HAL
open science

# Etude de la fissuration des bois tropicaux par mesures des champs

Bernard Odounga

## To cite this version:

Bernard Odounga. Etude de la fissuration des bois tropicaux par mesures des champs. Génie civil. Université Clermont Auvergne [2017-2020], 2018. Français. NNT : 2018CLFAC015 . tel-01922757

**HAL Id: tel-01922757**

**https://theses.hal.science/tel-01922757**

Submitted on 14 Nov 2018

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**UNIVERSITÉ CLERMONT AUVERGNE**

ÉCOLE DOCTORALE
SCIENCES POUR L'INGÉNIEUR DE CLERMONT-FERRAND

# THÈSE

Présentée par

**Bernard ODOUNGA**

pour obtenir le grade de

# DOCTEUR D'UNIVERSITÉ

## SPÉCIALITÉ : GÉNIE CIVIL

Titre de la thèse :

## Étude de la fissuration des bois tropicaux par mesures de champs

Soutenue publiquement le 09 juillet 2018 devant le jury :

| | |
|---|---|
| Mme. X. Gong, Professeure, IUT de Tarbes | Rapporteur |
| M. P. Doumalin, MCF HDR, Université de Poitiers | Rapporteur |
| M. Z. Aboura, Professeur, Université de Technologie de Compiègne | Président du jury |
| M. S. Ikogou, MA CAMES, USTM | Examinateur |
| M. R. Moutou Pitti, MCF HDR, UCA | Directeur |
| Mme. E. Toussaint, Professeure, UCA | Co-Directrice |
| M. M. Grédiac, Professeur, UCA | Co-Directeur |

# Dédicaces

**A mon père et à ma mère**
**A toutes les personnes qui ont contribué à ma formation**

**“ Le bonheur n’est pas dans l’ignorance,**
**la paresse et l’illusion, mais dans l’effort quotidien,**
**l’œuvre accomplie, le désir de savoir sans cesse davantage,**
**le libre épanouissement de notre nature.”**

- Paul Brulat -

# Remerciements

Ce travail s'est déroulé au sein de l'axe Mécanique, Matériaux et Structures (MMS) à l'Institut Pascal au sein de l'Université Clermont Auvergne à Clermont Ferrand.

Je souhaite tout d'abord exprimer ma profonde gratitude à mes directeurs de thèse, Rostand Moutou Pitti, Evelyne Toussaint et Michel Grédiac pour leur encadrement de qualité et pour avoir dirigé ce travail. Leurs précieux conseils, leur appui, leur disponibilité et aussi leur patience m'ont été d'une grande utilité tout au long de ces trois années de thèse.

Je remercie Madame Xiaojing Gong, Professeure à l'Institut Universitaire de Technologie de Tarbes et Monsieur Pascal Doumalin, Maître de conférences, HDR à l'Université de Poitiers, pour m'avoir fait l'honneur d'accepter d'être rapporteurs de ce mémoire.

Mes sincères remerciements s'adressent également à Monsieur Zoheir Aboura, Professeur à l'Université de Technologie de Compiègne et Monsieur Samuel Ikogou, Maître Assistant CAMES, à l'Ecole Polytechnique de l'Université des Sciences et techniques de Masuku, pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Je voudrai aussi remercier tous les membres du laboratoire, merci au personnel d'atelier pour leur disponibilité, merci à tout le corps enseignant du département génie civil de polytechnique. Je tiens aussi à dédier une mention spéciale à tous mes compagnons de laboratoire pour ces trois années passé ensembles, en particulier Augustin, Edouard, Basile, Bilal, César,

Claude, Elodie, Husam, Maitham, Mathilde et Taher.

Je souhaiterais exprimer ma gratitude à mes parents pour m'avoir inculqué les valeurs qui sont les miennes, à ma fiancée Claudia pour sa patience et à mes frères et sœurs pour leur soutien indéfectible.

# Résumé

L'objectif du présent travail est d'étudier expérimentalement et numériquement la fissuration des bois tropicaux issus de la forêt gabonaise, à savoir : le *Milicia excelsa* (iroko), l' *Aucoumea klaineana pierre* (okoumé) et *Pterocarpus soyauxii* (padouk). Cette étude est axée sur le processus de croissance de la fissure en mode d'ouverture et en mode mixte des trois essences à l'aide d'éprouvettes Compact Tension Shear (CTS) et Mixed Mode Crack Growth (MMCG) modifiées. Les éprouvettes sont montées dans un système Arcan et placées dans une machine d'essai électromécanique. La méthode de la grille est utilisée pour mesurer les champs de déplacements et de déformations au voisinage de la fissure. Ces cartes ainsi obtenues permettent d'obtenir l'ouverture et la longueur de la fissure tout au long de l'essai. Les courbes force en fonction de l'ouverture de la fissure sont déduites des mesures. La méthode de la complaisance à déplacement imposé est utilisée pour calculer le taux de restitution d'énergie $G$ en mode d'ouverture de fissure et en mode mixte. Les résultats ont montré un effet de l'épaisseur sur la fissuration. Ces résultats ont aussi permis de mettre en évidence une proportionnalité de la densité par rapport aux paramètres de rupture de ces essences. En mode mixte les valeurs de l'évolution de $G$ sont présentées en fonction de la longueur de fissure après découplage des modes (séparation du mode 1 et du mode 2). On observe pour l'okoumé par exemple, que les rapports des taux de restitution d'énergie des deux modes sont constants, ce qui justifie le caractère intrinsèque des paramètres de fissuration obtenus. Des comparaisons faites avec les résultats issus de de la littérature sur les essences tempérées de même densité ont montré des similitudes.

**Mots clés** : fissuration des bois tropicaux, méthode de la grille, éprouvettes CTS et MMCG modifiées.

# Abstract

The objective of the present work is to study experimentally and numerically the cracking behavior of tropical woods from the Gabonese forest, namely : *Milicia excelsa* (iroko), *Aucoumea klaineana pierre* (okume) and *Pterocarpus soyauxii* (padouk). This study focuses on the crack growth process in crack opening mode and mixed mode of these three species using Modified Tension Shear (CTS) and Mixed Mode Crack Growth (MMCG) specimens. The specimens are mounted in an Arcan system and placed in an electromechanical testing machine. The grid method is used to measure the displacement and strains fields near the tip crack. These maps make it possible to obtain the opening and the length of the crack during the tests. The curves force showing the face as a function of the crack opening are deduced from the measurements. The experimental critical energy release rate $G$ is evaluated by the compliance method in imposed displacement. The results show an effect of the thickness on cracking. These results also made it possible to demonstrate a proportionality of the density with the parameters of rupture of these species. In mixed mode, after decoupling the modes (separation of mode 1 and mode 2), the values of $G$ are presented as a function of to the crack length. For Okume, for example, it was observed that the ratios of the energy release rates of the two modes are constant, which justifies the intrinsic character of the cracking parameters were obtained. Comparisons made with results from the literature review on temperate species of the same density showed similarities.

**Keywords** : cracking of tropical woods, grid method, CTS specimen and modified MMCG specimen.

# Table des matières

**Remerciements** **7**

**Résumé** **9**

**Abstract** **10**

**Table des figures** **15**

**Liste des tableaux** **21**

**Introduction générale** **22**

**1 Généralités sur le matériau bois et choix des essences** **31**

1.1 Introduction . . . . . 31

1.2 Éléments constitutifs du matériau bois . . . . . 33

1.2.1 Le bois . . . . . 33

1.2.2 Les fonctions du bois de l'arbre . . . . . 35

1.3 Structure macroscopique et microscopique du bois . . . . . 37

1.3.1 Échelle macroscopique . . . . . 37

1.3.2 Échelle microscopique . . . . . 40

1.3.3 Composition chimique du bois . . . . . 42

1.4 Propriétés physiques et mécaniques du bois . . . . . 44

1.4.1 Élasticité et viscoélasticité . . . . . 45

1.4.2 Anisotropie et orthotropie . . . . . 46

1.4.3 Influence de l'humidité sur les propriétés du bois . . . . . 47
1.4.4 Influence de la densité sur le bois . . . . . 48
1.4.5 L'hygroscopie ou équilibre hygroscopique du bois . . . . . 50
1.5 Essences tropicales . . . . . 52
1.5.1 Quelques travaux sur les essences tropicales . . . . . 52
1.5.2 Les climats tempérés et tropicaux . . . . . 55
1.5.3 Aucoumea klaineana (okoumé) . . . . . 58
1.5.4 Milicia excelsa (iroko) . . . . . 59
1.5.5 Pterocarpus soyauxii (padouk) . . . . . 61
1.5.6 Comparaisons des gradeurs physiques et mécaniques des trois essences étudiées . . . . . 62
1.6 Conclusion . . . . . 64

**2 Éléments de mécanique de la rupture et méthode de la grille 65**

2.1 Introduction . . . . . 65
2.2 Géométrie d'éprouvettes utilisées en mécanique de la rupture . . . . . 66
2.3 Champs mécaniques en milieu orthotropes . . . . . 74
2.4 Méthode de la grille . . . . . 83
2.4.1 Intérêt des mesures de champs cinématiques . . . . . 84
2.4.2 Principe général de la méthode de la grille . . . . . 86
2.4.3 Extraction des phases des images de grilles avec l'ALS . . . . . 88
2.4.4 Estimation des erreurs de la méthode . . . . . 90
2.5 Conclusion . . . . . 92

**3 Étude de la fissuration en mode 1 93**

3.1 Introduction . . . . . 93
3.2 Matériaux et méthodes . . . . . 94
3.2.1 Éprouvettes bois CTS et MMCG modifiées . . . . . 94
3.2.2 Propriétés physiques et mécaniques des essences étudiées . . . . . 99

3.2.3 Fabrication du système Arcan . . . . . 100
3.2.4 Mesure de déplacement et de déformation à l'aide de la méthode de grille 102
3.2.5 Dispositif et protocole expérimental . . . . . 105
3.2.6 Méthode de la complaisance . . . . . 105
3.3 Méthode de détection de l'ouverture de fissure et de l'emplacement de la pointe de fissure dans le champ de déplacement . . . . . 106
3.3.1 Ouverture de fissure . . . . . 106
3.3.2 Emplacement de la pointe de fissure . . . . . 108
3.4 Résultats et discussion . . . . . 110
3.4.1 Cartes de déplacement et de déformation. . . . . 110
3.4.2 Courbes force - ouverture de fissure. . . . . 112
3.4.3 Courbe force - longueur de fissure . . . . . 117
3.4.4 Taux de restitution d'énergie critique . . . . . 119
3.4.5 Discussion . . . . . 125
3.5 Conclusion . . . . . 126

**4 Étude expérimentale en mode mixte 129**

4.1 Introduction . . . . . 129
4.2 Matériaux et méthodes . . . . . 129
4.2.1 Présentation et identification des éprouvettes . . . . . 131
4.2.2 Images de quelques éprouvettes testées . . . . . 132
4.3 Résultats des essais en mode mixte . . . . . 134
4.3.1 Cartes de déplacements et de déformations . . . . . 135
4.3.2 Courbes force - ouverture de fissure . . . . . 138
4.3.3 Taux de restitution d'énergie . . . . . 143
4.4 Comparaisons et analyses . . . . . 155
4.5 Conclusion . . . . . 158

**5 Étude numérique et comparaison avec les résultats expérimentaux 159**

5.1 Introduction . . . . . 159

5.2 Caractéristique des matériaux . . . . . 160

5.3 Modélisation par éléments finis (EF) . . . . . 163

5.3.1 Présentation de Cast3M . . . . . 163

5.3.2 Géométrie et maillage . . . . . 163

5.4 Résolution du problème d'amorçage et de propagation de fissure . . . . . 165

5.4.1 Introduction . . . . . 165

5.4.2 Méthodes énergétiques . . . . . 165

5.4.3 Interprétation physique de l'intégrale $M\theta$ . . . . . 169

5.4.4 Algorithme de résolution . . . . . 170

5.4.5 Procédure d'obtention du champ $\theta$ . . . . . 172

5.4.6 Procédure $M\theta$ . . . . . 173

5.5 Résultats numériques et analyse . . . . . 173

5.5.1 Taux de restitution d'énergie . . . . . 173

5.5.2 Réduction de l'éprouvette MMCG . . . . . 177

5.5.3 Plage de propagation des éprouvettes CTS et MMCG . . . . . 177

5.6 Conclusion . . . . . 179

**Conclusions générales et perspectives 184**

**Bibliographie 185**

**Annexe A. Difficultés rencontrées 198**

**Annexe B. Caractéristiques de l'acier du système Arcan 201**

**Annexe C. Résultats du chapitre 5 203**

# Table des figures


1.1 Les principales fonctions du bois de l'arbre [1]. . . . . 34

1.2 Orthotropie locale du bois : deux plans (RL et RT) de symétrie matériellle [2]. 37

1.3 Les différents types de bois dans un arbre [2]. . . . . 38

1.4 Schéma des trois plans anatomiques d'observation de la structure ligneuse chez les angiospermes et les gymnospermes (modifié de Grosser [3]). . . . . 41

1.5 Elements de vaisseau dont les extrémités sont perforées. . . . . 42

1.6 Les trois principaux constituants d'une fibre de bois. . . . . 43

1.7 Composition chimique du bois [1]. . . . . 44

1.8 Cernes de croissance bien visible des essences tempérées. . . . . 55

1.9 Carte des différents climats du globe. . . . . 57

1.10 Image d'okoumé abattu et transformé en contreplaqués. . . . . 59

1.11 Photo d'iroko sur pied et abattu. . . . . 60

1.12 Deux images montrant le padouk sur pied et abattu. . . . . 62

2.1 Définition des modes de sollicitation. . . . . 67

2.2 Eprouvette SENT. . . . . 68

2.3 Eprouvette CANTILEVER à inertie variable. . . . . 68

2.4 Eprouvette DCB [4]. . . . . 69

2.5 Eprouvette DCB à inertie variable [5]. . . . . 70

2.6 Éprouvette CTS [6]. . . . . 70

2.7 Eprouvette bois [7]. . . . . 71

2.8 Eprouvette ws. . . . . 72

2.9 Zones englobant la pointe de fissure [8]. . . . . 75

2.10 Définition des axes (x,y) et des coordonnées (r,$\theta$) au voisinage de l'extrémité d'une fissure . . . . . 76

2.11 Propagation de fissure sur une longueur $\Delta a$ [9]. . . . . 80

2.12 Propagation stable à force imposée ou à déplacement imposé [9]. . . . . 82

2.13 Variation de la force lors d'une propagation de fissure à force imposée ou à déplacement imposé [9]. . . . . 82

2.14 Représentation d'une grille croisée [10]. . . . . 87

3.1 De l'arbre aux éprouvettes bois. . . . . 94

3.2 Dimensions de l'éprouvette CTS (en $mm$). . . . . 96

3.3 Exemples d'éprouvettes CTS. . . . . 96

3.4 Dimensions de l'éprouvette MMCG modifiée (en $mm$). . . . . 97

3.5 Éprouvettes typiques MMCG des trois essences : Okoumé, Iroko et Padouk. . 97

3.6 Exemples typiques d'éprouvettes MMCG équipées de grilles. . . . . 99

3.7 Dimensions du système de fixation Arcan (en mm). . . . . 101

3.8 Eprouvette MMCG dans le système de fixation Arcan. . . . . 101

3.9 Exemple de grilles transférées sur les éprouvettes CTS et MMCG [11]. . . . . 103

3.10 Balance et composants utilisés . . . . . 104

3.11 Les deux étuves utilisées . . . . . 104

3.12 Montage expérimental. . . . . 105

3.13 Courbe de forces critiques en fonction de l'ouverture de fissure. . . . . 106

3.14 Points A et B utilisés pour déterminer l'ouverture de fissure $U_y$. . . . . 107

3.15 Abscisse de la pointe de fissure obtenue pour trois valeurs de seuil différentes de $\varepsilon_{yy}$. . . . . 109

3.16 Emplacement de la pointe de fissure. . . . . 109

3.17 Exemple de cartes de déplacement (a) et de cartes de déformation (b) pour les essences d'okoumé (O) et de padouk (P) avec des éprouvettes CTS de deux épaisseurs (12,5 et 20 $mm$). . . . . 111
3.18 Exemple de cartes de déplacement (a) et de cartes de déformation (b) pour les essences d'okoumé (O) et de padouk (P) avec des éprouvettes MMCG de deux épaisseurs (15 et 20 $mm$). . . . . 112
3.19 Courbes force en fonction de l'ouverture de fissure montrant la différence entre le déplacement de traverse et le déplacement obtenu avec la grille. . . . . 113
3.20 Courbes force en fonction de l'ouverture de fissure pour les éprouvettes CTS. 114
3.21 Courbes force en fonction de l'ouverture de fissure pour les éprouvettes de MMCG d'okoumé et deux épaisseurs (15 $mm$ et 20 $mm$). . . . . 115
3.22 Courbes force en fonction de l'ouverture de fissure pour les éprouvettes de MMCG d'Iroko et deux épaisseurs (15 $mm$ et 20 $mm$). . . . . 116
3.23 Courbes force en fonction de l'ouverture de fissure pour les éprouvettes de MMCG Padouk et deux épaisseurs (15 $mm$ et 20 $mm$). . . . . 116
3.24 Exemple de longueur de fissure en fonction de la force pour deux éprouvettes CTS (épaisseur 20 $mm$). . . . . 117
3.25 Exemple de courbe longueur de fissure en fonction de la force pour les trois essences MMCG (épaisseur : 15 $mm$ et 20 $mm$). . . . . 119
3.26 Taux de restitution d'énergie critique d'okoumé (O), de l'iroko (I) et du padouk (P) (épaisseur 12,5 $mm$ et 20 $mm$) pour les éprouvettes CTS. . . . . 120
3.27 Taux de restitution d'énergie critique $Gc$ en fonction de la longueur de fissure pour l'okoumé (O). . . . . 122
3.28 Taux de restitution d'énergie critique $Gc$ en fonction de la longueur de fissure pour l'iroko (I). . . . . 123
3.29 Taux de restitution d'énergie critique $Gc$ en fonction de la longueur de fissure pour le padouk (P). . . . . 124

4.1 Blocs de bois dans lesquels ont été usinées les éprouvettes . . . . . 130

4.2 Montage expérimental . . . . . 131

4.3 Projection de la force suivant les axes en mode mixte . . . . . 131

4.4 Exemples d'éprouvettes d'okoumé : face sans grille (a) et face avec grille (b) 133

4.5 Exemples d'éprouvettes d'iroko et du padouk : (a) épaisseur 12,5 $mm$ à $45^0$ et (b) épaisseur 20 $mm$ à $15^0$ . . . . . 134

4.6 Un exemple des cartes de déplacements et des déformations des trois essences pour $\alpha = 15^0$ : (a) b=15 $mm$ et (b) b=20 $mm$. . . . . 136

4.7 Un exemple typique de cartes de déplacements et de déformations pour $\alpha = 30^0$ : (a) okoumé (b=15 $mm$), (b) okoumé et padouk (b=15 $mm$) et (c) iroko et okoumé (b=20 $mm$), obtenues avec une longueur de fissure initiale différente 137

4.8 Cartes de déplacements et de déformations pour $\alpha = 45^0$ : (a) des trois essences b=12,5 $mm$ et (b) iroko et padouk b=20 $mm$ . . . . . 138

4.9 Force en fonction de l'ouverture de fissure des trois essences pour $\alpha = 15^0$ et b=15 $mm$. . . . . 139

4.10 Force en fonction de l'ouverture de fissure des trois essences pour $\alpha = 15^0$ et b=20 $mm$ . . . . . 139

4.11 Force en fonction de l'ouverture de fissure pour $\alpha$ =$30^0$ : okoumé et padouk (b=15 $mm$) et iroko et okoumé (b=20 $mm$) obtenues pour différentes fissures initiales . . . . . 140

4.12 Courbes force en fonction de l'ouverture de fissure de l'okoumé pour $b = 15$ $mm$ et $\alpha = 30^0$ . . . . . 141

4.13 Force en fonction de l'ouverture de fissure des trois essences pour $b = 12{,}5$ $mm$ et $\alpha = 45^0$ . . . . . 142

4.14 Force en fonction de l'ouverture de fissure pour l'iroko et le padouk pour $b =$ 15 $mm$ et pour $\alpha = 45^0$ . . . . . 142

4.15 Taux de restitution d'énergie en fonction de la longueur de fissure des trois essences : part de $G_I$ (b=15 $mm$ et $\alpha = 15^0$) . . . . . 143

4.16 Taux de restitution d'énergie en fonction de la longueur de fissure des trois essences : part de $G_{II}$ (b=15 $mm$ et $\alpha = 15^0$) . . . . . 144
4.17 Valeurs moyennes minimales de $G_{ic}$ (avec barres d'erreurs) des trois essences : part du mode I et du mode II pour les éprouvettes b=15 $mm$ et $\alpha = 15^0$ . . 144
4.18 Taux de restitution d'énergie en fonction de la longueur de fissure des trois essences : part de $G_I$ (pour $b$=20 $mm$ et $\alpha = 15^0$) . . . . . 146
4.19 Taux de restitution d'énergie en fonction de la longueur de fissure des trois essences : part de $G_{II}$ (pour $b$=20 $mm$ et $\alpha = 15^0$) . . . . . 147
4.20 Valeurs moyennes de $G_{ic}$ (avec écart type) des trois essences : part du mode 1 et du mode 2 (éprouvettes pour $b$= 20 $mm$ et $\alpha = 15^0$ . . . . . 147
4.21 Courbes taux de restitution d'énergie en fonction de la longueur de fissure d'okoumé et du padouk : part de $G_I$ et part de $G_{II}$ pour 15 $mm$ . . . . . 149
4.22 Taux de restitution d'énergie en fonction de la longueur de fissure d'iroko et d'okoumé : part de $G_I$ et part de $G_{II}$ pour 20 $mm$ . . . . . 149
4.23 Taux de restitution d'énergie en fonction de la longueur de fissure d'okoumé : part de $G_I$ (pour $b$=15 $mm$ et $\alpha$=30$^0$) . . . . . 150
4.24 Taux de restitution d'énergie en fonction de la longueur de fissure de l'okoumé : part de $G_{II}$ (pour $b$=15 $mm$ et $\alpha$=30$^0$) . . . . . 151
4.25 Evolution du rapport de $G_I$ / $G_{II}$ en fonction de la longueur de fissure de l'okoumé (pour $b$=15 $mm$ et $\alpha = 30^0$) . . . . . 151
4.26 Taux de restitution d'énergie en fonction de la longueur de fissure des trois essences : part de $G_I$ (pour $b$=12,5 $mm$ et $\alpha$=45$^0$) . . . . . 153
4.27 Taux de restitution d'énergie en fonction de la longueur de fissure des trois essences : part de $G_{II}$ (pour $b$=12,5 $mm$ et $\alpha$=45$^0$) . . . . . 154
4.28 Taux de restitution d'énergie en fonction de la longueur de fissure d'iroko et de padouk : part de $G_I$ et part de $G_{II}$ (pour $b$=20 $mm$ et $\alpha$=45$^0$) . . . . . 155
4.29 Valeurs moyennes $G_I - G_{II}$ en fonction de l'angle de mixité des trois essences (pour $b$= 20 $mm$) . . . . . 156

5.1 Eprouvettes maillées : (a) MMCG et (b) CTS. . . . . 164
5.2 Dispositif Arcan et éprouvette MMCG avec position des angles de chargement. 164
5.3 Définition des paramètres autour de la pointe de fissure (a) et définition du champ $\theta$ (b). . . . . 167
5.4 Visualisation des déplacements virtuels : (a) avec une éprouvette MMCG et (b) éprouvette CTS. . . . . 170
5.5 Algorithme de fissuration numérique. . . . . 171
5.6 Illustration du champ $\theta$ en pointe de fissure : (a) éprouvette MMCG et (b) éprouvette CTS. . . . . 172
5.7 Comparaison des courbes expérimentales numériques des trois essences (mode 1 pour b=15 $mm$ et $\alpha$ =$15^0$. . . . . 174
5.8 Comparaison des courbes expérimentales numériques des trois essences (mode 2 pour b=15 $mm$ et $\alpha$ =$15^0$. . . . . 175
5.9 Courbes de l'évolution du rapport $G_I/G_{II}$ : valeurs expérimentales et numériques des deux modes pour b=15 $mm$ et $\alpha$ =$30^0$. Avec $O_i$ nom et numéro de l'éprouvette (O=okoumé, i=3, 6 et 7 numéros des éprouvettes testées). . . . 175
5.10 Eprouvette MMCG : (a) éprouvette bois MMCG et (b) éprouvette bois MMCG modifiée. . . . . 177
5.11 Plage de propagation en mode d'ouverture ($\alpha$=$0^0$) des éprouvettes MMCG et CTS pour les éprouvettes de $b$=20 $mm$. . . . . 178
12 Problèmes de cassures rencontrés au niveau des congés de raccordement . . . 199
13 Observation des cernes : (a) essences tempérées et (b) essences tropicales . . 200

# Liste des tableaux

1.1 Les taux d'humidité à respecter dans la construction bois [12]. . . . . 52

1.2 Propriétés physiques et mécaniques, pour un taux d'humidité de 12% [13]. . 63

1.3 Caractéristiques diverses, pour un taux d'humidité de 12 % [13]. . . . . 63

2.1 Principales méthodes de mesure de champs cinématiques classées en fonction des grands domaines d'application. . . . . 84

3.1 Notations utilisées dans ce chapitre. . . . . 98

3.2 Caractéristiques mécaniques. MEL : module d'élasticité longitudinal, HI : teneur en humidité interne du matériau, CRC : contrainte de rupture en compression, CRFS : contrainte de rupture en flexion statique, SD : écart-type. . 100

3.3 Valeur de la force à la rupture et ouverture de fissure correspondante pour les éprouvettes CTS. . . . . 114

3.4 Valeurs spécifiques des éprouvettes de l'okoumé : $G_{ic}$ est la valeur initiale du taux de restitution d'énergie critique ; $G_{mc}$ est la valeur de taux de restitution d'énergie maximal à la rupture, Moy est la moyenne. . . . . 122

3.5 Valeurs spécifiques des éprouvettes de l'iroko : $G_{ic}$ est la valeur initiale du taux de restitution d'énergie critique ; $G_{mc}$ est la valeur de taux de restitution d'énergie maximal à la rupture, Moy est la moyenne. . . . . 123

3.6 Valeurs spécifiques des éprouvettes de padouk : $G_{ic}$ est la valeur initiale du taux de restitution d'énergie critique ; $G_{mc}$ est la valeur du taux de restitution d'énergie maximal à la rupture, Moy est la moyenne. . . . . 124

3.7 Comparaison des valeurs moyennes de $G_{mc}$ pour les éprouvettes MMCG testées d'épaisseur 15 $mm$ (1) et 20 $mm$ (2) avec la littérature et SD est l'écart type. 125

4.1 Notations utilisées dans ce chapitre. . . . . 132

4.2 Comparaison des valeurs moyennes des trois essences (b=15 $mm$ et $\alpha = 15^0$). 145

4.3 Comparaison des valeurs moyennes des trois essences (pour b=20 $mm$ et $\alpha = 15^0$). . . . . 148

4.4 Comparaison des valeurs moyennes pour les sept éprouvettes de l'okoumé (pour b=15 $mm$ et $\alpha = 30^0$). . . . . 152

4.5 Comparaison des valeurs moyennes des trois essences. . . . . 154

4.6 Comparaison des valeurs moyennes des trois essences. . . . . 156

5.1 Valeurs de quelques constantes. . . . . 161

5.2 Caractéristiques mécaniques et élastiques des essences. . . . . 162

3 Composition chimique (%). . . . . 202

4 Caractéristiques mécaniques à température ambiante au moment de la livraison. 202

5 Tableau comparatif des résultats obtenus avec les éprouvettes CTS d'okoumé et de padouk : valeurs expérimentales et numériques pour $b = 20$ $mm$ et $\alpha = 0^0$. 203

6 Tableau comparatif des résultats obtenus avec les éprouvettes MMCG d'iroko : valeurs expérimentales et numériques obtenues en mode 1 et mode 2. . . . . 204

7 Tableau comparatif des résultats obtenus avec les éprouvettes MMCG d'okoumé : valeurs expérimentales et numériques obtenues en mode 1 et mode 2. . . . . 205

8 Tableau comparatif des résultats obtenus avec les éprouvettes MMCG de padouk : valeurs expérimentales et numériques obtenues en mode 1 et mode 2. 206

# Nomenclature

| | |
|---|---|
| $a$ | longueur de fissure totale |
| $a_i$ | longueur de fissure initiale |
| $b$ | épaisseur de l'éprouvette bois |
| $C_1, C_2$ | complaisances reduites en mode 1 et mode 2 |
| $CRC$ | contrainte de rupture en compression |
| $CRFS$ | contraint de rupture en flexion statique |
| $CTS$ | Compact Tension Shear |
| $E$ | élasticité |
| $F_{ci}$ | force critique qui induit une propagation de fissure |
| $G$ | taux de restitution d'énergie |
| $Gc$ | taux de restitution d'énergie critique |
| $G_{ic}$ | valeur minimale du taux de restitution d'énergie |
| $G_{mc}$ | valeur maximale du taux de restitution d'énergie (à la rupture) |
| $G_I$ | part du mode 1 du taux restitution d'énergie après découplage |
| $G_{II}$ | part du mode 2 du taux restitution d'énergie après découplage |
| $G_{ic1}$ | valeur minimale du taux de restitution d'énergie (part du mode 1) |
| $G_{ic2}$ | valeur minimale du taux de restitution d'énergie (part du mode 2) |
| $G_{mc1}$ | valeur maximale du taux de restitution d'énergie (part du mode 1) |
| $G_{mc2}$ | valeur maximale du taux de restitution d'énergie (part du mode 2) |
| $HI$ | teneur en humidité interne du matériau (bois) |
| $HR$ | humidité relative |
| $J$ | intégrale de Rice |
| $K_I$ *et* $K_{II}$ | facteurs d'intensité de contrainte en mode 1 et 2 |

| | |
|---|---|
| $M\theta$ | forme modélisable de l'intégrale $M$ |
| $MEL$ | module d'élasticité longitudinal |
| $MMCG$ | Mixed Mode Crack Growth |
| $s^p_{11}, s^p_{22}, s^p_{12}, s^p_{33},$ | composantes du tenseur de complaisance |
| $T$ | température |
| $V$ | domaine volumique |
| $u, v$ | champs de déplacements réel et virtuel de composante $u_i$ et $v_i$ |
| $x_1, x_2$ | axes géométriques |
| $\rho$ | densité relative |
| $\rho_0$ | densité |
| $\phi$ | diamètre |
| $\alpha$ | angle de mixité |
| $\Delta a$ | incrément la fissure |
| $SD$ | écart-type |
| $\nu$ | coefficient de poisson |
| $\underset{n}{\rightarrow}$ | vecteur normal de composante $n_j$ |
| $\Gamma_1$ et $\Gamma_2$ | contours surfaciques |
| $\underset{n}{\rightarrow}_1, \underset{n}{\rightarrow}_2$ | vecteurs normaux respectifs aux contours $\Gamma_1$ et $\Gamma_2$ |
| $\sigma^u_{ij}, \sigma^v_{ij}$ | composantes des champs de déplacements réel et virtuel |
| $\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}$ | composantes des tenseurs de contrainte et de déformation |
| $\partial V$ | contour de la pointe de fissure |
| $\Omega$ | domaine d'intégration |

# Introduction générale

### Préambule

Le bois contribue à limiter durablement le réchauffement climatique en limitant les gaz à effet de serre. En Afrique centrale et plus particulièrement dans les régions équatoriales, la forêt joue un rôle clé dans cette régulation. Dans le cas du Gabon, avec une superficie de 267 667 $km^2$ qui abrite diverses espèces, la forêt représente plus de 85% du territoire (soit plus de 200 000 $km^2$) [14], dont 13% représentent des parcs nationaux protégés. Depuis les années cinquante cependant, la quasi-totalité de cette production forestière gabonaise est exportée sous forme de grumes. Avant 1970 l'exploitation forestière a occupé jusqu'à un tiers des emplois salariés au Gabon, et la loi prévoyait que 75% des grumes devaient être transformées au Gabon, mais les analyses montrent que seules 25 à 35% sont transformées avant cette date. A ce constat, il faut ajouter les considérations environnementales du moment. Ainsi, par souci d'une bonne gestion de la forêt et de façon à contribuer significativement à la régulation du changement climatique, le gouvernement gabonais a décidé d'interdire l'exportation des grumes au 1er janvier 2010. Cette décision récente du gouvernement gabonais a ouvert ainsi la voie à la transformation locale de cette richesse naturelle, et par voie de conséquence, à la vulgarisation et à la généralisation de ce matériau dans les constructions locales et sous-régionales. Cependant, le comportement mécanique de ces espèces, et plus particulièrement leurs propriétés à la rupture, reste peu étudié dans la littérature, ce qui entrave la conception fiable de telles structures. Cela peut conduire par exemple à la défaillance soudaine des structures, ce qui n'est pas acceptable.

**Objectifs et portée de la recherche**

Cette thèse tient son originalité du fait que la fissuration est étudiée pour la première sur les essences tropicales qui ont la particularité d'avoir une croissance continue. Le but visé est la connaissance des paramètres mécaniques d'essences méconnues à ce jour. L'étude des propriétés de rupture des bois tropicaux est cruciale pour guider les ingénieurs locaux dans le choix des matériaux de construction, mais aussi pour conforter les populations locales dans leur choix de matériaux de construction autres que le béton et l'acier. Elle s'inscrit aussi dans une vision globale qui est l'implantation au sein de l'Ecole Polytechnique de Masuku d'un pôle de recherche scientifique et technologique sur le matériau bois tropical. Ces objectifs coïncident parfaitement avec le projet actuel de développement des capacités institutionnelles de l'Université des Sciences et Techniques de Masuku en matière de recherche et de formation des formateurs.

L'objectif de ce travail de thèse est d'examiner le comportement d'essences produites au Gabon telles que le *Milicia excelsa* (iroko), l' *Aucoumea klaineana Pierre* (okoumé) et le *Pterocarpus soyauxii* (padouk), pour lesquelles les études concernant la caractérisation des propriétés mécaniques à la rupture font encore défaut à ce jour. Cette connaissance représentera une étape importante pour l'utilisation optimale de ces essences à des fins d'applications structurelles. En effet, le dimensionnement de telles structures nécessite une connaissance fine du comportement mécanique du matériau constitutif, notamment vis-à-vis de la fissuration. Ce phénomène précède en effet la ruine finale de la structure. A ce titre, il mérite une attention toute particulière. Le travail proposé consiste principalement à conduire plusieurs séries d'essais bien choisis, en effectuant des mesures fines réalisées par mesures de champs cinématiques obtenues par la méthode dite de la grille [15]. Il consiste aussi à modéliser le comportement observé, tant du point de vue de l'initiation que celui de la propagation de fissure. Enfin, le travail permet d'identifier des grandeurs pilotant les modèles associés aux phénomènes observés.

**Contenu de la thèse**

Ce manuscrit se structure autour de cinq chapitres :

- **le chapitre 1**.

Nous ferons ici une étude bibliographique sur le matériau bois dans sa généralité. Il est question de rappeler les éléments qui peuvent influencer le comportement du bois vis-à-vis de la rupture, notamment sur les éléments constitutifs du matériau bois sur le plan macroscopique et microscopique. Les propriétés physiques et mécaniques du bois sont aussi rappelées. Dans la dernière partie du chapitre nous parlerons des points qui font la particularité des climats tempéré et tropical équatorial. Les trois essences choisies sont aussi déscrites.

- **le chapitre 2**.

Dans cette partie sont rappelées quelques formules essentielles de la mécanique de la rupture linéaire. Une courte bibliographie sur certaines éprouvettes utilisées est également conduite pour étudier la fissuration des essences tempérées. C'est aussi l'occasion de prendre en main la méthode de la grille. En effet, des avancées conduites à ce jour ont montré que les performances de cette technique devraient permettre d'obtenir des informations d'une très grande richesse sur les déplacements, la distribution des déformations en front de fissures et sur l'ouverture de ces dernières. Ces données seront très précieuses pour construire et valider des modèles de fissuration adaptés.

- **le chapitre 3**.

Dans ce chapitre, divers essais en mode 1 sont effectués sur des éprouvettes CTS [6] et MMCG modifiée [11]. Nous utiliserons les mesures réalisées pour en déduire les différentes longueurs et ouvertures de fissure, les taux de restitution d'énergie ainsi que les facteurs d'intensité de contrainte (et leurs valeurs critiques) des trois essences. Nous observerons aussi l'effet de l'épaisseur d'une part et de la densité d'autre part sur la fissuration de ces essences. Une comparaison est réalisée entre les paramètres de la fissuration obtenus avec les essences tropicales et ceux issus de la bibliographie sur les essences tempérées.

• **le chapitre 4**.

Pour les mêmes essences, la fissuration en mode mixte est étudiée pour trois angles de mixité. En mode d'ouverture (chapitre 3), l'éprouvette est sollicitée en traction, la fissure est censée se propager suivant la direction du fil du grain. Mais puisque nous sommes en présence du bois, un matériau hétérogène, par conséquent il y a un risque important de bifurcation de fissure lors de la propagation, donc de cisaillement. C'est pour cette raison que les essais sont aussi effectués en mode de cisaillement, en mode mixte. Il s'agit ici d'examiner la propagation de la fissuration, toujours avec cette même technique de la grille, avec la seule éprouvette MMCG modifiée qui a la particularité d'avoir une géométrie adaptée qui permet de contrôler la propagation de fissures dans du bois.

• **le chapitre 5**.

Cette dernière partie permet de mener une étude numérique sur les éprouvettes CTS [6] et MMCG modifiée [11]. Il s'agit ici de décrire les modèles proposés dans la bibliographie pour modéliser la propagation de fissures dans ce type de matériau et d'identifier les paramètres pilotant ces modèles pour les essences testées. Les résultats obtenus numériquement seront comparés aux résultats expérimentaux des chapitres 3 et 4.

# Chapitre 1

# Généralités sur le matériau bois et choix des essences

## 1.1 Introduction

Dans ce chapitre, les propriétés mécaniques du bois sont rappelées du fait de son hétérogénéité et de son exposition à l'humidité. Il a été démontré que l'humidité du bois est une caractéristique importante qui influe directement sur ses autres propriétés physiques et sur ses propriétés mécaniques. Le comportement du matériau bois dépend fortement de la teneur en humidité dans celui-ci, de la température ainsi que de l'histoire de sorption de l'éprouvette ou de la structure considérée. La variation de l'humidité va donc entraîner, pour le bois, les variations de dimensions, de forme, de volume, de densité et donc par conséquent de résistance.

Les arbres, composantes dominantes de systèmes écologiques variés et complexes que sont les forêts, constituent l'un des réservoirs vivants le plus important de monoxyde de carbone, ce "gaz à effet de serre" qui contribue le plus au réchauffement de la terre et à l'évolution climatique de la planète. Par le biais d'un processus chimique appelé photosynthèse, les arbres et nombreuses autres plantes absorbent le gaz carbonique de l'air et le combine avec la lumière du soleil pour obtenir l'énergie dont ils ont besoin pour vivre. Les arbres transforment le gaz

carbonique en élément solide, le stockent dans leurs troncs, branches et feuilles, et dégagent de l'oxygène dans l'atmosphère. La capacité à absorber le gaz carbonique de l'atmosphère et à produire de l'oxygène a donné aux forêts le nom de "poumons du monde." Le gaz carbonique est surtout émis par la combustion du pétrole, du charbon, du gaz naturel ou d'autres combustibles " fossiles " à des fins industrielles, énergétiques et de transport. Comme matériau, le bois est utilisé par les industries de première transformation qui le traite, le modifie et lui confère de multiples formes. Il s'emploie soit directement comme matière première - par exemple pour la fabrication d'éléments de menuiserie, de meubles, d'emballages - soit pour la réalisation de matériaux dérivés tels que les panneaux de particules et contreplaqués. La grande variété des bois, de propriétés et d'aspects différents, permet de nombreuses utilisations dans de multiples domaines de l'environnement humain. Notre étude est basée sur des bois tropicaux, donc issus des arbres constitués principalement des feuillus (Angiospermes) qui présentent une structure des plus complexe que les Gymnospermes (résineux). Par ailleurs, les feuillus peuvent être caractérisés par leur densités très variables. Parmi, les essences feuillues que l'on trouve dans les régions tempérées et tropicales, nous trouvons un nombre très important d'espèces qui peuvent être classées en cinq catégories :

- bois très légers et tendres (densité 0,4 à 0,45) comme le peuplier, le saule, le tilleul ;
- bois légers et tendres (densité 0,45 à 0,55) comme l'okoumé, l'aulne, le bouleau, tremble ;
- bois mi-lourds et mi-durs (densité 0,56 à 0,70) comme l'iroko, le châtaignier, le chêne tendre, le pin ;
- bois lourds et durs (densité 0,70 à 0,85) comme le padouk, le movingui, le charme, le chêne dur, l'érable, le frêne, le hêtre, le merisier, le noyer, l'orme, le platane, le poirier ;
- bois très lourds et très durs (densité 0,85 et plus) comme l'azobé, le buis, le chêne vert, le cornouiller, le sorbier.

Dans ce chapitre il est question de définir le matériau bois, notamment avec ses aspects physiques et ses propriétés mécaniques. Les aspects macroscopique et microscopique seront rappelés. Il sera aussi question du choix opéré sur nos trois essences bois, à savoir l'okoumé, l'iroko et le padouk. Les raisons et les motivations du choix des trois essences sont expliqués,

notamment sur leur utilisation dans l'industrie, la construction, leur présence dans les foyers et leur importance dans le quotidien des populations.

## 1.2 Éléments constitutifs du matériau bois

### 1.2.1 Le bois

Issu des arbres, le bois est défini par la norme NF B 50-003 et d'après [16] comme un "ensemble de tissus très résistants qui constituent le tronc, les branches et les racines des plantes ligneuses, formés par des vaisseaux conduisant la sève brute, les fibres et le parenchyme (voir Figure 1.1). Issu du fonctionnement du cambium périphérique, le bois est situé entre celui-ci et la moelle. Cette définition ne s'applique pas aux monocotylédones (bambous, palmiers, rotins)". En effet, certaines plantes (palmiers, bambous...) produisent des tissus lignifiés mais non issus d'un cambium secondaire : il ne s'agit donc pas de bois.
Autrement dit, le bois est un ensemble de tissus composés des fibres ligneuses, trachéides, de parenchymes et de vaisseaux. Dans les arbres, le bois assure trois principales fonctions : la conduction de la sève brute de la racine vers les branches, le soutien mécanique de l'ensemble de l'arbre contre son poids et les forces extérieures, et la réserve des substances nutritives comme l'amidon (voir figure 1.1).
Il s'agit de l'un des matériaux les plus appréciés pour ses propriétés mécaniques, pour son pouvoir calorifique et comme matière première pour de multiples branches industrielles. Il a de nombreux usages dans le bâtiment et l'industrie (industries papetières, industries chimiques...), et en tant que combustible.

Le bois est l'un des rares matériaux 100% naturel. Ses principaux composants chimiques sont le carbone, l'oxygène et l'hydrogène. C'est également une matière organique principalement constituée de cellulose et de lignine renfermant un faible pourcentage d'éléments minéraux et une part d'humidité variable. Le bois est aussi écologique car son utilisation permet de limiter les émissions de gaz à effet de serre et, de ce fait, il permet de lutter efficacement contre le changement climatique.

Pendant sa croissance, le jeune arbre absorbe du carbone, avec lequel il fabrique les cellules du bois et rejette de l'oxygène dans l'atmosphère. Le bois est donc un véritable "puits de carbone". A la maturité de l'arbre, le processus absorption et rejet est ralentit, d'où la nécessité de replanter de jeunes arbres pour conserver cet équilibre. Enfin, le bois valorisé sous forme de meubles, parquets ou bâtiments est un stock de carbone. A la différence d'autres produits comme le ciment, le plastique ou l'acier, le bois est un matériau qui nécessite très peu d'énergie pour sa mise en œuvre (production et fabrication). Le bois est également 100% recyclable et biodégradable, et sa durée de vie est supérieure à celle des autres matériaux.
Le bois a été l'un des premiers matériaux utilisés par l'homme. Au fil des siècles et d'une multitude d'expérimentations, les êtres humains du monde entier ont pu utiliser le bois dans différents domaines. Nous pouvons, dans le cas du continent Européen, citer quelques exemples : construction des arcs en if, les tonneaux en chêne, les manches d'outil en frêne, les billots de boucher en charme, les moyeux de roue en orme, les crosses de fusil en noyer, les sculptures en tilleul, les dents d'engrenage en cormier, etc. En Afrique, les exemples d'utilisation de ce matériau sont nombreux et le bois a toujours été présent dans l'existence des peuples de ce continent. Les exemples de son utilisation sont nombreux dans les traversées d'obstacles (ponts), la construction des bâtiments, les outils ménagers, la sculpture, etc.

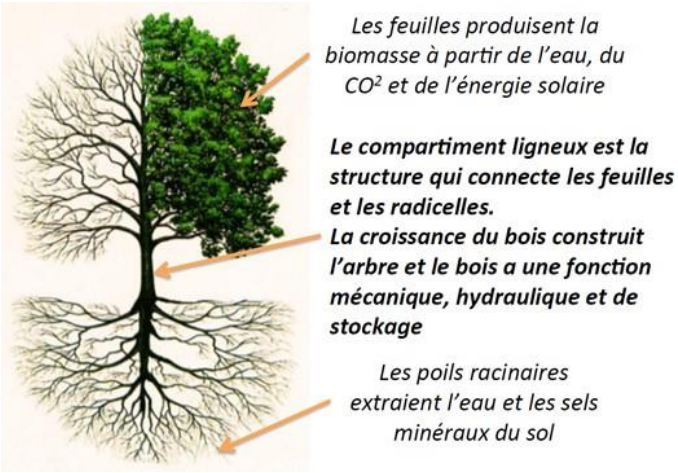



FIGURE 1.1 – Les principales fonctions du bois de l'arbre [1].

### 1.2.2 Les fonctions du bois de l'arbre

Une des trois fonctions principales assurée par le bois de l'arbre est une fonction mécanique des solides [1]. Elle est associée à une fonction de mécanique des fluides :

- mécanique des structures par la construction et la gestion de la posture de l'arbre, sa résistance aux efforts externes (accélération de la pesanteur, vent, charges transitoires, ...) et l'adaptation de la construction aux aléas de l'histoire de l'arbre (déracinement partiel, casse, ...) ;
- mécanique des fluides pour assurer la circulation de la sève brute (eau et sels minéraux) depuis les racines jusqu'aux feuilles dans le xylème puis de la sève élaborée (chargée en carbohydrates synthétisés par les feuilles) depuis la cime vers tous les compartiments de l'arbre.

