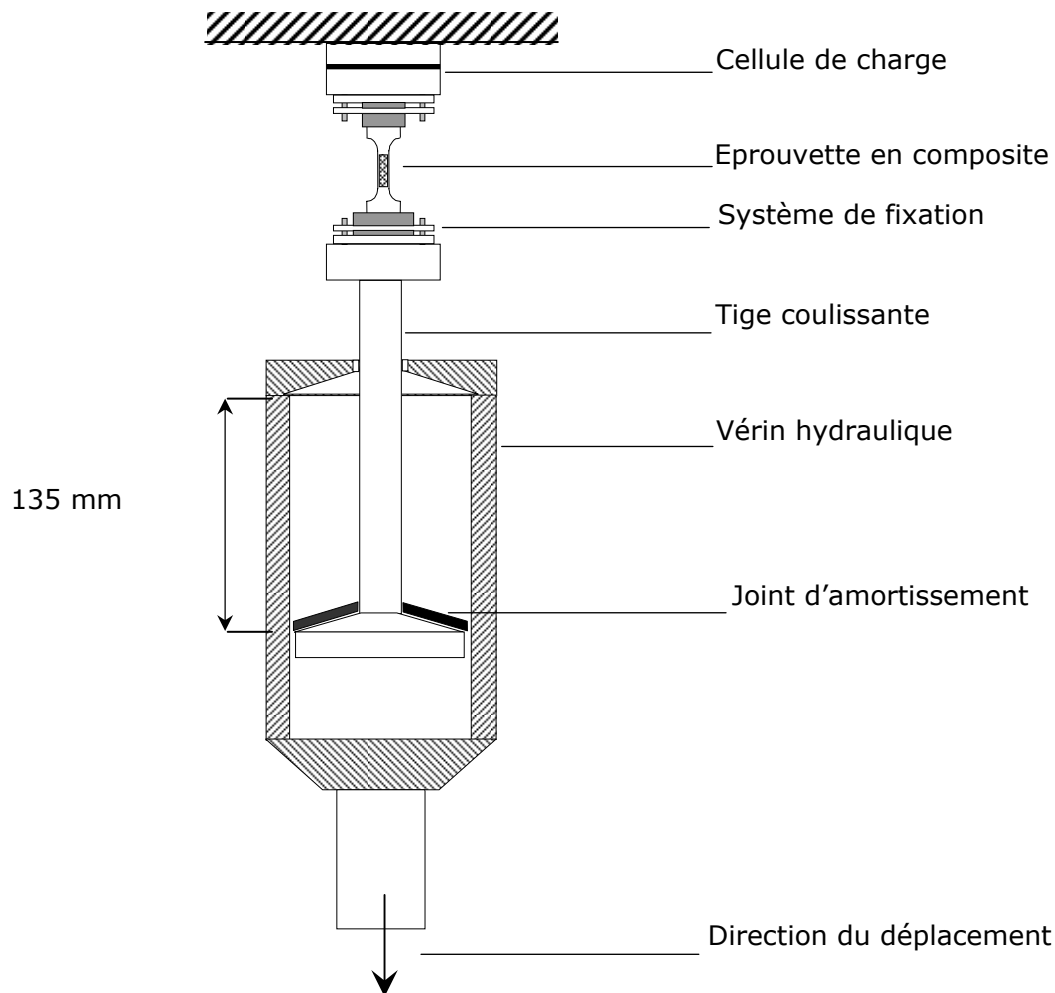


Figure II.6: Schéma synoptique de la machine de traction rapide.

La cellule de force, liée au bâti, se situe au-dessus de l'éprouvette. Le capteur de force a une capacité maximale de 50kN. L'asservissement de la machine est effectué en vitesse de déplacement du vérin hydraulique. Une fois l'essai lancé, la masse importante du vérin est accélérée à la vitesse commandée sur la course de 135mm, avant de frapper sur la tête de la tige coulissante. Au moment du contact, une onde de choc est transmise

à l'éprouvette après avoir passé le joint d'amortissement et le système de fixation du mors inférieur. Le capteur de force reçoit l'information en bout de ligne.

L'utilisation d'une machine hydraulique présente un avantage majeur inhérent au fait que la machine est alimentée en permanence par un groupe hydraulique. Ce dernier apporte l'énergie nécessaire pour assurer une continuité du chargement et, en particulier, une vitesse constante au cours d'un essai.

Cette machine de traction à grande vitesse a été choisie pour réaliser les essais de délaminage en dynamique des matériaux composites unidirectionnels. L'intérêt de cette machine est d'avoir une direction de chargement verticale qui convient à la direction longitudinale des fibres des matériaux composites et facilite le montage d'un essai de type CLS (Cracked-Lap Shear).

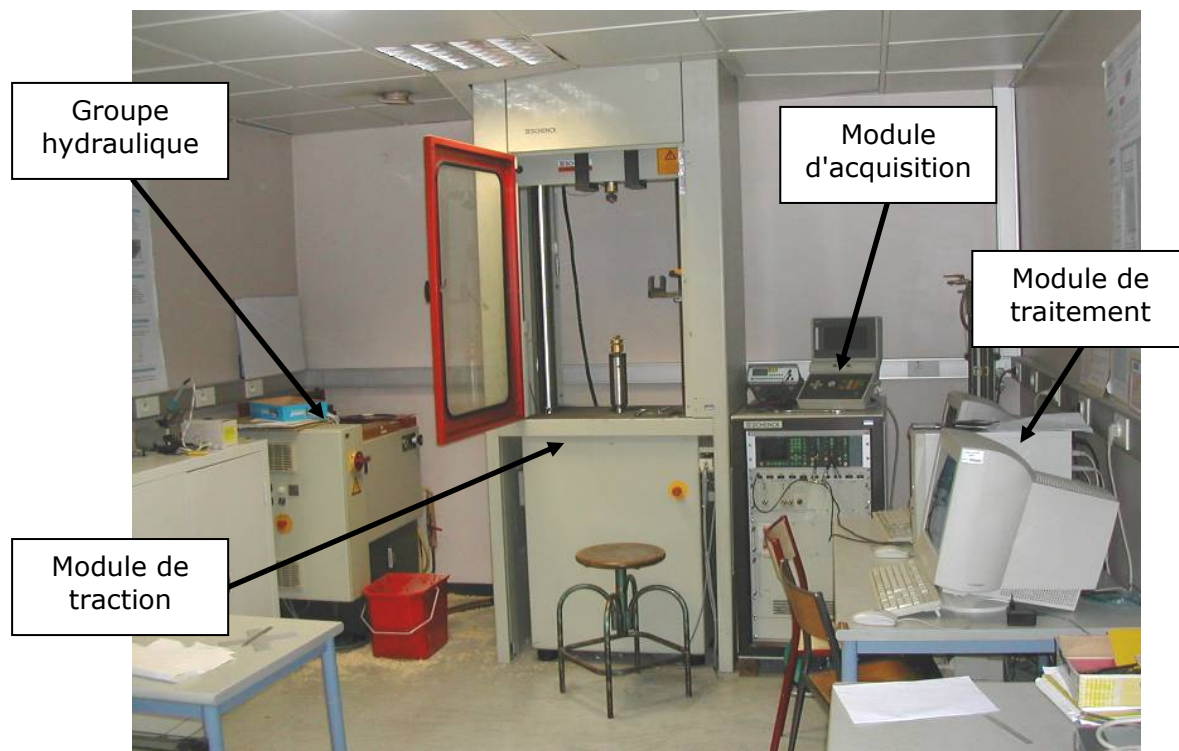


Figure II.7: Ensemble de la machine de traction à grande vitesse

La figure II.7 présente l'ensemble de la machine de traction qui se compose de 4 modules différents: groupe hydraulique, système d'acquisition des signaux, machine de traction, module de traitement des signaux.

II.5. Système de mesure et d'acquisition des données

II.5.1. Introduction

Lors d'un essai de type CLS, quatre mesures sont essentielles: l'effort, la vitesse de sollicitation, la longueur de la fissure notée a et les champs locaux de déplacement. L'effort de sollicitation est mesuré par la cellule de force qui est placée au dessus du mors supérieur. La vitesse de sollicitation est détectée par 2 moyens différents qui seront présentés en détail dans les paragraphes suivants. On dispose de 2 techniques indépendantes qui permettent de mesurer l'évolution de la longueur de fissure pendant l'essai en dynamique: la caméra rapide et l'outil de coupe-fils. La technique de mesure de champs par corrélation d'images numériques est un nouveau moyen permettant d'identifier les champs locaux de déplacements autour de la pointe de fissure pendant l'essai. Cette technique est appliquée et complétée afin de devenir un moyen efficace permettant de déterminer la longueur réelle de fissure à chaque instant de l'essai en dynamique.

II.5.2. Mesure de déplacements

La machine de traction à grande vitesse est capable de mesurer le déplacement du vérin pendant des essais. La différence de position du vérin par rapport à l'état non-chargé est mesurée en fonction du temps grâce à un capteur LVDT. Les données enregistrées dans un fichier de résultats permettent de calculer la vitesse moyenne du vérin pendant l'essai qui sera considérée comme la vitesse de chargement représentative de cet essai.

La déformation des matériaux présents dans le système de mise en charge, notamment le joint d'amortissement, modifie la vitesse de sollicitation transmise à l'éprouvette. C'est l'effet d'amortissement de la vitesse de déplacement. La mesure du déplacement par extensomètre laser permet d'accéder directement à la vitesse subie aux bornes de l'échantillon.

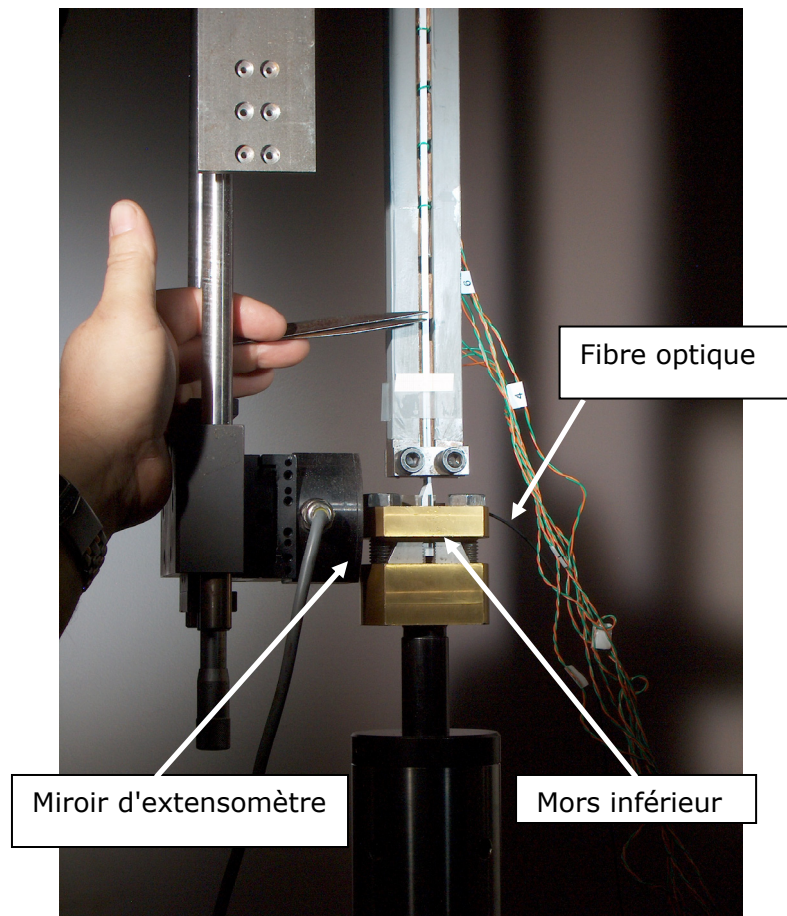


Figure II.8: Mesure de déplacement par fils de laser

En effet, le déplacement du mors inférieur est mesuré par un extensomètre laser qui permet une mesure directe du déplacement relatif de deux points sur l'éprouvette (figure II.8). Une fibre optique est fixée au mors inférieur par l'intermédiaire d'un clip. Un miroir placé en face, indique la position grâce à un signal de sortie analogique référencé par rapport à leur position initiale. En utilisant cette mesure, on accède directement au déplacement de la zone utile.

II.5.3. Mesure de l'effort

La force imposée est mesurée par un capteur piézoélectrique de type Kysler placé au dessus du mors supérieur. L'effort extérieur va être transmis après le choc au système de mors puis au matériau de l'éprouvette utilisée avant d'arriver jusqu'au capteur de force. Par ailleurs, la valeur de force mesurée est aussi due au changement progressif de la géométrie de l'éprouvette au fur à mesure que la fissure avance.

II.5.4. Caméra rapide

On dispose au laboratoire PIMM d'une caméra PHOTRON Fastcam APX-RS qui a la capacité d'enregistrer un grand nombre d'images par unité de temps, pouvant aller jusqu'à 250 000 images/seconde. Cette caméra permet de réaliser des films pour suivre des phénomènes de très courte durée, d'un ordre de grandeur de quelques

microsecondes. Les mouvements rapides pendant l'essai dynamique invisibles à l'œil nu pourront être enregistrés par la caméra.

La caméra possède les paramètres typiques suivants:

- Définition maximale : 1024x1024 pixels
- Taille d'un pixel: $17\mu\text{m} \times 17\mu\text{m}$
- Vitesse d'enregistrement à définition maximale(1024x1024 pixels): 3000 i/s
- Vitesse maximale d'enregistrement : 250000 i/s
- Intervalle minimum entre 2 images : $2\mu\text{s}$
- Codage: 8bits



Figure II.9: Caméra à grande vitesse

La figure II.9 présente la caméra rapide PHOTRON Fastcam APX-RS. Les paramètres relatifs entre la vitesse d'enregistrement et la résolution de l'image sont présentés dans le tableau II.5.

Vitesse d'enregistrement (i/s)	Résolution horizontale (pixels)	Résolution verticale (pixels)	Temps d'enregistrement (s)	Nombre d'images correspondant
60	1024	1024	34,1	2048
125	1024	1024	16,4	2048
250	1024	1024	8,2	2048
500	1024	1024	4,1	2048
1000	1024	1024	2,0	2048
2000	1024	1024	1,0	2048
3000	1024	1024	0,7	2048
5000	768	768	0,7	3641
9000	640	480	0,8	6991
10000	512	512	0,8	8192
10000	512	528	0,8	7944
15000	384	384	1,0	14564
30000	256	256	1,1	32768
50000	256	144	1,2	58254
70000	128	128	1,9	131072
100000	384	48	1,2	116508
150000	128	48	2,3	349525
210000	256	16	2,5	524288
250000	128	16	4,2	1048576

Tableau II.5: Relation entre la vitesse et la résolution de la caméra

La caméra possède une mémoire interne de 2,6GB pour le stockage intermédiaire des images filmées avant enregistrement sur le disque-dur du PC. La résolution maximale de la caméra est de $1024\text{ pixels} \times 1024\text{ pixels}$ et l'intervalle minimum entre deux images est de $2\mu\text{s}$. L'objectif macro Sigma, d'une distance focale fixe de 105 mm et d'une ouverture maximale de F 2,8, est fourni avec la caméra par le constructeur (figure II.10).

Caractéristiques techniques	
Formule optique :	9 groupes - 10 lentilles
Angle de champ :	23,3°
Diaphragme :	8 lames
Ouverture mini :	45
Rapport de reproduction :	1:1
Diam. filtre :	58 mm
Distance mini mise au point :	31,3 cm
Diam x Lg :	74 mm x 95 mm
Poids	450 g



Figure II.10: Objectif de la caméra rapide

II.5.5. Technique de mesure de champs locaux de déplacements

La technique de mesure de champs par traitement d'images numériques nommée "corrélation d'images numériques" est largement appliquée dans plusieurs domaines. Cette technique de mesure permet d'identifier la variation du champ de déplacements d'une zone surfacique par rapport à l'état de référence. Pour nous, l'intérêt de cette technique sera de réaliser les mesures locales des champs de déplacement de la surface d'éprouvette se trouvant autour de la tête de fissure. Cette technique de mesure combinée avec la caméra rapide permet de filmer la surface d'éprouvette pendant l'essai dynamique et nous donnera accès à la variation des champs locaux de déplacement autour de la pointe de fissure au cours de l'essai. Au chapitre III, on montrera comment cela nous a permis de déterminer la vitesse d'avancée de la fissure.

A. Généralité

Le développement des technologies de caméras numériques a permis l'acquisition d'un grand nombre d'images par unité de temps. Parallèlement, le développement des outils informatiques a permis de traiter et de manipuler les images. En particulier, la technique de corrélation d'images numériques a été largement développée ces dernières années.

Peter et Ranson ont établi les premiers éléments de la corrélation d'images numériques dans les années 80 [PETERS 1982]. Leur travail concerne l'utilisation d'images numériques obtenues par ultrasons sur un solide soumis à un chargement bidimensionnel et vise à déterminer la valeur moyenne des déplacements plans et les gradients de déformation de l'objet. Cette étude a permis l'obtention du suivi des champs de déformation sur une petite zone de la surface de l'éprouvette lors des différentes étapes du chargement en appliquant un algorithme de dérivation numérique.

Sutton et al. [SUTTON 2004] ont proposé au cours des années 80 un algorithme de détection "subpixel". Leur étude se concentre sur les méthodes d'interpolation permettant l'évaluation des déplacements subpixel. En 1985, la première théorie de la méthode de corrélation d'images numériques intégrant l'évaluation de la précision expérimentale est proposée par Chu et al. [CHU 1985]. Leur travail vise essentiellement la mesure des champs de déformation.

La transformée rapide de Fourier est largement appliquée durant les années suivantes comme une solution efficace de détermination des déplacements, en particulier pour les calculs où les déformations planes sont petites [CHEN 1993].

Enfin, les travaux de Hild et al. [HILD 2002] ont fortement contribué au développement de la technique de corrélation d'images numériques. Une approche multi-échelles permet d'accéder à la capacité de mesure en très grande déformation liée à la grande variation des textures au cours des chargements.

De nos jours, la technique de corrélation d'images numériques est largement appliquée dans plusieurs domaines. Des logiciels commerciaux sont apparus sur le marché tels ARAMIS [ARAMIS/GOM] ou VIC-2D [VIC-2D]. Parallèlement, des travaux de recherche sont menés au sein des laboratoires universitaires permettant de développer en amont des outils tels que Correla-LMS, CorrelManuV-LMS/Polytechnique ou CORRELI^{LMT} s'adaptant aux besoins spécifiques de travail.

Une limitation majeure de cette méthode est liée aux cas des déplacements hors plans. Ces derniers peuvent en effet engendrer des variations de distance relative entre les différents points de la surface de l'éprouvette par rapport à la surface des capteurs de la caméra. Ces variations de distance peuvent déformer l'image obtenue par la caméra.

Malgré sa jeunesse, la multitude des domaines d'application, la diversité des études et la multiplication des utilisateurs montrent le fort potentiel de cette technique de mesure de champs cinématiques. La continuelle évolution des matériels optiques d'un point de vue technique permet des améliorations et des optimisations de la corrélation d'images.

B. Théorie de base de la technique

Le principe de base de la corrélation d'images numériques bidimensionnelle pour l'obtention d'une mesure de déplacement consiste à faire coïncider une petite zone d'une image de la surface d'un objet à la même zone de l'image prise lors d'un chargement. En supposant qu'il existe une correspondance entre les déformations de l'image enregistrée et celles de la surface de l'objet, l'appariement zone par zone entre les images originales et déformées permet de mesurer les déplacements. Deux conditions majeures doivent être respectées pour appliquer au mieux la corrélation d'images numériques bidimensionnelle. La première : la surface étudiée doit présenter un motif aléatoire avec une dynamique de niveaux de gris maximum. La seconde: le positionnement des systèmes d'observation et de numérisation doit être parallèle à la surface de l'objet.

L'appariement des points homologues est réalisé par maximisation d'une fonction d'inter-corrélation calculée sur un voisinage autour de ces points. De ce fait, c'est un motif aléatoire qui rend possible la reconnaissance des points homologues les uns par rapport aux autres. La recherche de ce maximum passe par une procédure d'optimisation accompagnée de l'utilisation d'une interpolation de la fonction d'inter-corrélation permettant l'amélioration de la résolution de la mesure à un niveau subpixel.

Le logiciel CORRELI^{LMT} est basé sur le principe de la transformée de Fourier qui permet le traitement des données et des calculs rapides. L'organigramme de la procédure de corrélation de ce logiciel est décrit par la figure I.11.

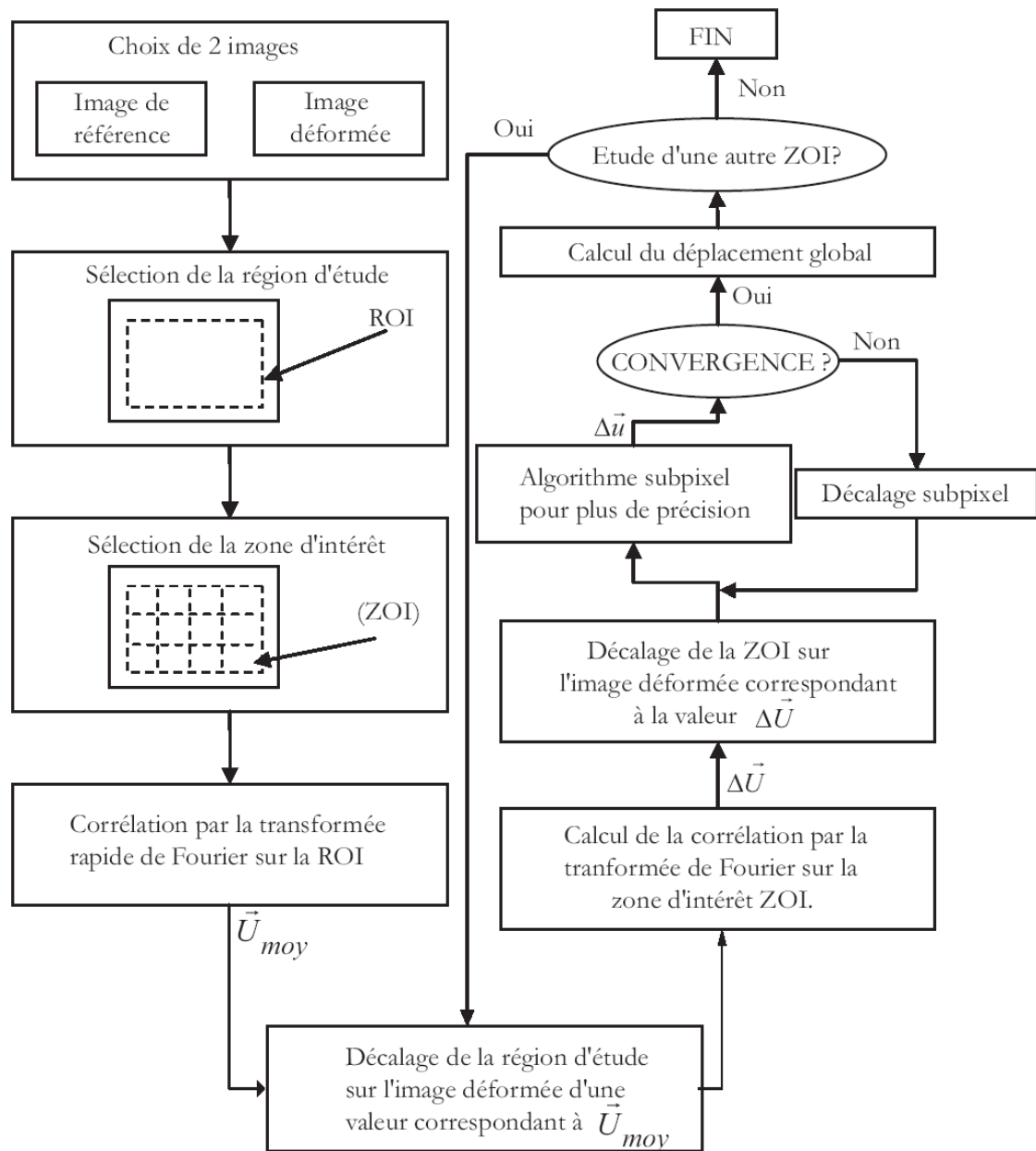


Figure II.11: Organigramme de la procédure de corrélation mise en place dans CORRELI^{LMT}

Pour déterminer le champ de déplacement d'une image déformée par rapport à une image de référence, un sous-domaine carré de l'image (de taille 2^n , n est un entier naturel), appelé zone d'intérêt (Zone Of Interest: ZOI) est extrait (figure II.12). Le but de la corrélation d'images par CORRELI^{LMT} consiste à retrouver la correspondance d'une ZOI entre deux images prises à deux instants différents. Le déplacement d'une ZOI par rapport à celle de l'image de référence correspond à un décalage de l'intensité du signal numérisé par une caméra CDD.

Pour identifier ce décalage, le signal de l'image déformée $g(x)$ peut être écrit comme un décalage du signal de l'image de référence $f(x)$ perturbé:

$$g(x) = f(x - u) + b(x)$$

où u correspond à un déplacement inconnu et $b(x)$ à un bruit aléatoire. Pour évaluer le déplacement, la norme de la différence des deux signaux est minimisée par rapport à un déplacement global U :

$$\min_U \|g(x) - f(x - U)\|^2$$

Dans le cas d'une norme quadratique du type $\|f\|^2 = \iint f^2(x, y) dx dy$, la minimisation se ramène alors à maximiser la quantité $h(U)$ par rapport à U définie par:

$$h(U) = (g \circ f)(U) = \int g(x) f(x - U) dx$$

où $\circ$ indique le produit de corrélation. De plus, considérons b comme étant un bruit blanc, l'estimation de $h(U)$ devient optimale. Le calcul du produit de corrélation peut être effectué soit dans l'espace réel, soit dans l'espace de Fourier en utilisant la transformée de Fourier rapide (FFT):

$$g \circ f = 2^n \cdot FFT^{-1}(FFT[g] \cdot \overline{FFT[f]})$$

où le complexe conjugué est surligné et n est un entier qui définit la taille de la zone d'intérêt (ZOI).

Pour évaluer les déplacements subpixels, la fonction d'intercorrélation est interpolée. Dans le cas de CORRELI^{LMT}, une interpolation bi-parabolique est utilisée. Pour ce type d'interpolation, une contribution de Sutton et al [SCHREIER 2000] a montré des erreurs moyennes en déplacement de l'ordre de 0,002 pixel sur une image codée 8 bits (il est à noter que ce résultat n'est pas obtenu par l'utilisation du logiciel CORRELI^{LMT}). Ce calcul est effectué pour chaque ZOI de la région d'étude ROI.

La corrélation d'images numériques est une technique de mesure qui ne nécessite que peu de matériel: une caméra CDD, une carte d'acquisition et un ordinateur muni d'un logiciel adapté pour le traitement des données.

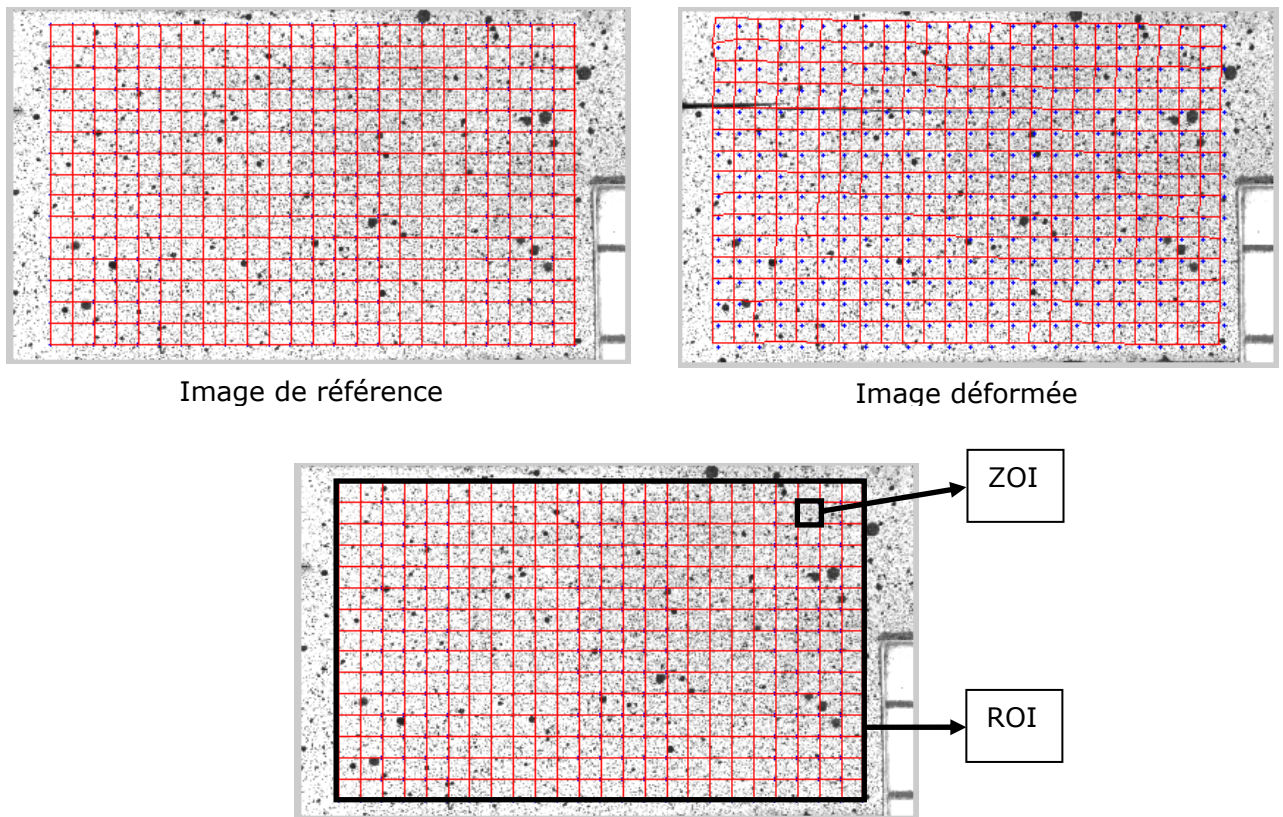


Figure II.12: Illustration de la taille de ZOI et de ROI

C. Montage expérimental associé

Le montage expérimental de cette technique nécessite quatre composants principaux listés ci-dessous, en considérant l'éprouvette fixée sur la machine de traction:

- Un objectif: objectif macro, objectif à focale variable, objectif à focale fixe...
- Une caméra: CDD, CMOS...
- Une source lumineuse: lampes à filament
- Un logiciel d'enregistrement et de transfert des données de la caméra au PC

Les quatre composants principaux de la technique de mesure contribuent à obtenir les images de la surface d'éprouvette qui sont filmées pendant l'essai. Cette première étape joue un rôle décisif. Le système d'équipements optiques décidera de la qualité des images récupérées qui influent sur l'incertitude de l'étape suivante de traitement d'images. Une fois que les images de surface d'éprouvette sont acquises, elles seront traitées par le logiciel de corrélation d'images pour identifier les champs de déplacement de la surface de l'éprouvette.

D. Application de la technique

On applique cette technique de mesure pour identifier les champs locaux de déplacement autour de la tête de fissure. Ces champs locaux jouent un rôle décisif dans la caractérisation du phénomène de délaminage. En envisageant les conditions de travail,

on a appliqué cette technique de mesure pour les essais du matériau composite unidirectionnel verre/époxy.

II.5.6. Outil de synchronisation des signaux :

Le MCDL (Photron Multi-Chanel Data-Link) est un système d'enregistrement des signaux issus de la caméra à grande vitesse qui possède deux voies d'acquisition des signaux analogiques et six voies pour les signaux digitaux. L'information des signaux analogiques et numériques est acquise pour chaque image filmée. Cela permet de synchroniser parfaitement le numéro de l'image et les paramètres mesurés par la machine de Traction à grande vitesse.

Le logiciel Photron Fastcam Viewer permet de contrôler le fonctionnement de la caméra rapide et de gérer l'acquisition d'images et des signaux mesurés par d'autres capteurs. Ce logiciel peut coupler les images du film avec les signaux détectés par d'autres capteurs de mesure (par exemple avec les signaux du capteur de force et de déplacement de la machine TGV). L'outil MCDL joue un rôle intermédiaire de couplage en acceptant les entrées des signaux d'autres capteurs en produisant une sortie unique. La sortie de l'outil MCDL est connectée directement au PC qui dispose du logiciel Photron Fastcam Viewer. En conséquence, les images récupérées par la caméra rapide traitées par ce logiciel contiennent les informations respectives des signaux mesurés au même instant par les capteurs utilisés.

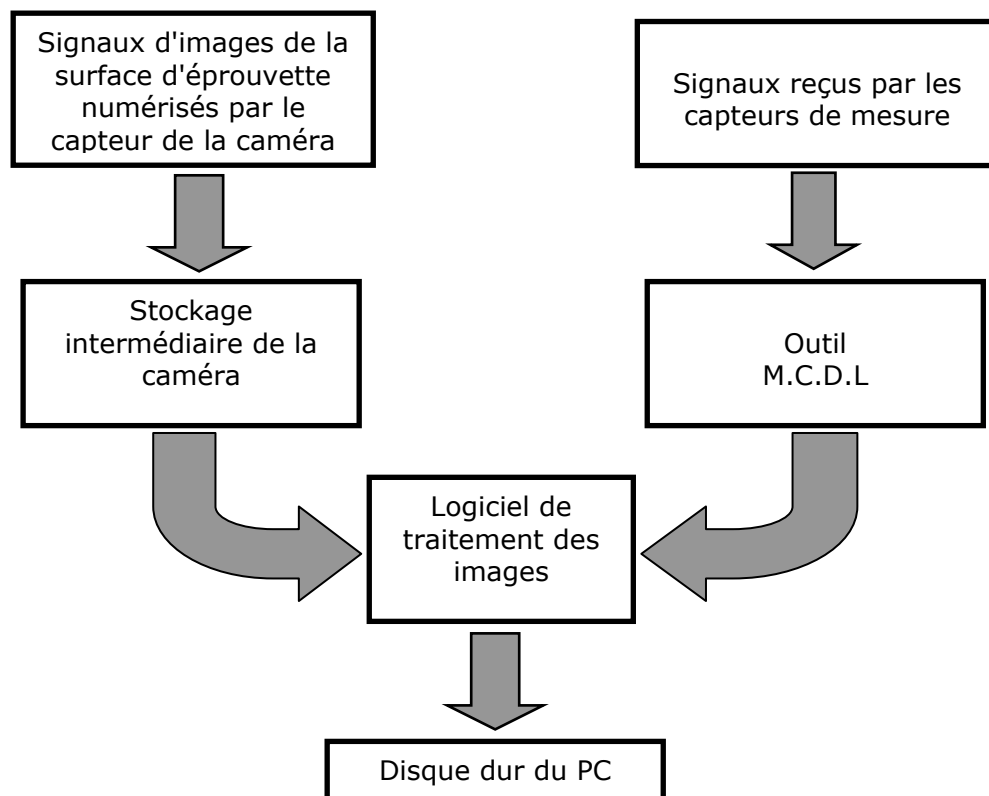


Figure II.13: Schéma d'enregistrement des données

La figure II.13 présente le schéma d'enregistrement des données du logiciel d'acquisition Photron Fastcam Viewer en utilisant l'outil MCDL. Le couplage de ces deux outils permet de réaliser les mesures des essais en dynamique de la durée d'un ordre de de quelques centaines microsecondes. La mesure utilisant ce couplage est présentée sous la forme de plusieurs images photographiques et chaque image récupérée contient les informations instantanées des signaux des capteurs utilisés. Le logiciel Photron Fastcam Viewer permet de lire toutes les images par ordre chronologique.

II.6. Campagne d'essais sur le matériau composite unidirectionnel carbone/époxy

L'objectif de cette campagne est de réaliser des essais de délaminage de type CLS (Cracked-Lap Shear) en dynamique sur des éprouvettes du matériau composite carbone/époxy unidirectionnel. Le système de guidage latéral sera utilisé pour pouvoir limiter les mouvements de flexion induite pendant l'essai.

La largeur des éprouvettes est toujours de 10mm et la longueur de l'éprouvette est égale à celle de la plaque originale du matériau composite à partir de laquelle les éprouvettes sont découpées. La couche mince de téflon placée entre deux plis pendant le drapage pour créer la pré-fissure est retirée de l'éprouvette avant chaque essai.

La caméra rapide PHOTRON Fastcam APX-RS est utilisée afin de filmer la propagation de la fissure de sorte de pouvoir suivre la longueur de fissure sur le parcours le plus long possible. Cela nécessite d'élargir la zone filmée par la caméra. Par contre, il faut assurer toujours une largeur minimale pour que la fissure puisse être bien visible.

La force est mesurée par la cellule de la machine de traction, le déplacement du mors inférieur est suivi par le fil laser. Tous les signaux mesurés de la force, du déplacement, de la caméra sont synchronisés par l'outil MCDL et enregistrés dans un fichier de résultats sous format vidéo.

La vitesse de propagation de la fissure est mesurée par deux méthodes différentes: l'outil de coupe-fils et la méthode de contraste.

II.6.1. Eprouvette de type CLS

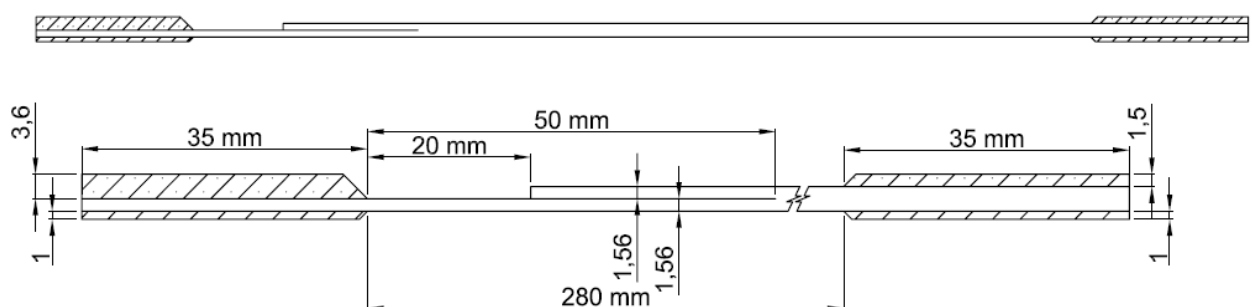


Figure II.14: Taille de l'éprouvette

Le tableau II.6 présente les valeurs caractéristiques de la géométrie de l'éprouvette. Les talons de matériaux composites plus rigides sont collés sur deux extrémités de l'éprouvette pour bien protéger le matériau pendant l'essai. La colle de type époxy permet de résister aux chocs et aux cisaillements.

Longueur totale (mm)	Longueur de la pré-fissure (mm)	Epaisseur du bras chargé (mm)	Epaisseur du bras libre (mm)	Longueur du talon (mm)
350	50	1,56	1,56	35

Tableau II.6: Géométrie de l'éprouvette en composite UD carbone/époxy

La figure II.15 présente une photo des éprouvettes du matériau composite unidirectionnel carbone/époxy. Les fibres sont orientées dans la direction longitudinale de l'éprouvette. La pré-fissure se situe sur le même plan que les plis (plan de la table sur la photo).

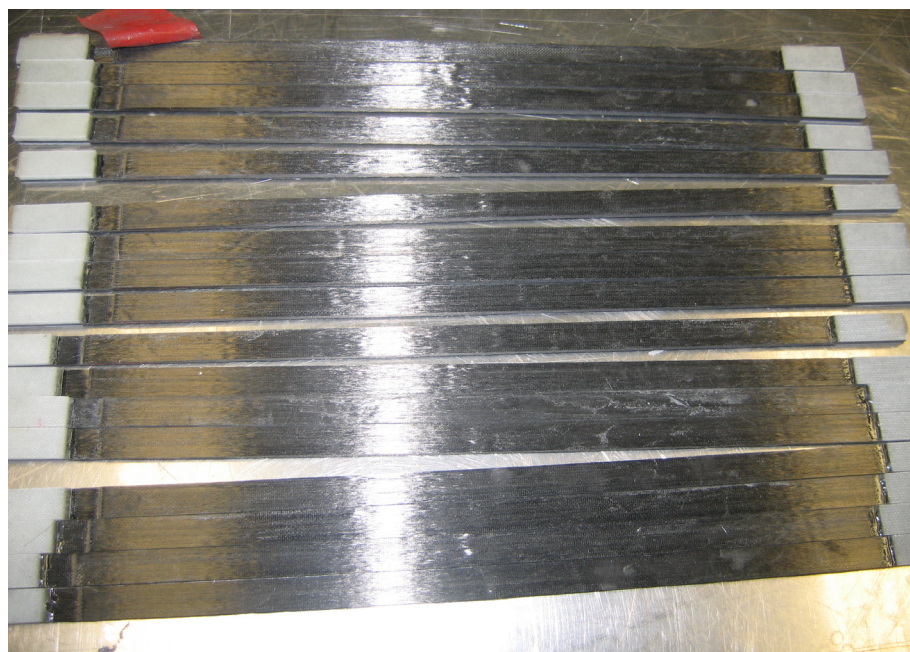


Figure II.15: Les éprouvettes découpées

La figure II.16 montre un zoom du talon de l'éprouvette et de la pré-fissure. Le talon collé est de couleur blanche et le matériau d'étude est noir. La bande de téflon formée la pré-fissure apparaît en rouge. L'épaisseur de chaque talon collé est choisi de façon à assurer la compensation de l'épaisseur totale des deux extrémités de l'éprouvette. Sous l'effet de compression des mors pendant l'essai, les talons distribuent l'effort d'une façon homogène sur le matériau composite et le protègent de tout endommagement.

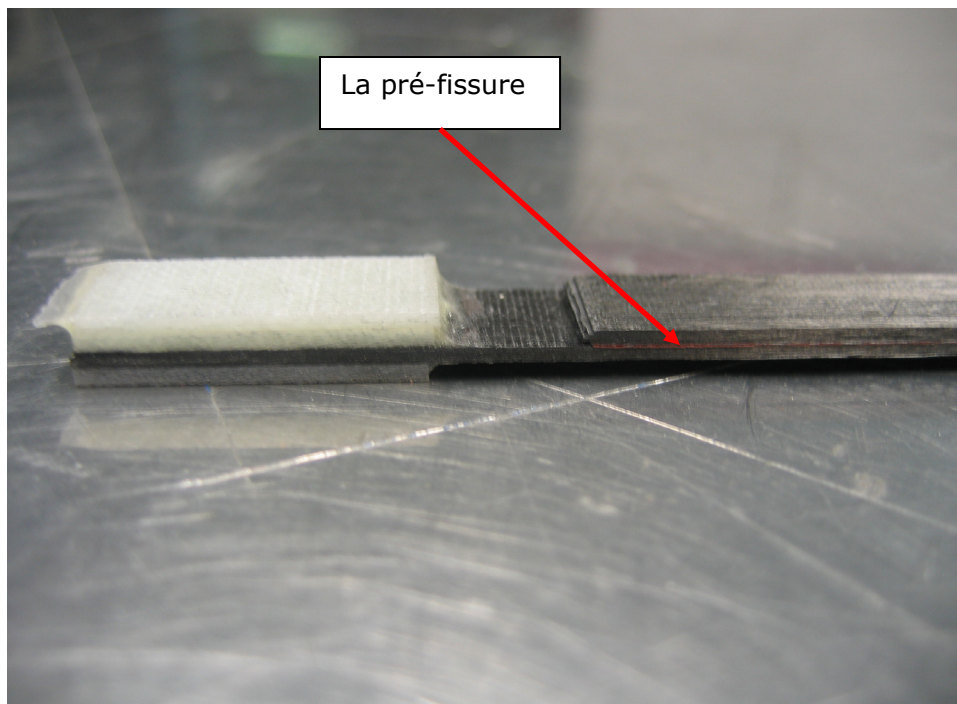


Figure II.16: Les tallons collés à l'éprouvette

II.6.2. Délaminage en mode II dominant

Nous avons placé deux barres en acier, droites, opposées aux deux surfaces latérales de l'éprouvette pour limiter le mode I de délaminage. Elles sont appelées "barres de guidage". Les deux côtés des barres de guidage sont en contact avec les surfaces de l'éprouvette. Les deux barres sont maintenues l'une à l'autre par deux pièces horizontales de chaque côté de l'éprouvette. Ces pièces sont vissées par deux vis traversant le matériau des barres.

L'épaisseur des barres de guidage est plus importante que la largeur de l'éprouvette. Cette dernière est donc totalement recouverte. Lors d'un essai de délaminage, les mouvements d'ouverture de la fissure seront limités en transmettant l'effort sur ces deux barres. Sur la surface interne faisant contact entre l'éprouvette et les barres est collée une couche de téflon qui permet de limiter la force de frottement pendant l'essai. La figure II.17 présente l'assemblage de l'éprouvette et des barres guidées.

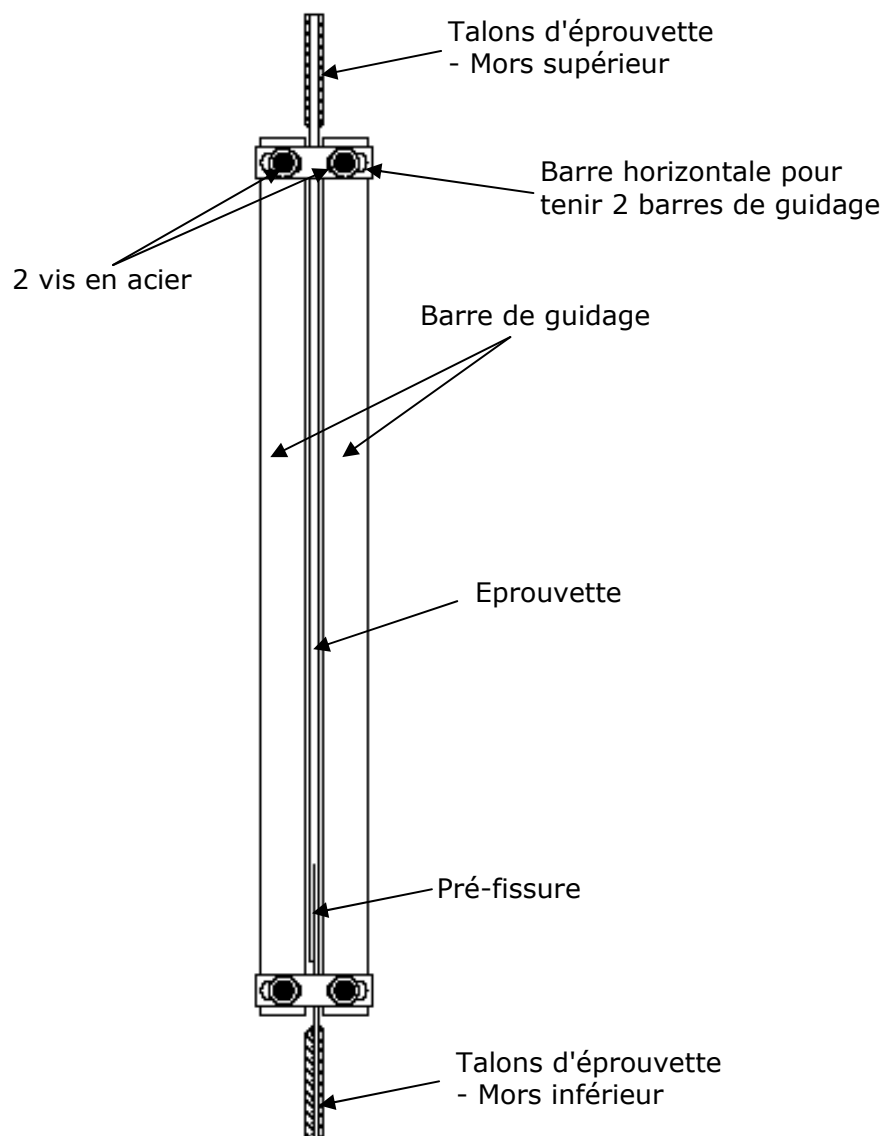


Figure II.17: Conception de l'essai CLS à vitesse élevée

La partie comprise entre les deux talons d'éprouvette est donc entièrement guidée par deux barres de guidage pendant l'essai. Les talons sont serrés dans les mors sur toute leur longueur. Une fois que l'éprouvette est bien positionnée, une longueur de 30mm encastrée dans les mors est toujours assurée afin d'éviter le glissement.

II.6.3. Protocole d'essai

Afin d'utiliser la méthode de contraste permettant de mesurer la longueur de la fissure, la surface de l'éprouvette est peinte en blanc sur la face que l'on souhaite filmer par la caméra rapide. La peinture blanche constituera le fond sur lequel la fissure apparaîtra sous la forme d'un trait noir.

Les barres de guidage sont ensuite mises en place en s'assurant qu'elles ne bloquent pas le mouvement vertical de l'éprouvette. L'éprouvette est montée dans les mors en position verticale. Le côté filmé est parallèle au plan de la surface du capteur de caméra.

Lorsque l'éprouvette est bien positionnée, on serre les quatre vis bloquantes du mors inférieur et du mors supérieur pour que tous les glissements aux mors soient éliminés.

Après la mise en position de l'éprouvette, le système de mesure des déplacements et de la force est réglé de sorte que les signaux soient bien enregistrés. Les spots d'éclairage et la caméra sont eux aussi mis en place. La netteté et l'éclairage sont réglés de façon à ce que les images récupérées soient contrastées au maximum.

La sortie des signaux de force et celle de déplacement est transférée en premier temps à l'outil de synchronisation MCDL. Les signaux sortant de cet outil seront transmis au PC muni du logiciel Photron Fastcam Viewer. La caméra est elle aussi connectée à ce PC par la deuxième entrée. Le Photron Fastcam Viewer va enregistrer trois types de signaux en même temps dans un fichier de type vidéo (.cih ou .avi): le signal du capteur de force, le signal du capteur de déplacement, les images de la caméra. Le type de fichier (.cih) permet de pouvoir modifier le format de chaque image de la vidéo. Il existe plusieurs formats d'images disponibles (BMP, TIFF, JPEG, PNG, RAW)

Au moment de lancer l'essai de traction, la caméra est mise en marche en même temps afin qu'on puisse filmer la procédure de fissuration du commencement de l'essai jusqu'à la rupture finale de l'éprouvette. La vitesse de la caméra est choisie en fonction de la vitesse de sollicitation pour obtenir un nombre maximal possible d'images de la qualité souhaitée. Cette vitesse dépend aussi de la taille souhaitée de l'image filmée.

II.6.4. Résultats expérimentaux et discussion

La gamme de vitesses choisie pendant la campagne d'essais varie de 0,1m/s à 12m/s. Cette gamme de vitesses de sollicitation est suffisamment large et permet de caractériser l'influence de la vitesse de sollicitation.

II.6.4.1. Mesure de la vitesse réelle de sollicitation

Le déplacement du mors inférieur pendant l'essai de cette campagne est suivi par la mesure de l'extensomètre laser. Cette méthode de mesure a été présentée dans la partie précédente. Un résultat typique de mesure de déplacement est montré dans la figure II.18. Sur cette figure, on observe de petites oscillations temporelles sur les signaux de déplacement récupérés. Ces perturbations s'expliquent par les vibrations de la machine de traction pendant l'essai causées essentiellement par le choc généré par le système tube-piston du lanceur.

Pendant l'essai réalisé, l'effet d'inertie peut influencer la partie libre du fil laser. En effet, le fil laser est tenu par un support collé sur le mors inférieur. Le fil laser est introduit dans le support par un trou. Il existe donc une partie libre de fil laser qui sort du support. Au moment du choc, le système support-fil accélère très vite et l'effet d'inertie apparaît. La partie libre du fil laser ondule sous l'action de l'inertie. La déformation de la colle sous le support du fil laser et le déplacement la partie libre du fil laser modifient les signaux mesurés du déplacement du mors inférieur. Pourtant, cette erreur est petite par rapport au déplacement total de l'éprouvette, donc acceptable.

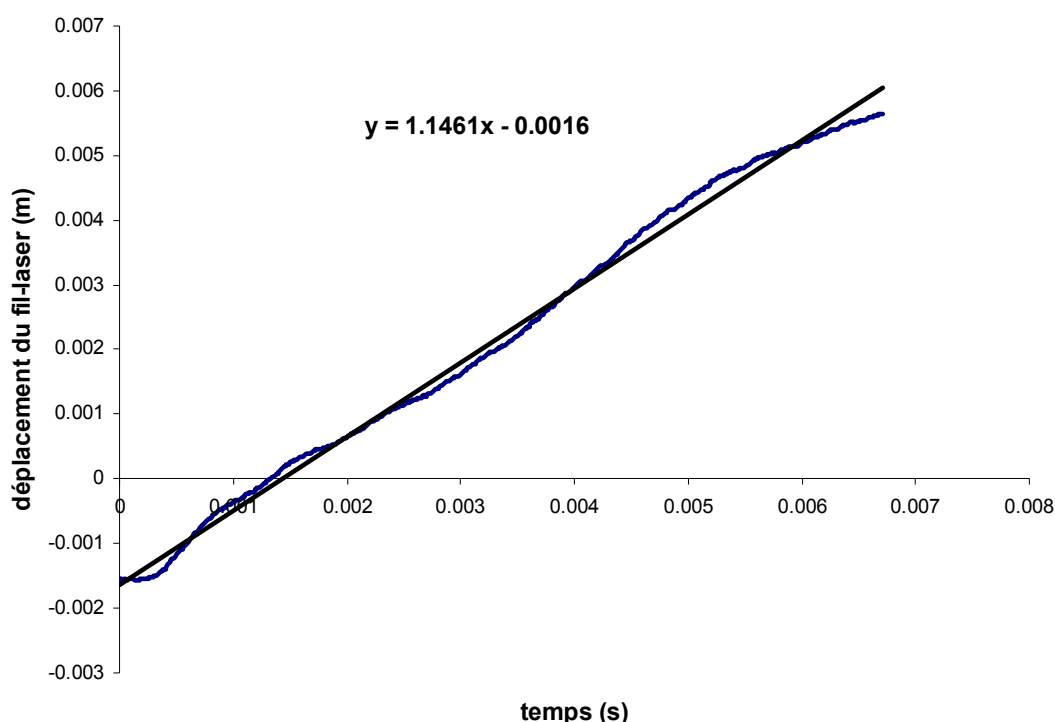


Figure II.18: Mesure de la vitesse réelle de sollicitation

Pour calculer la vitesse moyenne de l'essai, on utilise la courbe de tendance des signaux récupérés. La pente moyenne de la courbe de tendance sera considérée comme la vitesse moyenne de l'essai représentative de la vitesse de sollicitation de l'essai.

II.6.4.2. Comportement de l'éprouvette CLS à vitesse élevée

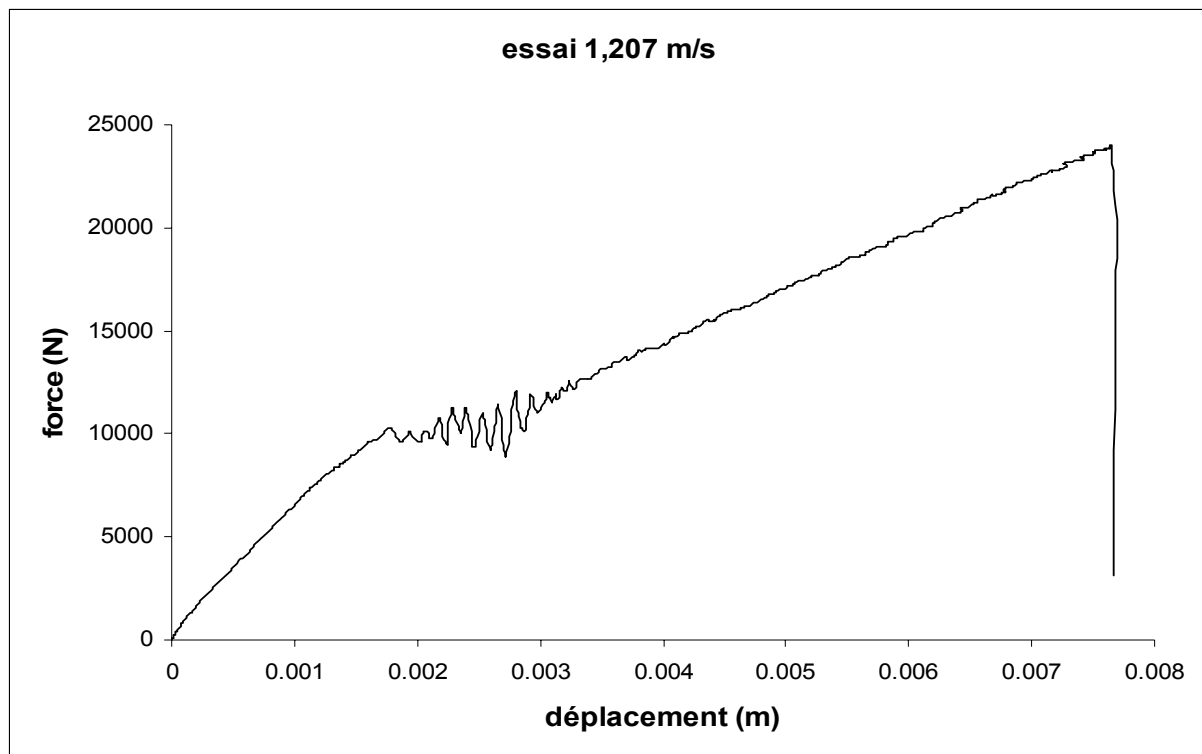


Figure II.19: Comportement typique de l'éprouvette CLS

Le comportement typique de l'éprouvette de type CLS de la campagne d'essais, caractérisé par la figure II.19, se décompose en trois parties principales. On considère que les mouvements de flexion induite sont éliminés par le système de guidage.

La première partie correspond au comportement élastique de l'éprouvette. Pendant cette partie, l'éprouvette se déforme élastiquement sous l'action des efforts extérieurs en acquérant de l'énergie élastique avant d'atteindre le seuil d'énergie critique de l'amorçage. En même temps, l'effet cinétique et l'effet de l'onde de choc peuvent participer au comportement de l'éprouvette et facilitent l'amorçage de la fissure. (On verra au chapitre IV que l'effet de l'onde de choc reste négligeable dans notre cas.)