Le bois de l'arbre est moteur en mécanique des structures, il construit la structure et gère la posture. Il n'est qu'acteur en mécanique des fluides, même si l'organisation géométrique du réseau de capillaires connectés du xylème et du phloème et si les capacités de biosynthèse des cellules à longue durée de vie du xylème et du phloème sont les clés de la réussite de la circulation par « aspiration » (tension dans le fluide) de la sève brute ou de la circulation par pression osmotique de la sève élaborée sur des dénivelés pouvant dépasser 100 $m$. Le couplage mécanique « fluide/structure » joue quant à lui un rôle essentiel dans la résistance à l'embolie dans un long circuit sous tension hydrostatique. Le bois participe aussi, bien entendu, à la perception des signaux de l'environnement par l'ensemble de ses cellules vivantes.
Trois autres fonctions importantes doivent être soulignées :

- une fonction d'autoprotection du bois vis-à-vis de l'extérieur (par l'épiderme véritable peau du bois) et par l'intérieur (duramen ou bois de cœur) ;
- une fonction de stockage de l'eau dans la masse du xylème et du phloème ;
- une fonction de biosynthèse de molécules actives, de stockage et de mobilisation de nutriments divers (sucres, amidons, matières grasses...) nécessaires à la vie ou à la survie de l'arbre (ou à sa multiplication végétative par bouturage).

A chaque instant, les différentes parties du bois de l'arbre sont créées ou modifiées pour bien répondre aux différentes fonctions, compte tenu de l'histoire passée et de l'environnement présent. Cette réponse est toujours « cadrée » par un pilotage de nature génétique qui définit des signatures propres à l'espèce (variations interspécifiques) et à l'individu (variations intra-spécifiques).

Le bois, a deux caractéristiques essentielles et primordiales qui sont l'anisotropie et l'hétérogénéité. L'anisotropie du bois est une conséquence directe de son hétérogénéité.

- il est hétérogène : il est constitué d'éléments de natures et de formes variées, ce sont les cellules ;
- il est anisotrope : c'est la conséquence directe de son hétérogénéité. Le bois est anisotrope car ses éléments sont orientés dans plusieurs directions déterminées ; il en résulte que ses propriétés mécaniques et physiques ne sont pas les mêmes dans tous les plans ou les sens dans lesquels on l'observe ou on l'utilise. Le caractère anisotrope du bois est lié également à ses particularités, notamment lié à la perturbation du fil du bois, provoqué par la présence d'un nœud, par un fil un ondulé, la présence du bois juvénile et de bois adulte, la présence de bois de compression et de bois de tension, la présence de contrainte de croissance, la présence de défauts et d'altérations, etc.

De façon à faciliter les études sur les comportements physiques et mécaniques, on prend comme référence trois types de section comme le montre la Figure 1.2 et définies de la manière suivante :

- section transversale (T), perpendiculaire au fût de l'arbre (tronc). Lorsqu'on regarde un arbre fraîchement abattu, on peut facilement se représenter une section transversale avec, en bois de bout, les cernes d'accroissement annuels qui correspondent à la matière ligneuse fabriquée par l'arbre au printemps ou en été suivant (un cerne complet est une couche de printemps plus une couche d'été) ;
- section tangentielle (L), longitudinale, dans le sens du fil du bois, et perpendiculaire aux rayons médullaires centrés sur le cœur de la grume. Lors du débit de la grume en plots (débit courant), les dessins des faces des premiers plateaux obtenus en sont

caractéristiques. Les Rayons médullaires ce sont les lames parenchymateuses, dont les plans passent par l'axe de la tige ou de la racine, séparant les faisceaux primaires (rayons médullaires primaires) ou coupant le bois et le liber secondaires (rayons médullaires secondaires) ;

– Section radiale (R), là aussi longitudinale, et dans le sens du fil du bois, mais parallèle aux rayons. Cette section est visualisable sur les plateaux débités à proximité du cœur.

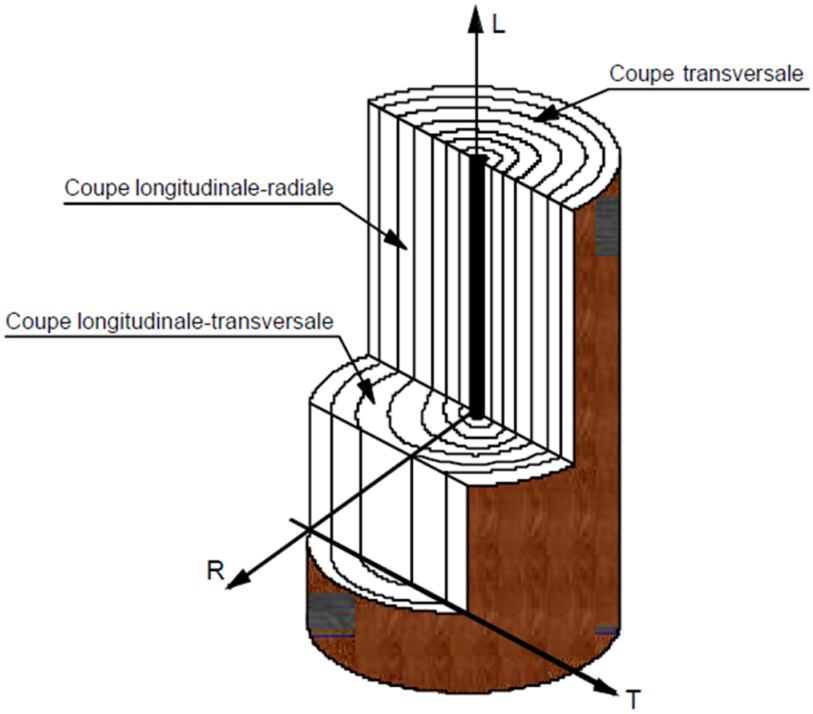



FIGURE 1.2 – Orthotropie locale du bois : deux plans (RL et RT) de symétrie matériellle [2].

## 1.3 Structure macroscopique et microscopique du bois

### 1.3.1 Échelle macroscopique

L'échelle macroscopique est définie comme l'échelle de l'arbre ou de la grume. La partie directement visible à cette échelle est l'écorce externe assurant la protection de l'arbre, de son environnement à son milieu biologique. La figure 1.3 montre les différents éléments qui participent à la croissance d'un arbre.

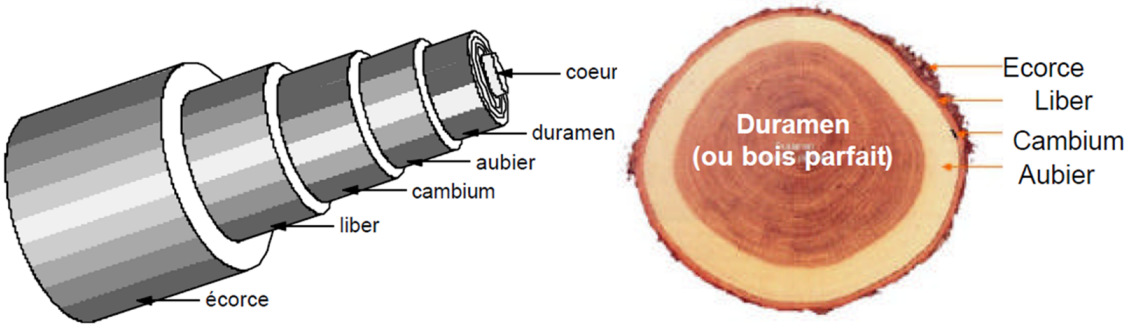



FIGURE 1.3 – Les différents types de bois dans un arbre [2].

Les différentes parties constituant le bois sont décrites ci-dessous :

### Moelle

C'est la partie la plus centrale de l'arbre, appelée aussi cœur, elle correspond à ce qui reste du xylème primaire. Importante dans les jeunes pousses, elle disparaît souvent avec l'âge pour ne laisser qu'un canal de faible section. La moelle est un ensemble de tissus spongieux qui évoluent en vieillissant.

### Bois

Le xylème secondaire lignifié, composé, en régions tempérées, présente de cernes visibles (ce qui n'est pas toujours le cas en régions tropicales). On distingue deux zones :

- le duramen (ou bois parfait). Il forme la masse principale du tronc. Formé par les cernes les plus anciens, il est composé de cellules mortes, lignifiées et imprégnées de tanin ou de colorants selon les essences. Il se distingue en général de l'aubier par une couleur plus foncée. Ses vaisseaux ne sont plus fonctionnels ;
- l'aubier. Il est constitué de couches concentriques de cellules non encore lignifiées formant un bois encore "imparfait". Formé par les cernes les plus récents, il y circule les matières nutritives. Les cernes se transforment en duramen après une période de 4 à 20 ans.

**Écorce**

C'est la partie externe, celle qui est directement visible et qui assure la protection de l'arbre, de son environnement à son milieu biologique. La figure 1.3 montre l'emplacement de l'écorce sur une coupe d'un arbre. Elle est composée de différentes parties :

- le cambium libéro-ligneux : zone de croissance ou méristème, c'est l'assise génératrice (de quelques cellules d'épaisseur) qui donne naissance au bois du côté interne et au liber (phloème secondaire) du côté extérieur. Le cambium libéro-ligneux produit plus de bois que de liber ;
- le liber : partie interne et « vivante » de l'écorce. Le liber comporte un ensemble de vaisseaux dans lesquels circule la sève élaborée. Les cellules du liber meurent lorsqu'elles se différencient : l'écorce s'exfolie, et tombe ou se fend longitudinalement ;
- le suber (ou liège) : partie la plus externe ayant un rôle de protection. Celle-ci contient une substance imperméable, la « subérine », qui protège les couches internes.

Entre le liber et le suber, il existe un second méristème : le cambium subéro-phellodermique (ou phellogène), qui produit le phelloderme du côté interne et le suber du côté externe. Cependant, contrairement au cambium libéro-ligneux le cambium subéro-phellodermique produit plus de suber (vers l'extérieur) que de phelloderme (vers l'intérieur). Il sert à compenser l'expansion de la circonférence de l'arbre, et à limiter les fentes créées par cette expansion. On observe également des structures allant du centre vers la périphérie : les rayons. En observant plus précisément les couches annuelles appelées « cernes », on peut voir qu'ils sont eux-mêmes divisés en deux zones. Le bois de printemps est la première zone formée chaque année ; c'est un bois tendre et riche en vaisseaux. La seconde zone est faite de bois d'été, plus dense et résistant. La différence entre les deux types de bois est plus ou moins visible selon les essences de bois : très visible chez le chêne dont le bois est hétérogène, elle l'est moins pour les arbres dont le bois est homogène comme le hêtre. Ces cernes sont le résultat d'une alternance des saisons, et sont absents chez les bois des arbres tropicaux qui croissent de manière plus continue.

### 1.3.2 Échelle microscopique

Sur le plan microscopique, l'observation montre qu'il existe deux types de bois, composés de différents types de tissus végétaux. Ces deux types sont décrits ci-dessous. Les Figures 1.4 et 1.5 présentent les constituants microscopiques de ces deux catégories de bois.

#### Bois résineux et feuillus

Les arbres sont classés en deux catégories : les résineux et les feuillus. La première est composée des gymnospermes ("résineux"). Ces arbres présentent une organisation simple et uniforme. Ils sont constitués de deux grands groupes de cellules : les trachéides et les cellules parenchymes. L'observation de ces deux types de cellules fait apparaitre la configuration suivante :

- des fibres trachéides, ayant à la fois les rôles de soutien et de conduction ;
- des rayons : fibres trachéides et parenchymes horizontaux ;
- des parenchymes verticaux qui assurent la répartition et l'emmagasinement des substances.

La seconde catégorie, regroupe les angiospermes ("feuillus"). Le bois des feuillus présente une plus grande diversité que celle des résineux et possède un certain nombre de types de cellules (vaisseaux, trachéides et cellules parenchymes). Les fonctions de soutien et de conduction sont effectuées par des cellules différentes :

- fibres (librifomes et trachéides) : ce sont des faisceaux de cellules résistantes, disposées dans le sens axial, ils assurent la rigidité et la résistance mécanique du bois. Il s'agit d'un bio composite constitué de cellulose, d'hémicellulose et de lignine ;
- vaisseaux : formés d'éléments de vaisseaux, ce sont des cellules creuses qui servent à conduire la sève brute depuis les racines jusqu'aux feuilles (voir Figures 1.3 et 1.4) ;
- parenchyme vertical : il est constitué de cellules parenchymateuses qui contribuent au transport des nutriments. Ces parenchymes, associés aux vaisseaux, donnent des motifs particuliers à chaque essence (particulièrement les essences tropicales) sur la coupe transversale (perpendiculaire à l'axe du tronc) ;

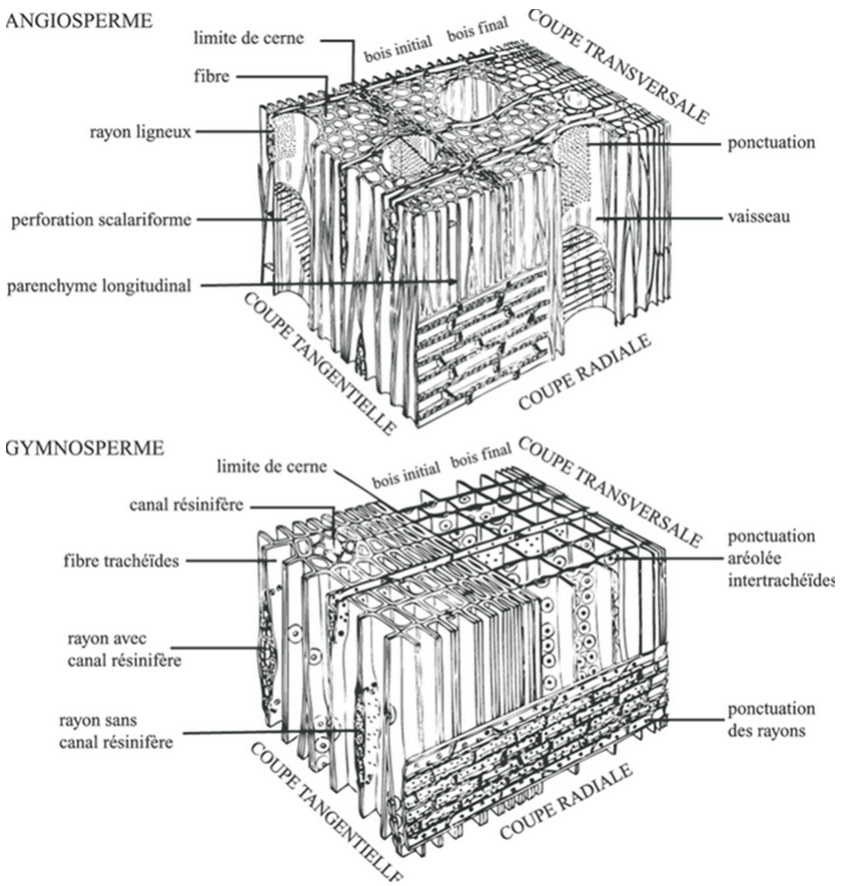



FIGURE 1.4 – Schéma des trois plans anatomiques d'observation de la structure ligneuse chez les angiospermes et les gymnospermes (modifié de Grosser [3]).

– rayons ligneux (ou médullaires) : il s'agit de parenchymes horizontaux constitués de cellules de réserve à parois épaissies et lignifiées. Ils accompagnent le tissu vasculaire. Ces cellules participent en outre à la fonction de soutien de l'arbre. Leur orientation est transversale et rayonnante en partant de l'axe longitudinal de l'arbre. La Figure 1.4 montre quelques rayons ligneux qui partent du centre du tronc.

La disposition des tissus, la forme et la taille des cellules, est appelée plan ou rayon ligneux. Celui-ci est caractéristique de chaque essence. Par exemple, il donne ce que l'on appelle « la maillure », qui est l'aspect de la coupe radiale du bois (coupe longitudinale dans le sens du rayon de l'arbre). Cette maillure est caractéristique chez le chêne, le hêtre, le platane, le niangon et l'acajou. Les cellules et les fibres sont orientées dans le sens axial qui détermine le « fil du bois ».

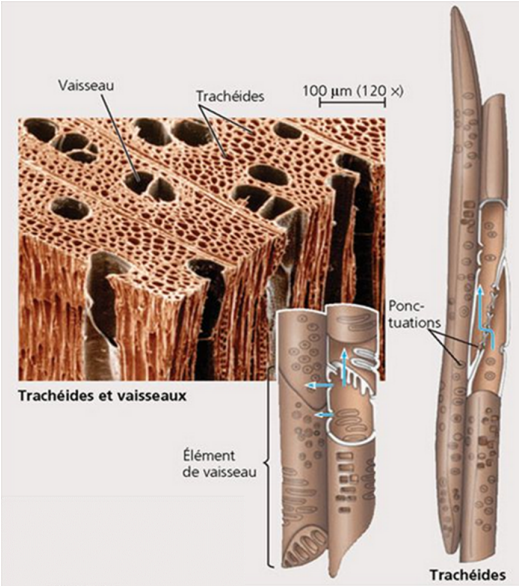



FIGURE 1.5 – Elements de vaisseau dont les extrémités sont perforées.

### 1.3.3 Composition chimique du bois

Le bois est un ensemble de cellules tubulaires de cellulose reliées entre elles par un produit chimique organique : la lignine. Ces cellules varient en taille et en forme, mais sont la plupart du temps longues et minces. Elles suivent l'axe longitudinal principal du tronc ou des branches de l'arbre. La structure de l'arbre est constituée de cellules (mortes ou vivantes) qui assurent la circulation de la sève, le stockage de réserves nutritives et de défense contre les agressions éventuelles. La composition chimique élémentaire du bois varie suivant les espèces. D'une manière générale, le bois est constitué à 50% de carbone, 42% d'oxygène, 6% d'hydrogène, 1% d'azote et 1% de minéraux [17] (principalement Ca, K, Na, Mg, Fe, Mn). Nous retiendrons comme principaux composants chimiques du bois : la cellulose, les hémicelluloses et les lignines. Il existe d'autres composants appelés extractifs qui ne contribuent pas aux propriétés mécaniques du bois, mais jouent plutôt le rôle de protection contre les attaques des insectes et autres parasites. Le bois contient aussi une proportion variable d'humidité. Sur la Figure 1.6 sont illustrés les principaux constituant chimiques d'une fibre de bois.

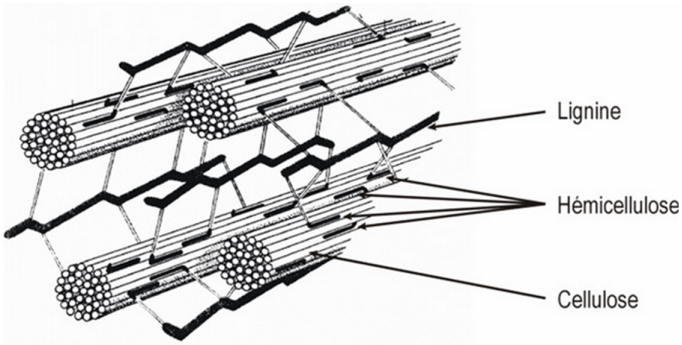



FIGURE 1.6 – Les trois principaux constituants d'une fibre de bois.

**La cellulose**

C'est le constituant dominant du bois (environ 50%). Il constitue la matière organique la plus abondante sur la terre. C'est un homopolymère, dont la macromolécule est composée d'une seule chaîne de D-glucose. Ses molécules sont liées latéralement par des ponts hydrogène. La structure de la cellulose est semicristalline ($60\% - 97\%$) et son degré de cristallinité influe directement sur le comportement mécanique de la paroi.

**Les hémicelluloses**

La proportion des hémicelluloses dans le bois est estimée entre 15% et 25%. Ce sont des polymères amorphes et ramifiés constitués d'unités de différents résidus du sucre dont on peut citer les xyloglucanes, les xylanes, les glucomannanes et mannanes. Les hémicelluloses jouent un rôle de pontage entre les fibres de cellulose.

**La lignine**

Sa quantité dans le bois représente 20% à 30%. C'est la composante non hydrocarburée du bois, elle est constituée de polymères, réticulés, amorphes, tridimensionnels et complexes. Elle est dure et cassante. Elle constitue à la fois le squelette et la matrice du bois, et confère à celui-ci sa résistance mécanique.

Cette composition chimique peut être représentée sous forme d'un diagramme présenté sur la figure 1.7.

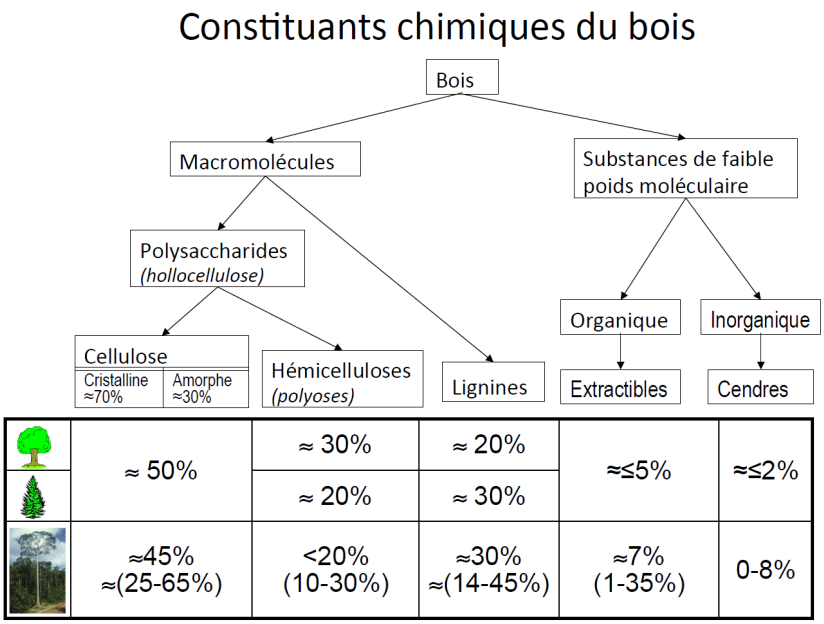



FIGURE 1.7 – Composition chimique du bois [1].

## 1.4 Propriétés physiques et mécaniques du bois

Dans cette partie sont présentées les propriétés physiques et mécaniques du bois. Le bois est un matériau particulier dont ses propriétés varient en fonction de différents facteurs. Les arbres étant des êtres naturels, vivants et très diversifiés, les propriétés du bois varient selon le type d'essence, les conditions de croissance et le taux d'humidité. Les propriétés physiques du bois sont les caractéristiques quantitatives du bois et son comportement à des influences extérieures autres que des forces appliquées. Le bois est considéré comme étant un matériau anisotrope, c'est-à-dire que ses propriétés varient selon les différentes directions. L'aptitude que possède le bois à absorber l'humidité (hygroscopicité) est une caractéristique majeure qui vise ce matériau. Lorsqu'il varie, le taux d'humidité provoque des changements dimensionnels du matériau (retrait et gonflement). L'humidité est également responsable de la pourriture du bois quand elle est en présence de certaines autres conditions environnantes. Les propriétés mécaniques du bois caractérisent la rigidité et la résistance du bois face aux sollicitations qui tendent à le déformer. Parmi les caractéristiques importantes il y a l'orthotropie et la viscosité. Les caractéristiques mécaniques du bois dépendent directement de ses propriétés

physiques.

Ces propriétés sont décrites brièvement ci-dessous :

### 1.4.1 Élasticité et viscoélasticité

L'élasticité est la propriété qu'ont certains matériaux comme le bois de reprendre leur forme ou leurs dimensions initiales lorsque la charge causant la déformation est enlevée. Ceci a lieu lorsque que l'on est en dessous de la limite proportionnelle ou élastique. Au-delà, une partie de la déformation reste permanente, après enlèvement de la charge. La limite proportionnelle est un paramètre indispensable pour distinguer le comportement élastique du comportement plastique. C'est la présence de la cellulose qui apporte au bois un comportement élastique linéaire puisque les réseaux cristallins tendent à revenir à leurs positions initiales suite à une sollicitation mécanique faible. La courbe contrainte–déformation permet de définir le module d'élasticité E (ou module d'Young). Celui-ci n'est valable que jusqu'à la limite proportionnelle. Pour le cas du bois, les déformations ne sont pas les mêmes dans les différents « sens ». En effet, d'un bois vert à un bois sec (anhydre), le retrait longitudinal, dans l'axe du tronc et des fibres, est très faible ($< 1\%$) par rapport aux deux autres, le retrait radial, perpendiculaire au tronc ($\approx 5\%$), et surtout par rapport au retrait dans le sens de l'écorce (tangentiel), qui est souvent de l'ordre de 10% [18]. Les gonflements du bois ont le même ordre de grandeur, et même si ces différentes déformations varient selon les essences, on le constate toujours dans des proportions semblables.

La viscosité, d'après [18], est la propriété, pour un corps, de se situer dans un état intermédiaire entre les deux états solide et liquide. Lorsqu'il s'agit d'un solide, cette notion de viscosité signifie que celui-ci possède un aspect liquide dans son comportement. Inversement, on dit qu'un liquide est visqueux lorsqu'il se rapproche du comportement d'un solide. De par sa composition chimique et la réponse de ses constituants suite à des sollicitations mécaniques, le comportement du bois peut être assimilé à un comportement viscoélastique linéaire. Les réseaux amorphes des hémicelluloses, lignines, changent de géométrie sous un chargement mécanique, donnant ainsi au bois un comportement viscoélastique.

### 1.4.2 Anisotropie et orthotropie

#### Anisotropie

L'observation au microscope d'un bois laisse apparaitre une série de tubes orientés dans une même direction. La conséquence de cette disposition est la différence des propriétés mécaniques et physiques suivant les directions préférentielles du bois (longitudinale L, radiale R et tangentielle T) Put [19] (Figure 1.2). C'est ce que l'on appelle l'anisotropie du bois. Le bois est anisotrope et peut être en première approximation assimilé à un composite constitué de fibres de cellulose orientées dont le comportement mécanique est de type élastique. En considérant un modèle de comportement unidimensionnel dans le sens des fibres, on peut écrire :

$$\sigma = E_L * \varepsilon \tag{1.1}$$

Avec la proportionnalité entre la contrainte $\sigma$ et la déformation $\varepsilon$ selon l'axe des fibres par rapport au fil du bois, $E_L$ représente le « module d'élasticité longitudinal » qui doit en toute rigueur être caractérisé pour chaque cas de charge en traction, compression, flexion etc. Ces fibres sont elles-mêmes noyées dans une matrice de lignine, qui est un polymère complexe constituée d'alcools phénoliques. Son comportement est de type viscoélastique linéaire de Kelvin Voigt et s'écrit :

$$\sigma(t) = E * \varepsilon(t) + \eta \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \tag{1.2}$$

Où : $\eta$ est la viscosité et $E$ module d'élasticité.

#### Orthotropie

Un matériau est orthotrope lorsqu'il existe, localement, deux plans de symétrie matérielle orthogonaux. C'est approximativement le cas du bois, pour lequel le plan radial (RL) et le plan transverse (RT) constituent des symétries matérielles locales. Ce qui implique un troisième plan (LT) orthogonal aux deux premiers. Lorsqu'un matériau est orthotrope, son élasticité se décrit simplement à condition de se placer dans le repère d'orthotropie, par exemple (R, T, L), pour le bois.

### 1.4.3 Influence de l'humidité sur les propriétés du bois

L'humidité d'un matériau est le rapport de la masse d'eau qu'il contient à sa masse anhydre (pourcentage minimal d'humidité). On peut mesurer le taux d'humidité d'une pièce de bois massif de deux façons différentes : soit par pesée avec une méthode normalisée [20, 2] dont on se sert notamment en laboratoire, ou dans l'industrie du séchage artificiel du bois, soit à l'aide d'un humidimètre. Cette dernière méthode plus rapide mais moins précise. Les deux procédures pour le calcul du taux d'humidité sont les suivantes :

- mesure par pesée : on détermine par pesée la diminution de masse d'un échantillon ou d'un lot de bois (dans ce travail nous parlons d'éprouvette) entre état courant et état sec : puis on calcule en pourcentage le rapport entre cette diminution de masse constatée et la masse de l'éprouvette ou du lot d'éprouvettes anhydres (déshydratées). Dans le cadre de ce travail, pour rendre les éprouvettes anhydres, on leur fait passer un séjour prolongé d'environ une semaine dans une étuve ventilée spécifique. La pesée en entrée et en sortie se fait alors avec une balance de précision $d = 0,01$ (ou encore avec une autre balance de précision $d = 0,0001$) ;
- mesure électrique : c'est sur la même base de calcul que sont conçus les humidimètres. Ces appareils étalonnés en pourcentage d'humidité du bois donnent la valeur de l'humidité du bois instantanément. Il suffit de rentrer la densité de l'essence et de poser l'appareil sur l'éprouvette bois, ensuite nous lisons directement la valeur du taux de l'humidité.

Le taux d'humidité est quantifié par le rapport de la masse d'eau que contient un éprouvette de bois à sa masse anhydre. L'humidité $HI$ de chaque éprouvette est alors exprimée en pourcentage par la formule suivante :

$$HI(\%) = \frac{M_H - M_0}{M_0} * 100 \tag{1.3}$$

où $M_H$ est la masse, en grammes, de l'éprouvette avant dessiccation. $M_0$ est la masse, en grammes, de l'éprouvette anhydre. La masse d'eau étant rapportée à la masse anhydre du bois, et non à sa masse humide, l'humidité peut dépasser 100%. L'humidité existe sous trois

différentes formes dans le matériau bois :

- l'eau de constitution. Elle fait partie intégrante de la matière ligneuse. Elle ne peut être libérée que par la dégradation thermique du matériau. Elle n'est pas prise en compte dans la mesure de l'humidité ;
- l'eau libre, ou eau capillaire. Elle est située dans les vides cellulaires, sous forme liquide pour des humidités très élevées du bois, puis sous forme vapeur en cours et après le séchage ;
- l'eau de saturation. Elle imprègne les parois cellulaires. Dans celles-ci, les molécules d'eau sont « liées » aux chaînes de cellulose et d'hémicellulose par des forces à caractère électrique appelées « ponts hydrogènes ». Lorsqu'un bois à l'état vert sèche, en un point donné de l'échantillon considéré, l'eau qui s'évapore la première est l'eau libre. Il arrive un moment où, à cet endroit, toute l'eau libre est partie et où il reste encore toute l'eau liée. Les parois cellulaires sont alors encore saturées d'humidité. Le bois atteint en cet emplacement le point de saturation des fibres (PSF). Le point de saturation des fibres peut varier suivant l'essence et suivant la température. Cependant, à $20^0$ C le PSF se situe toujours au voisinage de 30%. Au-dessous du PSF, les variations d'humidité s'accompagnent de variations dimensionnelles, ce qui n'est pas le cas au-dessus de ce point.

L'humidité et la température favorisent l'apparition des agents biologiques de dégradation du bois tels que : les micro-organismes (bactéries, champignons), les insectes et les organismes marins. C'est l'humidité qui affecte la stabilité dimensionnelle et cause la fissuration du bois. Les attaques par les champignons ont lieu à l'intérieur (environ 30% des dégâts répertoriés) comme à l'extérieur des habitations plutôt sur les bois de feuillus.

### 1.4.4 Influence de la densité sur le bois

La densité est le rapport de la masse volumique du bois à celle de l'eau. Le bois est un matériau hygroscopique qui peut changer de poids et de volume en fonction des pertes et des gains d'humidité. Il est donc important de préciser la teneur en humidité de l'échantillon au

moment de la mesure de la masse et du volume. La densité de référence est calculée avec un pourcentage de 12% d'humidité.

La densité est un paramètre important comme le sont la teneur en humidité et la température. Toutes ces propriétés mécaniques ont déjà été l'objet d'études dans le passé. En son temps Ylinen [21], cité par Moutee [22], puis Bodig et Jay [23], ont mis en évidence que les modules de Young, les coefficients de Poisson et les modules de cisaillement (ou de Coulomb) sont fortement dépendants de la densité du bois. Bodig et Jayne [23] ont mis en évidence une formule qui lie les propriétés mécaniques de la loi de Hooke généralisée à la densité du bois par la relation :

$$Y = a * D^b \tag{1.4}$$

où Y représente les propriétés élastiques, $D$ est la densité du bois, a et b sont deux constantes données dans les abaques pour chaque espèce de bois.
La densité est exprimée par la formule suivante :

$$D = \frac{Masse\ du\ corps}{Masse\ d'un\ egal\ volume\ d'eau\ \text{à}\ 4^0C} = \frac{\rho_{corps}}{\rho_{eau}\ \text{à}\ 4^0C} \tag{1.5}$$

La densité du bois varie largement d'une espèce à une autre et aussi à l'intérieur de la même espèce. La densité est largement influencée par la structure du bois. Chez les conifères, la densité augmente lorsque la proportion de bois final par rapport au bois initial augmente. L'inverse est vrai lorsque la proportion de bois initial augmente. Donc, la densité augmente lorsque la proportion de cellules étroites à paroi épaisses augmente (la quantité de plein sur la quantité de vide augmente). Chez les feuillus, les fibres expliquent les différences de densité entre les bois tant d'un point de vue qualitatif que quantitatif. La densité du bois dépend de la proportion relative des fibres par rapport aux éléments cellulaires, notamment les éléments de vaisseaux, ainsi que de l'épaisseur propre de la paroi des fibres. Une proportion de fibre élevée va favoriser une densité élevée. De même, des fibres à lumens étroits et à parois épaisses vont favoriser des bois denses. Par exemple chez le balsa, les vaisseaux sont larges et il y a beaucoup de parenchyme (axial et radial). Les fibres sont donc en faible proportion et ont en plus une paroi fine (1,5 $\mu m$, comparé à plus de 10 $\mu m$ chez l'azobé), ce qui explique la

densité très faible de ce bois. A l'intérieur d'une même espèce, c'est-à-dire à qualité de fibres relativement égale, le bois le plus dense sera celui qui contient proportionnellement le plus de tissus fibreux.

### 1.4.5 L'hygroscopie ou équilibre hygroscopique du bois

D'après le Larousse [24], le retrait est défini comme étant le fait qu'un matériau subit une diminution de volume sous un effet extérieur à la variation d'humidité. C'est le cas du matériau bois qui présente une diminution de ses dimensions lorsque son taux d'humidité décroît.

Le gonflement est en principe le phénomène inverse du retrait. Pour ce qui est du bois, et plus particulièrement des tropicaux car soumis à de fortes pluviométries, le gonflement, surtout en présence des températures élevées, d'humidité relative importante de l'air ou du contact avec l'eau est la principale cause de leur altérabilité. Lorsque le bois absorbe de l'eau, sa teneur en humidité augmente et le bois a tendance à augmenter de volume. Tout comme le retrait, le gonflement est proportionnel au gain d'humidité jusqu'au PSF. En-dessous du PSF, l'eau contenue dans les parois des cellules s'évapore et provoque un retrait du bois proportionnellement à la perte d'humidité. Le bois rétrécit très faiblement dans le sens longitudinal des fils (de l'ordre de 0,1 à 0,2%). C'est-à-dire que dans le sens longitudinal (axial) de l'arbre le retrait est pratiquement négligeable. Dans le sens radial, il est beaucoup plus important, atteignant jusqu'à 5 à 6% de la largeur des planches ou plateaux par exemples. Le retrait tangentiel, c'est-à-dire celui qui se produit dans le sens des cernes de croissance, est le plus important. Il peut atteindre trois fois la valeur du retrait radial.

Le plus souvent au lieu de parler de retrait, on préfère utiliser le terme de "mesure de la rétractabilité". On peut distinguer la rétractabilité totale qui correspond à la variation de volume depuis le point de saturation jusqu'à l'état anhydre. Nous pouvons établir le coefficient de rétractabilité volumétrique c'est-à-dire la variation de volume établie en pourcentage du volume initial, pour une variation de 1% du taux d'humidité. On peut aussi considérer un coefficient de rétractabilité linéaire qui exprime en pourcentage de la dimension considérée le

retrait pour une variation de 1% du taux d'humidité. La formule donnant la valeur du retrait est donnée par la relation :

$$r = \frac{CL * d}{100} \tag{1.6}$$

avec :

$C$ le coefficient de rétractabilité linéaire, $L$ la dimension considérée c'est-à-dire la largeur du plateau et $d$ la différence de titre hygrométrique (différence du pourcentage de l'humidité). La plupart des feuillus tropicaux font partis des essences à faibles retrait. La rétractabilité conditionne la stabilité en ambiance extérieure d'une essence.

Il faut signaler que le coefficient de rétractabilité est souvent donné dans le sens radial et tangentiel, il est spécifique à chaque essence. Par exemple, d'après [25], pour l'okoumé : dans le sens radial il est de $0,096$ et dans le sens tangentiel il est de $0,187$.

Le bois est un matériau hygroscopique qui a la possibilité, soit d'absorber une partie de l'humidité de l'air qui l'environne, soit de rejeter une partie de l'eau qu'il contient. Ce phénomène de rejet ou d'absorption se manifeste jusqu'au moment où l'humidité du bois atteint une valeur dite « humidité d'équilibre hygroscopique » qui est, elle-même, fonction de la température et de l'humidité de l'air ambiant. Toutes les variations de ces conditions climatiques aboutissent à une modification de la valeur d'équilibre, et par la suite à une variation de l'humidité du bois. Si l'état hygrométrique du milieu ambiant vient à être modifié, l'humidité du bois se stabilise alors à une valeur donnée. Cette propriété montre, si besoin, que le bois est un matériau « vivant » qui s'adapte aux conditions climatiques de son environnement. Ainsi un échantillon de bois placé dans une ambiance où la température est de $30^0$ C et l'humidité relative de l'air est de 60%, se stabilise à une humidité de 11% environ. Selon les conditions d'utilisation, l'humidité moyenne des bois, selon les normes d'utilisation en France, spécifiées par les DTU 31-1 « Charpente et escaliers en bois » et DTU 31-2 « Construction de maisons et bâtiments à ossature en bois » [12]. Pour la charpente, par exemple, ce taux ne doit pas dépasser 22% en moyenne. Concernant la construction de maisons et bâtiments à ossature bois, l'humidité à la mise en œuvre doit être inférieure à 18%. Les valeurs en pourcentage,

selon l'état du bois, du taux d'humidité sont données à titre indicatifs dans le tableau 1.1.

| **Emploi** | **Taux d'humidité** |
|---|---|
| charpente traditionnelle et fermettes | $15\% \leq H\% \leq 22\%$ |
| bois de construction (M.O.B) | $H\% \leq 18\%$ |
| menuiserie extérieure | $15\% \leq H\% \leq 18\%$ |
| charpente lamellée collée | $H\% \leq 13\%$ |
| charpente apparente en intérieure | $10\% \leq H\% \leq 13\%$ |
| menuiserie intérieure et parquet | $8\% \leq H\% \leq 12\%$ |

TABLE 1.1 – Les taux d'humidité à respecter dans la construction bois [12].

En ce qui concerne les pays tropicaux chauds et secs où la température et l'humidité de l'air avoisinent respectivement $30^0$ C et 30%, l'humidité d'équilibre du bois est d'environ 7%. En clair cela signifie que, comme une éponge, le bois est capable de perdre ou de reprendre de l'humidité en fonction de l'air ambiant. Il est donc directement dépendant de son environnement climatique et du lieu où il se trouve. Cela est vrai que le bois soit transformé ou non. L'hygroscopie du bois influe directement sur sa densité, sa durabilité, sa résistance mécanique, sa conductivité électrique, phonique, thermique, et sur ses dimensions.

## 1.5 Essences tropicales

### 1.5.1 Quelques travaux sur les essences tropicales

Les travaux ont déjà été menées sur les essences tropicales par plusieurs auteurs, notamment [26, 27, 28, 29, 30, 31]. Ces études sur les bois tropicaux concernaient divers domaines tels que la mesure des paramètres technologiques du bois d'œuvre ou d'autres caractéristiques telles que les propriétés physiques des contreplaqués d'okoumé par exemple.
Les aspects tels que les propriétés des essences tropicales sont décrits dans plusieurs ouvrages. Les travaux de Savard [32] ont été consacrés à la recherche du dosage de la lignine et des po-

lysaccharides. Parameswaran [33] s'est penché sur la recherche de la détermination de l'index de cristallinité de la cellulose du bois et de l'écorce de l'okoumé et du douka. Vitiello [34] s'est intéressé quant à lui à l'étude des produits de pyrolyse du bois et des extractibles de l'okoumé, du *distemonanthus benthamianus baill* (movingui), du *Pterocapus soyauxii* (padouk) et du *monopetalanthus coriaceus morel* (andong) du Gabon. Les travaux sur la composition chimique de la résine de l'okoumé sont décrits dans les travaux de Guang [35]. La formulation du composite bois/polymère par polymérisation radicalaire de l'acrylamide en milieu sulfurique dans des plaquettes d'okoumé est traitée dans [36]. Les travaux de Safou [37] sur les arbres issus de la forêt gabonaise visaient à étudier la structure morphologique, la composition chimique et la réactivité des sciures et des plaquettes des bois d'izombé, de béli, d'okoumé et de douka face à l'anhydride succinique et au 3-Oct-2-ényl-dihydro-furan-2,5- dione de nom usuel 2-Octen-1-yl d'anhydride succinique en vue de l'utilisation potentielle des déchets de ces essences dans la formulation de matériaux composites tels que les panneaux de particules ou les composites bois/polymères. En tenant compte des protocoles décrits dans la littérature par [38], Safou a pu extraire le taux de la cellulose et, par soustraction, déterminer le pourcentage des hémicelluloses. Le terme holocellulose désigne l'association de la cellulose et des hémicelluloses.

D'autres études ont été menées durant la première partie des années 90 sur différentes espèces tropicales dans le cadre de l'analyse architecturale. Cela a permis à un certain nombre d'auteurs [39, 40, 41] de mettre en évidence l'existence d'un gradient d'intensité des traces morphologiques du rythme de croissance des essences tropicales. C'est un gradient qui va de la présence d'écailles, d'entrenœuds courts, de feuilles plus petites, jusqu'à l'absence totale de marqueurs externes. Puisque la croissance de l'arbre est un phénomène très complexe, nous nous limiterons juste à parler de l'étude de l'allongement des tiges (croissance primaire). En effet, afin de pouvoir s'agrandir et maintenir sa forme, l'arbre a besoin de consolider ses axes. C'est par la présence des saisons bien marquées dans les saisons tempérées que les arbres poussent de manière rythmique ce qui induit des cernes dans le bois. Détienne [42] a pu montrer que les structures rythmiques dans le bois des essences tropicales existent et sont

connues depuis longtemps grâce à Coster [43]. Elles sont mêmes fréquentes. C'est ainsi que dans le bassin amazonien, Alvim [44], cité par Fahn [45], signale que 35% des espèces montrent clairement des cernes et que 22% ont des cernes beaucoup plus difficiles à déterminer mais sont quand même présents. Ce qui reste constitue tout de même un pourcentage énorme des essences sans cernes visibles. Les cernes peuvent être bien visibles ou peu marqués, mais leur périodicité n'est pas toujours facile à établir et à identifier. En plus, il y a des cas où il n'a pas été possible de mettre en évidence l'existence de structures périodiques dans le bois comme le précise Détienne [46], ce qui n'exclut pas, a priori, un quelconque rythme de production cambiale.

Il est largement reconnu que les arbres dans les régions tropicales, contrairement aux régions dites tempérées, poussent de manière continue tout au long de l'année du fait de l'absence de saisons très marquées. Ce phénomène est amplifié, dans les régions tropicales traversées par l'équateur, par la forte pluviométrie qui caractérise ces régions du globe. La datation des structures végétales de façon générale, et plus particulièrement en zone équatoriale, se heurte de ce fait à un problème majeur : celui de trouver des marqueurs temporels univoques.

On présente dans les parties suivantes les essences qui ont été choisies pour cette étude. Il s'agit de trois essences représentatives des nombreuses essences qui existent dans une forêt équatoriale. Ce choix dépend aussi d'autres considérations telles que le coût du matériau, le transport, le souci de canaliser le travail, etc. Le choix tient aussi compte des interdictions d'exportations des grumes existantes, avec des restrictions qui se sont récemment accrues au Gabon. Deux essences avec des caractéristiques très différentes et une essence intermédiaire entre les deux en termes de densité ont été choisies pour ce travail. Le choix des essences tient compte d'un certain nombre de critères :

- leur densité ;
- la dureté des espèces ;
- leur résistance à la compression et à la traction ;
- leur disponibilité dans la nature ;

– leur utilisation dans notre quotidien ;
– leurs propriétés physiques et caractéristiques mécaniques.

Avant que d'évoquer les raisons du choix des essences, nous tenons à rappeler ci-dessous les types de climats qui existent dans les zones tempérés et tropicales.

### 1.5.2 Les climats tempérés et tropicaux

Il est très difficile d'étudier les essences tropicales sans dire un mot sur la particularité des conditions climatiques de ces zones. En effet, les conditions climatiques sont sans aucun doute l'une des raisons à l'origine de la différence qui existe entre ces essences issues de climat tropical équatorial et des zones tempérées. La Figure 1.8 présente les cernes de croissance annuels facilement identifiables chez les essences tempérées.

FIGURE 1.8 – Cernes de croissance bien visible des essences tempérées.

Les bois des climats tropicaux, comme leurs noms l'indiquent, poussent sous les tropiques et sont donc assujettis à ce climat. C'est un climat qui se caractérise par deux saisons : la saison sèche et la saison humide dont la durée et la période varient selon les régions du monde. Il y fait une chaleur assez constante toute l'année et le taux d'humidité dû à la pluviosité détermine donc les saisons précitées. La mousson peut être l'une des caractéristiques du

climat tropical. Il existe trois grands types de climat tropical, le climat tropical humide ou sec, le climat tropical équatorial, le climat tropical désertique que nous détaillons ci-dessous :

- le climat tropical humide ou sec : il est caractérisé par des précipitations abondantes sur plusieurs mois consécutifs. Durant cette saison des pluies, les différences de températures diurnes sont faibles. La saison plus sèche s'installe ensuite plus ou moins selon les zones, et les températures se font aussi un peu plus froides. Les alizés influencent le climat tropical humide. Une grande partie de l'Amérique du Sud et le cœur du continent africain subissent ce climat.
- le climat tropical équatorial : il est présent dans les régions situées de part et d'autre de l'équateur. La pluviosité est très importante et il n'y a pas de saison sèche en tant que telle. Les forêts absorbent et rejettent des quantités importantes d'humidité provoquant ainsi des précipitations constantes. C'est le cas de pays ou de régions comme l'Amazonie, la Colombie, le Brésil, le bassin du Congo, les Philippines, et quelques îles des caraïbes.
- le climat tropical désertique : c'est le climat tropical désertique est le climat des zones arides, qu'elles soient équatoriales ou aux latitudes plus élevées. Les précipitations sont le plus souvent très faibles, voire nulles comme en Patagonie. Le sol ne peut absorber les pluies torrentielles comme dans certaines régions du Sahara ou d'Australie. L'amplitude thermique est très importante. Les journées sont très chaudes et les nuits assez froides du fait de l'absence de nuages.