La deuxième partie du comportement commence par la déviation brutale de la courbe causé par l'amorçage de la propagation de la pré-fissure. Au moment de l'amorçage de la pré-fissure, la structure de l'éprouvette se modifie à travers la propagation de la fissure. Le changement géométrique de l'éprouvette engendre la diminution de la résistance de la structure, et, en conséquence de sa complaisance. L'effet cinétique en même temps participe au comportement de l'éprouvette. Pendant cette partie, les signaux reçus par le capteur de force apparaissent sous forme de vibrations. Ces perturbations temporelles augmentent en amplitude en arrivant à une valeur maximale. Après la valeur maximale,

l'amplitude diminue puis disparaît. La deuxième partie correspond à la fissuration de l'éprouvette.

La troisième partie du comportement de l'éprouvette ressemble à la première partie: La fissure est arrivée à l'extrémité supérieure de l'éprouvette et l'éprouvette est fendue en deux parties indépendantes par rapport au plan de fissuration. Par conséquent, pendant cette partie, seul le bras-chargé subit l'effet de la sollicitation. Cette partie du comportement se termine par la rupture totale du bras-chargé, donc, de l'éprouvette. C'est le moment où la force mesurée revient brutalement à zéro.

La figure II.20 présente les signaux mesurés de la force en fonction du temps. La vitesse de sollicitation varie de 0,4 m/s jusqu'à 12m/s. Chaque essai correspond à une vitesse de sollicitation quasi-constante.

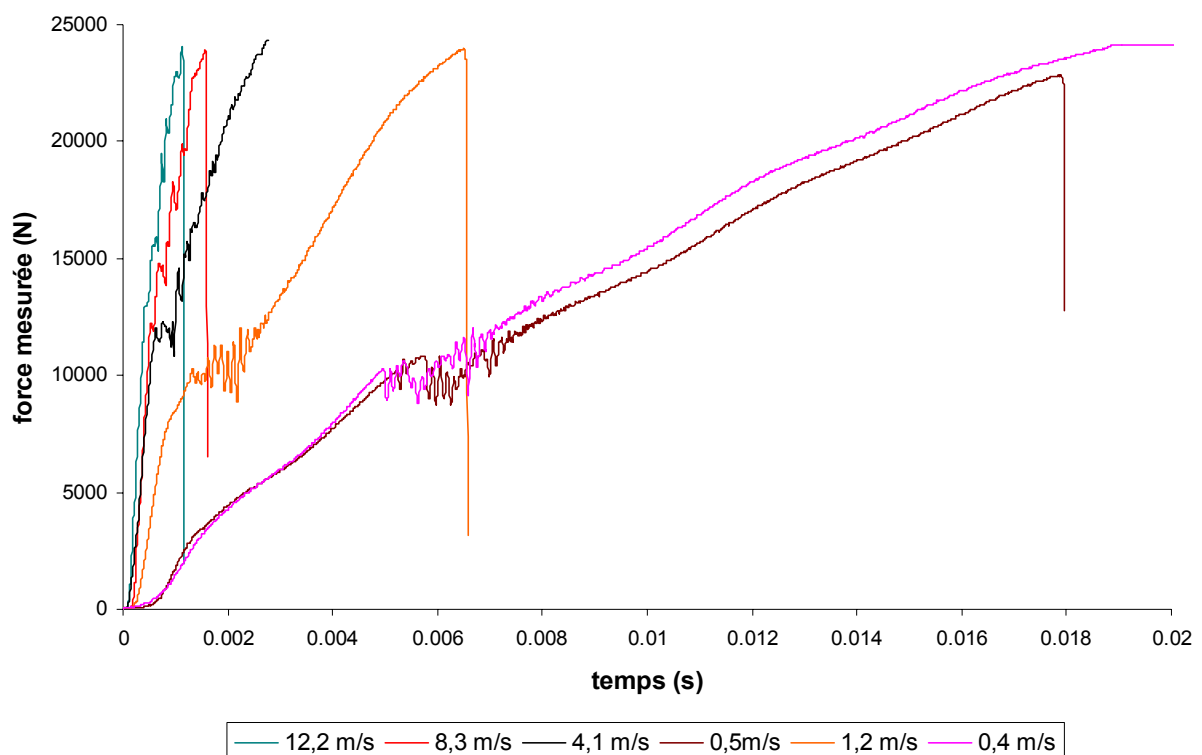


Figure II.20: Force mesurée pendant les essais

On peut conclure en disant que la force mesurée pendant les essais de cette campagne est gérée par trois paramètres principaux: la vitesse de sollicitation, l'effet du matériau et la propagation de la fissure. Parmi ces trois paramètres, les deux premiers sont des paramètres intrinsèques: l'effet du matériau et l'effet de la propagation de la fissure. La vitesse de sollicitation est un paramètre extérieur dont nous étudierons l'influence sur la fissuration en dynamique.

II.6.4.3. Observation au Microscopie Electronique à Balayage:

A. Phénomène de délaminage:

Rappelons ici que les stratifiés présentent un problème qui leur est propre: la rupture inter-laminaire. Ce mécanisme de rupture se caractérise par un décollement ou une décohésion entre les plis du stratifié. Il est couramment appelé "délaminage".

Après avoir réalisé les essais de type CLS, on a observé les faciès de la fissure au Microscopie Electronique à Balayage (MEB) pour étudier les phénomènes d'endommagement et le phénomène de fissuration principale de l'essai. Les résultats ont montré que la propagation de la fissure se produit dans la matrice entre les plis du matériau composite. La figure II.21 présente plusieurs images de la section transversale de l'éprouvette qui est perpendiculaire à la direction des fibres.

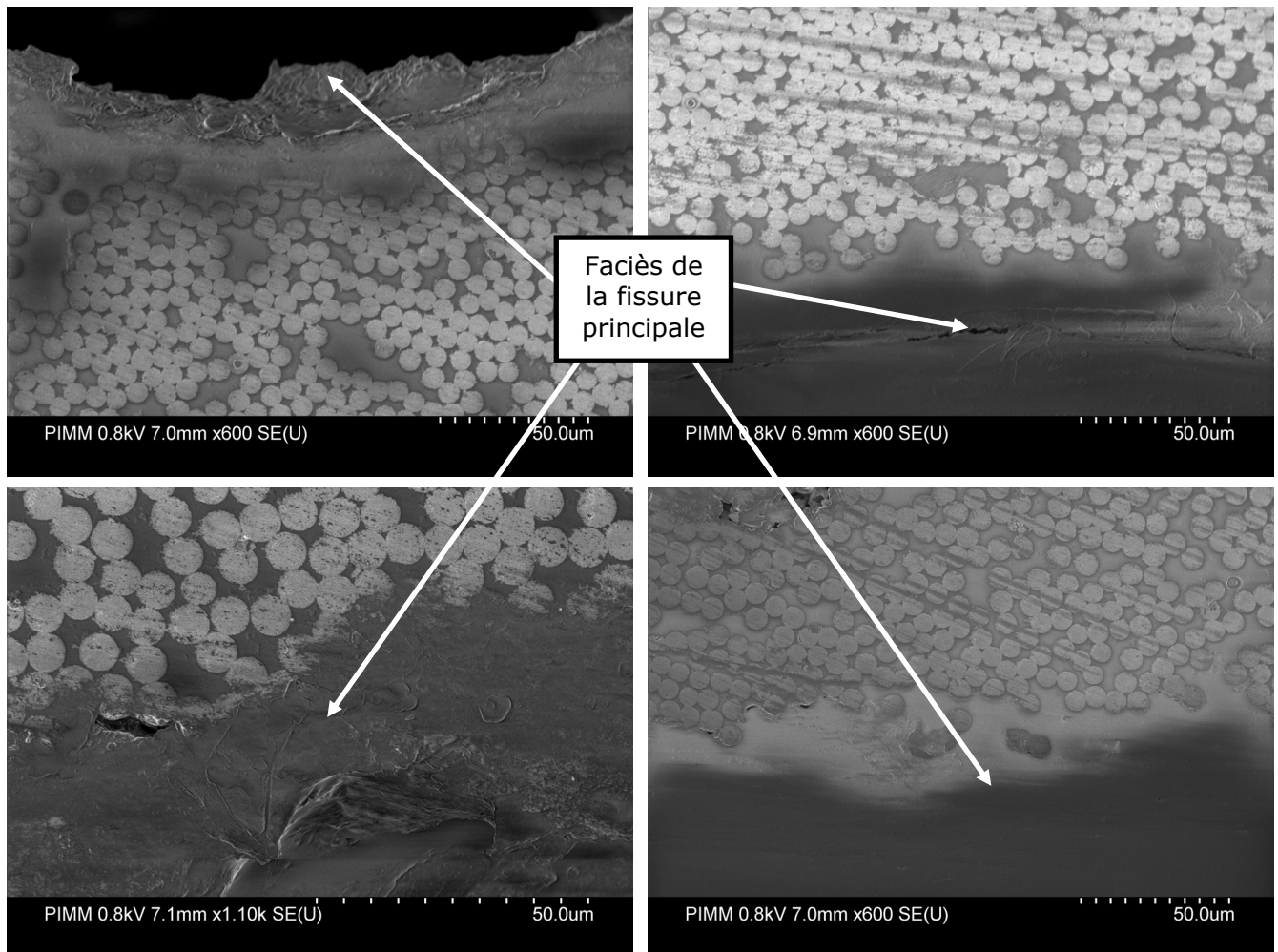


Figure II.21: Section transversale de l'éprouvette

Cette figure montre que les faciès de la fissure observée traversent la couche de la matrice entre 2 plis. La propagation n'influence pas la microstructure autour de cette couche de matrice. En effet, on ne voit pas de microfissures dans les couches des fibres de part et d'autre de la fissure. La microstructure ne subit pas d'endommagement lors de l'essai. On pourra donc faire l'hypothèse d'un comportement élastique des deux bras de l'échantillon CLS.

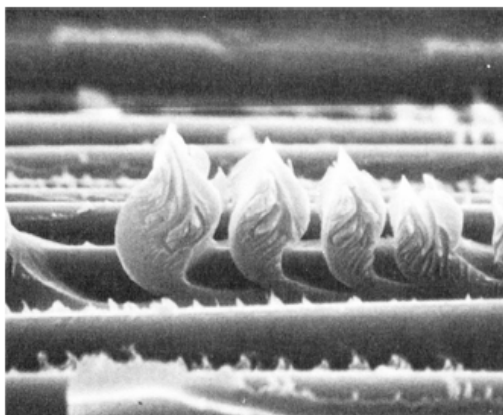
B. Mode II dominant:

La matrice époxy du matériau composite utilisé est de type thermodurcissable, la rupture est de type fragile. Sous le chargement en mode II dominant, les deux parties de part et d'autre de la fissure se voient imposer un déplacement relatif dans un même plan. La contrainte principale en traction pour le cisaillement appliqué est donc orientée à 45° du plan de rupture. La rupture fragile de la matrice se produit perpendiculairement à cette contrainte résultante de cisaillement sous la forme d'une série de microfissures inclinées à 45° (figure II.22).

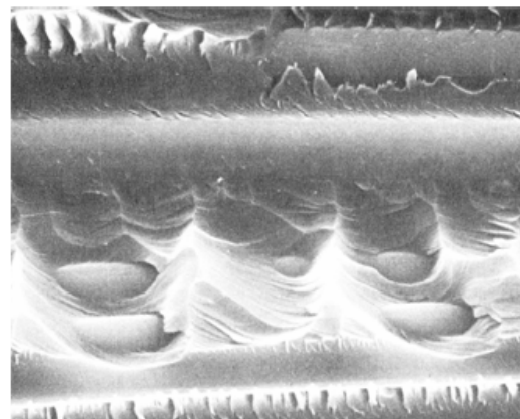


Figure II.22: Microfissures orientées à 45° du plan de rupture (mode II) [SMITH 1993]

Pendant le processus de rupture, ces microfissures coalescent. Une multitude de petites languettes sont formées sur la surface de rupture. Sur la surface opposée, la résine présente de petites zones concaves correspondant aux languettes de la première surface. Plusieurs termes ont été utilisés pour décrire ces faciès de rupture. Les termes les plus utilisés sont les "hackles", qui décrivent les languettes, et les "scallops", qui décrivent les zones concaves (figure II.23).



(I)



(II)

Figure II.23: Faciès de rupture en mode II (I) Hackles, (II) Scallops [SMITH 1993]

Le travail au MEB permet d'observer les "Hackles" et les "Scallops" de la surface de rupture de nos essais (figure II.24). Pour nos essais les "Hackles" et les "Scallops" sont répartis de façon aléatoire sur les deux surfaces de la fissure. Sachant que la fissure se

propage dans la matrice, le phénomène de cisaillement en traction a créé les "Hackles" et les "Scallops" de manière aléatoire sur les deux surfaces de rupture.

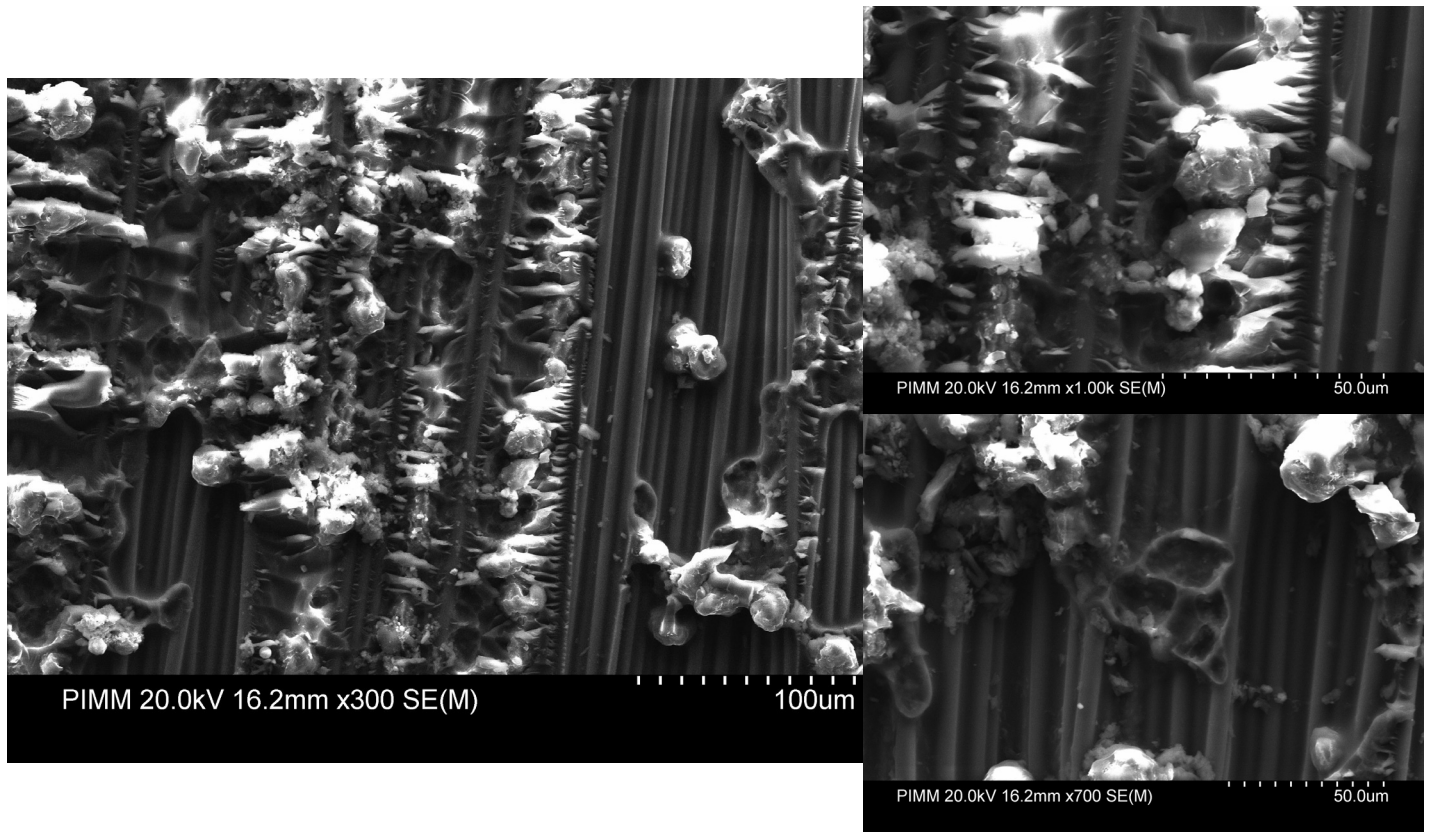


Figure II.24: les "Hackles" et les "Scallops" de la surface de rupture des essais réalisés

Les observations citées ci-dessus permettent de conclure que le mode II de chargement a été appliqué majoritairement pendant nos essais. La majorité de "Hackles" et les "Scallops" observés sur les deux surfaces de la fissure permet en effet d'affirmer la prédominance du mode II de chargement pendant l'essai.

II.7. Campagne des essais sur composite UD verre-Epoxy

La deuxième campagne d'essais a toujours pour objectif final d'étudier le délaminage en dynamique du matériau composite unidirectionnel. Pendant cette campagne d'essais, on a appliqué la technique de mesure des champs locaux de déplacement par corrélation d'images numériques. Pour faciliter l'application de cette technique, la géométrie des éprouvettes a été changée pour s'adapter aux conditions d'utilisation. Le type d'essai de délaminage est toujours celui du CLS (Cracked-Lap Shear).

On choisit la géométrie des éprouvettes pour avoir une largeur suffisante permettant d'appliquer la technique de mesure des champs locaux autour de la pointe de fissure. De l'autre côté, la longueur de l'éprouvette est limitée par la taille de la plaque originale du matériau composite à partir de laquelle les éprouvettes ont été découpées.

La force de l'essai est mesurée par la cellule de la machine de traction, le déplacement étant quand à lui mesuré par le capteur qui mesure la position du piston de la machine de traction. Les signaux mesurés de la force, du déplacement, de la caméra sont synchronisés par l'outil MCDL et enregistrés dans un fichier de résultats sous format vidéo.

Un nouveau système de guidage a été conçu et fabriqué pour pouvoir réaliser les essais de délaminage en mode II dominant. De plus, ce système de guidage doit avoir la capacité de limiter les déplacements hors-plan pendant l'essai.

II.7.1. Epreuve de type CLS

Pour caractériser le phénomène de délaminage en dynamique du matériau composite unidirectionnel, la longueur de l'éprouvette permet une propagation de la fissure d'environ 100mm à partir de la pointe de pré-fissure. La largeur de l'éprouvette (20mm) permet une large zone autour de la tête de fissure qui satisfait aux conditions dimensionnelles du traitement par corrélation d'images.

La géométrie des éprouvettes de type CLS a été conçue dans l'objectif de satisfaire aux objectifs demandés. La figure II.25 introduit les dimensions des éprouvettes utilisées. Comme il s'agit d'un empilement de plis unidirectionnels tous orientés dans le même sens, les fibres sont orientées parallèlement au plan de la fissure et dans le sens de la longueur de l'éprouvette.

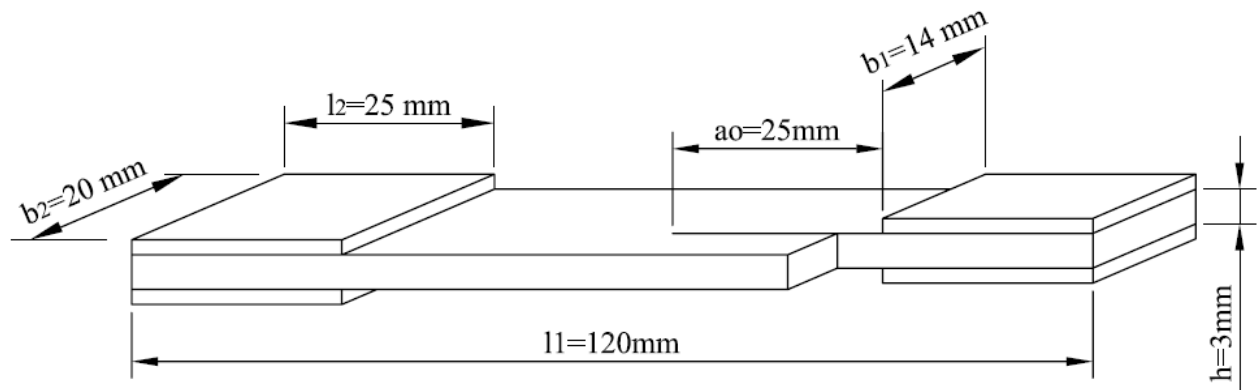


Figure II.25: Epreuve en composite stratifié UD verre/époxy

Avec cette géométrie d'éprouvette, il existe une surface en largeur de 20mm et en longueur d'environ 100mm autour de la pointe de pré-fissure. La pré-fissure est créée par une scie à fil de diamètre 100 μ m selon la direction des fibres.



Figure II.26: Epreuve avec mouchetis

Le talon des éprouvettes est en aluminium et coupé à partir d'une plaque de 1,5mm d'épaisseur. Il est collé à l'éprouvette par un type de colle adhésive qui peut subir des chocs pendant l'essai. La résistance de la colle a été choisie pour faire en sorte que la résistance à l'amorçage soit inférieure à celle de la cohésion entre le talon et le matériau composite, quelle que soit la vitesse de sollicitation.

Sur la surface de l'éprouvette on a déposé une couche de mouchetis (figure II.26). Le mouchetis est créé en mettant dans un premier temps une couche de peinture blanche comme le fond à la surface de l'éprouvette. Après séchage du fond blanc, des points de peinture noire sont ensuite déposés.

Le mouchetis a pour but d'augmenter la qualité des images de la surface par rapport à la technique de mesure de champs. La sensibilité d'une surface de mesure doit présenter une bonne répartition des niveaux de gris de l'image de cette surface.

II.7.2. Obtention d'un mode II dominant

Rappelons ici que l'un des objectifs de cette campagne d'essais est de pouvoir créer le phénomène de délaminage en mode II dominant. Alors que la méthode des essais CLS est bien conçue pour avoir une mode mixte de fissuration (mode I et mode II), le mode d'ouverture (mode I) apparaît au cours de l'essai. Selon le sens de sollicitation de la machine de traction à vitesse élevée (direction verticale), le mode I intervient en ouvrant la fissure dans le sens perpendiculaire. Pour limiter cet effet, les deux côtés longitudinaux de l'éprouvette doivent être guidés.

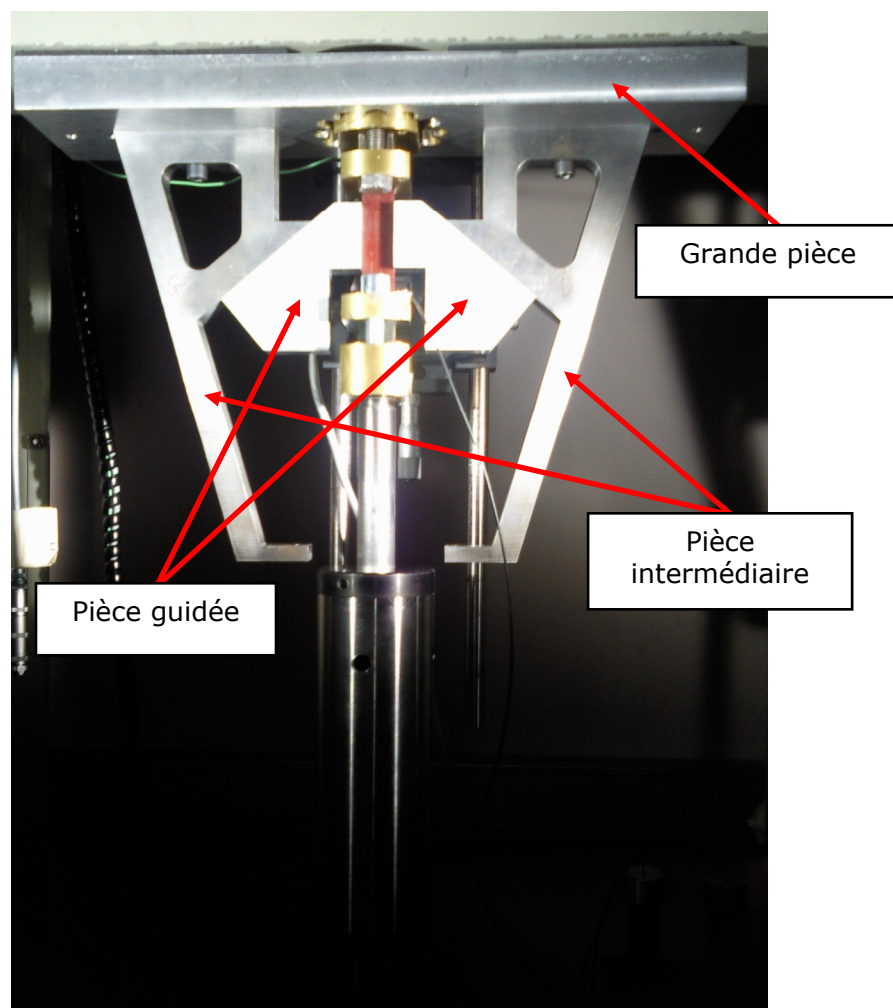


Figure II.27: Le système de guidage de fissuration de mode II dominé

Conformément aux conditions d'expérimentation, on a conçu et usiné un système de guidage présenté à la figure II.27. Le principe de ce système de guidage est de transmettre l'effort d'ouverture de la fissure en haut, vers la grande traverse de la machine de traction (la partie fixée par terre de la machine).

Le système de guidage se compose de cinq pièces différentes. La première pièce fixée en haut et en position horizontale possède le poids plus lourd. Elle tient les quatre autres pièces en suspension et sert aussi à transférer l'effort de frottement à la grande traverse horizontale de la machine TGV. Deux pièces intermédiaires servent à tenir les pièces guidées et permettent de régler facilement les jeux. Les pièces guidées sont connectées aux pièces intermédiaires par deux vis qui passent à l'intérieur de ces deux pièces au lieu de leur contact.

La pièce guidée est en contact avec les deux côtés longitudinaux de l'éprouvette et guident l'éprouvette afin d'éviter les mouvements parasites et ainsi de limiter les déplacements d'ouverture de la pré-fissure pendant l'essai. Afin de limiter l'effort de frottement pendant l'essai, une couche en téflon est collée entre les pièces guidées et la surface de l'éprouvette. L'éprouvette est guidée de manière à ce qu'elle puisse se déformer librement dans la direction verticale mais elle reste bloquée à l'ouverture de la fissure.

Lors de l'essai, l'effet d'ouverture de la fissure est transmis aux pièces de guidage. En prenant en compte les jeux du système de guidage et la rigidité du système, l'effet de l'ouverture ne pourra pas être totalement éliminé. Le phénomène de délaminage des essais se passe essentiellement en mode II et le mode I est forcément limité. Cette remarque pourra être démontrée par les résultats d'analyse par la technique de mesure de champs par corrélation d'images.

Au cours de l'essai, l'éprouvette est déformée par l'effort de sollicitation. La vitesse de déformation de l'éprouvette cause elle-même un effet de frottement avec contact avec les pièces guidées. Plus la vitesse de déformation est grande, plus le frottement augmente. Pourtant, grâce à la couche de téflon collée à la surface de contact, l'effort de frottement sera négligeable.

II.7.3. Protocole d'essai

Avant le montage de l'essai, on a déposé un mouchetis sur la surface de l'éprouvette qui se positionne autour de la pointe de fissure et le long de la ligne de fissuration. Le mouchetis frais est laissé sécher pendant une journée avant lancer les essais. Ceci permet à la peinture de bien coller au matériau composite et de se déformer simultanément avec l'éprouvette pendant l'essai.

L'éprouvette est montée en premier dans le mors inférieur. Après avoir réglé la direction verticale de l'éprouvette, on serre le mors inférieur. L'éprouvette est ensuite positionnée dans le mors supérieur. L'éprouvette est montée sur le banc de l'essai en s'assurant de la direction verticale du chargement.

Le système de guidage est installé juste après. Les deux côtés de l'éprouvette doivent être guidés sur toute leur longueur. Les contacts entre toutes les pièces du système de

guidage sont mis en bonne condition de transmission de force: parfaitement en contact, les vis de liaison sont bien serrées. L'installation du système de guidage doit limiter tous les jeux potentiels de la structure.

Après l'installation de l'éprouvette et du système de guidage sur la machine de traction, les spots d'éclairage et la caméra sont mis en place. La caméra est positionnée pour pouvoir capturer la zone choisie avec une résolution maximale. Les spots assurent un éclairage homogène et l'éclat à la surface de l'éprouvette. La mise au net de la caméra est ensuite réalisée. L'image capturée par la caméra doit avoir un bon contraste. La vitesse du film est choisie selon le besoin de chaque essai. Cette vitesse doit être obligatoirement supérieure à celle des mouvements qui pourront passer pendant l'essai.

La caméra est reliée à l'ordinateur central et commandée par le logiciel Photron fastcam viewer. La sortie des signaux mesurés de la force est connectée à l'outil MCDL avant être reliée à l'ordinateur central. Tous les signaux de la caméra et de la machine de traction sont enregistrés dans un fichier de résultats de format vidéo.

La vitesse de sollicitation est consignée par le logiciel qui commande la machine de traction. Au moment de lancer l'essai de traction, la caméra est mise en marche en même temps afin de filmer la fissuration du commencement jusqu'à la rupture finale de l'éprouvette. La vitesse de la caméra est choisie en fonction de la vitesse de sollicitation pour obtenir le nombre maximal possible d'images de la qualité souhaitée. Cette vitesse dépend aussi de la taille souhaitée des images filmées. Les résultats obtenus pour chaque essai sont les images de la surface de l'éprouvette qui sont enregistrées avec les signaux mesurés de la force correspondante.

II.7.4. Résultats et discussions

II.7.4.1. La vidéo de la surface d'éprouvette avec le mouchetis

Si nous retournons à la théorie de la méthode de mesure de champs, l'application de cette technique de mesure nécessite une bonne sensibilité des images de la surface d'éprouvette: c'est le but visé par le mouchetis.

Au cours des essais de la deuxième campagne, la caméra rapide Photron est utilisée pour prendre des images de la surface d'éprouvette pendant l'essai. En exploitant la capacité de capture en grand nombre des images pendant un court laps de temps, la caméra a filmé la surface d'éprouvette en dynamique du commencement de la sollicitation jusqu'à la rupture finale avec quelques dizaines d'images. Parallèlement, les signaux mesurés de la force de l'essai sont aussi synchronisés avec ces images.

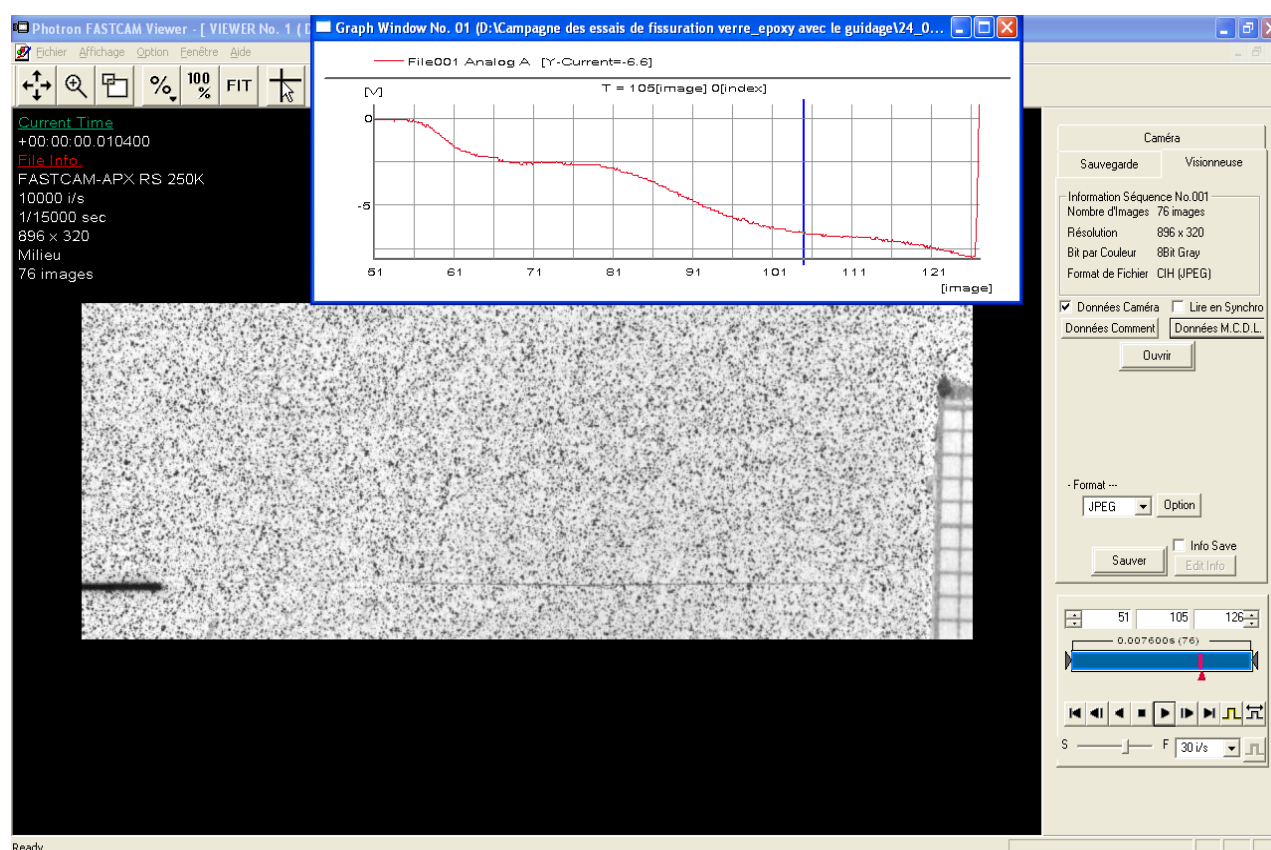


Figure II.28: Vidéo de l'essai

La figure II.28 présente une image de la vidéo filmée de la surface de l'éprouvette pendant l'essai à 1m/s de vitesse de sollicitation. Le mouchetis avec les petits points noirs sur le fond blanc est filmé avec une bonne qualité d'éclairage et une bonne netteté. La qualité de la vidéo permet d'observer visuellement l'évolution du phénomène de fissuration en dynamique. Les signaux de la force mesurée, enregistrés en même temps que les images, sont présentés parallèlement dans une petite fenêtre. Le papier millimétré collé à droite de la surface filmée, est le repère de dimension de la mesure.

La surface d'éprouvette avec le mouchetis filmée au cours de l'essai a une longueur de 40,4mm et une largeur de 14,6mm (Figure II.29). Avec cette taille de la surface locale, on peut observer la propagation de fissure pendant un parcours d'environ 30mm compté à partir de la pointe de la pré-fissure. A la vitesse filmée de 10000 images/seconde, on a récupéré 11 images pendant ce parcours de la fissure. La taille de chaque image du film est de 896pixels x 320pixels.

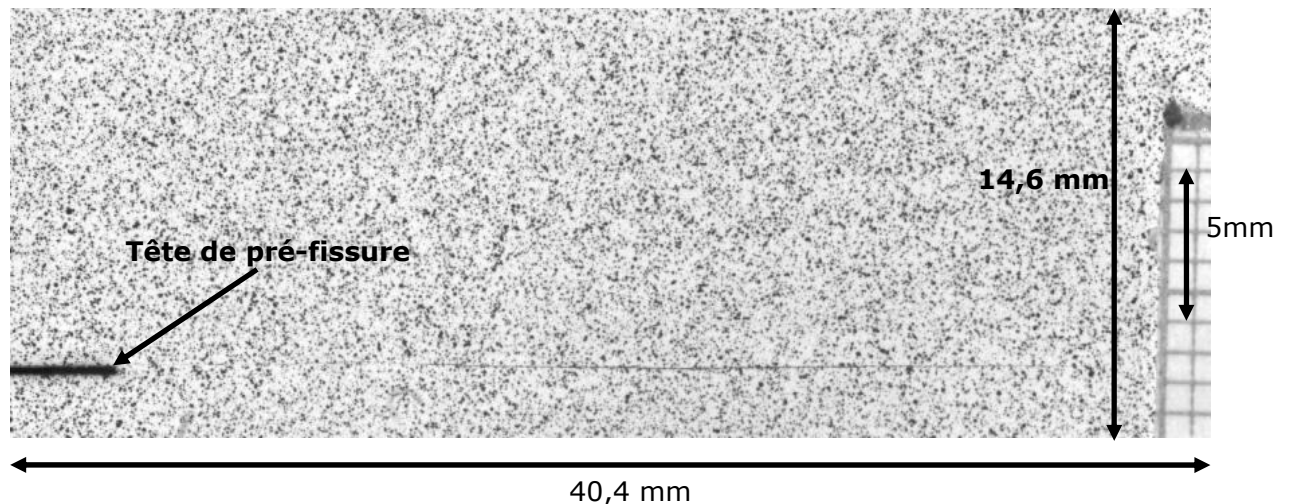


Figure II.29: Image de la surface locale d'éprouvette

La vidéo de la surface d'éprouvette avec le mouchetis présente une série d'évolutions de l'état surfacique de l'éprouvette pendant l'essai. Cette évolution des images est bien suivie, de l'amorçage de la pré-fissure jusqu'au moment où la fissure dépasse la zone filmée. La vidéo des images récupérées de cette zone locale se compose de plusieurs éléments importants permettant de caractériser le phénomène de délaminage en dynamique de l'essai: du temps, longueur de la fissure, champs de déplacement de la surface. L'application de la technique de mesure de champs dans cette campagne d'essais a pour premier but d'identifier les champs de déplacement de la zone locale au voisinage de la tête de la fissure. Une fois que les champs locaux sont identifiés, la longueur de la fissure et le taux de restitution d'énergie sont ensuite étudiés.

II.7.4.2. Mesure des champs locaux par corrélation d'images

L'objectif de cette partie est de présenter l'exploitation des vidéos filmées par la technique de mesure par corrélation d'images. On ne présentera ici que les premiers éléments d'analyse et quelques remarques préliminaires: le développement sera abordé dans le chapitre suivant.

Pour introduire les résultats ainsi de la technique d'analyse par Corrélation d'image, on prend deux images typiques de l'essai à 1m/s de vitesse de sollicitation: image de référence et image déformée. Cet essai a utilisé le système de guidage. L'image de référence correspond à la surface de l'éprouvette à l'état non chargé. En principe, les champs de déplacement de la surface de l'éprouvette à l'état non chargé sont nuls. La

figure II.30 (A) présente le champ de déplacement horizontal (U_1) et la figure II.30 (B) est celui en vertical (U_2). Sur ces deux images, le bras non-chargé de l'éprouvette est en dessous de la pré-fissure.



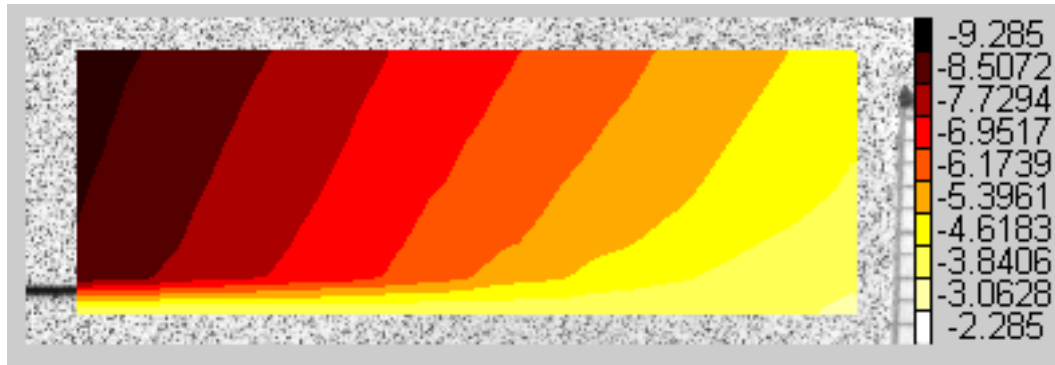
(A): Champ de déplacement U_1 (pixels)



(B): Champ de déplacement U_2

Figure II.30: Champs de déplacement de l'image de référence

L'image déformée est capturée au moment où l'éprouvette est déformée par l'effet de sollicitation. Dans ce cas typique, on prend une image après l'amorçage de la pré-fissure. La figure III.31 présente les résultats d'analyse de l'image déformée. La figure II.31 (A) correspond au champ de déplacement horizontal (U_1) et la figure II.31 (B) est le champ de déplacement vertical (U_2).



(A): Champ de déplacement U1 (pixels)



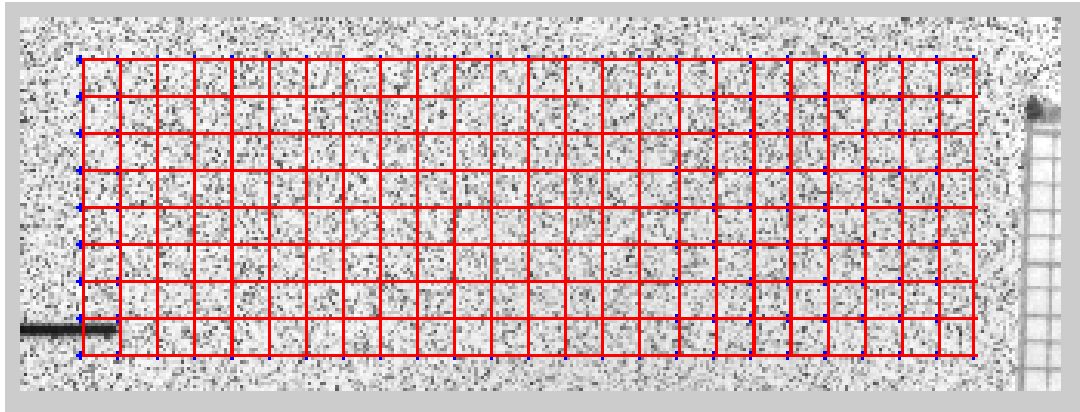
(B): Champ de déplacement U2

Figure II.31: Champs de déplacement de l'image déformée

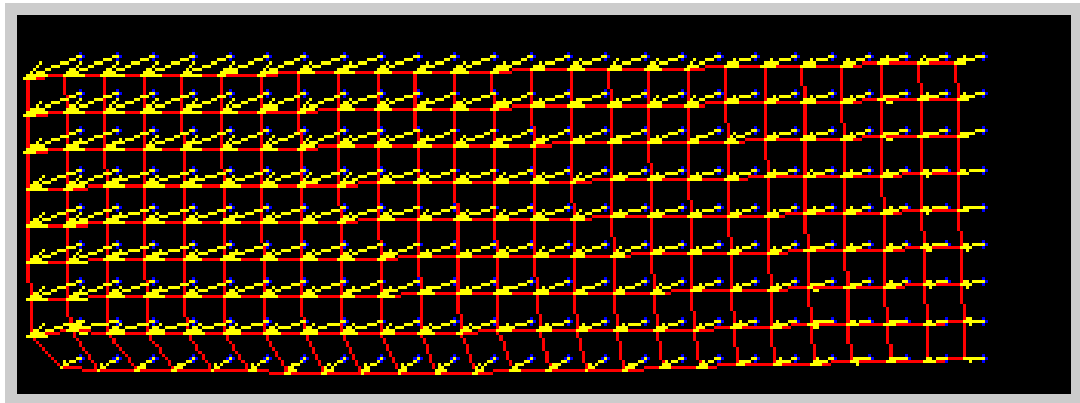
Sur les champs de déplacement de l'image déformée, on trouve visiblement la position de la fissure et aussi sa longueur. La position est plus claire par rapport à la longueur de la fissure. Cette remarque est préliminaire et n'est que qualitative.

Pendant cette analyse par corrélation d'images, on a utilisé la taille d'imagette ZOI égale à 32 pixels x 32pixels. Ces valeurs sont choisies en assurant la meilleure précision de la mesure qui est gérée par la résolution des images analysées.

Une autre manière de présentation des résultats consiste à introduire les champs de déplacement de l'image analysée sous forme du maillage. Les nœuds du maillage sont les centres des ZOI correspondants. La valeur de déplacement de chaque nœud est respectivement celle de la ZOI. La figure II.32 montre les maillages des deux images (l'image de référence et l'image déformée) qui sont créés automatiquement par le logiciel.



Maillage de l'image déformée



Maillage de l'image de référence

Figure II.32: Maillage des centres d'imagette ZOI

La transformation du maillage de l'image de référence à l'image déformée présente visuellement la position de la fissure. On peut facilement trouver que la ligne de fissuration coïncide à la 8^{ème} ligne du maillage. Entre deux côtés de la 8^{ème} ligne du maillage, la tendance des déplacements est différente. Cela s'explique par l'effet de cisaillement de l'essai qui apparaît à la pointe de la fissure. Pourtant, il existe parallèlement le mode I de fissuration qui se présente par des déplacements d'ouverture dans la direction verticale.

Le maillage se compose de 9 lignes et de 25 colonnes soit $25 \times 9 = 225$ nœuds. Le logiciel de corrélation d'images permet d'obtenir les valeurs des déplacements de chaque nœud du maillage. Chaque nœud possède donc une valeur de déplacement horizontal $U1$ et une valeur de déplacement vertical $U2$. La figure II.33 présente sous forme de graphique les déplacements horizontaux des nœuds tandis que la figure II.34 introduit les déplacements verticaux des nœuds. La $i^{\text{ème}}$ série des données de ces deux figures est la $i^{\text{ème}}$ ligne du maillage.

Par ces deux figures (figure II.33 et figure II.34), on identifie visuellement la ligne de fissuration qui se situe sur la 8^{ème} ligne du maillage. De plus, les valeurs de déplacement des nœuds de la 9^{ème} ligne sont différentes des autres lignes. Cette différence est directement liée à l'effet de cisaillement et l'effet d'ouverture en pointe de fissure. La figure II.33 représente l'effet de cisaillement (fissuration en mode II) tandis que la figure

II.34 montre l'effet d'ouverture (fissuration en mode II). Rappelons ici que l'essai utilise le système de guidage et que tous les bras (bras chargé et bras non-chargé) sont guidés pendant l'essai. La figure II.34 présente les valeurs de déplacement des noeuds au voisinage de la tête de la fissure sur la septième ligne du maillage qui sont proches de ceux de la huitième ligne. Par ailleurs, la fissure se trouve entre ces deux lignes du maillage. On peut noter que l'effet d'ouverture (mode I de cisaillement) reste très faible. En effet, l'ordre de grandeur de l'effet d'ouverture est de quelques micro. Par rapport à la figure II.33, l'effet de cisaillement (mode II de fissuration) est dix fois plus grand que l'effet d'ouverture. Cela nous permet de conclure que, grâce au système de guidage, l'effet de cisaillement (mode II de fissuration) est dominant par rapport à l'effet d'ouverture (mode I).

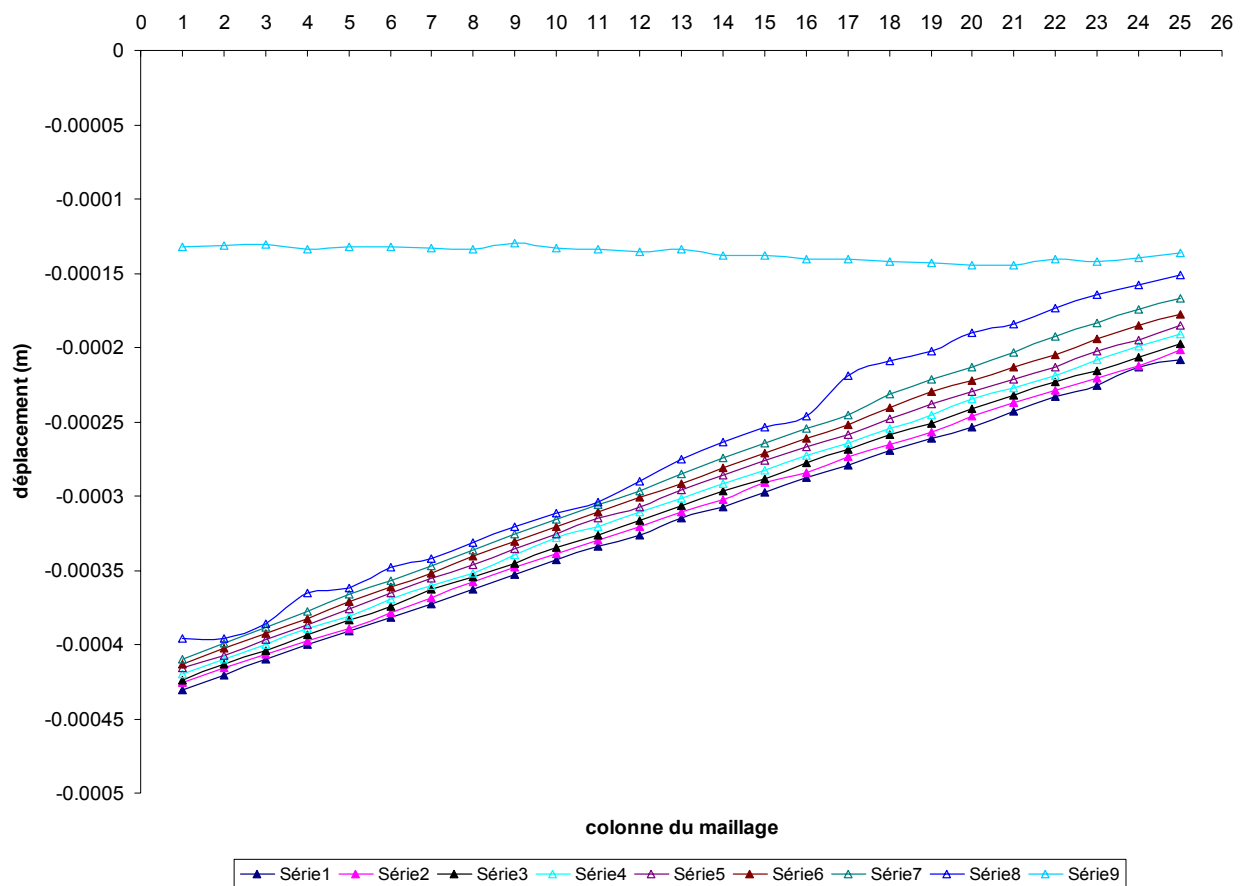


Figure II.33: Déplacement en direction horizontale (mode II) des points de mesure

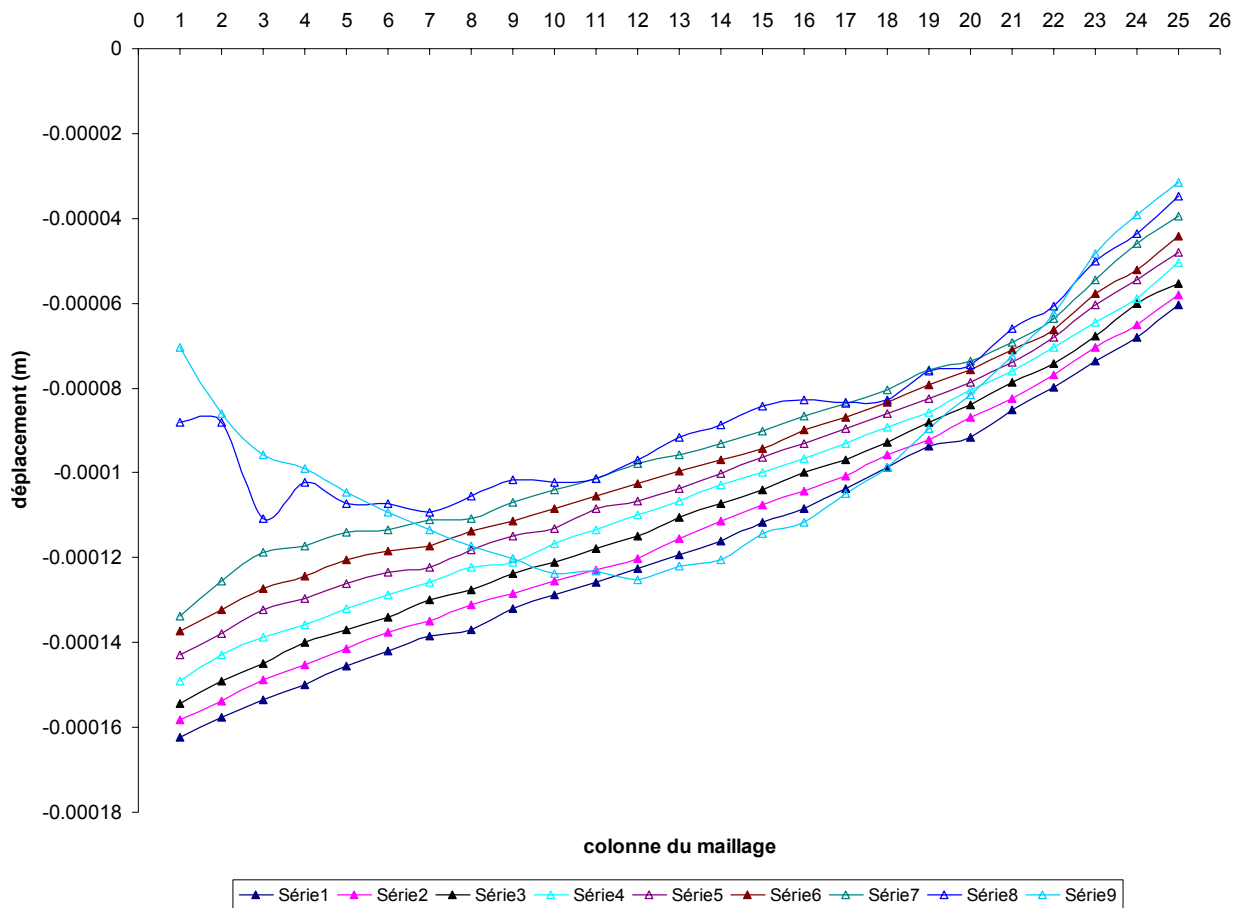


Figure II.34: Déplacement en direction verticale (mode I) des points de mesure

Afin de comparer avec l'essai non-guidé, on a réalisé un autre essai qui n'utilise pas le système de guidage à une vitesse de sollicitation de 0,5m/s (l'essai non-guidé). La surface au voisinage de la tête de la fissure est aussi suivie par la caméra rapide. Les images récupérées sont ensuite analysées par le logiciel de corrélation d'images. La taille de la zone locale au voisinage de la tête de fissure est montrée sur la figure II.35 ainsi que son maillage à la figure II.36.

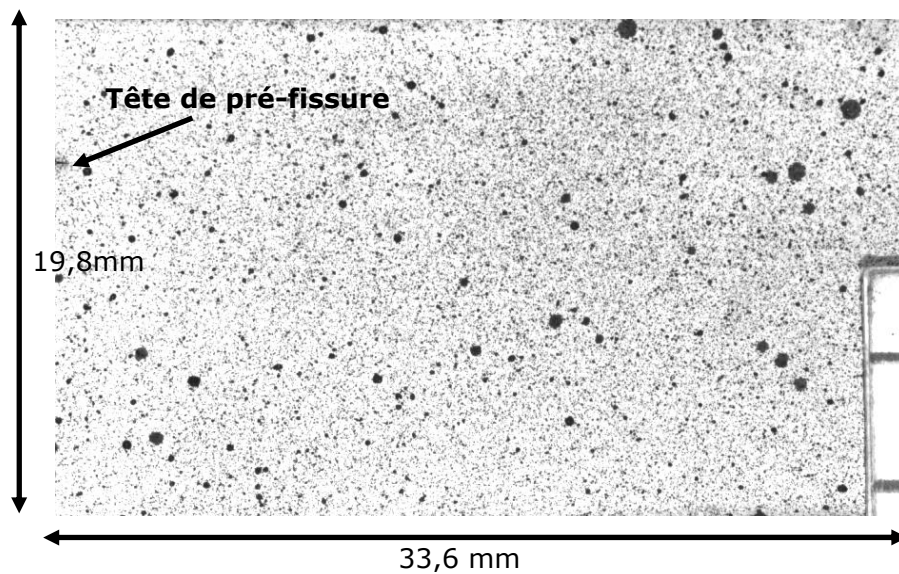


Figure II.35: surface analysée de l'essai à 0,5m/s

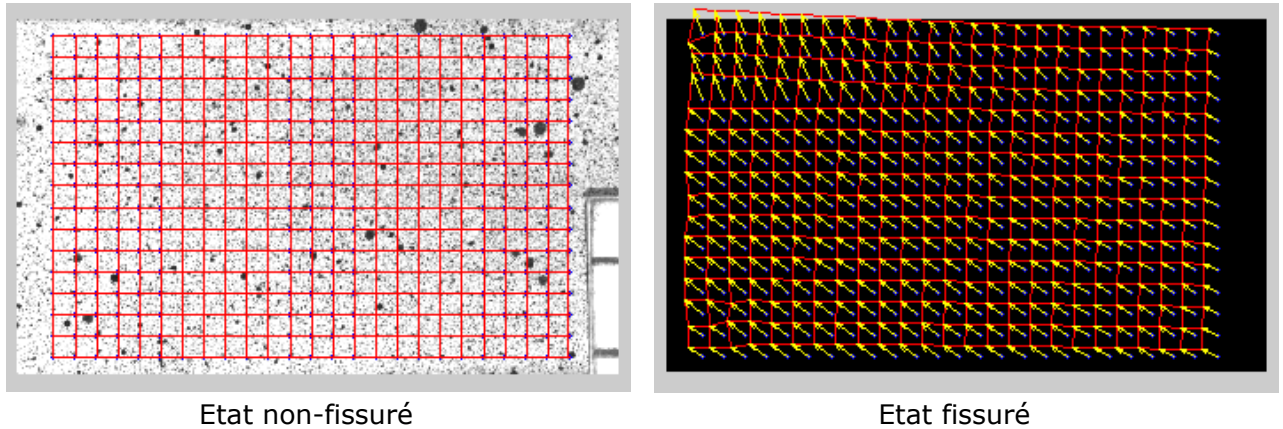


Figure II.36: maillage de calcul de l'essai à 0,5m/s

Dans cet essai (non-guidé), le bras non-chargé de l'éprouvette est au-dessus du bras chargé. De même, on identifie bien la ligne de fissuration qui se situe autour de la 5^{ème} ligne du maillage. Les champs de déplacements mesurés sont présentés en figures II.37 et II.38.

En général, la forme du graphique des courbes de la figure II.37 et II.38 ressemble à celle de l'essai utilisant le système de guidage (figure II.33 et II.34). On peut constater que l'effet d'ouverture et l'effet de cisaillement ont le même ordre de grandeur : quelques $10\ \mu m$. Le système de guidage réduit donc très fortement (d'un facteur 10) l'effet d'ouverture.

L'utilisation du système de guidage a permis de réaliser des essais de délaminage en mode II dominant. Les observations au Microscopie Electronique à Balayage présentées dans la partie précédente de ce chapitre l'ont d'ailleurs confirmé.

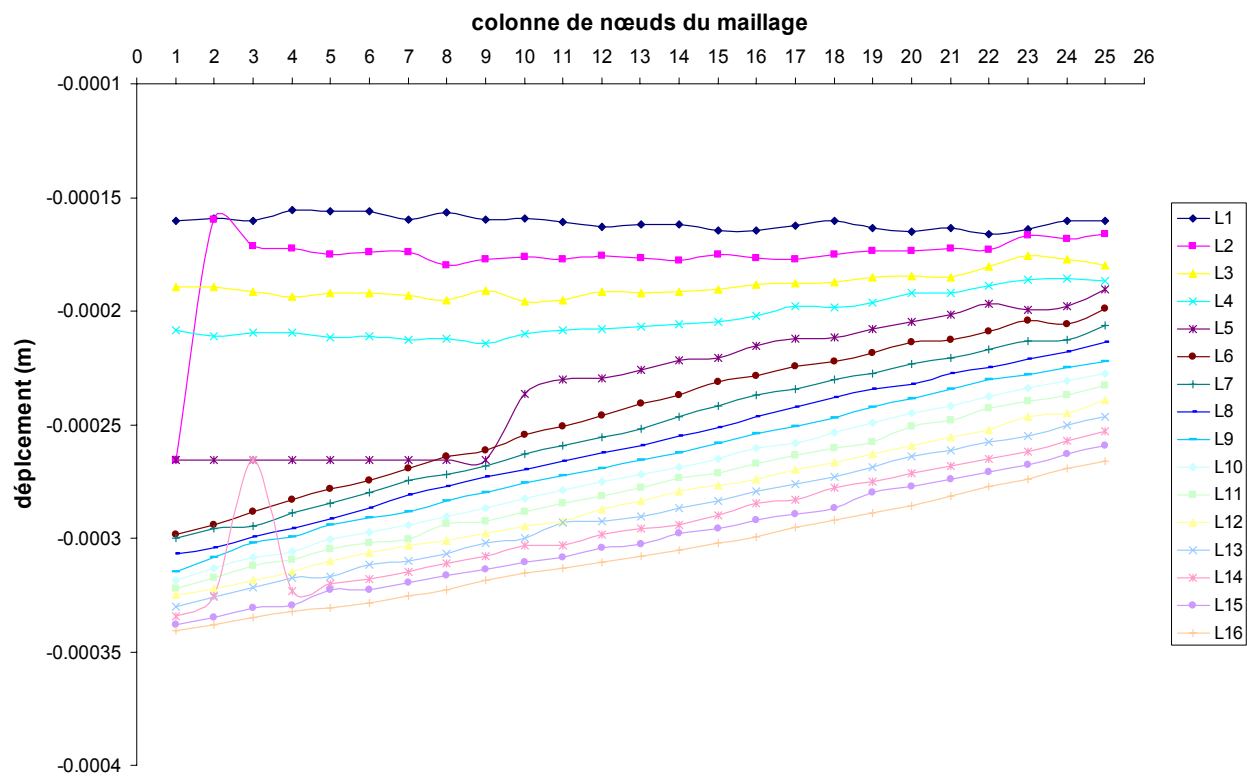


Figure II.37: Déplacement horizontal (mode II) de l'essai à 0,5 m/s

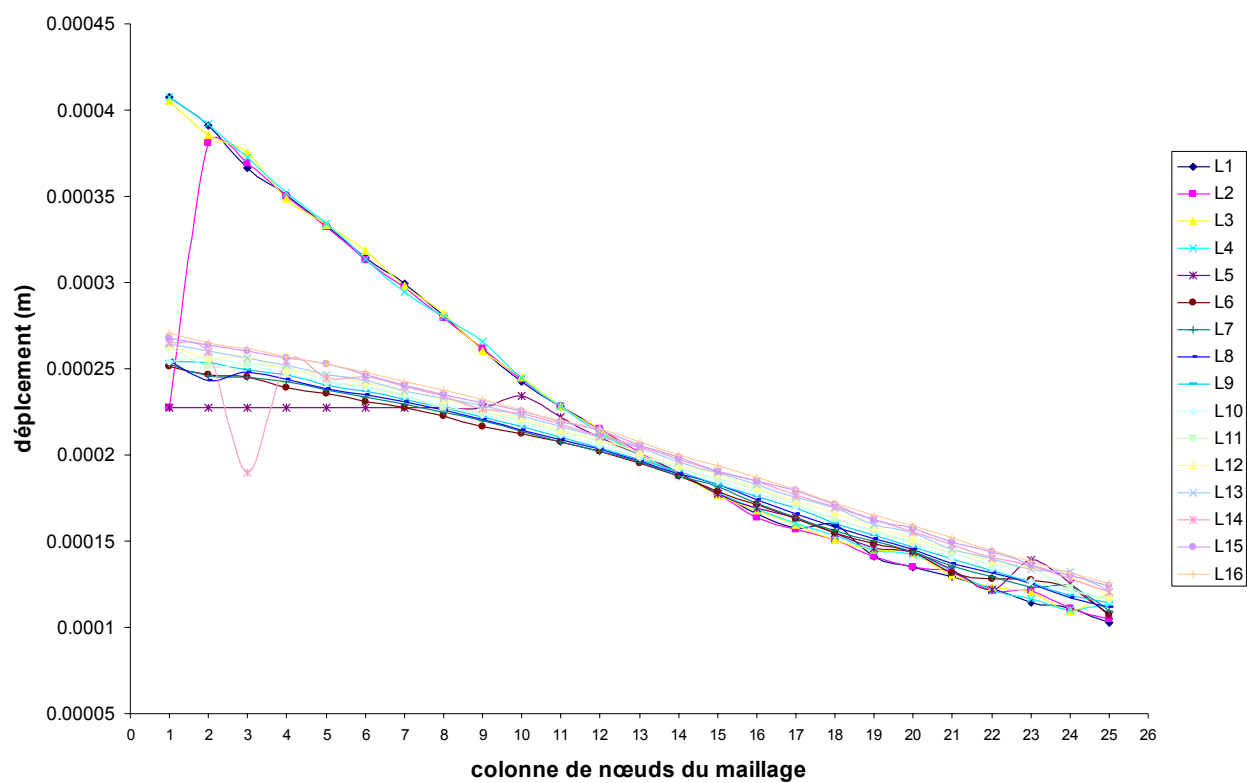


Figure II.38: Déplacement vertical (mode I) de l'essai à 0,5 m/s

II.8. Conclusion du chapitre

Ce chapitre a présenté le choix du type d'essai, les matériaux d'étude, les approches et moyens expérimentaux qui sont utilisés dans le cadre de la thèse. Deux types de matériaux composites ont été choisis pour réaliser les essais. Ensuite, pour chaque essai, le besoin de mesure identifié, un système de capteurs ou des techniques de mesures y sont associés. Les paramètres nécessaires qui permettent de caractériser le phénomène de délaminage sont identifiés.

Parmi les différents systèmes et outils de mesure, un intérêt particulier est porté à la caméra rapide. Sa capacité à capturer un grand nombre d'images pendant une durée courte donne accès à la mesure du phénomène de délaminage en dynamique. Elle permet en effet de contourner l'obstacle des essais dynamiques lié à la grande vitesse de mouvement de l'éprouvette ou des parties de l'éprouvette pendant l'essai.

Le système de guidage utilisé a montré son avantage qui limite grandement l'effet de fissuration en mode I. Les essais sont donc réalisés en mode II dominant. L'observation au microscope électronique à balayage des faciès de rupture a confirmé l'effet du système de guidage.

Le comportement de l'échantillon est influencé par 3 paramètres : l'effet du matériau, la vitesse de sollicitation et le changement géométrique de la structure causé par la propagation de la fissure pendant l'essai. L'évolution de la force pendant l'essai est donc conditionnée par ces 3 paramètres.

Les résultats présentés dans ce deuxième chapitre concernant les essais et les mesures de force et de déplacement pendant les essais sont les mesures de base indispensables à l'étude du délaminage dynamique. Pourtant, une autre mesure est décisive pour caractériser le phénomène de délaminage : celle de l'évolution de la longueur de la fissure. Les essais effectués en grande vitesse de mouvement génèrent de grandes vitesses de fissuration. Cela constitue une grande difficulté pour la mesure de la longueur instantanée de la fissure. Le chapitre III a donc pour objectif de résoudre ce problème afin de pouvoir suivre l'évolution de la longueur de la fissure pendant tous les essais réalisés.

Chapitre III:
Méthodes de détermination de la
longueur de fissure

III.1. Introduction

Le chapitre précédent a présenté les moyens utilisés pour l'analyse de la fissuration dynamique et les premiers résultats. Les courbes de force et de déplacement lors des essais réalisés ont pu y être établies. Pourtant, la longueur de la fissure qui est un paramètre important n'a pas encore été mesurée précisément. L'objectif principal de ce chapitre concerne donc la mesure de l'évolution de la longueur de la fissure pendant les essais présentés au 2^{ème} chapitre. Trois méthodes de mesure sont présentées.

Dans un premier temps, nous allons discuter de deux méthodes classiques permettant suivre la fissuration pendant l'essai: la méthode utilisant un outil coupe-fils et la méthode du contraste.

La méthode utilisant l'outil coupe-fils détecte les ruptures des résistances collées sur la longueur de l'éprouvette lors du trajet de la fissure. Au passage de la fissure, une résistance est coupée ce qui produit une augmentation brutale de la tension électrique. En collant plusieurs résistances sur l'éprouvette, la longueur et la vitesse de propagation de la fissure pourront être déterminées pendant toute la durée de l'essai.

La deuxième méthode consiste à appliquer un traitement numérique de contraste sur l'image filmée pendant l'essai afin de positionner la tête de la fissure. La différence entre la couleur noire de la fissure et le fond blanc déposé sur la surface du matériau permet d'identifier la tête de la fissure.

Chacune de ces deux premières méthodes possède des désavantages qui seront détaillés par la suite. Ceci nous a amené à rechercher une autre méthode de mesure qui permet d'obtenir une meilleure précision. Cette recherche fait l'objectif de la dernière partie de ce chapitre. La méthode proposée est fondée sur la technique de mesure de champs par corrélation d'images numériques. Cette dernière permet d'identifier les champs locaux de déplacement au voisinage de la tête de la fissure. Ces champs locaux seront ensuite utilisés dans une méthodologie numérique permettant de positionner la pointe de la fissure.

III.2. Outil coupe-fils

III.2.1. Principe de la méthode

Cette méthode de mesure utilise des résistances en aluminium collées tout au long du trajet prévu de la fissure afin d'en détecter la position à chaque instant. Cette méthode ne permet pas de mesurer la longueur de la fissure de manière continue à chaque instant de l'essai. En effet, cette méthode de mesure ne donne accès qu'à une valeur moyenne de la vitesse de propagation de la fissure sur le segment situé entre deux résistances successives.

Dans la pratique, un certain nombre de résistances est collé tout au long de la tranche de l'éprouvette. Les résistances sont connectées entre elles de sorte à produire un signal électrique lors de rupture. Lorsque la fissure passe sous une résistance, cette dernière est coupée ce qui produit une augmentation brutale de la tension. Un générateur de courant est utilisé afin d'alimenter le système coupe-fis. La figure III.1 présente une éprouvette avec les résistances collées.

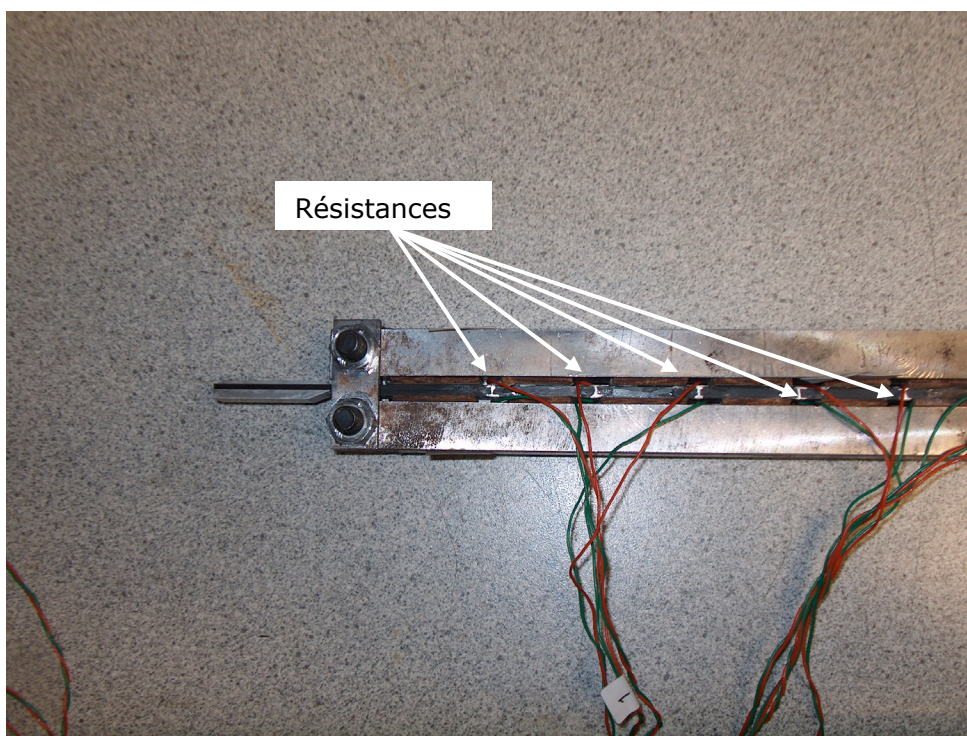


Figure III.1: Outil coupe-fils

La distance entre deux résistances voisines décidera la précision de cette mesure: plus les résistances sont nombreuses plus la précision augmente. Pourtant, le travail de préparation d'une éprouvette comportant un grand nombre de résistance n'est pas toujours facile. De plus, la préparation du montage et la procédure de traitement des résultats demandent beaucoup de temps. La figure III.2 présente la taille d'une résistance par rapport aux autres dimensions de la structure. Pratiquement, la longueur moyenne comprise entre deux résistances est de 20mm.

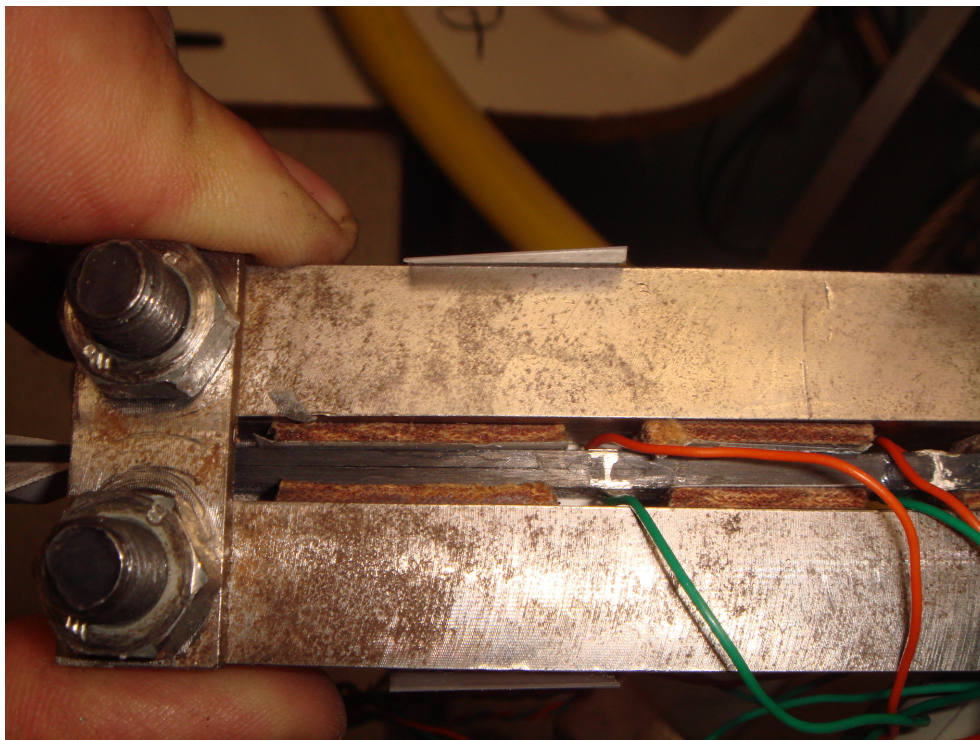


Figure III.2: Résistance collée

La figure III.3 montre un résultat de mesure d'un essai. Le résultat est présenté sous forme d'une courbe de tension. Le saut de tension lors du passage de la fissure sous une résistance collée est bien visible.

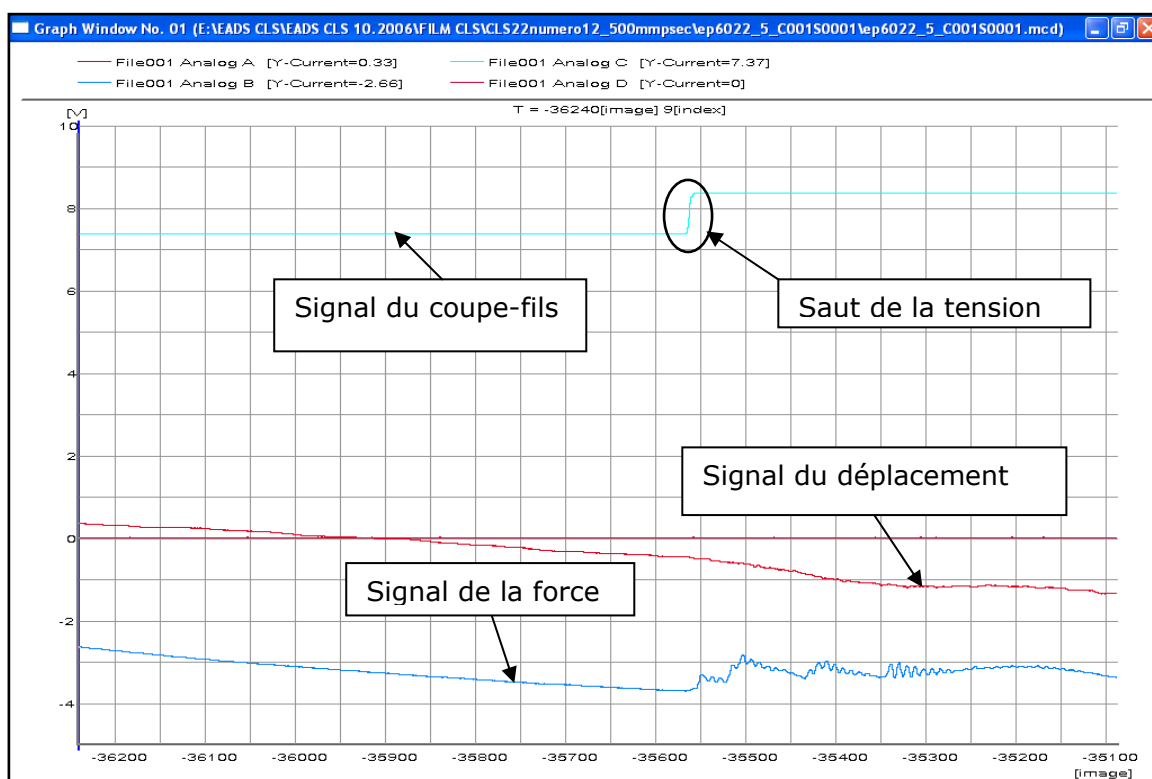


Figure III.3: Signal du coupe-fils

Il faut noter que le temps de réponse de cette technique de mesure dépend fortement de la durée nécessaire pour couper totalement la résistance. Le matériau constitutif de la

résistance présente un comportement élasto-plastique retardant le moment de la rupture. Cette durée est aussi le temps de réponse de cette mesure. Le travail qui suit tente d'évaluer ce dernier.

III.2.2. Temps de réponse de la meure par coupe-fils

Afin de vérifier le temps de réponse de la mesure par coupe-fils, on a utilisé la caméra rapide qui permet de comparer les signaux de la force et de déplacement avec le signal de coupe-fils à tous les moments de l'essai.

La figure III.4 détaille le moment de l'amorçage de la fissure. L'image de la fissure est présentée sur la grande fenêtre. La deuxième fenêtre (la plus petite) présente tous les signaux mesurés lors de l'essai: force, déplacement et tension du coupe-fils. Toutes les courbes sont tracées en fonction de temps.

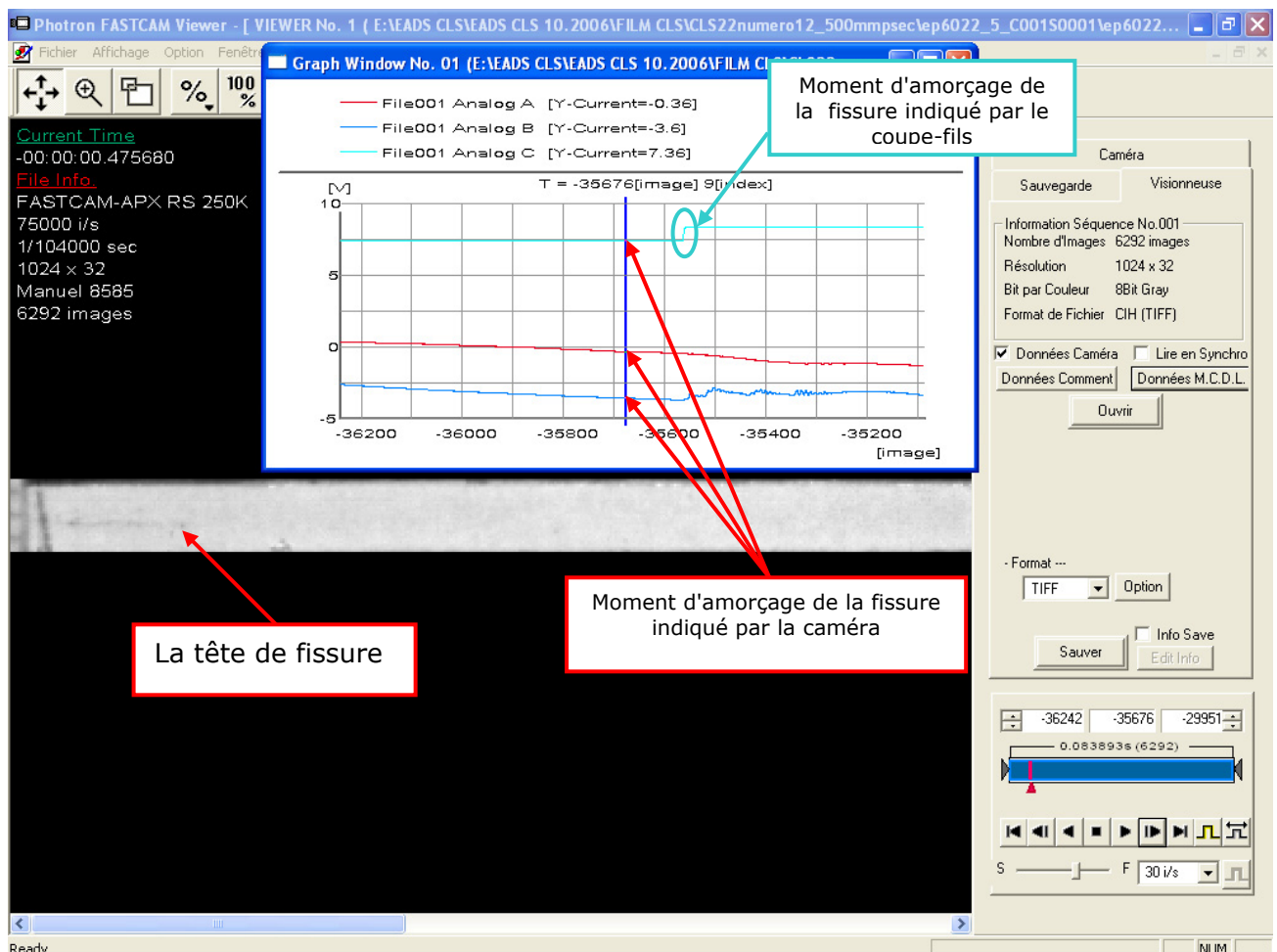


Figure III.4: Comparaison de l'amorçage de la fissure détectée par la caméra et par l'outil coupe-fils

La barre verticale rajoutée dans la petite fenêtre indique l'instant du passage de la fissure identifié à l'aide des images filmées (présentée sur la grande fenêtre).

Sur la courbe de signal de Coupe-fils, on identifie facilement le premier saut de la tension électrique. Ce changement correspond au moment où la fissure coupe totalement

la première résistance collée sur l'éprouvette. Cette première résistance a été collée à l'endroit de la pointe de la pré-fissure. Il en résulte que le premier saut de tension devrait coïncider au moment de l'amorçage de pré-fissure.

La figure III.4 montre clairement que l'avancée de la fissure s'est produite bien avant que le signal coupe-fil ait pu la détecter. Cela permet de mettre en évidence le temps de réponse de l'outil coupe-fils. Ce temps de réponse est de l'ordre de grandeur du décalage entre le temps de premier saut de tension et celui correspondant à l'image de la fissure au moment de l'amorçage. Ce décalage est de l'ordre de 2ms. Comparé à la durée de la propagation de la fissure qui est de l'ordre de 3 ms, on peut affirmer que ce décalage n'est pas du tout négligeable.

Il existe donc une incertitude importante de la mesure par coupe-fils. Après avoir analysé toutes les erreurs potentielles de cette méthode, il ressort que le problème est lié au mécanisme de cet outil. En effet, le matériau constituant la résistance collée est l'aluminium. Ce matériau est très ductile. Lors du passage de la fissure, la résistance va se plastifier avant d'être coupée complètement en deux parties isolantes. La déformation de la résistance permet de passer une ouverture de la fissure avant sa rupture totale. La fissure a pu avancer tandis que la résistance n'est pas encore rompue. Il en résulte qu'au moment détecté du saut de tension, la fissure a dépassé la position de la résistance. Ce phénomène devient important pour les essais en dynamique où on observe une grande vitesse de propagation. De plus, à grande vitesse, l'aluminium développe une plus grande ductilité.

Par conséquent, le dispositif de coupe-fils n'est pas bien approprié à la mesure de la fissuration en dynamique. Le temps de réaction de cette mesure ne lui permet pas de s'appliquer aux mesures en grande vitesse. La mesure en dynamique nécessite donc des moyens de mesure plus sensibles aux grandes vitesses de variation.

III.3. Méthode de contraste

Après avoir étudié la méthode de coupe-fils et mis en évidence les caractéristiques nécessaires d'une méthode de mesure efficace du phénomène de fissuration en dynamique, nous avons pensé mettre à profit les résultats de la caméra rapide. En effet, la caméra rapide a l'avantage majeur de filmer un très grand nombre d'images de bonne qualité pendant une durée très petite. Ceci devient décisif pour surmonter les difficultés de la mesure en dynamique. La méthode de contraste est une méthode de mesure qui a exploité cette capacité importante de la caméra rapide.

III.3.1. Généralité

La méthode de contraste est une méthode de mesure qui se base sur le traitement d'images numériques filmées sur la surface de l'éprouvette. Un agrandissement de la zone autour de la tête de la fissure permet de différencier la partie fissurée par rapport aux autres. Un fond blanc a été préalablement déposé afin d'augmenter la différence de contraste entre la fissure et le matériau autour.

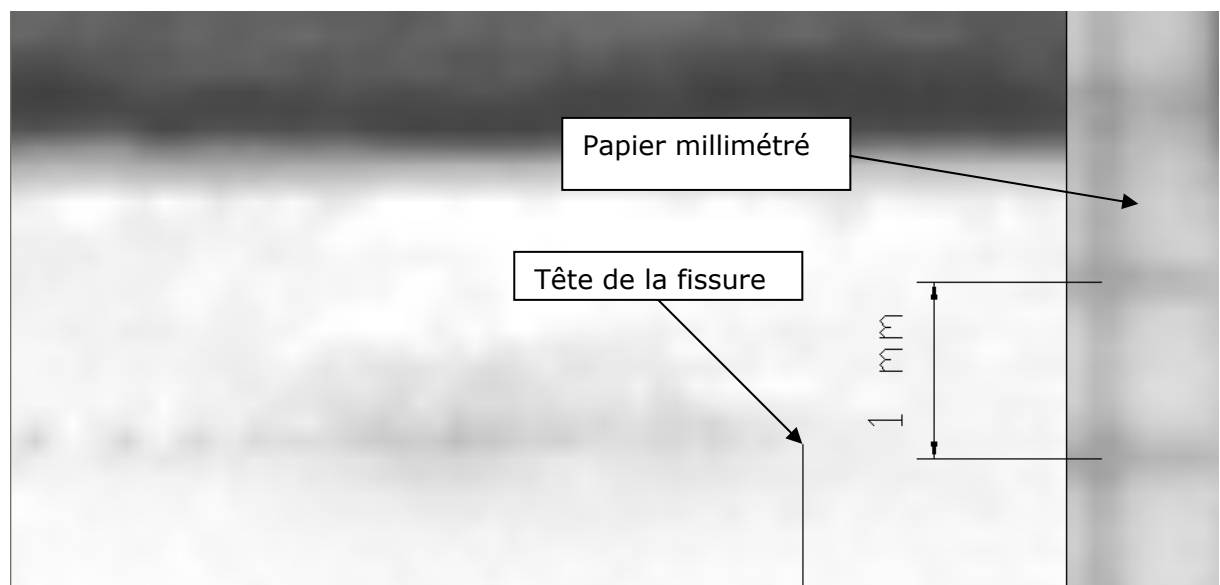


Figure III.5: L'image de la tête de la fissure en grossissement

Avec cette méthode de mesure, la caméra rapide est utilisée pour prendre les images de la fissure d'une façon continue du commencement de l'essai jusqu'à la rupture finale de l'éprouvette. Les images sont ensuite traitées par un logiciel numérique pour trouver la position de la tête de fissure correspondante.

Le système d'éclairage utilisé est deux Spots DEDOLIGHT 400D dont la puissance varie de 400W à 575W chacun. Les spots sont orientables et émettent une lumière dite froide. Les deux spots sont placés à 2 endroits différents. La surface de l'éprouvette doit être uniformément éclairée. A l'aide de ces deux spots, toute la surface autour de la fissure apparaît en blanc brillant et la ligne de la fissure se présente sous forme d'une ligne noire (la figure III.6).

La figure III.5 présente le traitement d'une image filmée par la caméra rapide. Le logiciel utilisé permet de faire un zoom de 20-30 fois de la zone autour de la tête de la fissure. Au dessus de cette valeur de grossissement, le contraste n'apparaît plus visuellement.

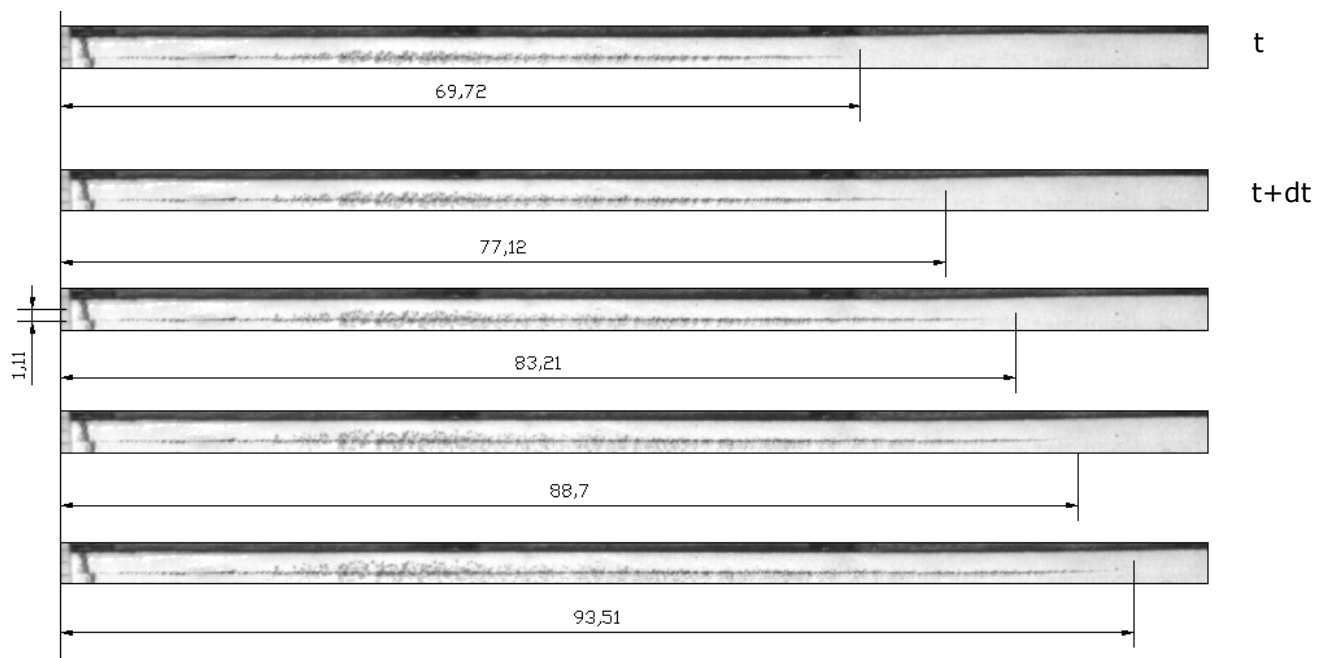


Figure III.6: Longueur de la fissure identifiée sur plusieurs images consécutives filmées lors d'un essai.

La figure III.6 montre une série d'images récupérée lors d'un essai depuis l'amorçage de la fissure jusqu'à la fin de la propagation. Chaque image correspond à un instant de l'essai. A chaque image, la méthode du contraste est utilisée pour mesurer la longueur de fissure.

La mesure utilise donc l'œil de l'utilisateur à l'aide du contraste. C'est pourquoi, cette mesure est sensible et dépend fortement de la qualité de l'image. Dans le cas des essais à grandes vitesses, la surface de l'éprouvette est soumise à des mouvements très rapides et il n'est pas facile d'obtenir des images de très bonne qualité. Par contre, cette méthode de mesure est continue et permet de suivre toute l'évolution de la fissure sur une longue distance (environ 100mm).

III.3.2. Application de la méthode de contraste aux essais du matériau composites carbone/époxy:

La méthode de contraste a été appliquée pour mesurer la longueur de fissure lors des essais sur le matériau composite carbone/époxy. Cette méthode simple permet de déterminer la longueur de fissure avec une précision limitée à $\pm 0,25mm$ [HUG 2005]. Cette méthode a été appliquée aux essais à 0,4m/s, 0,5m/s, 1,2 m/s, 4,1 m/s, 8,3 m/s, 12,2 m/s. Les résultats de la mesure sont présentés sur la figure III.7.

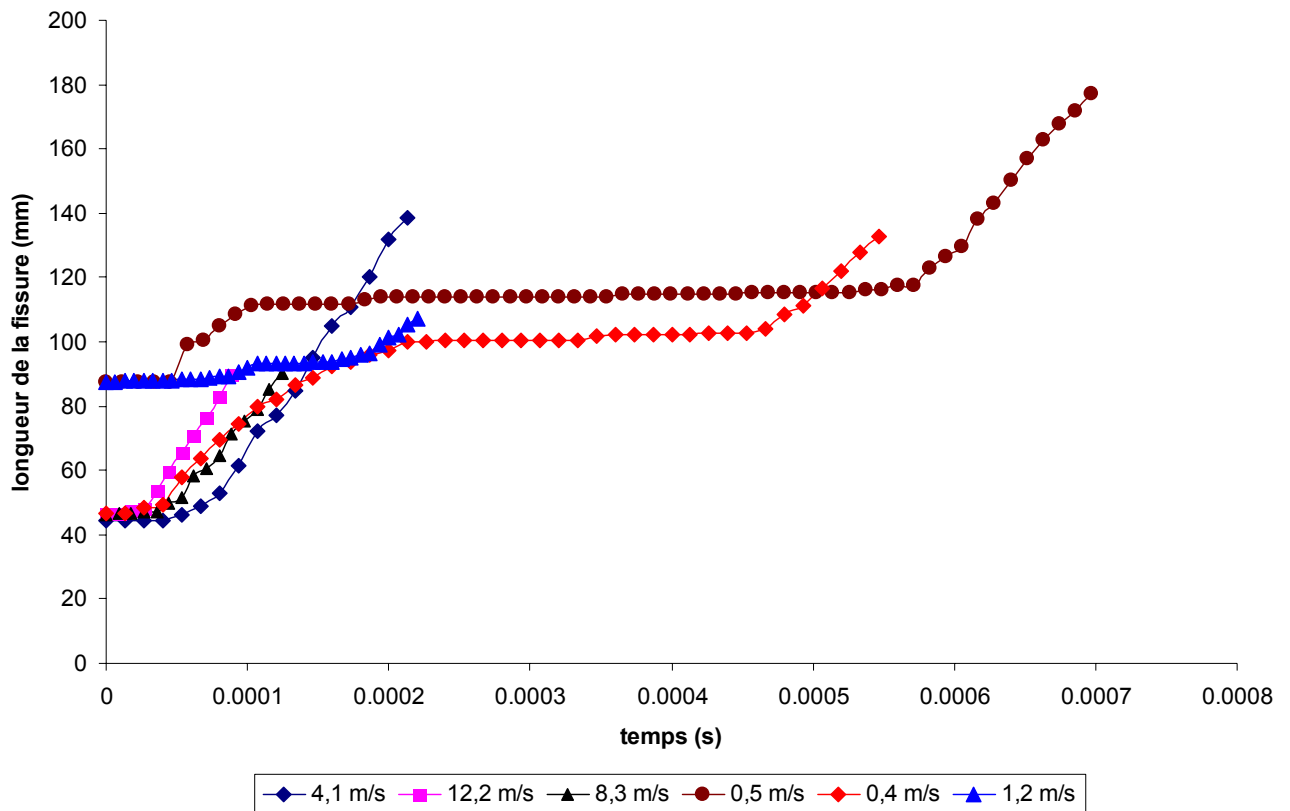


Figure III.7: Mesure de la fissure des essais carbone/époxy

Une remarque peut être faite pour les essais à faibles vitesses de sollicitation : l'essai de 0,4 m/s et l'essai à 0,5 m/s. On observe sur les courbes d'évolution de la longueur de fissure la présence de plateaux sur lesquelles la fissure n'avance pas. Durant ces périodes de "repos", la fissure accumule suffisamment d'énergie avant de recommencer à se propager. Après cette partie de repos, la fissure reprend la vitesse de propagation proche de celle qu'elle avait auparavant.

La figure III.8 présente les vitesses instantanées mesurées de la fissure pendant les essais de la campagne en fonction de la vitesse de sollicitation. La vitesse instantanée est déterminée entre 2 instants successifs de l'essai. Elle est calculée en divisant l'avance de la fissure entre 2 images successives par la durée. Sur cette figure, chaque essai correspond à une vitesse de sollicitation différente et chaque vitesse de sollicitation est présentée par une couleur. La vitesse de la fissure qui est mesurée pendant chaque essai varie différemment de zéro à 1000m/s.

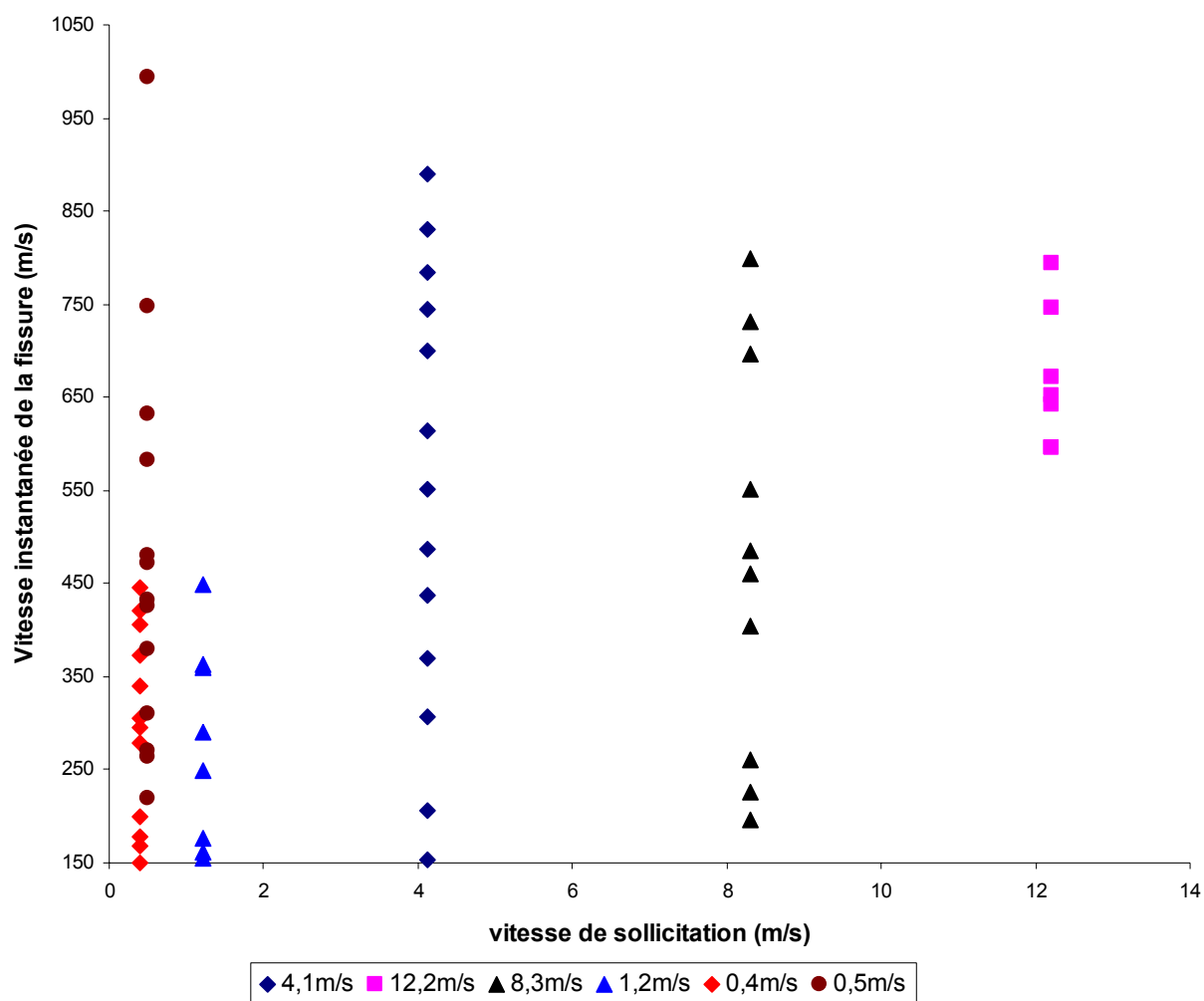


Figure III.8: Vitesse instantanée de la fissure en fonction de la vitesse de chargement.

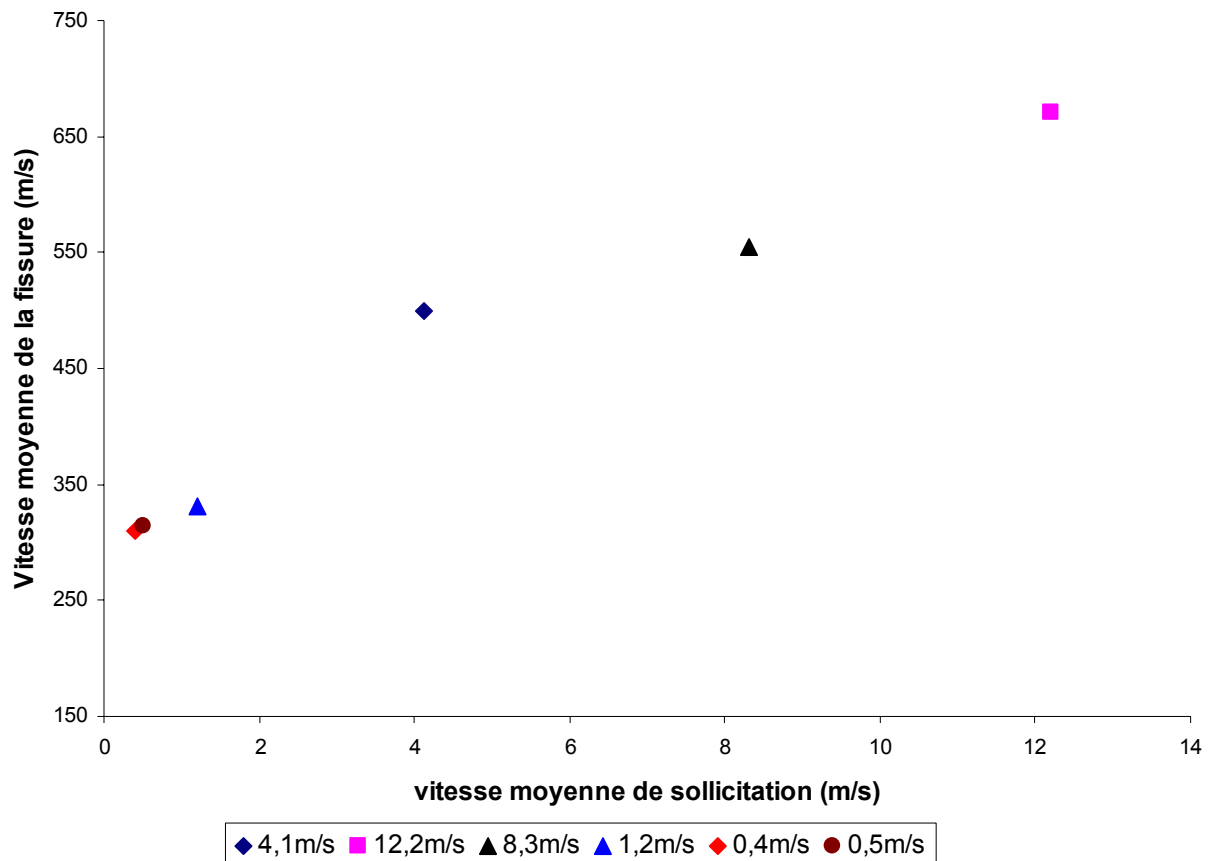


Figure III.9: Vitesse moyenne de la fissure en fonction de la vitesse de sollicitation

La figure III.9 présente la valeur moyenne de la vitesse de la fissure en fonction de la vitesse de chargement. Les résultats de cette figure permettent de constater l'influence de la vitesse de sollicitation sur la vitesse mesurée de la fissure. En effet, la vitesse moyenne de la fissure a tendance à augmenter en fonction de la vitesse de chargement.

La mise en œuvre de la méthode de contraste est relativement facile et rapide. Pourtant, la précision de cette méthode dépend beaucoup de la distance entre les 2 faces de la fissure (l'ouverture de la fissure). Plus cette distance est petite, plus l'incertitude de cette méthode augmente. C'est pourquoi, cette méthode ne pourra pas s'appliquer aux essais avec une petite ouverture de la fissure. Ceci est le désavantage majeur de cette méthode de mesure. Elle devient critique lors d'essais CLS effectués en mode II guidé durant lesquels on empêche l'ouverture des lèvres de la fissure. Cette dernière remarque a motivé la recherche d'une nouvelle méthode s'appuyant sur la mesure des champs cinématiques.

III.4. Une nouvelle méthode d'identification de la longueur réelle de fissure

La première méthode de mesure de la longueur de la fissure présentée dans la partie précédente a montré ses désavantages notamment un effet retard trop important lié essentiellement à la grande vitesse de sollicitation. La deuxième méthode permet de mesurer la longueur de la fissure avec une précision limitée à $\pm 0,25mm$. De plus, la précision de cette méthode de mesure dépend fortement de la visibilité de la fissure donc de l'ouverture des lèvres de la fissure. En effet, cette méthode ne sera pas applicable aux essais avec une très faible ouverture des lèvres de la fissure tels que les essais CLS guidés. Pour ce type d'essais, il est donc nécessaire de mettre en place une autre méthode de mesure. C'est l'objectif de cette partie.

III.4.1. Avantage en grande vitesse de la caméra rapide et de la technique de mesure de champs

Comme nous l'avons présenté au deuxième chapitre, la caméra à grande vitesse permet de capturer un grand nombre d'images de bonne qualité pendant une durée très courte. La vitesse maximale de la caméra allant jusqu'à 250000 images par seconde est donc adaptée aux phénomènes de produisant à vitesse élevée tels que la fissuration dynamique. Le système d'éclairage disponible assure un régime d'éclairage permettant une vitesse d'acquisition maximale de l'ordre de 100.000 images/seconde. Rappelons ici que plus que la vitesse d'acquisition demandée est importante, plus l'éclairage doit être intense.

L'utilisation de la caméra rapide permet donc de suivre l'évolution de la fissuration à travers l'acquisition d'une série d'images prise sur une zone de la surface de l'éprouvette à définir au début de l'essai. La synchronisation du phénomène de fissuration est donc assurée depuis l'amorçage jusqu'à la rupture finale de l'éprouvette.

Par ailleurs, la technique corrélation d'images numériques permet d'identifier les champs de déplacement à la surface de l'éprouvette. Une couche de mouchetis disposée à la surface de l'éprouvette permet au logiciel de comparer les images de la surface déformée par rapport à l'état initial. Un traitement numérique permet d'identifier le champ de déplacement pour chaque état de déformation. En combinant cette technique de mesure avec la caméra rapide, on pourra identifier l'évolution de champ de déplacement de la surface de l'éprouvette pendant toute la durée de l'essai de fissuration dynamique.

III.4.2. Méthode d'identification de la longueur réelle de la fissure

L'idée de base de la méthode que nous proposons est la suivante :

Le champ de déplacement de la zone autour de la tête de fissure est fonction de la position de cette dernière. En effet, la présence de la fissure perturbe le champ de déplacement de cette zone. La ligne de la fissure doit donc coïncider avec une discontinuité des champs de déplacement. La pointe de la fissure se trouve à la fin de cette discontinuité. Il en résulte que si l'on connaît le champ de déplacement de la zone au voisinage de la tête de fissure, la position réelle de cette dernière et par conséquent la longueur réelle de la fissure pourront être identifiées. La figure III.10 montre un exemple de la discontinuité du champ de déplacement qui est causée par la présence de la fissure.

A partir de cette remarque, nous avons proposé une méthode qui permet d'identifier la longueur réelle de la fissure pour chaque image filmée pendant l'essai. Cette méthode utilisera d'une part la technique de mesure par corrélation d'images appliquée aux images filmées par la caméra rapide, et d'autre part, la modélisation par éléments finis.

La zone filmée confinée autour de la tête de la fissure est d'abord choisie de telle sorte à pouvoir assurer une distance minimale nécessaire à l'observation de la propagation de la fissure pendant l'essai. Les champs de déplacement seront alors déterminés. A chaque image acquise correspond donc un champ de déplacement mesuré. Ensuite, pour chaque image on réalise une modélisation par éléments finis en gardant les mêmes dimensions que la zone filmée. La modélisation par éléments finis utilise comme conditions aux limites, les déplacements mesurés aux bords de la zone d'étude (connus par corrélation d'images). La longueur de la fissure modélisée est définie comme un paramètre variable de la modélisation. Enfin, les champs de déplacement issus de la modélisation sont comparés avec les champs mesurés afin d'identifier la valeur réelle de la longueur de la fissure. Cette valeur correspond à la longueur de fissure générant le champ de déplacement qui est le plus proche de la mesure par corrélation d'images. Cette longueur de la fissure sera prise comme la longueur réelle de la fissure pour l'image traitée. Cette procédure est reproduite pour chaque image filmée. Il est à noter que cette méthode n'est pas influencée par l'ouverture de la fissure.

Cette méthode d'identification de la longueur réelle de la fissure a été appliquée pour un essai de la deuxième campagne sur le composite verre/époxy. Cette méthode n'a pas été utilisée pour la première campagne d'essais du fait que la largeur limitée de la zone à filmer. En effet, les éprouvettes du matériau carbone/époxy ne sont pas suffisamment larges pour pouvoir obtenir une qualité d'image suffisante. Il aurait fallu utiliser un zoom dont nous ne disposons pas au moment des essais. Toutefois, le même principe peut être appliqué dans l'absolu.

Dans la suite, on présente cette méthode de mesure en s'appuyant sur une image prise lors d'un essai sur le composite verre/époxy réalisé à la vitesse de sollicitation de 1m/s (figure III.10).

A. Mesure par corrélation d'images

L'image étudiée présente une couche de mouchetis noir sur fond blanc. La fissure apparait au milieu de la zone étudiée (indiquée par la flèche). On note qu'il est très difficile de positionner la tête de la fissure à l'œil (figure III.10). La mesure par corrélation d'images a été réalisée en utilisant une taille de ZOI (carré unitaire) de 32pixels x 32pixels. Le champ de déplacement déterminé est présenté sur la figure III.11.

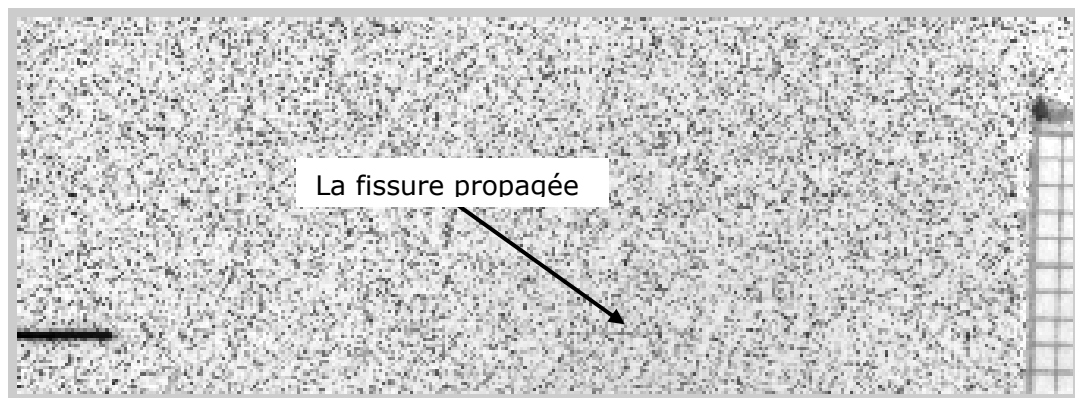


Figure III.10: Image étudiée

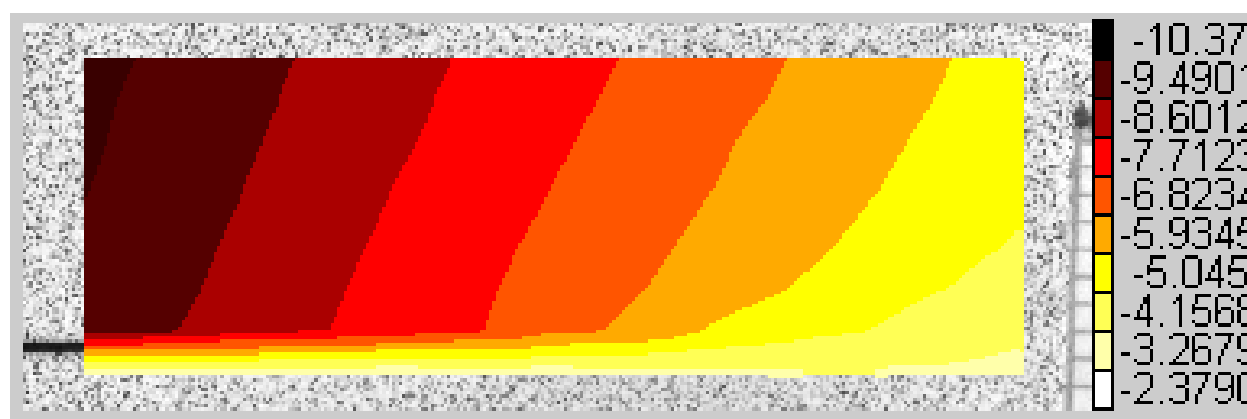


Figure III.11: Champ de déplacement longitudinal déterminé par corrélation d'images.

La taille de la ZOI est mise en évidence par le carré jaune au coin supérieur à gauche de la zone d'étude (figure III.12). Les centres de la ZOI sont les points en couleur bleue de la figure III.12. Le maillage est formé automatiquement par les centres des ZOI et est montré sur la figure III.13.