Les bois (essences) qui font l'objet de notre étude ici viennent du Gabon (voir la situation sur la carte de la Figure 1.9). Ils poussent dans la zone du climat tropical équatorial.

La répartition des saisons dans cette partie du monde pourra peut-être expliquer la complexité de la croissance ou non de ces essences. En effet, la répartition annuelle des pluies est l'élément caractéristique définissant les saisons dans la zone intertropicale.
C'est durant le mois de septembre que le flux de mousson pénètre au Gabon par le nord, où les précipitations sont maximales en octobre (250 à plus de 600 $mm$). Cette même mousson atteint le sud avec les précipitations observées avec moins d'intensité en novembre (200 à

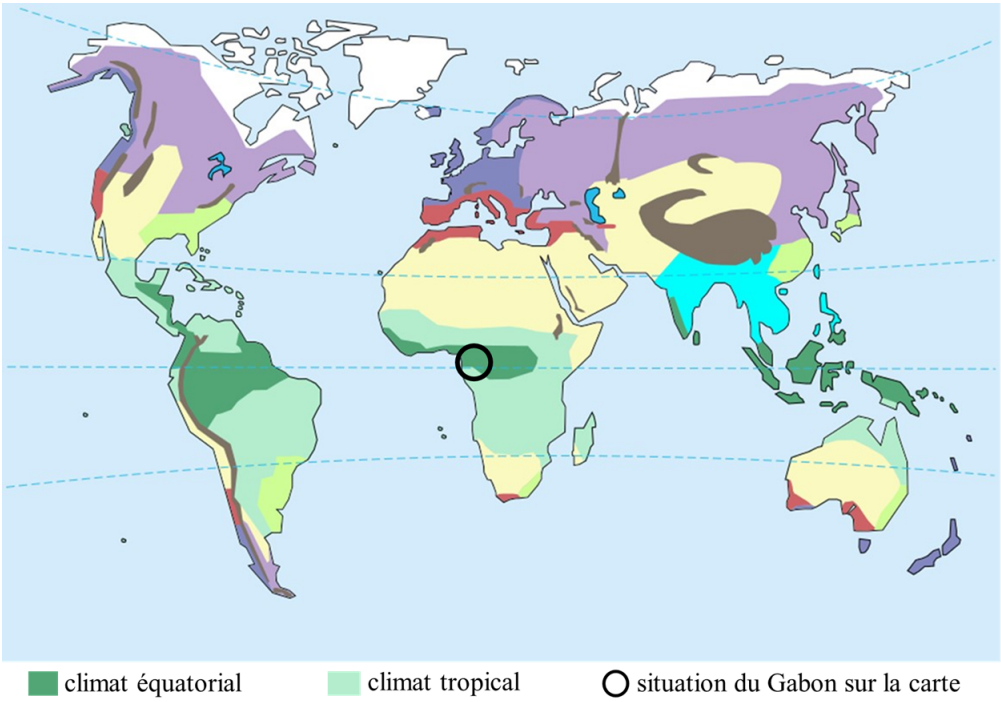



FIGURE 1.9 – Carte des différents climats du globe.

400 $mm$). Cette séquence constitue ce que l'on appelle la grande saison des pluies. La petite saison sèche intervient quant à elle entre janvier et février. C'est durant cette période qu'il y a diminution des précipitations allant de 50 à 200 $mm$ par mois du nord au sud. Vers fin février à mai, la zone active du flux de mousson traverse le pays, renforcée très souvent par la pénétration par l'est des masses d'air humides de l'océan indien. C'est ce que l'on désigne par seconde saison de pluies, qui entraîne avec elle de précipitations qui avoisinent 200 $mm$ par mois sur toute l'étendue du territoire. Les précipitations (ou pluviométrie) moyennes annuelles dans cette zone équatoriale sont très importantes, de l'ordre de 1 500 à 1 800 $mm$, voir 2 000 $mm$ d'après [47].

Le temps des deux saisons sèches est tellement négligeable qu'il ne permet pas au sol d'absorber totalement les quantités d'eau tombées durant les saisons de pluies. Ce qui nous amène à dire que les arbres ont, tout le long de l'année, l'eau nécessaire pour assurer en continu leur croissance. C'est certainement l'explication la plus plausible pour expliquer cette différence entre rythmes de croissance entre bois tropicaux et bois des zones plus tempérées, et donc

l'absence des cernes comme le montre l'annexe $A_2$.

Le choix s'est porté sur les trois essences de bois décrites dans les paragraphes suivants.

### 1.5.3 Aucoumea klaineana (okoumé)

De son nom scientifique *Aucoumea klaineana* et de nom français okoumé, il fait partie de la famille des Burseraceae. L'abondance de l'okoumé est décrite dans la littérature par la très forte dominance de cette espèce : elle représente au moins 60% des effectifs et 80% de la surface terrière des peuplements âgés de 20 à 60 ans. Déjà dès $5 - 10$ ans, d'après le Cirad et Fuhr [48], les peuplements jeunes montrent un différentiel de croissance par rapport à l'ensemble des autres espèces en faveur de l'okoumé, tant en hauteur (accroissement $> 1$ $m/an$) qu'en diamètre (accroissement $> 1{,}5$ $cm/an$). La croissance en diamètre des okoumés dominants est maximale entre 5 et 15 ans ($> 1{,}5$ $cm/an$) et reste soutenue au moins jusqu'à 60 ans (0,7 $cm/an$). Son diamètre est compris entre 60 à 200 $cm$, il fait plus de 50 $m$ de hauteur et l'épaisseur de son aubier est de 2 à 5 $cm$. D'une couleur de référence rouge clair, il peut être aussi de couleur blanche rosâtre plus ou moins sombre voire brun rouge. La couleur fonce avec l'âge. Le fil peut être légèrement ondulé. Son grain est fin. Sa densité est comprise entre $0,4 - 0,5$. L'okoumé est un arbre africain qui intègre à lui seul les 3 dimensions du développement durable :

- économique : il est extrêmement apprécié pour ses propriétés dans l'ameublement et la construction ;
- sociale : son écorce sert de décoction médicinale ;
- environnementale : sa sève sert de filtre naturel pour rendre potable l'eau de pluie et des rivières, mais aussi pour fabriquer des torches indigènes.

Dans l'industrie, ce bois est particulièrement apprécié et utilisé en intérieur de contreplaqué, placage tranché, coffrage, face ou contre face de contreplaqué. Les noyaux sains sont utilisés pour les intérieurs des panneaux lattés. L'okoumé est aussi employé pour la menuiserie légère et la menuiserie intérieure de meubles courants ou éléments pour les moulures, pour les tablettes de meubles, les lambris, l'emballage-caisserie. Il est aussi utilisé pour la fa-

brication des portes intérieures des habitations. La Figure 1.10 présente un okoumé abattu et les placages déroulés d'okoumé. Les populations s'intéressent à l'okoumé aussi pour d'autres raisons, à savoir :

- son abondance dans la nature fait qu'il est facile à obtenir ;
- son coût très bas et bon marché par rapport à d'autres essences ;
- ce bois se traite avec aisance en menuiserie ;
- sa flottabilité lui permet d'être largement employé dans la fabrication des pirogues.

FIGURE 1.10 – Image d'okoumé abattu et transformé en contreplaqués.

### 1.5.4 Milicia excelsa (iroko)

Il a pour nom scientifique *Milicia excelsa* et pour nom français iroko, il est de la famille des Moracee. Sa couleur de référence est brun jaune. Ce bois est aussi brun jaune orangé et légèrement cireux au toucher. Jaune à l'état frais, il fonce rapidement à la lumière. Son aubier est d'un blanc distinct, assez large (5 à 6 $cm$). C'est un bois qui possède plusieurs caractéristiques. En effet, malgré une sensibilité marquée aux chocs, sa durabilité le rend adapté aux usages du quotidien. Son fil est irrégulier et présente un léger contre-fil avec un grainage grossier. Disons qu'il est d'un grain plus ou moins grossier, possède un fil assez enchevêtré et parfois moiré ou rubané. C'est un bois mi-dur et mi-lourd (de densité comprise $0,55 - 0,75$) et d'une structure homogène avec des zones de croissance peu distinctes. Les vaisseaux sont gros et visibles à l'œil nu. Ces vaisseaux sont rares, obstrués par des thylles (Vésicule qui, à l'automne, obstrue le pétiole des feuilles des arbres et provoque leur mort). Le parenchyme

clair, visible à l'œil nu en coupe transversale, entoure les vaisseaux et comporte des cristaux visibles au microscope. Ce bois possède des rayons étroits visibles à la loupe. Des rayons multi séries forment une fine maillure en coupe radiale. Il est utilisé pour divers usages, notamment parce qu'il présente une bonne résistance aux attaques des champignons, des lyctus et des termites. C'est un bois très convoité, du négoce jusqu'à l'ameublement. C'est la raison pour laquelle il fait partie des espèces menacées.

Il est très utile pour l'industrie, il est présent dans la menuiserie intérieure et extérieure, la fabrication de parquets, éléments bordés (ensemble des planches constituant le revêtement extérieur de la coque d'un navire) pour construction navale, l'ébénisterie (meubles courants ou éléments), la tonnellerie-cuverie, les escaliers intérieurs, les faces ou contre faces et intérieurs de contreplaqués, les ponts pour les parties non en contact avec le sol ou l'eau, les lambris, les articles tournés, les charpentes légères, le lamellé-collé, les fond de véhicules ou de conteneurs. La Figure 1.11 montre la photo d'un iroko sur pied, une photo présentant une planche de cette essence et une bille d'iroko. Il est vendu dans le monde entier, en particulier en Europe comme bois exotique. Il stocke le $C0_2$ sous forme de cristaux d'oxalate de calcium et quand il se décompose les cristaux se dégradent en calcium. Il est d'un prix sur le marché relativement moyen.

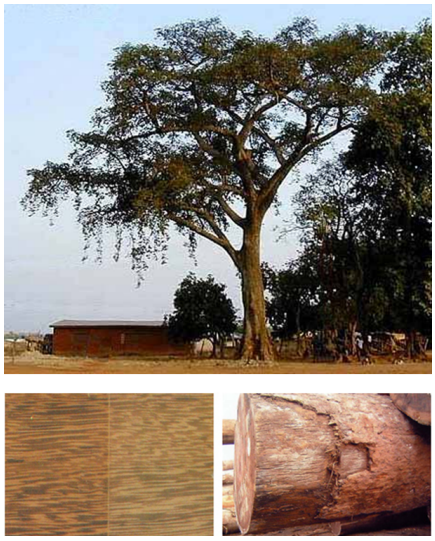


FIGURE 1.11 – Photo d'iroko sur pied et abattu.

### 1.5.5 Pterocarpus soyauxii (padouk)

Le *Pterocarpus soyauxii Taub* (ou *Pterocarpus osun*) ou plus communément appelé padouk d'Afrique est une espèce botanique provenant d'Afrique centrale et occidentale. Il est issu de la famille des Fabaceae. Cet arbre ne se développe correctement que s'il est exposé au rayon du soleil (héliophile). Solitaire, il croît principalement dans les forêts tropicales humides et ne perd jamais l'ensemble de ses feuilles. Comme pour beaucoup de végétaux, le vent permet de disperser ses semences ailées. La régénération se fait naturellement et relativement facilement. La croissance optimale du Padouk a lieu dans des pays comme le Cameroun ou le Gabon. Les arbres atteignent près de 50 mètres de hauteur avec un branchage regroupé à partir des 30 $m$ en partant de la base du tronc. Il possède un aubier bien distinct et l'épaisseur de celui-ci peut varier de 6 à 10 $cm$. Il est d'un grain grossier et son diamètre peut atteindre 60 à 100 $cm$. C'est un bois d'une densité mi-lourd et lourd (comprise entre $0,70 - 0,88$). Il est de couleur de référence rouge et peut devenir brun violacé ou noircir très vite à la lumière. Le duramen du padouk d'Afrique est reconnu comme étant très durable (classe de durabilité naturelle I). En revanche, l'aubier l'est moins (classe de durabilité naturelle V). Le grain est moyen. Le bois présente parfois un contrefil. Mais il montre généralement une structure assez uniforme. L'aubier est donc, par sa différence de couleur, bien distinct. Le fil est droit et le contre-fil reste léger. C'est un bois qui peut présenter des roulures, du cœur mou ou encore de cadranures (Fentes partant du centre du bois et rayonnant vers l'extérieur). Il est important de procéder au séchage avec précaution pour éviter toute apparition des fentes, toutefois il ne présente pas de risques majeurs de déformation. C'est un bois que l'on appelle "bois dur" et ses principaux usages sont nombreux. C'est un bois qui est utilisé pour les constructions hydrauliques lourdes, les parquets, les contreplaqués, en ébénisterie, les traverses pour rails, les fonds de camions ou wagons, la charpente, la construction navale (membrure), les menuiseries intérieures et extérieures, l'ameublement, les ponts, les escaliers et la sculpture. Il est utilisé dans les menages comme manches de pioches, de râteaux et de haches. Il est d'un prix relativement élevé. La Figure 1.12 présente deux photos, une d'un padouk sur pied et l'autre du padouk abattu.

FIGURE 1.12 – Deux images montrant le padouk sur pied et abattu.

### 1.5.6 Comparaisons des gradeurs physiques et mécaniques des trois essences étudiées

Dans les tableaux 1.2 et 1.3 sont donnés quelques caractéristiques physiques et mécaniques des trois essences étudiées [13].

Le tableau 1.2 donne les valeurs caractéristiques mécaniques et le tableau 1.3 indique les valeurs ou la capacité des trois essences à résister aux champignons. Dans le premier tableau à part les valeurs des différents retraits, toutes les autres valeurs sont proportionnelles à la densité. Comme nous pouvons aussi le constater dans le second tableau, plus l'essence est dense, meilleure est son aptitude à résister aux attaques des champignons et aux termites par exemple. La stabilité est aussi liée à la densité des trois essences, plus c'est dense, meilleure est sa stabilité dimensionnelle (elle est évaluée par le retrait ou le gonflement du bois en fonction de l'humidité).

| Désignation | okoumé | iroko | padouk |
|---|---|---|---|
| Densité | 0,4 à 0,5 (Très léger) | 0,6 à 0,7 (Léger et Mi-lourd) | 0,8 (Mi-lourd et lourd) |
| Dureté Monnin | Très tendre-tendre | Mi-dur | Dur |
| Coefficient de Retrait Volumique (%) | 0,30 à 0,40 (Faible-Moyen) | 0,40 à 0,50 (Moyen) | 0,40 à 0,50 (Moyen) |
| Retrait tangentiel total (%) | Faible-Moyen | Faible | Faible |
| Retrait radial total (%) | Moyen | Faible | Faible |
| Contrainte de rupture en compression (MPa) | 30 à 40 (Faible) | 50 à 60 (Moyenne) | 60 à 70 (Moyenne) |
| Contrainte de rupture en flexion statique (MPa) | 50 à 75 (Faible) | 75 à 100 (Moyenne) | 100 à 125 (Moyenne-forte) |
| Module d'élasticité (MPa) | 10 000 (Faible) | 10 000 à 15 000 (Faible-Moyen) | 14 000 à 18 000 (Moyen) |

Table 1.2 – Propriétés physiques et mécaniques, pour un taux d'humidité de 12% [13].

| Désignation | okoumé | iroko | padouk |
|---|---|---|---|
| Résistance aux champignons | Faiblement durable | Durable / Très durable | Très durable |
| Résistance aux insectes de bois sec | Durable | Durable | Durable |
| Résistance aux thermites | Sensible | Durable | Durable |
| Imprégnabilité | Peu Imprégnable | Non Imprégnable | Moyennement Imprégnable |
| Stabilité dimensionnelle | Peu Stable - Moyennement Stable | Moyennement Stable | Stable |
| Point de Saturation des fibres | Élevé | Faible | Faible |

Table 1.3 – Caractéristiques diverses, pour un taux d'humidité de 12 % [13].

## 1.6 Conclusion

Le présent chapitre a été consacré essentiellement au matériau bois, à sa définition, ses différentes fonctions, à la description des éléments qui le constituent sur les plans microscopique et macroscopique. Les propriétés physiques et mécaniques ont été rappelées. Il a été aussi l'occasion d'énumérer les paramètres susceptibles de modifier et d'influencer les caractéristiques physiques d'un bois. Une comparaison de certaines propriétés physiques et mécaniques des trois essences a été faite. Un rappel sur les caractéristiques des climats tempérés et tropicaux a été fait et a montré une grande différence. Une bibliographie spécifique sur les essences tropicales a été menée. En tenant compte de certaines spécificités liées à la densité et à la place que ces essences occupent dans le quotidien des populations trois essences ont été choisies pour cette étude. Le chapitre qui suit va présenter les outils de mécanique de la rupture pour l'étude de la fissuration ainsi que la technique de mesure expérimentale utilisée.

# Chapitre 2

# Éléments de mécanique de la rupture et méthode de la grille

## 2.1 Introduction

L'utilisation et l'emploi de plus en plus fréquent des métaux à haute résistance a nécessité la mise au point d'un moyen de calcul pour prévenir les ruptures fragiles que pouvaient subir ces métaux. Le seul critère de ténacité obtenu par essai de Charpy ne suffisait pas à caractériser leur fragilité par une valeur intrinsèque au matériau. C'est ainsi, que la mécanique de la rupture est née il y a environ une centaine d'années pour résoudre ce problème. Dès le début, le développement de la mécanique supposait un milieu homogène, isotrope, élastique linéaire. Le comportement à la rupture ainsi modélisé se trouvait très bien vérifié pour les métaux à faible déformation plastique. L'extension de cette modélisation aux métaux ductiles a nécessité divers développements basés sur des approches énergétiques. L'objectif de la mécanique appliquée de la rupture est de caractériser le comportement à la fissuration des structures à l'aide des paramètres quantifiables au sens de l'ingénieur, notamment la contrainte, la taille de la fissure et la résistance à la fissuration du matériau. La mécanique linéaire de la rupture, par exemple, est basée sur une procédure analytique qui relie le champ de contraintes au voisinage de la fissure à la contrainte nominale appliquée au loin, à la taille

de la fissure et son orientation et, finalement aux caractéristiques mécaniques du matériau. La mécanique de la rupture a été introduite par Griffith [49]. Dans les années 1920/1921, Griffith montre que la rupture d'un milieu élastique-fragile peut être caractérisée par une variable globale, qui sera appelée plus tard le taux de restitution d'énergie. Les premiers développements théoriques d'analyse des champs de déplacements, déformations et contraintes au voisinage d'une fissure ont été entrepris par Westergaard [50]. L'extension de la discipline a été amorcée par Irwin [51]. En particulier, en 1956, Irwin introduit la notion de facteur d'intensité des contraintes, à partir de l'étude des singularités du champ de contrainte. Les années $1960 - 1980$ sont celles de l'essor puis de la maturité de la mécanique de la rupture, avec en particulier les développements numériques et le traitement des problèmes non-linéaires. Depuis cette date le développement de la mécanique de la rupture s'étend aux problèmes de bifurcation des fissures en mode mixte et plus récemment à la propagation des fissures sous charges dynamiques, à la rupture des laminés et composites, aux techniques numériques de résolution permettant de ce fait le dimensionnement de structures complexes.

Dans ce chapitre, un regard est porté sur la mécanique de la rupture avec des applications au matériau bois. Quelques notions essentielles permettant de comprendre la mécanique de la rupture linéaire sont rappelées ici. On se focalisera d'abord sur des éprouvettes issues de la bibliographie pour les études similaires puis sur les champs mécaniques en milieux orthotrope [52]. En effet, un certain nombre d'éprouvettes ont déjà été testées pour les études de la fissuration sur les bois tempérés. La seconde partie du chapitre est consacrée à l'explication de la méthode de la grille. Le fonctionnement et l'utilisation de cette méthode sont précisés.

## 2.2 Géométrie d'éprouvettes utilisées en mécanique de la rupture

Le chargement qui fait intervenir un champ de contrainte "lointain" comportant une seule composante normale à la direction de la fissure, est appelé mode d'ouverture, ou mode 1. C'est celui qui est physiquement le plus important, puisqu'une fissure en mode 1 se propage dans

son propre plan sans bifurcation par raison de symétrie, l'ouverture de la fissure conduisant facilement à la rupture. Dans le cas du mode 2, le champ lointain de sollicitation extérieure est un cisaillement perpendiculaire au front de fissure, et dans le cas du mode 3, le cisaillement est parallèle au front de fissure, Figure 2.1. Pour réaliser les essais dans les différents modes, des études ont été menées par le passé sur un certain nombre d'éprouvettes visant différents objectifs. Dans la bibliographie [6, 53, 54, 55, 7, 56, 57], plusieurs de ces éprouvettes sont utilisées pour étudier la fissuration dans les matériaux composites mais aussi dans les matériaux orthotropes comme le bois. L'objectif était de connaître les paramètres permettant d'utiliser les formules de la mécanique de la rupture (taux de restitution d'énergie critique et intensité des contraintes). On rappelle ici quelques-unes de ces éprouvettes.

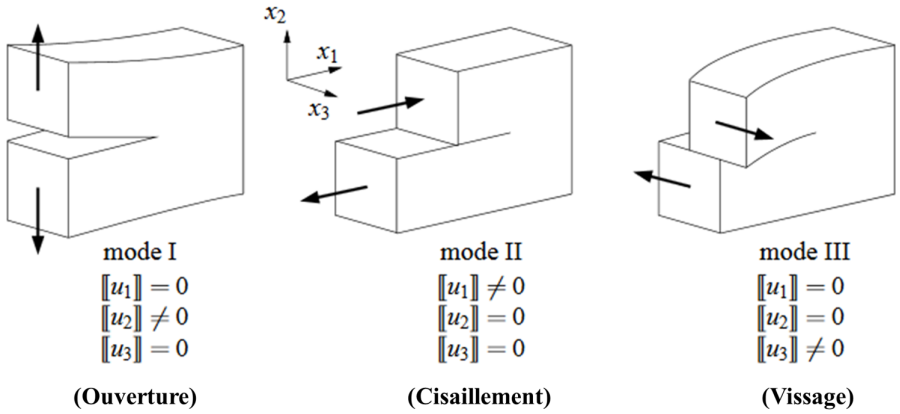



FIGURE 2.1 – Définition des modes de sollicitation.

## Éprouvette SENT

L'éprouvette *Single Edge Notch Tensil* (SENT), voir Figure 2.2, a été utilisée par un certain nombre d'auteurs, notamment par Valentin [6]. Pour cette éprouvette, les valeurs de progression de la fissure, très petites, montrent qu'il n'est pas facile de quantifier la rupture car dans ce cas, la plage de propagation n'est pas observable. De plus, de par sa forme, c'est une éprouvette avec une géométrie qui favorise une augmentation du facteur d'intensité de contraintes pendant la propagation de fissure. Néanmoins Valentin, a observé quelques millimètres de progression de fissure avec cette éprouvette.

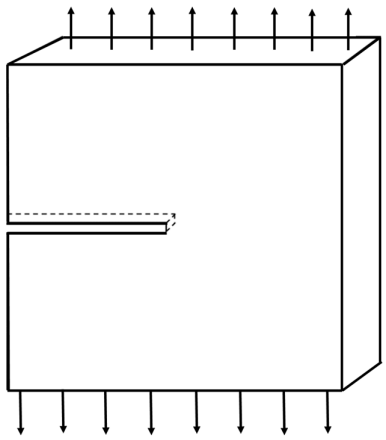


FIGURE 2.2 – Eprouvette SENT.

## Éprouvette CANTILEVER

Cette éprouvette est appelée éprouvette Cantilever à inertie variable (cf Figure 2.3). Contrairement à l'éprouvette SENT, elle a la particularité de présenter une bonne plage de propagation stable. Elle est adaptée aux essais de fissuration en mode mixte, comme cité dans [4].

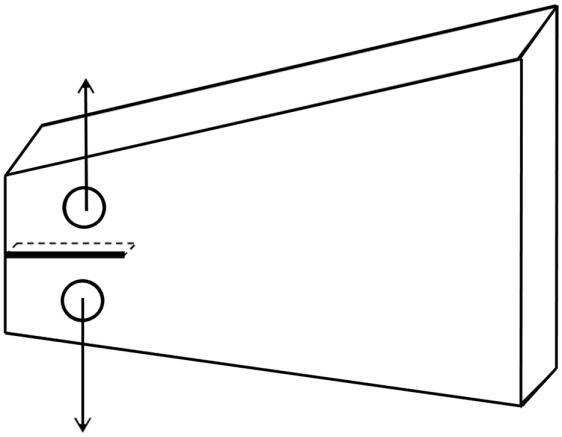


FIGURE 2.3 – Eprouvette CANTILEVER à inertie variable.

## Éprouvette DCB

Cette éprouvette *Double Cantilever Beam* (DCB) a été mise au point par Chow [53] pour la réalisation d'essais en mode d'ouverture des fissures (mode 1). Elle permet la détermination

de la ténacité et du taux de restitution d'énergie critique en mode 1. Sa conception permet d'obtenir un facteur d'intensité des contraintes qui décroît lorsqu'il y a propagation de fissure (zone sans défaut) [58, 59, 60, 61]. C'est cette forme qui justifie les risques d'instabilité dans le cas de mesures sur des matériaux isotropes. Par contre, ces risques d'instabilité disparaissent dans le cas du bois tempéré car la propagation est guidée par le fil longitudinal. Ces éprouvettes sont donc intéressantes car elles présentent une plage assez importante de propagation des fissures. Enfin, la simplicité de cette géométrie permet de faire des calculs analytiques en employant la méthode de la variation de la complaisance expliquée plus loin en considérant deux poutres consoles dont la longueur libre est assimilée aux lèvres de la fissure. Le schéma de cette éprouvette est présenté sur la Figure 2.4.

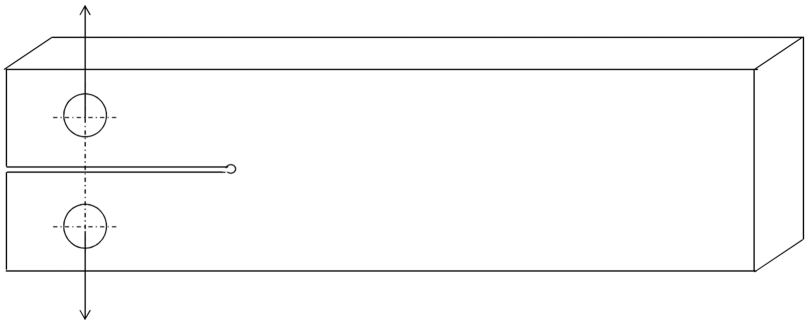


FIGURE 2.4 – Eprouvette DCB [4].

## Éprouvette DCB à Inertie variable

L'éprouvette *Double Cantilever Beam* (DCB) permet de constater, dès le début de l'amorçage de la fissure, qu'il y a une instabilité de la fissure, qui conduit à une rupture instantanée. Ce constat a lieu lors du pilotage des essais en force uniquement. C'est ce constat qui a amené Dubois [54] à proposer une éprouvette DCB à inertie variable présentant une stabilité de fissure. L'éprouvette était sollicitée au voisinage de l'effort critique, ce qui a permis de résoudre le problème de l'amorçage de fissure. Mais d'après Valentin [62], cette éprouvette présente tout de même un inconvénient, car sa géométrie n'est pas adaptée à l'étude du mode de cisaillement. L'illustration de cette éprouvette est donnée par la Figure 2.5.

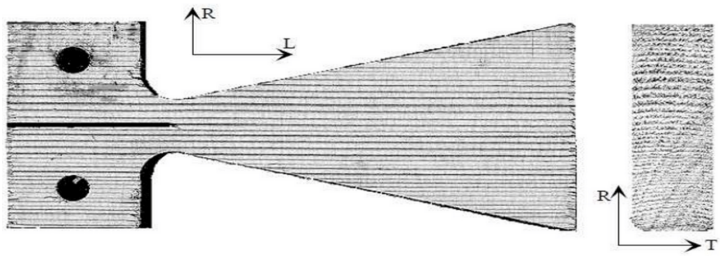



FIGURE 2.5 – Eprouvette DCB à inertie variable [5].

## Éprouvette CTS

L'éprouvette *Compact Tension Shear* (CTS) a été conçue pour la première fois par Richard [55]. Elle est présentée sur la Figure 2.6. Ensuite Luo [63] l'a utilisée pour déterminer l'évolution du front de fissure en mode mixte dans les polymères. Travaillant sur les matériaux métalliques et ductiles, Zhang et al. [64] ont repris cette géométrie d'éprouvette pour faire du mode mixte. Reprenant toujours la géométrie de cette éprouvette, Caumes [65] ainsi que Valentin et al. [6] l'ont utilisée sur les matériaux à symétrie orthogonale comme le bois. Ils ont effectué un certain nombre de travaux avec cette éprouvette, en réalisant notamment les sollicitations en mode d'ouverture de fissure, en mode de cisaillement ou en mode mixte. Cette éprouvette est fixée entre deux bras en acier munis de trous de sollicitation où s'appliquent des forces symétriques opposées P. La fissure est orientée dans le plan (R, L) et le taux de mixité est engendré par l'angle $\beta$.

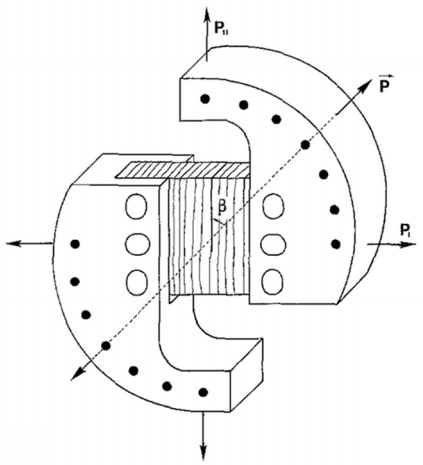



FIGURE 2.6 – Éprouvette CTS [6].

## Éprouvette MMCG

En prenant en compte les configurations des géométries précédentes Moutou Pitti [7, 66] a réalisé une éprouvette appelée *Mixed Mode Crack Growth* (MMCG) (Figure 2.7). Il a modifié plus particulièrement l'éprouvette DCB initiale en ajoutant à cette dernière un talon inférieur. La particularité de cette éprouvette est de garantir la stabilité de la fissure et de reproduire l'ensemble des modes de sollicitations. Elle garantit une stabilité de la fissure durant sa propagation. En effet, elle permet pour une plage de propagation donnée, en mode 1, en mode 2 et en mode mixte, une stabilité voir une diminution considérable du taux de restitution d'énergie.

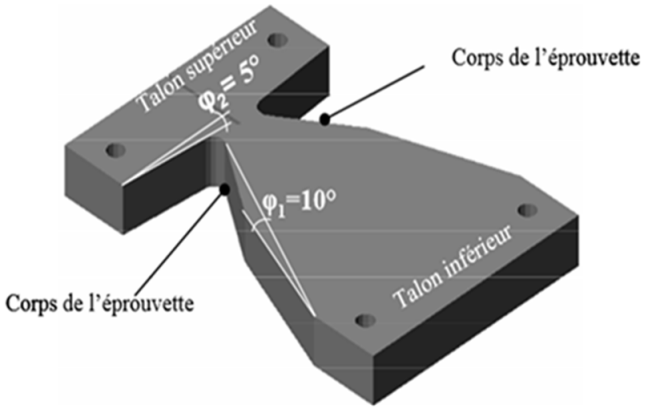



FIGURE 2.7 – Eprouvette bois [7].

## Éprouvette WS

L'éprouvette *Wedge Splitting* (WS) a été utilisée pour conduire des essais dans les matériaux comme le béton par Tschegg [56]. Elle a été mise au point pour étudier les propriétés de rupture pendant la propagation stable de la fissure. Par la suite, un certain nombre de personnes l'ont utilisée et étendue au matériau bois, comme Stanzl-Tschegg [67]. La forme de l'éprouvette WS peut être cubique ou cylindrique. Le système de montage est assez simple et la conception facile à mettre en œuvre. Elle induit une parfaite symétrie en mode 1. Le schéma de cette éprouvette est représenté sur la Figure 2.8.

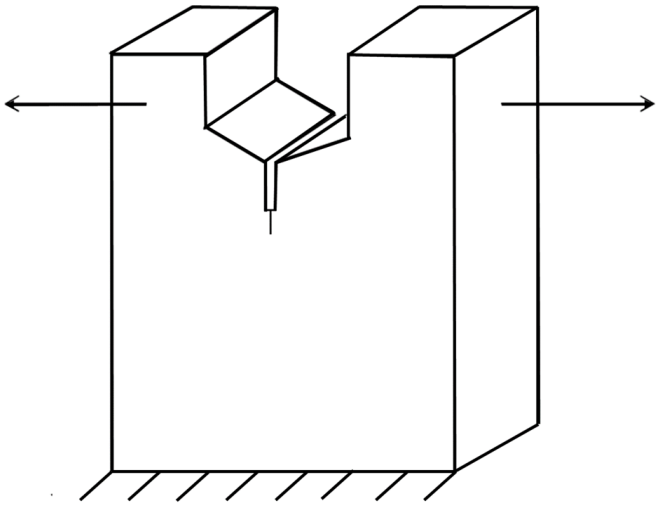


FIGURE 2.8 – Eprouvette ws.

## Éprouvette WS modifiée

S'inspirant des configurations et des formes des éprouvettes SENT et de l'éprouvette WS, Meite et al.[57] ont modifié la géométrie précédente dans sa partie située juste avant la fissure initiale. Cette éprouvette a été conçue et utilisée pour réaliser les essais en mode d'ouverture de fissure (mode 1) et en mode mixte.
D'autres éprouvettes existent dans la litérature telles que la *Single Edge Notched Bending* (SENB) [68, 69], l'éprouvette à entaille centrale, l'éprouvette *Double Edge Crack* (DEC) [70].

## Quelques études issues de la bibliographie sur ces éprouvettes

L'objectif de cette partie est de rappeler quelques études issues de la bibliographie sur certaines de ces éprouvettes sur les essences tempérées. En effet, si les aspects de la mécanique de la rupture n'ont jamais été discutés pour les essences tropicales, ils l'ont déjà été sur les essences tempérées. Les auteurs ont étudiés la fissuration en mode 1 (le plus étudié) et en mode mixte, sur les essences tempérés en utilisant les éprouvettes énumérées plus haut dans cette partie. Parmi eux, Valentin [71] a utilisé l'éprouvette *Compact Tension Shear* (CTS) conçue par Richard (1983) pour les matériaux isotropes et a montré que cette éprouvette pouvait s'étendre aux matériaux à symétrie orthogonale comme le bois. Il a pu numériquement et

expérimentalement réaliser les essais en mode 1 et mode mixte. De son côté Oliveira [72] a numériquement réalisé sur du Pin maritime et avec des éprouvettes *Double Cantilever Beam* (DCB), les éprouvettes *Single Edge Notched Tensile* (SENT) et les éprouvettes *Wedge Splintting* (WS), des essais en configuration mode mixte dans le système de propagation des fissures RL. Il a de ce fait utilisé un concept de fissure équivalente lié à la zone de fracturation et a fourni des valeurs précises des taux de restitution d'énergie en mode 1 et 2. C'est une analyse tridimensionnelle des éléments finis, incluant un modèle de dommages cohésifs. Cette façon de faire ne nécessite pas de mesures de fissures pendant la propagation. Moutou et al. [73] ont utilisé l'éprouvette MMCG qui est un compromis entre l'éprouvette *Double Cantilever Beam modifiée* (DCB modifiée) et *Compact Tension Shear* (CTS) pour étudier les effets du fluage sur la fissuration en mode mixte. Les auteurs ont testé différents paramètres géométriques afin d'obtenir une forme finale optimisée en utilisant la méthode de l'intégrale $M$ implémenté dans un logiciel d'éléments finis. L'objectif visé était de rechercher la stabilité de la propagation des fissures pour différents rapports de modes mixtes. Yoshihara [74], a quant à lui effectué des essais en mode mixte sur des poutres en porte-à-faux et à flexion parallèle sur des éprouvettes DCB en Epicéa. Le mode mixte sur le matériau bois a été aussi étudié par [75, 76].

## Choix des éprouvettes

Pour ce travail, le choix est porté sur les éprouvettes CTS et MMCG pour les essais en mode d'ouverture de fissure et MMCG uniquement pour les essais en mode mixte. En effet, l'utilisation de l'éprouvette CTS permet d'obtenir une rupture instantanée de l'éprouvette. L'éprouvettes CTS se caractérise généralement par une propagation immédiate de la fissure après l'apparition, ce qui rend le phénomène instable. L'éprouvette MMCG permet d'observer une propagation de fissure. L'avantage de l'éprouvette MMCG est également d'obtenir une diminution du taux de restitution d'énergie lors de la croissance des fissures. Dans ce cas, si le matériau est viscoélastique, on peut facilement séparer les effets dépendant du temps et les paramètres de rupture afin de connaître l'impact réel du temps sur la fissuration du

matériau. Pour des raisons pratiques, les configurations de ces éprouvettes seront modifiées et les détails seront donnés au chapitre 3.

## 2.3 Champs mécaniques en milieu orthotropes

Dans les prochains chapitres, les calculs des paramètres de rupture des essences présentées au chapitre 1 seront menés. Pour ce faire, certaines formules et expressions utilisées sont rappelées ici. On rappelle ici les modes de sollicitation et les zones observables lors d'une fissuration (on détermine la distribution des champs de contrainte au voisinage du front de la fissure pour des matériaux isotropes ainsi que pour des matériaux à symétrie orthotrope). Deux approches différentes du problème de la propagation de fissure sont considérées :

- l'approche locale, qui caractérise la distribution des contraintes au fond de la fissure avec le facteur d'intensité de contrainte $K$ (on dit surtout qu'il exprime l'intensification des contraintes et des déformations dans la zone perturbée par la fissure ou le défaut) ;
- l'approche globale, qui résulte d'un bilan énergétique relatif à la création de deux nouvelles surfaces de rupture, caractérisée par le taux de restitution d'énergie $G$.

La mécanique de la rupture étudie l'interaction entre la discontinuité géométrique (fissure) et le milieu continu avoisinant ainsi que l'évolution de cette discontinuité. D'un point de vue mécanique, on peut distinguer, schématiquement, trois zones successives dans un milieu fissuré (cf. Figure 2.9) :

- la zone 1 (zone d'élaboration) : elle se trouve à la pointe de la fissure et dans le sillage laissé par la fissure au cours de sa propagation. L'étude de cette zone est très complexe à cause de contraintes importantes qui ont fortement endommagé le matériau. Celui-ci devenant discontinu, la taille de cette zone est en général très faible. Elle est ponctuelle d'un point de vue mécanique ;

- la zone 2 (zone singulière) : dans cette zone, les champs de déplacements, de déformations et de contraintes sont continus et possèdent une formulation indépendante de la

géométrie lointaine de la structure. On démontre que dans cette zone [77], les composantes du champ de contraintes sont infinies au voisinage du front de fissure ($r \to 0$). Plus exactement, la singularité est en $r^{-1/2}$ en milieu élastique linéaire. Le matériau ayant une limite élastique, il existe un rayon ($r_p$) autour de la pointe de fissure déterminant la forme de la zone plastique. C'est en fonction de la taille de la zone plastique que l'on dira que la rupture est fragile ou ductile ;

– la zone 3 : c'est une zone extérieure comprenant les champs lointains se raccordant d'une part à la zone singulière, et d'autre part aux conditions aux limites en charges et en déplacements. Dans cette zone, les champs de déplacements, de déformations et contraintes varient peu, et peuvent être approchés par des polynômes communément utilisés dans les différentes méthodes de résolution.

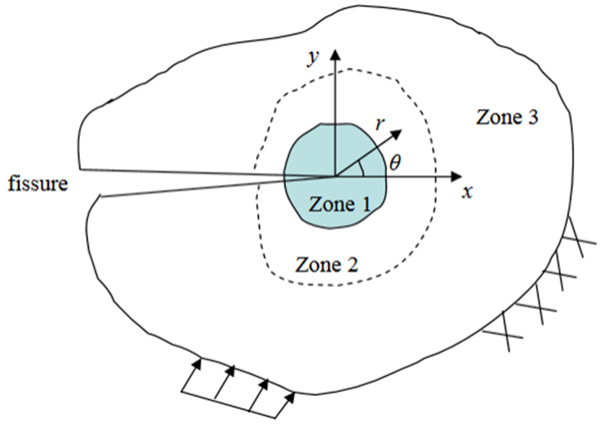



FIGURE 2.9 – Zones englobant la pointe de fissure [8].

La forme générale du champ des contraintes au voisinage de l'extrémité d'une fissure dans un matériau dont le comportement est élastique et linéaire s'exprime à l'aide des formes singulières de Sih [52] :

$$\sigma_{ij} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) + \left( \sum_{m=0}^{\infty} \alpha_m r^{\frac{m}{2}} g_{ij}^{(m)}(\theta) \right) \tag{2.1}$$

Les coordonnées $(r, \theta)$ sont repérées par rapport à l'extrémité de la fissure (Figure 2.10). Les fonctions addimentionnelles $f_{ij}$ et $g_{ij}$ dépendent du mode de sollicitation. $g_{ij}$ dépend

aussi de l'état de contrainte et de la géométrie du corps fissuré.

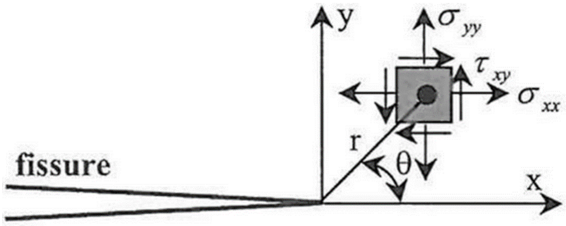



FIGURE 2.10 – Définition des axes (x,y) et des coordonnées (r,$\theta$) au voisinage de l'extrémité d'une fissure

.

Au voisinage immédiat de l'extrémité de la fissure, les contraintes présentent une singularité en $1/\sqrt{r}$, c'est-à-dire que lorsque $r \to 0$ elles tendent vers l'infini. Les termes de degré en $r$ plus élevé de la relation 2.1 sont alors négligeables. La zone la plus critique est donc située au voisinage immédiat de l'extrémité de la fissure et on ne considère alors que les termes en $1/\sqrt{r}$, autrement dit que les champs de contraintes asymptotiques qui sont de la forme :

$$\sigma_{ij} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) \tag{2.2}$$

Ces champs asymptotiques peuvent être décrits à l'aide de l'approche de Westergaard. Nous avons vu qu'il existe trois façons (appelées modes présentés à la Figure 2.1) d'appliquer une force, à une éprouvette, pour permettre à une fissure de se propager.

Les modes sont définis et exprimés de la manière suivante et sont illustrés sur la figure 2.1 :

– le mode 1 : c'est celui que l'on appelle mode d'ouverture des fissures, pour lequel les déplacements aux lèvres de la fissure sont perpendiculaires à la direction de propagation. On parle de charge normale perpendiculaire au front de fissure. Dans une approche locale, les champs mécaniques dans la zone singulière (approche $2D$), sont définis de la manière suivante [52, 78] :

$$\sigma_{11} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \times cos\frac{\theta}{2} \times \left(1 - sin\frac{\theta}{2} \times sin\frac{3\theta}{2}\right) \tag{2.3}$$

$$\sigma_{22} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \times cos\frac{\theta}{2} \times \left(1 + sin\frac{\theta}{2} \times sin\frac{3\theta}{2}\right) \tag{2.4}$$

$$\sigma_{12} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \times cos\frac{\theta}{2} \times sin\frac{\theta}{2} \times cos\frac{3\theta}{2} \tag{2.5}$$

De même, les champs de déplacement pour ce mode de sollicitation s'écrivent de la manière suivante [52] :

$$U_1 = \frac{K_I}{4\mu} \times \sqrt{\frac{r}{2\mu}} \times \left[(2\chi - 1) \times sin\frac{\theta}{2} - sin\frac{3\theta}{2}\right] \tag{2.6}$$

$$U_2 = \frac{K_I}{4\mu} \times \sqrt{\frac{r}{2\mu}} \times \left[(2\chi + 1) \times sin\frac{\theta}{2} - sin\frac{3\theta}{2}\right] \tag{2.7}$$

avec :

- $K_I$ : facteur d'intensité de contrainte en mode 1 ;
- $\nu = \frac{\lambda}{2(\lambda+\mu)}$ : coefficient de Poisson ;
- $\mu = \frac{E}{2(1+\nu)}$ : coefficient de cisaillement de Lame ;
- $E = \frac{\mu(3\lambda+2\mu)}{\lambda+\mu}$ : module de Young ;
- $\lambda = \frac{\nu E}{(1-2\nu)(1+\nu)}$ : coefficient de Lame.

Le terme $\chi$ représente une constante définie, selon que le calcul est effectué en déformations planes ou en contraintes planes, de la façon suivante :

- $\chi = 3 - 4\nu$ pour les déformations planes ;
- $\chi = \frac{3-\nu}{1-\nu}$ pour les contraintes planes.

– le mode 2 : appelé encore mode de cisaillement. Les déplacements aux lèvres de la fissure sont parallèles à la direction de propagation. On parle de cisaillement perpendiculaire au front de fissure. Pour ce mode de sollicitation les champs mécaniques dans la zone singulière (approche $2D$) sont exprimés, de la façon qui suit [52, 78] :

$$\sigma_{11} = -\frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \times sin\frac{\theta}{2} \times \left(2 + cos\frac{\theta}{2} \times cos\frac{3\theta}{2}\right) \tag{2.8}$$

$$\sigma_{22} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \times sin\frac{\theta}{2} \times cos\frac{\theta}{2} \times cos\frac{3\theta}{2} \tag{2.9}$$

$$\sigma_{12} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2 * \pi r}} \times cos\frac{\theta}{2} \times \left(1 - sin\frac{\theta}{2} \times sin\frac{3\theta}{2}\right) \tag{2.10}$$

Les champs de déplacement pour le mode 2 de sollicitation s'écrivent, comme exprimés dans [52], de la manière suivante :

$$U_1 = -\frac{K_{II}}{4\mu} \times \sqrt{\frac{r}{2\mu}} \times \left[(2\chi + 3) \times sin\frac{\theta}{2} + sin\frac{3\theta}{2}\right] \tag{2.11}$$

$$U_2 = \frac{K_{II}}{4\mu} \times \sqrt{\frac{r}{2\mu}} \times \left[(2\chi + 3) \times sin\frac{\theta}{2} + sin\frac{3\theta}{2}\right] \tag{2.12}$$

avec : $K_{II}$ : facteur d'intensité de contrainte en mode 2.