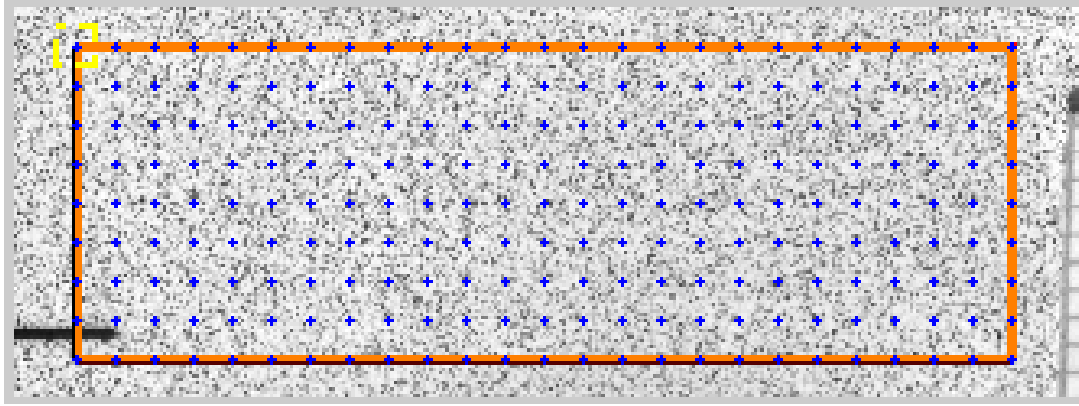


Figure III.12: Maillage formé par les centres des ZOI

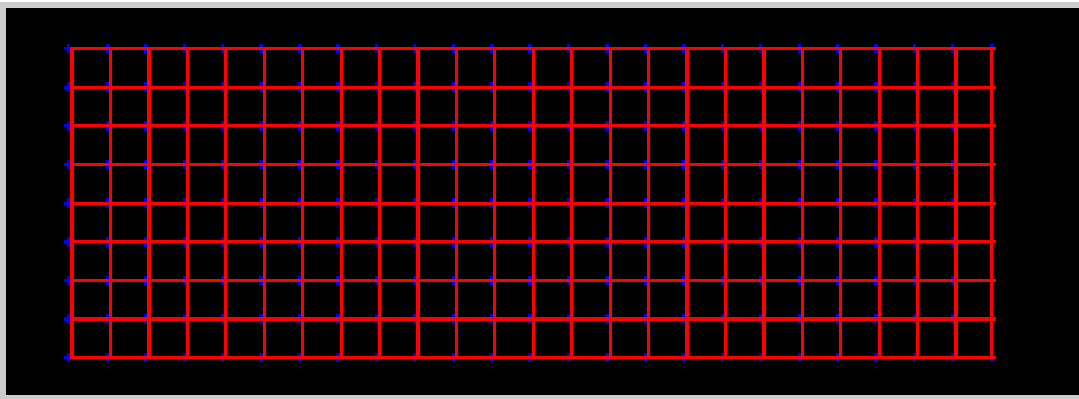


Figure III.13: Maillage à état initial non déformé

La figure III.14 montre la déformation du maillage de l'image étudiée. Les vecteurs jaunes indiquent le déplacement des centres de ZOI. Ces vecteurs de déplacement mettent bien en évidence le cisaillement induit tout au long de la fissure. La fissure se situe donc aux abords de la huitième ligne du maillage en partant du haut.

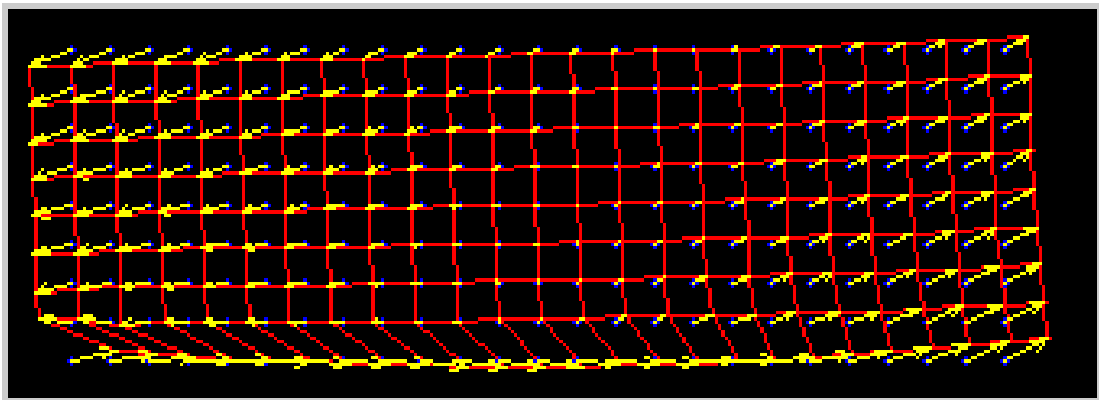


Figure III.14: Maillage déformé correspondant à l'image étudiée

B. Modélisation par Eléments Finis

Le maillage éléments finis est choisi de telle sorte à correspondre au maillage utilisé par la corrélation d'images. La zone modélisée présente la même dimension que la zone étudiée par corrélation d'images (figure III.15). La taille d'élément est égale à la taille du

ZOI, donc égale à la taille d'un carré du maillage de la mesure. Etant données les remarques du paragraphe précédent, on considère que la fissure se trouve sur la huitième ligne du maillage.

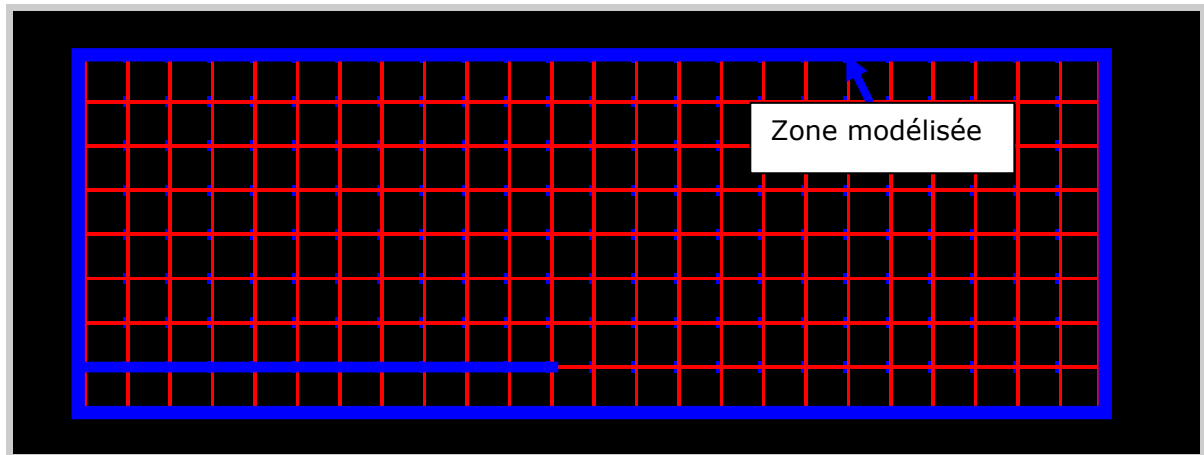


Figure III.15: Zone modélisée

Le logiciel par éléments finis utilisé est Abaqus version 6.5. La modélisation est réalisée en condition de déformation plane et l'élément fini choisi est du type CPS8R. C'est un type d'élément fini biquadratique, déformation plane quadrilatéral et intégration réduite. Les caractéristiques du matériau composite unidirectionnel verre/époxy de l'étude sont présentées par le tableau II.2 du chapitre II. Le comportement utilisé est élastique linéaire anisotrope.

On fixe une première valeur de la longueur modélisée de la fissure. L'épaisseur de la fissure modélisée est de 10^{-2} mm, et la tête de fissure est modélisée comme la pointe d'un triangle. Les conditions aux limites consistent à appliquer sur chacun des nœuds du contour de la zone d'étude les déplacements du même nœud déterminés par corrélation d'images. Ceci est rendu possible par la parfaite correspondance entre les deux maillages.

Afin d'identifier la longueur réelle de la fissure, on fait varier progressivement la longueur modélisée de la fissure. On effectue une modélisation différente pour chacune des valeurs choisies de la longueur de la fissure. La variation de longueur de la fissure modélisée correspond à la longueur d'une maille définie par la dimension des éléments finis utilisés.

Le fait d'utiliser la même taille d'éléments finis par rapport à celle des ZOI a pour but de comparer les champs de déplacement modélisés avec ceux de la mesure. Le déplacement de chaque centre de ZOI sera comparé avec le point correspondant du champ de déplacement modélisé.

C. Comparaison des champs de déplacement

Pour comparer les champs de déplacement de la mesure avec ceux de la modélisation, on propose une méthode qui permet d'évaluer l'écart quadratique moyen de tous les nœuds du maillage. Le champ de déplacement mesuré, considéré comme le champ de déplacement réel, constitue notre valeur de référence. Chaque champ de déplacement a donc 2 valeurs écart quadratique moyen: une pour les déplacements horizontaux (f_{U_1}) et une pour les déplacements verticaux (f_{U_2}). La moyenne de ces deux valeurs caractérise l'écart moyen global de tout le champ de déplacement modélisé par rapport à celui de la mesure. Cette valeur sera donc le paramètre caractéristique qui permet la comparaison des deux champs de déplacement.

L'écart quadratique moyen des déplacements horizontaux est défini par :

$$f_{U_1} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i^N (\delta(U_1 - A)_i - \delta(U_1 - C)_i)^2} \quad \text{Eq III-1}$$

L'écart moyen des déplacements verticaux est défini par :

$$f_{U_2} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i^N (\delta(U_2 - A)_i - \delta(U_2 - C)_i)^2} \quad \text{Eq III-2}$$

Enfin, l'écart moyen global du champ de déplacement est défini comme :

$$f_U = \frac{1}{2} (f_{U_1} + f_{U_2}) \quad \text{Eq III-3}$$

avec:

N le nombre des nœuds du maillage.

$\delta(U_1 - A)_i$ le déplacement horizontal du nœud i du maillage modélisé.

$\delta(U_1 - C)_i$ le déplacement horizontal du nœud i du maillage mesuré.

$\delta(U_2 - A)_i$ le déplacement vertical du nœud i du maillage modélisé.

$\delta(U_2 - C)_i$ le déplacement vertical du nœud i du maillage mesuré.

Deux autres paramètres supplémentaires (%_U1 et %_U2) sont aussi calculés pour évaluer le pourcentage d'écart moyen dans chaque direction (horizontale et verticale) par rapport au déplacement moyen du champ mesuré :

$$\%_{U1} = \frac{f_{U1}}{U_{1\text{moyenne}}} \% \quad \text{et} \quad \%_{U2} = \frac{f_{U2}}{U_{2\text{moyenne}}} \%$$

avec:

$U_{1\text{moyenne}}$ le déplacement moyen du champ de déplacement horizontal mesuré

$U_{2\text{moyenne}}$ le déplacement moyen du champ de déplacement vertical mesuré

D. Résultat et discussion

Pour chaque image de la structure déformée, on procède donc à un certain nombre de modélisations par éléments finis. Chaque modélisation effectuée correspond à une valeur donnée de la longueur de la fissure. A chacune de ces valeurs correspond un champ de déplacement est modélisé. Tous les champs de déplacement modélisé seront comparés avec le champ de déplacement mesuré afin d'identifier celui qui est plus proche au champ de déplacement mesuré. La valeur de la longueur de la fissure utilisé pour les champs identifié comme étant le plus proche de la mesure est donc celle qui se rapproche le plus de la valeur réelle. Le tableau III.1 introduit les valeurs de longueur de fissure des modélisations de l'image choisie.

Modélisation	1	2	3	4	5
Longueur modélisée de la fissure: L_{fissure} (mm)	8,175	10,9	12,26	13,63	14,98

Tableau III.1: Nombre de modélisations par éléments finis

Pour chaque valeur de la longueur de fissure, on calcule les valeurs respectives des $\%_U1$, $\%_U2$ et f_U . Le tableau III.2 présente les résultats de calculs pour toutes les modélisations de cette image.

L_{fissure} (mm)	8,175	10,9	12,26	13,63	14,98
$U_{1\text{moyenne}}$ (mm)	0,224	0,224	0,224	0,224	0,224
f_{U1} (mm)	9,47E-03	7,86E-03	7,44E-03	7,25E-03	7,24E-03
$\%_U1$	4,2%	3,5%	3,3%	3,2%	3,2%
$U_{2\text{moyenne}}$ (mm)	0,047	0,047	0,047	0,047	0,047
f_{U2} (mm)	5,21E-03	5,51E-03	5,72E-03	6,05E-03	6,44E-03
$\%_U2$	11,12%	11,76%	12,20%	12,91%	13,74%
f_U (mm)	7,34E-03	6,69E-03	6,58E-03	6,65E-03	6,84E-03

Tableau III.2: Variation de longueur de la fissure modélisée

L'analyse des résultats de calcul: f_U , $\%_U1$, $\%_U2$, nous conduisent aux remarques suivantes:

- L'ordre de grandeur des $\%_U1$, montrent une faible différence entre le champ de déplacement horizontal de la mesure par rapport au champ modélisé.
- L'ordre de grandeur des $\%_U2$ reste par contre assez grand. L'écart moyen du champ de déplacement vertical modélisé par rapport au champ de la mesure est donc relativement important. Par contre, il faut noter que la valeur moyenne du déplacement vertical du champ mesuré est dix fois plus petite par rapport à celle du déplacement horizontal. Il est donc évident qu'il

sera difficile d'être plus précis pour de si petites valeurs de déplacement. L'écart entre la modélisation et la mesure est donc forcément plus important.

- L'écart moyen global du champ de déplacement f_U reste de faible amplitude. Plus sa valeur est petite, plus les champs de déplacement modélisés sont proches de la mesure.

La figure III.16 montre l'évolution de l'écart moyen global du champ de déplacement modélisé par rapport aux champs mesurés, f_U , en fonction de la longueur de la fissure. La courbe présente une forme parabolique. Sur la courbe, apparaît donc une valeur minimale de f_U qu'il nous faut maintenant identifier.

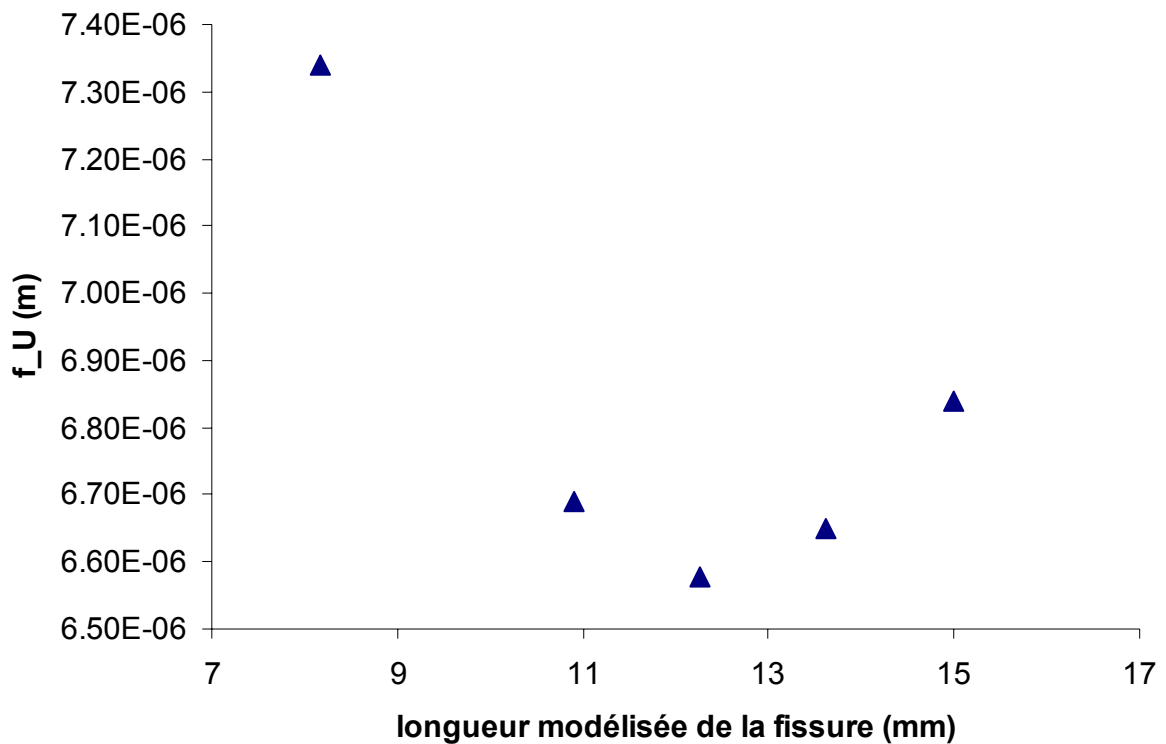


Figure III.16: Courbe d'évolution de l'écart moyen global du champ de déplacement modélisé par rapport au champ mesuré.

En effet, la longueur modélisée de la fissure qui correspond à la valeur minimale de la dispersion moyenne f_U correspond à la meilleure estimation de la longueur réelle de la fissure. Afin d'identifier la longueur réelle de la fissure, il nous faut donc identifier la valeur minimale de la dispersion moyenne f_U sur la courbe d'évolution (figure III.16).

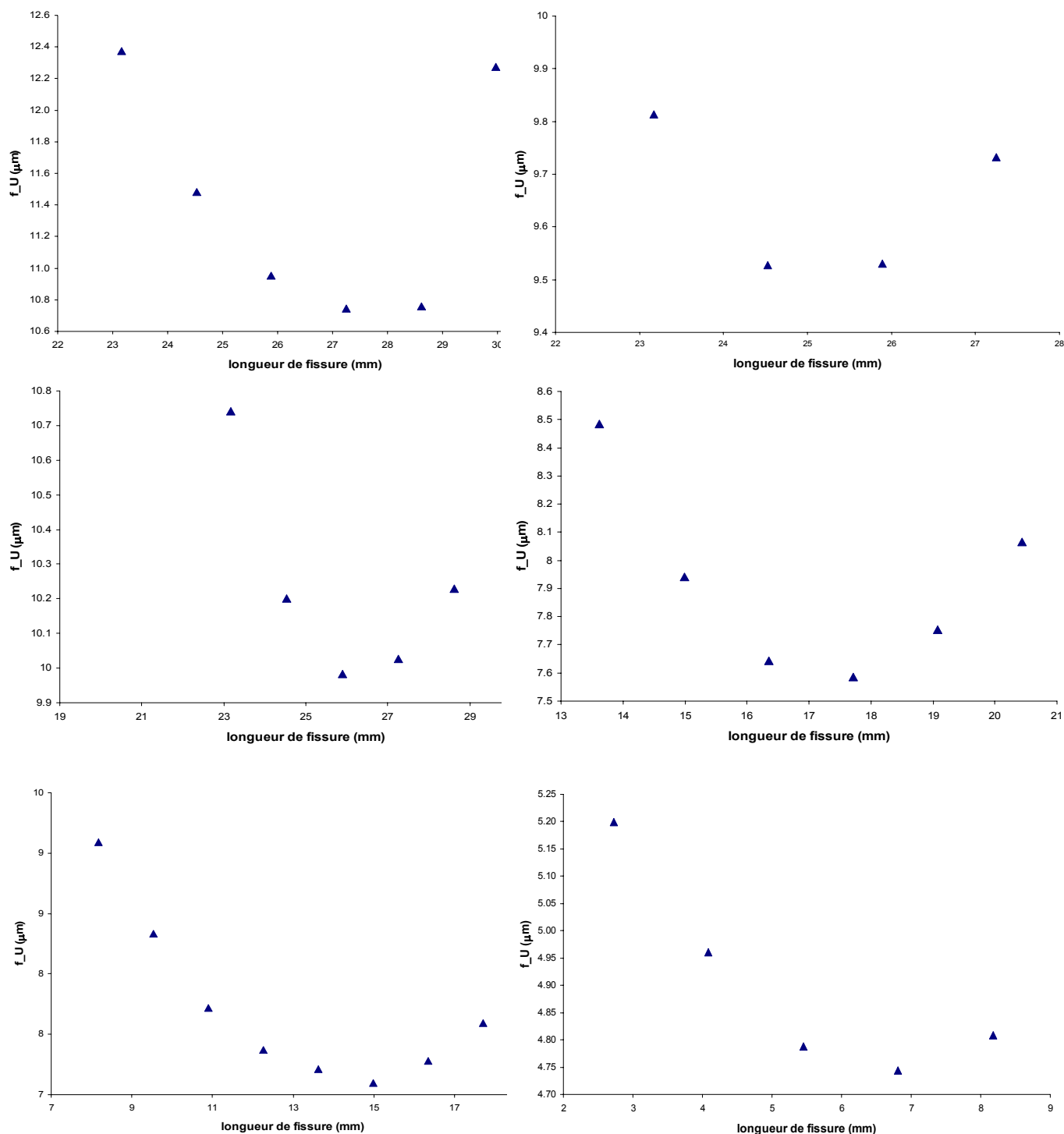


Figure III.17: Formes typiques des courbes ($f_U - a$)

La figure III.17 présente les formes typiques des courbes de ($f_U - a$) correspondant aux traitements des différentes images de l'échantillon déformé au cours de cet essai. On constate à chaque fois une forme parabolique. Il existe donc toujours une valeur de a sur la courbe ($f_U - a$) pour laquelle f_U atteint sa valeur minimale. La valeur de la longueur réelle peut donc toujours être identifiée.

Pour trouver la valeur optimale de la longueur de la fissure, on trace une courbe de tendance de type polynôme d'ordre 2. Ce polynôme est utilisée pour identifier la valeur

minimale de f_U en fonction de la longueur de la fissure. La figure III.18 présente ce travail.

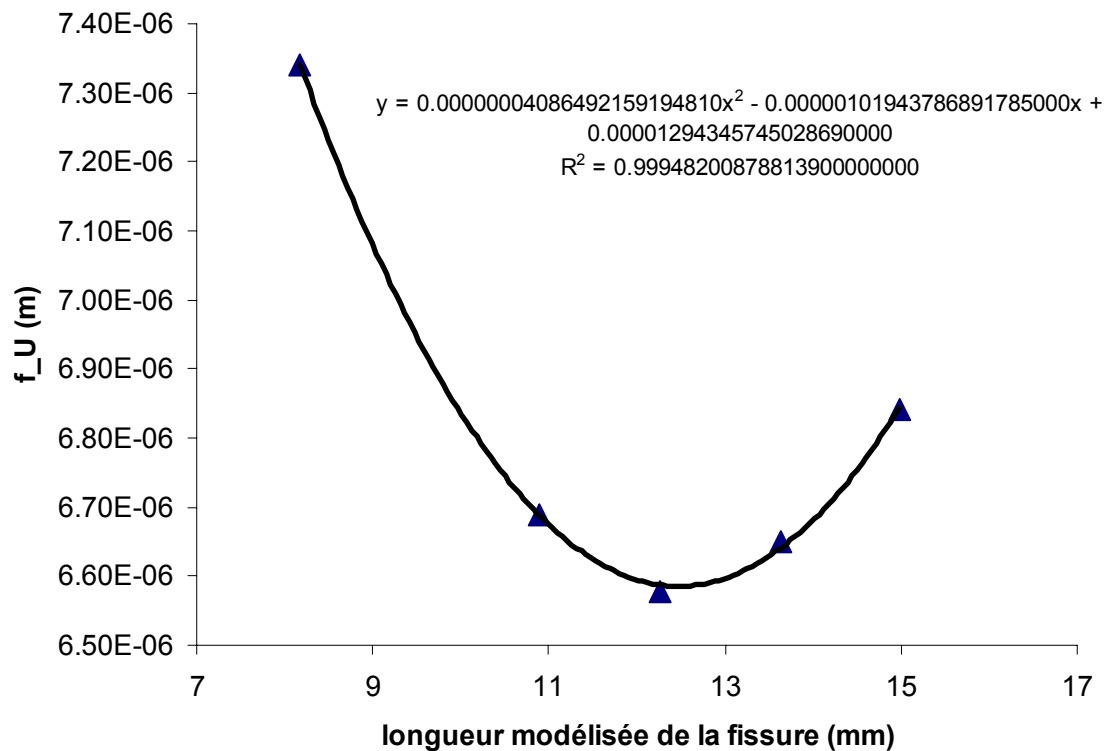


Figure III.18: Fonction d'interpolation $f_U = f(a)$

Sur cet exemple, la fonction polynômiale s'écrit:

$$f_U = 0,4086E-07.a^2 - 0,102E-05.a + 1,294E-05$$

La valeur minimale de f_U correspond à la longueur de la fissure qui satisfait :

$$\frac{df_U}{da} = 0,8172E-07.a - 0,102E-05 = 0$$

On trouve donc la longueur réelle de la fissure est : $a = 12,47mm$.

La valeur réelle de la fissure correspondant à cette image est donc égale à: 12,47mm. Cette valeur de la fissure correspond à une valeur de l'écart moyen global minimisé et égale à $f_U = 6,58E-06m$.

$$f_U(a = 12,47mm) = 6,58E-06m$$

Le calcul a montré une valeur optimale de la longueur de fissure. En principe, cette longueur correspond à un champ de déplacement modélisé qui est le plus proche de la mesure. Afin de vérifier l'exactitude de cette méthode, on réalise une dernière modélisation utilisant la longueur identifiée pour comparer avec le champ mesuré par corrélation d'image.

III.4.3. Vérification de la méthode d'indentification proposée

Ce travail est consacré à vérifier l'exactitude de la troisième méthode de mesure de longueur de la fissure et d'en estimer la précision. La vérification est basée sur la comparaison entre le champ modélisé et champs mesuré lorsqu'on utilise pour la modélisation, la longueur de la fissure identifiée. La valeur de l'écart moyen global entre ces deux champs de déplacement décidera l'exactitude de la méthode proposée.

D'abord, la troisième méthode de mesure est appliquée à une image filmée pendant un essai pour identifier la longueur réelle de la fissure correspondant à cette image. La mesure par corrélation d'images est ensuite utilisée pour la même image afin de mesurer les champs de déplacements. La figure III.19 présente le maillage de la mesure par corrélation d'images qui est appliquée à l'image choisie.

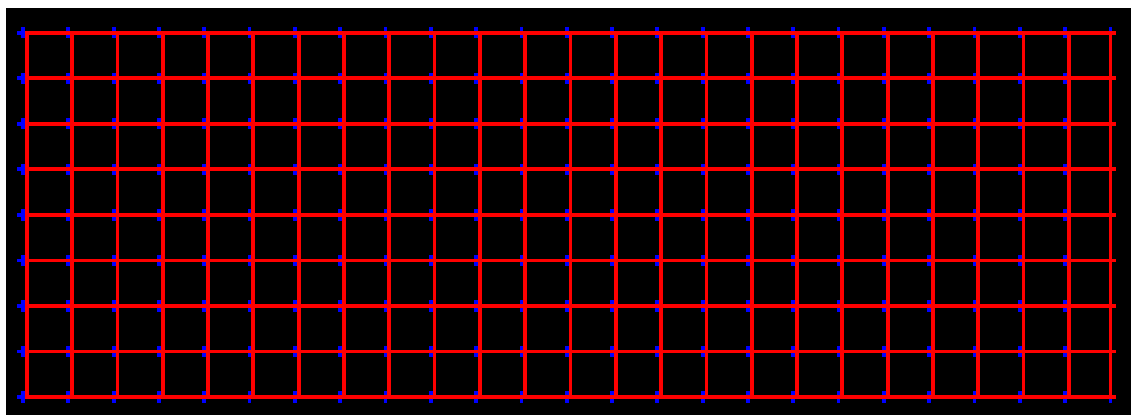


Figure III.19: Maillage de la mesure

La mesure par corrélation d'images donne accès au champ de déplacement horizontal présenté sur la figure III.20 et sur la figure III.21 pour le champ de déplacement vertical.

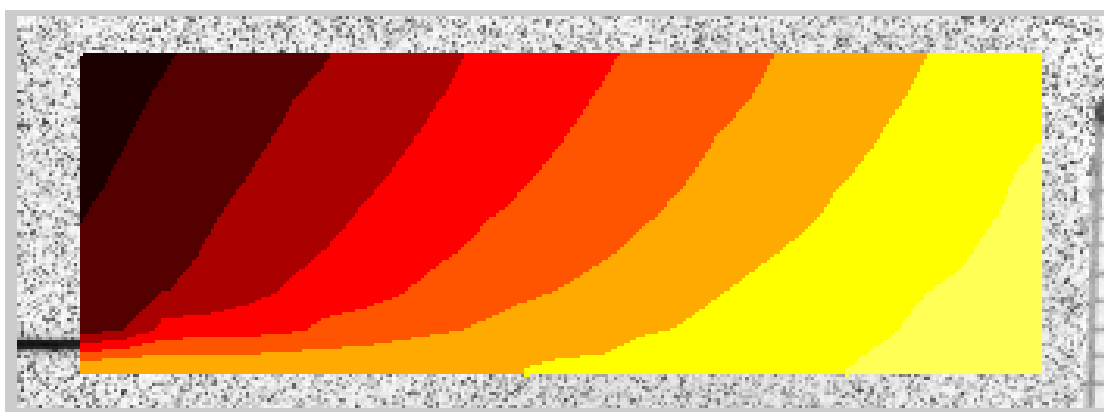


Figure III.20: Champ de déplacement horizontal mesuré



Figure III.21: Champ de déplacement vertical mesuré

Par ailleurs, le comportement de l'éprouvette dans la zone d'étude est modélisé par élément finis en utilisant la longueur identifiée de la fissure. Le maillage de la modélisation est présenté à la figure III.22. Ce maillage est créé en reprenant les mêmes dimensions par rapport au maillage de la mesure par Corrélation d'image.

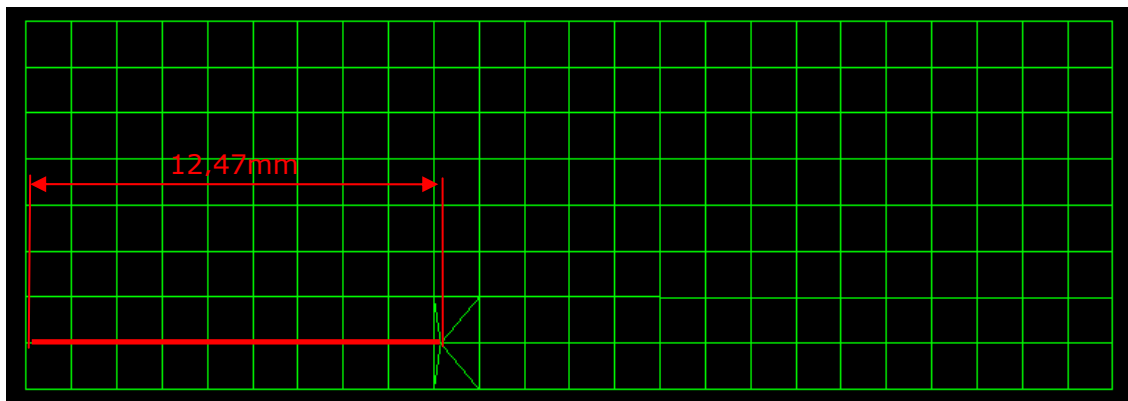


Figure III.22: Maillage de la modélisation

Le champ de déplacement horizontal obtenu est présenté à la figure III.23 et le champ de déplacement vertical à la figure III.24.

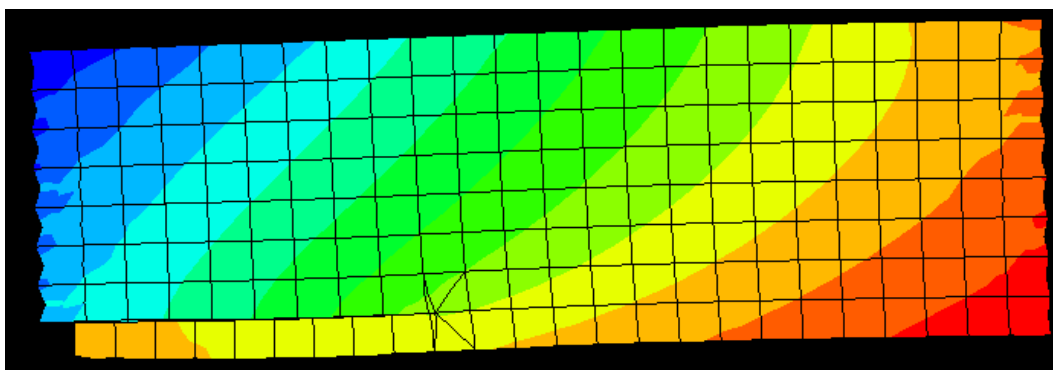


Figure III.23: Champ de déplacement horizontal modélisé

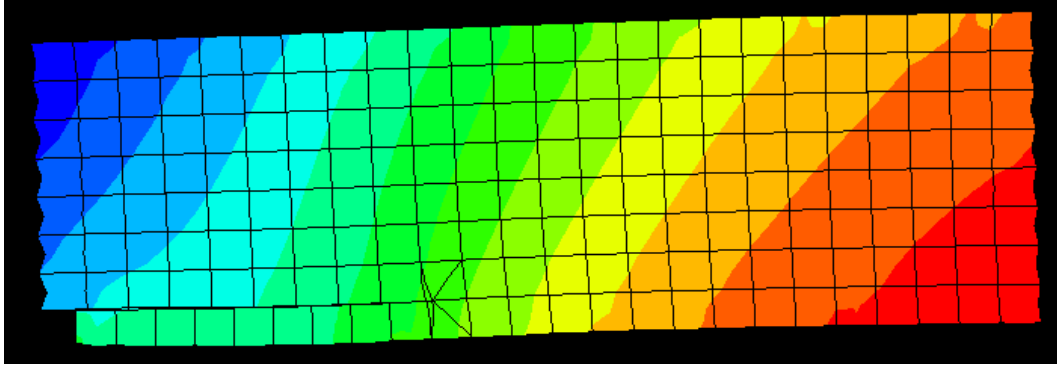


Figure III.24: Champ de déplacement vertical modélisé

Visiblement, les champs de déplacement modélisés présentent une forme similaire à ceux de la mesure. Toutefois, est difficile de quantifier visiblement l'écart entre les champs mesurés et les champs calculés directement à partir des champs de déplacement montrés aux figures III.20, III.21 et III.23, III.24. Afin de comparer ces champs de déplacements, on utilise la méthode de l'écart moyen qui est présentée dans la partie précédente. Par contre, les valeurs de déplacements correspondant à chaque nœud du maillage sont présentées à titre indicatif aux tableaux III.3, III.4, III.5, III.6.

Selon la méthode de comparaison, on calcul l'écart moyen sur les déplacements horizontaux :

$$f_{-U_1} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i^N (\delta(U_1 - A)_i - \delta(U_1 - C)_i)^2} = 6,23.10^{-3} mm$$

De même pour les déplacements verticaux :

$$f_{-U_2} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i^N (\delta(U_2 - A)_i - \delta(U_2 - C)_i)^2} = 4,82.10^{-3} mm$$

L'écart moyen global entre les champs de déplacement est donc:

$$f_{-U} = \frac{1}{2} (f_{-U_1} + f_{-U_2}) = 5,52.10^{-3} mm$$

Il est à noter que cette valeur est très proche de celle correspondant à la valeur du minimum du polynôme d'ordre 2 ayant servi à l'identification. Les pourcentages d'écart moyen dans chaque direction (horizontale et verticale) par rapport au déplacement moyen du champ mesuré sont:

$$\%_{-U_1} = \frac{f_{-U_1}}{U_{1moyenne}} = 2,78\%$$

$$\%_{-U_2} = \frac{f_{-U_2}}{U_{2moyenne}} = 10,28\%$$

Les tableaux III.3 et III.4 ont pour but de montrer l'ordre de grandeur des déplacements mesurés, tandis que les tableaux III.5 et III.6 présentent ceux modélisés. Les valeurs moyennes des champs mesurés sont:

$$U_{1\text{moyenne}} = 0,224\text{mm}$$

$$U_{2\text{moyenne}} = 0,047\text{mm}$$

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13
L1	-0.346	-0.337	-0.330	-0.321	-0.312	-0.305	-0.300	-0.290	-0.280	-0.273	-0.265	-0.259	-0.249
L2	-0.341	-0.332	-0.325	-0.317	-0.311	-0.301	-0.292	-0.283	-0.277	-0.269	-0.261	-0.254	-0.246
L3	-0.338	-0.329	-0.321	-0.312	-0.304	-0.296	-0.287	-0.280	-0.272	-0.264	-0.257	-0.248	-0.240
L4	-0.333	-0.325	-0.316	-0.307	-0.299	-0.290	-0.282	-0.274	-0.266	-0.258	-0.250	-0.242	-0.234
L5	-0.328	-0.320	-0.311	-0.303	-0.293	-0.284	-0.275	-0.267	-0.259	-0.253	-0.242	-0.235	-0.227
L6	-0.323	-0.314	-0.305	-0.297	-0.286	-0.277	-0.268	-0.260	-0.251	-0.243	-0.233	-0.225	-0.220
L7	-0.319	-0.309	-0.299	-0.290	-0.278	-0.268	-0.259	-0.249	-0.240	-0.231	-0.223	-0.215	-0.209
L8	-0.312	-0.298	-0.258	-0.255	-0.255	-0.249	-0.232	-0.229	-0.219	-0.213	-0.205	-0.199	-0.194
L9	-0.181	-0.181	-0.182	-0.182	-0.184	-0.183	-0.184	-0.186	-0.185	-0.186	-0.183	-0.181	-0.176
		C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20	C21	C22	C23	C24	C25
L1		-0.244	-0.234	-0.227	-0.220	-0.212	-0.205	-0.198	-0.190	-0.181	-0.175	-0.165	-0.160
L2		-0.238	-0.229	-0.223	-0.215	-0.208	-0.200	-0.192	-0.184	-0.178	-0.172	-0.164	-0.155
L3		-0.232	-0.225	-0.218	-0.209	-0.202	-0.195	-0.188	-0.181	-0.174	-0.167	-0.160	-0.152
L4		-0.226	-0.219	-0.212	-0.204	-0.197	-0.190	-0.182	-0.177	-0.170	-0.162	-0.154	-0.147
L5		-0.220	-0.213	-0.206	-0.198	-0.190	-0.184	-0.177	-0.171	-0.165	-0.158	-0.151	-0.144
L6		-0.212	-0.205	-0.198	-0.190	-0.183	-0.177	-0.172	-0.166	-0.161	-0.153	-0.146	-0.140
L7		-0.201	-0.194	-0.189	-0.181	-0.176	-0.170	-0.165	-0.160	-0.152	-0.148	-0.140	-0.135
L8		-0.188	-0.183	-0.178	-0.172	-0.168	-0.162	-0.159	-0.153	-0.148	-0.143	-0.136	-0.132
L9	-0.175	-0.170	-0.167	-0.162	-0.160	-0.155	-0.151	-0.147	-0.141	-0.139	-0.133	-0.128	

Tableau III.3: Déplacement horizontal mesuré des nœuds du maillage (en mm)

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13
L1	-0.124	-0.119	-0.113	-0.109	-0.103	-0.097	-0.093	-0.087	-0.082	-0.075	-0.069	-0.063	-0.056
L2	-0.120	-0.115	-0.110	-0.104	-0.100	-0.094	-0.089	-0.084	-0.079	-0.072	-0.065	-0.059	-0.053
L3	-0.118	-0.112	-0.107	-0.101	-0.096	-0.092	-0.087	-0.081	-0.075	-0.068	-0.062	-0.057	-0.049
L4	-0.113	-0.108	-0.103	-0.099	-0.093	-0.088	-0.083	-0.078	-0.072	-0.065	-0.058	-0.052	-0.046
L5	-0.109	-0.104	-0.097	-0.094	-0.089	-0.084	-0.081	-0.074	-0.069	-0.062	-0.054	-0.048	-0.043
L6	-0.105	-0.099	-0.095	-0.090	-0.085	-0.081	-0.076	-0.071	-0.066	-0.059	-0.052	-0.044	-0.039
L7	-0.101	-0.095	-0.089	-0.086	-0.081	-0.077	-0.073	-0.068	-0.062	-0.055	-0.047	-0.040	-0.034
L8	-0.090	-0.086	-0.085	-0.075	-0.078	-0.071	-0.069	-0.063	-0.059	-0.049	-0.042	-0.037	-0.029
L9	-0.063	-0.070	-0.073	-0.072	-0.074	-0.071	-0.069	-0.064	-0.055	-0.048	-0.041	-0.035	-0.028
		C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20	C21	C22	C23	C24	C25
L1		-0.052	-0.046	-0.041	-0.035	-0.031	-0.027	-0.025	-0.021	-0.017	-0.015	-0.014	-0.010
L2		-0.047	-0.041	-0.037	-0.033	-0.027	-0.024	-0.020	-0.017	-0.015	-0.013	-0.011	-0.008
L3		-0.044	-0.038	-0.034	-0.029	-0.025	-0.020	-0.017	-0.013	-0.012	-0.009	-0.007	-0.006
L4		-0.040	-0.035	-0.029	-0.025	-0.020	-0.017	-0.014	-0.011	-0.007	-0.006	-0.005	-0.002
L5		-0.036	-0.031	-0.026	-0.021	-0.017	-0.013	-0.010	-0.007	-0.005	-0.003	-0.001	0.000
L6		-0.033	-0.027	-0.021	-0.017	-0.013	-0.010	-0.007	-0.005	-0.002	0.000	0.001	0.002
L7		-0.028	-0.024	-0.018	-0.014	-0.010	-0.005	-0.005	-0.002	0.000	0.003	0.004	0.006
L8		-0.025	-0.019	-0.014	-0.010	-0.007	-0.004	-0.001	0.001	0.004	0.005	0.006	0.008
L9		-0.022	-0.016	-0.014	-0.008	-0.005	-0.002	0.001	0.003	0.004	0.008	0.010	0.010

Tableau III.4: Déplacement horizontal mesuré des nœuds du maillage (en mm)

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13
L1	-0.346	-0.337	-0.330	-0.321	-0.312	-0.305	-0.300	-0.290	-0.280	-0.273	-0.265	-0.259	-0.249
L2	-0.341	-0.321	-0.318	-0.311	-0.304	-0.296	-0.290	-0.282	-0.275	-0.267	-0.260	-0.252	-0.245
L3	-0.338	-0.313	-0.311	-0.303	-0.296	-0.289	-0.282	-0.275	-0.268	-0.261	-0.253	-0.246	-0.239
L4	-0.333	-0.306	-0.304	-0.295	-0.289	-0.282	-0.275	-0.268	-0.261	-0.254	-0.247	-0.240	-0.233
L5	-0.328	-0.299	-0.297	-0.289	-0.282	-0.274	-0.267	-0.260	-0.253	-0.246	-0.239	-0.232	-0.225
L6	-0.323	-0.293	-0.291	-0.282	-0.275	-0.267	-0.259	-0.252	-0.245	-0.237	-0.230	-0.223	-0.216
L7	-0.319	-0.287	-0.285	-0.276	-0.268	-0.260	-0.251	-0.243	-0.235	-0.225	-0.219	-0.211	-0.205
L8	-0.312	-0.282	-0.281	-0.271	-0.263	-0.254	-0.244	-0.234	-0.224	-0.213	-0.200	-0.195	-0.191
L9	-0.181	-0.181	-0.182	-0.182	-0.184	-0.183	-0.184	-0.186	-0.185	-0.186	-0.183	-0.181	-0.176
		C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20	C21	C22	C23	C24	C25
L1		-0.244	-0.234	-0.227	-0.220	-0.212	-0.205	-0.198	-0.190	-0.181	-0.175	-0.165	-0.160
L2		-0.238	-0.230	-0.223	-0.216	-0.209	-0.202	-0.195	-0.188	-0.182	-0.176	-0.172	-0.155
L3		-0.232	-0.225	-0.218	-0.211	-0.205	-0.198	-0.192	-0.186	-0.180	-0.173	-0.171	-0.152
L4		-0.226	-0.219	-0.212	-0.206	-0.200	-0.193	-0.187	-0.181	-0.176	-0.169	-0.168	-0.147
L5		-0.218	-0.212	-0.205	-0.199	-0.193	-0.187	-0.182	-0.176	-0.171	-0.165	-0.163	-0.144
L6		-0.210	-0.203	-0.197	-0.192	-0.186	-0.181	-0.175	-0.170	-0.165	-0.159	-0.158	-0.140
L7		-0.199	-0.193	-0.188	-0.183	-0.178	-0.173	-0.168	-0.163	-0.158	-0.153	-0.152	-0.135
L8		-0.187	-0.182	-0.178	-0.173	-0.169	-0.164	-0.160	-0.155	-0.151	-0.147	-0.144	-0.132
L9		-0.175	-0.170	-0.167	-0.162	-0.160	-0.155	-0.151	-0.147	-0.141	-0.139	-0.133	-0.128

Tableau III.5: Déplacement horizontal modélisé des nœuds du maillage (en mm)

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13
L1	-0.124	-0.119	-0.113	-0.109	-0.103	-0.097	-0.093	-0.087	-0.082	-0.075	-0.069	-0.063	-0.056
L2	-0.120	-0.115	-0.110	-0.105	-0.101	-0.095	-0.090	-0.084	-0.078	-0.071	-0.065	-0.058	-0.052
L3	-0.118	-0.113	-0.109	-0.104	-0.100	-0.094	-0.089	-0.083	-0.076	-0.070	-0.063	-0.056	-0.049
L4	-0.113	-0.110	-0.107	-0.103	-0.098	-0.093	-0.088	-0.082	-0.075	-0.067	-0.060	-0.053	-0.046
L5	-0.109	-0.108	-0.105	-0.101	-0.097	-0.093	-0.087	-0.081	-0.074	-0.066	-0.057	-0.050	-0.043
L6	-0.105	-0.105	-0.103	-0.100	-0.096	-0.092	-0.086	-0.080	-0.073	-0.064	-0.054	-0.046	-0.039
L7	-0.101	-0.104	-0.101	-0.099	-0.095	-0.091	-0.086	-0.080	-0.072	-0.062	-0.051	-0.043	-0.036
L8	-0.090	-0.104	-0.100	-0.098	-0.094	-0.090	-0.085	-0.079	-0.072	-0.049	-0.046	-0.040	-0.033
L9	-0.063	-0.070	-0.073	-0.072	-0.074	-0.071	-0.069	-0.064	-0.055	-0.048	-0.041	-0.035	-0.028
		C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20	C21	C22	C23	C24	C25
L1		-0.052	-0.046	-0.041	-0.035	-0.031	-0.027	-0.025	-0.021	-0.017	-0.015	-0.014	-0.010
L2		-0.046	-0.040	-0.035	-0.030	-0.026	-0.022	-0.019	-0.016	-0.013	-0.011	-0.009	-0.008
L3		-0.043	-0.038	-0.033	-0.028	-0.024	-0.020	-0.017	-0.014	-0.011	-0.009	-0.007	-0.006
L4		-0.040	-0.034	-0.029	-0.025	-0.021	-0.017	-0.014	-0.011	-0.008	-0.006	-0.004	-0.002
L5		-0.037	-0.031	-0.026	-0.022	-0.018	-0.014	-0.011	-0.008	-0.006	-0.003	-0.001	0.000
L6		-0.033	-0.028	-0.023	-0.019	-0.015	-0.011	-0.008	-0.006	-0.003	-0.001	0.001	0.002
L7		-0.030	-0.025	-0.020	-0.016	-0.012	-0.009	-0.006	-0.003	-0.001	0.002	0.004	0.006
L8		-0.027	-0.022	-0.018	-0.013	-0.010	-0.006	-0.004	-0.001	0.001	0.004	0.006	0.008
L9		-0.022	-0.016	-0.014	-0.008	-0.005	-0.002	0.001	0.003	0.004	0.008	0.010	0.010

Tableau III.6: Déplacement vertical modélisé des nœuds du maillage (en mm)

Par rapport aux autres longueurs présentées au tableau III.2, la longueur identifiée possède des valeurs des f_{U_1} , f_{U_2} , f_U , $\%_{U1}$, $\%_{U2}$ qui sont optimales. De plus, par rapport à l'ordre de grandeur valeurs moyennes du champ de déplacement dans les deux directions, des valeurs de pourcentages d'écart moyen (3% pour le champ de déplacement horizontal et 10% pour le champ de déplacement verticale) permettent

de conclure que la méthode de mesure proposée permet d'accéder à une très bonne estimation de la longueur de la fissure.

III.4.4. Incertitude de la méthode d'indentification

La question liée à l'incertitude de la méthode proposée est évaluée dans ce paragraphe. Pour répondre à cette question, on commence par l'analyse des différents facteurs influençant la précision de la détermination expérimentale des champs de déplacement. En effet, cette méthode de mesure est basée principalement sur la corrélation d'images numériques. Cette technique quant à elle, dépend d'une part de la qualité de l'image numérique utilisée, et d'autre part, des incertitudes provenant de l'algorithme utilisé par le logiciel.

Par ailleurs, le logiciel de calculs par éléments finis utilisé induit lui aussi une incertitude. La taille des éléments, le type d'éléments choisis, la technique de maillage et de résolution jouent leur rôle sur ce type d'incertitude. Ce type d'incertitude n'est pas évalué dans ce travail. Le type et la taille des éléments ont été choisis de telle sorte à être adaptés au besoin des calculs.

On se concentre donc sur les sources d'incertitude provenant de la technique de mesure de champ et à la qualité de l'image récupérée par la caméra rapide. Pour évaluer ces deux sources d'incertitude, on utilise une méthode proposée et validée par [TRICONNET 2007]. L'incertitude produite par ces deux sources est appelée par l'incertitude numérique. Les différentes étapes de cette méthode sont présentées par la suite :

- Reprendre une image de l'essai à l'état initial qui ne subit pas encore de la charge (l'image de référence)
- Imposer à cette image un déplacement horizontal égal à $U_{1\text{moyenne}}$: la valeur moyenne de déplacement du champ de déplacement horizontal mesuré.
- Mesurer le champ de déplacement horizontal de l'image déplacée par le logiciel de Corrélation d'image et comparer ce champ de déplacement avec $U_{1\text{moyenne}}$.
- Imposer à cette image un déplacement vertical égal à $U_{2\text{moyenne}}$: la valeur moyenne de déplacement du champ de déplacement vertical mesuré.
- Mesurer le champ de déplacement vertical de l'image déplacée par le logiciel de Corrélation d'image et comparer ce champ de déplacement avec $U_{2\text{moyenne}}$.

La procédure est illustrée sur la figure III.25. Cette procédure est appliquée à chaque valeur identifiée de la longueur de la fissure qui correspond à un champ de déplacement mesuré (une valeur correspondante de $U_{1\text{moyenne}}$ et de $U_{2\text{moyenne}}$).

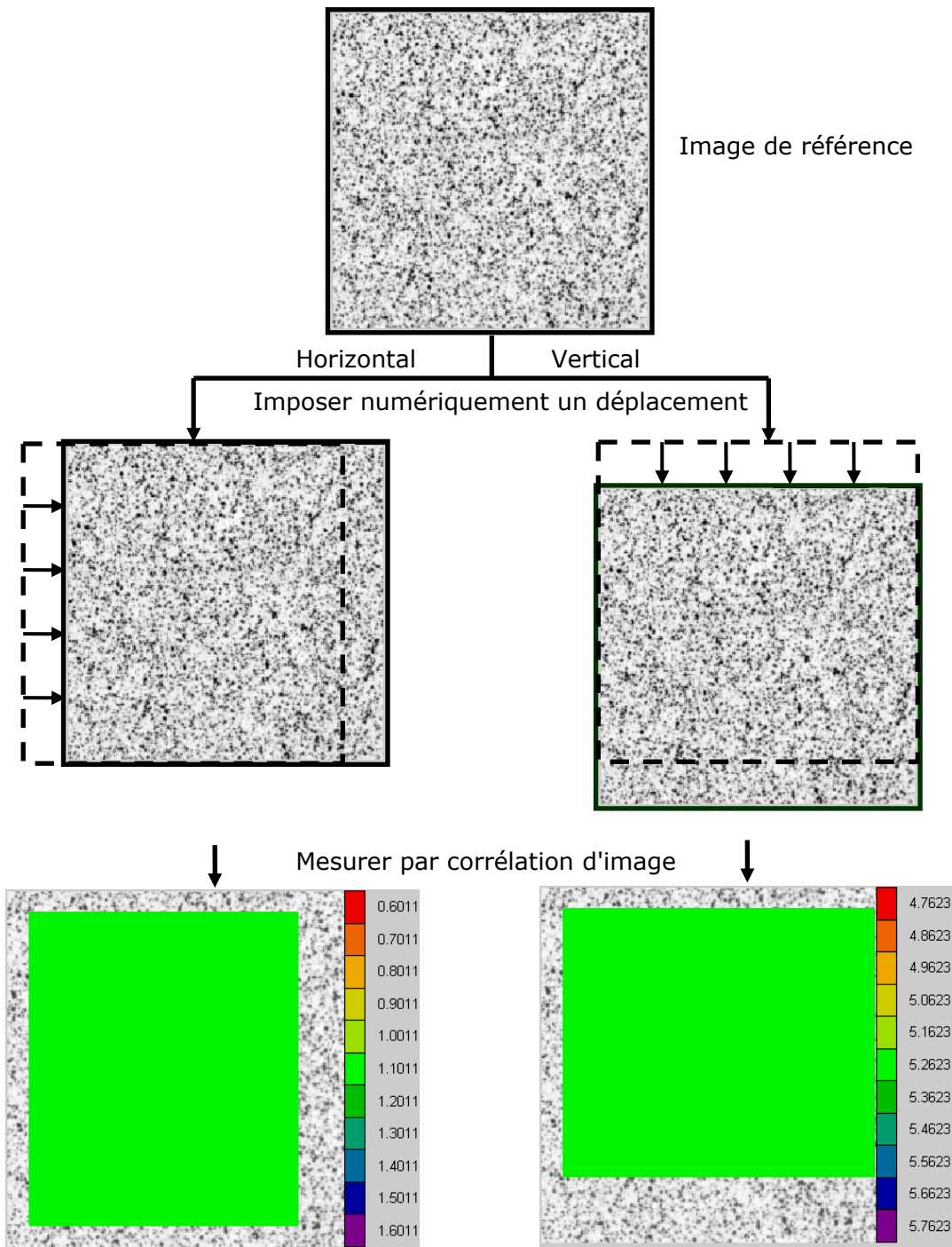


Figure III.25: Principe de calcul d'incertitude

On impose donc à l'image de référence numériquement un déplacement horizontal égal à $U_{1\text{moyenne}}=0,224\text{mm}$. Puis, dans un deuxième temps, un déplacement vertical égal à $U_{1\text{moyenne}}=0,047\text{mm}$ (cf. tableau III.2). Les deux images déformées numériquement seront ré-analysées par le logiciel de corrélation d'images pour évaluer les champs de déplacement respectifs. L'application de cette démarche conduit à un champ homogène de déplacement horizontal mesuré égal à $0,2235\text{mm}$ lorsqu'on impose un champ de déplacement $U_{1\text{moyenne}} = 0,224\text{mm}$. Le calcul a aussi montré un champ de déplacement vertical mesuré égal à $0,0467\text{mm}$ pour un champ de déplacement imposé de $U_{2\text{moyenne}}=0,047\text{mm}$.

L'écart dans la direction horizontale est de $0,5 \cdot 10^{-3}$ (mm). Par rapport à la valeur moyenne de déplacement horizontal égale à $U_{1\text{moyenne}} = 0,224\text{mm}$, l'incertitude de la mesure est donc de l'ordre de 0,2%. De la même manière, l'incertitude de la mesure du champ de déplacement vertical est de l'ordre 0,64%. Ces faibles valeurs d'incertitude sur les champs de déplacement permettent de conclure que la méthode d'identification de la longueur de la fissure proposée est adaptée à nos besoins pour l'étude de l'évolution de la fissuration. En effet, l'intérêt de cette méthode est de pouvoir identifier la longueur réelle de la fissure pour des essais qui présentent une faible ouverture de la fissure, ce qui est primordial pour nos essais CLS guidés. Cette méthode de mesure pourra être utilisée alors que la fissure n'est pas visible à l'œil humain. L'inconvénient majeur est lié à la quantité de calculs qu'elle génère. De plus, la précision de cette méthode relève aussi d'un compromis entre la taille d'élément fini utilisé et la précision souhaitée.

La partie suivante illustre cette méthode à travers son application à la campagne d'essais effectuée sur le matériau composite verre/époxy. Comme nous l'avons déjà précisé, nous ne disposons pas du matériel optique nécessaire pour pouvoir appliquer cette méthode lors de la réalisation de la campagne d'essais sur le matériau composite carbone/époxy. En effet, la largeur de l'éprouvette de composite carbone/époxy est trop petite pour pouvoir être traitée par le logiciel de corrélation d'images. L'objectif disponible sur la caméra rapide et le système d'éclairage n'étant pas adaptés à ce type de géométrie. C'est pourquoi l'analyse de la fissuration dynamique sur la campagne d'essai du composite carbone/époxy utilise la méthode de contraste pour mesurer la longueur de la fissure.

III.4.5. Application de la méthode d'identification de la longueur de la fissure aux essais sur matériau verre/époxy

A. Campagne d'essai sur matériau composite verre/époxy

La largeur de l'éprouvette du matériau verre/époxy est de l'ordre de 20mm, ce qui permet d'appliquer notre méthode en utilisant l'objectif disponible sur la caméra.

Aux paragraphes suivants, on présente les résultats de la mesure correspondant à 2 essais : ceux réalisés à 1m/s et 3m/s. Les résultats identifiés sont introduits au tableau III.7 pour l'essai à 1m/s.

$L_{\text{fissure}} \text{ identifiée (mm)}$	5,43	7,87	10,22	12,47	14,47	17,49
$f_U \text{ (mm)}$	4,69E-03	2,41E-03	5,2E-03	6,59E-03	7,14E-03	7,58E-03
$U_{1\text{moyenne}} \text{ (mm)}$	0,1925	0,203	0,214	0,224	0,234	0,244
$U_{2\text{moyenne}} \text{ (mm)}$	0,0024	0,0027	0,0034	0,0047	0,0054	0,0065
Incertitude horizontale	0,32%	0,22%	0,01%	0,26%	0,32%	0,13%
$U_{1\text{moyenne}} \text{ (pixel) imposé}$	4,53	4,78	5,04	5,27	5,51	5,74
$U_{1\text{moyenne}} \text{ (pixel) mesuré}$	4,5458	4,789	5,038	5,259	5,526	5,751
Incertitude verticale	6,01%	4,02%	4,79%	5,10%	3,24%	6,54%
$U_{2\text{moyenne}} \text{ (pixel) imposé}$	0,0565	0,064	0,0800	0,111	0,127	0,153
$U_{2\text{moyenne}} \text{ (pixel) mesuré}$	0,0531	0,061	0,0762	0,105	0,123	0,143
$L_{\text{fissure}} \text{ identifiée (mm)}$	19,71	25,81	26,5	26,73	27,62	
$f_U \text{ (mm)}$	1,046E-02	1,011E-02	9,958E-03	1,055E-02	1,107E-02	
$U_{1\text{moyenne}} \text{ (mm)}$	0,255	0,264	0,272	0,281	0,288	
$U_{2\text{moyenne}} \text{ (mm)}$	0,0089	0,0094	0,01	0,1012	0,105	
Incertitude horizontale	0,01%	0,14%	0,22%	0,22%	0,16%	
$U_{1\text{moyenne}} \text{ (pixel) imposé}$	6,003	6,215	6,403	6,615	6,780	
$U_{1\text{moyenne}} \text{ (pixel) mesuré}$	6,0031	6,206	6,389	6,629	6,7905	
Incertitude verticale	4,11%	4,19%	4,84%	0,64%	0,64%	
$U_{2\text{moyenne}} \text{ (pixel) imposé}$	0,210	0,221	0,235	2,382	2,472	
$U_{2\text{moyenne}} \text{ (pixel) mesuré}$	0,2009	0,212	0,224	2,367	2,456	

Tableau III.7: Essai 1m/s

La figure III.26 présente l'évolution de la fissure rapport du temps pendant l'essai à 1m/s.

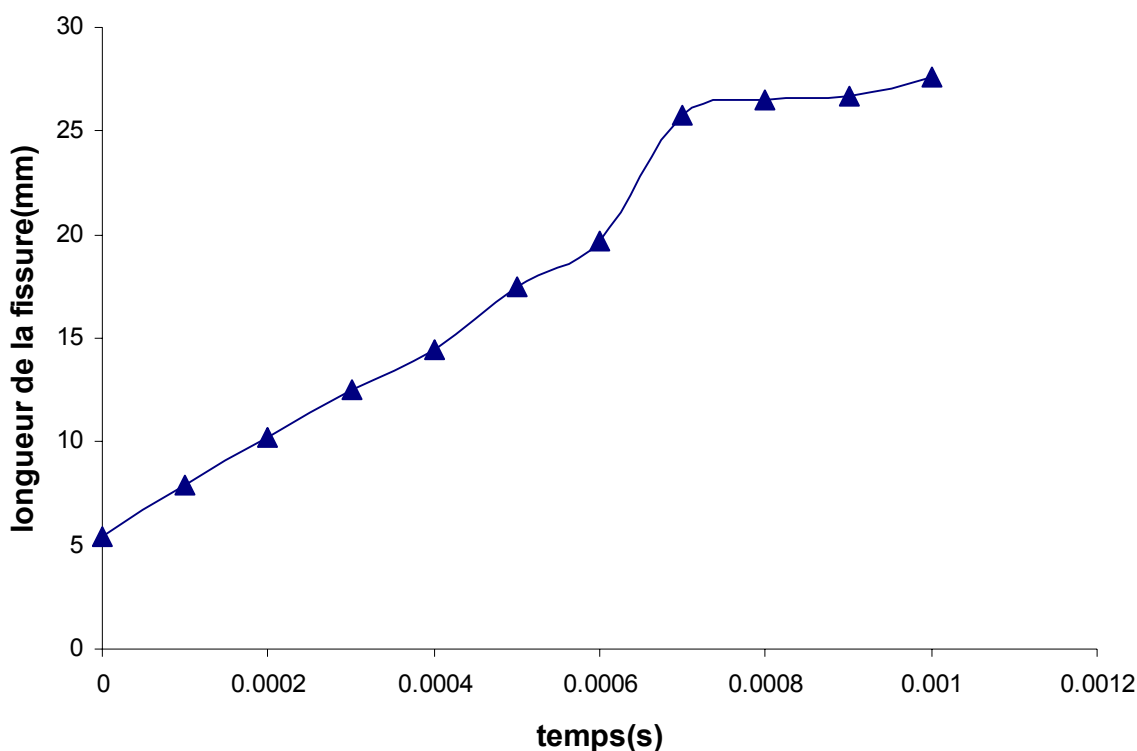


Figure III.26: Evolution de la fissure pendant l'essai à 1m/s du matériau composite verre/époxy

Les résultats identifiés sont introduits au tableau III.8 pour l'essai 3m/s.

$L_{\text{fissure}} \text{ identifiée(mm)}$	7,53	8,64	16,08	21,70
$f_U(\text{mm})$	1,23E-03	2,35E-03	6,15E-03	4,05E-03
$U_{1\text{moyenne}}(\text{mm})$	0,0892	0,1362	0,1869	0,2482
$U_{2\text{moyenne}}(\text{mm})$	0,0372	0,0860	0,1310	0,1620
Incertitude horizontale	0,19%	0,27%	0,25%	0,09%
$U_{1\text{moyenne}}(\text{pixel}) \text{ imposé}$	2,113	3,226	4,426	5,879
$U_{1\text{moyenne}}(\text{pixel}) \text{ mesuré}$	2,1088	3,2173	4,4149	5,8843
Incertitude vertical	0,50%	0,08%	0,13%	0,15%
$U_{2\text{moyenne}}(\text{pixel}) \text{ imposé}$	0,881	2,036	3,103	3,837
$U_{2\text{moyenne}}(\text{pixel}) \text{ mesuré}$	0,8858	2,0343	3,0985	3,843

Tableau III.8: Essai 3m/s

La figure III.27 présente l'évolution de la longueur réelle de la fissure au cours de l'essai 3m/s. Le temps correspondant de chaque valeur de longueur est déterminé selon la durée d'enregistrement entre 2 images successives.

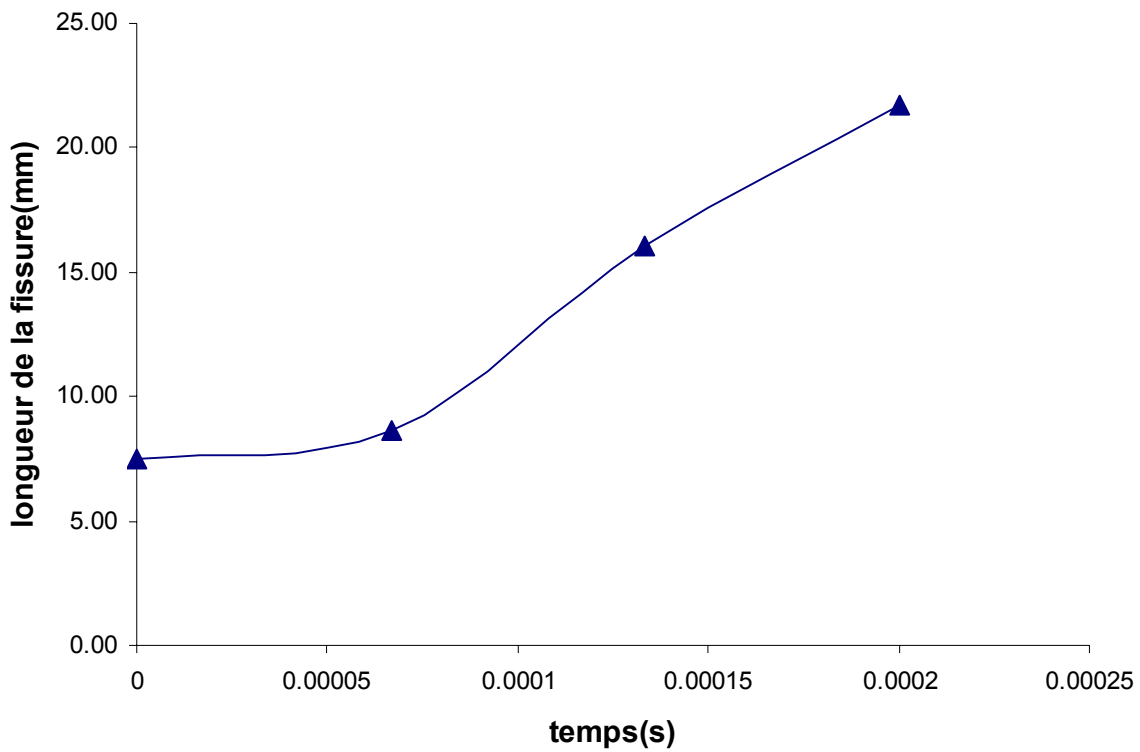


Figure III.27: Evolution de la fissure pendant l'essai

Lorsqu'on applique notre méthode de mesure aux essais sur composite verre/époxy, on peut faire les remarques suivantes:

- La précision de cette méthode de mesure est satisfaisante par rapport à notre besoin. Concrètement, cette méthode possède une plus grande précision par rapport aux deux méthodes de mesure classiques que nous avons utilisées: méthode de contraste et le coupe-fils.
- Cette méthode de mesure permet d'accéder à des informations de fissures possédant une très petite ouverture qui sont inexploitable par la méthode de contraste.

Par contre, cette méthode présente quelques points faibles:

- La lourdeur de cette méthode impose une grande masse de travail pour identifier une valeur de longueur de la fissure réelle.
- Le nombre de longueur identifiée par cette méthode pendant chaque essai dépend de la taille des images filmées par la caméra rapide. En effet, une fois que la fissure dépasse la zone filmée, on perd l'information.
- La taille maximale de l'image est inversement proportionnelle à la vitesse de la caméra rapide. Plus la vitesse de la caméra est importante, plus la taille d'image récupérée diminue. C'est pourquoi, lors des essais effectués à grande vitesse qui nécessitent une grande vitesse d'acquisition, la taille de l'image sera limitée et devient insuffisamment grande pour pouvoir utiliser cette méthode de mesure.

- Des images de bonne qualité (résolution) constituent la première condition de validité de cette méthode de mesure. C'est pourquoi, la réalisation des essais nécessite une grande précision à toutes les étapes : l'usinage de l'éprouvette, la préparation de mouchetis, l'éclairage, montage d'éprouvette, la mise en position de la caméra... La qualité souhaitée de l'image n'est pas toujours facile à obtenir. C'est la raison pour laquelle les essais exploitables sont peu nombreux.
- Toutefois, avec le développement de la photographie à vitesse élevée, cette méthode possède un potentiel intéressant. Son domaine d'application est assez large et la méthode s'adapte bien aux besoins de mesure des essais dynamiques. Cependant, un équipement optique performant supposera un coût certainement élevé.

B. Conclusion

Cette partie de notre étude concerne la recherche et l'étude d'une nouvelle méthode qui permet d'identifier la longueur de fissure pendant l'essai de délaminage dynamique. Cette méthode est applicable aux cas où la fissure possède une petite ouverture qui n'est pas visible par l'œil humain. Son inconvénient est lié au volume de calcul qui devient très grand avec l'augmentation de précision souhaitée. La capacité de calcul par éléments finis est aussi un des paramètres qui gèrent le choix de la précision recherchée.

La caméra rapide a montré son grand intérêt pour les essais de délaminage en dynamique présentant des mouvements très rapides. Grâce à l'outil de synchronisation MCDL, la caméra a pu filmer la zone surfacique d'analyse en enregistrant en même temps la force et le déplacement de l'image correspondante. Tous les éléments nécessaires pour la caractérisation du phénomène de délaminage en dynamique sont présents grâce au film de l'essai.

La technique de mesure de champs a permis d'identifier les champs locaux de déplacements autour de la pointe de fissure à partir de l'image de la caméra rapide. Le couplage de cette technique de mesure avec la caméra rapide associé aux calculs par éléments finis est un moyen efficace pour mesurer le phénomène de fissuration en dynamique.

III.5. Conclusion du chapitre

L'étude de la méthode utilisant l'outil coupe-fils a montré ses limites dans le cas de la mesure de l'évolution de la fissuration en grande vitesse. Ceci a orienté notre travail vers la recherche de moyens plus efficaces dédiés aux mesures de la propagation de la fissure.

La caméra rapide constitue un outil indispensable pour résoudre le problème de la mesure et l'étude de la fissuration en grande vitesse. Ses capacités sont exploitées dans deux méthodes de mesure utilisées.

La méthode de contraste permet de suivre l'évolution de la fissure de nos essais en traitant les images enregistrées par la caméra rapide. Cette méthode de mesure est appliquée aux essais de la première campagne sur le composite carbone/époxy. Cette méthode est relativement rapide et ne demande pas beaucoup de travail pour mesurer la longueur de la fissure. Pourtant, son exploitation est conditionnée par l'ouverture de la fissure pendant l'essai. Cette méthode devient inefficace pour les fissures qui se propagent avec une très faible ouverture.

La nouvelle méthode d'identification de la longueur réelle de la fissure a été étudiée et vérifiée. L'applicabilité de cette méthode n'est pas conditionnée par l'ouverture de la fissure. Elle permet de suivre la longueur de la fissure avec une bonne précision. Pourtant, cette méthode nécessite encore des améliorations notamment pour diminuer la masse de calcul.

A ce stade de la rédaction, toutes les données nécessaires pour étudier le phénomène de fissuration en dynamique sont réunies. Le chapitre IV a donc pour but de les utiliser dans l'objectif d'étudier le phénomène de fissuration dynamique des deux types de matériaux composites présentés.

Chapitre IV:
**Détermination d'une loi de
propagation stable**

IV.1. Introduction

Le chapitre précédent a présenté les méthodes de mesure permettant la détermination de l'évolution de la longueur de fissure pendant les essais de délaminage. C'est le premier pas décisif pour caractériser le phénomène de fissuration dynamique des essais. Ce chapitre s'attache à l'exploitation de ces méthodes afin d'arriver au but de l'étude : déterminer une loi de propagation fonction de la vitesse de fissuration.

Dans un premier temps, on présente une approche globale fondée sur la théorie des poutres et sur un bilan énergétique. Cette approche est appliquée aux essais réalisés et permet de calculer le taux de restitution d'énergie instantané durant les essais qui sont évalués aux temps correspondant aux acquisitions des images par la caméra rapide. Ainsi, l'évolution du taux de restitution d'énergie sera connue à chaque instant. Le phénomène de délaminage en dynamique est ensuite discuté à partir des résultats obtenus selon l'approche globale.

Les résultats de l'approche globale seront ensuite confrontés à ceux obtenus à l'aide d'une deuxième approche que nous proposons. Cette deuxième démarche sera appelée l'approche locale. Cette nouvelle approche utilise la modélisation par éléments finis. La zone au voisinage de la tête de la fissure est modélisée finement. Les conditions aux limites de la modélisation sont issues des mesures obtenues par corrélation d'images. Les champs de déplacement locaux sont ensuite utilisés pour calculer le taux de restitution d'énergie selon la méthode de l'intégrale de contour.

Enfin, en se fondant sur les résultats de l'approche globale nous présentons une loi théorique qui permet de représenter le phénomène physique des essais de délaminage en dynamique qu'on a réalisés. Cette loi théorique devra être représentative de toutes les caractéristiques identifiées à partir des résultats expérimentaux.

IV.2. Sollicitation dynamique des essais CLS

Au début du chapitre II (au paragraphe traitant du choix du type d'essais), nous avons discuté généralement du phénomène physique qui se produit lors des essais de type CLS. Dans cette partie, on poursuit cette discussion en focalisant sur les phénomènes liés au caractère dynamique de la sollicitation.

Quand on parle de sollicitation rapide on utilise le terme « dynamique » par abus de langage. Toutefois, une sollicitation rapide ne présente pas systématiquement un caractère "dynamique" au sens strict du terme. En fait, plusieurs aspects doivent être pris en compte lors d'une sollicitation rapide :

- Les effets d'inertie ne peuvent plus être négligés,
- L'énergie cinétique n'est plus négligeable par rapport à l'énergie de déformation,
- Il peut exister un phénomène typiquement « dynamique » caractérisé par une inhomogénéité spatio-temporelle du chargement généralement liée à la propagation d'onde.

Afin de caractériser le phénomène de sollicitation rapide de nos essais, DRAGON et al. [DRAGON 2000] ont proposé une classification. Soit un essai sollicité en dynamique duquel résulte une courbe (chargement-temps) schématisée à la figure IV.1. Sur cette figure, l'abscisse est le temps et l'ordonnée présente l'amplitude du chargement. La durée du chargement est notée par Δ et T est le temps caractéristique de la façon dont le chargement varie au cours du temps. La dimension caractéristique de la structure est notée λ correspond pour notre cas à la longueur effective de l'éprouvette. Le temps caractéristique nécessaire pour l'onde de choc pour parcourir une distance de l'ordre de λ est noté δ (figure IV.1).

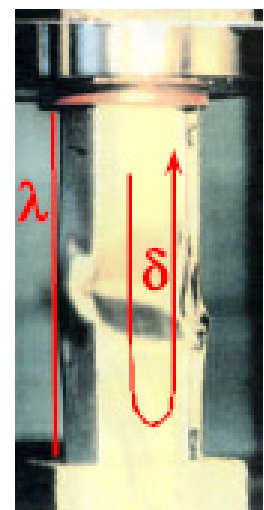
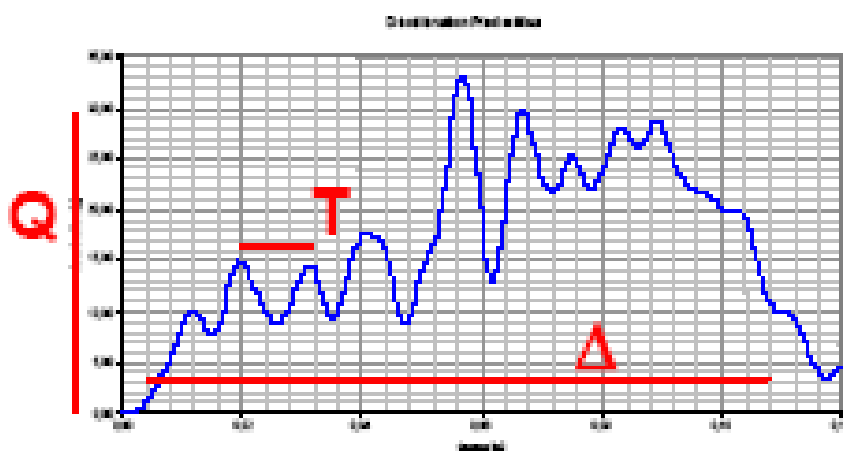


Figure IV.1: Quelques notions de base du phénomène de sollicitation dynamique

Cette classification est fondée sur la comparaison entre les paramètres de sollicitation (Q, Δ, T) et les paramètres de la structure (λ, δ, Q_{max}). En effet, si la variation temporelle du chargement T est supérieure au temps caractéristique δ , le phénomène de sollicitation dynamique a les caractères suivantes:

- La variation temporelle de la sollicitation est suffisamment lente pour que la structure puisse suivre de façon globale ces variations;
- Les phénomènes de propagation d'onde n'ont pas à être pris en compte, même si l'énergie cinétique ne peut pas forcément être négligée.

Dans cette situation, la structure (ou le matériau) a le temps de se mettre en équilibre. Même sous sollicitations très rapides, on est dans les conditions proches de celles de la quasi-statique.

Par contre, si la variation temporelle du chargement T est inférieure ou égale au temps caractéristique δ , la sollicitation est qualifiée de "dynamique" au sens strict du terme :

- Les effets de propagation d'onde doivent être pris en compte car ils deviennent prépondérants,
- Il n'existe, à aucun moment, d'homogénéité spatio-temporelle du chargement.

Ce phénomène physique peut s'exprimer de façon transitoire. On parle alors de dynamique transitoire. En dynamique transitoire, le chargement se décompose en général en deux phases:

- La phase de mise en charge : dont la durée est inférieure au temps caractéristique du système δ .
- La phase de mise en équilibre : durant laquelle le chargement global varie peu : le temps caractéristique associé au chargement devient dans cette phase de l'ordre de Δ et supérieur à δ . La mise en équilibre de la structure (homogénéisation des champs mécaniques) nécessite généralement quelques dizaines de δ ; les instants suivants peuvent alors être décrits sans tenir en compte des phénomènes de propagation. L'effet d'inertie n'est pas négligeable dans ce cas.

Etudions maintenant le cas spécifique de nos essais en essayant d'identifier à quel schéma ils appartiennent. La figure IV.2 présente une forme typique de la courbe chargement-temps de nos essais sur le composite carbone/époxy. Grâce à cette courbe, on peut déterminer facilement les valeurs caractéristiques du phénomène de sollicitation dynamique.

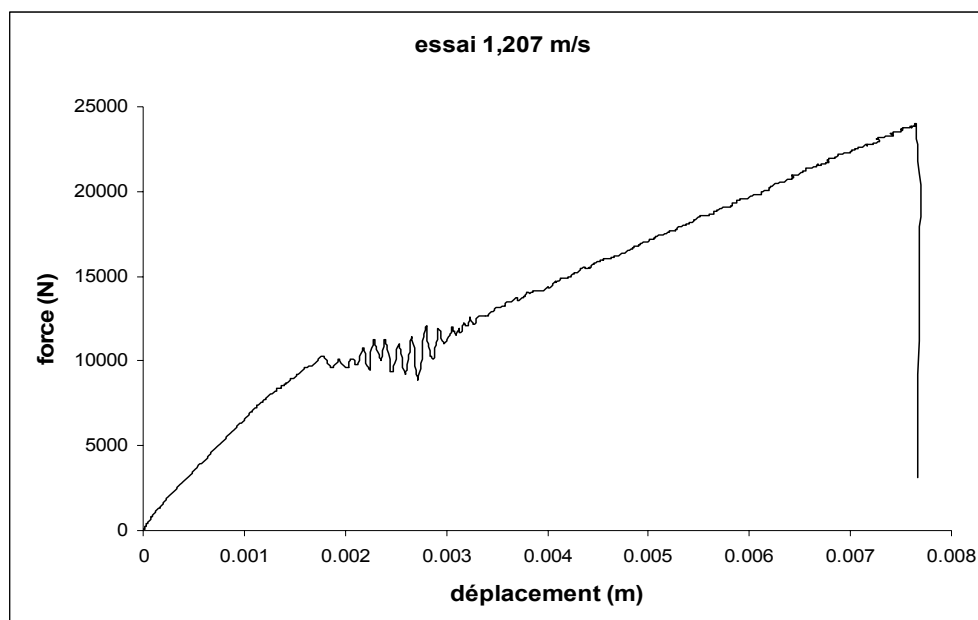


Figure IV.2: Forme typique de la courbe chargement-temps

Le tableau IV.1 présente l'ordre grandeur de ces valeurs pour chacun de nos matériaux d'étude.

	λ (mm)	δ (s)	Célérité de l'onde (m/s)	T (s)
Essai carbone/époxy	280	$0,56 \cdot 10^{-4}$	≈ 5000	$3 \cdot 10^{-4}$
Essai verre/époxy	70	$0,14 \cdot 10^{-4}$	≈ 5000	$7 \cdot 10^{-4}$

Tableau IV.1: Paramètres caractéristique de sollicitation dynamique

Le tableau IV.1 montre que le temps caractéristique de la sollicitation est toujours supérieur au temps caractéristique de la structure. On peut donc affirmer que :

- La variation temporelle de la sollicitation est suffisamment lente pour que la structure puisse suivre de façon globale ces variations. On peut donc conclure que la structure arrive à se mettre en équilibre. Nos essais sont réalisés dans des conditions comparables à celles de la quasi-statique.
- Les phénomènes purement dynamiques de propagation d'onde n'ont pas à être pris en compte. Ils sont négligeables. Par contre, l'effet de l'énergie cinétique ne peut pas forcément être négligé.

Par conséquent, dans la suite de ce chapitre, le phénomène de propagation de l'onde sera désormais négligé. Seuls les effets de l'énergie cinétique sont à prendre en compte.

IV.3. Taux de restitution d'énergie: Approche globale

Dans cette partie, on essaie d'évaluer l'influence de l'effet cinétique sur le phénomène de fissuration d'un point de vue énergétique. C'est le principe de base de cette approche globale. L'effet cinétique est généralement lié à l'inertie du matériau (masse en mouvement) qui participe aux mouvements pendant l'essai. Les évaluations de l'approche globale se fondent sur l'étude du bilan énergétique du phénomène de fissuration lors de l'amorçage et de la propagation de la fissure. Tous les éléments de base liés au bilan d'énergie qu'on utilisera par la suite sont présentés dans la partie suivante.

IV.3.1. Mécanique de la rupture pour un matériau isotrope-linéaire

La mécanique de la rupture appliquée aux matériaux homogènes, isotropes a largement été développée durant le siècle dernier. Cette partie présente les éléments de base de cette mécanique qui seront utiles pour l'analyse de nos essais.

La présente étude concerne le mode mixte (mode I et mode II) de fissuration. Etant donné que la mécanique de la rupture suppose un comportement purement élastique du matériau, la théorie de base ne prévoit pas de déformation résiduelle à la fin du chargement. Cette hypothèse est acceptable pour les deux matériaux de notre étude.

Le taux de restitution d'énergie G est déterminé grâce à un bilan d'énergie établi sur la phase de propagation de la fissure: la déformation plastique du matériau étant négligeable du fait du comportement fragile des matériaux utilisés, l'énergie apportée par les forces extérieures dE_{ext} est en partie emmagasinée en déformation élastique dE_e et en partie consommée par la propagation de la fissure dE_p . Dans le cas des vitesses de chargement élevées, elle est aussi transformée en partie en énergie cinétique du fait des masses en mouvement dE_c .

Le bilan d'énergie lors de la propagation de la fissure s'écrit alors: [Smi87]

$$dE_{ext} - dE_e - dE_p - dE_c = 0 \quad \text{Eq IV-1}$$

Considérons une courbe de charge-propagation-décharge qui se compose de 3 parties principales: $\overline{0I}$, $\overline{I2}$, $\overline{23}$ (voir figure IV-3). Pendant la première phase ($\overline{0I}$), le matériau se déforme de manière élastique sans que la fissure se propage. L'énergie apportée par la sollicitation extérieure est transformée en énergie de déformation élastique dE_e et dans le cas d'un chargement rapide, en énergie cinétique dE_c :

$$dE_{ext} = dE_e + dE_c \quad \text{Eq IV-2}$$

Au point 1, l'énergie fournie par le chargement extérieur dépasse un seuil critique et la fissure commence à se propager jusqu'au point 2. Pendant la phase de propagation de la fissure $\overline{12}$, une partie de l'énergie extérieure est consommée par l'énergie de propagation $dE_p = G\Delta A$. Le taux de restitution d'énergie G est défini comme l'énergie nécessaire pour faire propager une unité de la surface de la fissure ΔA :

$$dE_{ext} = dE_e + dE_p + dE_c = dE_e + G\Delta A + dE_c \quad \text{Eq IV-3}$$

Considérons l'énergie élastique emmagasinée au point 1: E_{e1} , on notera de même E_{e2} l'énergie élastique emmagasinée au point 2. Au moment où le chargement s'arrête au point 2 de la courbe, l'énergie cinétique est dissipée et seule l'énergie élastique E_{e2} reste emmagasinée. Cette dernière est libérée au cours de la décharge élastique:

$$dE_e = E_{e2} - E_{e1} \quad \text{Eq IV-4}$$

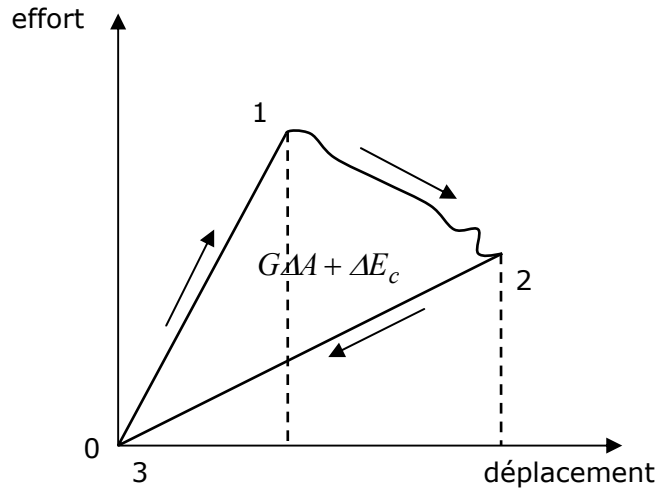


Figure IV.3: Cycle de chargement appliqué à une éprouvette

Dans le graphique présenté à la figure IV.3, la variation de l'énergie élastique dE_e de la première partie (de 0 à 1) correspond à la surface triangulaire en dessous de la droite $\overline{01}$. De la même façon, la surface du triangle en dessous de la droite $\overline{23}$ représente la variation de l'énergie élastique de cette troisième partie (de 2 à 3). La surface du triangle $\overline{0123}$ se traduit en équation conformément au bilan suivant:

$$G\Delta A_{12} + \Delta E_{c12} = \Delta E_{ext12} + E_{e1} - E_{e2} \quad \text{Eq IV-5}$$

On distingue deux cas limites de la propagation (partie $\overline{12}$): celui à déplacement constant et celui à effort constant.

Premier cas limite : propagation à déplacement constant (figure IV.4). Pendant la propagation de la fissure, il n'y a pas d'apport d'énergie de la part de l'extérieur:

l'énergie nécessaire à la propagation de la fissure est fournie par la transformation de l'énergie élastique et de l'énergie cinétique, emmagasinées au cours de la phase précédente:

$$G\Delta A_{l2} + \Delta E_{cl2} = E_{e1} - E_{e2} = -\Delta E_e \quad \text{Eq IV-6}$$

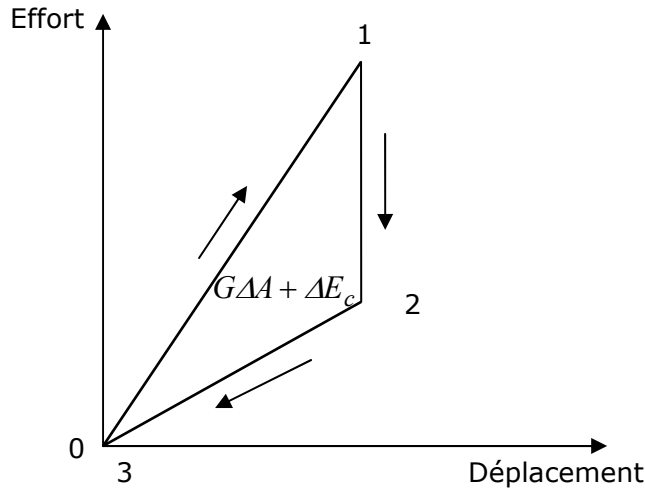


Figure IV.4: Cas limite de propagation à déplacement constant

Le deuxième cas (Figure IV.5): propagation à effort constant. Dans ce cas, l'énergie de propagation de la fissure est fournie totalement par l'effort extérieur, l'énergie élastique augmente au cours de la propagation. La quantité d'énergie restituée lors de la décharge (partie $\overline{23}$) est donc plus grande que celle emmagasinée précédemment, pendant la partie $\overline{01}$. Cela nous conduit au bilan énergétique suivant:

$$G\Delta A_{l2} + \Delta E_{cl2} = \Delta E_{extl2} + E_{e1} - E_{e2} = \Delta E_{extl2} - \Delta E_e \quad \text{Eq IV-7}$$

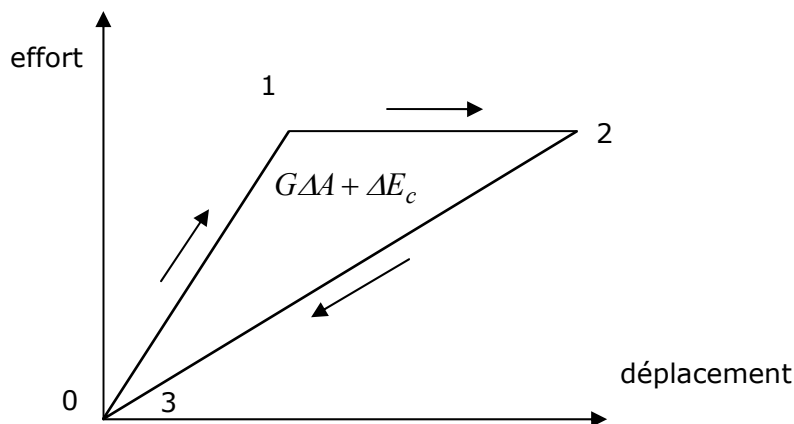


Figure IV.5: Cas limite de propagation à effort constant

La plupart des cas réels rencontrés se situent entre ces 2 cas limites. Le bilan énergétique, quand la fissure se propage d'un incrément de surface dA s'écrit :

$$GdA + dE_c = dE_{ext} - dE_e \quad \text{Eq IV-8}$$

Etant donné que la structure se déforme élastiquement, le déplacement δ du point d'application de la charge P est proportionnel à la charge :

$$\delta = CP \quad \text{ou encore} \quad \frac{\delta}{P} = C \quad \text{Eq IV-9}$$

C correspond ici à la complaisance de la structure qui est fonction de la géométrie du corps fissuré ainsi que de l'élasticité du matériau (C est lié à l'inverse de la raideur de la structure fissurée figure IV.6).

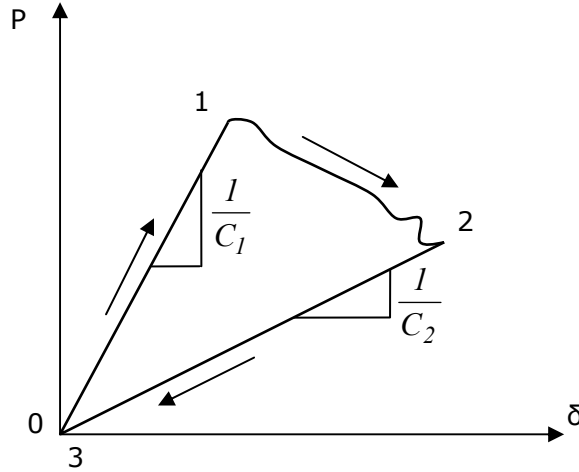


Figure IV.6: Méthode de la complaisance

Sur la figure IV.6, sur les intervalles $\overline{0I}$ et $\overline{23}$, la complaisance reste constante, et l'énergie élastique emmagasinée E_e (juste avant et juste après la propagation) est calculée grâce à la complaisance C :

$$E_e = \frac{1}{2} P \delta = \frac{1}{C} \frac{\delta^2}{2} = \frac{CP^2}{2} \quad \text{avec} \quad C = \text{const} \quad (\text{Points } 0 \rightarrow 1 \text{ et } 2 \rightarrow 3) \quad \text{Eq IV-10}$$

Lorsque P a dépassé sa valeur critique P_c (pendant l'intervalle $\overline{12}$), la fissure se propage et la raideur de la structure est donc diminuée. La valeur de $C(a)$ augmente au fur et à mesure que a augmente. A partir de l'équation IV-10, la variation de l'énergie élastique emmagasinée pendant l'allongement de la fissure (partie $\overline{12}$) est calculée par :

$$dE_{e12} = \frac{P^2}{2} dC(a) + C(a) P dP \quad \text{avec} \quad C \neq \text{const} \quad (\text{Points } 1 \rightarrow 2) \quad \text{Eq IV-11}$$

Lors de la propagation de la fissure (partie $\overline{12}$), δ et P varient indépendamment et la complaisance C n'est plus constante. Toutefois, la relation $C(a) = \frac{\delta}{P}$ reste encore valable à tout moment. La variation d'énergie potentielle du système est donnée par l'expression suivante, sachant qu'au cours de l'extension la charge varie très peu :

$$dE_{ext} = Pd\delta = Pd(CP) = P^2 dC(a) + C(a)PdP \text{ avec } C \neq const \text{ (Points } I \rightarrow 2) \text{ Eq IV-12}$$

En introduisant les équations Eq IV-11 et Eq IV-12 dans l'équation IV-8, le bilan d'énergie devient:

$$GdA_{I2} + dE_{cI2} = dE_{extI2} - dE_{eI2} = \frac{P^2}{2} dC(a) \quad \text{Eq IV-13}$$

Pour une section de la structure de largeur h et de l'épaisseur B (avec $dA = Bda$) fissurée en mode mixte, on peut donc en déduire l'expression du taux de restitution d'énergie pour un chargement en mode mixte à vitesse élevée :

$$G = G_I + G_{II} = \frac{P^2}{2B} \frac{dC(a)}{da} - \frac{1}{B} \frac{dE_c}{da} \quad \text{Eq IV-14}$$

Par définition, la fissure se propage au moment où le taux de restitution d'énergie atteint sa valeur critique G_c qui est une propriété intrinsèque du matériau représentative de sa ténacité. De plus, G_c est aussi fonction des conditions environnementales (pression, température, humidité) et de la vitesse de chargement appliquée [SMILEY 1987].

$$G_c = \frac{P_c^2}{2B} \frac{dC(a)}{da} - \frac{1}{B} \frac{dE_c}{da} \quad \text{Eq IV-15}$$

avec $P = P_c$ au moment de l'amorçage.

L'équation IV-15 nous a permis de distinguer deux termes différents intervenant dans l'expression du taux de restitution d'énergie. Le premier terme $\frac{P_c^2}{2B} \frac{dC(a)}{da}$ est influencé d'une part par la sensibilité du comportement du matériau à l'effet de la vitesse de chargement et d'autre part, par le changement de géométrie de la structure causée par la propagation de la fissure. En effet, la valeur de la force P_c est le résultat du comportement du matériau sous l'effet de chargement appliqué et du changement de la complaisance de la structure causé par la propagation de la fissure. Ce premier terme est indépendant de l'effet cinétique. Le deuxième terme $-\frac{1}{B} \frac{dE_c}{da}$ est lié directement à l'effet cinétique qui est caractérisé par la masse en mouvement pendant l'essai. Ce terme joue un rôle important quand la vitesse de mouvement devient grande.

La division en deux termes différents du taux de restitution d'énergie nous permet de déterminer chaque terme de manière indépendante. En effet, le premier terme peut être déterminé en utilisant la mécanique de la rupture classique, lorsque le deuxième terme

sera calculé en prenant en compte l'effet d'inertie. De plus, les mesures réalisées pendant les essais pourront faciliter la détermination du taux de restitution d'énergie.

IV.3.2. Mécanique de la rupture avec prise en compte de l'anisotropie du matériau composite

Dans cette partie, le principe de deux termes différents du taux de restitution d'énergie montré dans la partie précédente reste toujours valable. Chaque terme sera déterminé séparément. De plus, l'influence de l'anisotropie du matériau composite est aussi prise en compte.

IV.3.2.1. Théorie des poutres pour un matériau composite (anisotrope)

La méthode de calcul analytique de détermination du taux de restitution d'énergie fondée sur la théorie des poutres a été développée par [WILLIAMS 1989]. Cette méthode est appliquée au cas des poutres simples constituée de matériaux isotropes. Pour une poutre en composite constituée de n phases différentes, les caractéristiques de la section transversale doivent être redéfinies en utilisant les notions de module longitudinal effectif E_0 et le moment quadratique effectif I_{pz} [MICHEL 2004].

Lorsqu'un corps fissuré subit une sollicitation P , la fissure s'accroît d'une longueur da sur une épaisseur uniforme B . Les deux hypothèses suivantes ont pour résultat une simplification considérable de l'analyse du délaminage des stratifiés composites:

- Le délaminage se propage en restant dans son plan initial. Les matériaux composites unidirectionnels qui présentent des fibres orientées dans le même sens que celui de propagation assurent l'accroissement de la fissure dans son plan initial. Les fibres longitudinales imposent une fissuration bien guidée [GONG 1992].
- La propagation est uniforme dans la largeur [WILLIAMS 1989]. Le front de la fissure reste toujours perpendiculaire à la direction de propagation.

Le taux de restitution d'énergie G , est déterminé en ayant recours au champ de contraintes au front de la fissure. Seuls les chargements à distance doivent être considérés. L'analyse des énergies mises en jeu par les chargements appliqués conduit alors aux expressions générales de G pour tous les cas de charge.

On considère que la section transversale de la poutre en composite est constituée de 2 phases principales: des fibres et de la matrice. L'image de la section transversale prise au MEB (figure IV.7) montre que la répartition des fibres dans la matrice est relativement homogène par rapport à la taille de la section. Les fractions volumiques de fibres et de matrice du matériau composite sont notées respectivement: f_f et f_m . Soit :

$$f_f + f_m = 1.$$

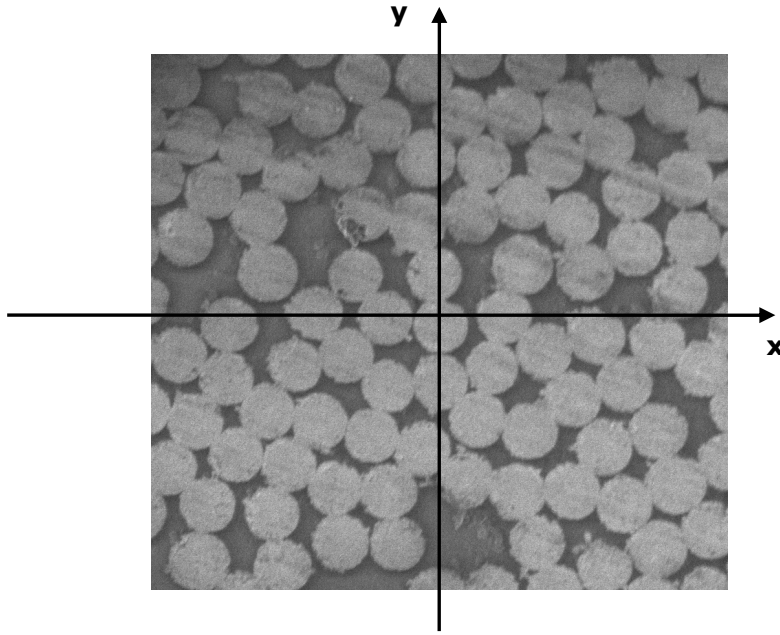


Figure IV.7: Section transversale d'une poutre composite

Selon [MICHEL 2004], le module longitudinal effectif E_I peut être évalué par la formule suivante:

$$E_I S = \sum_{i=1}^2 E_i . S_i = E_f . f_f . S + E_m . f_m . S \quad \text{Eq IV-16}$$

soit:

$$E_I = E_f . f_f + E_m . f_m \quad \text{Eq IV-17}$$

où:

S est la superficielle de la section, $S = hB$,

E_m le module d'Young de la matrice,

E_f le module d'Young des fibres.

Du fait de la distribution quasi homogène des 2 phases du matériau composite, il existe un axe d'isotropie transverse correspondant à la direction longitudinale des fibres. Le moment quadratique effectif de la section autour de l'axe d'isotropie I_{PZ} s'écrit (cf figure IV.5):

$$E_I I_{pz} = \iint_{S_m} E_m y^2 dS + \iint_{S_f} E_f y^2 dS \quad \text{Eq IV-18}$$

soit :

$$E_I I_{pz} = \frac{h^3 B}{12} (E_m . f_m + E_f . (1 - f_m)) \quad \text{Eq IV-19}$$

Ou encore:

$$I_{pz} = \frac{h^3 B}{12} \quad \text{Eq IV-20}$$

IV.3.3. Evaluation du premier terme du taux de restitution d'énergie

Dans le cadre de cette partie, les calculs de taux de restitution d'énergie seront effectués en supposant qu'il n'existe pas d'effet cinétique pendant l'essai. Cette hypothèse permet d'isoler le premier terme du taux de restitution d'énergie en l'absence de l'effet cinétique. On considère ici le terme statique du taux de restitution d'énergie G correspond à la valeur $G_{statique}$ (figure IV.8).

Le bilan énergétique devient :

$$BG_{statique}da = dE_{ext} - dE_e \quad \text{Eq IV-21}$$

avec :

$$dE_e = \overline{023'} - \overline{013} \quad \text{et} \quad dE_{ext} = \overline{3123'}$$

et :

$$BG_{statique}da = (\overline{3123'} + \overline{013}) - \overline{023'} \quad \text{Eq IV-22}$$

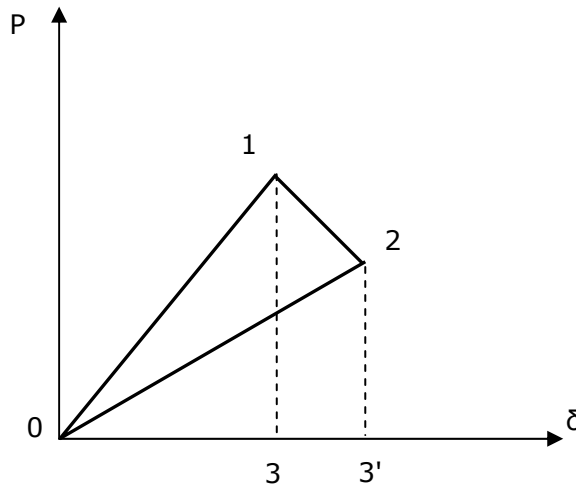


Figure IV.8: Courbe de comportement

A partir de la figure IV.8, on peut écrire:

$$BG_{statique} = P \frac{d\delta}{da} - \frac{d}{da} \int P d\delta \quad \text{et} \quad E_e = \int P d\delta \quad \text{Eq IV-23}$$

Deux cas particulier de l'équation IV-23 sont déterminés comme suit [WILLIAMS 1989]:

$$BG_{statique} = -\frac{dE_e}{da} \quad \text{si} \quad \delta = \text{const} \quad \text{Eq IV-24}$$

$$BG_{statique} = + \frac{dE_e}{da} \text{ si } P = const$$

Eq IV-25

Les relations IV-24 et IV-25 seront appliquées pour déterminer le premier terme du taux de restitution d'énergie. Par la suite, l'effort extérieur est considéré constant entre 2 instants successifs de l'essai. Cette hypothèse correspond au bilan d'énergie exprimé par la relation IV.25 et elle est conforme à nos observations expérimentales sur nos deux matériaux.

La figure IV.9 ((I) et (II)) présente l'éprouvette à 2 instants successifs: t et $(t + \Delta t)$ correspondant à deux images successives filmées par la caméra rapide pendant l'essai. La durée entre ces deux images est suffisamment petite pour la considérer comme petite la variation du temps Δt . On divise l'éprouvette en 3 parties différentes (figure IV.8): A, B, C qui présente chacune une section différente :

$$S_1 = h_1 B \text{ (partie A), } S_2 = h_2 B \text{ (partie B), } S = (h_1 + h_2) B \text{ (partie C)}$$

L'objectif de cette division géométrique est de calculer séparément l'énergie de déformation élastique de chaque partie. L'énergie de déformation élastique totale est donc la somme des 3 parties. Le repérage des dimensions de l'éprouvette est donné à la figure IV.9. On suppose que la fissure se propage d'une distance da pendant la durée dt

à une vitesse $\frac{da}{dt}$ considérée constante pendant la durée Δt .

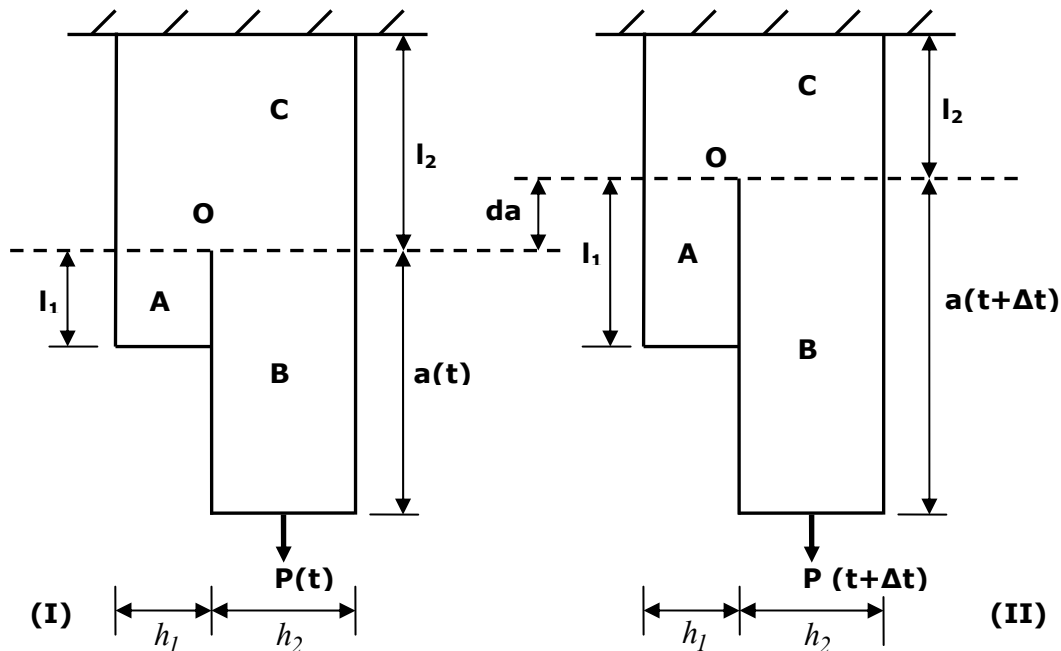


Figure IV.9: Avance de la fissure pendant 2 instants successifs de l'essai

Sous l'action de l'effort extérieur $P(t)$ au moment t de l'essai, la partie B est soumise à un effort de traction. Du fait de l'asymétrie, la partie C subit un moment de flexion

$M = \left(\frac{h_1 + h_2}{2} - \frac{h_2}{2} \right) P(t) = \frac{h_1}{2} P(t)$ ainsi que l'effort de traction $P(t)$. La partie A reste toujours libre pendant l'essai (figure IV.10).

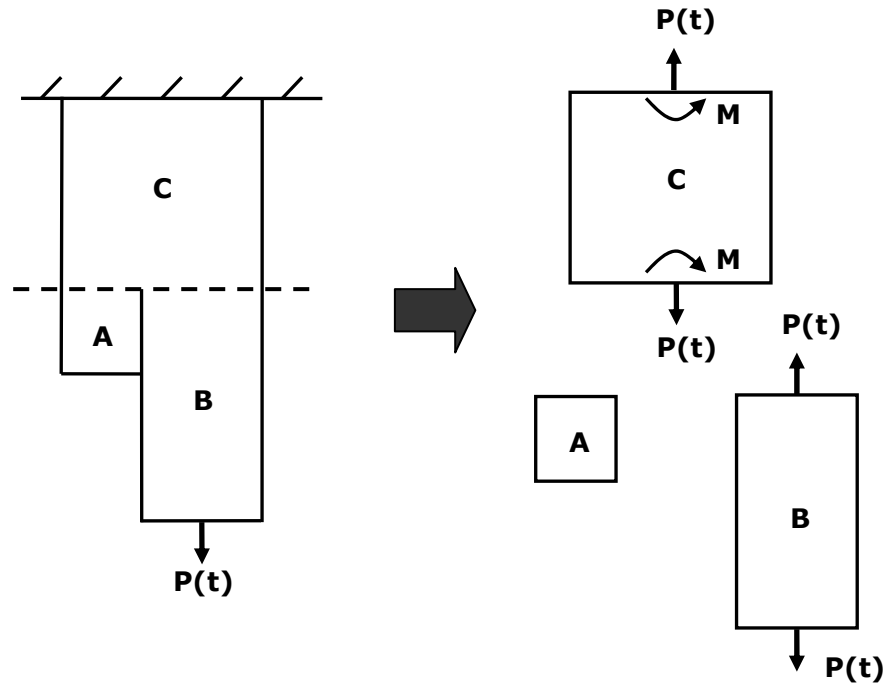


Figure IV.10: Décomposition des efforts des parties de l'éprouvette

Selon la théorie des poutres, l'énergie élastique par unité de longueur de l'éprouvette est [AGATI 1999]:

$$\frac{I}{2} \left(\frac{M^2}{EI_{pz}} + \frac{P^2}{ES} \right) \quad \text{avec: } M : \text{moment de flexion, } P : \text{effort extérieur}$$

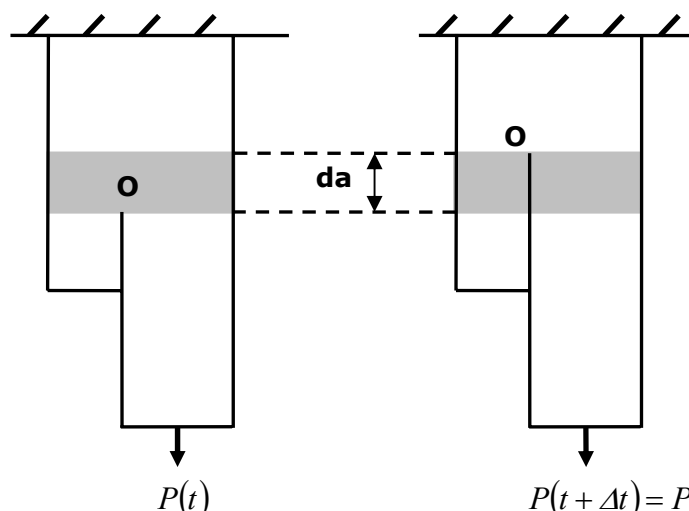


Figure IV.11: Chargement pendant Δt

Rappelons que l'effort extérieur P est supposé toujours rester constant pendant que la fissure se propage une distance da . La variation de l'énergie élastique de l'éprouvette

pendant Δt est causée par la variation d'énergie élastique subie par la partie de l'éprouvette comprise entre les 2 positions successives de la tête de fissure (la partie ombrée à la figure IV.11). On appelle cette zone la partie étudiée (figure IV.11).

A l'instant t , la partie étudiée est toujours à l'état vierge du matériau et possède une section transversale égale à $(h_1 + h_2)B$ (la section de la partie C de l'éprouvette). Selon la théorie des poutres, l'énergie de déformation élastique de cette partie à l'instant t est:

$$E_e(t) = \left(\frac{P(t)^2}{2E_1 S} + \frac{M(t)^2}{2E_1 I_{PZ}} \right) da \quad \text{Eq IV-26}$$

A l'instant $(t + \Delta t)$, la fissure a avancé une distance da par rapport à l'instant t de l'éprouvette. A cet instant, la partie étudiée a été transférée aux parties A et B de l'éprouvette. La section transversale de la partie étudiée est aussi divisée en deux: une section à la partie A et une section à la partie B. Sachant que la partie A de l'éprouvette est toujours en libre, l'énergie de déformation élastique de la partie étudiée à l'instant $(t + \Delta t)$ devient:

$$E_e(t + \Delta t) = \frac{P(t + \Delta t)^2}{2E_1 S_2} da \quad \text{Eq IV-27}$$

où $P(t) = P(t + \Delta t)$, l'équation IV-27 devient:

$$E_e(t + \Delta t) = \frac{P(t)^2}{2E_1 S_2} da \quad \text{Eq IV-28}$$

La variation d'énergie élastique entre les deux instants t et $(t + \Delta t)$ s'écrit donc :

$$dE_e(t) = E_e(t + \Delta t) - E_e(t) = \left[\frac{P(t)^2}{2E_1 S_2} - \left(\frac{P(t)^2}{2E_1 S} + \frac{M(t)^2}{2E_1 I_{PZ}} \right) \right] da \quad \text{Eq IV-29}$$

Selon l'équation IV-25, le premier terme du taux de restitution d'énergie est donné par :

$$G_{statique}(t) = \frac{dE_e(t)}{Bda} = \frac{1}{B} \left[\frac{P(t)^2}{2E_1 S_2} - \left(\frac{P(t)^2}{2E_1 S} + \frac{M(t)^2}{2E_1 I_{PZ}} \right) \right] \quad \text{Eq IV-30}$$

$$\text{avec: } M(t) = \frac{h_1}{2} P(t), \quad S_2 = h_2 B, \quad S = (h_1 + h_2) B, \quad I_{pz} = \frac{h^3 B}{12}$$

on a finalement:

$$G_{statique}(t) = \frac{P(t)^2}{E_I B^2} \left[\frac{I}{2h_2} - \left(\frac{I}{2(h_I + h_2)} + \frac{3h_I^2}{2(h_I + h_2)^3} \right) \right] \quad \text{Eq IV-31}$$

L'équation IV-31 permet de déterminer le premier terme du taux de restitution d'énergie de nos essais. Ce calcul sera appliqué aux deux campagnes d'essais que l'on a réalisées.

Le résultat de l'équation IV-31 nous permet de constater que le premier terme n'est influencé que par l'effort de chargement pendant l'essai. Par ailleurs, au chapitre II, on a montré que la force mesurée pendant l'essai est gérée par 3 paramètres différents: la vitesse de chargement, l'effet de la variation géométrique de la structure causé par la propagation de la fissure, l'effet du matériau.

IV.3.4. Evaluation du deuxième terme du taux de restitution d'énergie

Lors de l'application d'une vitesse constante au cours de l'essai, l'énergie cinétique totale reste inchangée tant que la fissure ne se propage pas. Dans le calcul du taux de restitution d'énergie, la variation d'énergie cinétique au cours de la propagation de la fissure $\frac{dE_c}{da}$ intervient dès que la fissure avance. La variation du taux de restitution d'énergie au cours de la propagation est due au changement de longueur de la fissure et à la masse de matériau qui participe au mouvement.

Nous considérons une éprouvette CLS qui est fixée au bord supérieur et se déforme instantanément à une vitesse de déplacement égale à $\frac{d\delta}{dt}$ appliquée sur le bras chargé de l'éprouvette, le second bras (le bras non-chargé) restant libre.

Les coordonnées (O, x, y) du plan sont définies comme sur la figure IV.12, O coïncide avec la pointe de la fissure.

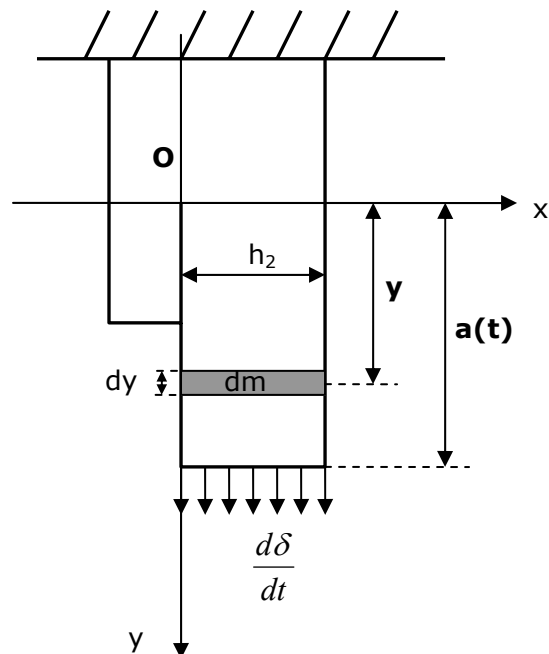


Figure IV.12: Approximation de calcul

En supposant que la raideur longitudinale du matériau composite est toujours constante pendant l'essai, on peut considérer une variation linéaire de la vitesse de mouvement tout au long de l'éprouvette. Le profil longitudinal de la vitesse de mouvement de toutes les parties (A, B, C) de l'éprouvette peut être représenté par la figure IV.13.