– le mode 3 : celui que l'on désigne par mode hors-plan, pour lequel les déplacements aux lèvres sont parallèles au front de fissure. Les contraintes données par [52], s'expriment de la manière suivante :

$$\sigma_{13} = -\frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \times sin\frac{\theta}{2} \tag{2.13}$$

$$\sigma_{23} = \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \times cos\frac{\theta}{2} \tag{2.14}$$

Le champ de déplacement pour le mode 3 de sollicitation s'écrit dans [52] de la manière suivante :

$$U_3 = -\frac{2K_{III}}{\mu} \times \sqrt{\frac{r}{2\mu}} \times sin\frac{\theta}{2} \tag{2.15}$$

avec : $K_{III}$ : facteur d'intensité de contrainte en mode 3.

## Critère de fissuration

Dans cette partie nous donnons et définissons les différents termes de la formule de la complaisance à déplacement imposé. Cette formule qui sera utilisée dans les prochains chapitres permet de calculer le taux de restitution d'énergie critique. L'énergie de Griffith notée $G$ (qu'on appelle le taux de restitution d'énergie) est définie par la variation d'énergie par

unité de surface fissurée, associée à la propagation d'une fissure dans un matériau linéaire élastique. La propagation de fissure va se produire lorsque l'énergie de Griffith $G$ atteindra une valeur critique notée $Gc$. Cette valeur $Gc$ est une mesure de la ténacité du matériau. Dans cette partie nous rappelons les expressions donnant le taux de restitution d'énergie. Considérons un matériau contenant une fissure de longueur $a$ (Figure 2.11). Une extension $\Delta a$ de cette fissure va s'accompagner des variations d'énergies suivantes :

$$\Delta W_{ext} = \Delta W_{elast.} + \Delta U \tag{2.16}$$

avec :

- $\Delta W_{ext}$ la variation d'énergie appliquée (due aux forces extérieures) ;
- $\Delta W_{elast.}$ la variation d'énergie élastique (emmagasinée) ;
- $\Delta U$ l'énergie dépensée lors de la propagation de la fissure sur la longueur $\Delta a$.

Dans la théorie initiale de Griffith qui s'applique à une rupture fragile, l'énergie $\Delta U$ correspond à l'énergie nécessaire pour créer de nouvelles surfaces dans le matériau ($\Delta U = \Delta W_{sép}$ avec $\Delta W_{sép}$ l'énergie de séparation des surfaces). L'énergie de Griffith $G$ est rapportée à l'unité de surface. Elle est définie à partir de $\Delta U$ par :

$$G = \lim_{\Delta A \to 0} \frac{\Delta U}{\Delta A} = \frac{\partial U}{\partial A} \tag{2.17}$$

où $\Delta A = b\Delta a$ est la surface fissurée lors de la propagation de la fissure sur la longueur $\Delta a$ dans une éprouvette d'épaisseur $b$. On considère généralement une épaisseur unité ($b = 1$). L'énergie de Griffith $G$, rapportée à l'unité d'épaisseur est alors donnée par l'expression suivante :

$$G = \lim_{\Delta a \to 0} \frac{\Delta U}{\Delta a} = \frac{\partial U}{\partial a} \tag{2.18}$$

Si l'on note $\gamma_s$ l'énergie spécifique de création de surface, on a :

$$G = \frac{\Delta U}{\Delta A} = 2\gamma_s \tag{2.19}$$

L'expression donnant l'énergie de Griffith ($G$) est donnée par unité de surface fissurée de la manière suivante :

$$G = \frac{\pi(\sigma_R)^2 a}{E} \tag{2.20}$$

La contrainte à la rupture $\sigma_R$ est alors donnée d'après les relations (2.19) et (2.20) par :

$$\sigma_R = \sqrt{\frac{GE}{\pi a}} = \sqrt{\frac{2E\gamma_s}{\pi a}} \tag{2.21}$$

Si l'on pose :

$$\alpha = \sqrt{\frac{2}{\pi}}$$

on trouve une expression que l'on appelle contrainte de rupture par clivage notée :

$$\sigma_R = \alpha\sqrt{\frac{E\gamma_s}{a}}$$

.

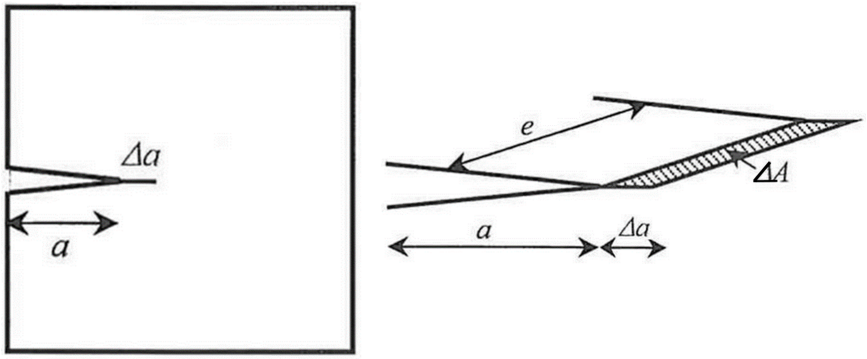



FIGURE 2.11 – Propagation de fissure sur une longueur $\Delta a$ [9].

Pour bien comprendre la signification de l'énergie de Griffith $G$ ou du taux de restitution d'énergie, on va envisager à partir d'une configuration initiale, la propagation (dans une éprouvette d'épaisseur unité) dans les deux cas classiques suivants (Figure 2.12) :

- propagation à déplacement $d$ imposé (Figure 2.12 (c)) ;
- propagation à force $F$ imposée (Figure 2.12 (b)).

La méthode qui sera utilisée pour trouver les paramètres de calculs nous donnera l'ouverture et l'avancée de fissure. C'est pour cette raison que seule la propagation à déplacement imposé sera utilisée lors des calculs dans les prochains chapitres. Nous n'aborderons donc pas le cas de la propagation à force imposée.

Dans le cas d'une propagation de fissure à déplacement imposé d ; si $\Delta x = 0$, la variation d'énergie externe sera nulle ( $\Rightarrow \Delta W_{ext} = 0$), on en déduit alors l'énergie élastique $W_{élast} = \frac{1}{2}Fx$

soit en introduisant la complaisance (c'est à dire l'inverse de la rigidité) par la relation :

$$C = \frac{x}{F}$$

On en deduit $W_{élast} = \frac{1}{2}CF^2 = \frac{x^2}{2C}$

soit $\Delta W_{elast.} = \left(\frac{\partial W_{elast.}}{\partial a}\right)\Delta a = \left(\frac{\partial W_{elast.}}{\partial C}\right)\left(\frac{\partial C}{\partial a}\right)\Delta a = -\frac{x^2}{2C^2}\left(\frac{\partial C}{\partial a}\right)\Delta a$

Ainsi, l'énergie élastique emmagasinée décroit.

Enfin, puisque

$$\Delta W_{ext} = 0 = \Delta U + \Delta W_{elast} \Rightarrow \Delta U = -\Delta W_{elast}$$

On en déduit :

$$\Delta U = \frac{x^2}{2C^2}\left(\frac{\partial C}{\partial a}\right)\Delta a$$

et comme

$$G = \lim_{\Delta a \to 0}\left(\frac{\Delta U}{\Delta a}\right)$$

il vient :

$$G = \frac{x^2}{2C^2}\left(\frac{\partial C}{\partial a}\right) = \frac{F^2}{2}\left(\frac{\partial C}{\partial a}\right)_d \tag{2.22}$$

Dans la relation de l'équation 2.22, à déplacement imposé, l'énergie de Griffith G est une expression qui provient d'une diminution d'énergie élastique qui a servi à faire propager la fissure, matérialisée par l'aire hachurée de la Figure 2.13 (a).

La relation de l'équation 2.22 est rapportée à l'unité d'épaisseur. Dans le cas où l'épaisseur $b$ n'est pas égale à l'unité, il convient de modifier cette relation comme suit :

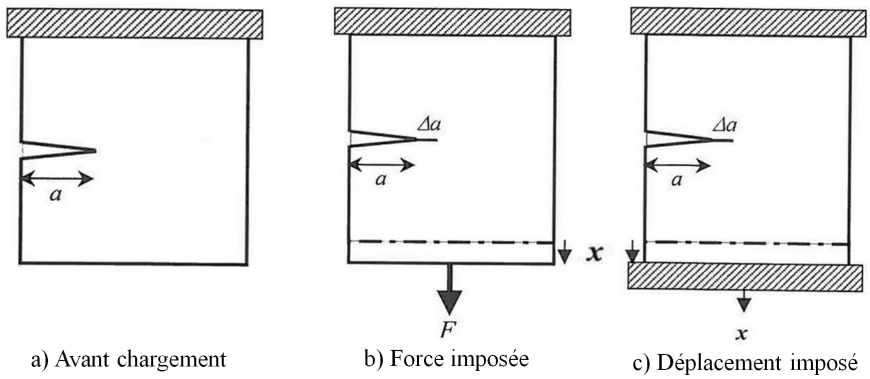



FIGURE 2.12 – Propagation stable à force imposée ou à déplacement imposé [9].

$$G_C = \frac{(F_{ci})^2}{2b} \times \left(\frac{\partial C}{\partial a}\right)_d \tag{2.23}$$

où $F_{ci}$ $(i = 1, 2, 3, ...)$ est la force dite critique qui indique une augmentation $\Delta a$ de la longueur de la fissure $a$. De façon générale, la complaisance est définie par $\Delta C = U_i/F_{ci}$, où $U_i$ est l'ouverture de fissure induite par chaque force critique $F_{ci}$. Dans l'équation 2.23, $\Delta C$ est l'augmentation de la complaisance correspondant à l'augmentation observée de la longueur de fissure d'une quantité $\Delta a$. L'indice $d$ signifie que le test est effectué avec un déplacement imposé. C'est cette formule qui sera utilisée pour la suite dans les prochains chapitres.

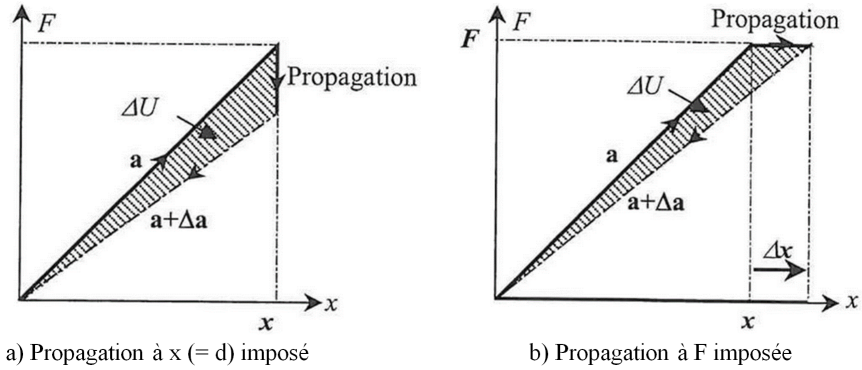



FIGURE 2.13 – Variation de la force lors d'une propagation de fissure à force imposée ou à déplacement imposé [9].

D'une manière concrète, la valeur de $G$ définit un paramètre énergétique global qui rend compte du changement d'énergie potentielle qui accompagne la propagation d'une fissure

dans une structure.

La plupart des éprouvettes de caractérisation des propriétés de rupture sollicitent les fissures en mode 1. Les méthodes de mesure et de calcul font intervenir le lien entre $K_I$ et $G$, ce qui conditionne le lien entre $K_{IC}$ et $G_{IC}$. Cette relation est exprimée de la manière suivante :

– en contraintes planes :

$$G_{ic} = \frac{K_{ic}^2}{E}$$

– en déformations planes :

$$G_{ic} = \frac{(1-\nu^2)K_{ic}^2}{E}$$

Dans les matériaux orthotropes comme le bois, on préfère $G$ à $K$ car lorsque $G$ atteint une valeur critique $Gc$, la rupture se produit. C'est ce critère qui a l'avantage de ne pas nécessiter la connaissance de la répartition des contraintes en fond de fissure.

Nous avons vu les éprouvettes utilisées et rappelé la formule qui nous permet de quantifier et d'étudier la fissuration des essences choisies au chapitre 1. En plus, parmi les paramètres permettant d'appliquer cette formule, il y a l'ouverture et la longueur de fissure. Pour ce faire, nous optons pour l'une des méthodes de mesure de champs, en l'occurrence celle de la grille qui fait l'objet du paragraphe ci-dessous.

## 2.4 Méthode de la grille

Pour étudier la fissuration des essences choisies dans tout ce manuscrit, nous avons besoin de l'ouverture et de l'avancée de fissure. Parmi les méthodes de champs sans contact qui existent, nous avons opté pour la méthode de la grille. Dans cette partie après avoir rappelé les principales méthodes de champs qui existent, est rappelé le principe de cette méthode. Il est aussi expliqué l'origine, disons la provenance éventuelle des erreurs de la méthode.

### 2.4.1 Intérêt des mesures de champs cinématiques

Les techniques de mesure de champs ont connu un essor formidable pendant ces deux dernières décennies [79], ce qui est dû aux performances toujours croissantes des caméras et des systèmes de traitement d'images associés, ceci à un coût désormais abordable. L'intérêt principal de ces techniques est de pouvoir visualiser des champs entiers de déplacements et de déformations, contrairement aux jauges de déformation électriques qui fournissent des mesures ponctuelles. Ces mesures de champs entiers permettent ainsi de révéler les hétérogénéités qui apparaissent souvent lors de la déformation d'éprouvettes testées sous sollicitations mécaniques.

Il existe plusieurs techniques de mesures de champs cinématiques sans contact. Les principales sont rassemblées dans le Tableau 2.1.

| ***Designation*** | ***Mesures*** |
|---|---|
| Mesure des déplacements surfaciques | - suivi des marqueurs<br>- corrélation d'images<br>- grille<br>- granularité laser |
| Mesure des déformations surfaciques | - suivi des marqueurs<br>- corrélation d'images<br>- grille |
| Mesure des déplacements hors-plan | - moiré d'ombre<br>- moiré de projection<br>- interférométrie |
| Mesure des déplacements et déformations tridimensionnelles | - corrélation d'images 3D |

TABLE 2.1 – Principales méthodes de mesure de champs cinématiques classées en fonction des grands domaines d'application.

Parmi toutes ces techniques, celles qui sont basées sur l'analyse d'images numériques sont les plus faciles à mettre en œuvre. En effet, une caméra numérique, (ou un appareil photographique numérique) relié à un ordinateur ainsi qu'un éclairage spécifique constituent l'équipement de base pour réaliser des mesures. La méthode de corrélation d'images numérique (CIN) est la technique la plus simple à mettre en œuvre et la plus utilisée en mécanique expérimentale. Elle consiste à suivre un marquage aléatoire de la surface et à déduire des images correspondantes des champs de déplacements, puis de déformations par lissage et différentiation des déplacements. Après les articles fondateurs dédiés à cette technique [80, 81, 82], de très nombreux articles ont suivi décrivant son utilisation dans divers contextes [83]. On relève plus particulièrement :

- l'observation de diverses hétérogénéités dans les champs de déformation, par exemple dues à l'endommagement localisé ou à la plastification de certaines zones d'éprouvettes testées. Le cas ultime est celui de la fissuration, considérée comme la présence d'une discontinuité dans un champ de déplacement [83, 84] ;
- au-delà de l'observation d'hétérogénéités, l'identification de paramètres pilotant des lois de comportement de divers degrés de complexité (élasticité, élasto-plasticité, fissuration, etc...), ce qui nécessite la mise en place de stratégies d'identification adaptées aux gros volumes de données à traiter [83, 84].

Les mesures de champs, principalement la CIN, sont aussi utilisées dans l'enseignement des sciences de l'ingénieur, par exemple pour :

- visualiser des mouvements de corps rigides afin de comprendre la cinématique associée et construire des centres instantanés de rotation [83, 84] ;
- visualiser les déformations dans des poutres afin de comprendre les hypothèses de la théorie sous-jacentes et de mieux cerner leur domaine de validité [83, 84].

Une technique voisine de la précédente (au sens où elle est basée sur un suivi d'images du marquage des surfaces à analyser) est la méthode dite de la grille. Elle consiste à traiter des images d'un motif périodique (appelé grille) déposé sur la surface à analyser. On considère que le déplacement induit par la déformation de l'éprouvette entraîne une modulation de la

phase de ce signal périodique. Ceci explique que les méthodes d'analyse des images diffèrent de celles utilisées en CIN puisqu'on emploie dans le cas présent des techniques basées sur l'analyse de Fourier. On montre que le compromis entre le niveau de bruit dans les cartes et finesse des détails dans ces cartes est globalement meilleur avec la méthode de la grille qu'avec la CIN [85]. C'est principalement pour cette raison que la méthode de la grille a été choisie comme outil de mesure de champs dans ce travail de thèse. En particulier, le calcul des déplacements et des déformations en chaque pixel permet a priori une caractérisation fine des fissures en termes d'ouverture et de position de l'extrémité de celle-ci [86], ce qui est recherché ici. Un autre avantage réside dans le temps de traitement, qui est également beaucoup plus court avec des images de grilles grâce à l'efficacité des algorithmes basés sur la transformée de Fourier rapide. En pratique, la détermination du déplacement en quelques centaines de milliers de points ne requiert que quelques secondes avec un ordinateur récent. Cette caractéristique est intéressante dans la perspective du traitement de longues séquences d'images acquises pendant des essais de fissuration. L'inconvénient de cette méthode, par rapport à la CIN, est le fait qu'il soit plus délicat de marquer les surfaces, la phase de dépôt de grilles étant notamment plus longue que celle qui consiste à déposer des marquages aléatoires avec un spray de peinture par exemple. La méthode de la grille est décrite en détails dans [15]. On en rappelle les principales caractéristiques dans les sections suivantes.

### 2.4.2 Principe général de la méthode de la grille

La première étape consiste à transférer une grille sur la surface à analyser. La procédure utilisée ici, proposée initialement dans [87], est expliquée plus en détails au chapitre 3 de ce manuscrit pour mieux intégrer les spécificités des éprouvettes utilisées. Les grilles ainsi transférées suivent fidèlement les déplacements et les déformations de la surface à analyser. La Figure 2.14 montre un détail d'une grille. Il s'agit de deux réseaux de traits perpendiculaires, chacun ayant un pas de 0,2 $mm$. Ces réseaux peuvent être considérés comme des porteuses spatiales dont la phase est modulée par la déformation de la surface sur laquelle ils sont collés. Pour comprendre le traitement d'une image de grille, on peut considérer que l'intensité

lumineuse est modélisée par la fonction suivante $s$ [88] :

$$s(x,y) = \frac{A}{2}\,(2 + \gamma.frng(2\pi fx + \phi_x(x,y)) + \gamma.frng(2\pi fy + \phi_y(x,y)) \tag{2.24}$$

où :

- A est l'intensité globale moyenne ;
- $\gamma$ représente le contraste du signal modulé de valeur comprise entre 0 et 1 ;
- $frng$ est une fonction $2\pi$-périodique qui décrit le profil du trait de grille, d'amplitude 1 et de valeur moyenne 0 ;
- $f$ est la fréquence de la porteuse, définie comme l'inverse du pas p de la grille qui est la distance inter-ligne ;
- $\phi_x(x,y)$ et $\phi_y(x,y)$ représentent les modulations des phases des porteuses suivant les axes $x$ et $y$, respectivement. Ces modulations sont provoquées par le déplacement des points physiques à cause de la déformation. Dans les vraies grilles, ces modulations sont également dues à des défauts de grilles. L'effet de ces défauts est en grande partie éliminé lorsque l'on soustrait les cartes de phases courante et de référence [88, 15], comme expliqué ci-dessous.

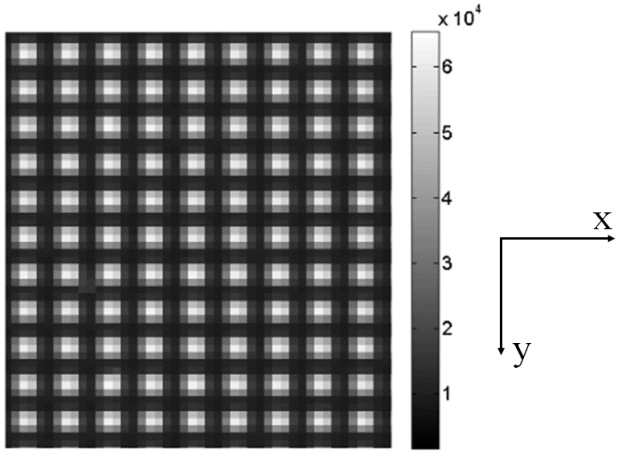



FIGURE 2.14 – Représentation d'une grille croisée [10].

Les paramètres $A$ et $\gamma$ sont supposés être constants ici, mais en pratique ils peuvent légèrement varier dans les images réelles. Il convient également de mentionner que dans les vraies

grilles, l'intensité de l'éclairage le long des lignes sombres est presque constante. La pixellisation entraîne cependant le fait que les points situés aux croisements entre les lignes soient plus sombres que les points des lignes situées à l'écart de ceux-ci. Avec la formule 2.24, un léger mouvement de la grille peut être interprété comme un changement des phases $\Phi_x$ et $\Phi_y$. On montre que les composantes planes du déplacement sont directement proportionnelles à ces changements de phases [15]. Une étape importante de la méthode consiste donc à extraire la phase des images courante et de référence de la grille. Diverses méthodes ont été proposées dans la littérature. On utilise ici la plus simple et la plus efficace d'entre elles nommée l'Analyse Localisée du Spectre (Localized Spectrum Analysis) dans [15]. Cette méthode est notée ALS dans la suite du chapitre.

### 2.4.3 Extraction des phases des images de grilles avec l'ALS

L'ALS consiste d'abord à calculer la transformée de Fourier fenêtrée des images de grilles de référence et courante. Pour chacune de ces images notée $s$, cette transformée s'écrit :

$$\widehat{s_g}(x,y,\theta) = \int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty} s(\eta,\xi)g(x-\eta,y-\xi)e^{-2i\pi f(\eta cos\theta+\xi sin\theta)}d\eta d\xi \tag{2.25}$$

où $g$ est une fenêtre centrée en chaque pixel de coordonnées $x, y$, là où $\widehat{s_g}(x,y,\theta)$ est calculé. En toute rigueur, la transformée de Fourier fenêtrée est définie comme une fonction de la position $(x, y)$ des points, mais aussi des fréquences selon $x$ et $y$. On choisit cependant de ne conserver ici que la fréquence nominale de la grille dans ce calcul, ce qui accélère considérablement les calculs sans dégrader les performances métrologiques. Concernant la définition de $g$, une gaussienne permet d'obtenir le meilleur compromis entre diverses contraintes pratiques, comme démontré récemment dans [89]. La fonction définissant cette gaussienne est donnée par l'équation suivante :

$$g(x,y) = \frac{1}{2\pi\ell^2}e^{\left(-\frac{x^2+y^2}{2\ell^2}\right)} \tag{2.26}$$

où $\ell$ est l'écart-type de la gaussienne, que l'on peut considérer comme une longueur caractéristique de la méthode.

Dans l'Equation 2.25, l'angle $\theta$ est égal à 0 ou $\pi/2$ selon que l'on analyse le réseau de traits verticaux pour trouver la phase selon $x$, ou le réseau de traits horizontaux pour trouver la phase selon $y$. On récupère donc au bilan en chaque pixel de coordonnées $(x, y)$ deux nombres complexes $\widehat{s_g}(x, y, 0)$ et $\widehat{s_g}(x, y, \pi/2)$. On admet généralement que les phases selon $x$ et $y$ sont simplement égales aux arguments de ces deux nombres complexes, respectivement. Ces angles sont déterminés modulo $2\pi$, ce qui induit des sauts de phases au sein même des cartes de phases dès que l'amplitude du déplacement dépasse une fois la valeur du pas de la grille. Une étape dite de dépliement des phases est alors nécessaire pour qu'elles présentent une évolution qui soit effectivement continue [15]. Le déplacement est finalement déduit des cartes de phases avec l'équation suivante :

$$\boldsymbol{u}(\boldsymbol{x}) = -\frac{p}{2\pi}\left(\boldsymbol{\phi}^{cur}(\boldsymbol{x} + \boldsymbol{u}(\boldsymbol{x})) - \boldsymbol{\phi}^{ref}(\boldsymbol{x})\right) \tag{2.27}$$

où $\boldsymbol{\phi}^{def}$ est la distribution de phase de l'image de grille déformée et $\boldsymbol{\phi}^{ref}$ la distribution de phase de référence. On note que les cartes de phases de l'image déformée sont données en des points physiques différents des points physiques des cartes de phase de l'image de référence. Le vecteur déplacement recherché $\boldsymbol{u}$ apparaît donc à gauche et à droite de cette égalité. $\boldsymbol{u}$ est donc la solution d'une équation implicite. La détermination de $\boldsymbol{u}$ s'effectue avec un simple algorithme du point fixe. On l'initialise en estimant $\boldsymbol{u}$ avec l'Equation 2.27 dans laquelle la carte de phase déformée est considérée connue aux mêmes points physiques que la carte de phase de référence. On obtient ainsi une première estimation de $\boldsymbol{u}$ qui est réinjectée dans la partie droite de l'Equation 2.27. Il s'en suit une estimation itérative de $\boldsymbol{u}$. En pratique, l'algorithme converge en une itération seulement. La raison est que la vitesse de convergence est d'autant plus importante que la dérivée de la fonction inconnue est petite. Comme il s'agit ici de la dérivée $\boldsymbol{u}$ et que l'on mesure des petites déformations, cette convergence est quasiment instantanée.

### 2.4.4 Estimation des erreurs de la méthode

On peut donner rapidement quelques informations sur les erreurs de mesure associées à la méthode de la grille. Ces informations sont extraites de [15], où les performances métrologiques de la méthode de la grille sont discutées en détails. Il convient ainsi de distinguer les erreurs systématiques et les erreurs aléatoires.

Les sources d'erreurs systématiques sont multiples et certaines sont communes à la méthode de la grille et à la CIN 2D. On peut citer par exemple l'effet du mouvement hors-plan ou un mauvais parallélisme entre capteur de la caméra et plan observé sur l'éprouvette. L'erreur systématique due au traitement des images de grilles est discutée en détails dans [15]. On montre notamment que la distribution de déplacement réelle est "amortie", avec une perte d'amplitude qui augmente à mesure que la fréquence de la distribution des déplacements augmente. En première approximation, ce phénomène peut être modélisé par une convolution du champ de déplacement réel par la fenêtre $g$ utilisée dans la transformée de Fourier fenêtrée définie par l'Equation 2.25, [90]. On a ainsi

$$u_i = \widetilde{u}_i \star g + \eta_{u_i}, \quad i \in (x, y) \tag{2.28}$$

où le symbole $\star$ représente l'opérateur de convolution entre deux fonctions. $\eta_{u_i}$ est quant à lui un bruit spatialement corrélé discuté brièvement dans le paragraphe suivant. On trouve un résultat analogue pour les composantes de déformation planes, comme démontré rigoureusement dans [90]. Ainsi, pour une carte de déformation comportant n'importe quelle signature en termes de fréquence et considérant le spectre d'amplitude de sa transformée de Fourier, cela signifie que l'amortissement est d'autant plus élevé que la fréquence activée dans le spectre d'amplitude est élevée. Ce phénomène se manifeste par un flou dans les cartes de déformation. En effet, l'influence des fréquences les plus hautes est presque annulée dans le spectre d'amplitude. Ce spectre est donc affecté de façon hétérogène par ce phénomène, les basses fréquences étant les moins touchées. Une conséquence est que l'erreur systématique change à travers toute carte de déformation hétérogène. Cela signifie également que l'erreur systématique dépend du signal lui-même. Il faut souligner que le même phénomène se produit

avec la CIN, mais le filtre correspondant à cette technique est le filtre de Savitzky-Golay [91]. De plus, d'autres sources d'erreurs systématiques telles que le biais d'interpolation se produisent avec la CIN et pas avec la méthode de grille. Discuter ces questions est toutefois hors de la portée de la présente étude. Le lecteur est renvoyé à la Réf. [85] pour plus d'informations sur l'erreur systématique.

L'erreur aléatoire dans les cartes de déplacement et de déformation est principalement due à la propagation du bruit du capteur. Le bruit qui en résulte dans les cartes est spatialement corrélé, ce qui explique que des tâches soient visibles dans les cartes de déformation. Le bruit dans ces cartes n'est donc pas indépendant d'un pixel à l'autre. La matrice de covariance de ce bruit spatialement corrélé a été entièrement caractérisée dans [90]. L'écart-type de ce bruit, qui est la racine carrée des termes diagonaux de cette matrice de covariance, a été étudié expérimentalement dans [92]. On y démontre que les formule prédictives théoriques données dans [90] sont bien vérifiées expérimentalement. Dans [92], l'écart type mesuré pour le bruit dans les cartes de déplacement ($u_x$ ou $u_y$) dû à la propagation du bruit du capteur est inférieur à un micromètre. L'écart-type pour les composantes de déformation $\varepsilon_{xx}$ et $\varepsilon_{yy}$ se situe généralement entre 3 et $4\times10^{-4}$, suivant les conditions d'éclairage. Cet écart-type est $\sqrt{2}$ fois plus petit que pour $\varepsilon_{xy}$. Il faut souligner que comme pour la CIN avec la taille du subset, le niveau de bruit dans ces cartes diminue avec la méthode de la grille à mesure que la taille de la fenêtre $g$ utilisé dans l'Equation 2.25 augmente. Des formules analytiques modélisant cette infuence sont disponibles dans [15, 92]. Les valeurs chiffrées données ici doivent donc être considérées comme des ordres de grandeurs seulement, estimés pour une taille de fenêtre couramment utilisée avec cette méthode mesure, à savoir lorsque l'écart-type $\ell$ de la gaussienne définie par l'Equation 2.26 est égal à la valeur du pas $p$ de la grille. Ces valeurs de l'écart-type diminuent naturellement lorsque $\ell$ augmente, et cette évolution doit être prédite de façon fiable par diverses formules établies dans [90, 92].

## 2.5 Conclusion

Le présent chapitre avait pour but de rappeler les origines de la mécanique de la rupture, et les éprouvettes utilisées par le passé pour l'observation de la progression de fissure. Les formules de base de la mécanique linéaire de la rupture, notamment celles donnant les facteurs d'intensités de contraintes et le taux de restitution d'énergie ont été développées. Différentes méthodes de mesures de champs ont été brièvement rappelées. Une de ces méthodes, celle qui sera utilisée dans cette étude, la méthode de la grille, a été présentée. La procédure d'obtention de déplacements et de déformations a été rappelée. La méthodologie du transfert de la grille et les résultats de l'étude expérimentale en mode 1 seront présentés dans le chapitre 3.

# Chapitre 3

# Étude de la fissuration en mode 1

## 3.1 Introduction

Nou avons vu au chapitre 2 que les études dédiées à la fissuration sur les essences tropicales étaient quasiment inexistantes. Seules les études sur la fissuration des essences tempérées existent. Elles ont été rappelées au chapitre 2. Dans le présent chapitre, les comportements de rupture en mode d'ouverture de l'okoumé, de l'iroko et du padouk sont étudiés avec la méthode de la grille. Les géométries d'éprouvettes CTS et MMCG modifiées sont considérées. Les détails sur les matériaux et les méthodes utilisés sont donnés dans la partie suivante, qui décrit le dispositif Arcan, les dispositifs expérimentaux, la méthode de grille et le protocole expérimental appliqué. La façon dont l'emplacement de la pointe de fissure est déduit des cartes de déplacement est décrite. Les résultats sont présentés et discutés dans la dernière partie du chapitre. En particulier, des cartes typiques de déformations et de déplacements sont représentées. De plus, des courbes typiques force-déplacement sont données. Enfin, on compare les valeurs des taux de restitution d'énergie critiques obtenues avec la méthode de la complaisance dans le déplacement imposé pour chaque espèce et on discute de l'influence de l'épaisseur de l'éprouvette sur les résultats obtenus.

## 3.2 Matériaux et méthodes

Cette partie a pour objectif de présenter les matériaux et méthodes utilisés pour la suite de ce travail. Les trois essences avec lesquelles les éprouvettes bois sont usinées ont été présentées au chapitre 1.

### 3.2.1 Éprouvettes bois CTS et MMCG modifiées

Les morceaux de tronc de toutes les essences testées ici ont été préalablement coupés au Gabon et conservés sous atmosphère équatoriale pendant 1 mois (cf. Figure 3.1). Ils ont ensuite été expédiés à Aubière, France. Ces pièces ont été conservées à température ambiante en laboratoire, dans l'environnement qui sera décrit par la suite dans ce manuscrit. Les éprouvettes ont donc été débitées dans les conditions environnementales du laboratoire. Dans ce cas, aucun séchage des éprouvettes n'a été observé lors des essais. La teneur en humidité interne de toutes les essences est donnée dans le Tableau 3.2 a été mesurée juste avant l'essai.

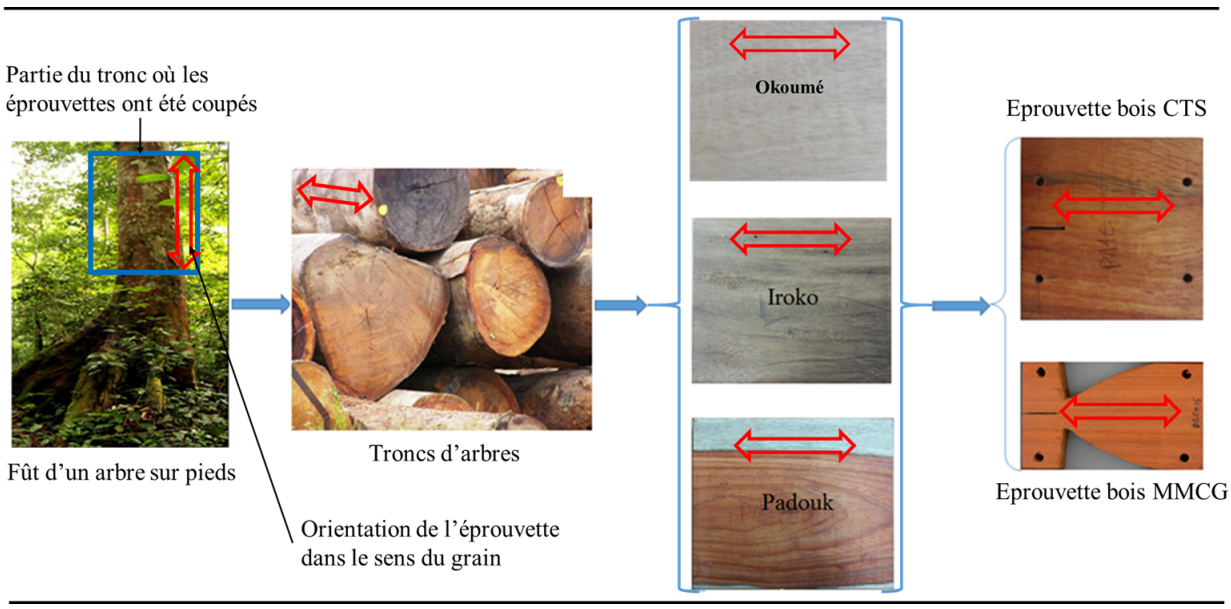



FIGURE 3.1 – De l'arbre aux éprouvettes bois.

Les éprouvettes utilisées dans cette partie sont des éprouvettes de forme CTS (Figures 3.2

et 3.3) et MMCG (Figures 3.4 et 3.5). Pour la conception de deux éprouvettes bois (CTS et MMCG modifiée), nous nous sommes inspirés des configurations des éprouvettes issues de la bibliographie vue au chapitre 2. Les modifications des dimensions opérées pour la conception de ces deux éprouvettes CTS et MMCG modifiée permettent d'utiliser un même système de sollicitation Arcan. Les éprouvettes bois ont été conçues avec les trois essences que sont l'okoumé, l'iroko et le padouk. Les critères de choix ont été exposés au chapitre 1.

## Éprouvettes bois CTS

Les dimensions des éprouvettes CTS sont données dans la Figure 3.2. Deux valeurs d'épaisseur ont été considérées, 12,5 $mm$ et 20 $mm$, pour voir si ce paramètre influe sur les paramètres de fissuration. Pour toutes les éprouvettes CTS, une entaille de longueur $a_i = 25$ $mm$ a été usinée le long de la direction de la fibre (RL) avec une scie à ruban. L'entaille a ensuite été étendue sur 3 $mm$ environ avec une lame de cutter pour amorcer la fissure. La Figure 3.3 présente un exemple d'éprouvette de bois CTS pour les trois essences étudiées.

Les dimensions de l'éprouvette CTS sont : 105 $mm$ de longueur et 105 $mm$ de largeur. La fissure initiale se trouve au milieu, de l'un des côtés. De façon à utiliser le même système Arcan pour les deux éprouvettes (CTS et MMCG), les trous de fixation ont été choisis à une distance de 85 $cm$ dans le sens de la fissure initiale. Dans le sens perpendiculaire à cette fissure initiale ces trous de fixation sont distants de 54,5 $mm$. Les trous de fixation ont un diamètre de $\phi = 10$ $mm$.

## Éprouvette MMCG modifiée

La première version de l'éprouvette MMCG a été mise au point par Moutou Pitti [66]. Par rapport à la version initiale de l'éprouvette MMCG, la taille des éprouvettes testées ici est légèrement plus petite. La principale raison est que le même dispositif d'ancrage est utilisé pour les éprouvettes CTS et MMCG, ce qui limite la taille des éprouvettes MMCG (Figure 3.4). Deux épaisseurs ont été considérées dans ce chapitre $b$= 15 $mm$ et 20 $mm$. D'une inertie très variable, les caractéristiques de l'éprouvette MMCG sont présentées sur

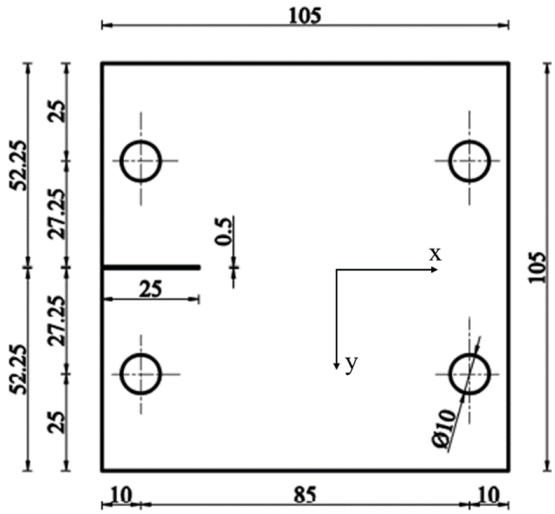



FIGURE 3.2 – Dimensions de l'éprouvette CTS (en $mm$).

(a) Okoumé (b) Iroko (c) Padouk

FIGURE 3.3 – Exemples d'éprouvettes CTS.

les Figures 3.4 à 3.6 Le talon supérieur a une base de 70 $mm$ et de largeur 20 $mm$. Il est légèrement incliné vers la partie inférieure d'un angle de rayon égale 2,5$^0$ qui mène jusqu'au congé de raccordement. Le talon inférieur a quant à lui une section de 70x20 mm$^2$. Cette éprouvette a été munie d'une fissure initiale notée $a_i$ de longueur $a_i = 22\ mm$. La longueur de fissure totale est égale à : $a = a_i + \Delta a$ pour les spécimens MMCG quelle que soit l'épaisseur. Les dimensions de cette éprouvette sont données à la figure 3.4.

L'avantage de l'éprouvette MMCG est que la fissure se propage de manière stable après son apparition. Au contraire, les éprouvettes CTS sont généralement caractérisées par la propagation instantanée de la fissure après l'apparition de la fissure, ce qui rend le phénomène instable. Une stabilité apparente de la fissure est cependant observée si l'épaisseur de l'éprou-

vette CTS devient significative. L'avantage de l'éprouvette MMCG est également d'obtenir une diminution du taux de restitution d'énergie lors de la croissance des fissures. Dans ce cas, si le matériau est viscoélastique, on peut facilement séparer les effets dépendant du temps et les paramètres de fissuration afin de connaître l'impact réel du temps sur la rupture du matériau.

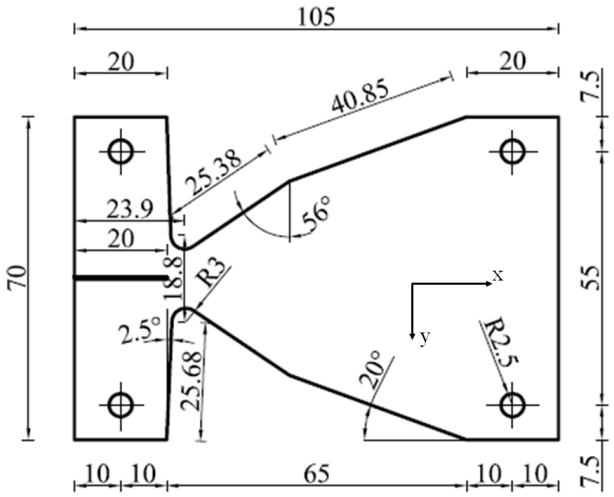



FIGURE 3.4 – Dimensions de l'éprouvette MMCG modifiée (en $mm$).

(a) Okoumé (b) Iroko (c) Padouk

FIGURE 3.5 – Éprouvettes typiques MMCG des trois essences : Okoumé, Iroko et Padouk.

Le tableau 3.1 indique les notations associées et le nom des éprouvettes testées dans ce chapitre.

Plusieurs essais ont été effectués mais ils n'ont pas tous été exploitables. Six éprouvettes CTS ont été testées. Pour les éprouvettes MMCG, nous ne rapportons ici que les essais pour lesquels la propagation des fissures a pu être observée et quantifiée, ce qui explique que le

| Eprouvettes bois | *Aucoumea klaineana* (Okoumé) | *Milicia excelsa* (Iroko) | *Pterocarpus soyauxii* (Padouk) |
|---|---|---|---|
| Éprouvettes CTS testées | O12,5 | I12,5 | P12,5 |
| | O20 | I20 | P20 |
| Éprouvettes MMCG testées | O1M15 | I1M15 | P1M15 |
| | O2M15 | I2M15 | P2M15 |
| | O1M20 | I3M15 | P3M15 |
| | O2M20 | I4M15 | P1M20 |
| | O3M20 | I1M20 | P2M20 |

Avec : O = Okume ; I = Iroko ; P = Padouk ;

1,2,3,..= Numéro d'essai pour l'éprouvette MMCG ; M = MMCG ; 12,5, 15 et 20 = Épaisseurs des éprouvettes

TABLE 3.1 – Notations utilisées dans ce chapitre.

pourcentage des éprouvettes présentant une épaisseur de 15 $mm$ et 20 $mm$ varie d'une espèce à l'autre (cf. Fissure 3.1).

La Figure 3.6 montre des exemples typiques d'éprouvettes testées. Des rondelles en aluminium ont été collées au niveau des trous de fixation pour renforcer ces zones, limitant ainsi le risque de rupture précoce des éprouvettes dans la zone de connexion. La partie supérieure des éprouvettes a été renforcée par de petites plaques en aluminium pour la même raison. Un adhésif époxy a été utilisé pour coller les rondelles et les petites plaques. Afin de déterminer les champs de déplacement et de déformation, une grille a été transférée à la surface de chaque éprouvette. Selon l'espèce et l'éprouvette, l'orientation des fibres est très peu visible à l'œil nu. On peut observer une certaine inclinaison par rapport à l'orientation théorique de la fibre dont le fil devrait être droit quand tous les éléments sont parallèles et orientés suivant l'axe de l'arbre.

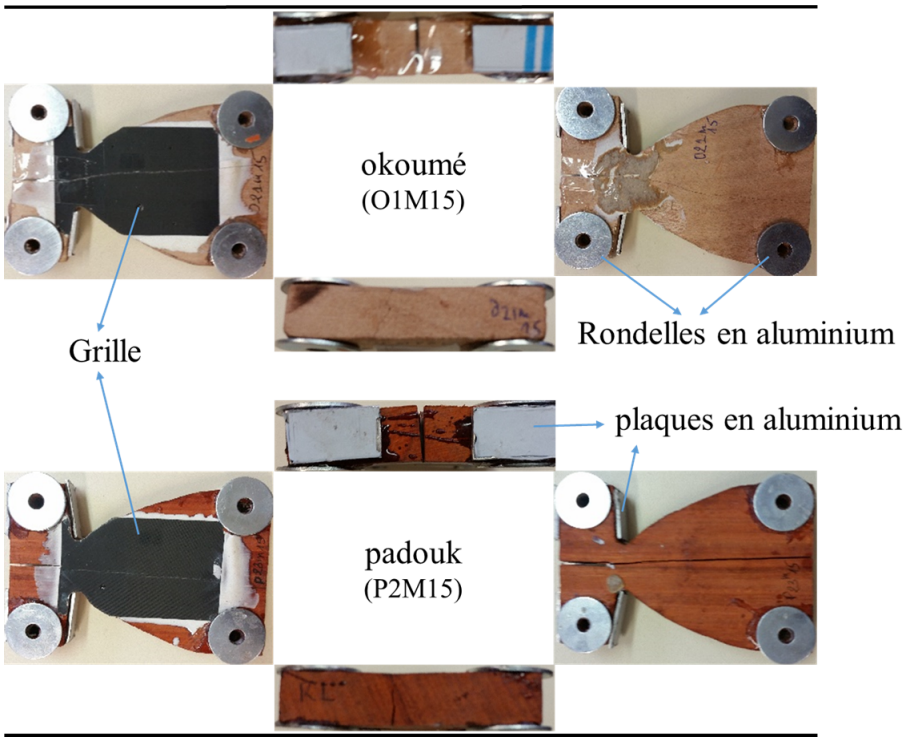



FIGURE 3.6 – Exemples typiques d'éprouvettes MMCG équipées de grilles.

### 3.2.2 Propriétés physiques et mécaniques des essences étudiées

Les principales propriétés mécaniques de ces trois essences sont rassemblées dans le Tableau 3.1. Ces valeurs sont extraites de la base des données du CIRAD [13] et sont obtenues pour une teneur en humidité relative de $HR = 12\%$.