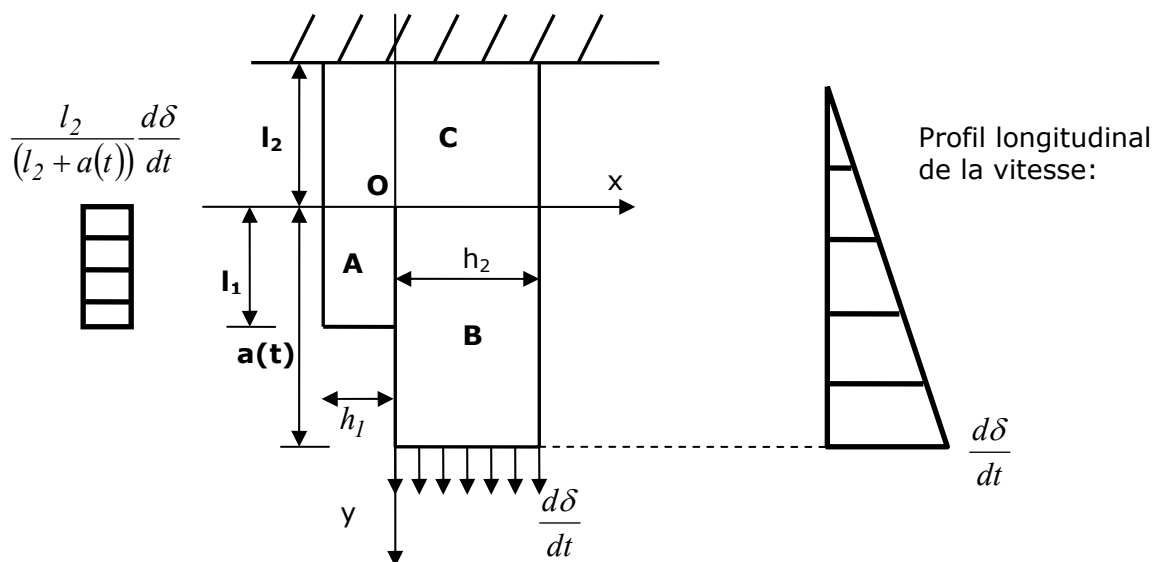


Figure IV.13: Répartition de la vitesse sur le bras chargé à l'instant t

La répartition de la vitesse de déplacement longitudinale de la partie B et C de l'éprouvette est caractérisée par un triangle à la figure IV.13 (à droite de la figure). La vitesse de déplacement longitudinale maximale se trouve à la limite inférieure de l'éprouvette (à la position du mors inférieur) et est égale à $\frac{d\delta}{dt}$. Cette vitesse est égale à zéro à la limite supérieure (au mors supérieur). La partie A de l'éprouvette se déforme à

une vitesse de déplacement unique sur toute la partie. Cette vitesse est égale à

$$\frac{l_2}{(l_2 + a(t))} \frac{d\delta}{dt}.$$

On a donc pour tous les instants t :

$$\text{à } y = -l_2 \text{ on a } \frac{dy}{dt} = 0$$

$$\text{à } y = a(t) \text{ on a } \frac{dy}{dt} = \frac{da}{dt}$$

avec:

$a(t)$: la longueur de la fissure à l'instant t .

La vitesse de déplacement $\frac{dy}{dt}(t)$ à l'instant t d'un élément dm pris sur la longueur de l'éprouvette est donc calculée par :

$$\frac{dy}{dt}(t) = \frac{d\delta}{dt} \frac{y(t)}{(a(t) + l_2)} \quad \text{Eq IV-32}$$

avec:

$y(t)$ est la coordonnée verticale de l'élément dm ,

$a(t)$ la longueur de la fissure à l'instant t ,

l_2 la longueur de la partie C de l'éprouvette.

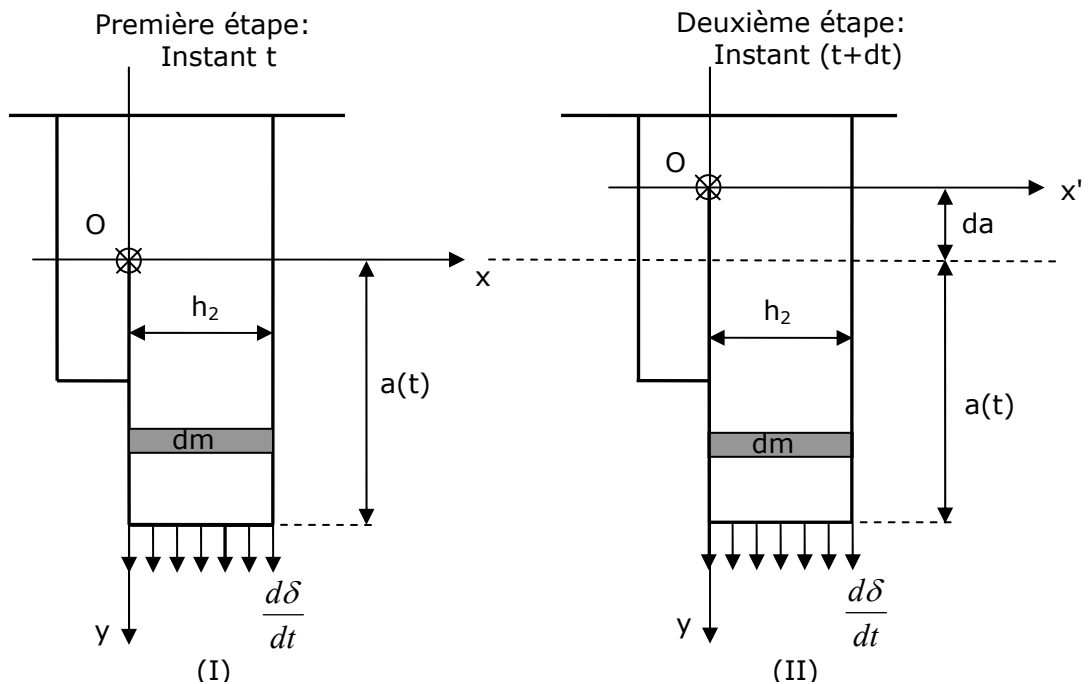


Figure IV.14: Deux moments successifs de la propagation de la fissure

Considérons deux moments successifs du chargement de l'éprouvette (Figure IV.14). L'image IV.14(I) correspond à l'instant t où la longueur de fissure égale à $a(t)$ et l'image IV.14(II) présente l'éprouvette au moment $(t+dt)$ où la fissure a propagé d'une longueur da par rapport au moment t . Sous l'action de la vitesse de déplacement $\frac{d\delta}{dt}$ appliquée au bras chargé, à chaque instant pendant l'essai (t ou $(t+dt)$) l'éprouvette développe toujours une énergie cinétique qu'on l'appelle l'énergie cinétique instantanée de l'éprouvette: $E_c(t)$ et $E_c(t+dt)$ développée respectivement à l'instant t et $(t+dt)$ de l'essai. La variation de l'énergie cinétique de l'éprouvette est due à la croissance de la longueur de la fissure qui rajoute une masse supplémentaire au bras-chargé (partie B) en mouvement et en même temps diminue la masse de la partie A.

Soit un élément de masse dm du bras-chargé en coordonnée verticale y qui est en mouvement sous l'action de $\frac{d\delta}{dt}$. On peut écrire: $dm = \rho B h dy$ avec h la largeur et B l'épaisseur de l'éprouvette, ρ est la masse volumique du matériau.

A l'instant t , l'énergie cinétique élémentaire $dE_c(t)$ de l'élément dm est donnée par:

$$dE_c(t) = \frac{1}{2} v^2 dm = \frac{1}{2} \left(\frac{dy}{dt}(t) \right)^2 dm \quad \text{Eq IV-33}$$

où $\frac{dy}{dt}(t)$ est la vitesse de mouvement de l'élément dm à l'instant t .

Cette vitesse est déterminée par l'équation IV-32:

$$dE_c(t) = \frac{1}{2} dm \left(\frac{d\delta}{dt} \frac{y(t)}{(a(t)+l_2)} \right)^2 dy \quad \text{Eq IV-34}$$

La masse de l'élément dm est :

$$dm = h_1 B \rho \quad \text{pour la partie A}$$

$$dm = h_2 B \rho \quad \text{pour la partie B}$$

$$dm = (h_1 + h_2) B \rho \quad \text{pour la partie C}$$

En intégrant sur la longueur de l'éprouvette, on peut trouver l'énergie cinétique de l'éprouvette correspond à l'instant t de l'essai:

$$E_c(t) = \frac{1}{2} h_1 B \rho \left(\frac{l_2}{(l_2 + a(t))} \frac{d\delta}{dt} \right)^2 \int_{-l_1}^0 dy \frac{1}{2} h_2 B \rho \int_0^{a(t)} \left(\frac{d\delta}{dt} \frac{y(t)}{(a(t) + l_2)} \right)^2 dy + \frac{1}{2} (h_1 + h_2) B \rho \int_{-l_2}^0 \left(\frac{d\delta}{dt} \frac{y(t)}{(a(t) + l_2)} \right)^2 dy$$

Eq IV-35

L'équation IV-35 permet de déterminer l'énergie cinétique instantanée de l'éprouvette pendant l'essai:

$$E_c(t) = \frac{1}{2} h_1 B \rho \left(\frac{l_2}{(l_2 + a(t))} \frac{d\delta}{dt} \right)^2 l_1 + \frac{1}{6} h_2 B \rho \left(\frac{d\delta}{dt} \right)^2 \frac{a(t)^3}{(a(t) + l_2)^2} + \frac{1}{6} (h_1 + h_2) B \rho \left(\frac{d\delta}{dt} \right)^2 \frac{(l_2)^3}{(a(t) + l_2)^2}$$

Eq IV-36

La variation d'énergie cinétique de l'éprouvette entre deux instants successifs t et $(t + dt)$ pendant l'essai est donnée par

$$dE_c = E_c(t + dt) - E_c(t) \quad \text{Eq IV-37}$$

Connaissant la variation de l'énergie cinétique dE_c entre deux instants de l'essai, le terme lié à l'énergie cinétique du taux de restitution d'énergie est déterminé par la relation suivante :

$$-\frac{1}{B} \frac{dE_c}{da} = -\frac{1}{h} \frac{(E_c(t + dt) - E_c(t))}{da} \quad \text{Eq IV-38}$$

$$\text{où } da = a(t + dt) - a(t)$$

L'équation IV-38 permet de calculer le deuxième terme du taux de restitution d'énergie de la structure lié à la variation de l'énergie cinétique entre 2 instants successifs de l'essai. La variation d'énergie cinétique est considérée comme l'énergie consommée pendant une propagation da de la fissure. Cette variation de l'énergie cinétique est due au changement de vitesse de plusieurs parties de l'éprouvette entre deux instants successifs. L'équation IV.36 nous permet de constater que la variation de l'énergie cinétique entre 2 instants successifs pendant l'essai est influencée en premier lieu par la vitesse de chargement instantanée $\frac{d\delta}{dt}$ mais aussi par la propagation de la fissure entre deux instants produisant une variation des dimensions de l'éprouvette $(l_1, l_2, a(t))$. Cette remarque permet de conclure que le deuxième terme du taux de restitution d'énergie est influencé par deux paramètres : la vitesse de propagation de la fissure et la vitesse de chargement. Par rapport au premier terme du taux de restitution d'énergie, ce deuxième terme n'est pas influencé par l'effet du matériau. Cela est une conclusion importante qui permet de différencier les deux termes du taux de restitution d'énergie.

Du point de vue applicatif, notons que la caméra rapide permet de filmer les essais avec une vitesse d'acquisition allant jusqu'à 250.000 images/seconde. A ces vitesses,

l'écart temporel entre deux images successives devient très petit par rapport à la durée de l'essai. C'est pourquoi, on pourra considérer que la durée entre deux images successives est assimilable au terme dt de l'équation IV.38.

IV.3.5. Taux de restitution d'énergie des essais du matériau composite carbone/époxy

Les deux parties précédentes nous ont permis d'estimer séparément les termes du taux de restitution d'énergie dans le cas des essais de type CLS. Nous présenterons aux paragraphes suivants les résultats de calcul et les discussions pour chaque campagne d'essais.

IV.3.5.1. Mesure de la vitesse de chargement

Afin d'appliquer l'approche globale présentée précédemment, il est nécessaire de connaître la vitesse de sollicitation. Lors de la réalisation des essais CLS sur le matériau composite carbone/époxy, le déplacement du mors inférieur est suivi par l'extensomètre laser. Cette méthode de mesure a été présentée au chapitre II. La vitesse de déplacement du mors inférieur est considérée par la suite comme la vitesse de chargement de l'essai.

L'ordre de grandeur de la durée des essais est de quelques 10^{-4} secondes. La figure IV.15 est un exemple typique du déplacement mesuré par l'extensomètre laser. Au vu de ce résultat, on peut raisonnablement considérer que la vitesse de chargement est constante pendant toute la durée de l'essai. En effet, les mesures montrent que les courbes (déplacement-temps) sont quasi-linéaires pendant toute la durée de l'essai. La vitesse de chargement moyenne est donc identifiée par la pente de la droite et est considérée comme constante pendant l'essai (figure IV.15).

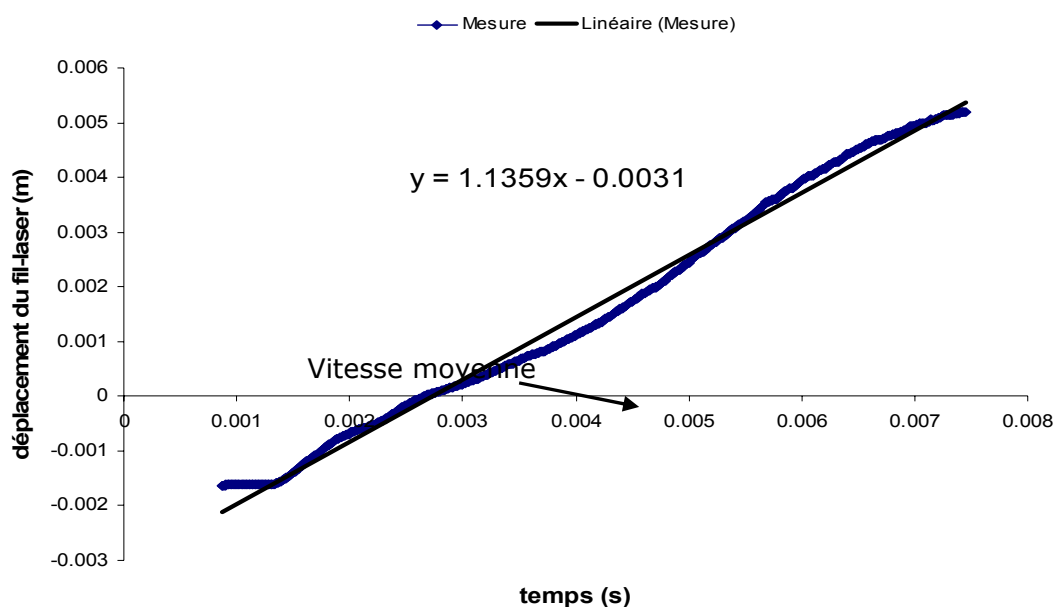


Figure IV.15: Mesure de la vitesse de chargement

Pendant la campagne d'essais du matériau composite carbone/époxy, on a pu réaliser plusieurs essais avec une gamme de vitesse de chargement assez large. La vitesse de chargement mesurée varie de 0,3 m/s jusqu'à 12m/s.

IV.3.5.2. Résultat de calcul

La figure IV.16 présente le résultat de calcul du taux de restitution d'énergie des essais du matériau composite carbone/époxy selon l'approche globale. Le taux de restitution d'énergie est exprimé en fonction de la vitesse de la fissure mesurée pendant les essais. Chaque vitesse de chargement est représentée par une couleur différente. Cette figure présente au total 6 vitesses de chargement différentes. La vitesse maximale de la fissure qu'on a pu mesurer est de l'ordre de 1000m/s.

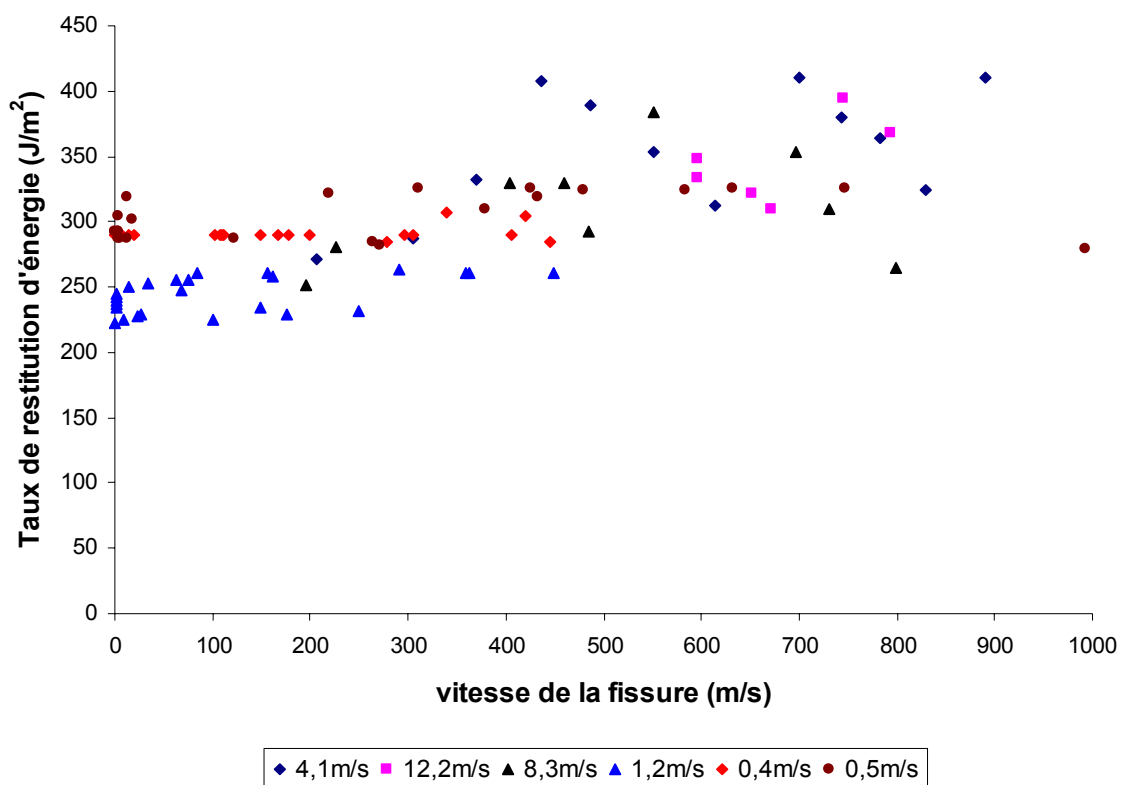


Figure IV.16: Taux de restitution d'énergie de la campagne d'essais du matériau carbone/époxy en fonction de la vitesse de la fissure

Les résultats présentés montrent au début une tendance stable du taux de restitution d'énergie par rapport à la vitesse de propagation de la fissure : Pour des vitesses de propagation inférieure à 300m/s, le taux de restitution d'énergie reste confiné entre 220J/m² et 330J/m². A partir de 300m/s, le taux de restitution d'énergie augmente sensiblement et atteint la valeur maximale de 450J/m².

Pour les essais à faible vitesse de chargement (< 2m/s), le taux de restitution d'énergie n'évolue presque pas en fonction de la vitesse de la fissure. Pourtant, à partir des grandes vitesses de chargement (>4 m/s), le taux de restitution d'énergie augmente sensiblement par rapport à sa valeur initiale et montre une plus grande dispersion autour de la valeur moyenne. On voit donc un effet direct de la vitesse de sollicitation.

Le tracé de l'évolution sur une échelle logarithmique de la vitesse de la fissure met en évidence le phénomène de seuil (figure IV.17). Sur cette figure, on observe bien l'évolution stable du taux de restitution d'énergie jusqu'au seuil de vitesse de fissuration situé autour de 300m/s. A partir de ce seuil, le taux de restitution de l'énergie commence à augmenter sensiblement par rapport à la valeur initiale.

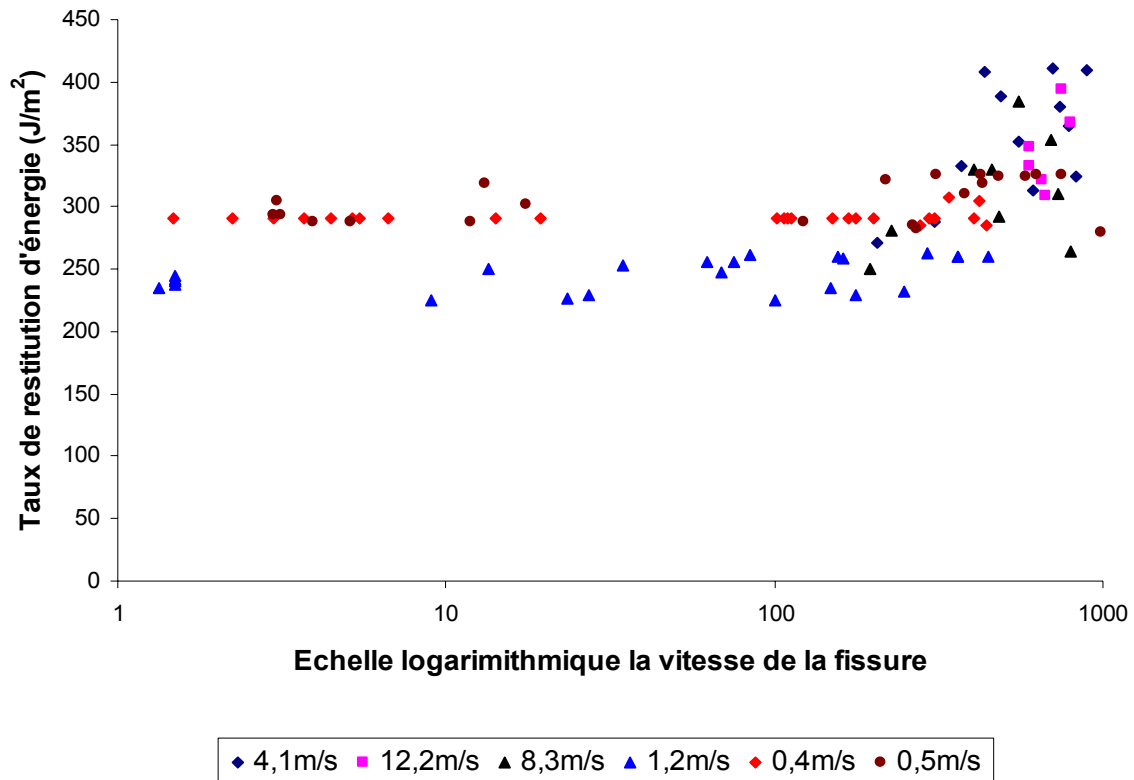


Figure IV.17: Taux de restitution d'énergie en fonction de la vitesse de chargement (à échelle logarithmique)

IV.3.5.3. Discussion

Répetons ici que le taux de restitution, selon l'approche globale, est composé par 2 termes différents : le premier terme statique et le deuxième terme cinétique. Le premier terme du taux de restitution d'énergie est caractérisé par 3 paramètres : les caractéristiques physiques du matériau, la vitesse de la fissure et la vitesse de chargement. Le deuxième terme est influencé par l'effet cinétique de l'essai provoqué par la grande vitesse. En résumé, selon l'approche globale, le taux de restitution d'énergie est géré par 3 paramètres principaux : la vitesse de la fissure, la vitesse de chargement, et l'effet du matériau.

La figure IV.18 présente l'évolution du premier terme du taux de restitution d'énergie en fonction de la vitesse propagation de la fissure. Chaque série de cette figure correspond à une vitesse de chargement. On peut constater qu'aux faibles vitesses de sollicitation (0,4m/s, 0,5m/s, 1,2m/s) le premier terme a tendance à se stabiliser autour d'une valeur moyenne. A partir de la vitesse de sollicitation de 4,1m/s, le premier terme commence à disperser et on observe que la vitesse de sollicitation de 12,2m/s engendre

les valeurs les plus petites du premier terme tandis que la vitesse de sollicitation de 4,1m/s présente les valeurs les plus grandes. Malgré une dispersion plus importante aux grandes vitesses de sollicitation, on peut quand même conclure que globalement le terme statique n'est pas influencé de façon significative par la vitesse de sollicitation. L'effet matériau est donc plutôt faible.

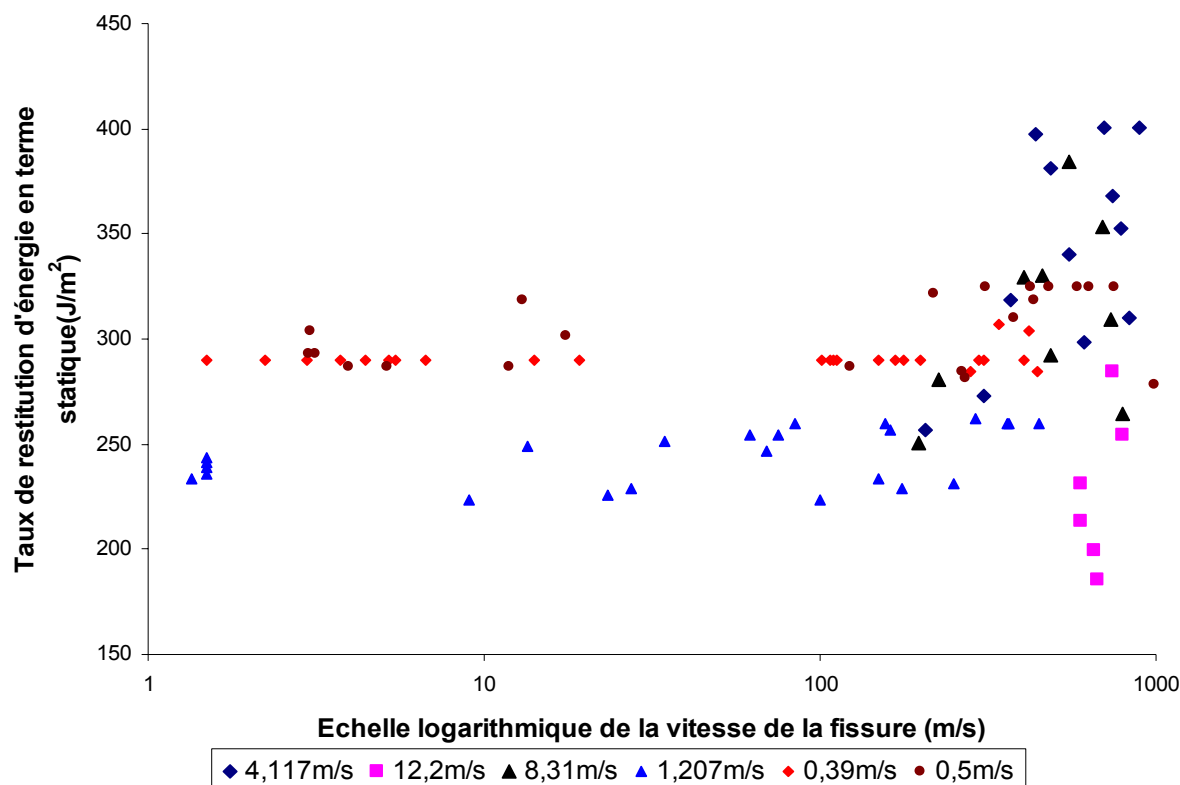


Figure IV.18: Taux de restitution d'énergie en terme statique

Analysons maintenant l'influence de l'effet cinétique sur l'évolution du taux de restitution d'énergie pendant les essais. Pour évaluer cela, nous avons étudié l'évolution du deuxième terme du taux de restitution d'énergie par rapport à la vitesse de la fissure (figure IV.19). La première remarque est que le deuxième terme augmente de manière significative avec la vitesse de sollicitation.

En effet, les résultats sur la figure IV.19 montrent que le deuxième terme est très petit aux faibles vitesses de chargement (essais : 0,4m/s, 0,5m/s, 1,2m/s), c'est-à-dire que l'effet cinétique n'influence pas le taux de restitution d'énergie pendant ces essais et peut être négligé. A la vitesse de chargement égale à 4,1m/s, l'effet cinétique commence à influencer le taux de restitution d'énergie. A partir de cette vitesse de chargement, l'effet cinétique commence à jouer un rôle non négligeable sur le taux de restitution d'énergie. Plus la vitesse de chargement est grande sa participation augmente.

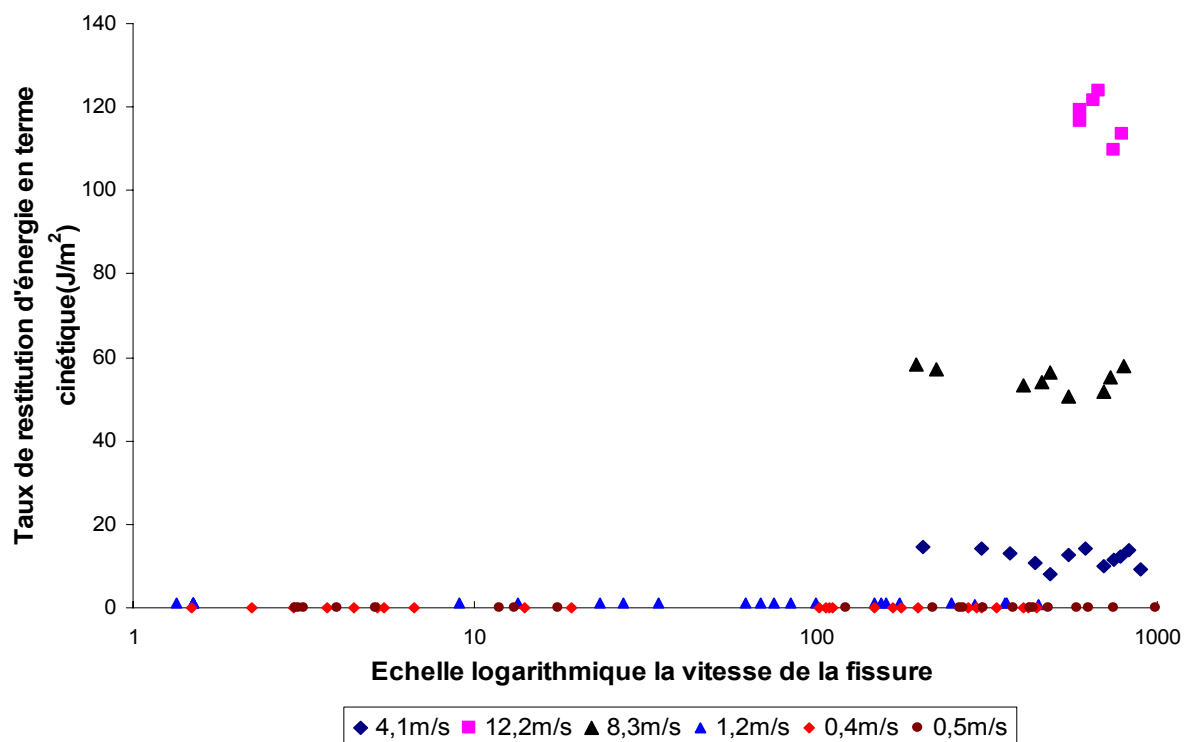


Figure IV.19: Taux de restitution d'énergie en terme cinétique

La figure IV.20 présente le pourcentage du deuxième terme par rapport à la valeur totale du taux de restitution d'énergie. A 12,2m/s, le deuxième terme lié à l'effet cinétique intervient en moyenne pour 35% de la valeur total du taux de restitution d'énergie. L'effet cinétique est donc important pour cette vitesse.

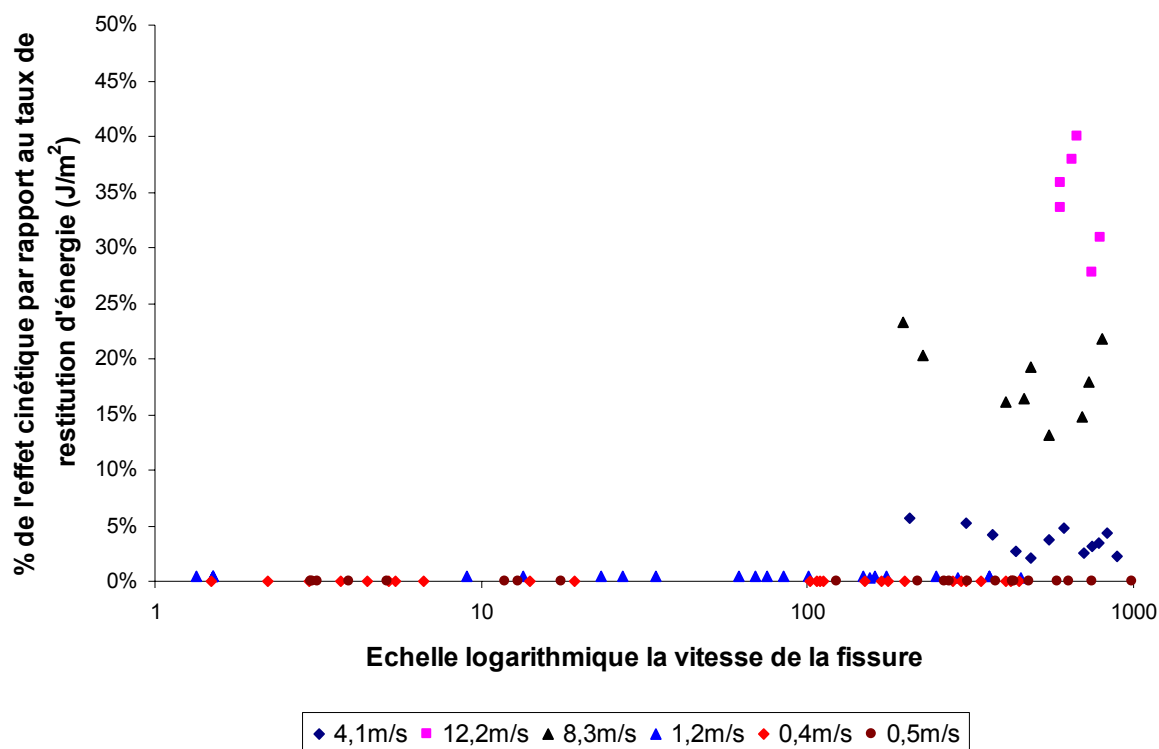


Figure IV.20: Participation de l'effet cinétique au taux de restitution d'énergie pendant l'essai

IV.3.6. Taux de restitution d'énergie des essais du matériau composite verre/époxy

IV.3.6.1. Vitesse de chargement

La vitesse de chargement imposée par la machine de traction à grande vitesse est une valeur de consigne donnée au début de l'essai. Par contre, du fait de la présence du joint d'amortissement et des jeux entre les différentes parties du montage, elle ne représente pas forcément la vitesse de déplacement à l'extrémité chargée de l'éprouvette pendant l'essai (vitesse de chargement). Pendant cette campagne d'essais, les dimensions de l'éprouvette et l'encombrement au lieu du mors inférieur ne permettent pas d'installer l'extensomètre laser afin de mesurer la vitesse de chargement. C'est la raison pour laquelle nous avons dû rechercher une nouvelle méthode de mesure de cette condition aux limites.

La mesure de champs de déplacement par corrélation d'images a permis de mesurer le champ de déplacement de la zone autour de la tête de la fissure pour toutes les images filmées pendant l'essai. En combinant cette méthode de mesure de champs avec la caméra rapide, on a pu suivre l'évolution du champ de déplacement de la zone filmée pendant tout l'essai. L'idée d'utiliser l'évolution du champ de déplacement mesuré afin de déterminer la vitesse de déplacement au lieu du mors inférieur de l'essai a été exploitée afin de nous donner accès à cette donnée nécessaire à l'application de l'approche globale. La détermination de cette vitesse de déplacement est réalisée en utilisant une méthode d'extrapolation.

La suite de cette partie illustre la méthode de mesure de la vitesse de chargement dans le cas d'un essai effectué à la vitesse de consigne de 1 m/s. Onze images ont pu être filmées pendant cet essai lors la propagation de la fissure. Les images sont numérotées de 40 à 50. On étudie l'évolution du champ de déplacement horizontal pendant l'essai qui est déterminée par la mesure de champs appliquée à toutes les images. Un exemple de champ de déplacement horizontal mesuré par corrélation est présenté à la figure IV.21. Le maillage se compose de 9 lignes et de 25 colonnes. Les lignes sont numérotées de 1 à 9 de bas en haut. Les colonnes sont numérotées de 1 à 25 de gauche à droite.

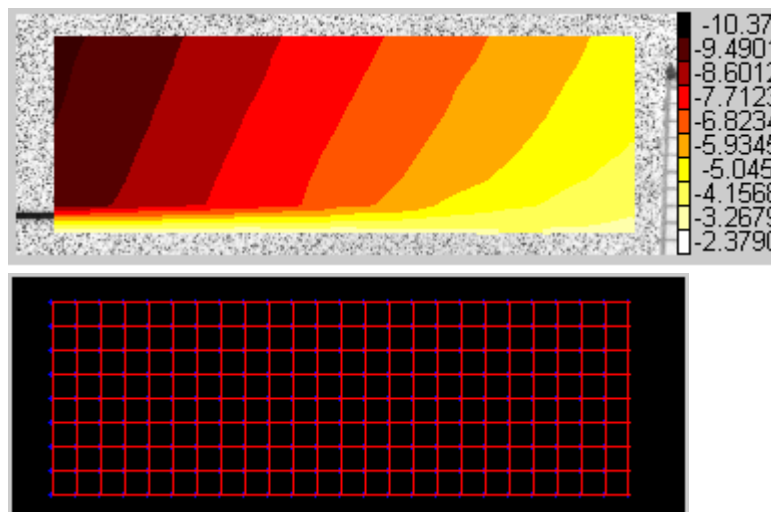


Figure IV.21: Maillage de la mesure du champ de déplacement horizontal

Le chargement est appliqué dans la direction horizontale sur le bras supérieur. L'image avec le mouchetis est prise à la surface de l'éprouvette dans la zone sur laquelle se trouve la tête de la fissure.

Les champs de déplacement horizontal de 3 images différentes pendant l'essai (image 40, image 45 et image 49) sont présentés respectivement aux figures IV.22, IV.23, IV.24. Sur ces figures, chaque courbe représente l'évolution du déplacement horizontal sur une des lignes du maillage numérotées de 1 à 9 de haut en bas. Ces résultats nous amènent aux remarques suivantes:

- La partie de l'éprouvette qui se trouve proche du point de sollicitation se déplace plus que ceux qui sont loin.
- La répartition du champ de déplacement horizontal selon la longueur de l'éprouvette est linéaire par rapport aux lignes 4, 5, 6, 7, 8, 9.
- La répartition non linéaire des lignes numéro 1, 2, 3 est liée à la présence de la fissure qui perturbe le champ de déplacement horizontal.
- A l'image 40 (figure IV.22), l'écart des 6 premières lignes (ligne 1 à ligne 6) en colonne 1 est plus grand que celui de la colonne 25. Cette variation de l'écart signifie que la pente varie légèrement d'une ligne à l'autre. Pourtant, à l'image 45 (figure IV.23), cette variation est de très faible amplitude et à l'image 50 (figure IV.24) cette variation existe en sens inverse. La variation de cet écart entre les images permet de constater la présence d'une légère rotation oscillatoire de l'échantillon pendant l'essai qui est causée par la présence de la fissure.

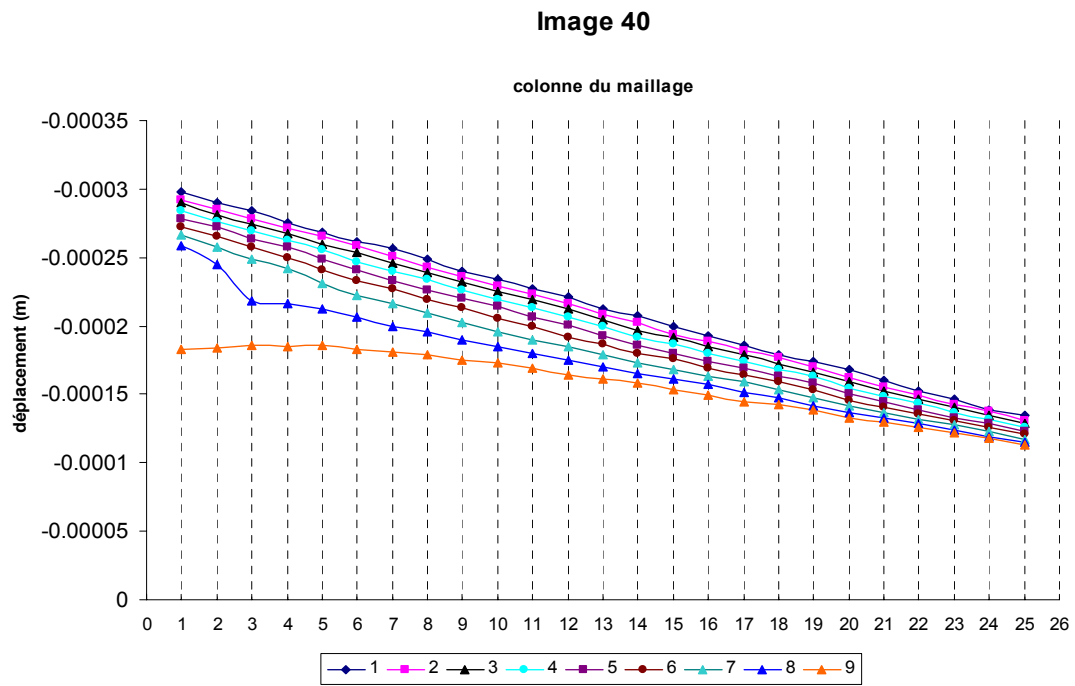


Figure IV.22: Champ de déplacement horizontal de l'image numéro 40 de l'essai 1m/s

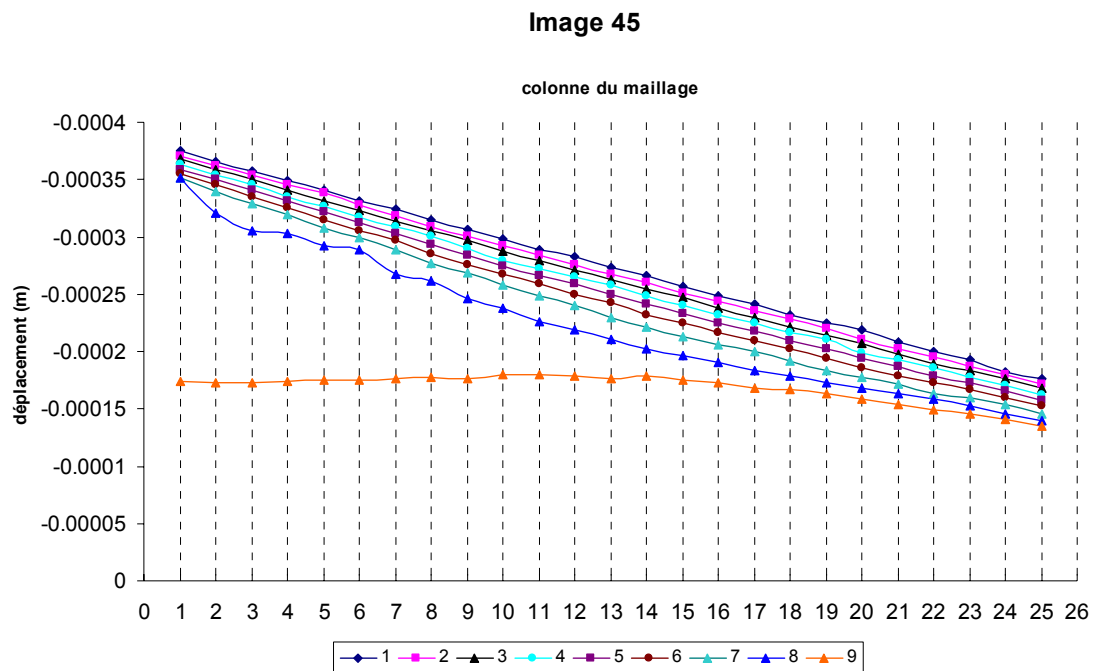


Figure IV.23: Champ de déplacement horizontal de l'image numéro 45 de l'essai 1m/s

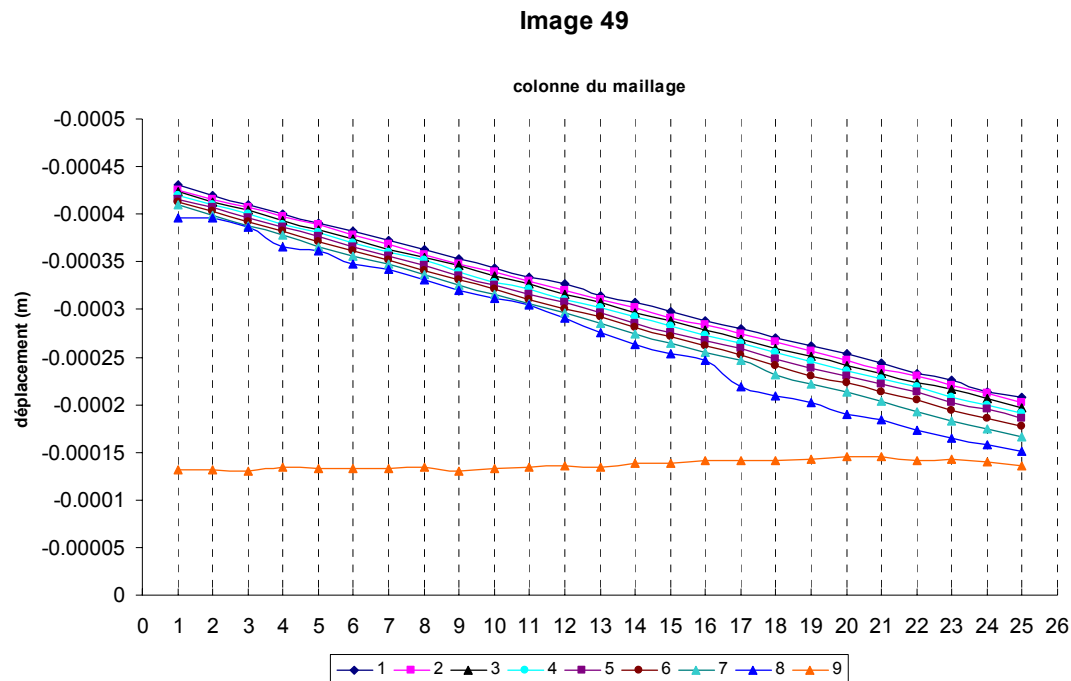


Figure IV.24: Champ de déplacement horizontal de l'image numéro 50 de l'essai 1m/s

Toutes ces remarques se répètent systématiquement sur toutes les images prise pendant l'essai. Malgré la très légère rotation de l'échantillon, on peut donc conclure à une variation linéaire du champ de déplacement horizontal du bras chargé par rapport à la longueur de l'éprouvette. Le bras chargé a tendance à se déformer uniformément par rapport à la longueur d'éprouvette pendant l'essai réalisé.

Afin de vérifier cette affirmation, on étudie le déplacement horizontal des nœuds qui se trouvent sur la même section transversale de l'éprouvette. On étudie donc 3 sections représentatives différentes: 1ère colonne du maillage, la 14ème colonne, la dernière colonne du maillage. L'évolution des déplacements horizontaux des nœuds sur une section est présentée par chacune des figures IV.25, IV.26, IV.27. On a donc 3 figures correspondant à 3 sections différentes. Sur chaque figure, les déplacements horizontaux sur la section sont présentés pour toutes les images prises pendant l'essai. Chaque image filmée pendant l'essai correspond à une couleur différente.

Ces 3 figures nous conduisent aux remarques suivantes:

- L'écart de déplacement horizontal des nœuds de chaque section selon le temps de l'essai est homogène de l'image 40 jusqu'à l'image 50. Cela nous permet de conclure que chaque section se déforme horizontalement à une vitesse de déplacement constante pendant l'essai.
- La présence de la fissure qui se trouve à la 2ème ligne du maillage influence les déplacements des nœuds de la 3ème ligne et contribue à l'effet de rotation du champ de déplacement horizontal de la zone étudiée. En effet, sur les 3 figures, on voit nettement la tendance de rotation autour de la ligne de la fissure

du champ de déplacement horizontal. La présence de la fissure est à l'origine de l'asymétrie de l'éprouvette pendant l'essai. Sous l'effet du chargement dans la direction horizontale, il existe un moment de flexion par rapport à l'axe horizontal de l'éprouvette. Ce moment de flexion a causé l'effet de rotation du champ de déplacement horizontal. Pourtant, l'effet de rotation est négligeable par rapport au déplacement moyen, c'est pourquoi on peut confirmer que l'éprouvette se déforme linéairement dans la direction horizontale sous l'action du chargement extérieur.

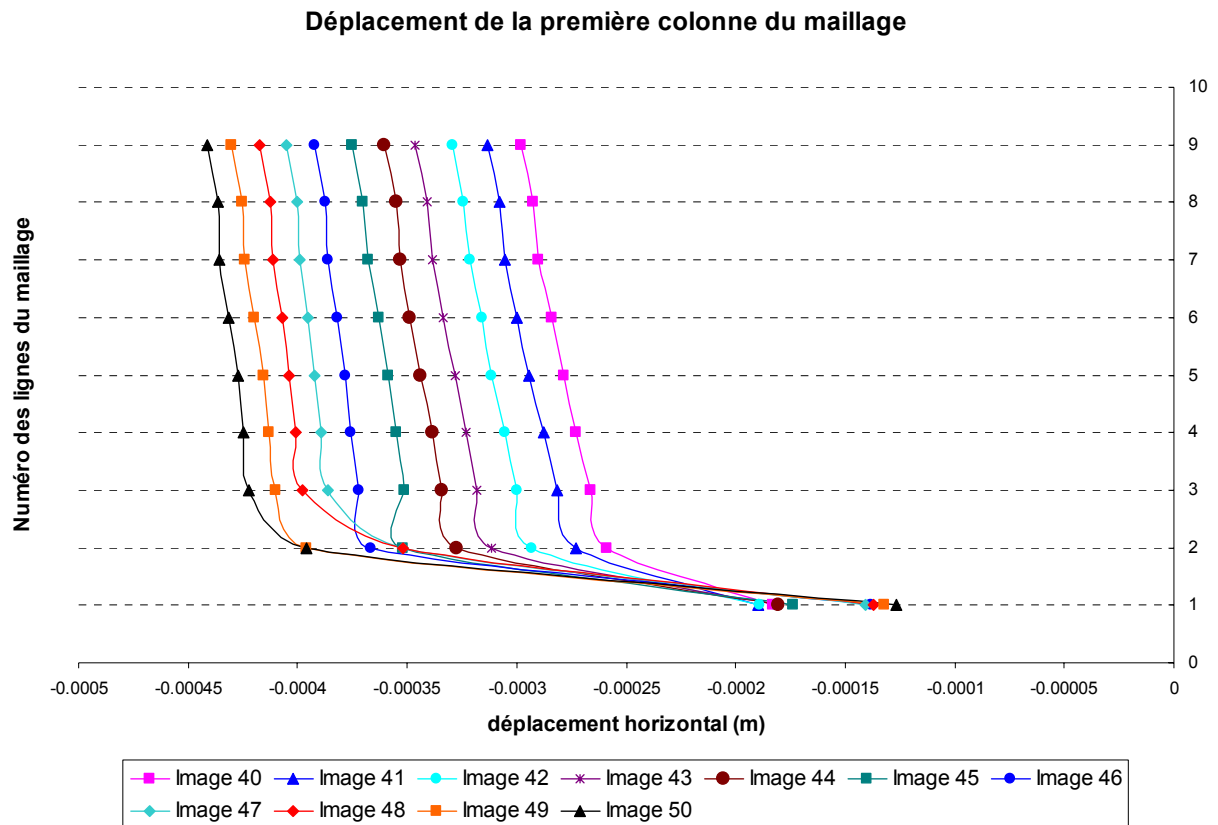


Figure IV.25: Evolution de la première section

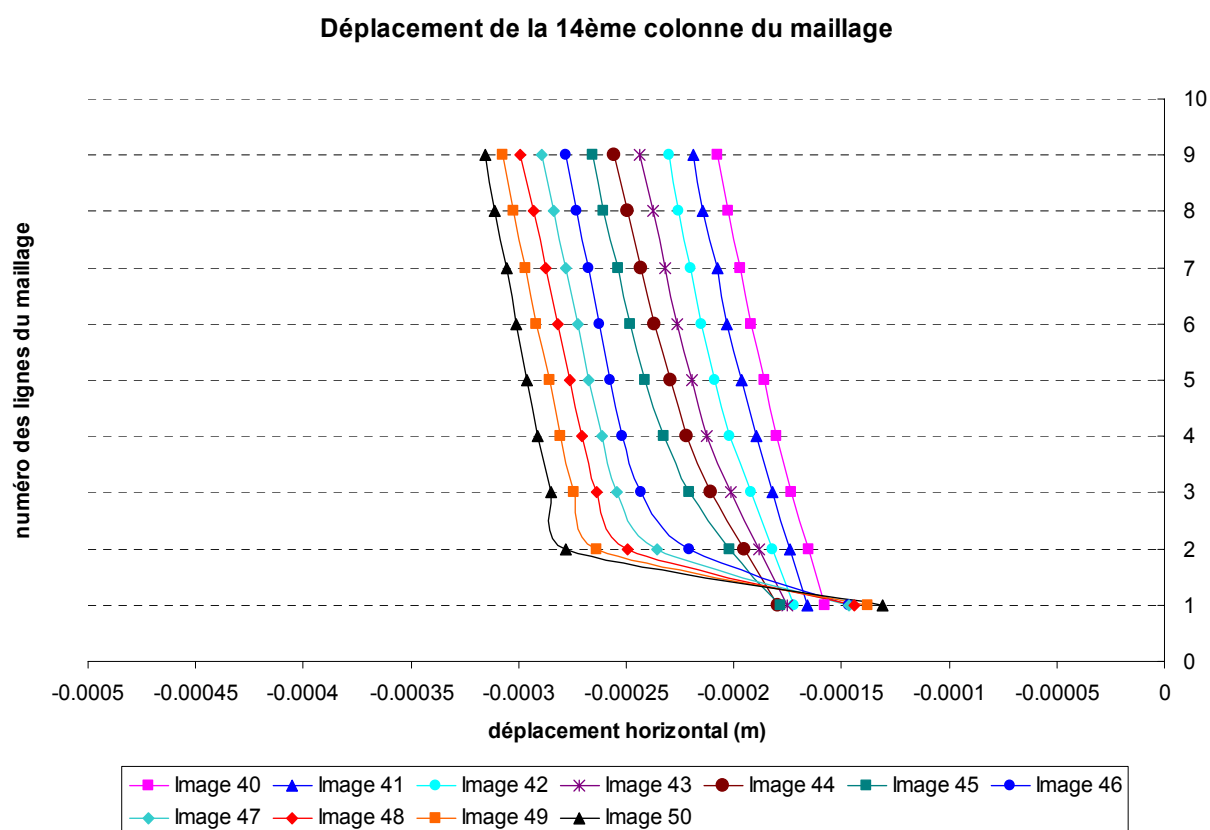


Figure IV.26: Evolution de la deuxième section

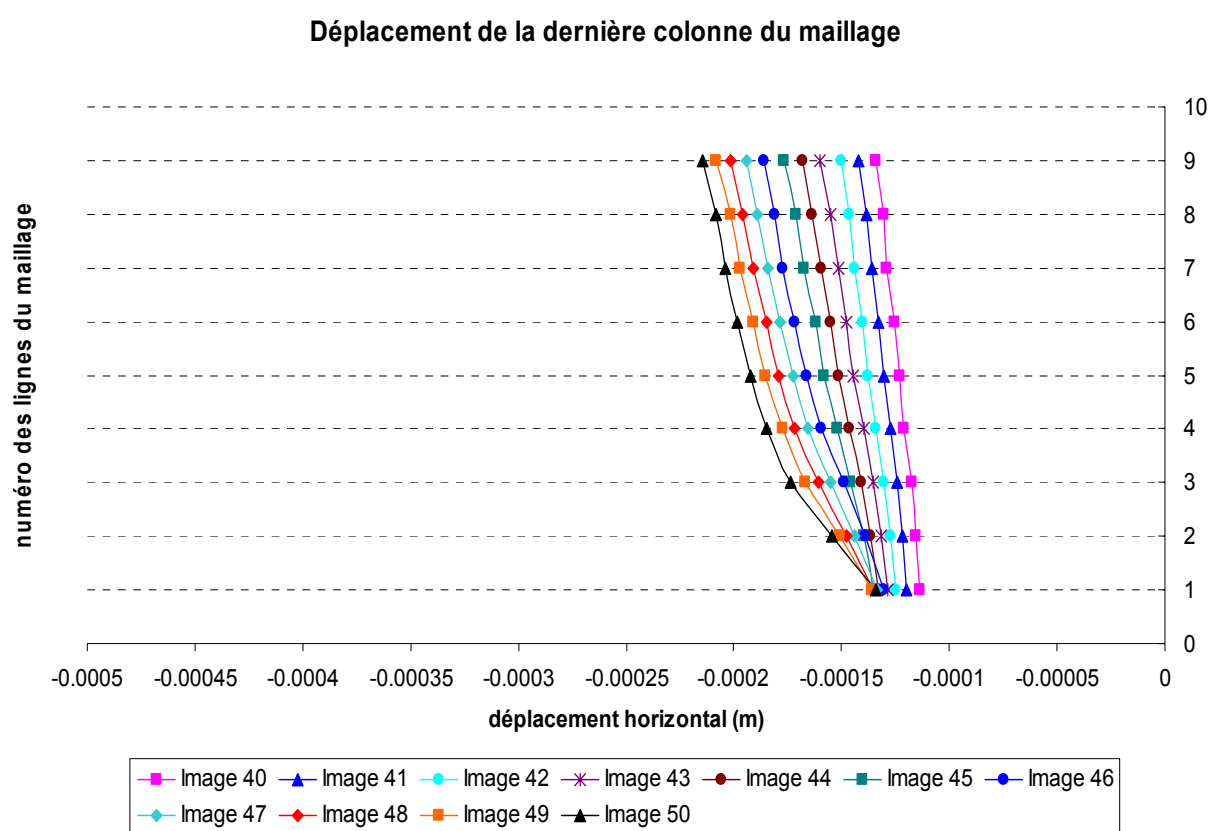


Figure IV.27: Evolution de la troisième section

Ce résultat nous autorise donc à utiliser une méthode d'extrapolation linéaire pour déterminer la vitesse de chargement à la position du mors inférieur de l'essai qui se trouve proche de la zone étudiée (zone filmée). La figure IV.28 présente le principe d'extrapolation qui permet de déterminer la vitesse de chargement pendant l'essai. La distance de la zone filmée au mors inférieur est égale à 23,58mm.