L'humidité interne ($HI$) de chaque essence est obtenue en utilisant la formule suivante :

$$HI(\%) = \frac{m_S - m_0}{m_0} \times 100\% \tag{3.1}$$

où $m_S$ est la masse originale de l'éprouvette et $m_0$ le poids séché au four. Les éprouvettes ont donc d'abord été pesées pour obtenir la masse sèche notée $m_S$ (ou masse anhydre). Ces valeurs ont été obtenues à température ambiante, T = $21^0$ C $\pm$ $2^0$ C, et un taux d'humidité relative ($HR$) = 42% $\pm$ 2%. Les autres propriétés mécaniques sont issues de [13]. Elles ont été obtenues pour une température de $T = 22^0$ C et une humidité relative $HR = 12\%$ (Table 3.1). Les éprouvettes ont été ensuite placées dans un four à une température de

$110^0$ C pour déterminer la masse sèche. La température normalisée est de $103^0$ C [93], mais une température entre $100^0$ C et $130^0$ C est souvent utilisée dans la pratique. La température que nous avons utilisée ici se situe dans cette fourchette. Les éprouvettes sont restées dans le four jusqu'à ce que la masse soit complètement stabilisée soit au bout de 4 jours. Les éprouvettes ont été pesées, trois fois par jour pour vérifier si leur masse était bien stabilisée. Les valeurs ont également été mesurées avec un humidimètre et les résultats obtenus avec ce dispositif sont similaires à ceux obtenus avec l'équation 3.1.

| Eprouvette bois | *Aucoumea klaineana* ou Okoumé (SD) | *Milicia excelsa* ou Iroko (SD) | *Pterocarpus soyauxii* ou Padouk (SD) |
|---|---|---|---|
| Densité relative moyenne | 0,44 (0,06) | 0,64 (0,06) | 0,79 (0,09) |
| MEL (MPa) | 9690 (1231) | 12840 (2496) | 15870 (1885) |
| HI (%) | 9,12 | 7,94 | 7,29 |
| CRC (MPa) | 36 (5) | 54 (6) | 65 (8) |
| CRFS (MPa) | 62 (11) | 87 (15) | 116 (24) |

TABLE 3.2 – Caractéristiques mécaniques. MEL : module d'élasticité longitudinal, HI : teneur en humidité interne du matériau, CRC : contrainte de rupture en compression, CRFS : contrainte de rupture en flexion statique, SD : écart-type.

Dans le tableau 3.1, on peut observer que l'humidité interne des éprouvettes diminue à mesure que la densité augmente, ce qui semble logique.

### 3.2.3 Fabrication du système Arcan

Pour réaliser les essais, un système Arcan en acier a été conçu, les caractéristiques et la géométrie sont présentées figures 3.7. Sa forme laisse entrevoir un vide au milieu de sorte que la grille collée sur les éprouvettes soit visible et adaptée à tous les modes de sollicitations, y compris le mode mixte avec ses différents angles de sollicitations voir Figure 3.7. Ce dispositif a été conçu de façon à être utilisé pour réaliser les essais sur des éprouvettes CTS, en mode

d'ouverture (mode 1) et des éprouvettes MMCG, en mode 1 et en mode mixte.

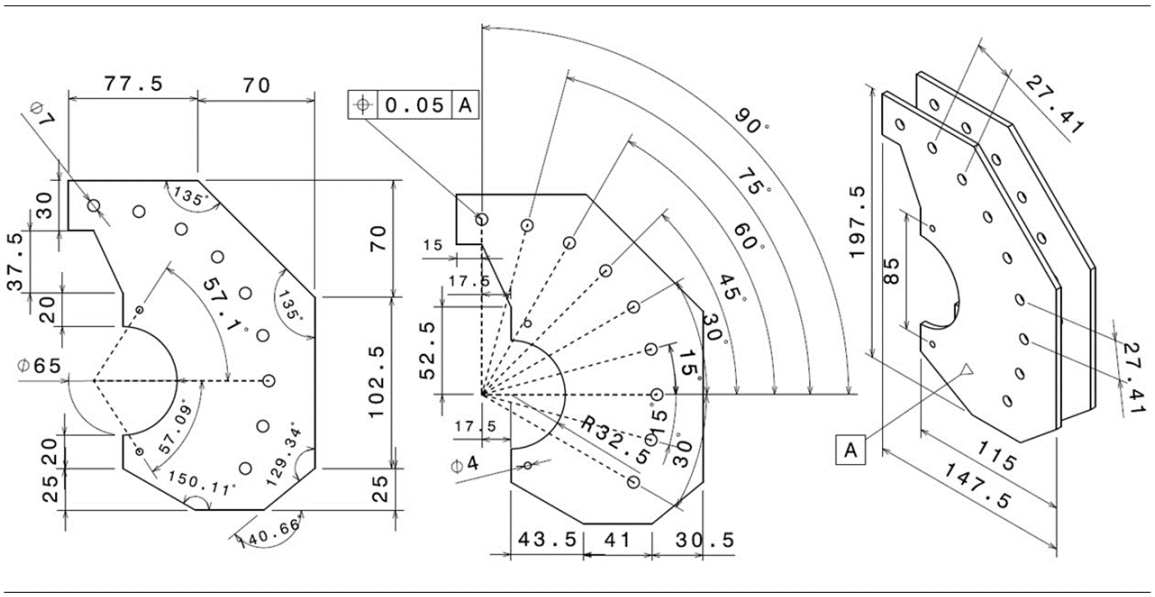



FIGURE 3.7 – Dimensions du système de fixation Arcan (en mm).

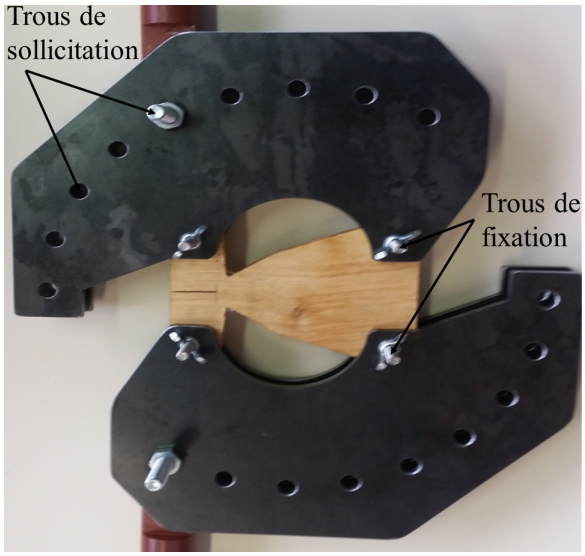



FIGURE 3.8 – Eprouvette MMCG dans le système de fixation Arcan.

Les figures 3.7 et 3.8 montrent le dispositif d'essai Arcan conçu et usiné spécifiquement pour cette étude. Il est fait en acier à haute résistance à la traction (HLE), dont les principales caractéristiques sont données dans [94]. Les trous de fixation pour les éprouvettes en bois ont

un diamètre $\phi = 4\ mm$, et les trous d'introduction du chargement (voir Figure 3.8) un diamètre $\phi = 7\ mm$. Ces trous de fixation ont été percés afin de pouvoir charger l'éprouvette avec différentes valeurs angulaires de l'angle $\alpha$ (avec $\alpha = 0^0,\ 15^0,\ 30^0,\ 45^0,\ 60^0,\ 75^0\ et\ 90^0$) par rapport à la direction verticale afin d'activer des modes de rupture. Pour plus d'informations sur l'acier utilisé voir l'annexe B.

### 3.2.4 Mesure de déplacement et de déformation à l'aide de la méthode de grille

Le procédé de grille est utilisé ici pour mesurer le champ de déplacement dans le plan sur la face avant de l'éprouvette afin de détecter et de suivre la longueur de fissure et son ouverture pendant les essais. Cette technique consiste à traiter les images d'une grille transférée sur l'éprouvette avant l'essai afin de déterminer les cartes de déplacement et de déformation [15]. Une grille bidirectionnelle ayant un pas de 0,2 $mm$ est imprimée avec une imprimante haute résolution (50 800 points par pouce) sur une mince feuille polymère. Cette feuille est ensuite collée sur l'éprouvette à l'aide d'une fine couche adhésive blanche (référence : Epotecny E504). Après polymérisation de la couche adhésive, la feuille polymère est décollée et seule l'encre reste collée sur la couche adhésive blanche. L'épaisseur finale de cette couche est typiquement égale à quelques dixièmes de $mm$. On peut donc raisonnablement supposer que la grille reflète parfaitement la déformation de la surface de l'éprouvette sans influencer les composantes réelles de déplacement et de déformation qui se produisent dans l'éprouvette lui-même. Des détails complets sur la procédure de transfert de la grille sont donnés dans [87]. Les images des grilles transférées sont ensuite prises avec une caméra pendant le test. La caméra PCO 2000 utilisée dans cette étude possède un capteur CCD 14 bits / $2048 \times 2048$ -pixel (CCD = Charged Coupled Device). Il est équipé d'un objectif de 105 $mm$. Le grossissement (et donc la distance $d$ entre le plan focal de la caméra et les éprouvettes) a été ajusté de telle sorte que la période de grille a été échantillonnée avec 5 pixels. Cela conduit à d = 67 $cm$. Avec ce réglage, la fissure et une partie de l'éprouvette qui contient la fissure à l'étude, étaient dans tous les cas dans le champ de vision de la caméra. La caméra a enregistré environ $1,83$ images / seconde

pendant les essais. On a vérifié qu'avec cette configuration et avec la vitesse de déplacement prescrite égale à 0,033 $mm/s$, une moyenne de 8 images prises à la suite pourrait être traitée sans induire un flou des images de grille. Cette procédure de moyenne peut être réalisée à des fins de réduction du bruit, comme étudié dans [95]. Certains événements dynamiques tels que la propagation soudaine des fissures apparaissent au cours des essais et la meilleure résolution temporelle possible est nécessaire pour capturer de tels événements entre deux images consécutives. Finalement toutes ces images de grille ont été traitées après l'essai en utilisant un programme développé au laboratoire. Des détails complets sur cette technique de traitement d'image de grille sont donnés dans [15], et des versions récentes des programmes correspondants sont disponibles en ligne [96]. La figure 3.9 présente un exemple de la grille, mais aussi deux éprouvettes CTS et MMCG sur lesquelles est transférée une grille.

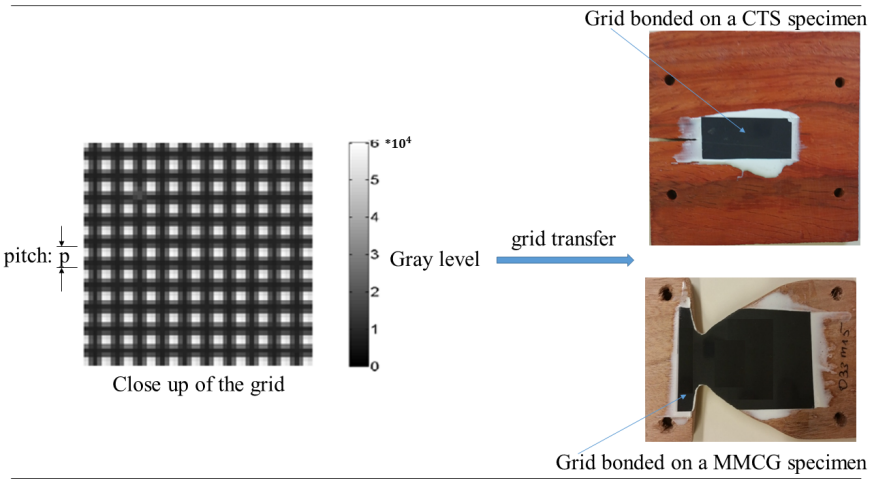



FIGURE 3.9 – Exemple de grilles transférées sur les éprouvettes CTS et MMCG [11].

## Matériel utilisé pour le collage de grille

Il est nécessaire avant toute procédure de transfert d'avoir le matériel suivant : des ciseaux, un rouleau de scotch, une tige en bois ou un coton tige, un pot pour mélanger et homogénéiser les colles, la grille et les deux composants de colles : un composant A (résine de couleur blanche), un composant B (durcisseur de couleur jaune), voir Figure 3.10.

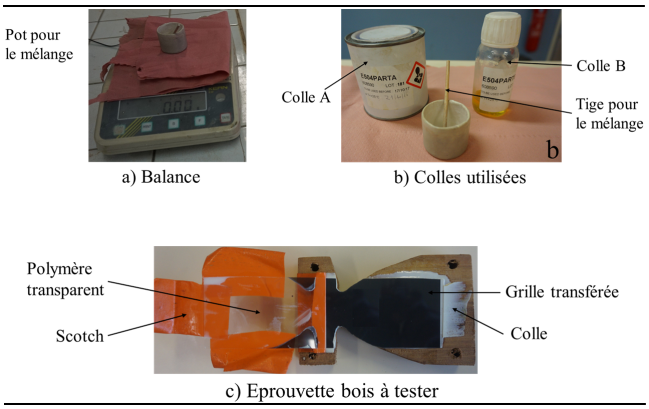



FIGURE 3.10 – Balance et composants utilisés

.

## Procédure de collage

Une fois les grilles découpées la phase de transfert peut commencer. Après avoir ôté toute trace de poussière en surface de l'éprouvette, la grille est transférée sur l'éprouvette en chassant l'air qui risque d'empêcher son bon transfert. Cette opération terminée, il est procédé à la polymérisation de la colle dans une étuve chauffée à $38^0$ C pendant 48 heures. A la sortie de cette enceinte thermique, et de façon à permettre la séparation des deux parties de la grille, les éprouvettes sont introduites dans une autre enceinte thermique à $80^0$ C pendant 20 minutes, voir Figure 3.11. Ce n'est qu'après ces 20 minutes que nous pouvons enlever le film transparent qui servait de support à l'encre de la grille.

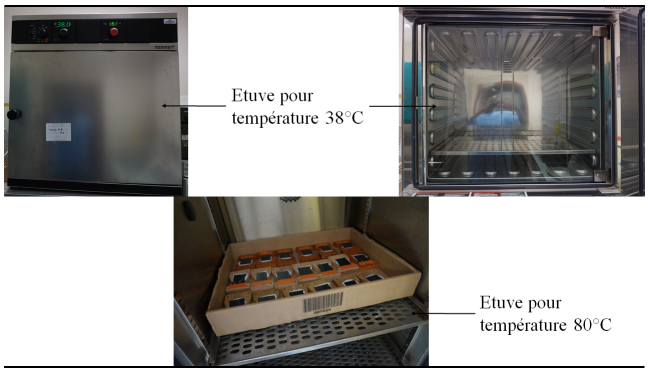



FIGURE 3.11 – Les deux étuves utilisées

.

### 3.2.5 Dispositif et protocole expérimental

Une machine de traction compression Zwick / Roel, de capacité 200 $kN$, représentée dans la Figure 3.12 a été utilisée pour effectuer les tests. La caméra et le dispositif Arcan décrits ci-dessus sont clairement visibles sur cette figure. La caméra a été fixée sur un trépied afin de photographier des images de grille stabilisées pendant les essais. Le dispositif miniature en acier Arcan utilisé pour charger les éprouvettes est également visible. Le mors mobile de la machine d'essai, est contrôlé en déplacements imposés. Il est équipé d'un capteur de force. L'information combinée avec le déplacement vertical $U_y$ obtenu par la méthode de grille a donné les courbes force-ouverture de la fissure pour chaque essai.

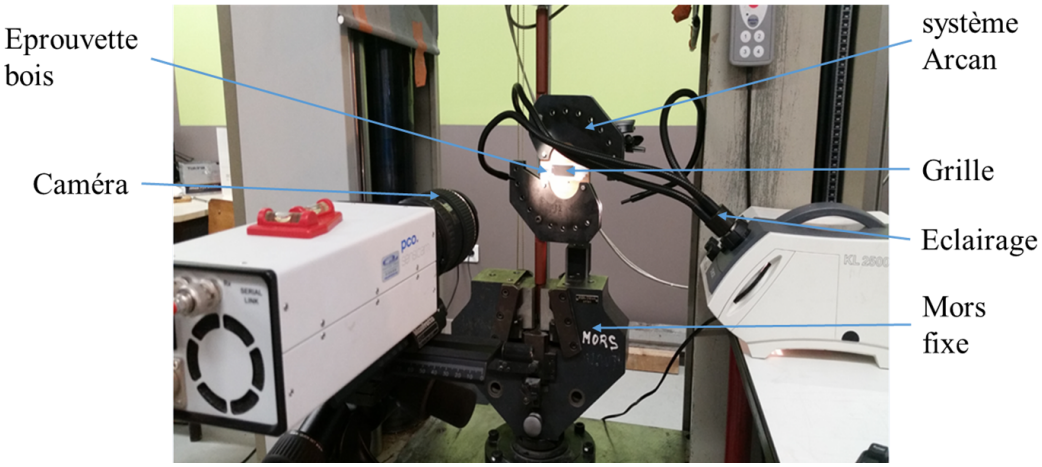



FIGURE 3.12 – Montage expérimental.

### 3.2.6 Méthode de la complaisance

Dans cette étude, la valeur du taux de restitution d'énergie critique des trois espèces a été calculée en utilisant la méthode de la complaisance. La formule donnant ce taux est donnée par la relation :

$$G_C = \frac{(Fc_i)^2}{2b} \times \left(\frac{\Delta C}{\Delta a}\right)_d \tag{3.2}$$

Les différents termes de l'équation 3.2 ont déjà été définis au chapitre 2. Pour les éprouvettes MMCG, la propagation de la fissure est progressive. Nous traitons les incréments $\Delta C$ et $\Delta a$

entre deux configurations stables de la fissure. La figure 3.13 montre une courbe typique de force en fonction de l'ouverture de fissure dans laquelle des chutes de force soudaines sont clairement visibles. Les pics et baisses brusques de force ne sont cependant pas vraiment observables en pratique à l'œil nu, ils sont détectés automatiquement par un programme développé dans le laboratoire. La force critique est cette force qui apparait juste avant la chute brutale de l'effort. L'augmentation de la longueur de fissure correspondante est déduite des cartes de déplacement.

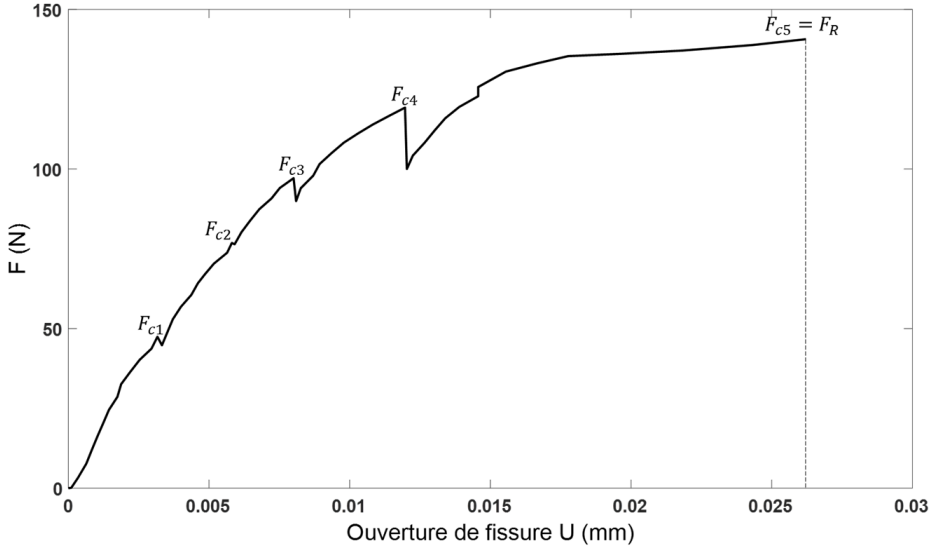



FIGURE 3.13 – Courbe de forces critiques en fonction de l'ouverture de fissure.

## 3.3 Méthode de détection de l'ouverture de fissure et de l'emplacement de la pointe de fissure dans le champ de déplacement

### 3.3.1 Ouverture de fissure

L'ouverture de fissure $U$ que l'on retrouve dans l'équation 3.2 est déduite des cartes de déplacement en utilisant la procédure suivante. Deux points A et B situés de part et d'autre

des lèvres de la fissure sont choisis (Figure 3.14). Ces points sont suffisamment éloignés de la fissure elle-même pour être certain que la détermination du déplacement de ces points ne soit pas altérée par la présence de la singularité dans le champ de déplacement due à la fissure. Ces points doivent cependant être suffisamment proches de la fissure, de sorte que la différence entre le déplacement vertical mesuré en ces points peut être considérée comme correspondant à l'ouverture de fissure le long de la ligne verticale définie par ces points. En pratique, une distance supérieure à la moitié de la largeur de la fenêtre de la transformée de Fourier fenêtre utilisée dans l'équation 3.2 est suffisante. Cette fenêtre utilisée dans le logiciel interne qui permet de déterminer les champs de déplacement et de déformation étant une Gaussienne avec un écart type égal à 5 *pixels*, cela signifie que selon la règle dite des $3\sigma$ [97], la valeur $5 \times 3 = 15$ Pixels est la distance minimale entre chaque point de la fissure qui doit être utilisée. La fissure est située entre ces deux points, mais son emplacement peut fluctuer d'une éprouvette à l'autre. Par conséquent, la distance entre $A$ et $B$ a été choisie égale à 90 pixels pour avoir une marge de sécurité suffisante. L'objectif de ce choix est de prévoir une éventuelle bifurcation de fissure. Ensuite, l'ouverture de fissure est obtenue par la relation $|U_y(A) - U_y(B)|$.

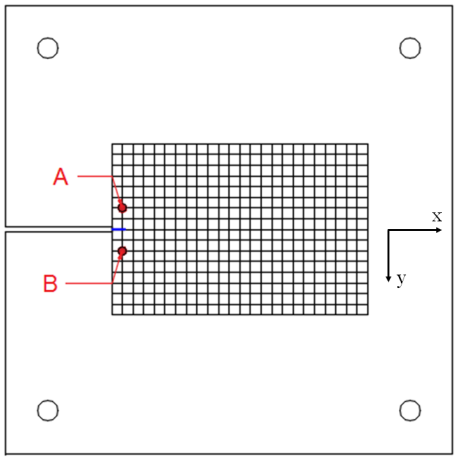



FIGURE 3.14 – Points A et B utilisés pour déterminer l'ouverture de fissure $U_y$.

### 3.3.2 Emplacement de la pointe de fissure

L'emplacement de la pointe de fissure doit être précisément estimé, la propagation de la fissure étant impliquée dans l'équation 3.2 ci-dessus. Il est important de mentionner que l'emplacement précis de la pointe de fissure ne peut pas être directement estimé en étudiant le champ de déplacement à l'œil nu. La raison principale est que le champ de déplacement renvoyé par le programme de traitement des images de grille est légèrement flou. En effet, il est démontré dans [90] que le déplacement mesuré est égal au déplacement réel convolué par la fenêtre de la transformée de Fourrier fenêtrée. La convolution induit un léger flou des cartes de déplacement, et la pointe de fissure n'est donc pas clairement visible. Dans ce contexte, l'emplacement de la pointe de fissure a été déterminé en utilisant la même procédure pour toutes les cartes de déplacement. Ses principales étapes sont les suivantes :

- une zone rectangulaire censée contenir la pointe de fissure est d'abord définie à la main ;
- le gradient du champ de déplacement le long de la direction verticale $y$, autrement dit la valeur apparente pour $\varepsilon_{yy}$, est estimée par différenciation numérique du champ de déplacement dans cette zone ;
- la valeur apparente pour $\varepsilon_{yy}$ devrait tendre vers l'infini pour les points des cartes appartenant à la fissure, mais la valeur apparente retournée par la différenciation d'image de la carte de déplacement est finie, avec une valeur qui diminue à l'approche de la pointe de fissure. Une valeur de seuil pour la valeur apparente de $\varepsilon_{yy}$ est donc fixée et les coordonnées de la pointe de fissure sont définies par les coordonnées du point situé le plus près possible (la fissure se propage de gauche à droite) et pour laquelle cette valeur de seuil est atteinte.

La valeur de seuil pour $\varepsilon_{yy}$ a été choisie égale à $0,10$. Une valeur pour laquelle l'avancée de fissure est presque identifiable sur toutes les images. Ce choix pourrait affecter le résultat, aussi d'autres valeurs proches de $0,10$ ont également été testées pour voir si les coordonnées de la pointe de fissure sont vraiment sensibles à ce paramètre. La figure 3.15 montre la coordonnée de la pointe de fissure obtenue pour trois valeurs de ce seuil, soit $0,08$, $0,10$ et $0,12$. Une éprouvette de padouk ($P32M20$) est utilisée à cette fin.

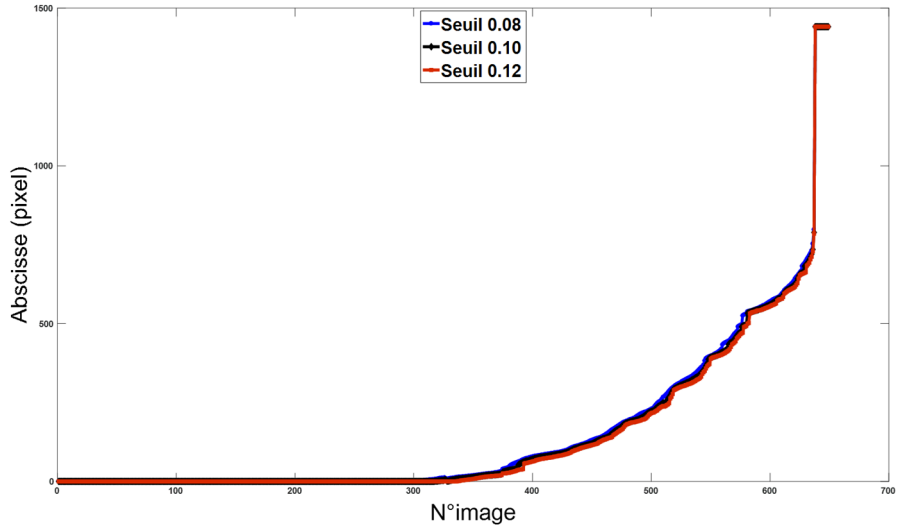



FIGURE 3.15 – Abscisse de la pointe de fissure obtenue pour trois valeurs de seuil différentes de $\varepsilon_{yy}$.

On peut conclure que le fait de changer cette valeur autour de $0,10$ n'influence pas les résultats, ce qui signifie que ce choix pour le seuil peut être considéré comme fiable. La Figure 3.16 montre un nuage de points montrant l'emplacement de la pointe de fissure pour un ensemble d'images prises lors d'un essai sur une éprouvette du padouk. Ces coordonnées sont obtenues avec la méthode de détection décrite ci-dessus. Il est clair que sur cette figure,

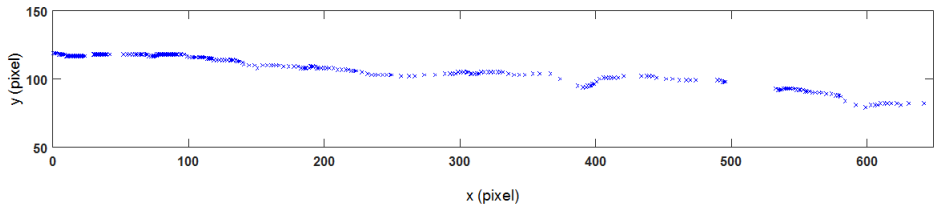



FIGURE 3.16 – Emplacement de la pointe de fissure.

la fissure se propage pas à pas, puisque certains «vides» sont visibles le long de la direction $x$ entre l'abscisse de deux emplacements consécutifs de la pointe de fissure, voir par exemple entre $x = 500$ et $x = 530$ pixels. $\Delta a$ dans l'équation 3.2 est obtenue en soustrayant directement l'abscisse de deux points consécutifs en cas de chute de force, entrainant la propagation de fissure, la variation de position selon la verticale étant négligeable.

## 3.4 Résultats et discussion

Dans cette partie, nous présentons et analysons les cartes de déplacements et de déformations obtenues avec la méthode de la grille. Ensuite, la courbe force en fonction de l'ouverture de fissure est présentée. Les évolutions des courbes de la longueur de fissure le long de l'axe des x sont obtenues en fonction de la charge. Enfin, les taux de restitution d'énergie pour les éprouvettes CTS et MMCG sont calculés et analysés pour les trois espèces de bois.

### 3.4.1 Cartes de déplacement et de déformation.

Un déplacement vertical typique ($U_y$) et les cartes de déformations ($\varepsilon_{yy}$) obtenus avec la méthode de grille pour les éprouvettes CTS et MMCG sont reportés sur les Figures 3.17 et 3.18. Les cartes de déplacement sont utilisées pour déterminer l'ouverture des fissures pendant le test et les cartes de déformations permettent de localiser au mieux la position de la pointe de fissure. La méthodologie a été présentée dans la section précédente.

Pour le cas de fissuration statique CTS : les cartes de déplacements et de déformations sont présentées. Un exemple est donné dans la Figure 3.17 avec deux essences, l'okoumé et le padouk, testées avec des épaisseurs de 12,5 $mm$ et 20 $mm$. Nous pouvons voir l'évolution de la fissure sur ces différentes cartes, voir la figure 3.17 (b). Le but est ici d'utiliser ces cartes pour déterminer l'ouverture et la longueur de la fissure pour chaque image tout le long de l'essai quelle que soit la configuration : fissures instantanées (cas d'éprouvettes d'une épaisseur de 12,5 $mm$) ou avec propagation de fissures (cas d'éprouvettes d'épaisseur 20 $mm$).

Pour les éprouvettes MMCG avec propagation de fissures, les cartes de déplacements et de déformations sont présentées dans la figure 3.18. Ces cartes de déplacements et de déformations montrent l'évolution de la fissure pour différents éprouvettes. Nous avons remarqué au cours des essais que les fissures tendent à se propager selon l'orientation et l'inclinaison des fibres. Dans la figure 3.18 (a) pour l'éprouvette $P1M15$, nous avons noté une petite inclinaison d'environ 5 degrés des fibres. Cela explique certainement l'orientation de la fissure que nous voyons. Les éprouvettes ont été testées suivant le plan RL. Dans la pratique, le

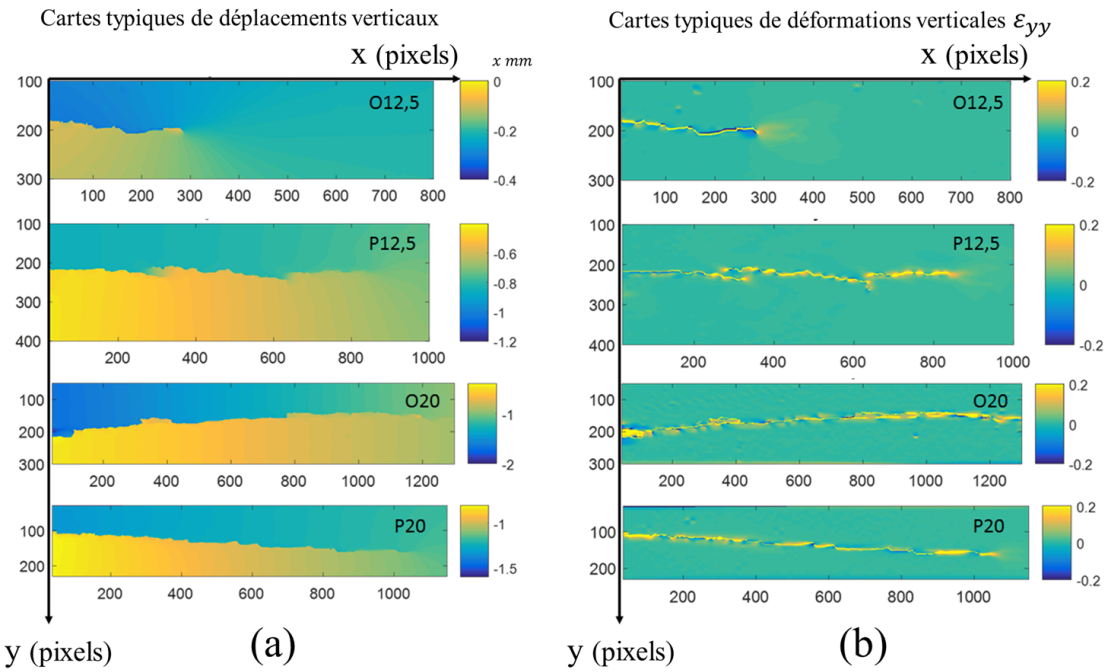



FIGURE 3.17 – Exemple de cartes de déplacement (a) et de cartes de déformation (b) pour les essences d'okoumé (O) et de padouk (P) avec des éprouvettes CTS de deux épaisseurs (12,5 et 20 $mm$).

chemin de la fissure n'est pas rectiligne. Le chemin suivi par la fissure pour les systèmes RL et TL reste cependant toujours parallèle au grain [98].

Les fissures sont clairement visibles sur les Figures 3.17 (a) et 3.18 (a) car elles correspondent à des discontinuités dans les cartes de déplacement vertical. La valeur du déplacement est négative car la mâchoire supérieure se déplace dans la direction opposée de l'axe des $y$ qui est descendant. Les valeurs des déformations présentées dans les Figures 3.17 (b) et 3.18 (b) sont globalement nulles ou proches de zéro, sauf dans le voisinage de la fissure, pour lesquelles des valeurs élevées en valeur absolue sont observées. Il faut rappeler dans ce cas de fort gradient, que ces valeurs mesurées sont les valeurs réelles convoluées par la fenêtre de la transformée de Fourier fenêtrée. Par conséquent ces valeurs représentent des valeurs moyennées spacialement avec un poids qui est la fenêtre gaussienne. Les cartes typiques montrées dans les Figures 3.17 (b) et 3.18 (b) permettent de mettre en évidence une caractéristique intéressante : pour les éprouvettes CTS ($O12,5$) et MMCG ($O1M15$) par

exemple, la propagation des fissures est entraînée par la tension transversale à l'avant de la pointe de fissure, où la concentration de déformation se produit. Ce résultat est également visible pour les spécimens CTS $P12,5$ et $P20$ sur les cartes de déformations correspondantes montrant la pointe de fissure.

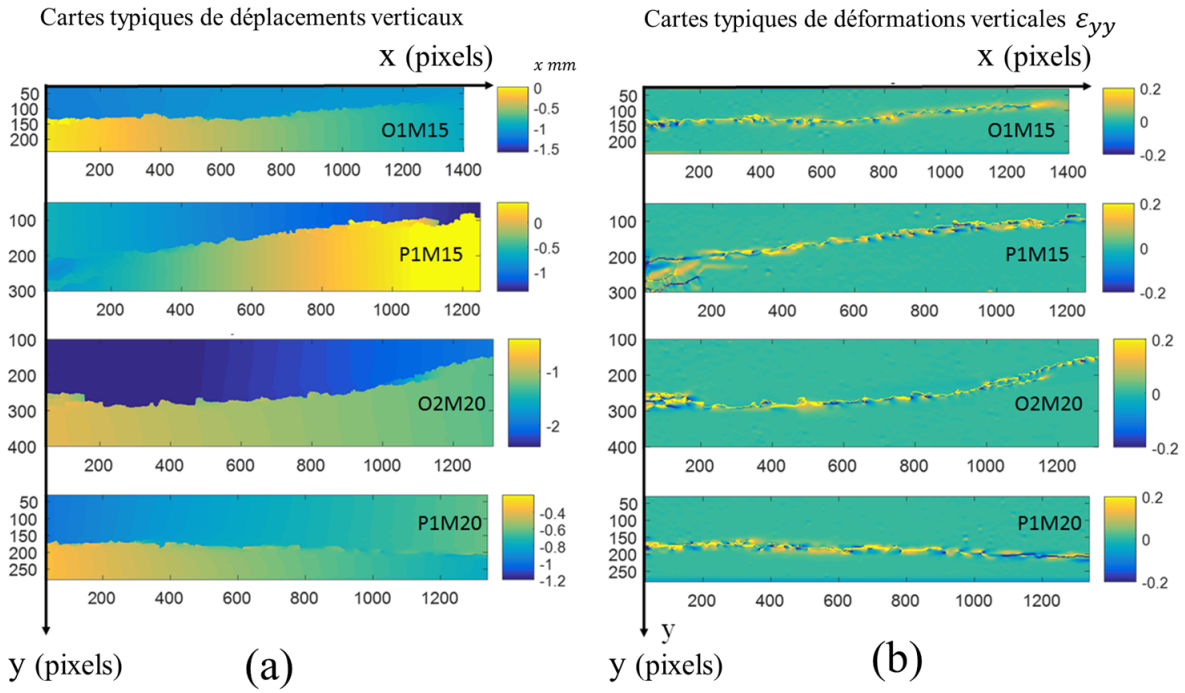



FIGURE 3.18 – Exemple de cartes de déplacement (a) et de cartes de déformation (b) pour les essences d'okoumé (O) et de padouk (P) avec des éprouvettes MMCG de deux épaisseurs (15 et 20 $mm$).

### 3.4.2 Courbes force - ouverture de fissure.

Les courbes globales d'ouverture de fissure sont présentées sur la Figure 3.20 pour les éprouvettes CTS, et sur les Figures 3.21 à 3.23 pour les éprouvettes MMCG. L'ouverture de fissure (déplacement des deux lèvres de la fissure) est directement obtenue à partir des cartes de déplacement, suivant la méthodologie présentée dans la section 3.3. Le déplacement des mâchoires mobiles n'est pas utilisé ici parce qu'il est plus élevé que celui obtenu avec la machine en raison des jeux au niveau des mors. La Figure 3.19 montre la différence entre

le déplacement de traverse et le déplacement obtenu avec la grille (exemple de l'éprouvette $I_1M15$).

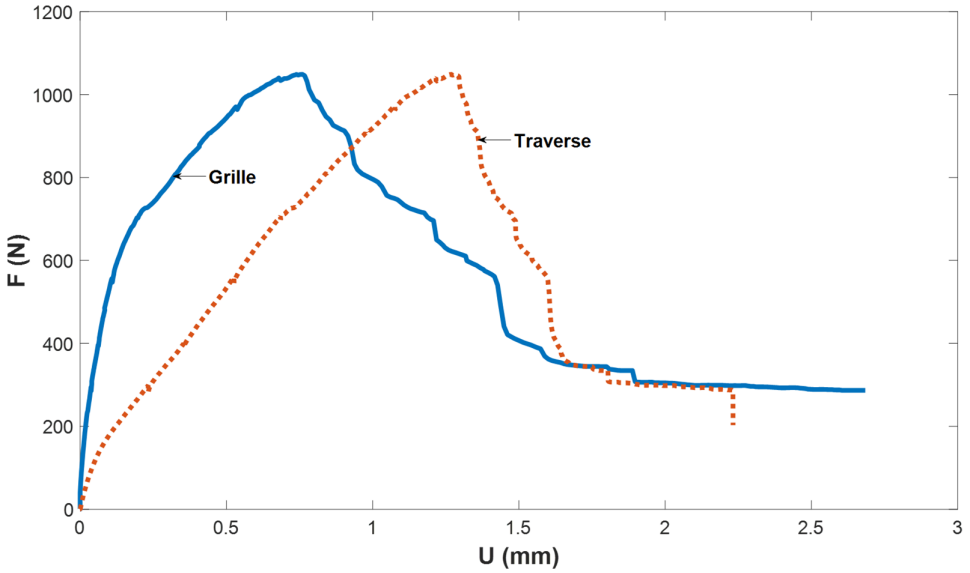



FIGURE 3.19 – Courbes force en fonction de l'ouverture de fissure montrant la différence entre le déplacement de traverse et le déplacement obtenu avec la grille.

Le Tableau 3.3 présente les forces de chargement au moment de la rupture ainsi que l'ouverture de fissure maximale correspondante pour ces deux épaisseurs et pour les trois espèces de bois. L'influence de l'épaisseur sur la valeur de chargement à la rupture est clairement visible. En effet, la valeur de chargement à la rupture est plus petite pour les éprouvettes fines ($b = 12,5\ mm$) que pour les plus épaisses ($b = 20\ mm$). L'ouverture maximale de fissure dépend également de l'épaisseur de l'éprouvette, mais son influence est moins sensible comparée à celle obtenue avec le chargement à la rupture. Pour les éprouvettes $P20$ et $O20$, l'ouverture des fissures évolue progressivement, et plusieurs forces critiques $F_c$ sont directement obtenues à partir des courbes force - ouverture de la fissure. Ce constat traduit l'effet de l'épaisseur sur le comportement à la fissuration de ces essences.

Le tableau 3.3 montre les différentes les forces à la rupture et les ouvertures de fissures correspondantes des éprouvettes CTS. Malgré la forte hétérogénéité des essences, les valeurs de forces à la rupture ici sont proportionnelles à la densité ou encore à l'épaisseur. Nous pouvons voir que les forces sont plus élevées pour les deux essences les plus denses. Pour le

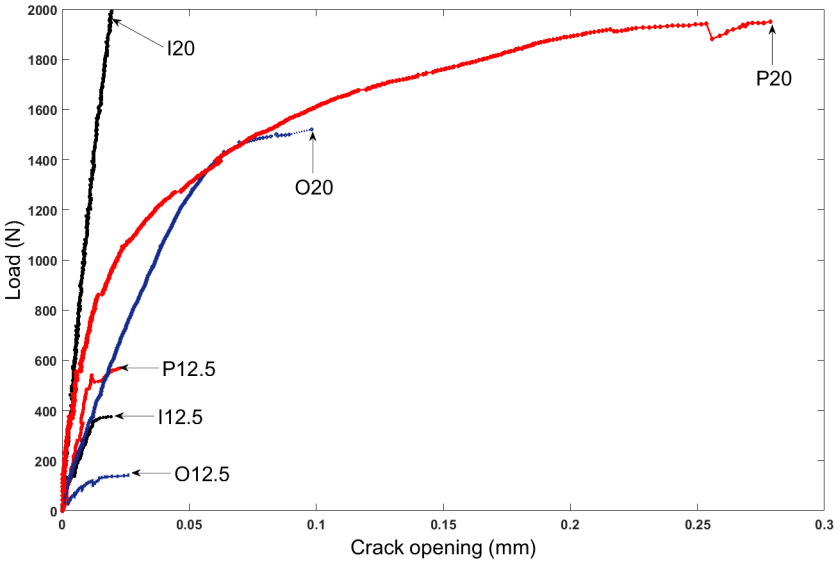



FIGURE 3.20 – Courbes force en fonction de l'ouverture de fissure pour les éprouvettes CTS.

| | Epaisseur : 12,5 $mm$ | | Epaisseur : 20 $mm$ | |
|---|---|---|---|---|
| | Force à la rupture ($N$) | Ouverture de fissure Maximale ($\mu m$) | Force à la rupture ($N$) | Ouverture de fissure Maximale ($\mu m$) |
| okoumé | 141 | 30 | 1520 | 90 |
| iroko | 375 | 19 | 1991 | 19 |
| padouk | 568 | 20 | 1950 | 280 |

TABLE 3.3 – Valeur de la force à la rupture et ouverture de fissure correspondante pour les éprouvettes CTS.

passage de l'épaisseur 12,5 $mm$ à 20 $mm$ nous constatons une augmentation de ces forces à la rupture. Le Tableau 3.3 montre que les valeurs à la rupture sont plus élevées pour le padouk que l'iroko et davantage que l'okoumé, sauf pour l'épaisseur de 20 $mm$ pour laquelle les forces à la rupture d'iroko et du padouk sont quasi identiques.

Les Figures 3.21 à 3.23 présentent les différentes courbes de force en fonction de l'ouverture des trois essences respectivement pour l'okoumé, l'iroko et le padouk. Ici les valeurs maximales

des forces varient fortement d'une éprouvette à l'autre pour la même espèce et pour la même épaisseur. Cependant, les charges à la rupture des éprouvettes d'épaisseur 20 $mm$ semblent plus élevées qu'avec les éprouvettes d'épaisseur 15 $mm$, à deux exceptions près.

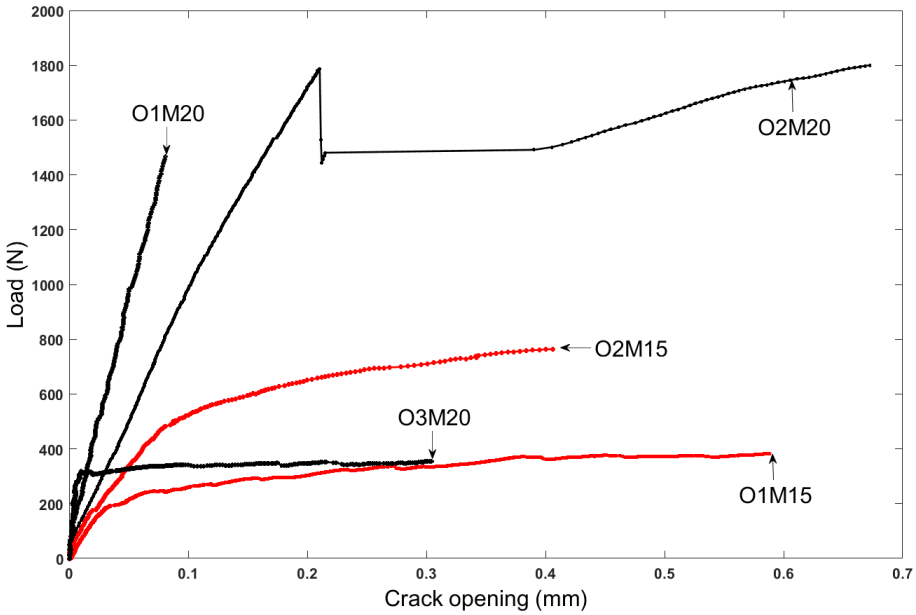



FIGURE 3.21 – Courbes force en fonction de l'ouverture de fissure pour les éprouvettes de MMCG d'okoumé et deux épaisseurs (15 $mm$ et 20 $mm$).

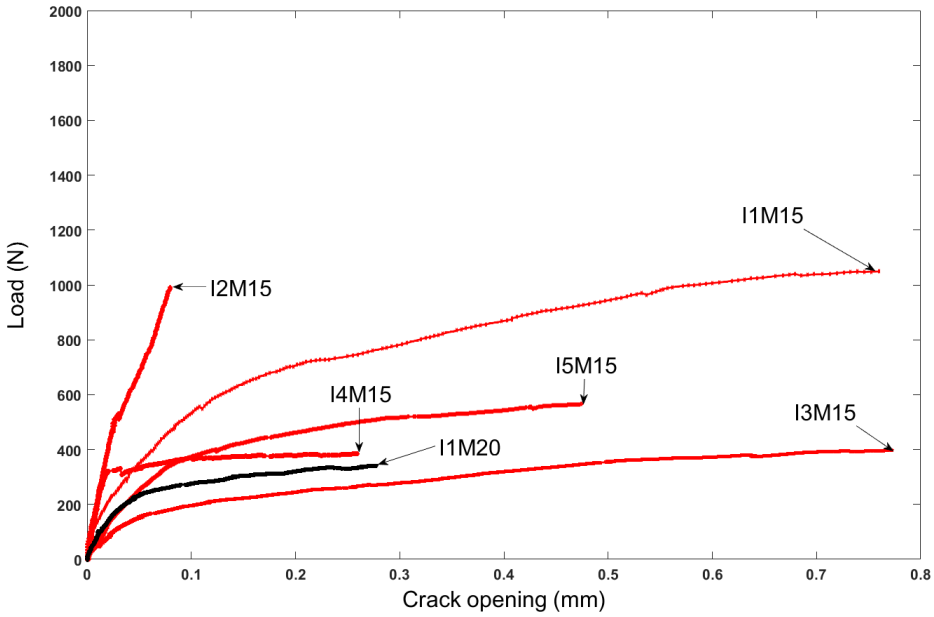



FIGURE 3.22 – Courbes force en fonction de l'ouverture de fissure pour les éprouvettes de MMCG d'Iroko et deux épaisseurs (15 $mm$ et 20 $mm$).