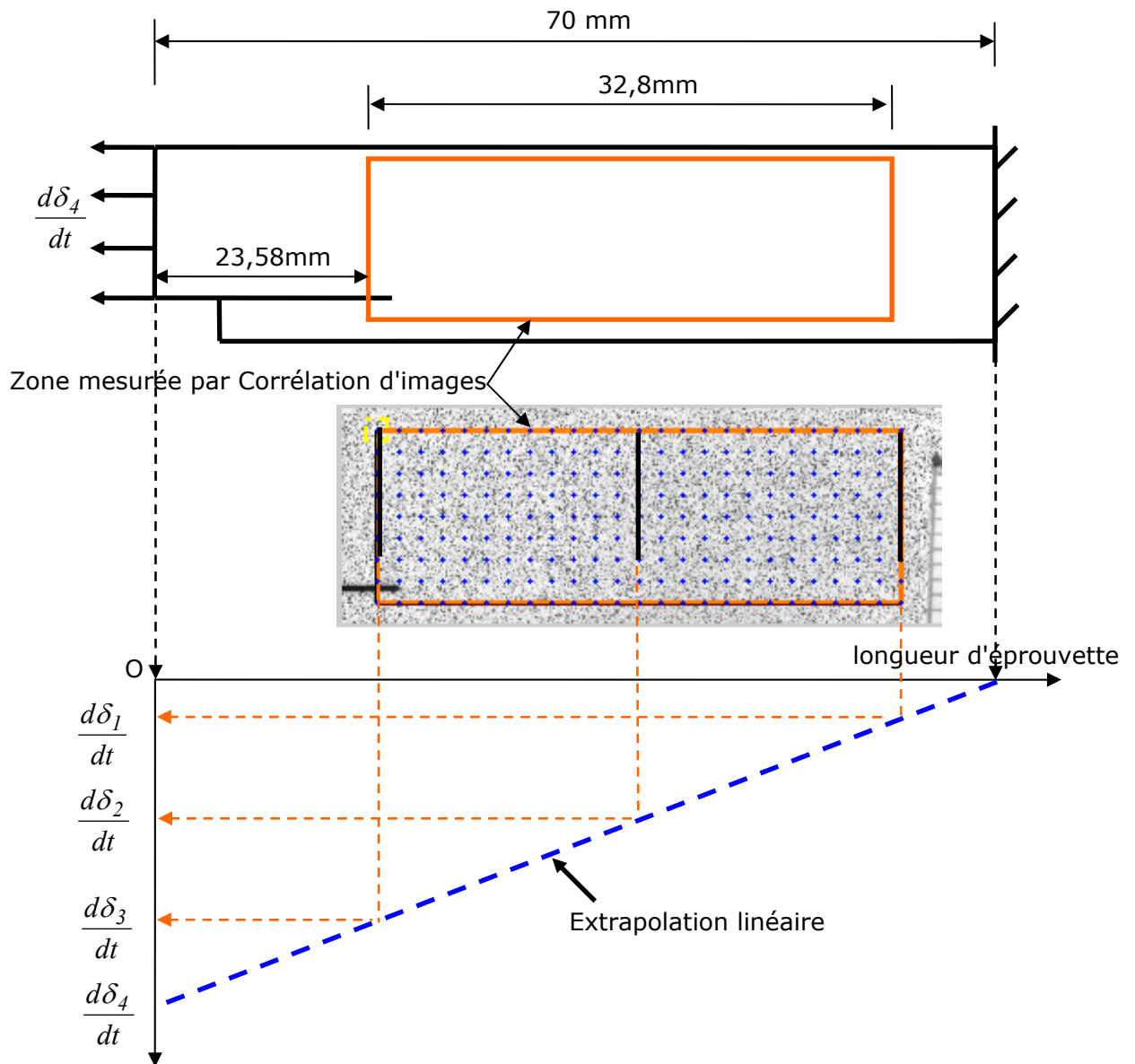


Figure IV.28: déplacement Extrapolation de l'essai 1m/s

Par cette méthode d'extrapolation, la vitesse moyenne de déplacement horizontal de chaque section est calculée par la mesure par corrélation d'image. Les vitesses calculées de 3 sections : $\frac{d\delta_1}{dt}$, $\frac{d\delta_2}{dt}$, $\frac{d\delta_3}{dt}$ sont ensuite utilisées pour enfin déterminer par extrapolation la vitesse de chargement $\frac{d\delta_4}{dt}$.

La figure IV.29 montre l'évolution des vitesses identifiées par extrapolation en fonction du temps pendant les essais de la campagne. Ces vitesses de chargement sont calculées en position du mors inférieur de l'essai.

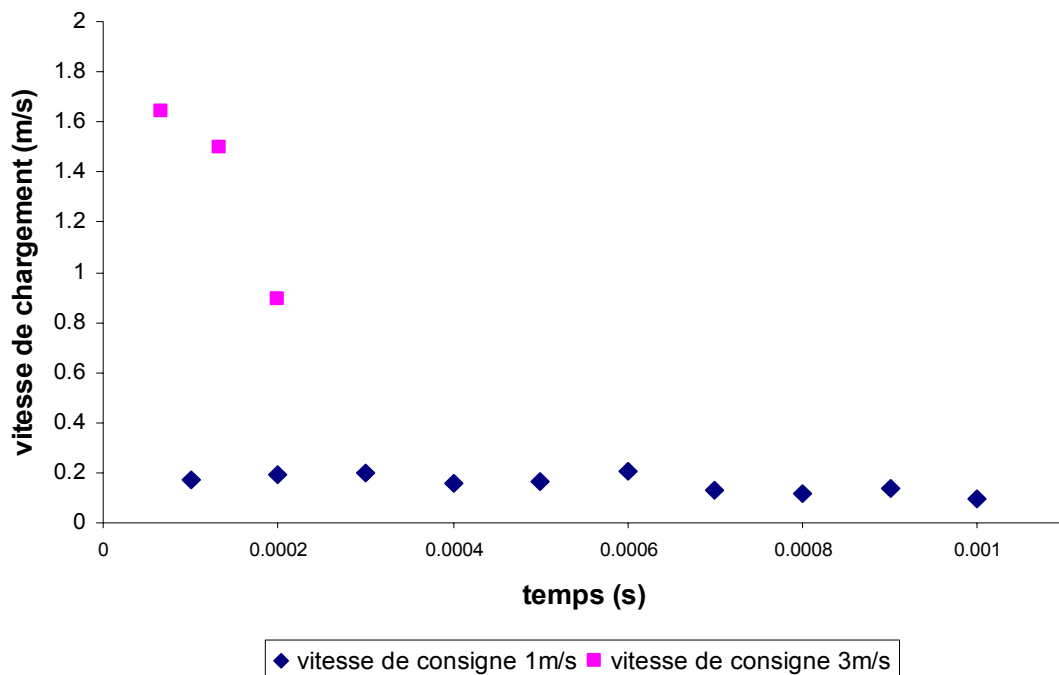


Figure IV.29: Vitesses identifiées de chargement

IV.3.6.2. Résultat de l'approche globale appliquée au composite verre/époxy.

La mesure de la vitesse de sollicitation pendant l'essai utilisant la technique de corrélation d'images a été appliquée à la campagne d'essais du matériau composite verre/époxy. La connaissance de la vitesse de déplacement permet alors de calculer l'énergie cinétique de l'éprouvette pendant l'essai. Le taux de restitution d'énergie est ensuite déterminé en utilisant la méthode de calcul de l'approche globale.

Les résultats de calcul sont présentés à la figure IV.30. Le taux de restitution d'énergie des essais dynamiques γ est présenté en fonction de la vitesse de propagation de la fissure. La vitesse de fissuration maximale mesurée est égale à 110m/s. Cette vitesse maximale est bien inférieure à celle obtenue pour le matériau composite carbone/époxy.

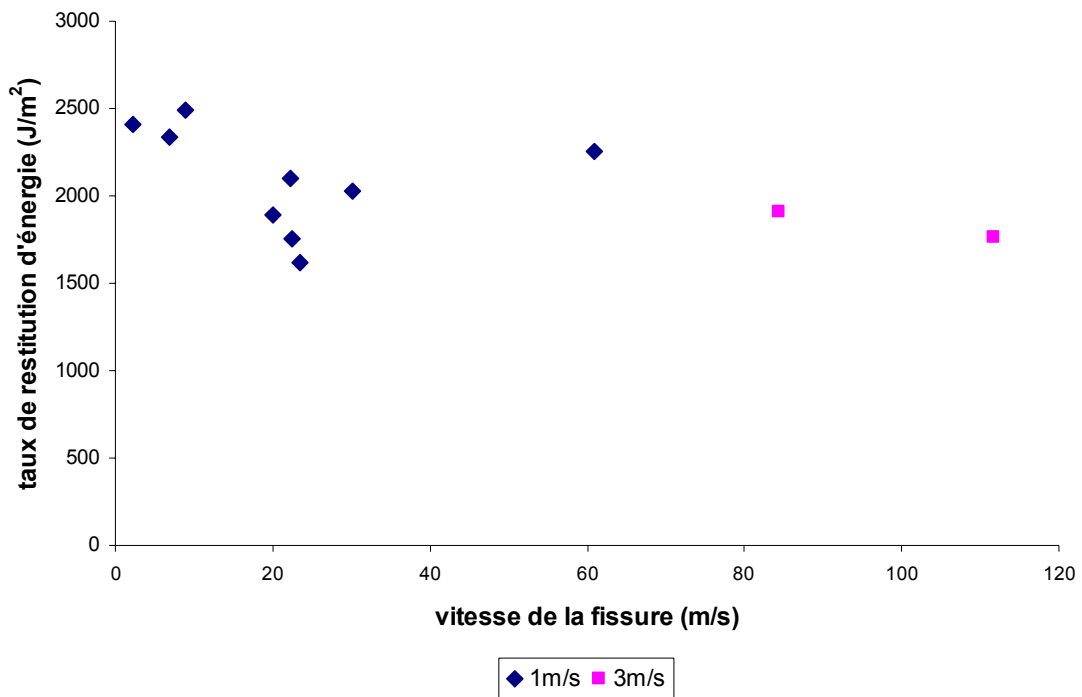


Figure IV.30: Taux de restitution d'énergie de la campagne d'essais du matériau verre/époxy

Les résultats présentés à la figure IV.30 ont aussi montré une tendance stable du taux de restitution d'énergie dans la gamme de vitesse de propagation atteinte. Dans cette gamme, le taux de restitution d'énergie se stabilise autour d'une valeur moyenne proche de 2000 J/m². Les résultats présentés à cette figure correspondent à deux vitesses de sollicitation différentes: 1m/s et 3m/s. On retrouve ici le fait qu'une vitesse de sollicitation plus importante conduit à une augmentation de la vitesse de propagation de la fissure.

Selon l'approche globale, le taux de restitution d'énergie des essais du matériau composite verre/époxy est géré par 3 paramètres différents: les caractéristiques physiques du matériau utilisé, la vitesse de sollicitation, le changement de géométrie de la structure pendant l'essai causé par la propagation de la fissure.

La figure IV.31 présente le pourcentage du terme cinétique du taux de restitution d'énergie par rapport à la valeur totale de ce dernier. Malgré une vitesse de fissuration maximale limitée, on observe quand même une participation de l'effet d'inertie au taux de restitution d'énergie qui produit une très légère augmentation avec la vitesse de sollicitation. La vitesse de sollicitation influence le pourcentage de l'effet d'inertie par rapport au taux de restitution d'énergie. Plus la vitesse de sollicitation augmente, plus l'effet d'inertie participe au taux de restitution d'énergie.

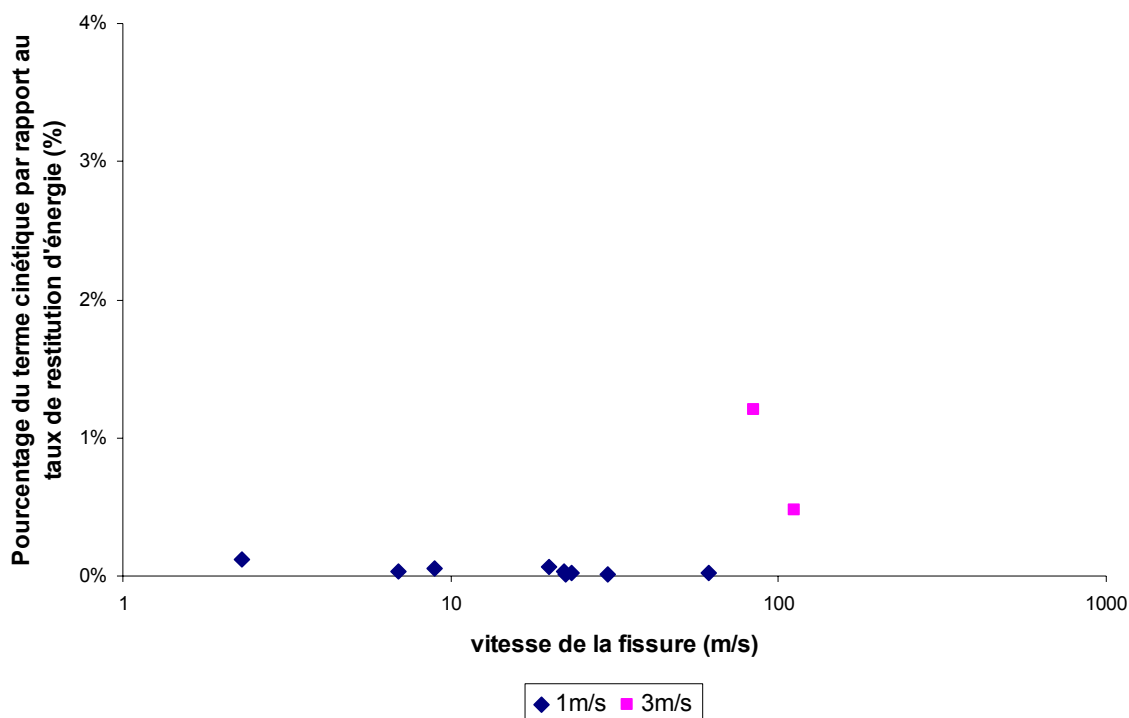


Figure IV.31: Effet cinétique par rapport au taux de restitution d'énergie

IV.3.7. Conclusion partielle concernant l'approche globale

L'approche globale présentée a permis de déterminer le taux de restitution d'énergie pendant les essais réalisés lors de deux campagnes d'essais. Selon cette approche, le taux de restitution d'énergie est influencé par 3 paramètres différents : les caractéristiques physiques du matériau utilisé, la vitesse de sollicitation, le changement de géométrie de la structure pendant l'essai causé par la propagation de la fissure.

Les résultats obtenus par l'approche globale permettent de conclure sur une tendance d'évolution du taux de restitution d'énergie en fonction de la vitesse de fissuration qui se décompose en 2 étapes générales : à faible vitesse, un plateau puis à partir d'un certain seuil, une augmentation. Etant donné que la vitesse de la fissure maximale que l'on a pu mesurer est de l'ordre de 1000m/s pour les essais sur matériau composite carbone/époxy et de 110m/s pour les essais du matériau composite verre/époxy, cette tendance d'évolution est validée au moins pour le composite carbone/époxy.

La partie qui suit a pour l'objectif de vérifier l'approche globale par des calculs par éléments finis. Pendant ces calculs par éléments finis, le comportement de la zone locale qui se trouve autour de la tête de la fissure sera modélisé en utilisant les conditions aux limites mesurées pendant les essais réalisés. A partir du champ de déplacement modélisé de cette zone, le taux de restitution d'énergie sera calculé utilisant la méthode d'intégrale de contour. A cause de la largeur d'éprouvette, la vérification est appliquée uniquement aux essais sur matériau composite verre/époxy.

IV.4. Taux de restitution d'énergie: Approche locale

La méthode d'identification de la longueur réelle de la fissure présentée au chapitre III, nous a conduits à utiliser les conditions aux limites mesurées par corrélation d'images comme données d'entrée pour la modélisation par éléments finis. Ce principe a montré son efficacité à travers une bonne corrélation entre la mesure et le calcul. Dans cette partie du travail, nous proposons d'utiliser à nouveau ce principe pour calculer le taux de restitution d'énergie en utilisant la méthode des intégrales de contour à partir des champs locaux obtenus par la modélisation.

IV.4.1. Principe de base

La technique de mesure de champs nous permet de mesurer les champs de déplacement de la zone au voisinage de la tête de fissure. Les déplacements situés aux bords de cette zone seront à nouveau utilisés comme conditions aux limites de la modélisation par éléments finis. Cette dernière restitue le comportement de la zone utilisant les mêmes caractéristiques physiques du matériau composite. Pour ces modélisations, la longueur réelle de la fissure déterminée au chapitre III sera utilisée comme une donnée du maillage. Par conséquent, pour chaque essai, on réalise plusieurs fois cette modélisation et chacune d'elle correspond à une des longueurs de fissure identifiées. Cette série de modélisations par éléments finis nous permet alors de reconstruire pas à pas l'évolution des champs de déplacements de la zone entourant la tête de fissure.

Ces champs étant connus, la méthode des intégrales de contour est alors utilisée pour évaluer le taux de restitution d'énergie correspondant à la longueur de la fissure identifiée. Le calcul du taux de restitution d'énergie de cette méthode est fondé sur le déplacement et la contrainte aux nœuds pour calculer l'intégrale du contour considéré entourant la fissure.

Dans le cadre de ce chapitre, on présente une illustration complète de la méthode de calcul du taux de restitution d'énergie pour un essai effectué à 1m/s sur le matériau composite unidirectionnel verre/époxy. L'évolution du taux de restitution d'énergie pendant l'essai à la vitesse de sollicitation de 1m/s sera donc établie. Il faut noter que, dans cette méthode, le fait d'utiliser des conditions aux limites locales, l'effet cinétique de l'essai est pris en compte de manière implicite.

IV.4.2. Mise en œuvre

Grace à la méthode d'identification de la longueur réelle de la fissure présentée au chapitre III, on identifie la longueur de la fissure correspond à chaque image récupérée pendant l'essai. La figure IV.32 et le tableau IV.2 présentent l'évolution de la longueur de

la fissure mesurée pendant l'essai à 1m/s en fonction du temps. L'image numéro 40 correspond au moment où la propagation de la fissure commence.

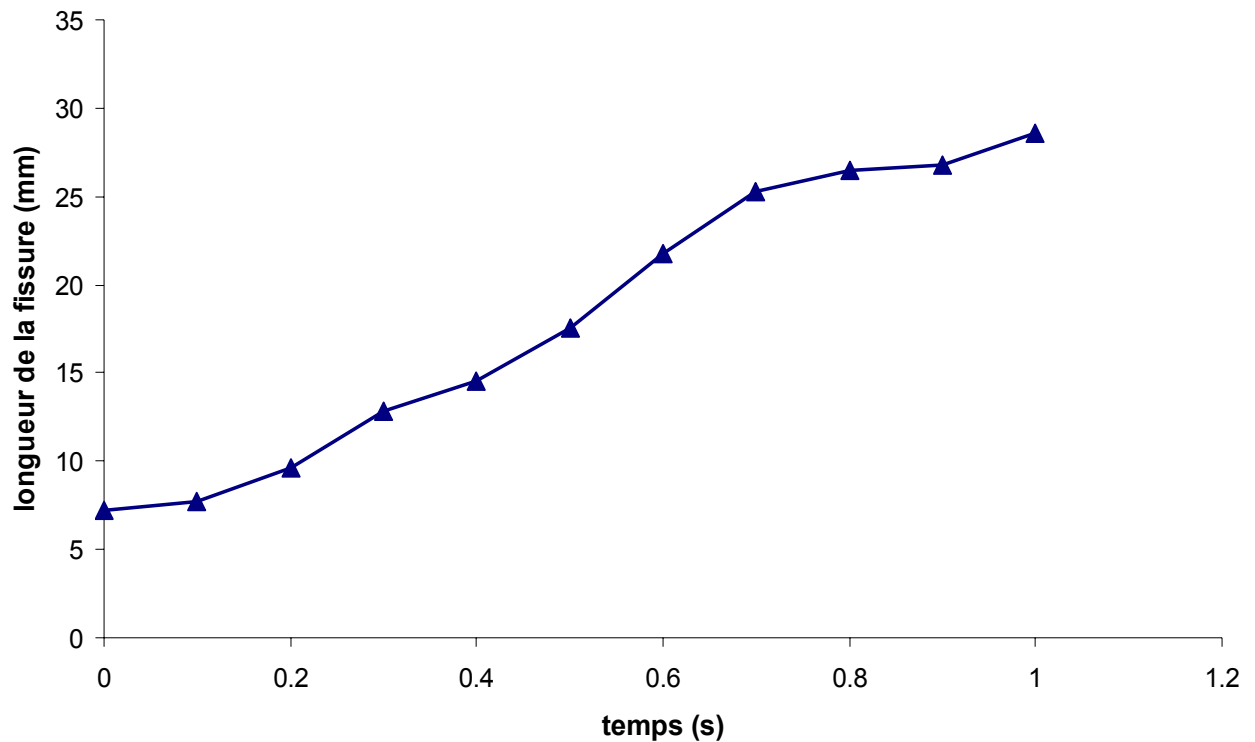


Figure IV.32: Variation de longueur de la fissure pendant un essai effectué à 1m/s

Temps (ms)	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
image	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
Longueur de la fissure (mm)	7,18	7,74	9,67	12,79	14,56	17,51	21,8	25,3	26,5	26,82	28,61

Tableau IV.2: Longueur de fissure identifiée à chaque image

Correspondant à chaque valeur de la longueur identifiée de la fissure, les champs de déplacements de la zone autour de la pointe de fissure sont déterminés par la technique de mesure de champs par corrélation d'images. La figure IV.33 présente une série des champs locaux mesurés de l'image numéro 40 jusqu'à l'image numéro 50.

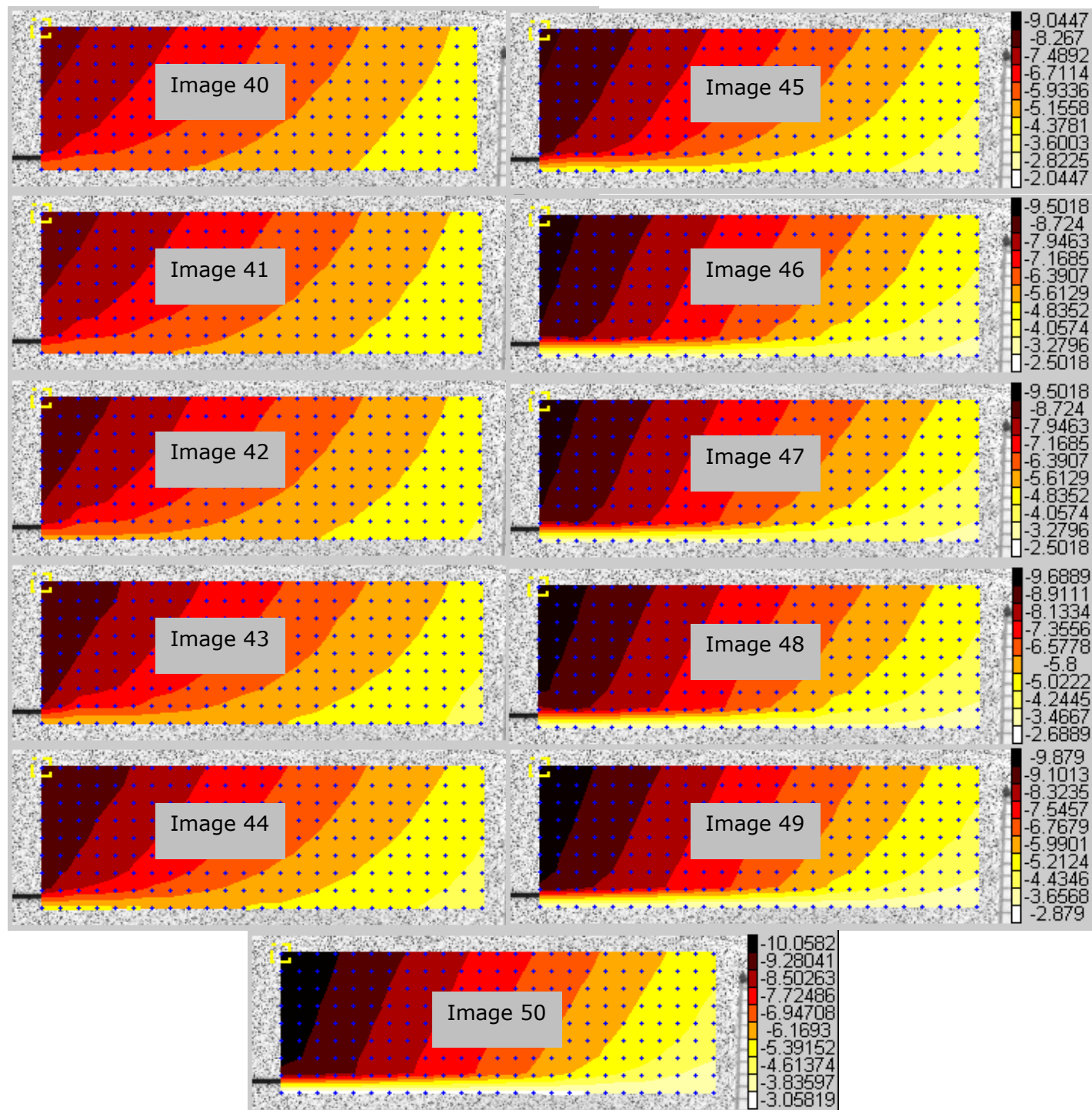


Figure IV.33: Evolution des champs de déplacements longitudinaux mesurés par Corrélation d'images pour un essai réalisé à 1m/s

La technique de mesure de champs donne accès aux déplacements des points aux bords de la région d'étude pour chaque image filmée pendant l'essai. Ces valeurs mesurées de déplacements seront utilisées ensuite comme des conditions aux limites des calculs par éléments finis. La zone mesurée par corrélation d'images est modélisée par éléments finis en utilisant la longueur réelle de la fissure de chaque image et les déplacements aux bords mesurés correspondants. Chaque valeur identifiée de la longueur réelle de la fissure correspond à une modélisation par éléments finis. Cette

modélisation donne accès aux champs de déplacements locaux dont on a vérifié au chapitre III qu'ils sont représentatifs des champs réels mesurés par corrélation d'images.

Autrement dit, par la modélisation par éléments finis, on a reconstruit numériquement l'évolution du champ de déplacements de la zone autour de la tête de la fissure pendant l'essai. La méthode des intégrales de contour est appliquée sur les champs modélisés de déplacements pour calculer le taux de restitution d'énergie. Le champ modélisé de contraintes est donc supposé être lui aussi représentatif de la réalité. Le résultat du calcul du taux de restitution d'énergie selon l'approche locale sera comparé avec celui de l'approche globale pour vérifier cette hypothèse. La comparaison sera présentée à la fin de cette partie.

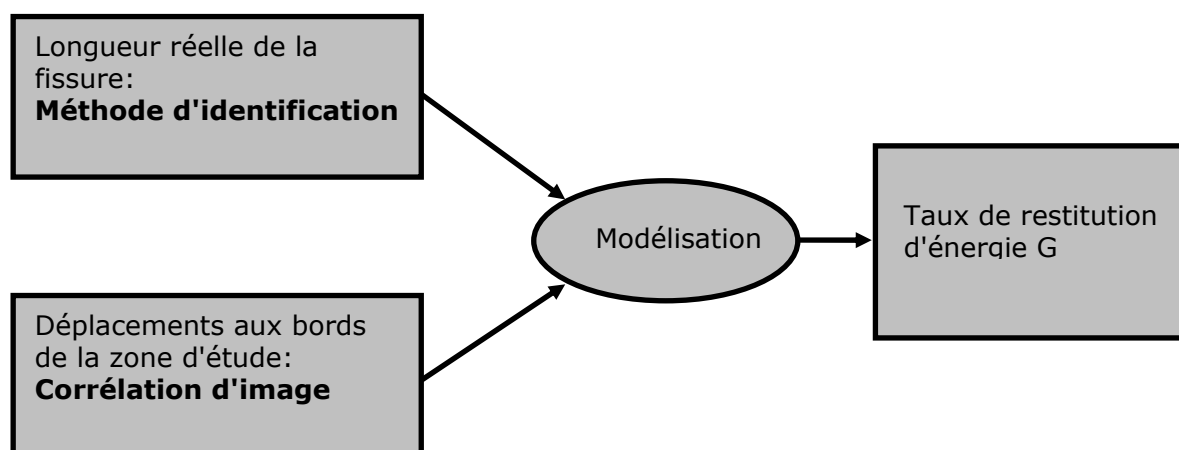


Figure IV.34: Principe de calcul du taux de restitution d'énergie

La figure IV.34 présente de manière synoptique le principe de la nouvelle méthode qui permet d'utiliser des intégrales de contour pour calculer le taux de restitution d'énergie de l'essai dynamique. Le maillage de la zone d'étude est créé de façon telle que la zone voisine de la tête de fissure soit maillée très finement. La taille des éléments est divisée par 10 par rapport aux éléments qui sont plus éloignées de la tête de fissure. Un carré comprenant 60x60 petits éléments est systématiquement créé autour de la tête de fissure.

Lorsque l'on utilise la méthode des intégrales de contour, la taille du maillage joue un rôle très important. Plus la taille des éléments est petite, plus la précision augmente. En revanche, plus la taille des éléments est petite, plus le volume de calcul augmente. Par conséquent, afin d'avoir une précision maximale, on a utilisé le maximum de la capacité de calcul pour pouvoir diminuer la taille des éléments autant que possible. Dans le cadre de ce travail, on a utilisé des petits éléments carrés de côté de longueur égale à 0,03mm. La taille des côtés des grands éléments triangulaires est de l'ordre de 1mm. La figure IV.35 présente le maillage de la zone étudiée en précisant la zone locale située autour de la tête de fissure.

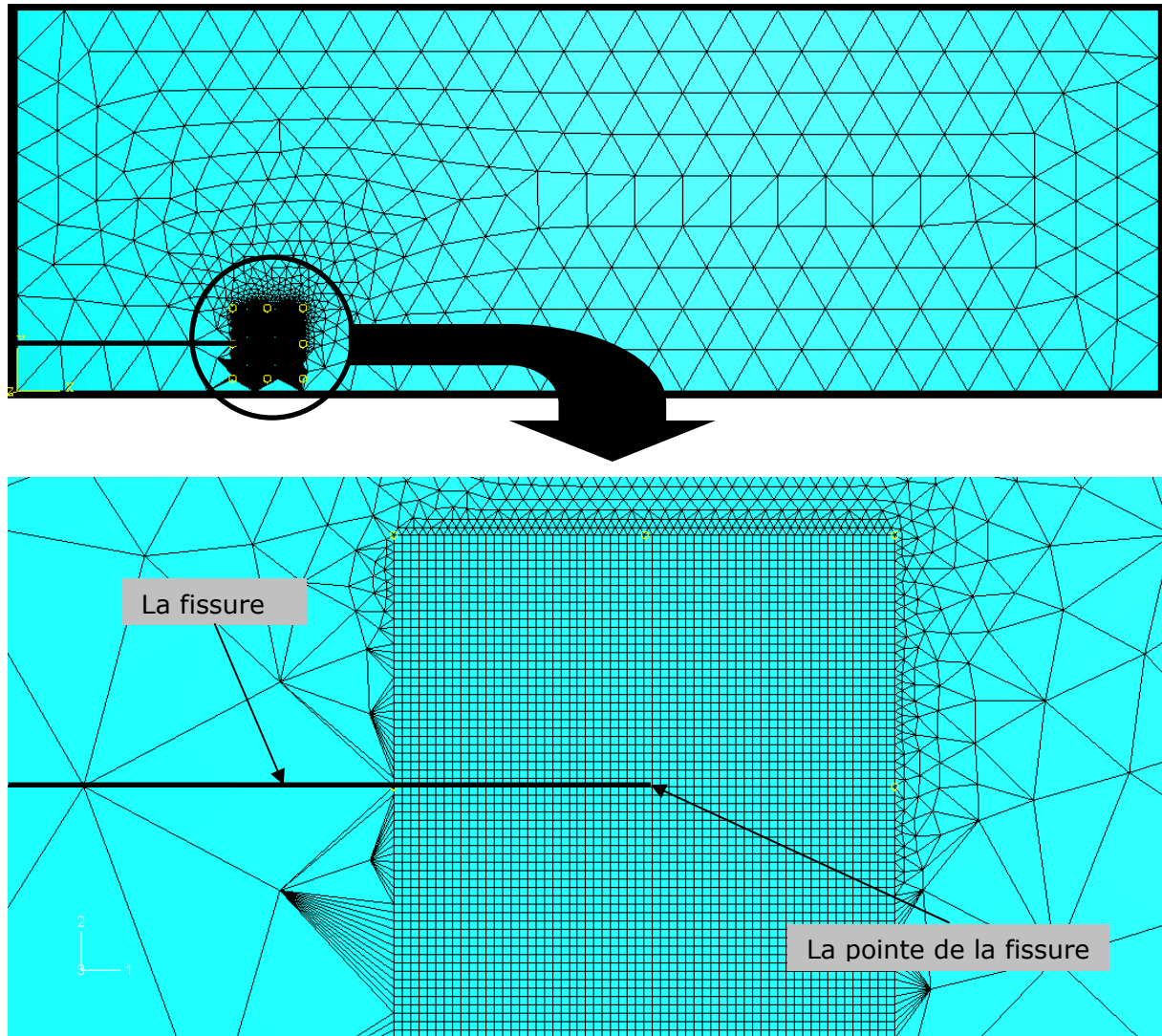


Figure IV.35: Maillage de la zone d'étude

Le logiciel de calculs par éléments finis ABAQUS version 6.5 permet d'étudier le problème de fissuration en quasi-statique des matériaux non-linéaires en utilisant la théorie de l'intégrale de contour J [ABAQUS Vol II]. Le principe de calcul se base sur les valeurs du champ des déplacements et du champ des contraintes calculées aux nœuds du maillage. La méthode de l'intégrale de contour relie les nœuds autour de la pointe de la fissure pour définir automatiquement les contours. Le calcul est réalisé grâce à la connaissance de l'état des contraintes et des déplacements de ces nœuds.

La méthode de l'intégrale J est spécifiquement utilisée dans notre cas pour caractériser l'énergie associée au développement de la fissure pendant l'essai. Pour une avance instantanée $\lambda(s)$ dans le plan de la fissure, le taux de restitution d'énergie sera calculé par la formule suivante:

$$\bar{J} = \int_A \lambda(s) n \cdot H \cdot q dA \quad \text{Eq IV-39}$$

où:

dA est un élément du contour complet A ,

n est la normale extérieure de dA ,

q est le vecteur unitaire indiquant la direction de la fissure.

H est exprimé par:

$$H = \left(WI - \sigma \cdot \frac{\partial u}{\partial x} \right) \quad \text{Eq IV-40}$$

où W est la matrice d'énergie des contraintes élastiques.

Un éventuel état initial des contraintes n'est pas pris en compte dans la définition de la méthode de l'intégrale de contour. C'est pourquoi cette méthode n'est pas efficace dans le cas où la zone est précontrainte. En conséquence, la méthode de l'intégrale J n'est applicable que pour les cas de chargement monotone.

Pour créer les contours, ABAQUS définit automatiquement les cercles des éléments qui entourent la tête de fissure. Le premier contour utilise les éléments qui sont directement connectés avec la tête de la fissure. Le deuxième contour partage ses nœuds avec ceux des éléments du premier contour. Suivant ce principe, les contours suivants seront créés.

Les éléments de type CPE8R (8 nœuds, déformation plane, intégration réduite) et CPE6M (6 nœuds, déformation plane, modifié) sont utilisés pour analyser des comportements linéaires ou complexes non-linéaires du matériau. Ils sont utilisés spécifiquement pour les analyses de la mécanique de la rupture. Notre calcul utilise les éléments de type CPE8R pour les grands éléments du maillage et les éléments de type CPE6M pour la zone proche de la tête de fissure (petits éléments). La modélisation par éléments finis de la zone d'étude reprend les caractéristiques physiques du matériau composite verre/époxy qui sont présentées au chapitre II.

IV.4.3. Résultats et discussion

La figure IV.36 introduit les résultats de calcul de l'approche locale appliquée aux essais réalisés sur le matériau composite verre/époxy. Sur cette figure, le taux de restitution d'énergie calculé est présenté en fonction de la vitesse de propagation de la fissure mesurée pendant l'essai.

Ces résultats montrent que le taux de restitution d'énergie se trouve compris dans une marge de 1200 J/m² à 4200 J/m². L'approche locale présente aussi des valeurs proches de celles obtenues par l'approche globale sur le même essai (de 1500J/m² à 2500J/m² par l'approche globale). Pourtant, les valeurs du taux de restitution d'énergie calculées par l'approche locale apparaissent plus dispersées autour de la valeur moyenne obtenue par l'approche globale.

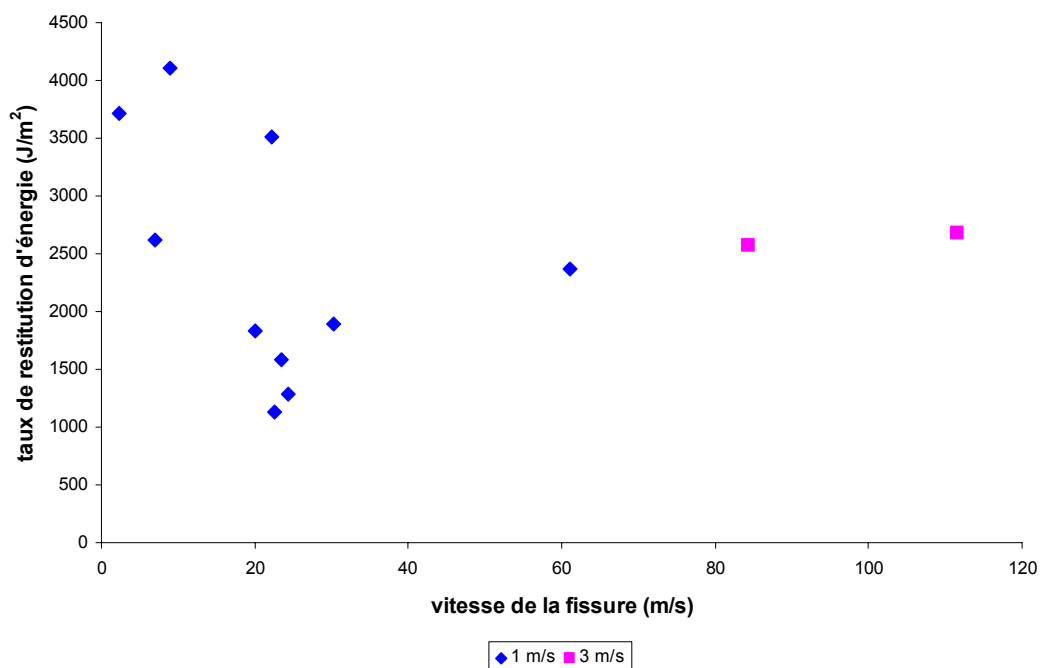


Figure IV.36: Taux de restitution d'énergie de l'essai 1m/s et de l'essai 3m/s calculés par l'approche locale

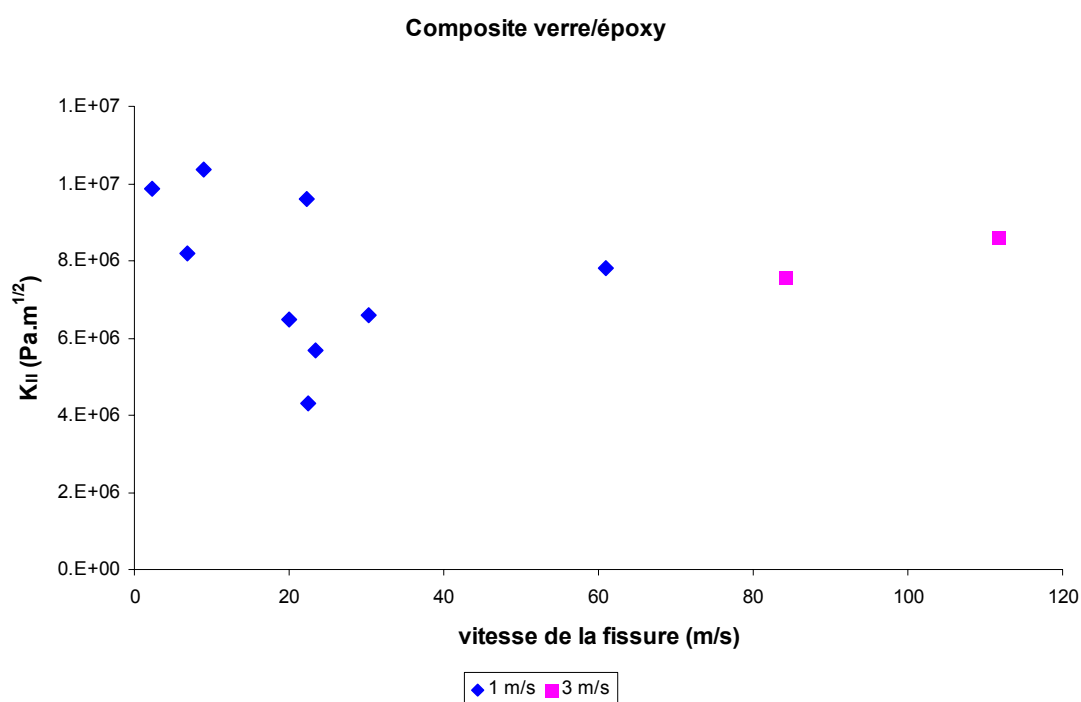


Figure IV.37: Facteur d'intensité K_{II} de l'essai 1m/s et de l'essai 3m/s calculés par l'approche locale

L'approche locale permet aussi de calculer le facteur d'intensité à partir du champ de contraintes dans la zone d'étude. Rappelons ici que l'approche locale a supposé qu'en reprenant les conditions aux limites mesurées autour de la zone au voisinage de la fissure, la modélisation par éléments finis donne accès à un champs de contraintes cohérent avec la réalité de l'essai. La figure IV.37 présente l'évolution du facteur d'intensité de contraintes de l'essai.

La figure IV.38 superpose les résultats de calcul du taux de restitution d'énergie selon deux approches sur un même graphe. Les résultats de cette figure ont montré que les valeurs de l'approche locale sont réparties autour de l'approche globale. Pour quelques vitesses de la fissure les valeurs de calcul de deux méthodes sont très rapprochées.

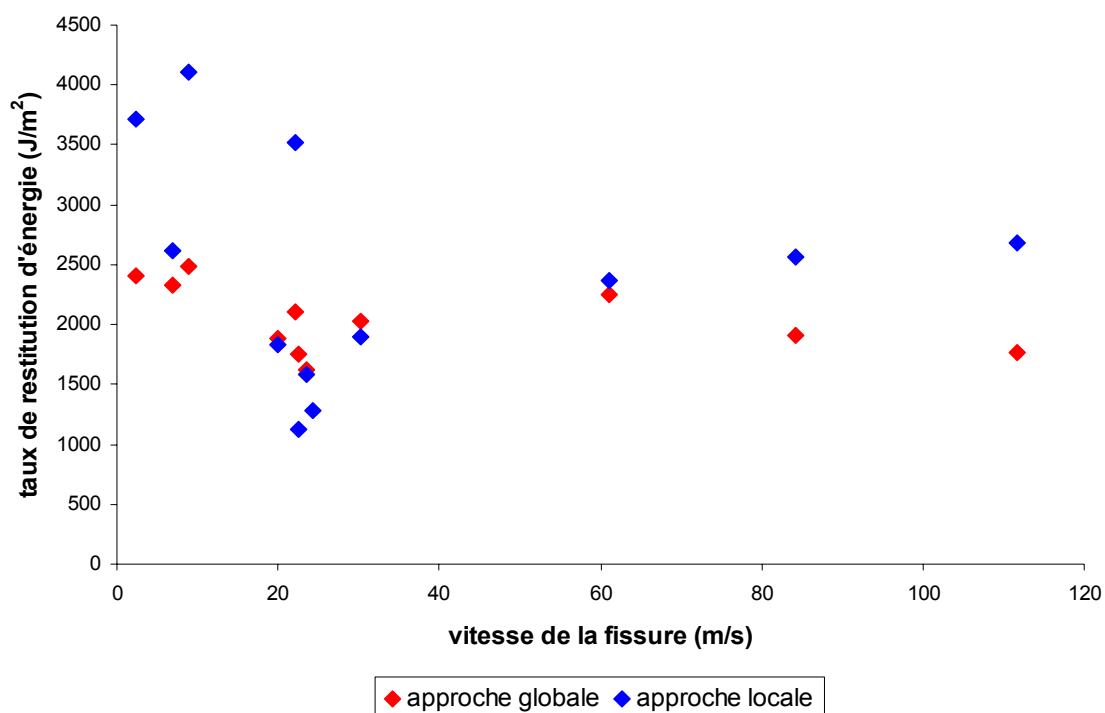


Figure IV.38: Comparaison entre l'approche locale et l'approche globale

Le tableau IV.3 présente le pourcentage de la différence entre les résultats de calcul de deux approches.

Vitesse de la fissure (m/s)	2,3	6,9	8,9	20	22,2	22,5	23,5	30,2	61	84,3	111,7
G_{II} (J/m ²) locale	3711	2616	4106	1832	3514	1126	1583	1896	2370	2567	2679
G_{II} (J/m ²) globale	2407	2333	2491	1890	2104	1751	1619	2031	2255	1912	1760
% par rapport à l'approche globale (%)	54,15	12,15	64,8	3,07	67,03	35,71	2,23	6,66	5,08	34,27	52,22

Tableau IV.3: Comparaison de deux approches

Les résultats présentés à la figure IV.38 et au tableau IV.3 permettent de conforter les résultats de l'approche globale qui donne la même tendance que l'approche locale mais qui semble générer moins de sources de dispersion. Les résultats de l'approche locale se varient autour de ceux de l'approche globale. A partir de ce résultat, on peut conclure que le calcul de l'approche globale est conforté par les résultats de l'approche locale. En notant le gros travail de l'approche locale pour déterminer le taux de restitution d'énergie des essais, l'approche globale est une solution efficace.

De plus, la cohérence entre les résultats de l'approche globale et de l'approche locale permet de vérifier l'hypothèse de représentativité des champs de contrainte utilisés par l'approche locale. Selon cette hypothèse, en reprenant les conditions aux limites

mesurées de la zone au voisinage de la fissure (les déplacements aux bords de la zone et la longueur identifiée de la fissure), la modélisation par éléments finis donne accès à champ de contraintes cohérent avec la réalité de l'essai.

Après avoir vérifié l'approche globale par le calcul par éléments finis, on continue l'étude du phénomène de délaminage dynamique en se basant sur les résultats calculés selon l'approche globale. L'objectif de la partie suivante est de comprendre l'évolution du taux de restitution d'énergie en fonction de la vitesse de la fissure.

IV.5. Loi d'évolution

La partie précédente a étudié le phénomène de fissuration en dynamique selon deux approches différentes: globale et locale. Les résultats trouvés ont montré une bonne cohérence entre ces deux approches. Afin de valoriser ces résultats, on se propose de rechercher une loi théorique capable de bien représenter le phénomène physique. Cette loi devra exprimer la relation entre la vitesse de fissuration et le taux de restitution d'énergie en prenant en compte 3 paramètres caractéristiques : le matériau utilisé, le changement de géométrie de la structure pendant l'essai (lié à la propagation de la fissure), et la vitesse de sollicitation. C'est l'objectif de cette partie.

De plus, par les observations des résultats calculés par les deux approches, on a constaté que dans la gamme des vitesses de propagation générée lors de nos essais (jusqu'à 1000m/s), l'évolution du taux de restitution d'énergie est caractérisée par 2 phases: une première durant laquelle le taux de restitution d'énergie reste stable et une seconde durant laquelle il augmente. Le passage d'une phase à l'autre caractérise un seuil de vitesse caractéristique du matériau.

IV.5.1. La loi de YANG

A. Généralité

Yang et al. [YANG 1991] ont présenté une loi d'évolution qui permet d'établir une relation entre les 3 paramètres principaux de la fissuration dynamique : le taux de restitution d'énergie G , la vitesse de propagation de fissure v et des facteurs d'intensité de contraintes K_I et K_{II} . De plus, cette méthode est dédiée aux matériaux homogènes orthotropes.

Cette loi théorique représente le phénomène de propagation de la fissure en dynamique à l'interface entre 2 substrats anisotropes. La vitesse de la fissure est considéré non-uniforme et le comportement de la zone voisine de la pointe de fissure est constitué par plusieurs états réguliers instantanés de la singularité en deux dimensions. Cette hypothèse permet d'appliquer la formulation de Stroh [STROH 1962] qui résout la question de l'état régulier instantané de la zone locale autour de la tête de fissure. La vitesse de Rayleigh est la vitesse de l'onde surfacique du matériau utilisé. Lorsque la vitesse de la fissure est inférieure à la vitesse de Rayleigh, l'interface de la fissure possède un facteur énergétique défini et les champs singuliers connus pour les matériaux isotropes sont alors applicables pour le cas des matériaux orthotropes.

Le facteur d'intensité de contraintes dynamique du matériau anisotrope sera ensuite identifié en utilisant quelques configurations de base de l'état stable comme ceux indiqués par les solutions données par Yoffe [YOFFE 1951], Gol'dshtein [GOL'DSHTEIN 1966].

B. Etat régulier de la singularité en deux dimensions

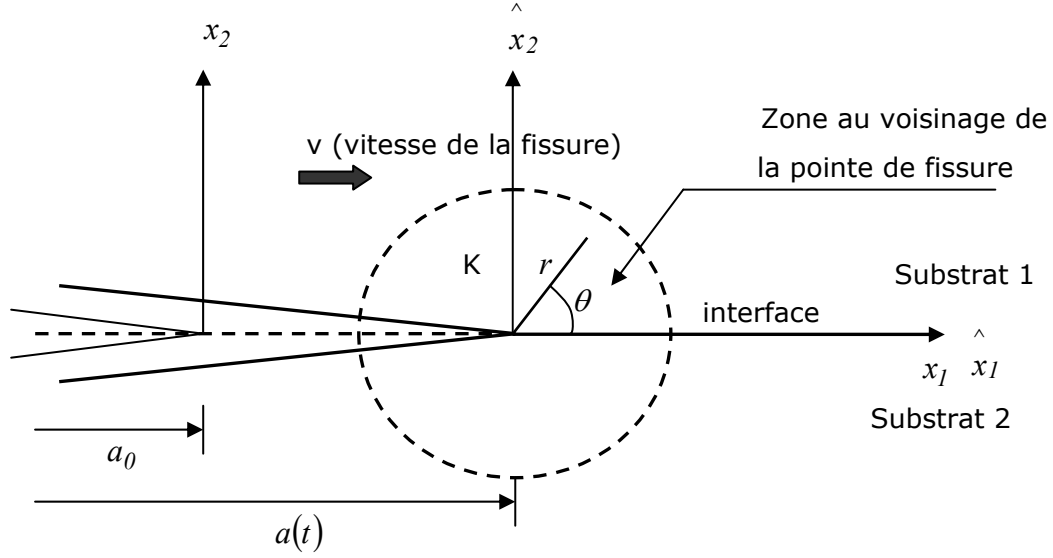


Figure IV.39: Propagation dynamique de la fissure à l'interface bi-matériaux sous chargement en mixte mode

L'équation de Navier gouverne les déplacements u_1, u_2, u_3 à travers l'équation suivante :

$$\frac{C_{ijkl} \partial^2 u_k}{\partial x_l \partial x_i} = \rho \ddot{u}_j \quad \text{Eq IV-41}$$

C_{ijkl} est le tenseur de Hooke du matériau

ρ est la masse volumique du matériau

Supposons que la fissure se déplace à une vitesse $v = \frac{da}{dt}$ et supposons que cette

vitesse soit inférieure à la vitesse de Rayleigh. Les coordonnées $\hat{x}_i$ des points qui se déplacent avec la pointe de fissure répondent aux équations suivantes :

$$\hat{x}_1 = x_1 - a(t), \quad \hat{x}_2 = x_2, \quad \hat{x}_3 = x_3$$

Pour les champs de singularité au voisinage de la pointe de fissure, les dérivations partielles dans les nouvelles coordonnées: $\partial u_k / \partial \hat{x}_3$ et $\partial u_k / \partial t$ sont beaucoup plus petites que $\partial u_k / \partial \hat{x}_1$ et $\partial u_k / \partial \hat{x}_2$. En conséquence, le terme qui caractérise l'accélération de la fissure devient:

$$\ddot{u}_j = v^2 u_{j,11} \quad \text{Eq IV-42}$$

$$\text{avec } \left(\right)_{,\alpha} = \frac{\partial \left(\right)}{\partial x_\alpha}$$

L'équation de Navier (Eq IV-41) se réduit alors à :

$$\hat{C}_{\alpha j k \beta} u_{k,\alpha\beta} = 0 \quad \text{Eq IV-43}$$

avec $\alpha, \beta = 1, 2$ et:

$$\hat{C}_{\alpha j k \beta} = C_{\alpha j k \beta} - \rho v^2 \delta_{jk} \delta_{1\alpha} \delta_{1\beta} \quad \text{Eq IV-44}$$

C. Formulation de Stroh

L'équation différentielle partielle Eq IV-41 peut être résolue par l'utilisation d'une variable proposé par Stroh [STROH 1962], la fonction de contraintes Φ_i définie par:

$$\sigma_{li} = -\Phi_{i,2} + \rho v^2 u_{i,1}, \quad \sigma_{2i} = \Phi_{i,1} \quad \text{Eq IV-45}$$

Les relations entre les déplacements et la fonction de contraintes sont données par :

$$u_i = 2 \operatorname{Re} \left\{ \sum_{q=1}^3 A_{iq} f_q(z_q) \right\} \quad \Phi_i = 2 \operatorname{Re} \left\{ \sum_{q=1}^3 L_{iq} f_q(z_q) \right\} \quad \text{Eq IV-46}$$

où $f_q(z_q)$ sont 3 fonctions analytiques et $z_q = \hat{x}_1 + p_q \hat{x}_2$

L'équation Eq IV-43 devient alors :

$$\sum_{q=1}^3 \left\{ \hat{C}_{lik1} + p_q \left(\hat{C}_{lik2} + \hat{C}_{2ik1} \right) + p_q^2 \hat{C}_{2ik2} \right\} A_{kq} = 0 \quad \text{Eq IV-47}$$

Les valeurs propres p_q sont les racines de l'équation polynomiale suivante :

$$\det \left\{ \hat{C}_{lik1} + p_q \left(\hat{C}_{lik2} + \hat{C}_{2ik1} \right) + p_q^2 \hat{C}_{2ik2} \right\} = 0 \quad \text{Eq IV-48}$$

La combinaison des équations IV-45 et IV-46 conduit à :

$$L_{iq} = \sum_{j=1}^3 \left\{ \hat{C}_{2ij1} + p_q \hat{C}_{2ij2} \right\} A_{jq} = - \sum_{j=1}^3 \left\{ p_q^{-1} \hat{C}_{lij1} + \hat{C}_{lij2} \right\} A_{jq} \quad \text{Eq IV-49}$$

et:

$$\sigma_{2i} = 2 \operatorname{Re} \sum_{q=1}^3 L_{iq} f'_q(z_q) \quad \text{Eq IV-50}$$

Deux matrices sont définies par:

$$B = iAL^{-1}, \quad H = B^{(I)} + \overline{B^{(2)}}$$

$$\text{où } i = \sqrt{-1}$$

D. Matériau orthotrope

Nous nous intéressons au cas de déformation plane des matériaux orthotropes. Les constantes de rigidité du matériau orthotrope sont définies par :

$$\begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & 0 \\ C_{12} & C_{11} & 0 \\ 0 & 0 & C_{66} \end{pmatrix}$$

Le ratio de rigidité et le facteur de réduction de l'onde sont :

$$\rho_{\gamma\beta} = \frac{C_{\gamma\beta}}{C_{66}}, \quad \alpha_1 = \sqrt{1 - \frac{\rho v^2}{C_{11}}}, \quad \alpha_2 = \sqrt{1 - \frac{\rho v^2}{C_{66}}} \quad \text{Eq IV-51}$$

Les valeurs propres sont déterminées par un polynôme d'ordre 4:

$$p^4 + 2s\xi p^2 + \xi^2 = 0 \quad \text{Eq IV-52}$$

où:

$$\xi = \alpha_1 \alpha_2 \sqrt{\frac{\rho_{11}}{\rho_{22}}} \quad \text{et} \quad s = \frac{\alpha_2^2 + \rho_{11} \rho_{22} \alpha_1^2 - (1 + \rho_{12})^2}{2\sqrt{\rho_{11} \rho_{22}} \alpha_1 \alpha_2}$$

Les racines de l'équation Eq IV-51 sont:

$$p_1, p_2 = i \sqrt{\xi \left(\left[\frac{I}{2}(s+1) \right]^{\frac{1}{2}} \pm \left[\frac{I}{2}(s-1) \right]^{\frac{1}{2}} \right)} \quad \text{si } s \geq 1$$

et

$$p_1, p_2 = i \sqrt{\xi \left(\pm \left[\frac{I}{2}(1-s) \right]^{\frac{1}{2}} + i \left[\frac{I}{2}(1+s) \right]^{\frac{1}{2}} \right)} \quad \text{si } -1 < s < 1$$

Les matrices de conformité sont données par :

$$A = \begin{pmatrix} 1 & -\lambda_2^{-1} \\ -\lambda_1 & 1 \end{pmatrix}, \quad L = C_{66} \begin{pmatrix} p_1 - \lambda_1 & 1 - p_2/\lambda_2 \\ \rho_{12} - \rho_{22} p_1 \lambda_1 & -\frac{\rho_{12}}{\lambda_2} + \rho_{22} p_2 \end{pmatrix}$$

et:

$$B = \frac{1}{C_{66}H} \begin{pmatrix} p_{22} \alpha_2^2 [2(1+s)/\xi]^{\frac{1}{2}} & i(\rho_{22} - p_{12} \alpha_2^2 / \xi) \\ -i(\rho_{22} - p_{12} \alpha_2^2 / \xi) & p_{22} [2\xi(1+s)]^{\frac{1}{2}} \end{pmatrix}$$

$$H = \begin{pmatrix} H_{11} & iH_{12} \\ -iH_{12} & H_{22} \end{pmatrix}$$

avec: $\lambda_y = (\rho_{11} \alpha_1^2 + \rho_y^2) / (\rho_{12} + 1) \rho_y$, $y = 1, 2$

La vitesse de Rayleigh est la racine de l'équation suivante :

$$\rho_{22}(\rho_{22}\xi - 1 + \alpha_2^2) - \rho_{12}^2 \alpha_2^2 / \xi = 0 \quad \text{Eq IV-53}$$

E. Taux de restitution d'énergie

Le champ de contraintes autour de la pointe de fissure est donné en fonction du facteur d'intensité des contraintes par :

$$\sigma_{ij} = (2\pi r)^{-\frac{1}{2}} [K_I \sigma_{ij}^I(\theta) + K_{II} \sigma_{ij}^{II}(\theta) + K_{III} \sigma_{ij}^{III}(\theta)] \quad \text{Eq IV-54}$$

Selon Irwin [IRWIN 1960] Le taux de restitution d'énergie est défini par :

$$G = \frac{1}{4} k^T H k \quad \text{Eq IV-55}$$

où: $k = \{K_I, K_{II}, K_{III}\}$

donc :

$$G = \frac{1}{4} (H_{22} K_I^2 + H_{11} K_{II}^2 + H_{33} K_{III}^2) \quad \text{Eq IV-56}$$

La loi de YANG permet d'exprimer le taux de restitution d'énergie G en fonction du facteur d'intensité de contraintes K et des caractéristiques physiques du matériau orthotrope utilisé. Le facteur d'intensité de contraintes K est un paramètre qui est fonction de l'effort extérieur, du changement géométrique de la structure fissurée et du comportement du matériau. Par rapport à nos essais, le facteur d'intensité de contrainte est géré par le changement de la longueur de fissure pendant l'essai, la vitesse de sollicitation et le matériau.