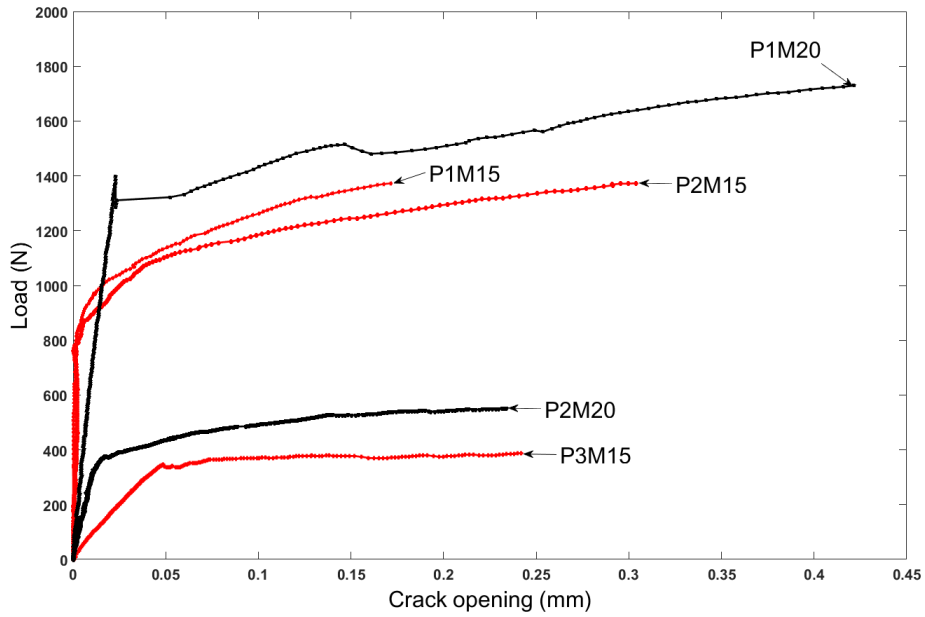



FIGURE 3.23 – Courbes force en fonction de l'ouverture de fissure pour les éprouvettes de MMCG Padouk et deux épaisseurs (15 $mm$ et 20 $mm$).

### 3.4.3 Courbe force - longueur de fissure

**Eprouvette CTS**

La Figure 3.24 présente les courbes de longueur de fissure en fonction de la force de l'okoumé et du padouk. Pour les éprouvettes CTS de 12,5 $mm$ d'épaisseur, une rupture soudaine correspondant à une chute soudaine de la charge est observée. Aucune propagation de fissure n'est observée avant la rupture de l'éprouvette. En revanche, il y a une évolution de la fissure après la rupture. Ce résultat est dû au pontage des fibres et les valeurs obtenues sont sans intérêt donc ne peuvent pas être considérées pour le calcul de $G_c$. En effet, le pontage des fibres a lieu après la rupture des éprouvettes.

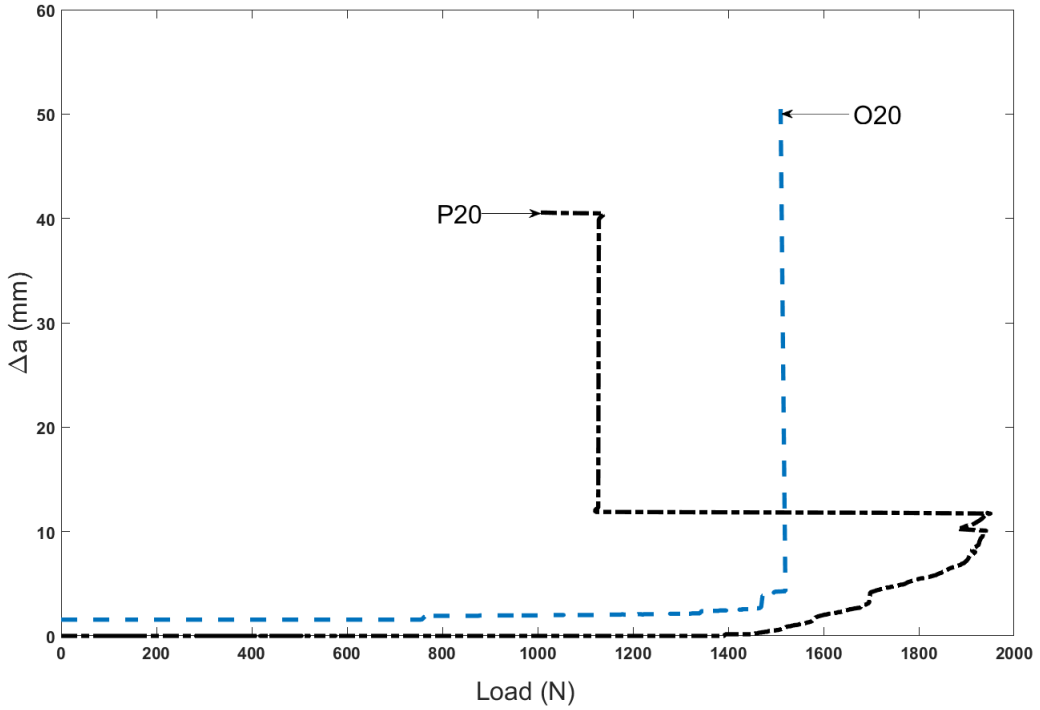



FIGURE 3.24 – Exemple de longueur de fissure en fonction de la force pour deux éprouvettes CTS (épaisseur 20 $mm$).

Le schéma de propagation des fissures est différent pour l'éprouvette CTS de 20 $mm$ d'épaisseur, plus particulièrement pour les éprouvettes d'okoumé et du padouk. La Figure 3.24, présente l'évolution de la longueur de fissure en fonction de la force de deux éprouvettes. La

longueur de fissure augmente légèrement jusqu'à une valeur de charge de 1520 $N$ et 1950 $N$ pour les éprouvettes d'okoumé et du padouk, respectivement. Ensuite, la longueur de fissure augmente soudainement, ce qui entraîne la rupture de l'éprouvette. Aucune propagation de la fissure n'est observée pour l'éprouvette CTS de 20 $mm$ d'épaisseur concernant l'éprouvette d'iroko. La fissure s'est développée hors de la grille, dans la zone de liaison et les trous à travers lesquels la charge a été appliquée. Cela est certainement dû à la fragilité de cette essence. L'annexe $A_1$ montre les éprouvettes cassées au niveau de congés de raccordements.

**Éprouvette MMCG**

La figure 3.25 montre un exemple de l'évolution de la force en fonction de la longueur de fissure pour les trois essences pour les éprouvettes MMCG et les deux épaisseurs 15 et 20 $mm$. $\Delta a$ est l'incrément de longueur de fissure. La longueur de fissure augmente graduellement et continuellement contrairement à ce qui se passe avec les éprouvettes CTS, pour lesquelles la fissure de l'éprouvette se propage soudainement et entraîne la rupture brutale, du moins pour les éprouvettes CTS à faible épaisseur. Pour les autres, les éprouvettes CTS à forte épaisseur et les éprouvettes MMCG, l'évolution de fissure est constatée et significative avant la rupture. En effet, pour les CTS à 20 $mm$, l'augmentation d'épaisseur est la raison de la propagation de fissure. En ce qui concerne les éprouvettes MMCG c'est la conception de sa forme qui permet la propagation stable de la fissure. En effet, avec cette éprouvette les fissures progressent lentement jusqu'à la rupture qui intervient lorsque la force est maximale sur l'axe des x. Cette augmentation de longueur de fissure va d'ailleurs au-delà de la rupture. Si nous prenons par exemple l'éprouvette $O_1M15$, nous constatons que la rupture intervient pour une valeur de la force égale à 383 $N$ pour une longueur équivalente de 18 $mm$. Nous pouvons aussi voir qu'au-delà de cette valeur à la rupture la force va commencer à décroitre et la longueur de fissure va continuer à augmenter jusqu'à atteindre une valeur d'environ 53 $mm$.

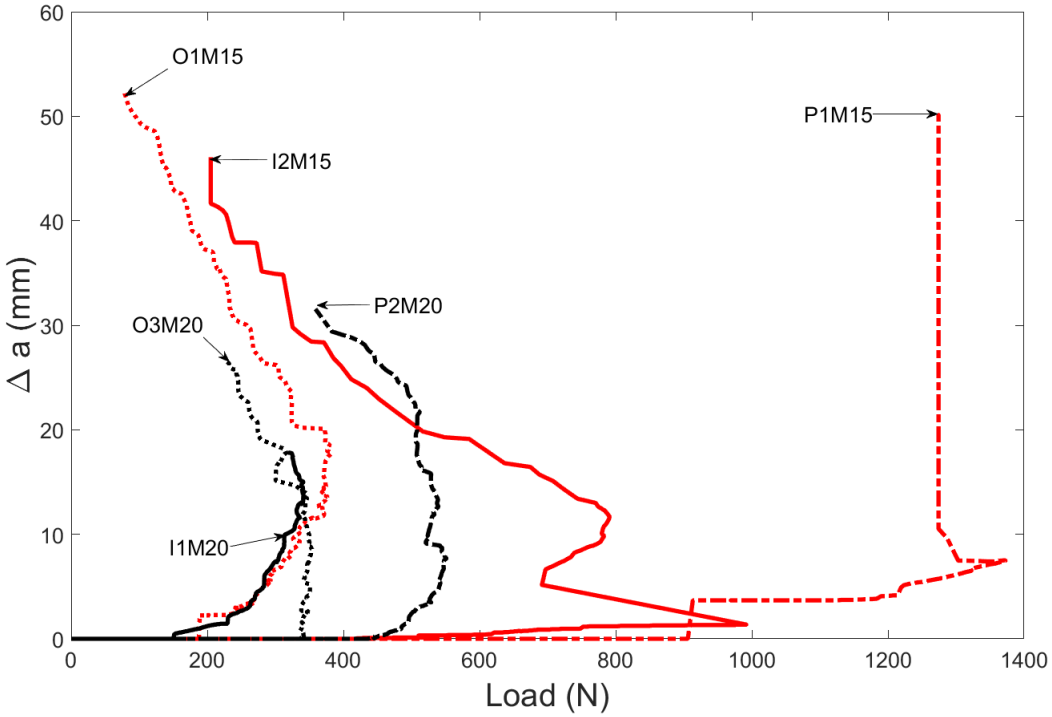



FIGURE 3.25 – Exemple de courbe longueur de fissure en fonction de la force pour les trois essences MMCG (épaisseur : 15 $mm$ et 20 $mm$).

### 3.4.4 Taux de restitution d'énergie critique

Dans cette section, la valeur du taux de restitution d'énergie critique $G_c$ obtenu à la fois avec les éprouvettes CTS et MMCG est calculée et l'influence de l'épaisseur des éprouvettes est mise en évidence.

La figure 3.26 présente $G_c$ en fonction de la longueur de fissure $a$ calculée avec la méthode (de la complaisance) pour les éprouvettes CTS, pour les trois essences bois et les deux épaisseurs. Pour les éprouvettes de 12,5 $mm$ d'épaisseur, une seule valeur de $G_c$ est calculée car aucune propagation de fissure n'a été observée. Il s'agit ici de la valeur à la rupture. Les valeurs obtenues sont égales à 5 $J/m^2$, 10 $J/m^2$ et 18 $J/m^2$ pour les essences d'okoumé, d'iroko et du padouk, respectivement. Il convient de souligner que la valeur $G_c$ est directement liée à la densité moyenne donnée dans le Tableau 3.1. En effet, $G_c$ augmente quasiment proportionnellement à la densité de l'espèce.

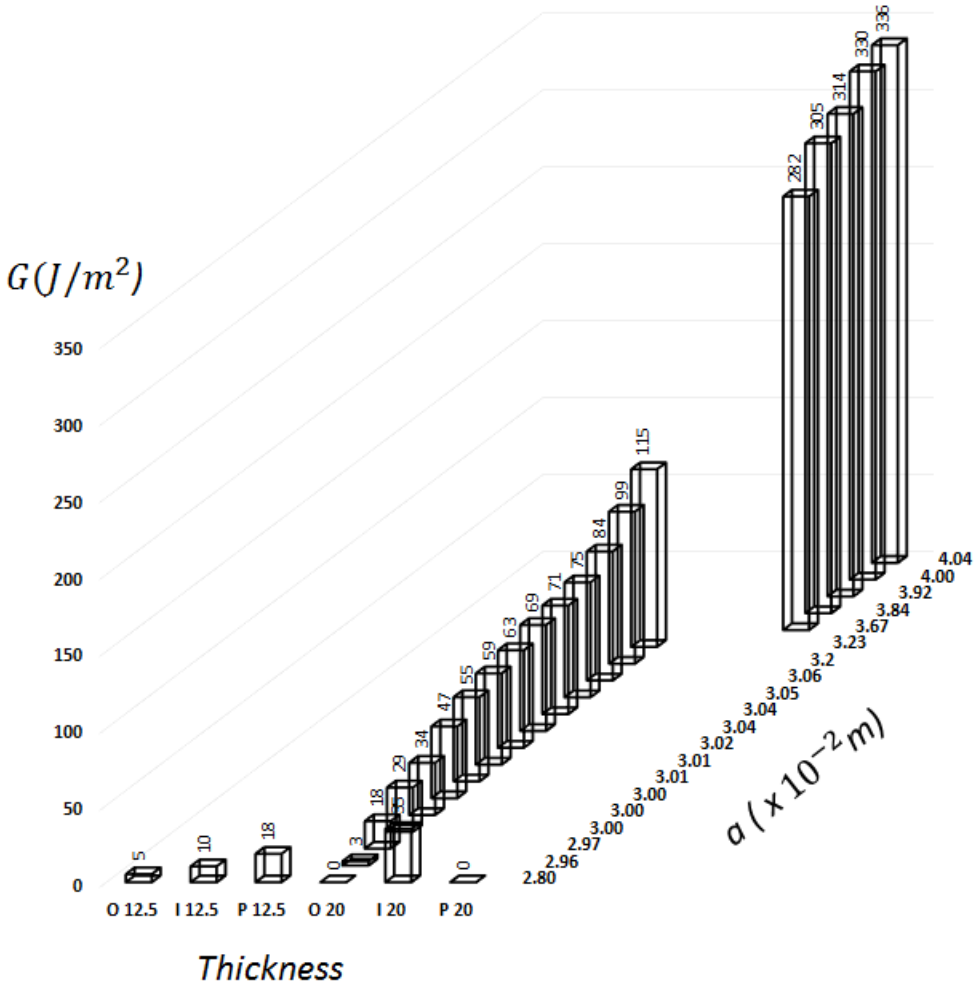



FIGURE 3.26 – Taux de restitution d'énergie critique d'okoumé (O), de l'iroko (I) et du padouk (P) (épaisseur 12,5 $mm$ et 20 $mm$) pour les éprouvettes CTS.

Pour les éprouvettes d'épaisseurs 20 $mm$ présentant une propagation de fissures (pour les éprouvettes $O20$ et $P20$), le taux initial de restitution d'énergie critique $G_{ic}$ induisant le début de la propagation de fissure est égal à 3 $J/m^2$ pour l'okoumé et 282 $J/m^2$ pour le padouk. D'une façon globale, $G_c$ est beaucoup plus élevé pour le padouk que pour l'okoumé. Cela signifie que la quantité d'énergie nécessaire pour induire l'initiation des fissures et la propagation de celle-ci est plus élevée pour le padouk que pour l'okoumé. En ce qui concerne les éprouvettes de $12,5$ mm d'épaisseur, ce résultat est cohérent avec la densité des essences tropicales étudiées ici. Enfin, le taux maximal de restitution d'énergie critique $G_{mc}$ est également corrélé à l'ouverture des fissures obtenue juste avant la rupture des éprouvettes $O20$

et $P20$. En effet, les valeurs obtenues sont égales à 4,3 $mm$ et 12,4 $mm$, pour les éprouvettes d'okoumé et de padouk, respectivement (Figure 3.24). Aucune propagation de fissure n'est observée pour les éprouvettes $I20$ en iroko. Ce constat est justifié du fait que cette essence est très fragile et la rupture dans la plupart des cas a eu lieu au niveau des congés et de trous de sollicitations. Une seule valeur de $G_c$, à la rupture, a pu être obtenue dans ce cas.

Les résultats obtenus avec les éprouvettes MMCG sont maintenant présentés pour les trois essences bois et pour les deux épaisseurs. La Figure 3.27 montre $G$ en fonction de la longueur de fissure pour l'okoumé. Les valeurs minimales du taux de restitution d'énergie ($G_{ic}$), *i.e.* valeurs obtenues en début de propagation de fissure, et les valeurs maximales du taux de restitution d'énergie à la rupture ($G_{mc}$), *i.e.* valeurs obtenues à la rupture, des différentes éprouvettes sont calculées. Les résultats sont présentés dans le Tableau 3.4. La valeur moyenne $G_{ic}$ pour les éprouvettes de 15 $mm$ et 20 $mm$ d'épaisseur est égale à 6,5 $J/m^2$ et 46 $J/m^2$, respectivement. Cela souligne clairement l'influence de l'épaisseur sur cette valeur. Les valeurs moyennes de $G_{mc}$ induisant la rupture pour les éprouvettes d'épaisseurs $b$=15 $mm$ et 20 $mm$ sont égales à 317 $J/m^2$ et 248 $J/m^2$, respectivement. L'interprétation physique de ces derniers résultats est difficile et très complexe en raison de la variabilité et de l'hétérogénéité des différentes éprouvettes, donc du matériau bois en général. Au contraire, les valeurs $G_{ic}$ sont relativement proches les unes des autres. Par conséquent, l'influence de l'épaisseur des éprouvettes sur cette quantité est clairement visible. Plus l'épaisseur est grande, plus la valeur initiale est élevée pour $G$.

La même analyse pour les différents résultats des calculs de $Gc$ est effectuée pour les éprouvettes d'iroko et de padouk. Les Figures 3.28 et 3.29 présentent $G$ en fonction de la longueur de fissure pour ces essences de bois. $G_{ic}$ est donné dans les tableaux 3.5 et 3.6 pour l'iroko et le padouk, respectivement. En ce qui concerne l'iroko, les valeurs moyennes de $G_{ic}$ pour les éprouvettes d'une épaisseur de 15 $mm$ et 20 $mm$ sont égales à 19 $J/m^2$ et 37 $J/m^2$, respectivement. Cela montre l'influence de l'épaisseur. La même remarque que pour l'okoumé peut être tirée concernant les fluctuations importantes de $G_{mc}$ pour les éprouvettes

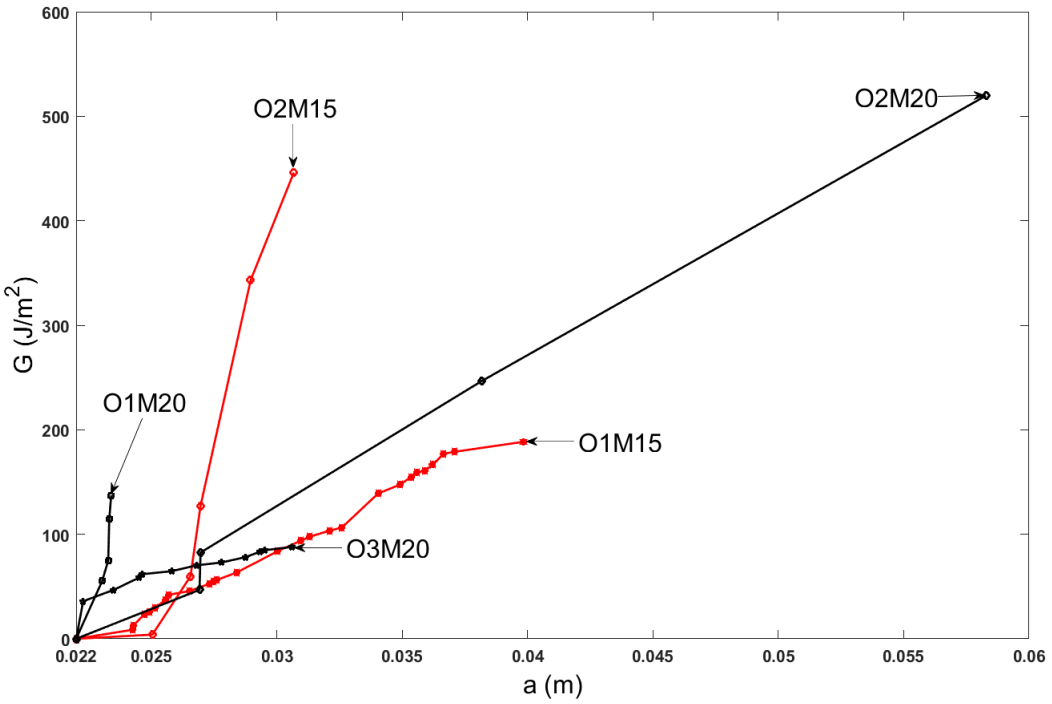



FIGURE 3.27 – Taux de restitution d'énergie critique $Gc$ en fonction de la longueur de fissure pour l'okoumé (O).

| | O1M15 | O2M15 | O1M20 | O2M20 | O3M20 | Moy OM15 | Moy OM20 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $G_{ic}$ | 9 | 4 | 55 | 47 | 36 | 6,5 | 46 |
| $G_{mc}$ | 188 | 446 | 137 | 520 | 88 | 317 | 248 |

TABLE 3.4 – Valeurs spécifiques des éprouvettes de l'okoumé : $G_{ic}$ est la valeur initiale du taux de restitution d'énergie critique ; $G_{mc}$ est la valeur de taux de restitution d'énergie maximal à la rupture, Moy est la moyenne.

d'épaisseur 15 $mm$.

Enfin, les éprouvettes du padouk sont analysées en termes de valeur de $Gc$. Le Tableau 3.6, les valeurs moyennes de $G_{ic}$ sont égales à 12 $J/m^2$ et 35 $J/m^2$ pour les éprouvettes d'épaisseurs 15 $mm$ et 20 $mm$, respectivement. La valeur initiale de $G$ pour l'éprouvette $P2M15$ (1 $J/m^2$) peut sembler anormale. C'est certainement une pré-entaille au cutter qui est à

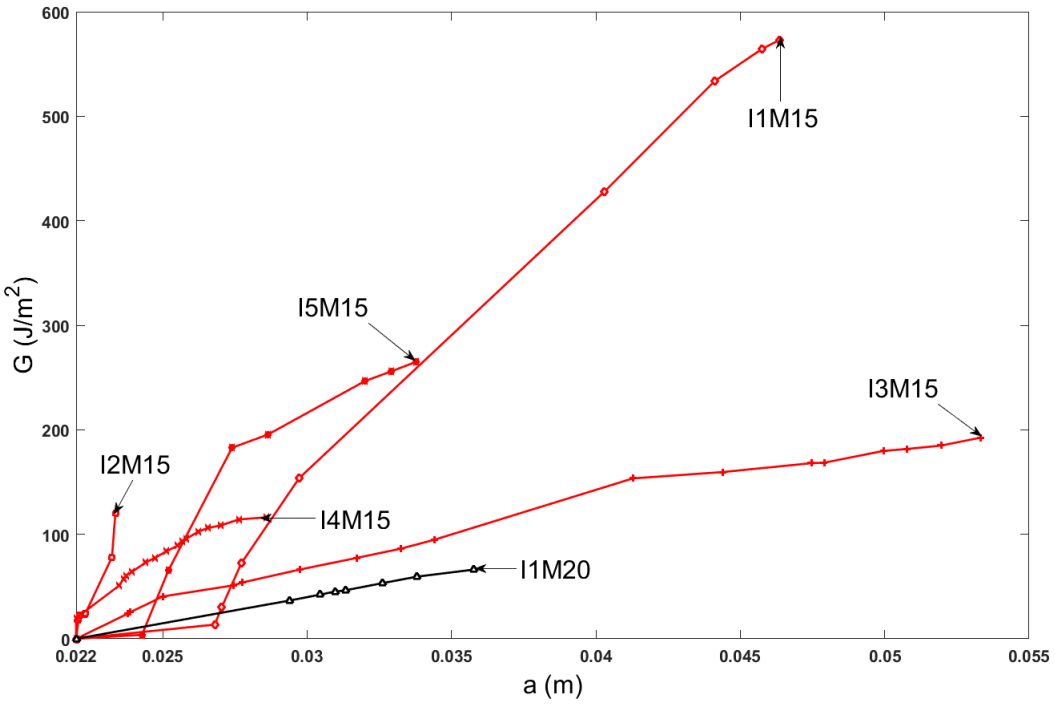



FIGURE 3.28 – Taux de restitution d'énergie critique $Gc$ en fonction de la longueur de fissure pour l'iroko (I).

| | I1M15 | I2M15 | I3M15 | I4M15 | I1M20 | Moy IM15 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $G_{ic}$ | 14 | 18 | 24 | 20 | 37 | 19 |
| $G_{mc}$ | 188 | 446 | 137 | 520 | 88 | 323 |

TABLE 3.5 – Valeurs spécifiques des éprouvettes de l'iroko : $G_{ic}$ est la valeur initiale du taux de restitution d'énergie critique ; $G_{mc}$ est la valeur de taux de restitution d'énergie maximal à la rupture, Moy est la moyenne.

l'origine d'une propagation de fissure anticipée qui peut expliquer cela. Les fluctuations importantes des valeurs maximales de $Gc$ pour les éprouvettes d'okoumé peuvent s'expliquer par un changement de direction du fil du grain. C'est une spécificité des essences tropicales. Dans la littérature, ce changement est plus marqué et fréquent avec l'okoumé. La même remarque que pour okoumé peut être tirée concernant les fluctuations importantes de la valeur

maximale de $Gc$ pour les éprouvettes d'épaisseur 15 $mm$ et 20 $mm$.

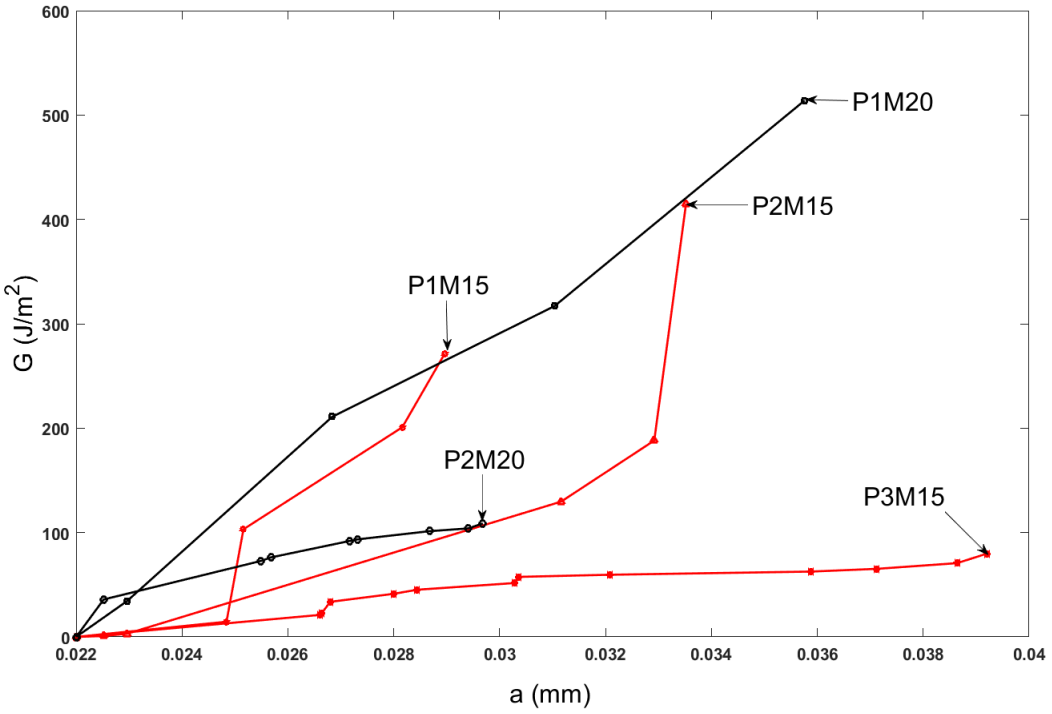



FIGURE 3.29 – Taux de restitution d'énergie critique $Gc$ en fonction de la longueur de fissure pour le padouk (P).

| | P1M15 | P2M15 | P3M15 | P1M20 | P2M20 | Moy PM15 | Moy PM20 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $G_{ic}$ | 15 | 1 | 21 | 34 | 36 | 12.3 | 35 |
| $G_{mc}$ | 271 | 415 | 80 | 514 | 109 | 255 | 312 |

TABLE 3.6 – Valeurs spécifiques des éprouvettes de padouk : $G_{ic}$ est la valeur initiale du taux de restitution d'énergie critique ; $G_{mc}$ est la valeur du taux de restitution d'énergie maximal à la rupture, Moy est la moyenne.

### 3.4.5 Discussion

Le tableau 3.7 compare les différentes valeurs obtenues dans cette étude avec les valeurs de la bibliographie obtenues sur des espèces tempérées. Ces dernières sont nombreuses, surtout en mode I.

| Désignation | Orientation | Densité relative | $G_{mc}$ $(J/m^2)$ | Ecart type (SD) |
|---|---|---|---|---|
| épicéa [99, 100] | RL | 0,40 - 0,50 | 159 - 345 | 60 / 186 |
| pin [100] | RL | 0,40 - 0,50 | 346 | $\approx 90$ |
| chêne [100] | RL | 0,70 - 0,80 | 234 | $\approx 110$ |
| **okoumé** | **RL** | **0,39 - 0,50** | **248**$^{(2)}$ **/ 317**$^{(1)}$ | **129 / 160** |
| **iroko** | **RL** | **0,56 - 0,70** | **323**$^{(1)}$ | **200** |
| **padouk** | **RL** | **0,70 - 0,88** | **255**$^{(1)}$ **/ 312**$^{(2)}$ | **175 / 200** |

TABLE 3.7 – Comparaison des valeurs moyennes de $G_{mc}$ pour les éprouvettes MMCG testées d'épaisseur 15 $mm$ (1) et 20 $mm$ (2) avec la littérature et SD est l'écart type.

Afin de proposer une comparaison objective, la discussion est centrée sur les espèces tempérées avec la même densité et une fissure initiale orientée dans la direction RL [101]. En effet, Voichita Bucur [99] a étudié l'épicéa et testé cette essence suivant la direction RL. Reiter et al. [100], également cité par [99], ont quant à eux effectués les essais selon RL sur les éprouvettes cubiques. Selon le principe du test de fente en coin (WS), ces tests ont été effectués sur des éprouvettes de plusieurs espèces, dont l'épinette, le pin et le chêne. Les essais ont été effectués dans les mêmes conditions (chambre climatisée à $20^0$ C et 65% d'humidité relative). L'énergie de rupture spécifique ou le taux de restitution d'énergie critique maximale $Gf$ (valeurs moyennes et écart-type de six mesures pour chaque bois résineux et feuillus) sont pris en compte pour cette comparaison. Par conséquent, la moyenne de $G_{mc}$ pour l'okoumé, l'iroko et le padouk (donnée par les Tableaux 3.4, 3.5 et 3.6 respectivement) est indiquée dans le Tableau 3.7 en gras et comparée à l'épicéa, au pin et au chêne respectivement. La comparaison montre que de faibles écarts en pourcentage ont été obtenus entre les valeurs

moyennes d'okoumé obtenues avec les éprouvettes d'épaisseur $b$= 15 $mm$ et 20 $mm$ et celles de l'épicéa. Pour les éprouvettes d'okoumé d'une épaisseur de 15 $mm$, une différence de 8% avec les valeurs de l'épicéa est observée, tandis qu'on obtient une différence de 28% pour les éprouvettes de 20 $mm$ d'épaisseur. Une différence de 8% a été observée entre les éprouvettes du padouk de 15 $mm$ d'épaisseur et les valeurs du chêne, et cette différence est de 25% avec les éprouvettes de 20 $mm$ d'épaisseur. Nous avons à peu près les mêmes conclusions pour l'espèce iroko.

Les comparaisons sur les écarts-types en termes de valeurs maximales de $Gmc$ à la rupture ont été faites. Les écarts sont de 53% et 13% entre l'okoumé et l'épicéa. Ces écarts-types donnent une différence de 30% entre l'okoumé et le pin. Cette différence d'écart-types entre le padouk et le chêne est de l'ordre de 37%. La dispersion des résultats constatée ici est attribuable au matériau. Les tests de rupture réalisés avec les essences tempérées avec des anneaux annuels spécifiques visibles montrent moins de disparité que pour les essences tropicales concernant le cheminement des fissures. Pour ces essences tempérées, les fissures trouvent facilement leur chemin de propagation entre le bois initial et le bois final. Cependant, pour les essences tropicales, le cheminement des fissures est parfois aléatoire et moins facile à prévoir en raison de la croissance continue du bois de l'arbre. Notons également que la dispersion des résultats se justifie par la forte variabilité naturelle de ces espèces tropicales et de leur composition constitutive anatomique.

## 3.5 Conclusion

Dans cette étude, des tests de fissuration ont été effectués sur trois espèces tropicales : iroko *(Milicia Excelsa)*, okoumé *(Aucoumea klaineana Pierre)* et padouk *(Pterocarpus soyauxii)*. Une grille a été transférée sur chaque éprouvette pour suivre l'avancée du front de fissure et mesurer l'ouverture de celle-ci. Un nouveau système Arcan a été conçu pour tester à la fois les éprouvettes bois CTS (Compact Tension Shear) et MMCG (Mixed Mode Crack Growth). Les valeurs obtenues ont permis d'utiliser la méthode de la complaisance afin de calculer le

taux de restitution d'énergie critique de chaque éprouvette de bois pour différentes épaisseurs. Pour les éprouvettes CTS et MMCG, il est clair que l'épaisseur et la densité ont une influence sur la ténacité de l'espèce. En effet, il est montré que le taux de restitution d'énergie critique augmente lorsque la densité augmente à la fois dans les processus de fissure stationnaire et de croissance de fissure. Cependant, l'incrément de longueur de fissure n'a pas pu être mesuré pour l'iroko en raison du comportement quasi-fragile de cette espèce par rapport à l'okoumé et au padouk. La comparaison des moyennes de $G_{mc}$ pour les trois espèces testées (okoumé, iroko, padouk) est comparée à celles des espèces tempérées données par la littérature (épicéa, pin, chêne) avec la même densité et les mêmes conditions expérimentales, montrent que les résultats obtenus sont similaires. Le chapitre 4 sera consacré à l'étude de paramètres de fissuration en mode mixte, notamment pour les angles de degrés de mixité $15^0$, $30^0$ et $45^0$.

# Chapitre 4

# Étude expérimentale en mode mixte

## 4.1 Introduction

Le présent chapitre a pour but de compléter les résultats du chapitre précédent en étudiant la fissuration en mode mixte des trois essences tropicales déjà décrites au chapitre 1. Les essais sont réalisés pour différentes valeurs de taux de mixité $\alpha = 15^0$, $30^0$ et $45^0$. Au-delà de $45^0$, les essais effectués n'ont pas été concluants. Les éprouvettes ont cassé systématiquement au niveau des congés de raccordement et des trous de sollicitation. On présente ici le dispositif expérimental et les résultats. Des cartes de déplacements et de déformations typiques issues de la grille, les courbes force en fonction de l'ouverture de fissure sont aussi présentées. Après découplage des modes, les différents taux de restitution d'énergie sont calculés. La part du mode 1 ($G_I$) et la part du mode 2 ($G_{II}$) sont données en fonction de la longueur de fissure. Pour terminer ce chapitre, une partie discussion et analyse des résultats est présentée.

## 4.2 Matériaux et méthodes

Les essences utilisées dans le présent chapitre ainsi que les éprouvettes usinées ont déjà été décrites aux chapitres 1 et 3. La Figure 4.1 présente les blocs de bois qui ont été acheminés du Gabon et usinés en France. La caméra, le dispositif miniature en acier Arcan utilisé pour

charger les éprouvettes et la machine d'essai traction-compression (cf. Figure 4.2) ont déjà été décrits dans le chapitre 3. Seules les éprouvettes MMCG sont testées dans ce chapitre. La partie de l'éprouvette équipée de la grille était éclairée de façon à ce que la lumière soit uniformément repartie. La caméra a été fixée sur un trépied afin de photographier des images de grille stabilisées pendant les essais.

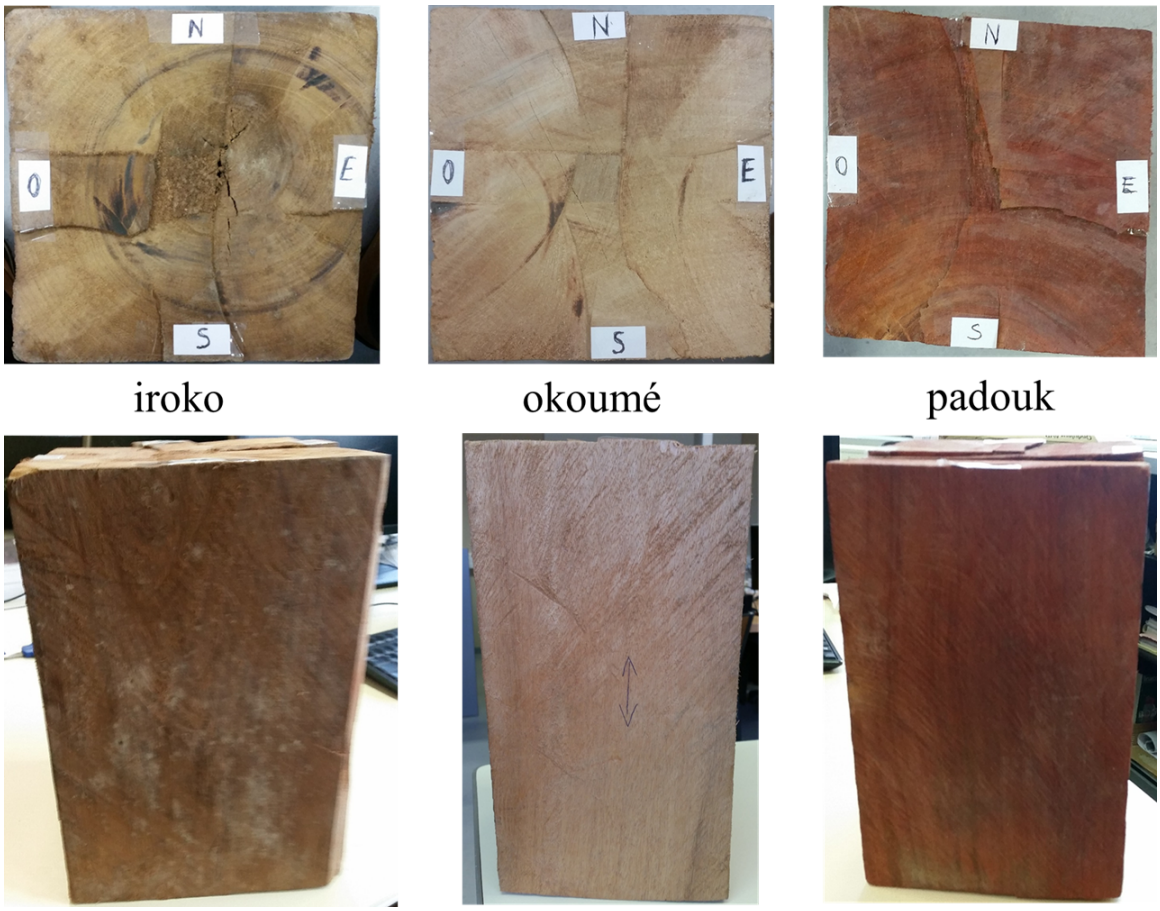



FIGURE 4.1 – Blocs de bois dans lesquels ont été usinées les éprouvettes

En mode mixte, cette caméra a la même inclinaison que celle de l'éprouvette, ceci conformément à la Figure 4.2. Les valeurs de l'ouverture de fissure (mesurée avec les déplacements des lèvres de la fissure) se trouvent donc directement projetées suivant les axes $x$ et $y$. La force est projetée quant à elle suivant les axes $x$ et $y$, comme indiqué sur la Figure 4.3.

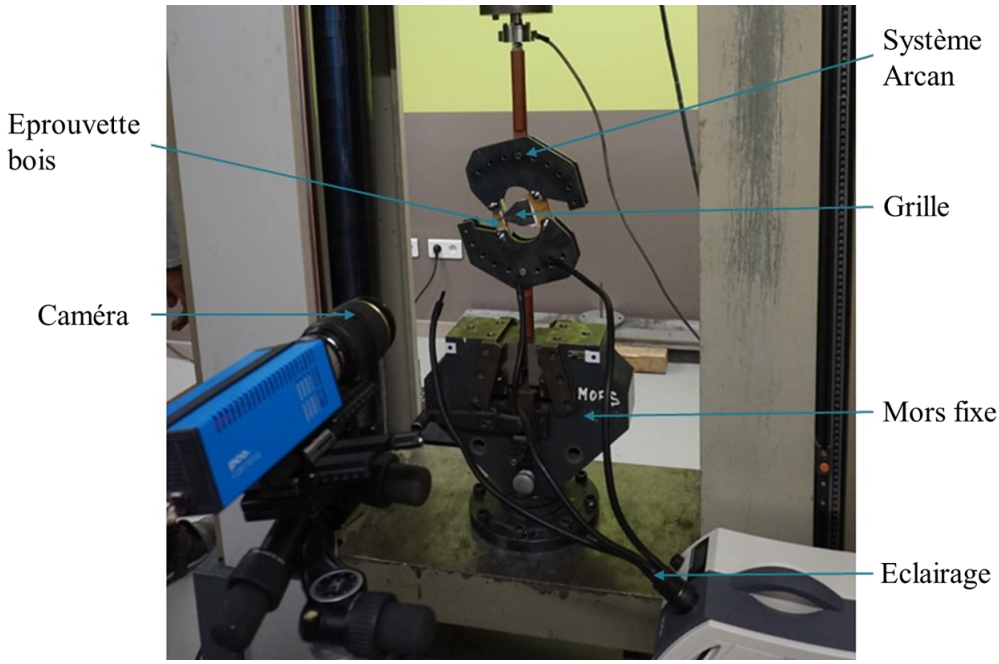



FIGURE 4.2 – Montage expérimental

.

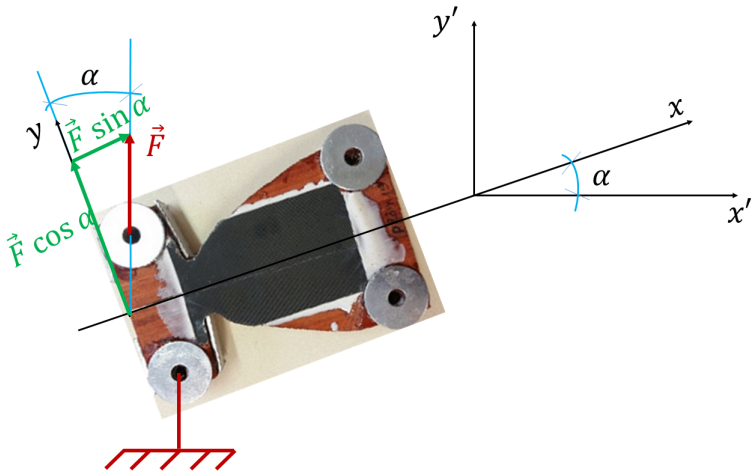



FIGURE 4.3 – Projection de la force suivant les axes en mode mixte

.

### 4.2.1 Présentation et identification des éprouvettes

Le tableau 4.1 donne les notations et les noms des éprouvettes testées dans ce chapitre. Ce tableau répertorie toutes les éprouvettes des trois essences utilisées pour les trois taux de mixité $\alpha = 15^0$, $30^0$ et $45^0$. Les éprouvettes d'iroko, de l'okoumé et du padouk sont respecti-

vement d'épaisseurs $b = 12{,}5\ mm$, $15\ mm$ et $20\ mm$. Comme dans le chapitre précédent, les éprouvettes sont désignées par la première lettre majuscule du nom de l'essence, et le numéro permet de différencier les éprouvettes d'une même essence. Les valeurs entre parenthèses désignent les épaisseurs des éprouvettes.

| Désignation | iroko | okoumé | padouk |
|---|---|---|---|
| | I1 (15) | O1 (15) | P1 (15) |
| Éprouvettes testées à $15^0$ | I2 (15) | O2 (15) | P2 (15) |
| | I1 (20) | O1 (20) | P1 (20) |
| | I2 (20) | O1 (20) | P2 (20) |
| | | O1 (15) / O1 (20) | |
| Éprouvettes testées à $30^0$ | I1 (20) | O2 (15) / O3 (15) | P1 (15) |
| | | O4 (15) / O5 (15) | |
| | | O6 (15) / O7 (15) | |
| | I1 (12,5) | O1 (12,5) | P1 (12,5) |
| Éprouvettes testées à $45^0$ | I2 (12,5) | O2 (12,5) | P2 (12,5) |
| | I1 (20) | | P1 (20) |

Avec : I = iroko ; O = okoumé ; P = padouk ;

1,2,3,..= Numéro de l'éprouvette testée ; 12,5, 15 et 20 = Épaisseurs des éprouvettes testées

TABLE 4.1 – Notations utilisées dans ce chapitre.

### 4.2.2 Images de quelques éprouvettes testées

Les éprouvettes sont usinées dans le plan RL, avec l'orientation de la fissure suivant L. Le pourcentage (%) d'humidité relative interne des éprouvettes est de 7,9% pour l'iroko, elle est de 9,1% pour l'okoumé et de 7,3% pour le padouk. La température de la salle d'essais est de $22^0$ C $\pm$ $1^0$ C et l'humidité relative est de 60% $\pm$ 1%. Les Figures 4.4 et 4.5 présentent quelques-unes des éprouvettes testées.

La Figure 4.4 (a) présente la face sans grille et la Figure 4.4 (b) présente la face avec grille de quelques éprouvettes d'okoumé pour $b = 15\ mm$ et testées pour $\alpha = 30^0$. Les figures 4.5 (a) et 4.5 (b) présentent les éprouvettes d'iroko et de padouk testées respectivement pour $\alpha = 45^0$ ($b = 12{,}5\ mm$) et $\alpha = 15^0$ ($b = 20\ mm$). Les rondelles et les plaques en métal sont

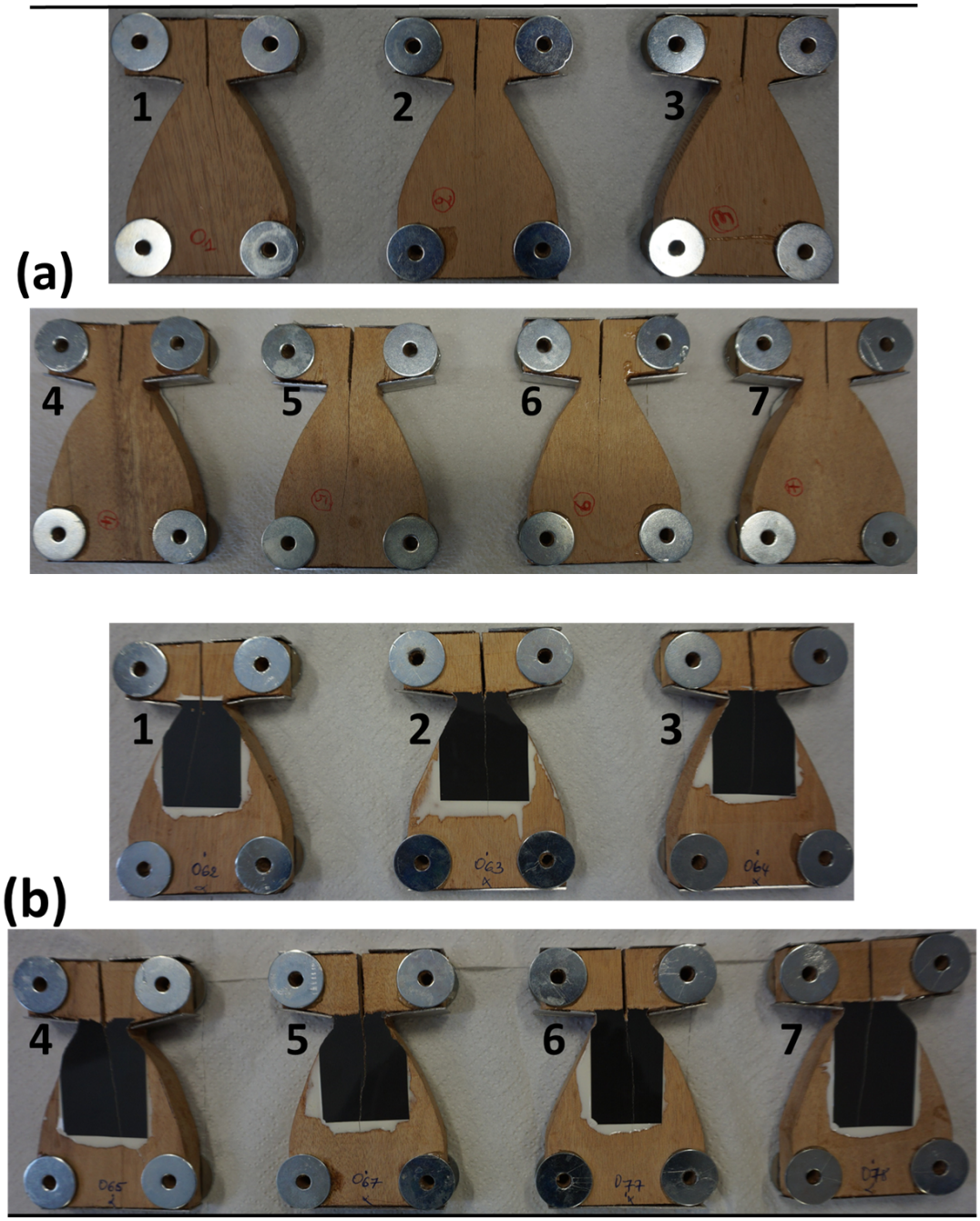



FIGURE 4.4 – Exemples d'éprouvettes d'okoumé : face sans grille (a) et face avec grille (b)

.

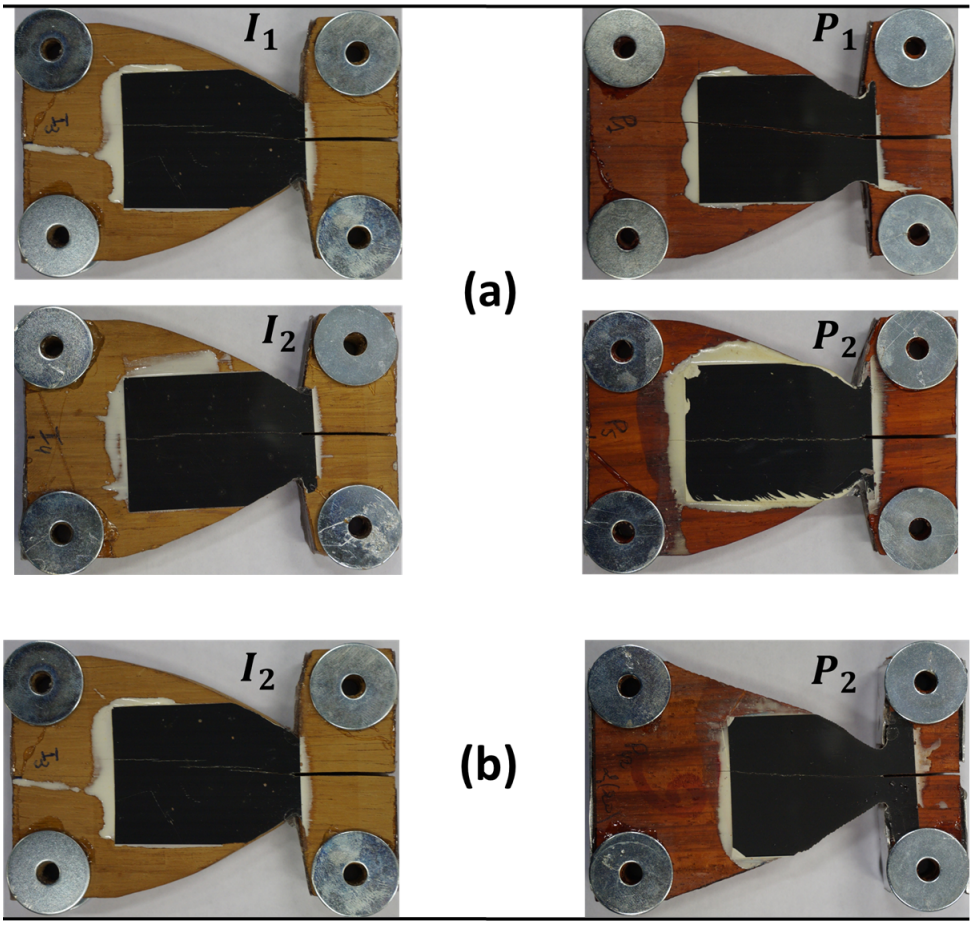



FIGURE 4.5 – Exemples d'éprouvettes d'iroko et du padouk : (a) épaisseur 12,5 $mm$ à $45^0$ et (b) épaisseur 20 $mm$ à $15^0$

.

installées pour renforcer les congés de raccordements et les trous de sollicitations.

## 4.3 Résultats des essais en mode mixte

Dans cette partie sont présentés les résultats obtenus avec les trois essences. Le découplage des modes a permis l'obtention de la part du mode 1 et du mode 2. La méthode de la complaisance à déplacement imposé de l'équation 2.23 du chapitre 2 a été utilisée pour calculer les différents taux de restitution d'énergie. Les cartes de déplacements et de déformations, les courbes de force en fonction de l'ouverture de fissure, le taux de restitution d'énergie en

fonction de la longueur de fissure pour différents cas de figures sont présentés ci-dessous. Les valeurs des rapports $G_I/G_{II}$ et celles de la différence $G_I - G_{II}$ sont également données. Le calcul de la différence vise à montrer le comportement et l'évolution des deux modes par rapport à la variation de $\alpha$.

### 4.3.1 Cartes de déplacements et de déformations

Dans cette partie nous présentons quelques exemples des cartes de déplacements et de déformations issues de la méthode de la grille. Ces cartes sont données en fonction des coordonnées suivant $x$ (pixels) et $y$ (pixels). Sur ces différentes cartes de déplacements et déformations, nous pouvons clairement voir la progression de la fissure.

La Figure 4.6 (a) (éprouvettes b=15 $mm$) et la Figure 4.6 (b) (éprouvettes b=20 $mm$) présentent des exemples de cartes de déplacements et de déformations des trois essences obtenues pour $\alpha = 15^0$.

Sur la figure 4.6 (a), la propagation de fissure est clairement observable sur les deux types de cartes. Le chemin de propagation de fissure, même s'il n'est pas parfaitement rectiligne, ne semble pas non plus changer de direction. Les mêmes remarques peuvent être formulées pour la figure 4.6 (b), à part l'éprouvette $O_2$ où la fissure semble légèrement inclinée.
La Figure 4.7 présente les cartes obtenues pour $\alpha = 30^0$. Les éprouvettes de la figure 4.7 (a) ont une fissure initiale égale à $a_i = 28\ mm$ et celles des figures 4.7 (b) et 4.7 (c) une fissure initiale $a_i = 24\ mm$.

Sur la Figure 4.7 (a) les fissures se sont propagées normalement car les éprouvettes étaient pourvues de fissure initiale conséquente. Pour certaines éprouvettes il a été constaté un léger changement d'orientation de la fissure, c'est le cas par exemple de $O_1$ et $O_4$ (cf. figure 4.7 (a)). Les éprouvettes de pakouk de la figure 4.7 (b) et d'iroko de la figure 4.7 (c) n'ont pas propagé jusqu'à la rupture. Elles ont cassé au niveau des congés de raccordement juste en début de la propagation de fissure.

La Figure 4.8 (a) présente les cartes de déplacements et déformations issues des trois essences et la figure 4.8 (b) celles de l'iroko et du padouk, toutes obtenues pour $\alpha = 45^0$. Des

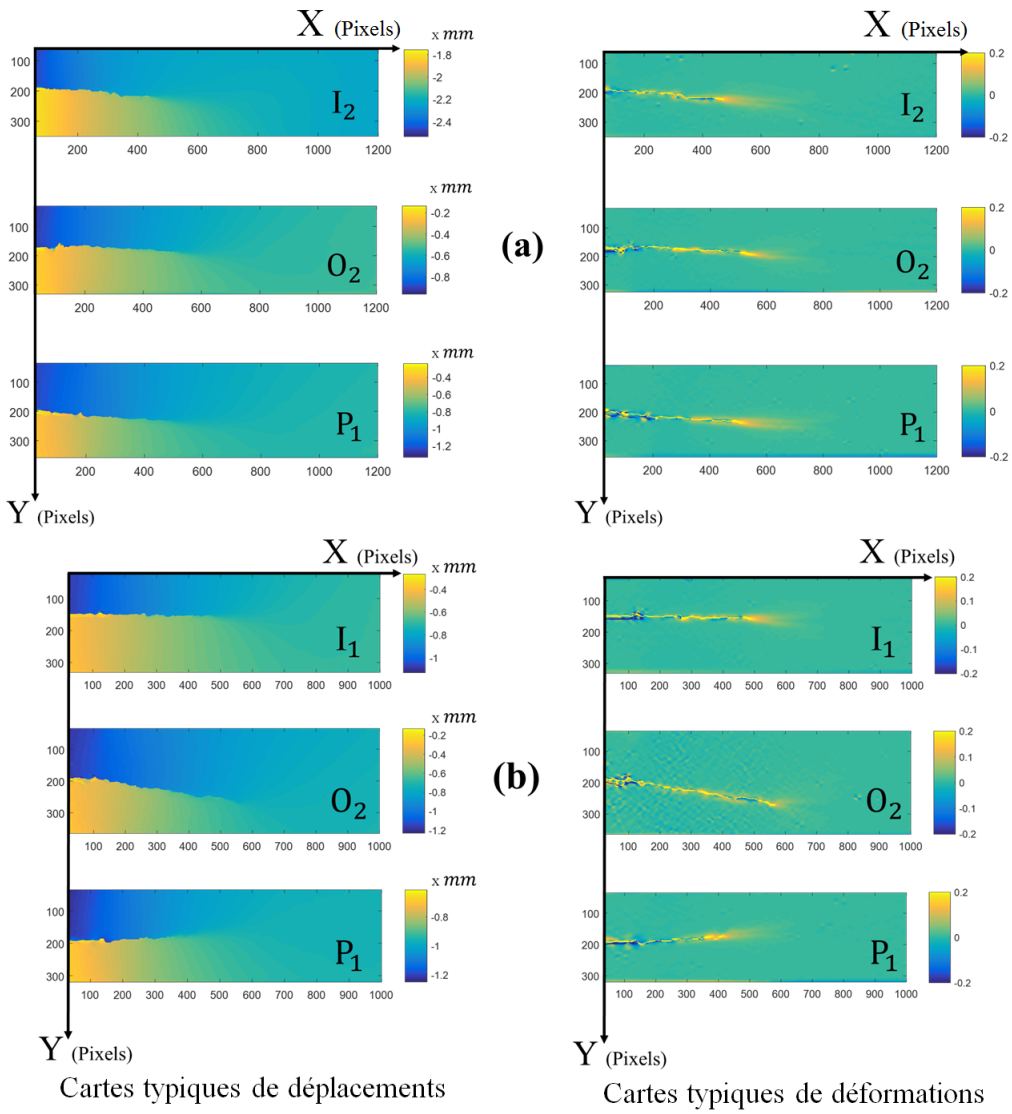



FIGURE 4.6 – Un exemple des cartes de déplacements et des déformations des trois essences pour $\alpha = 15^0$ : (a) b=15 $mm$ et (b) b=20 $mm$.

résultats concluants ont été obtenus avec les éprouvettes d'épaisseurs 12,5 $mm$. Des plages de propagation sont clairement observables (Figure 4.8 (a)).

Pour les éprouvettes avec $b = 15$ $mm$ et 20 $mm$, la propagation a été partielle, juste avant que n'intervienne une rupture au niveau des congés de raccordement, comme le montre la Figure 4.8 (b).

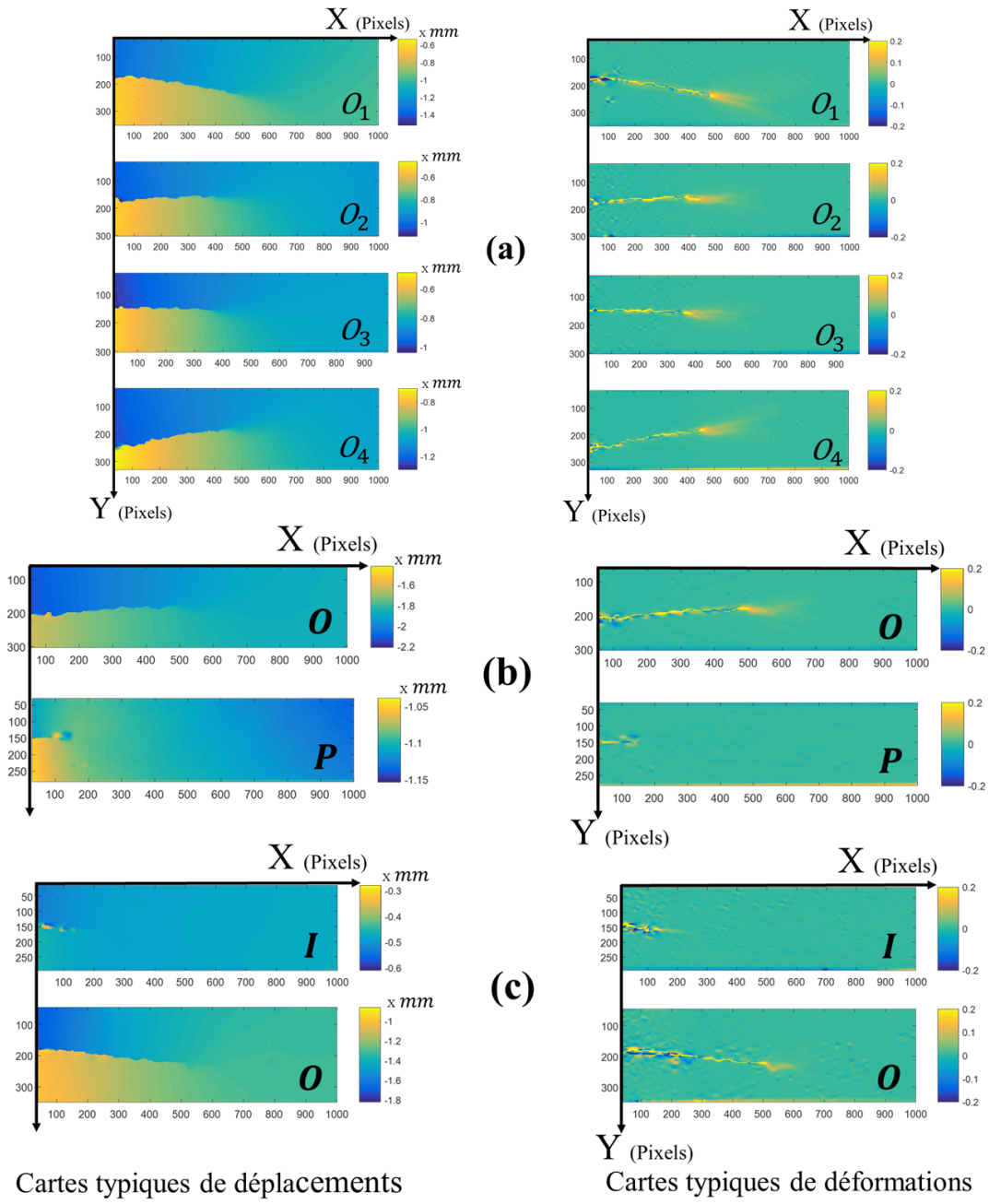



FIGURE 4.7 – Un exemple typique de cartes de déplacements et de déformations pour $\alpha = 30^0$ : (a) okoumé (b=15 $mm$), (b) okoumé et padouk (b=15 $mm$) et (c) iroko et okoumé (b=20 $mm$), obtenues avec une longueur de fissure initiale différente

.

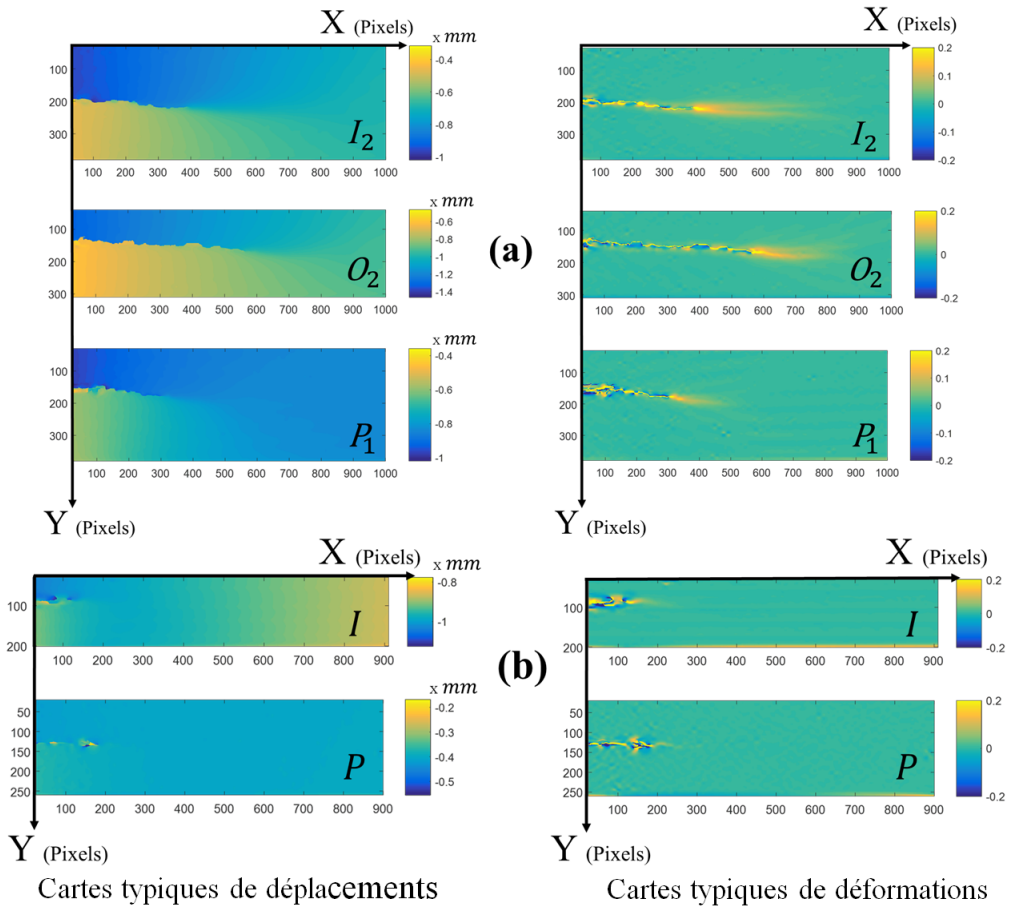



FIGURE 4.8 – Cartes de déplacements et de déformations pour $\alpha = 45^0$ : (a) des trois essences b=12,5 $mm$ et (b) iroko et padouk b=20 $mm$

.

### 4.3.2 Courbes force - ouverture de fissure

La Figure 4.9 présente l'évolution de la force en fonction de l'ouverture de fissure pour les trois essences pour $b = 15$ $mm$ et $\alpha = 15^0$. Les ouvertures de fissure suivant l'axe $x$ sont négligeables devant celles suivant l'axe des $y$. Pour toutes les éprouvettes, les valeurs suivant $x$ sont inférieures à 0,1 $mm$ et de l'ordre de 0,6 à 0,8 $mm$ suivant l'axe des $y$. Suivant $x$, ces valeurs sont justes légèrement supérieures aux valeurs obtenues avec un angle $\alpha = 0^0$ (angle pour lequel ces valeurs sont presque nulles, voir Figures 3.22 à 3.24).

La Figure 4.10 présente les courbes force en fonction de l'ouverture de fissure pour $b = 20$ $mm$ et $\alpha = 15^0$. Il est observé que les valeurs des forces à la rupture varient entre 700 $N$ et 1400 $N$

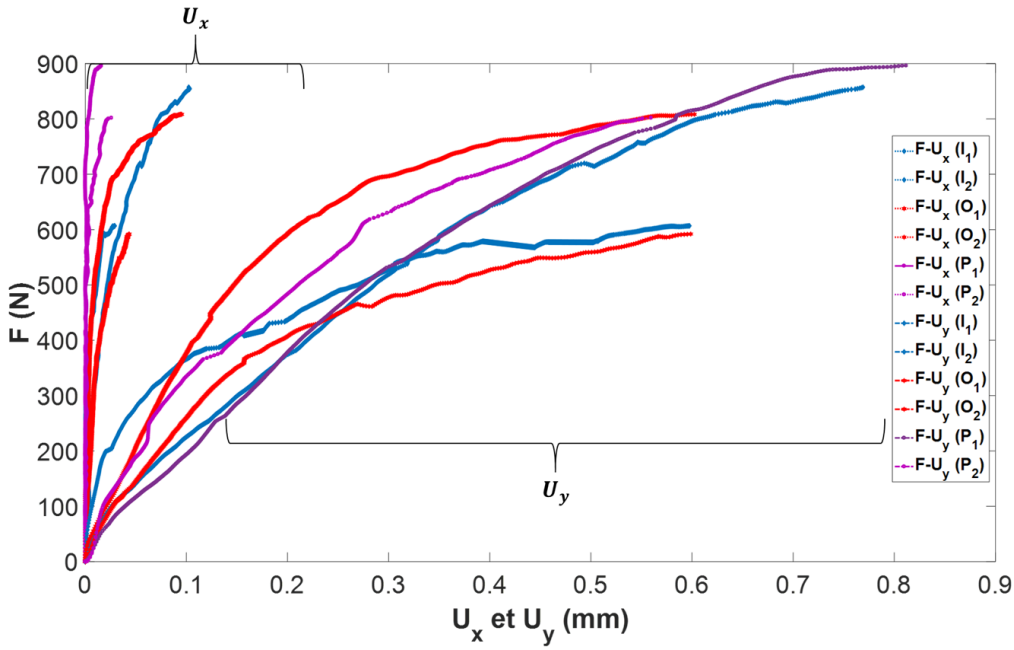



FIGURE 4.9 – Force en fonction de l'ouverture de fissure des trois essences pour $\alpha = 15^0$ et b=15 $mm$.

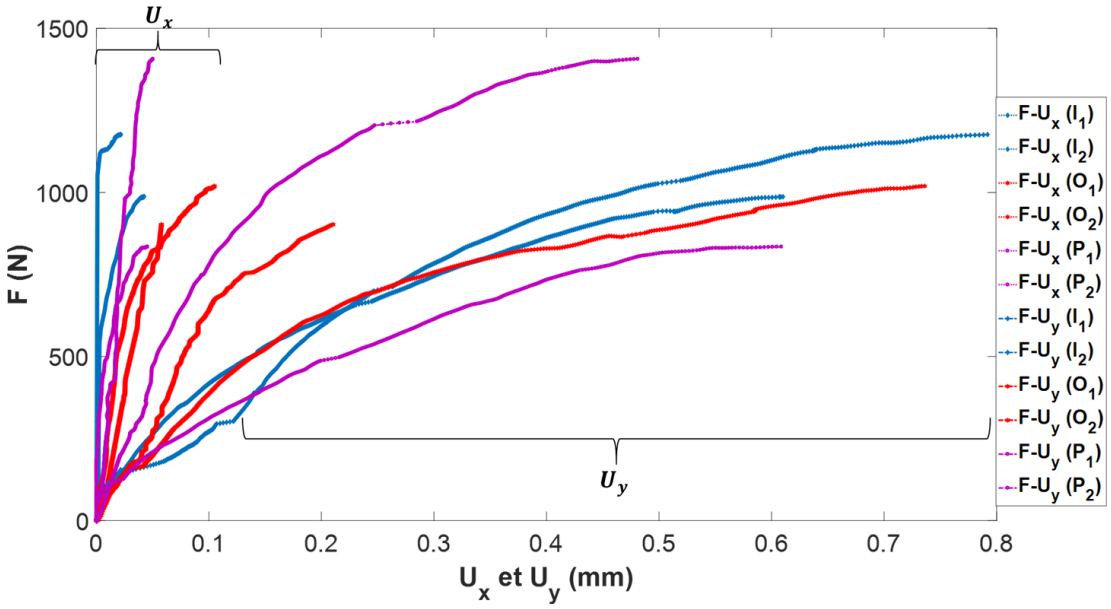



FIGURE 4.10 – Force en fonction de l'ouverture de fissure des trois essences pour $\alpha = 15^0$ et b=20 $mm$

.

ce qui est logiquement supérieur au précédent cas où elles variaient entre 600 $N$ à 900 $N$. Cette augmentation des forces à la rupture se justifie par une épaisseur plus importante des éprouvettes, donc une résistance à la fissuration plus grande. Sur la figure 4.11, sont présentées les courbes de force en fonction de l'ouverture de fissure du padouk et de l'okoumé pour $b = 15\ mm$, ainsi que de l'iroko et de l'okoumé pour $b = 20\ mm$. Les petites valeurs constatées d'iroko et de padouk s'expliquent par une rupture des éprouvettes au niveau des congés de raccordement. La Figure 4.12 présente les courbes de force en fonction de l'ouverture de fissure des éprouvettes de l'okoumé pour $b = 15\ mm$ et pour $\alpha = 30^0$. Comme nous pouvons le constater, l'ouverture de fissure suivant x ($U_x$) pour l'ensemble des éprouvettes testées est inférieur à 0,1 $mm$. Pour l'ouverture de fissure suivant y ($U_y$), les valeurs sont de l'ordre de 0,3 à 0,5 $mm$. L'observation de toutes ces courbes issues de la même essence montre une certaine uniformité.

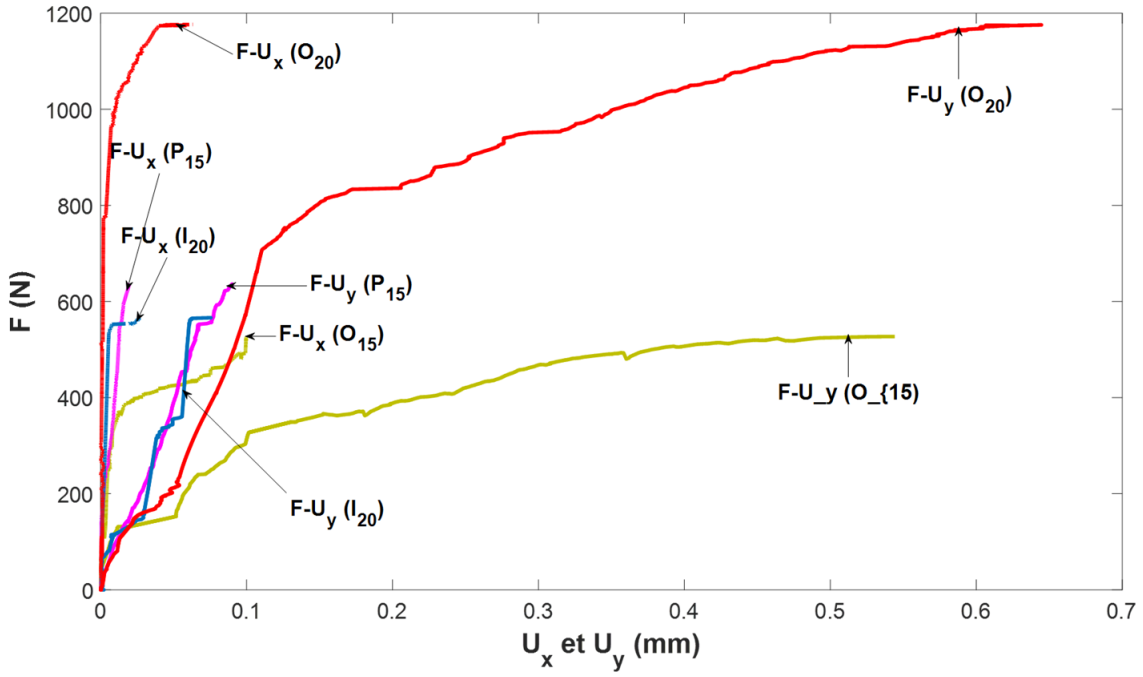



FIGURE 4.11 – Force en fonction de l'ouverture de fissure pour $\alpha$ =$30^0$ : okoumé et padouk (b=15 $mm$) et iroko et okoumé (b=20 $mm$) obtenues pour différentes fissures initiales

.

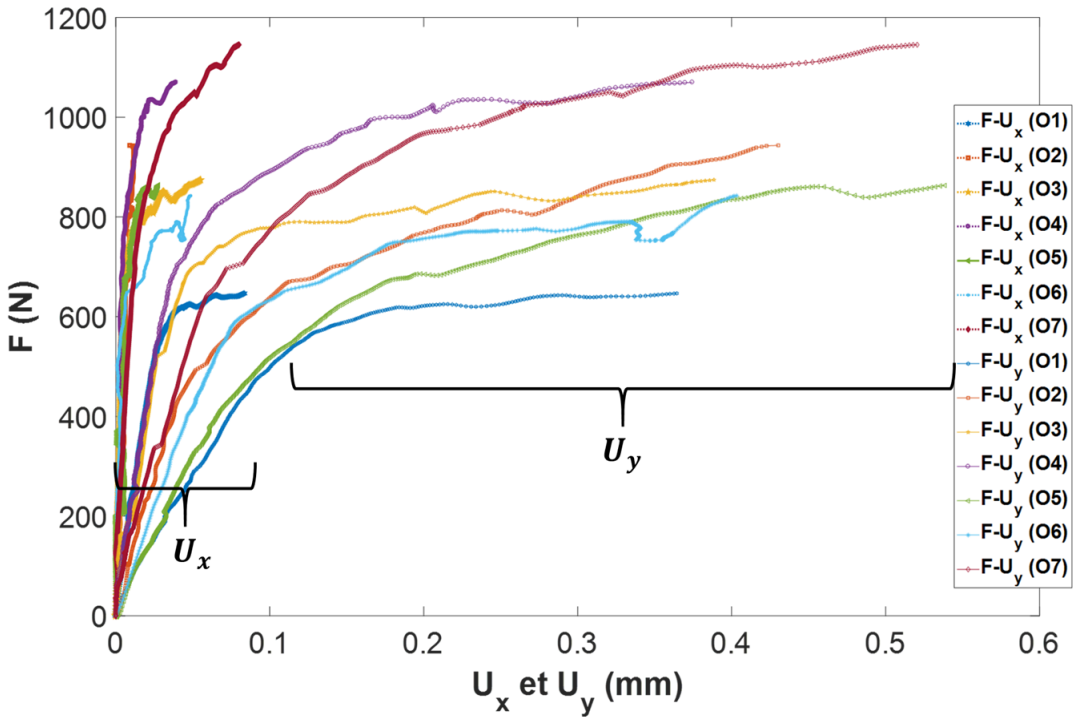



FIGURE 4.12 – Courbes force en fonction de l'ouverture de fissure de l'okoumé pour $b = 15$ $mm$ et $\alpha = 30^0$

.

La Figure 4.13 présente les courbes force en fonction de l'ouverture de fissure des éprouvettes $b = 12{,}5$ $mm$ et $\alpha = 45^0$ des trois essences. L'écart entre les ouvertures de fissure suivant l'axe des $x$ et celle des $y$ s'est considérablement réduit. En effet, les valeurs sont toujours inférieur à 0,1 $mm$ suivant l'axe des $x$, mais en ce qui concerne l'axe des $y$ elles varient entre 0,05 à 0,25 $mm$ excepté pour une courbe d'iroko pour qui cette valeur est de 0,55 $mm$. Cela est peut être dû à la forte inclinaison de la fissure observée sur cette éprouvette. La Figure 4.14 présente les courbes de la force en fonction de l'ouverture de fissure d'iroko et de padouk pour $b$=12,5 $mm$ et $\alpha$=45$^0$. Nous pouvons constater une certaine instabilité en début d'ouverture de fissure due certainement à la mise en place de l'éprouvette avant stabilisation du dispositif.

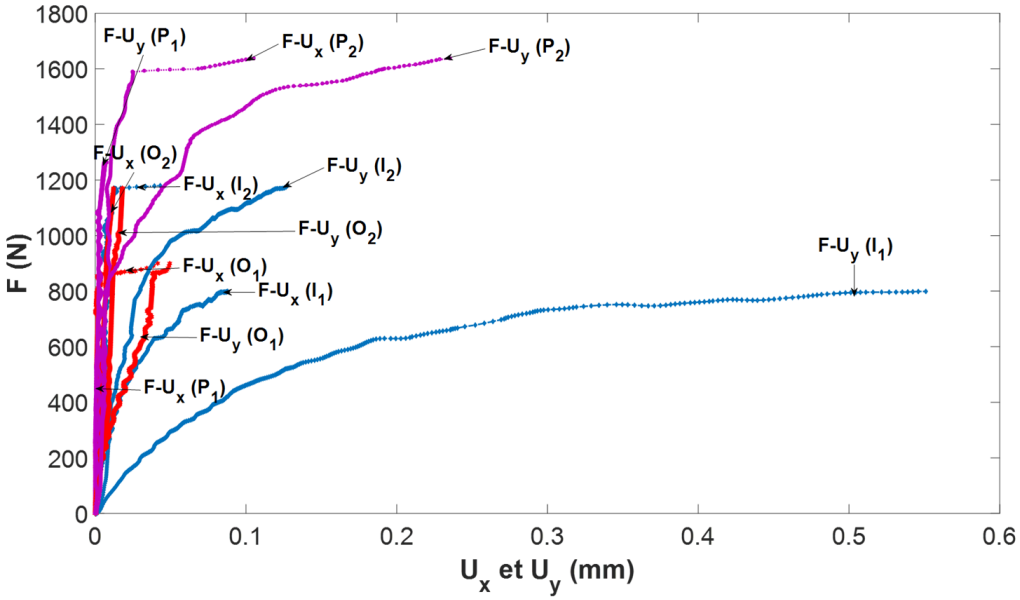



FIGURE 4.13 – Force en fonction de l'ouverture de fissure des trois essences pour $b = 12{,}5$ $mm$ et $\alpha = 45^0$

.

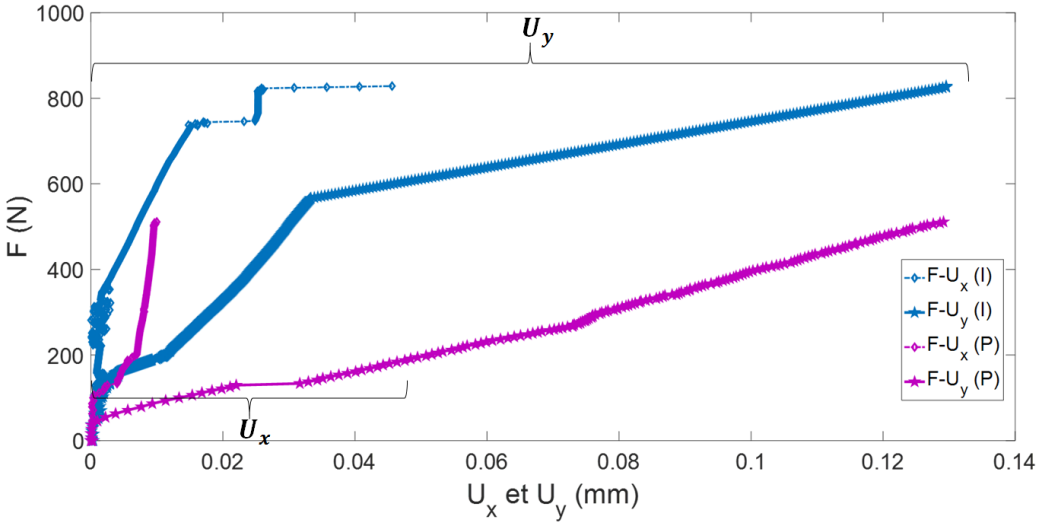



FIGURE 4.14 – Force en fonction de l'ouverture de fissure pour l'iroko et le padouk pour $b = 15$ $mm$ et pour $\alpha = 45^0$

.

### 4.3.3 Taux de restitution d'énergie

Dans cette partie, sont calculées les différentes valeurs du taux de restitution d'énergie des différentes éprouvettes pour les valeurs de $\alpha = 15^0$, $30^0$ et $45^0$ et pour $b = 12{,}5\ mm$, 15 $mm$ et 20 $mm$. Les valeurs moyennes minimales ($G_{ic}$) obtenues en début de fissuration et les valeurs moyennes maximales ($G_{mc}$) obtenues à la rupture sont calculées. Ces valeurs seront désignées par $G_{ic1}$ et $G_{mc1}$ pour la part du mode 1 et pour celle du mode 2 par $G_{ic2}$ et $G_{mc2}$. L'équation 3.2 du chapitre 3 devient :

$$\begin{cases} G_I = \frac{(Fc_x)^2}{2b} \times (\frac{\Delta C}{\Delta a})_d \\ G_{II} = \frac{(Fc_y)^2}{2b} \times (\frac{\Delta C}{\Delta a})_d \end{cases} \tag{4.1}$$

où $G_I$ et $G_{II}$ sont les taux de restitution d'énergie respectivement en mode 1 et 2.

• Les Figures 4.15 (part du mode 1) et 4.16 (part du mode 2) représentent les valeurs de l'évolution du taux de restitution d'énergie en fonction de la longueur de fissure.

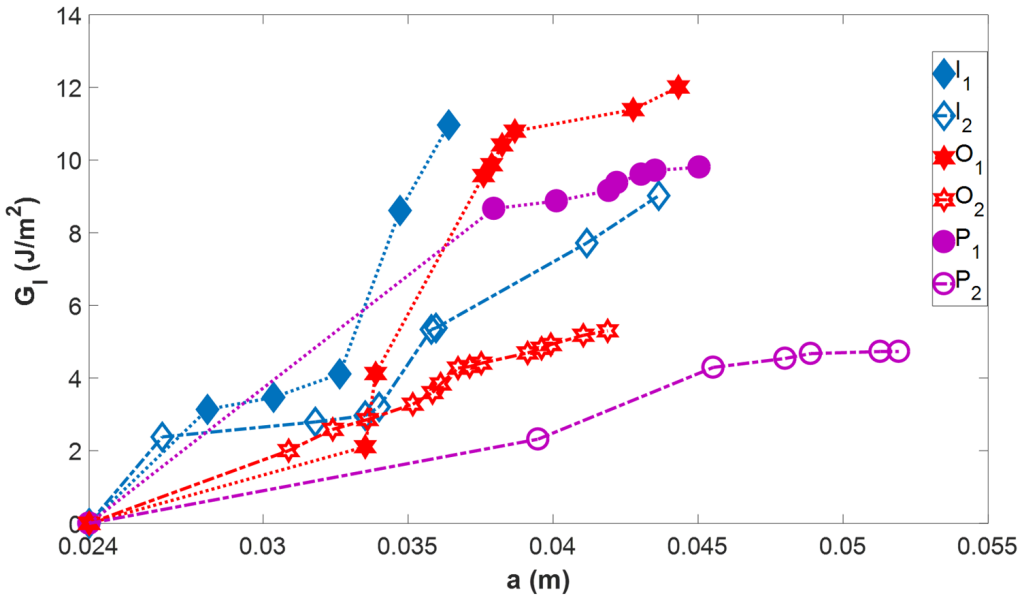



FIGURE 4.15 – Taux de restitution d'énergie en fonction de la longueur de fissure des trois essences : part de $G_I$ (b=15 $mm$ et $\alpha = 15^0$)

.

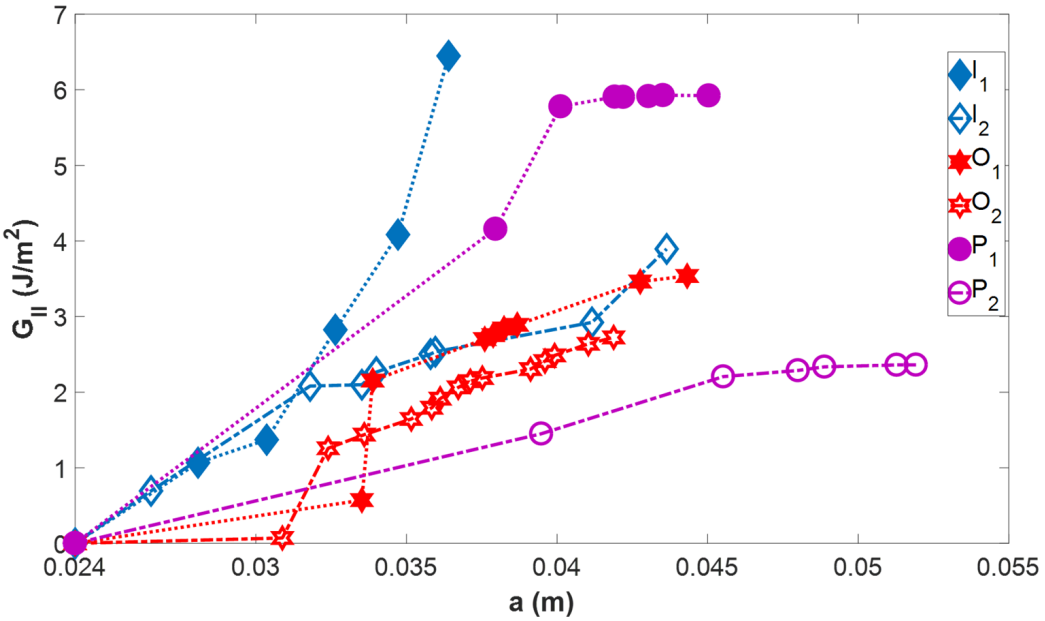



FIGURE 4.16 – Taux de restitution d'énergie en fonction de la longueur de fissure des trois essences : part de $G_{II}$ (b=15 $mm$ et $\alpha = 15^0$)

.

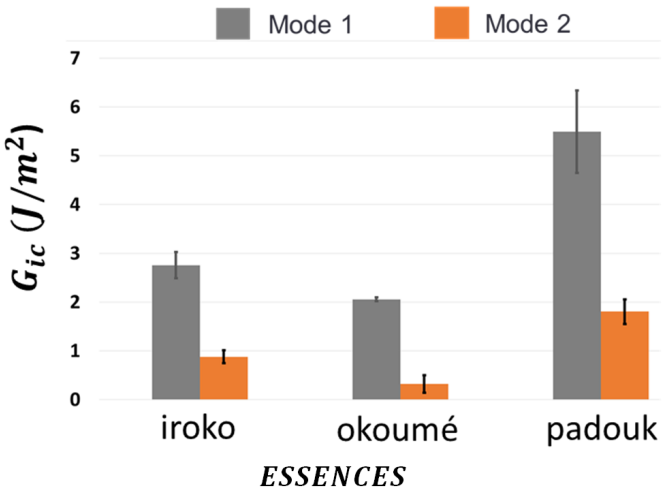



FIGURE 4.17 – Valeurs moyennes minimales de $G_{ic}$ (avec barres d'erreurs) des trois essences : part du mode I et du mode II pour les éprouvettes b=15 $mm$ et $\alpha = 15^0$

.

Parallèlement le tableau 4.2 présente les différentes valeurs moyennes minimales et maximales du taux de restitution d'énergie obtenues pour les trois essences données dans les fi-

gures 4.15 et 4.16. Les valeurs des rapports $G_{ic1}/G_{ic2}$ et $G_{mc1}/G_{mc2}$ et les différences $G_{ic1}-G_{ic2}$ et $G_{mc1} - G_{mc2}$ sont aussi données.

| Taux de restitution d'énergie ($J/m^2$) | iroko | okoumé | padouk |
|---|---|---|---|
| $G_{ic1}$ | 2,76 | 2,06 | 5,49 |
| $G_{ic2}$ | 0,88 | 0,32 | 2,80 |
| $G_{ic1} - G_{ic2}$ | 1,88 | 1,74 | 2,69 |
| $G_{ic1}/G_{ic2}$ | 3,14 | 6,44 | 1,96 |
| $G_{mc1}$ | 9,99 | 8,66 | 7,27 |
| $G_{mc2}$ | 5,17 | 3,13 | 4,14 |
| $G_{mc1} - G_{mc2}$ | 4,82 | 5,53 | 3,13 |
| $G_{mc1}/G_{mc2}$ | 1,93 | 2,77 | 1,76 |

avec : $G_{ic1}$ et $G_{ic2}$=Valeurs minimales du taux de restitution d'énergie (part de $G_I$ et de $G_{II}$)

$G_{mc1}$ et $G_{mc2}$=Valeurs maximales du taux de restitution d'énergie (part de $G_I$ et de $G_{II}$)

TABLE 4.2 – Comparaison des valeurs moyennes des trois essences (b=15 $mm$ et $\alpha = 15^0$).