La loi de YANG rassemble tous les paramètres nécessaires à la caractérisation du phénomène de fissuration dynamique. Cette loi est donc choisie en tant que modèle de validation des résultats montrés dans les parties précédentes.

IV.5.2. Application au cas d'étude

Pour le cas de notre étude, nous considérons que la fissuration est réalisée dans le plan sans aucune participation de la troisième direction (en deux dimensions et en état de déformation plane). Le taux de restitution d'énergie correspondant s'écrit donc :

$$G = \frac{I}{2} (H_{22} K_I^2 + H_{11} K_{II}^2) \quad \text{Eq IV-57}$$

où :

$$H_{11} = \frac{I}{C_{66} R} \rho_{22} \alpha_2^2 [2(I+s)/\xi]^{1/2}, \quad H_{22} = \frac{I}{C_{66} R} \rho_{22} [2\xi(I+s)]^{1/2}$$

$$\text{avec } R = \rho_{22} (\rho_{22} \xi - I + \alpha_2^2) - \rho_{12}^2 \alpha_2^2 / \xi$$

$$\rho_{11} = \frac{C_{11}}{C_{66}}, \quad \rho_{22} = \frac{C_{22}}{C_{66}}, \quad \rho_{12} = \frac{C_{12}}{C_{66}}$$

$$\alpha_1 = \sqrt{\left(1 - \frac{\rho v^2}{C_{11}}\right)}, \quad \alpha_2 = \sqrt{\left(1 - \frac{\rho v^2}{C_{66}}\right)}$$

$$\xi = \alpha_1 \alpha_2 \sqrt{\rho_{11} / \rho_{22}}$$

$$s = \frac{\alpha_2^2 + \rho_{11} \rho_{22} \alpha_1^2 - (I + \rho_{12})^2}{2\sqrt{\rho_{11} \rho_{22}} \alpha_1 \alpha_2}$$

V est la vitesse de propagation de fissure

$C_{11}, C_{22}, C_{12}, C_{66}$ sont les constantes de la matrice de rigidité du matériau composite.

$$C_{11} = \frac{I - \nu_{23} \nu_{32}}{E_2 E_3 \Delta}, \quad C_{22} = \frac{I - \nu_{13} \nu_{31}}{E_1 E_3 \Delta}, \quad C_{12} = \frac{\nu_{12} + \nu_{32} \nu_{13}}{E_1 E_3 \Delta}, \quad C_{66} = G_{12}$$

où:

$$\Delta = \frac{I - \nu_{12} \nu_{21} - \nu_{23} \nu_{32} - \nu_{31} \nu_{13} - 2\nu_{21} \nu_{32} \nu_{13}}{E_1 E_2 E_3}$$

$E_1, E_2, E_3, G_{12}, G_{23}, G_{13}, \nu_{12}, \nu_{23}, \nu_{13}$ sont les caractéristiques du matériau composite.

Étant donné que les essais réalisés ont utilisé le système de guidage qui permet de limiter la fissuration en mode I, on suppose que la propagation de la fissure pendant l'essai s'est passée strictement en mode II. Avec cette hypothèse, le modèle d'YANG devient :

$$G = \frac{1}{2} H_{II} K_{II}^2$$

Eq IV-58

L'équation IV-58 a montré une relation réciproque entre 3 paramètres: le taux de restitution d'énergie, le facteur d'intensité de contraintes et la vitesse de la fissure qui est caractérisée par le terme H_{II} . Cette relation permet d'identifier un de ces trois paramètres si on connaît les deux autres. Cela permet de calculer le facteur d'intensité de contraintes à partir des résultats de calcul selon les deux approches qui ont été présentées à la partie précédente. C'est le travail de la partie suivante.

IV.5.3. Facteur d'intensité de contraintes identifié par la loi d'YANG

L'approche locale permet de calculer le facteur d'intensité de contraintes à partir du champ de contraintes dans la zone d'étude. Rappelons ici que l'approche locale a supposé qu'en reprenant les conditions aux limites mesurées autour de la zone au voisinage de la fissure, la modélisation par éléments finis donne accès à un champ de contraintes cohérent avec la réalité de l'essai. La figure IV.40 présente l'évolution du facteur d'intensité de contraintes de l'essai. Les résultats du calcul permettent de suivre l'évolution du facteur d'intensité de contraintes en fonction de la vitesse de la fissure.

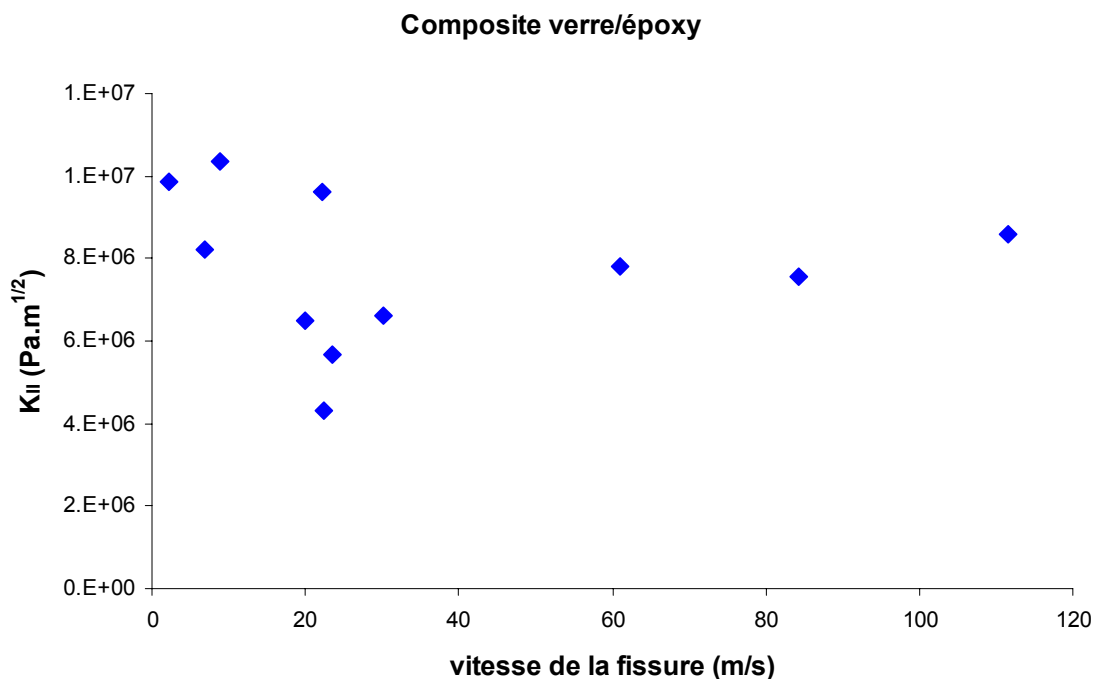


Figure IV.40: Facteur d'intensité K_{II} calculés par l'approche locale

Par ailleurs, en utilisant la loi de YANG, on peut identifier indirectement le facteur d'intensité à partir du taux de restitution calculé par les deux approches et de la vitesse de la fissure mesurée de l'essai. La figure IV.41 montre les résultats en comparant avec ceux de la figure IV.40.

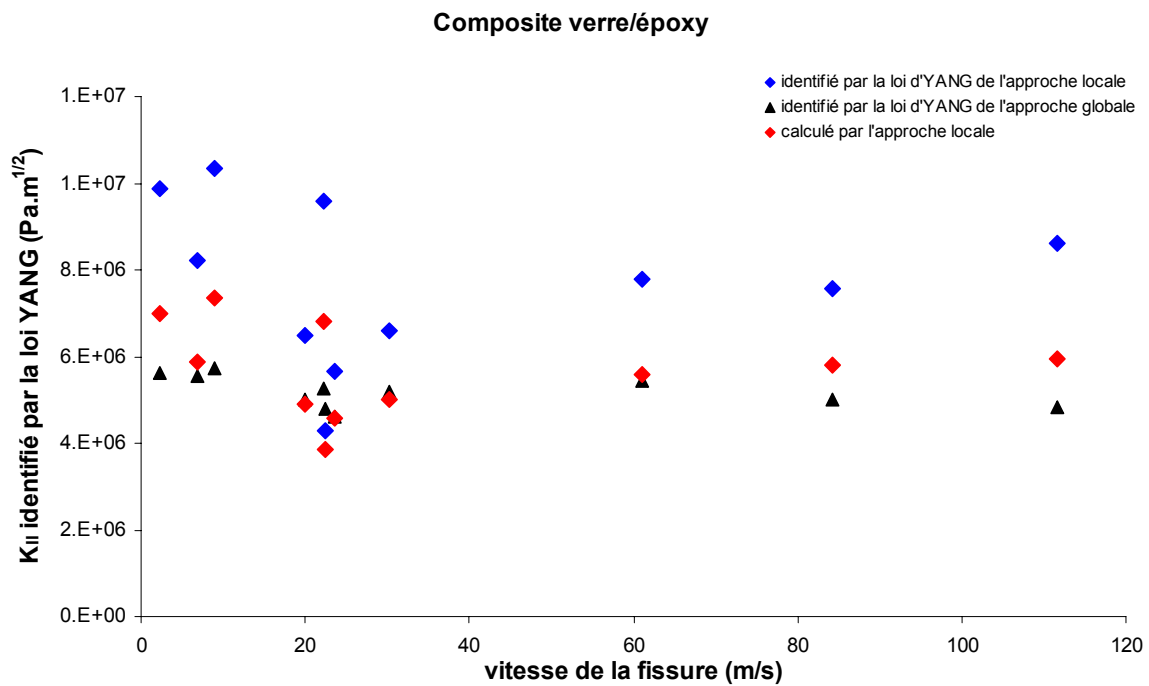


Figure IV.41: Facteur d'intensité de contraintes K_{II} du composites verre/époxy

Les deux tableaux suivants (IV.4 et IV.5) présentent le pourcentage de la différence entre les méthodes de calcul du facteur d'intensité de contraintes. La valeur moyenne de pourcentage est autour de 30%.

Vitesse de la fissure (m/s)	2,3	6,9	8,9	20	22,2	22,5	23,5	30,2	61	84,3	111,7
K_{II} ($MPa\sqrt{m}$) identifié par la loi de YANG de l'approche locale	7	5,87	7,36	4,92	6,81	3,85	4,57	5	5,59	5,81	5,94
K_{II} ($MPa\sqrt{m}$) calculé par l'approche locale	9,87	8,2	1,04	6,49	9,6	4,3	5,67	6,6	7,80	7,56	8,60
% (%)	29,11	28,36	28,97	24,25	29,06	10,28	19,37	24,28	28,30	23,11	30,95

Tableau IV.4: K_{II} calculé selon l'approche locale et identifié à partir de l'approche locale

Vitesse de la fissure (m/s)	2,3	6,9	8,9	20	22,2	22,5	23,5	30,2	61	84,3	111,7
K_{II} ($MPa\sqrt{m}$) identifié par la loi de YANG de l'approche globale	5,63	5,55	5,73	4,99	5,27	4,81	4,62	5,18	5,45	5,03	4,81
K_{II} ($MPa\sqrt{m}$) calculé par l'approche locale	9,87	8,20	1,04	6,49	9,6	4,3	5,67	6,60	7,80	7,56	8,6
% (%)	42,9	32,35	44,67	23,06	45,11	11,90	18,46	21,63	30,06	33,65	44,03

Tableau IV.5: K_{II} calculé selon l'approche locale et identifié à partir de l'approche locale

Les résultats de la figure IV.41 et des tableaux (IV.4 et IV.5) ont montré que l'évolution du facteur d'intensité de contraintes qui est calculé par l'approche locale est similaire par rapport à celui qui est identifiée par la loi d'YANG. Cela permet de conclure

qu'il existe une cohérence entre la loi de YANG et les résultats de calcul des deux approches.

Cette remarque nous a conduits à poser la question sur la capacité de représentation de la loi de YANG par rapport aux nos essais réalisés.

IV.5.4. La forme de la loi d'YANG au cas d'étude

En appliquant les caractéristiques mécaniques du matériau composite au modèle de Yang, on pourra présenter les résultats de ce dernier en fonction du facteur d'intensité de contraintes K_{II} . Les figures IV.42 et IV.43 en montrent les illustrations. L'unité du facteur d'intensité de contraintes K_{II} de ces deux figure est $Pa\sqrt{m}$. La figure IV.42 présente la forme typique de l'évolution du taux de restitution d'énergie en fonction de la vitesse de la fissure pour le matériau composite carbone/époxy, tandis que la figure IV.43 présente la forme typique de la courbe d'évolution du matériau verre/époxy.

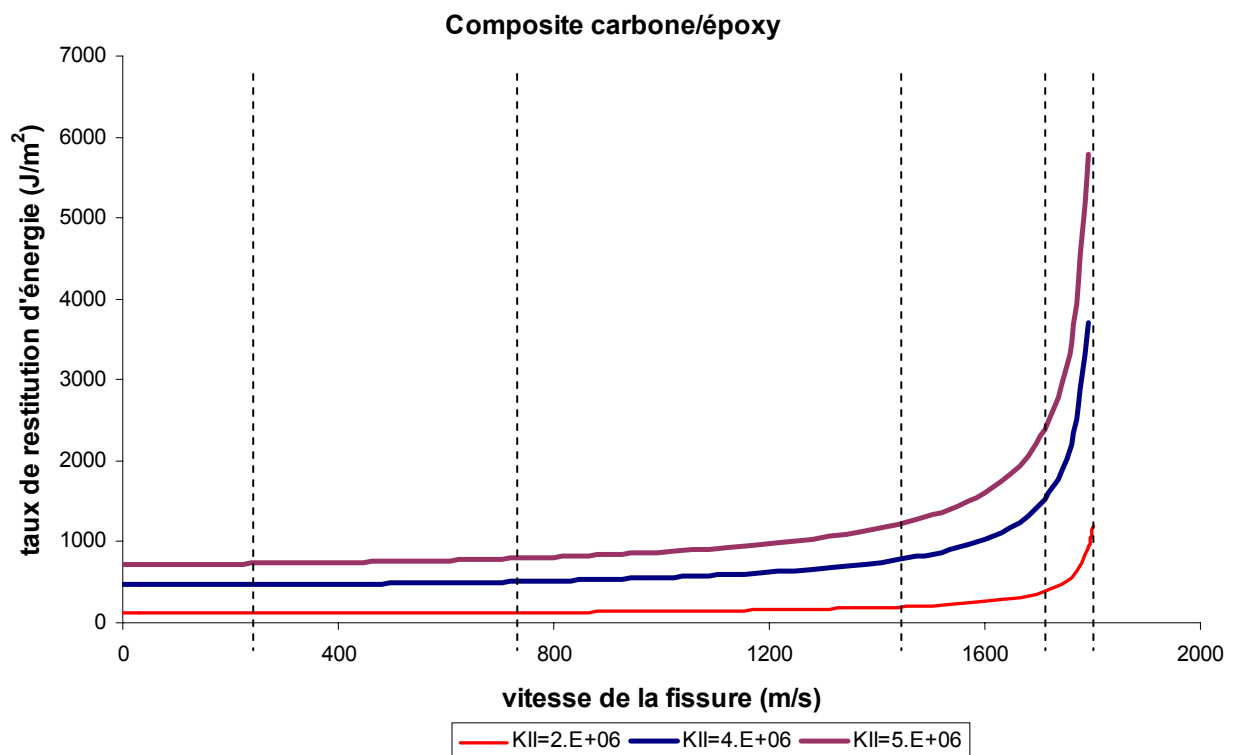


Figure IV.42: Modèle d'YANG pour composite carbone/époxy

La forme de l'évolution du taux de restitution d'énergie selon la loi de YANG dépend du matériau et du facteur d'intensité de contraintes K_{II} . La courbe de la figure IV.42 montre plusieurs étapes différentes de l'évolution du taux de restitution d'énergie en fonction de la vitesse de la fissure.

En effet, on peut distinguer 5 étapes différentes de l'évolution du taux de restitution d'énergie. La première étape correspond à une vitesse de la fissure variant de 0m/s à 250 m/s. Pendant cette étape, le taux de restitution d'énergie reste constant. On note

une augmentation très faible (1% par rapport à la valeur initiale). La deuxième étape se situe entre 250 m/s à 750m/s pour la vitesse de la fissure. Durant cette étape, le taux de restitution d'énergie augmente de 10%. La troisième étape correspond à une variation de la vitesse de la fissure qui varie de 750 m/s jusqu'à 1500m/s. Pendant cette étape le taux de restitution d'énergie augmente de 100%. La quatrième étape présente une variation de la vitesse de la fissure entre 1500m/s à 1700m/s. Le taux de restitution d'énergie augmente de 200%. Par la suite, le taux de restitution d'énergie augmente de façon exponentielle. Les bornes des valeurs de la vitesse de propagation décrites ici évoluent quand on fait varier la valeur de K_{II} , mais la tendance générale de l'évolution reste toujours du même type.

A 1800m/s, le taux de restitution d'énergie tend vers l'infinie. Cette valeur de la vitesse de la fissure est appelée la vitesse maximale de la fissure. Elle correspond à la vitesse que la fissure ne pourra jamais dépasser. Quelle que soit la valeur du facteur d'intensité de contraintes K_{II} , on trouve toujours la même valeur de la vitesse maximale. Cette vitesse critique représente le matériau étudié.

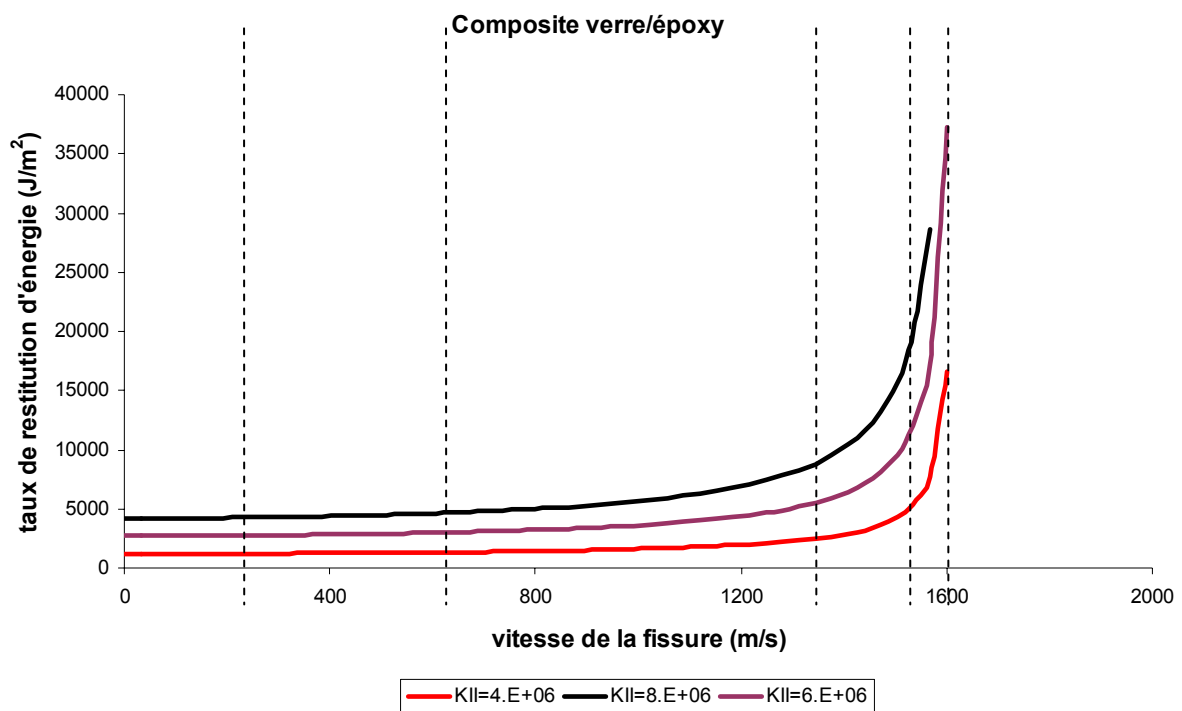


Figure IV.43: Modèle d'YANG pour composite verre/époxy

Les résultats montrés à la figure IV.43 présentent la même forme d'évolution par rapport à la figure IV.42. La vitesse maximale trouvée est toujours égale à 1600m/s. Le taux de restitution d'énergie augmente de 1%, 10%, 100%, 200% par rapport à sa valeur initiale respectivement entre les bornes de vitesse suivantes : 220 m/s, 640m/s, 1300m/s, 1500 m/s de la vitesse de la fissure.

La valeur maximale de la vitesse de la fissure est la limite pour laquelle le taux de restitution d'énergie tend vers l'infini. Cette valeur de la vitesse est influencée uniquement par les caractéristiques physiques du matériau utilisé. Chaque matériau possède une valeur critique unique de la vitesse de la fissure. Elle est égale à 1800m/s pour le matériau composite carbone/époxy et à 1600m/s pour le matériau composite verre/époxy. La valeur maximale de la vitesse de la fissure selon la loi de YANG représente la valeur critique que la pré-fissure ne pourra jamais dépasser dans le matériau étudié quelle que soit la vitesse de chargement appliquée.

IV.5.5. Loi de YANG par rapport à deux approches

Une superposition des résultats obtenus grâce à l'approche globale montre une bonne adéquation avec le modèle de Yang appliqué au matériau composite carbone/époxy. Toutefois, les vitesses de sollicitation appliquées lors de nos essais conduisant à une vitesse de propagation maximale mesurée de l'ordre de 1000m/s, nos résultats ne nous permettent pas de mettre en évidence la vitesse maximale de la loi de YANG de façon expérimentale.

Les comparaisons sont montrées sur les figures IV.44 et IV.45. La figure IV.44 présente les résultats obtenus pour le composite carbone/époxy et la figure IV.45 ceux correspond au composite verre/époxy.

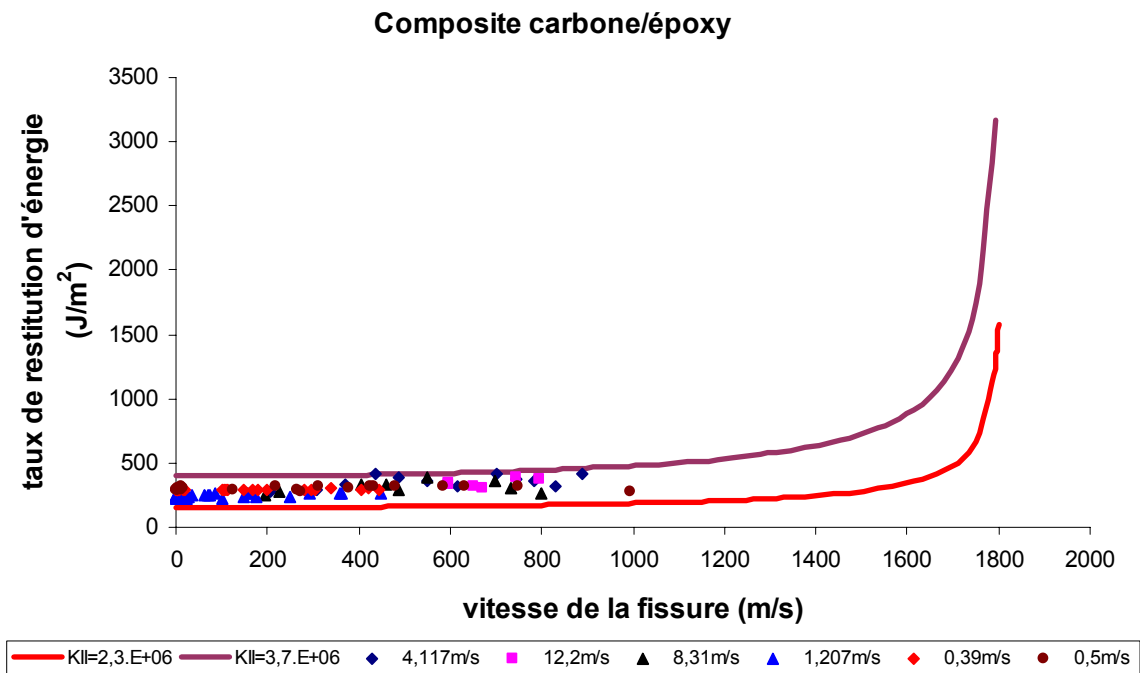


Figure IV.44: Comparaison entre la loi d'YANG et l'approche globale appliquées au composite carbone/époxy

La figure IV.44 présente 2 courbes d'évolution de la loi de YANG qui correspondent à deux valeurs du facteur d'intensité des contraintes: $K_{II \min} = 2,3.10^6 Pa\sqrt{m}$ et

$K_{II\ max} = 3,7.10^6 Pa\sqrt{m}$. Ces deux courbes encadrent tous les résultats calculés selon l'approche globale.

De la même façon, on a trouvé deux valeurs caractéristiques de K_{II} de la campagne d'essais sur verre/époxy: $K_{II\ min} = 4,6.10^6 Pa\sqrt{m}$ et $K_{II\ max} = 5,7.10^6 Pa\sqrt{m}$ (figure IV.45).

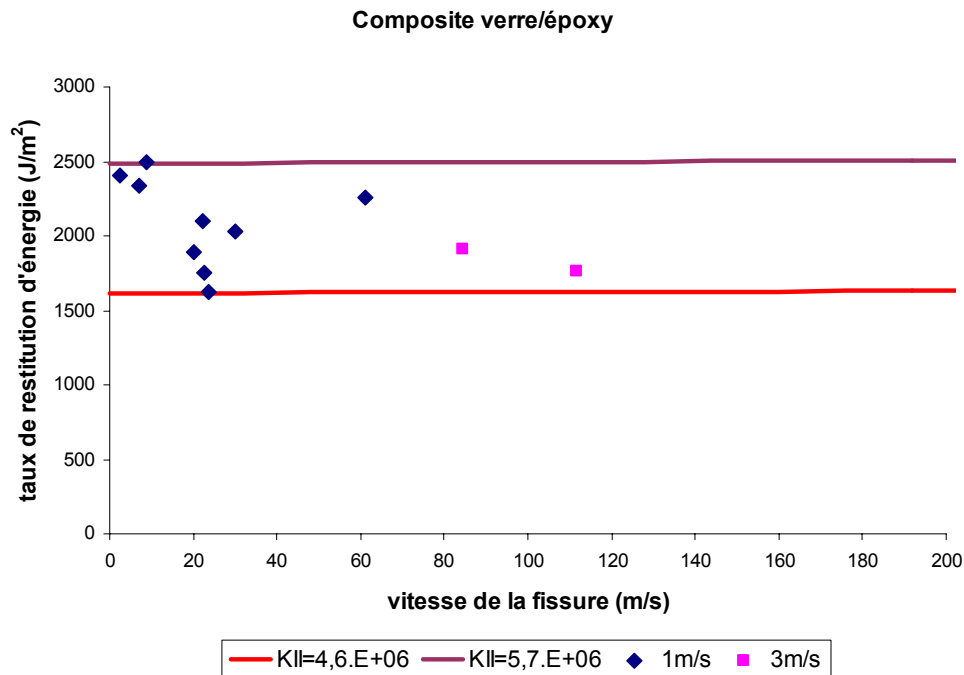


Figure IV.45: Comparaison entre la loi d'YANG et l'approche globale appliquées au composite verre/époxy

Les résultats montrés aux figures IV.44 et IV.45 permettent de conclure que la loi théorique de YANG est cohérente avec l'évolution du taux de restitution d'énergie en fonction de la vitesse de la fissure obtenue par notre approche globale. De plus, cette loi théorique permet de prévoir l'évolution du taux de restitution d'énergie au-delà de la vitesse de propagation maximale mesurée lors de nos essais.

IV.5.6. Application de la loi d'YANG

Le facteur d'intensité de contraintes est directement fonction du champ de contraintes au voisinage de la pointe de la fissure. En outre, l'analyse expérimentale a montré que le phénomène de fissuration dépend de 2 paramètres : la vitesse de chargement (qui conditionne la vitesse de propagation de la fissure) et les caractéristiques du matériau utilisé (cf le chapitre II). Par conséquent, le facteur d'intensité de contraintes qui intervient dans la loi de Yang est influencé par ces mêmes paramètres.

Par ailleurs, en appliquant la loi de YANG à notre matériau et notre approche globale conduisent à une même tendance d'évolution du taux de restitution d'énergie par rapport

à la vitesse de la fissure. De plus, la loi de YANG permet de prédire l'évolution pour des vitesses supérieures à la vitesse maximale mesurée lors de nos essais.

Par les arguments démontrés à-dessus, on peut donc en conclure que la loi de YANG est capable de bien représenter le phénomène de fissuration en dynamique des essais réalisés dans le cadre de cette thèse. Les résultats des expériences réalisées n'ont pas été à même de valider la présence d'une vitesse critique de propagation de la fissure. Toutefois, d'un point de vue théorique, la loi de YANG a permis de valider cette hypothèse.

IV.6. Conclusion du chapitre

L'étude des paramètres caractéristiques de nos essais nous a permis de conclure que les effets de propagation d'ondes peuvent être négligés. L'effet purement dynamique (variabilité spatiotemporelle des champs de contrainte) étant négligeable, la propagation de la fissure est donc influencée uniquement par l'effet cinétique et par le comportement du matériau utilisé.

L'approche globale permet de calculer le taux de restitution d'énergie instantané qui estime pour chaque image récupérée par la caméra rapide pendant les essais. Cette approche est fondée sur l'étude du bilan énergétique lors de l'essai. Cette approche nous a permis de suivre l'évolution du taux de restitution d'énergie pendant tous les essais réalisés.

L'approche globale est ensuite vérifiée par les résultats de calcul de l'approche locale fondée sur un dialogue expérience-simulation par éléments finis. Cette deuxième approche utilise l'analyse des champs cinématiques locaux dans la zone proche de la pointe de la fissure afin d'obtenir par simulation l'évolution du taux de restitution d'énergie en fonction de la vitesse de propagation de la fissure.

Les résultats de l'approche globale nous ont permis d'aboutir à deux conclusions importantes :

- L'évolution du taux de restitution d'énergie pendant les essais est gérée par 3 paramètres : la vitesse de la fissure, la vitesse de chargement et les caractéristiques mécaniques du matériau. Toutefois, il existe une relation directe entre la vitesse de chargement et la vitesse de propagation de la fissure.
- L'évolution du taux de restitution d'énergie en fonction de la vitesse de la propagation de la fissure est représentée par deux étapes : une première étape, correspond aux faibles vitesses de propagation, durant laquelle le taux de restitution d'énergie reste constant. Une seconde étape à partir de laquelle on note une augmentation sensible du taux de restitution d'énergie. Le seuil de vitesse à partir duquel le taux de restitution d'énergie augmente a été identifié.
- De plus, l'influence de l'effet cinétique par rapport à celle de l'effet du matériau a été évaluée. Il apparaît que, pour les plus grandes vitesses de chargement, l'effet cinétique peut participer à 40% de l'évolution du taux de restitution d'énergie pour les essais analysés.

Enfin, l'application de la loi théorique de YANG à nos deux matériaux composites a confirmé toutes les observations obtenues par l'approche globale. En effet, les résultats des deux approches coïncident parfaitement pour nos deux cas d'étude.

De plus, la loi théorique de YANG permet de prévoir l'évolution du taux de restitution d'énergie jusqu'à la vitesse critique de la fissure pour laquelle le taux de restitution d'énergie tend vers l'infini. Du point de vue théorique, cette vitesse correspond à la vitesse de propagation que la fissure ne pourra jamais dépasser quelle que soit la vitesse de chargement.

Nous pouvons donc conclure que la loi théorique de YANG pourra représenter correctement le phénomène de délaminage dynamique pour nos deux matériaux.

Conclusion

Les travaux présentés dans le cadre de cette thèse ont pour objet principal de trouver une loi d'évolution qui permet de représenter le phénomène de délaminage en mode II dominant de deux types de matériau composite unidirectionnel soumis à une sollicitation rapide.

Le choix du type d'essai (CLS guidé) permet de créer le phénomène de délaminage en dynamique en mode II (cisaillement). Les observations des facies de rupture au Microscopie Electronique à Balayage et par les mesures de champs par corrélation d'images confirment la présence d'un mode II presque pur. En effet, l'utilisation d'un système de guidage conçu pour les besoins de l'étude permet d'assurer un délaminage en mode II dominant par rapport à mode I.

Deux campagnes d'essais correspondant à deux types différents de matériau composite unidirectionnel sont réalisées à l'aide de la machine de traction à grande vitesse. Durant les essais, l'effort et le déplacement ont été suivis par les différents capteurs.

La caméra rapide a montré ses avantages pour l'analyse des essais rapides réalisés. Cette caméra est capable de filmer un très grand nombre d'images pendant une durée très courte. Ceci nous a permis de suivre la propagation de la fissure lors d'essais réalisés à grande vitesse. Les images récupérées sont exploitées pour mesurer la longueur de la fissure en chaque instant au cours de la propagation de la fissure.

La technique de mesure de champs a permis d'accéder aux champs de déplacement locaux de la zone entourant la pointe de la fissure. Grâce au traitement des images filmées par la caméra rapide, l'évolution du champ de déplacement de cette zone a été suivie pendant la propagation de la fissure.

Deux méthodes de mesure capables de déterminer la longueur de la fissure pendant les essais (méthode de contraste et corrélation d'images) sont appliquées aux images obtenues lors de chacune des deux campagnes d'essais réalisées. Ces deux méthodes ont exploité les images de la surface de l'éprouvette filmée par la caméra rapide afin d'identifier la position de la fissure et sa longueur. Ces deux méthodes ont été appliquées à la mesure de la longueur de la fissure durant la propagation pour tous les essais réalisés.

Après avoir caractérisé expérimentalement le phénomène de délaminage dynamique, nous avons recherché des approches permettant de déterminer le taux de restitution d'énergie développé durant chaque essai réalisé. Deux approches différentes ont donc été proposées et appliquées à chacune de nos deux campagnes d'essais : l'approche globale et l'approche locale. L'approche globale proposée est fondée sur une étude du bilan énergétique de l'essai afin d'accéder au calcul du taux de restitution d'énergie.

L'approche locale, fondée sur les champs de déplacement locaux autour de la pointe de la fissure, utilise une modélisation par éléments finis. Ces deux approches utilisent les mesures expérimentales établies précédemment comme données de calcul. Les résultats issus de ces deux méthodes sont en assez bonne corrélation. Cela permet de valider les hypothèses de calcul utilisées pour chaque approche.

Les résultats obtenus selon l'approche globale ont été analysés pour caractériser l'évolution typique du taux de restitution d'énergie en fonction de la vitesse de la fissure. Les analyses permettent de conclure à deux étapes principales de cette évolution : Une première durant laquelle on n'observe pas d'évolution significative suivie d'une seconde durant laquelle le taux de restitution d'énergie augmente. L'expérimentation permet de traduire une loi d'évolution du taux de restitution d'énergie jusqu'à une vitesse de propagation de la fissure de l'ordre de 1000m/s.

Par ailleurs, les résultats expérimentaux ainsi que les résultats des deux approches proposées montrent que le taux de restitution d'énergie du phénomène de délaminage dynamique est géré par 3 paramètres : la vitesse de sollicitation, la vitesse de la fissure et les caractéristiques du matériau. Toutefois, on a montré que les deux premiers paramètres ne sont pas indépendants. En effet, la vitesse de propagation est directement influencée par la vitesse du chargement.

Par ailleurs, la loi théorique de YANG a été appliquée à nos matériaux. Il apparaît que cette loi est capable de représenter le phénomène de délaminage dynamique des essais réalisés. Cette loi théorique caractérise l'évolution du taux de restitution d'énergie par rapport à la vitesse de la fissure. Selon cette loi, le taux de restitution d'énergie est géré par les caractéristiques mécaniques du matériau utilisé, par la vitesse de propagation de la fissure et par l'effet du chargement (ou la vitesse de chargement). La superposition des résultats de cette loi à ceux obtenus par notre approche globale montre une bonne cohérence.

De plus, la loi de YANG permet de prévoir l'évolution du taux de restitution d'énergie jusqu'à la vitesse critique de la fissure à laquelle le taux de restitution tend théoriquement vers l'infini. Cette valeur critique de la vitesse de la fissure est une caractéristique du matériau. Elle est conditionnée par les caractéristiques mécaniques de ce dernier et correspond la vitesse que la fissure ne pourra jamais dépasser quelle que soit la vitesse de chargement.

Après avoir étudié la loi théorique de YANG, il apparaît que cette loi est représentative du phénomène de délaminage dynamique des deux types de matériau composite unidirectionnel utilisés. Cette loi a été validée par tous les résultats expérimentaux qu'on a obtenus durant cette thèse.

En résumé, la première partie de ce travail a contribué au développement d'un outil permettant l'identification de la longueur réelle de la fissure pendant les essais rapides.

Dans la deuxième partie, deux approches ont été proposées et appliquées pour calculer le taux de restitution d'énergie des essais réalisés. Enfin, la loi théorique de YANG a été validée pour représenter le phénomène de délaminage dynamique de deux types de matériau composite utilisé.

Perspectives

La méthode proposée d'identification de la longueur réelle de la fissure pendant la fissuration dynamique permet de suivre de façon précise la propagation de la fissure pendant les essais rapide. Pourtant, les démarches de cette méthode de mesure demandent un travail de calcul lourd. Le développement d'un outil automatique s'appuyant sur cette méthode de mesure permettrait de faciliter les calculs et d'obtenir directement l'évolution de la fissure à partir des images récupérées par la caméra rapide. Cet outil devrait réaliser automatiquement la modélisation par éléments finis de la zone au voisinage de la pointe de la fissure en utilisant les données de la mesure de champs par corrélation d'images.

De plus, avec la méthode d'identification de la longueur de la fissure, le type et la taille utilisés des éléments jouent le rôle décisif sur la précision de la mesure ainsi le volume de calcul par éléments finis. C'est pourquoi l'optimisation de la méthode d'identification aidera à trouver le type et la taille optimale des éléments utilisés.

Par ailleurs, la réalisation d'essais plus performants capables de générer des vitesses de propagation plus importantes permettrait de valider la loi de YANG et notamment l'effet de seuil. Par l'expérimentation, on pourra estimer la variation du facteur d'intensité de contrainte pour chaque type de matériau composite jusqu'à la vitesse maximale de la fissuration.

La loi théorique de YANG prévoit la variation du taux de restitution d'énergie en fonction de la vitesse de la fissure pour chaque type du matériau composite unidirectionnel. Elle a été validée dans le cas d'un délaminage en mode II. Il serait intéressant de la valider en mode I et en mode mixte grâce à la même procédure.

L'application de cette loi dans le cas de crash de structures industrielles réelles (telle que la chute d'hélicoptère élaborés par EADS avec des pièces en composite carbone époxy similaire à notre matériau d'étude) permettra de modéliser la propagation de la fissure jusqu'à la rupture totale. Ce type de démarche conduira à une meilleure optimisation des structures.

REFERENCE

[ABAQUS Vol II] Volume II: Analysis user's manual, version 6.5

[AGATI 1999] Pierre Agati, Frédéric Lerouge, Marc Rossetto, "Résistance des matériaux", cours et exercices corrigés, Dunod, Paris, 1999.

[Airbus 2007] Airbus: "Advanced materials and technologies for A380 structure", 2007

[ALIYU 1985] Aliyu A.A., Daniel I.M., "Effects of strain rate on delamination fracture toughness of graphite/epoxy", In: Johnson WS editor, Delamination and debonding of materials, ASTM STP 876, Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials, p. 336, 1985.

[ANGLIN 1993] ANGLIN J. M., "Aircraft application", dans: "Engineered materials handbook, vol.I: composites", Ohio, ASM international, USA, pp 801-809, 1993.

[ASTM 1994] American society for testing and materials, "Standard test method for mode I interlaminar fracture toughness of unidirectional fiber-reinforced polymer matrix composite", Pennsylvanie, USA: ASTM International, N° D 5528-94a, p 10, 1994.

[BERTHELOT 1996] Jean-Marie BERTHELOT, "Matériaux composites comportement mécanique et analyse des structure", Ouvrage, Edition MASSON, 2^e édition, Paris, 1996.

[BLACKMAN 2001] Blackman B.R.K., Brunner A.J. & Davies P., "Delamination fracture of continuous fibres composites: mixed-mode fracture", dans "Fracture mechanics testing methods for polymers, adhesives, and composites" Ed. Par D.R. Moore, A. Pavan & J.G. Williams, Oxford, Royaume-Uni, Elsevier Science Ltd, pp. 335-359, 2001.

[Boeing 2007] Boeing: "787 Dreamliner: Program facts", 2007

[BRUNNER 2001] Brunner A. J., Blackman B.R.K. & Davies P., "Mode I delamination", dans: "Fracture mechanics testing methods for polymers, adhesives, and composites", Ed. par D.R. Moore, A. Pavan & J. G. Williams, Oxford, Royaume-Uni: Elsevier Science Ltd, pp. 277-305, 2001.

[CAIRNS 1992] Cairns D.S., "Static and dynamic mode II strain energy release rates in toughened thermosetting composite laminates", Journal of composites Technology and Research, pp 14-37, 1992.

[CHEN 1993] CHEN D. J., CHIANG F. P., TAN Y. S. and DON H. S. "Digital speckle-displacement measurement using a complex spectrum method", Applied optics, pp:1839-1849, 1993.

[CHU 1985] CHU T. C., RANSON W. F., SUTTON M. A. and PETERS W. H. "Applications of digital image correlation techniques to experimental mechanics", Experimental Mechanics, 1985.

[DAVIES 1999] Davies P., Sims G. D., Blackman B. R. K., Brunner A. J., Kageyama K., Hojo M., Tanaka K., Murri G., Rousseau C., Gieseke B. & Martin R. H., "comparison of test configurations for determination of mode II interlaminar fracture toughness results from international collaborative test programme", *Plastics, rubber and composites*, vol. 28, pp. 432-437, 1999.

[DAVIES 2001] Davies P., Blackman B. R. K. & Brunner A. J., "Mode II delamination" dans: "Fracture mechanics testing methods for polymers, adhesives, and composites", Ed. Par D. R. Moore, A. Pavan & J. G. Williams, Oxford, Royaume-Uni: Elsevier Science Ltd., pp. 307-333, ISBN 0080436897, 2001.

[DEVAULX 1998] DeVaulx, Thomas, "Determination of the First Damage Criterion of a Glass/Epoxy Composite Material Using in Situ Tensile Tests", Atlanta, 1998.

[DRAGON 2000] André GRAGON, François HILD, Laurant ROTA, Hervé TRUMEL, "Modélisation du comportement et de la rupture des matériaux sous sollicitations dynamiques", *Mécanique & Industries* ISSN 1296-2139, vol. 1, n°5, pp: 521-537 (76 ref.), 2000.

[FRIENDRICH 1989] Friedrich K., "Fractographic analysis of polymer composites", dans: "Application of fracture mechanics to composite materials": Ed. Par Friendrich K., Amsterdam, Pays-Bas, Elsevier Science Publishers, B. V., pp: 425-487, ISBN 0444872868 (vol.-), 1989.

[GIRAULT 2009] Discours de Patrick GIRAULT, directeur de la Stratégie et du développement d'Aircelle, du Salon du Bourget 2007.

[GOL'DSHTEIN 1966] Gol'dshtein R. V., "On steady motion of a crack along a straight line boundary between two joined materials", *Inzh. Zh. MTT*, vol 5, pp: 93-101.

[GONG 1992] Gong X. J., "Rupture interlaminaire en mode mixte I+II du composite stratifié verre/époxy unidirectionnel et multidirectionnel", thèse: mécanique appliquée, acoustique, et matériaux. Compiègne: Université de technologie de Compiègne, N° D 459, 1992

[Grady 1986] Grady J.E., Sun C.T., "Dynamic delamination crack propagation in a graphite/epoxy laminate", In: Hahn HT editor, *Composite materials: fatigue and fracture*, ASTM STP 907, p. 5, 1986.

[Guo 1998] Guo C., Sun C.T., "Dynamic mode I crack propagation in a carbon/epoxy composite", Composite Science and Technology, p. 58, 1998.

[HASHEMI 1990] Hashemi S, Kinloch AK, Williams JG. "The analysis of interlaminar fracture in uniaxial fiber-polymer composites", Proc Royal Soc, Lond 1990; A427: 173-99.

[Hexcel Composites] <http://www.hexcel.com>

[HILD 1999] HILD F. PERIE J. -N. and CORET M. "Mesure de champs de déplacements 2D par intercorrélation d'images" CORRELI2D, Internal report230 DecemberLMT-Cachan, p 101, 1999.

[HILD 2002] HILD F. "CORRELILMT: A software for displacement field measurements by digital image correlation" Internal report 254 January LMT-Cachan, 2002.

[HILD 2006] HILD F., ROUX S. "Measuring stress intensity factors with a camera: Integrated digital image correlation (I-DIC)", Compte rendu de l'Académie des Sciences-Mécanique, 334, pp: 8-12, 2006.

[HORTON 1993] Horton R. E., McCarty J. E. "Damage tolerance of composites", dans: "Engineered material handbook" - yvolume I: composite, Ohio, USA: ASM International, p 259-267, 1993.

[HUG 2005] Gregor HUG, "Analyse du comportement de stratifiés carbone/époxy sous sollicitation rapide. Elaboration par électrothermie diélectrique d'un même matériau pour comparaison", thèse de l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Paris, 2005.

[IREMAN 1996] T. IREMAN, J. C. THESKEN et al, "Damage propagation in composite structural elements-coupon experiment and analyses", Composite structures 36, Elsevier Science Ltd, pp 209-220, 1996.

[IRWIN 1960] Irwin G. R., "Fracture Mechanics", In Structural Mechanics, ed J. N. Goodier & N. J. Hoff, New York, pp: 557-591, 1960.

[TSAI 2001] J.L. Tsai, C. Guo, Sun C.T., "Dynamic delamination fracture toughness unidirectional polymeric composites", Composites Science and Technology, volume 61, Issue 1, January 2001, page 87-94, 2001.

[JENDLI 2005] Zouhaier JENDLI, "Analyse et modélisation multi-échelles du comportement mécanique sous sollicitations rapides de composite SMC", thèse de l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Paris, 2005.

[JONES 1975] Jones R. Y., "Mechanics of composite materials", Scripta Book Company,

Washington D.C., USA, 1975.

[Kaelble 1973] Kaelble, D.H, "Epoxy-Resin Adhesives", Epoxy Resins, Marcel Dekker, inc., New York, pp329, pp. 357-359, 1973.

[KAELBLE 1973] Kaelblec D. H., "Epoxy-Resin Adhesives", Epoxy Resins, Marcel Dekker, inc., New York, pp. 357-359, 1973.

[KYONG 1997] KYONG Y.Rhee, "Determination of $\bullet$ -factor for an end-notched flexure test specimen", Journal of materials science letter 16, pp 386-388, 1997.

[Lambros 1997, 01] Lambros J., Rosakis A.J., "Experimental investigation of dynamic delamination in thick polymeric composite laminates", Experimental Mechanics, p. 360, 1997.

[Lambros 1997, 02] Lambros J., Rosakis A.J., "Dynamic crack initiation and growth in thick unidirectional graphite/epoxy plates", Composites Science and Technology, pp 55-65, 1997.

[LEMAITRE 1985] Lemaître J., Chaboche J. -L., "Mécaniques des matériaux solides", ouvrage, Edition Dunod, Paris, 1985.

[LIU] Liu, C., Rosakis, A. J., Stout, M. G. & Ellis, R., "On the application of CGS interferometry to the study of cracks in fiber reinforced composites", int. J. Fract.

[MAMOLA 1998] Mamola D., Moustrou M., "Etude Comparative du Comportement en Flexion Quatre Points d'un Composite Elaboré par Chauffage Micro Ondes et Thermique Clasique", Paris, 1998.

[MEZIERE 2000] Mézière Y., "Tolérance au dommage: Etude de délaminage dans les matériaux composites à matrice organique", thèse de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, 2000.

[MICHEL 2004] Michel L."Mécanique des matériaux stratifiés", Notes de cours, ENSICA, Toulouse, 2004

[O'BRIEN 1998] O'Brien T. K., "Interlaminar fracture toughness: the long and winding road to standardization", Composite part B: Engineering, vol 29, pp. 57-62, 1998.

[PETER 1982] PETER W. H., and RANSON W. F., "Digital imaging techniques in experimental stress analysis", Optical Engineering, pp: 427-432, 1982.

[PARDO 2001] Pardo S. , "Tenue d'assemblage de composites sous sollicitations dynamiques", Thèse de doctorat, ENSAM de Paris, 2001.

[PARDO 2001] Stéphanie PARDO, "Tenue d'assemblage de composites sous sollicitations dynamiques", thèse de l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Paris, 2001.

[PAVAN 2004] Payan J., "Etude du comportement de composites stratifiés sous chargement statique et de fatigue", thèse en mécanique, Université de la Méditerranée Aix-Marseille II, 2004.

[RICE 1968] J. R. Rice, "A path-independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks", Journal of Applied Mechanics, vol. 35, pp.376-386, 1968.

[SCHREIER 2000] SCHREIER H. W., BRAASCH J. R., SUTTON M. A., "Systematic errors in digital image correlation caused by intensity interpolation", Optical Engineering, pp: 2915-2921, 2000

[SMILEY 1987] Smiley A. J., Pipes R. B., "Rate effects on mode I interlaminar fracture toughness in composite materials", Journal of Composite Materials, 21, pp. 670-687, 1987.

[SMITH 1993] Smith B. W., "Fractography for continuous fiber composites", dans: "Engineered materials handbook", volume 1: composite, Ohio, USA, ASM International, pp: 786-793, ISBN 0871702797 (v.1), 1993.

[STROH 1962] Stroh A. H., "Steady state problems in anisotropic elasticity", J. Math Phys., vol. 41, pp: 77-103, 1962.

[SUTTON 2004] SUTTON M. A., "Recent developments and trends in measurements from the macroscale to reduced length scales", actes Colloque Photomécanique, EMAC, pp: 1-8, 2004.

[SZEKRENYES 2003] Andras SZEKRENYES, Jozsef UJ, "Analysis of the interlaminar crack initiation in mixed-mode I+II composite fracture specimens", Periodica Polytechnica Ser. Mech. Eng. Vol. 47, no. 2, pp 103-188, 2003.

[TANAKA 1973] TANAKA Yoshio, "Synthesis and Characteristics of Epoxides", Epoxy Resins, Marcel Dekker, inc., New York, p16, 1973.

[TRICONNET 2007] Karen TRICONNET, "Identification des propriétés mécaniques à partir de mesures de champs dans un matériau multi-phase", rapport de thèse de l'école nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Spécialité mécanique, Paris, 2007

[TSAI 2001] J.L. Tsai, C. Guo, C.T. Sun, "Dynamic delamination fracture toughness in unidirectional polymeric composite", Composite Science and Technology, pp: 87-94 ,

2001.

[TSAI 2005] TSAI W., "Three decades of composites activities at US Air Force Materials Laboratory". Composites science and technology, pp 2295-2299, vol. 65, 2005.

[VIC-2D] VIC-2D/CORRELATION Solution: <http://www.correlatedsolutions.com>

[VINCENT 1998] Vincent Henri Barre, "Determination of a Local Damage Threshold Criterion for a Glass/Epoxy Laminated under an Intermediate Rate of Loading", PhD of Georgia Institute of Technology, 1998.

[WILLIAMS 1989] Williams J. G., "Fracture mechanics of anisotropic materials", dans: "Application of fracture mechanics to composite materials", Ed. par K. Friedrich, Amsterdam, Pay-Bas, Elsevier Science Publishers B. V., pp. 3-38, ISBN 0444872868, 1989.

[WOSU 2005] N. Wosu, Hui, K. Dutta "Dynamic mixed-mode I/II delamination fracture and energy release rate of unidirectional graphite/epoxy composites", Engineering Fracture Mechanics, Volume 72, Issue 10, pp: 1531-1558, July 2005.

[YANG 1991] Yang W., Suo Z., Shih C. F., "Mechanics of dynamics debonding", Proceeding of Royal Society of London, pp. 433-679, 1991.

[Yaniv G. 1988] Yaniv G., Daniel I.M., "Height-tapered double cantilever beam specimen for study of rate effects on fracture toughness of composites" In: Whitcomb JD editor, Composite materials: testing and design (Eighth Conference); ASTM STP 972, Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials, p. 241, 1988.

[YOFFE 1951] Yoffe E. H., "The moving Griffith crack", Phil. Mag., vol 42, pp: 739-750, 1951.

[ZHANG 1999] Zhang ZX, Kou JQ, Yu Y, Jiang LG, Lindquist PA, "Effect of loading rate on rock fracture", Int Rock Mech Mining Sci, pp: 597-611, 1999.

Titre: Etude du délaminage en mode II de composites unidirectionnels soumis à des sollicitations rapides: Approche globale et Approche locale

Résumé: L'un des avantages majeurs des stratifiés composites à renforts de fibres longues est la capacité d'orienter les fibres de chaque pli afin d'optimiser ses propriétés mécaniques telles que la résistance et la rigidité, par rapport aux chargements imposés. Malgré d'excellentes propriétés dans le plan, les stratifiés présentent un problème propre aux matériaux réalisés par stratification: la rupture inter-laminaire. Ce mécanisme de rupture se caractérise par un décollement ou une décohésion entre les plis du stratifié. Il est couramment appelé le "délaminage". De plus, peu d'information existe dans la littérature concernant le délaminage en mode II pur. Par ailleurs, cette dernière est encore moins prolifique en ce qui concerne les sollicitations rapides. L'objectif de cette thèse est donc d'étudier ce mode de délaminage lorsque ce type de matériau composite est soumis à des sollicitations rapides. L'essai de délaminage en mode II CLS (Cracked-Lap-Shear) a été appliqué à deux types standards de matériaux composites unidirectionnels en utilisant un système de guidage assurant un mode II quasi-pur. Les campagnes d'essais ont été réalisées à l'aide d'une machine de traction à grande vitesse. Une caméra rapide de type Photron a été utilisée pour filmer la fissuration jusqu'à des vitesses de propagation de l'ordre de 1000m/s. L'application de la technique de mesure de champ par Corrélation d'images a permis de mesurer les champs de déplacement locaux au voisinage de la tête de la fissure. Deux méthodes différentes de mesure sont étudiées et appliquées aux essais pour suivre la propagation de la fissure: la méthode de contraste et une méthode combinant la mesure par Corrélation d'image et la méthode des Eléments finis. Par ailleurs, deux approches: la première dite « locale » et la seconde dite « globale » ont été appliquées pour déterminer l'évolution du taux de restitution d'énergie en fonction de la vitesse de propagation de la fissure. Grâce aux résultats obtenus par ces deux approches, nous avons montré que la loi théorique proposée par YANG est capable de bien représenter l'évolution du taux de restitution d'énergie en fonction de la vitesse de propagation de la fissure lors du délaminage en mode II. La loi d'évolution de Yang a donc été validée.

Mots clés: renfort fibreux UD, délaminage, Caméra à grande vitesse, technique de mesure de champs, sollicitation rapide.

Title: Study of delamination in mode II unidirectional composites subjected to high speed loading: Local Approach and Global Approach

Abstract: One of the major benefits of laminate composites reinforced with long fibers is the ability to orient the fibers of each ply to optimize its mechanical properties such as strength and stiffness, relative to loads imposed. Despite excellent properties in the plane, laminates present a problem for materials made by laminating: the inter-laminar fracture. This failure mechanism is characterized by a delamination or debonding between the plies of the laminate. It is commonly called the "delamination". In addition, little information exists in the literature concerning the mode II delamination pure. Moreover, it is even less prolific in terms sollicitations fast. The objective of this thesis is to study this mode of delamination when this type of composite material is subjected to high speed loading. The test mode II delamination (CLS Cracked-Lap-Shear) was applied to two standard types of unidirectional composite materials using a guiding system ensuring a quasi-pure mode II. The test campaigns were carried out using a tensile machine at high speed. A Photron high speed camera type was used to shoot up crack propagation speeds of about 1000m/s. The application of the technique of field measurement by image correlation was used to measure local displacement fields near the crack tip. Two different methods of measurement are studied and applied to tests to monitor the crack propagation: the contrast method and a method combining measurement by image correlation and finite element method. In addition, two approaches: the first called "local" and the second called "global" has been applied to determine changes in the rate of energy release according to the speed of propagation of the crack. With the results obtained by these two approaches, we showed that the theoretical law proposed by Yang is able to adequately represent the evolution of the energy release rate depending on the speed of propagation of the crack during mode II delamination. The evolution law of Yang has been validated.

Keywords: UD reinforcement fiber, delamination, High speed camera, field measurement technique, speed loading.