Ces résultats nous permettent de conclure que l'évolution de la fissure est progressive pour l'iroko et le padouk. Pour l'okoumé nous observons une avancée de $G$ significative entre la première et la deuxième valeur critique. En effet, l'observation de l'évolution de $G$ se matérialise par un saut brusque. En reliant par exemple la première valeur et la deuxième valeur de $G$, nous observons une droite presque verticale, comme indiqué sur les figures 4.15 et 4.16 pour les deux courbes de l'okoumé. Si les valeurs minimales donnent une idée du comportement à la fissuration, les valeurs maximales ne donnent pas d'information concluante sur la résistance à la fissuration de ce type d'essence. En effet, une fois que la fissure a commencé à se propager, le chemin suivi devient aléatoire. Par contre, les valeurs minimales montrent une certaine proportionnalité à la densité des essences. Le changement de direction du fil de grain rend complexe la prévision de l'orientation de la fissure et conduit à un $G$ élevé.

La figure 4.17 présente quant à elle les valeurs moyennes minimales en début de fissuration du taux de restitution d'énergie, avec barres d'erreurs pour les deux modes. Cette figure montre pour ces éprouvettes d'épaisseur 15 $mm$ une différence significative entre les trois essences. Nous remarquons aussi une certaine proportionnalité des valeurs $G_{ic1}$ et $G_{ic2}$ par rapport à la densité.

• Les Figures 4.18 (part du mode 1) et 4.19 (part du mode 2) présentent l'évolution du taux de restitution d'énergie en fonction de la longueur de fissure pour les trois essences, pour les éprouvettes avec $b = 20$ $mm$ et pour $\alpha = 15^0$.

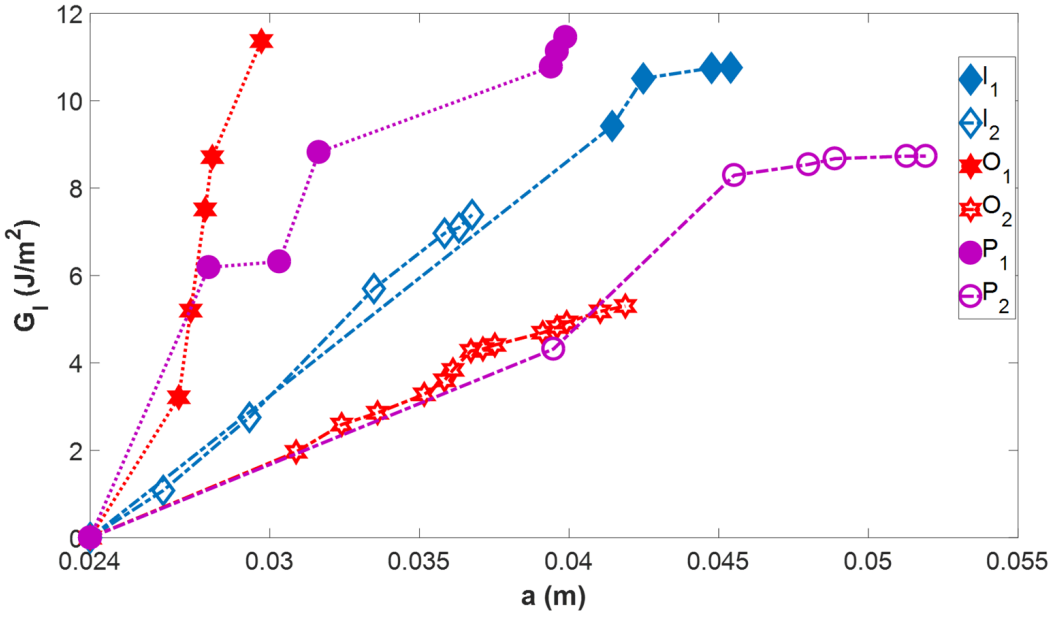



FIGURE 4.18 – Taux de restitution d'énergie en fonction de la longueur de fissure des trois essences : part de $G_I$ (pour $b$=20 $mm$ et $\alpha = 15^0$)

.

La Figure 4.20 présente les valeurs moyennes minimales du taux de restitution d'énergie des trois essences. Sur cette figure sont présentées les valeurs de $G_{ic}$ des deux modes. Comme au cas précédent, les valeurs issues du mode 1 sont largement supérieures à celles du mode 2. Nous constatons aussi qu'après augmentation de l'épaisseur $b$ des éprouvettes, les valeurs obtenues avec le padouk et l'iroko sont très proches, et celles de l'okoumé sont très inférieures

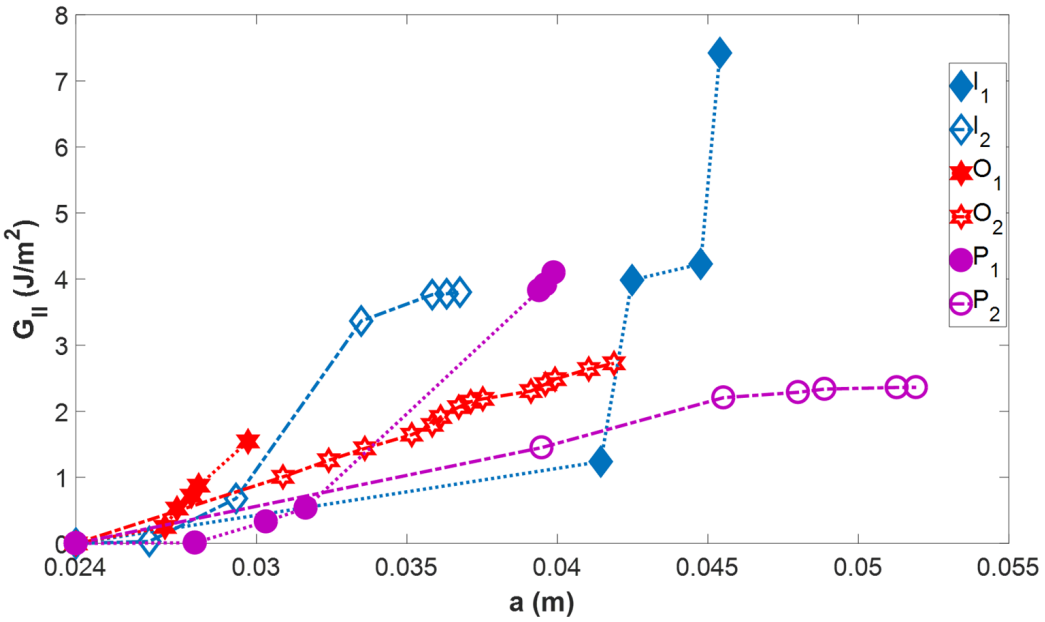



FIGURE 4.19 – Taux de restitution d'énergie en fonction de la longueur de fissure des trois essences : part de $G_{II}$ (pour $b$=20 $mm$ et $\alpha = 15^0$)

.

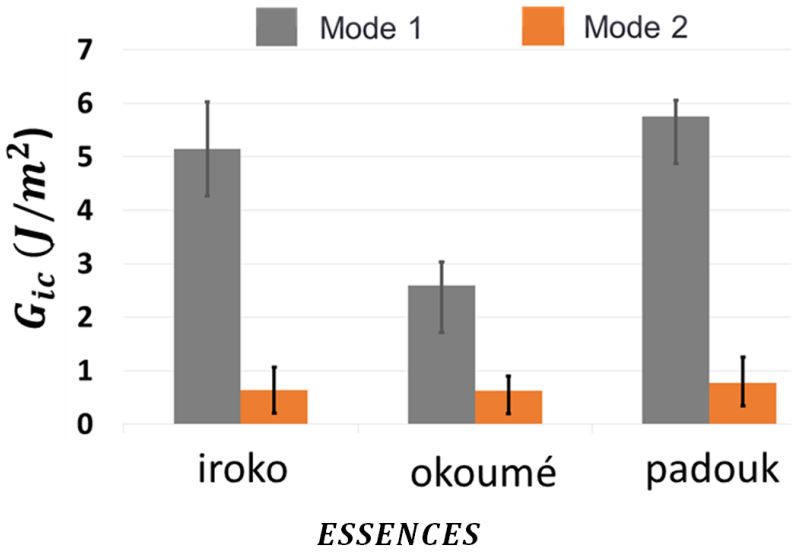



FIGURE 4.20 – Valeurs moyennes de $G_{ic}$ (avec écart type) des trois essences : part du mode 1 et du mode 2 (éprouvettes pour $b$= 20 $mm$ et $\alpha = 15^0$

.

aux deux autres. Ceci revient à dire que l'augmentation de l'épaisseur a eu une incidence sur l'iroko. En effet, les valeurs de $G_{ic}$ obtenues avec les éprouvettes qui sont passées de $b$=15 $mm$ à $b$=20 $mm$ de l'iroko ont été multipliées par deux et sont presque identiques à celles du padouk. Ici nous observons aussi que les valeurs obtenues en mode 2 sont très proches pour les trois essences.

| Taux de restitution d'énergie ($J/m^2$) | iroko | okoumé | padouk |
|---|---|---|---|
| $G_{ic1}$ | 5,24 | 2,58 | 5,25 |
| $G_{ic2}$ | 0,63 | 0,63 | 0,73 |
| $G_{mc1}$ | 9,07 | 8,33 | 10,09 |
| $G_{mc2}$ | 5,61 | 2,13 | 3,23 |
| $G_{ic1} - G_{ic2}$ | 4,62 | 1,96 | 4,52 |
| $G_{ic1}/G_{ic2}$ | 8,32 | 4,09 | 7,19 |
| $G_{mc1} - G_{mc2}$ | 3,46 | 6,20 | 6,86 |
| $G_{mc1}/G_{mc2}$ | 1,61 | 3,91 | 3,12 |

avec : $G_{ic1}$ et $G_{ic2}$=Valeurs moyennes minimales du taux de restitution d'énergie (part de $G_I$ et de $G_{II}$)

$G_{mc1}$ et $G_{mc2}$=Valeurs moyennes maximales du taux de restitution d'énergie (part de $G_I$ et de $G_{II}$)

TABLE 4.3 – Comparaison des valeurs moyennes des trois essences (pour b=20 $mm$ et $\alpha = 15^0$).

Le Tableau 4.3 synthétise les résultats des figures 4.18 et 4.19. Comme dans le précédent cas, les valeurs moyennes minimales et maximales sont données.

• Les Figures 4.21 (parts des deux modes) et 4.22 (parts des deux modes) représentent l'évolution du taux de restitution d'énergie en fonction de la longueur de fissure pour les éprouvettes, respectivement pour $b = 15$ $mm$ (okoumé et padouk) et $b = 20$ $mm$ (iroko et okoumé), et pour $\alpha = 30$ $^0$. Les valeurs obtenues avec le padouk et l'iroko sont, sur les deux figures, très faibles par rapport à celles de l'okoumé. La raison est que pour ces deux essences, les éprouvettes ont cassé au niveau des congés de sollicitations.

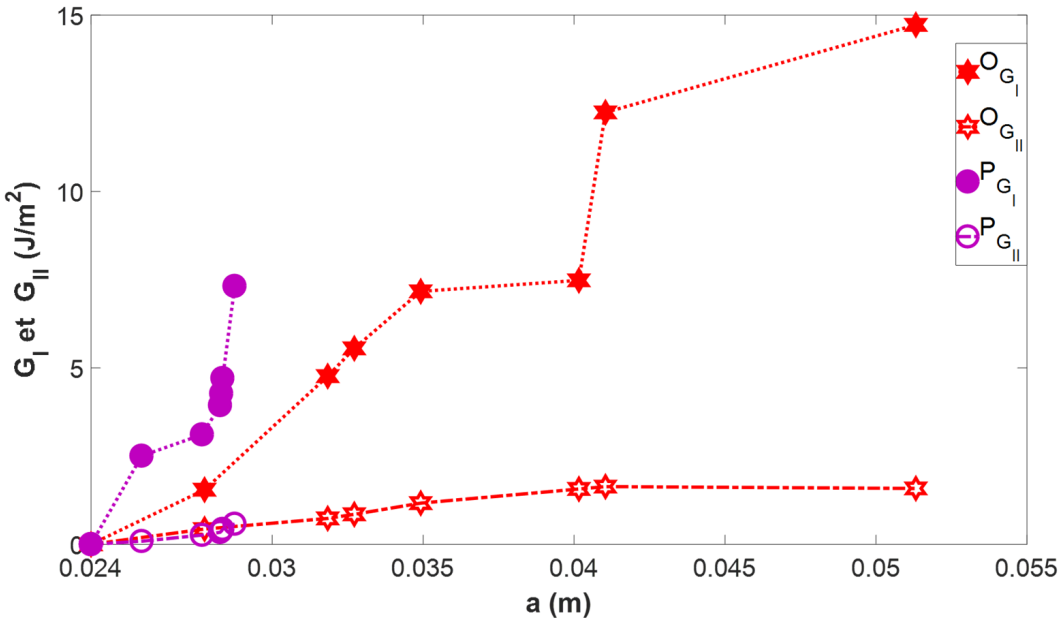



FIGURE 4.21 – Courbes taux de restitution d'énergie en fonction de la longueur de fissure d'okoumé et du padouk : part de $G_I$ et part de $G_{II}$ pour 15 $mm$

.

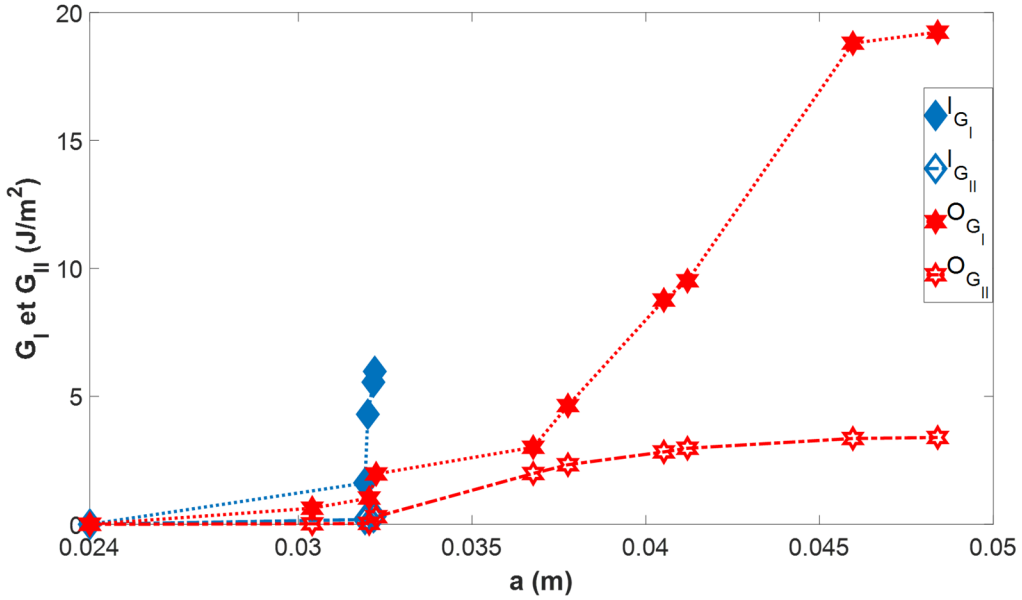



FIGURE 4.22 – Taux de restitution d'énergie en fonction de la longueur de fissure d'iroko et d'okoumé : part de $G_I$ et part de $G_{II}$ pour 20 $mm$

.

Les Figures 4.23 (part du mode 1) et 4.24 (part du mode 2) présentent l'évolution du taux de restitution d'énergie en fonction de la longueur de fissure pour les différentes éprouvettes d'okoumé pour $b = 15\ mm$ et $\alpha = 30^0$.

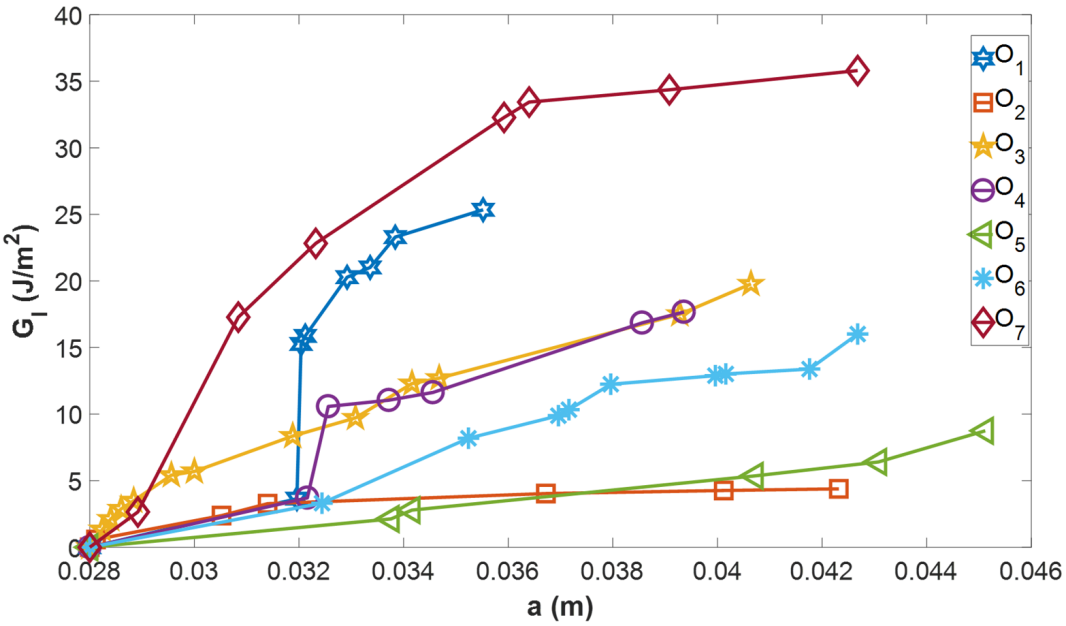



FIGURE 4.23 – Taux de restitution d'énergie en fonction de la longueur de fissure d'okoumé : part de $G_I$ (pour $b$=15 $mm$ et $\alpha$=30$^0$)

.

Ensuite sont calculées et représentées sur la Figure 4.25 les différentes valeurs obtenues avec le rapport $G_I/G_{II}$.

Sur la Figure 4.25, le rapport ($G_I/G_{II}$) est presque constant pour les différentes éprouvettes. Certaines études [102, 103] ont souvent montré le caractère complexe et instable en début de propagation de la fissure. Cela peut expliquer l'instabilité de ce rapport en début de propagation. En effet, au début de la propagation, la valeur critique de $Gc$ n'est pas encore atteinte, d'où une légère augmentation et parfois une certaine instabilité justifiée par le rapport $G_I/G_{II}$. Ce rapport se stabilise quand le seuil critique est atteint. La conséquence de ceci est que le rapport $G_I/G_{II}$ aura tendance à être grand en début de propagation de fissure. Dans l'ensemble cependant, ce rapport, après une légère diminution, se stabilise et reste conforme avec ce qui est communément observé [104, 105]. Ceci se justifie d'autant plus que le critère

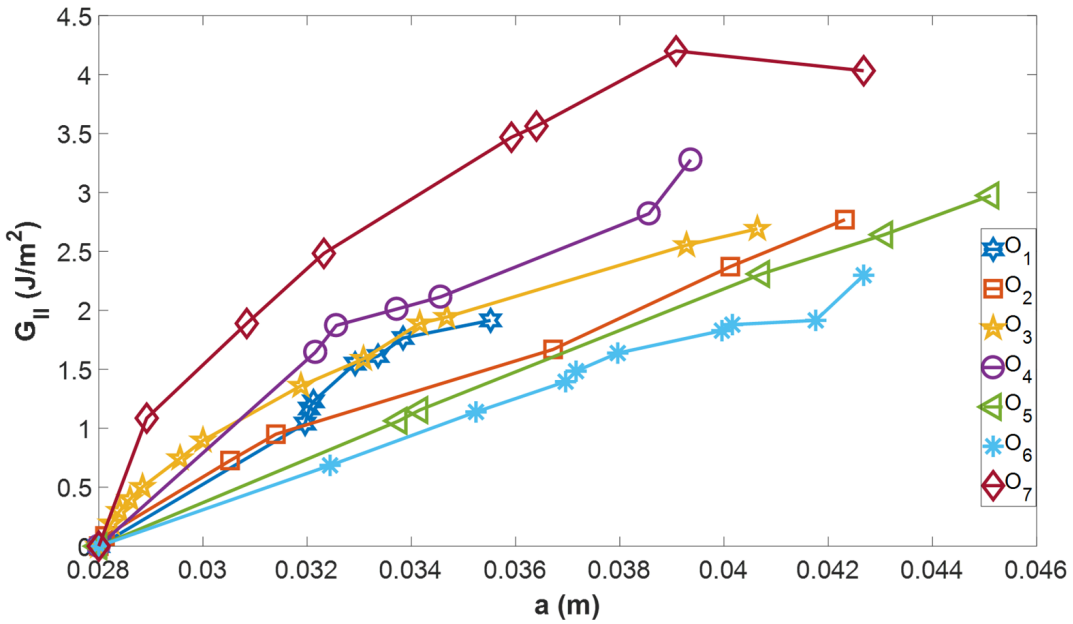



FIGURE 4.24 – Taux de restitution d'énergie en fonction de la longueur de fissure de l'okoumé : part de $G_{II}$ (pour $b$=15 $mm$ et $\alpha$=30$^0$)

.

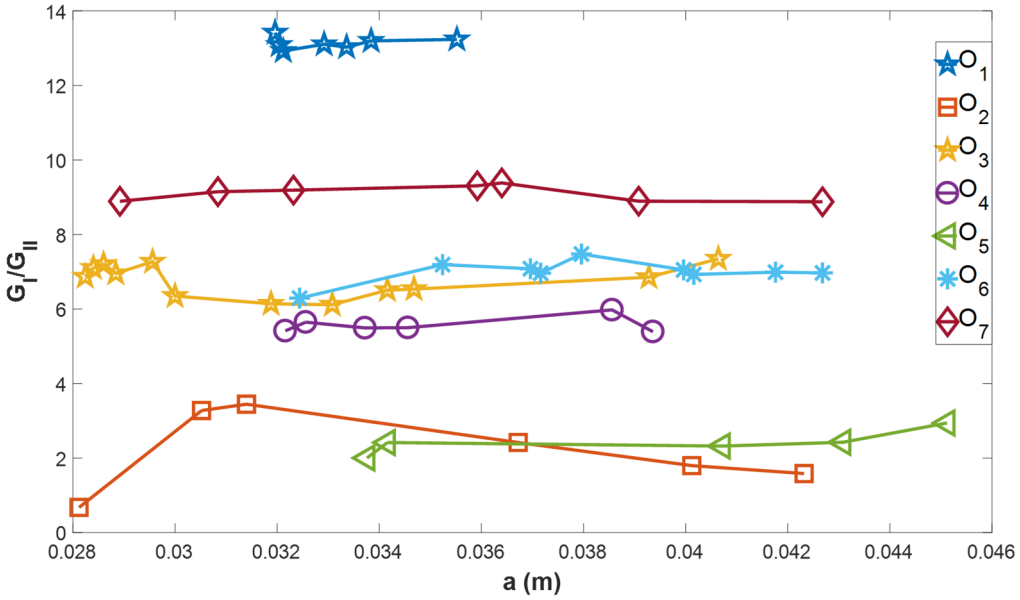



FIGURE 4.25 – Evolution du rapport de $G_I$ / $G_{II}$ en fonction de la longueur de fissure de l'okoumé (pour $b$=15 $mm$ et $\alpha = 30^0$)

.

| Taux de restitution d'énergie ($J/m^2$) | Valeurs |
|---|---|
| $G_{ic1}$ | 2,48 |
| $G_{ic2}$ | 0,83 |
| $G_{ic1} - G_{ic2}$ | 1,65 |
| $G_{ic1}/G_{ic2}$ | 2,99 |
| $G_{mc1}$ | 18,25 |
| $G_{mc2}$ | 2,85 |
| $G_{mc1} - G_{mc2}$ | 15,4 |
| $G_{mc1}/G_{mc2}$ | 6,40 |

avec : $G_{ic1}$ et $G_{ic2}$ : Valeurs moyennes minimales du taux de restitution d'énergie (part de $G_I$ et de $G_{II}$)

$G_{mc1}$ et $G_{mc2}$ : Valeurs moyennes maximales du taux de restitution d'énergie (part de $G_I$ et de $G_{II}$)

TABLE 4.4 – Comparaison des valeurs moyennes pour les sept éprouvettes de l'okoumé (pour b=15 $mm$ et $\alpha = 30^0$).

énergétique linéaire a été satisfait. En effet, ce constat a été fait par Yoshihara [74] pour les rapports de ténacités sur l'épinette (nom de l'épicéa au Canada). De plus, ce résultat semble aussi être en accord avec les résultats de la méthode dite de la fissure équivalente utilisée par Phan [104, 105]. L'autre raison justifiant cette instabilité est le fait que dans le cas du mode mixte, dans la phase initiale de croissance des fissures, les dommages induits par le mode 1 sont dominants. Concernant les moyens de mesure, une conclusion est que la méthode de la grille utilisée pour ce travail semble être bien adaptée à la caractérisation de la rupture du bois dans le système de propagation des fissures suivant la configuration RL et sous chargement en mode mixte. Les valeurs moyennes de diverses grandeurs sont récapitulées dans le tableau 4.4.

• Pour l'angle $\alpha$= $45^0$ les éprouvettes $b = 15$ $mm$ et $b = 20$ $mm$ des trois essences testées ont systématiquement cassé au niveau des congés de raccordement. Bien que la longueur de fissure initiale ait été augmentée, aucun changement n'a été observé. Les seules éprou-

vettes qui ont été exploitées n'ont pas totalement propagé avant de rompre (cf. figure 4.28). Cependant, la diminution de l'épaisseur $b = 12{,}5\ mm$ des éprouvettes a permis d'obtenir une propagation satisfaisante de fissure jusqu'à la rupture. Dans cette partie, les Figures 4.26 (part du mode 1) et 4.27 (part du mode 2) présentent le taux de restitution d'énergie en fonction de la longueur de fissure pour $b = 12{,}5\ mm$ et pour les trois essences (voir tableau 4.5 pour les valeurs comparatives). De même, la figure 4.28 (part des deux modes) présente le taux de restitution d'énergie en fonction de la longueur de fissure pour $b = 20\ mm$ de l'iroko et du padouk.

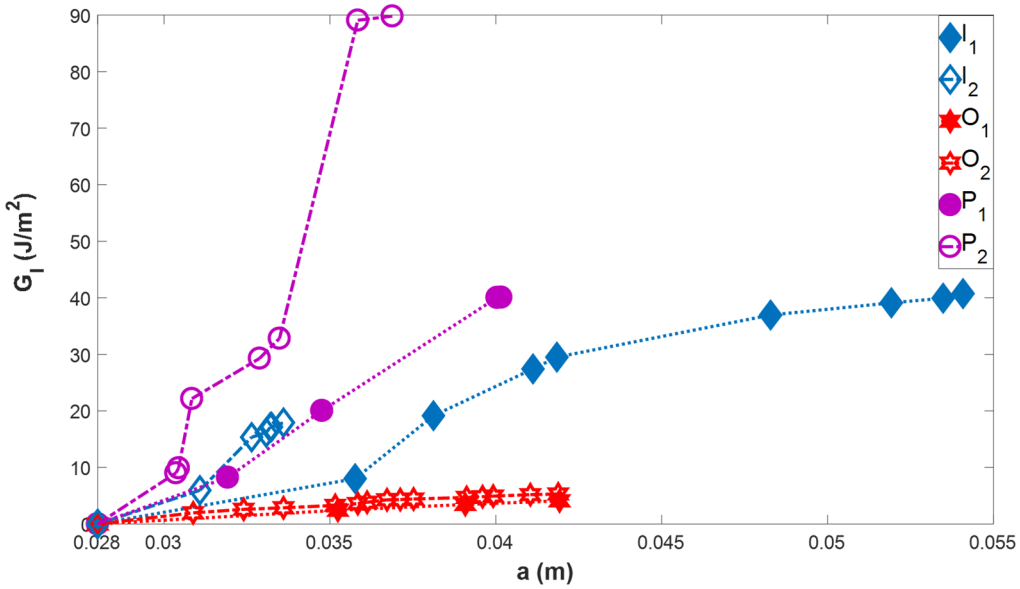



FIGURE 4.26 – Taux de restitution d'énergie en fonction de la longueur de fissure des trois essences : part de $G_I$ (pour $b$=12,5 $mm$ et $\alpha$=45$^0$)

.

Les résultats obtenus en mode 1 et en mode 2 montrent que les valeurs sont du même ordre de grandeur. En effet, l'écart entre les deux modes est beaucoup plus élevé pour les angles 15$^0$ et 30$^0$ que pour l'angle 45$^0$. La différence entre les valeurs moyennes minimales en mode 1 et mode 2 calculées et consignées dans les différents tableaux l'atteste aussi. Ce résultat est logique puisque pour cet angle de 45$^0$, la force projetée suivant les deux axes est identique. En plus, la différence des valeurs des ouvertures de fissures suivant x et y se trouve être minimale.

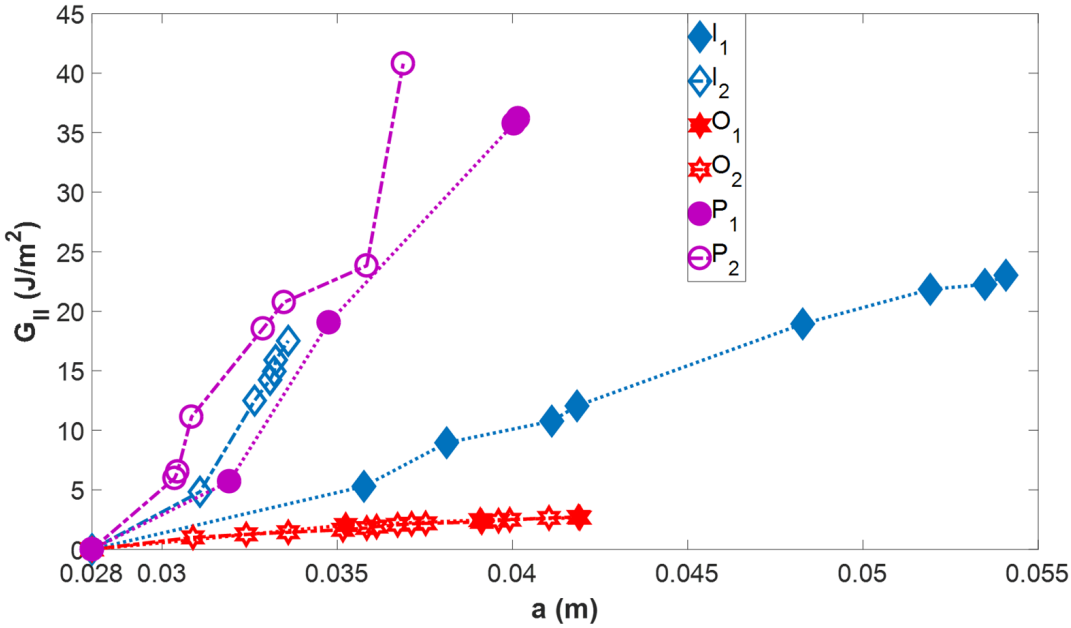



FIGURE 4.27 – Taux de restitution d'énergie en fonction de la longueur de fissure des trois essences : part de $G_{II}$ (pour $b$=12,5 $mm$ et $\alpha$=$45^0$)

.

| Taux de restitution d'énergie $(J/m^2)$ | iroko | okoumé | padouk |
|---|---|---|---|
| $G_{ic1}$ | 6,98 | 2,19 | 8,63 |
| $G_{ic2}$ | 5,07 | 1,53 | 5,84 |
| $G_{mc1}$ | 29,33 | 4,69 | 64,95 |
| $G_{mc2}$ | 20,27 | 2,69 | 38,50 |
| $G_{ic1} - G_{ic2}$ | 1,92 | 0,67 | 2,78 |
| $G_{ic1}/G_{ic2}$ | 1,38 | 1,43 | 1,47 |
| $G_{mc1} - G_{mc2}$ | 9,06 | 2,00 | 26,45 |
| $G_{mc1}/G_{mc2}$ | 1,45 | 1,74 | 1,69 |

avec : $G_{ic1}$ et $G_{ic2}$ : Valeurs moyennes minimales du taux de restitution d'énergie (part de $G_I$ et de $G_{II}$)

$G_{mc1}$ et $G_{mc2}$ : Valeurs moyennes maximales du taux de restitution d'énergie (part de $G_I$ et de $G_{II}$)

TABLE 4.5 – Comparaison des valeurs moyennes des trois essences.

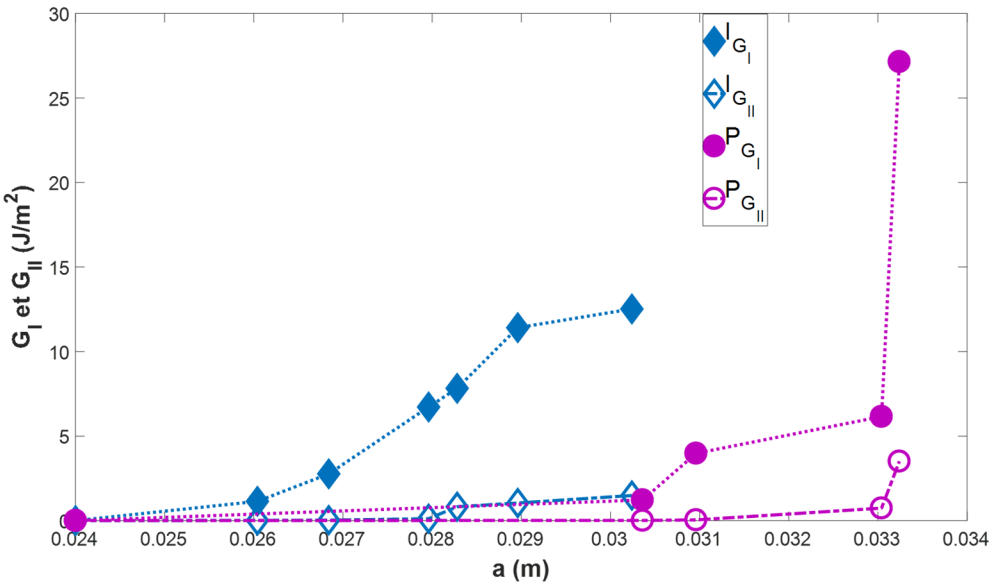



FIGURE 4.28 – Taux de restitution d'énergie en fonction de la longueur de fissure d'iroko et de padouk : part de $G_I$ et part de $G_{II}$ (pour $b$=20 $mm$ et $\alpha$=45$^0$)

.

## 4.4 Comparaisons et analyses

Le Tableau 4.6 présente les différentes valeurs ($G_{ic}$) et ($G_{mc}$) obtenues pour les trois essences. Les différences des valeurs minimales de la part du mode 1 et celles de la part du mode 2 sont comparées.

La figure 4.29 présente la différence des valeurs moyennes des taux de restitution d'énergie $G_I - G_{II}$ en fonction des différents angles de mixité pour les éprouvettes $b = 20\ mm$. Nous pouvons voir clairement la diminution de cette différence entre la part du mode 1 et celle du mode 2 avec l'augmentation de l'angle de mixité.

Après analyse des essais pour les différents taux de mixité, les résultats obtenus ont donné les informations suivantes :

- pour tous les angles de mixité étudiés, la part du mode 1 est toujours supérieure à celle du mode 2. Ces résultats sont identiques aux résultats d'essais effectués sur des essences tempérées par [73, 106] ;
- les valeurs moyennes minimales ($G_{ic}$) augmentent avec l'épaisseur des éprouvettes

| Désignation | iroko | okoumé | padouk |
|---|---|---|---|
| Epaisseur 15 ($15^0$) | $G_{ic1} - G_{ic2} = 1,88$ | $G_{ic1} - G_{ic2} = 1,73$ | $G_{ic1} - G_{ic2} = 2,69$ |
| Epaisseur 20 ($15^0$) | $G_{ic1} - G_{ic2} = 4,62$ | $G_{ic1} - G_{ic2} = 1,96$ | $G_{ic1} - G_{ic2} = 4,52$ |
| Epaisseur 15 ($30^0$) | | $G_{ic1} - G_{ic2} = 1,11$ | $G_{ic1} - G_{ic2} = 2,42$ |
| Epaisseur 20 ($30^0$) | $G_{ic1} - G_{ic2} = 1.43$ | $G_{ic1} - G_{ic2} = 0,61$ | |
| Epaisseur 15 ($30^0$) | | $G_{ic1} - G_{ic2} = 1,65$ (1) | |
| Epaisseur 15 ($30^0$) | | $G_{ic1}/G_{ic2} = 2,99$ | |
| Epaisseur 15 ($30^0$) | | $G_{mc1}/G_{mc2} = 6,40$ | |
| Epaisseur 12,5 ($45^0$) | $G_{ic1} - G_{ic2} = 1,92$ | $G_{ic1} - G_{ic2} = 0,67$ | $G_{ic1} - G_{ic2} = 2,78$ |
| Epaisseur 20 ($45^0$) | $G_{ic1} - G_{ic2} = 1,13$ | | $G_{ic1} - G_{ic2} = 1,21$ |

TABLE 4.6 – Comparaison des valeurs moyennes des trois essences.

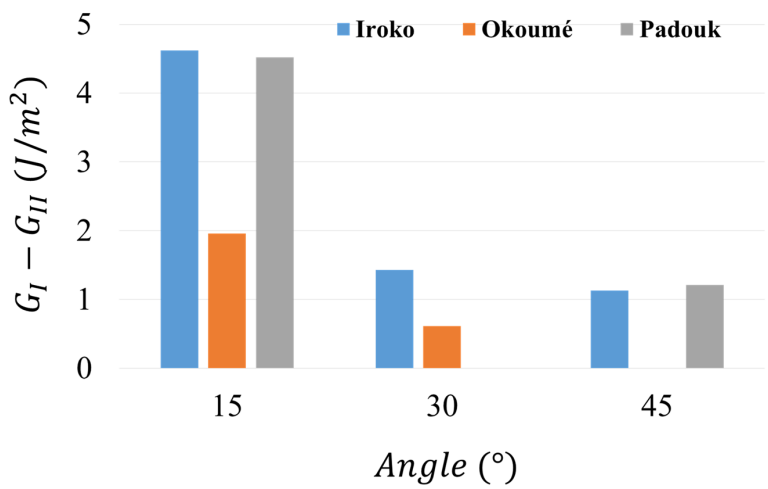



FIGURE 4.29 – Valeurs moyennes $G_I - G_{II}$ en fonction de l'angle de mixité des trois essences (pour $b$= 20 $mm$)

.

quel que soit le taux de mixité ;

- les valeurs moyennes minimales du taux de restitution d'énergie issues du mode 1 ($G_{ic1}$) diminuent avec l'augmentation du degré de l'angle de mixité, tandis que les valeurs minimales du taux de restitution d'énergie issues du mode 2 ($G_{ic2}$) augmentent ;

- le rapport $G_I/G_{II}$ en fonction de la longueur de fissure a une évolution constante comme indiqué sur la Figure 4.25, ce qui est en accord avec [105]. Cela peut indiquer que les valeurs caractérisant la fissuration obtenues sont des valeurs intrinsèques aux essences étudiées ;
- La différence entre les valeurs minimales $G_{ic1} - G_{ic2}$ diminue avec l'augmentation du degré de l'angle de mixité (Figure 4.29) justifiant en même temps le découplage complet des modes mixtes de rupture. Sur cette figure sont représentés les résultats des valeurs de $G_I - G_{II}$ obtenues pour les essais avec un angle de $15^0$, $30^0$ et $45^0$. Nous observons bien une évolution décroissante de cette différence. Ce constat peut s'expliquer par le fait que lorsque nous nous rapprochons d'un angle de $45^0$, les valeurs des ouvertures de fissures suivant x et y ont tendance à se rapprocher. En mode mixte, l'ouverture de fissure n'est plus unidimensionnelle puisque l'éprouvette est sollicitée avec un angle qui induit une cohabitation de deux modes, ce qui conduit à une projection suivant les deux axes de l'ouverture de fissure. L'obtention des deux composantes $Ux$ et $Uy$ a abouti au calcul de $G_I$ et $G_{II}$. Autrement dit, cela permet le découplage des deux modes. La différence entre les valeurs des deux modes est donc maximale lorsque l'angle de mixité est de $15^0$. Elle va se réduire jusqu'à l'angle de $45^0$ où elle est minimale. Entre $0^0$ et $45^0$ le mode 1 est supérieur au mode 2. C'est probablement après un angle de mixité de $45^0$ que le mode 2 est censé être supérieur au mode 1 ;
- Nous remarquons aussi une certaine proportionnalité des valeurs du taux de restitution d'énergie avec celles des densités des trois essences en mode mixte. Il faut plus d'énergie pour initier une fissure dans l'iroko que dans l'okoumé et davantage d'énergie dans le padouk.

L'écart observé pour certaines valeurs de $G$ peut être dû à la spécificité du matériau. En effet, les bois tropicaux ont la particularité d'avoir au sein du matériau une déviation du fil de grain. Certaines de ces essences, telle que l'okoumé, présentent un fil légèrement ondulé. La conséquence dans ces cas de figures est d'avoir un $Gc$ plus élevé à cet endroit précis. C'est certainement ce qui est à l'origine des valeurs élevées de $Gc$ des éprouvettes $O_1$, $O_4$ et

$O_7$ de l'okoumé (Figure 4.16). Sur la Figure 4.7 (a) montrant les cartes de déplacements et de déformations de l'okoumé, nous pouvons observer que pour les éprouvettes $O_1$ et $O_4$, les fissures ont une légère inclinaison. Dans ces cas de figure, les valeurs du taux de restitution sont plus grandes que pour une propagation de fissure rectiligne. Il est à noter que c'est justement avec ces éprouvettes dont les fissures bifurquent que les valeurs de $Gc$ sont plus élevées que dans les autres cas. C'est ce qui explique certainement la dispersion des résultats. Il est très difficile d'avoir toutes les éprouvettes avec un fil parfait suivant la direction souhaitée pour ces essences tropicales à croissance continue.

## 4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, les éprouvettes MMCG de dimensions réduites ont été utilisées pour étudier la fissuration en mode mixte de l'iroko, de l'okoumé et du padouk. Une machine d'essai électromécanique a été utilisée pour effectuer les essais de traction pour les angles de mixité $15^0$, $30^0$ et $45^0$. La méthode de la grille décrite au chapitre 2 et utilisée au précédent chapitre a servi à mener les essais. Le découplage des modes a donné la part des modes 1 et 2. Les différents résultats des taux de restitution d'énergie calculés par la méthode de la complaisance à déplacement imposé ont montré une prédominance du mode 1 sur le mode 2. Des cartes typiques de déplacements et déformations et des résultats en termes de force en fonction de l'ouverture de fissure et de taux de restitution d'énergie en fonction de la longueur de fissure ont été présentés. Les valeurs minimales du taux de restitution d'énergie $G_{ic}$ ont été calculées et comparées pour les trois essences, et le rapport de $G_I/G_{II}$ en fonction de la longueur de fissure a été donné pour l'okoumé. Ce rapport montre une évolution constante, ce qui laisse à penser que les valeurs obtenues caractérisant la fissuration sont des valeurs intrinsèques aux matériaux étudiés. L'analyse des résultats montre aussi qu'il y a une certaine influence de la densité sur la fissuration de ces essences. Le prochain chapitre lui, sera consacré à l'étude numérique et à la comparaison des résultats numériques aux résultats expérimentaux obtenus aux chapitres 3 et 4.

# Chapitre 5

# Étude numérique et comparaison avec les résultats expérimentaux

## 5.1 Introduction

Le présent chapitre a pour objectif d'étudier numériquement la fissuration des trois essences tropicales déjà vues dans les précédents chapitres. Pour ce faire, la méthode des éléments finis est utilisée car c'est un outil numérique performant permettant de simuler la propagation d'une fissure. Cette méthode de calcul numérique est une approche qui permet de caractériser les états de contraintes et de déformations locales en pointe de fissure. Nous rappellerons d'abord les formules de Guitard [107, 108] qui ont permis de calculer les différents paramètres mécaniques des trois essences. Les techniques numériques exposées dans la littérature simulant la propagation d'une fissure seront aussi rappelées, autrement dit, les aspects liés à la mécanique de la rupture. Les différents taux de restitution d'énergie critique seront ensuite calculés numériquement en nous servant des données expérimentales (force, longueur de fissure et l'épaisseur de l'éprouvette). Pour terminer les comparaisons seront faites avec les résultats obtenus expérimentalement dans les chapitres 3 et 4.

## 5.2 Caractéristique des matériaux

Dans cette partie, les formules utilisées pour estimer les valeurs des caractéristiques mécaniques (modules d'élasticité, complaisances et coefficients de cisaillement) sont rappelées. Des essais de caractérisation des trois essences de cette étude n'ayant pas été effectués, ce sont les données issues de la littérature qui sont utilisées ici en suivant la méthode de Guitard [107, 108]. Cette méthode calcule les modules d'élasticité ($ME$), les complaisances et les modules de cisaillement dans le cas des résineux et des feuillus. Seules les formules donnant les valeurs dans le cas des feuillus suivant les trois directions préférentielles du bois (L,R,T) sont rappelées ici.

Le module d'élasticité est, dans un essai uni axial par exemple, le rapport de la contrainte $\sigma_i$ imposée à l'élongation $\epsilon_i$ qui en résulte. On remarque que le module $E_i$ est l'inverse de la complaisance $C_{ii}$ (sans sommation sur $i$). Les valeurs ($V_i$) que l'on obtient pour un feuillu standard sont $E_L$=1400 $MPa$, $E_R$=1810 $MPa$ et $E_T$=1030 $MPa$ [107, 108, 109]. Elles sont obtenues pour une humidité du bois égale à $HI$=12%, une humidité relative de $HR$=65%, une température de $T$=20$^0$ C et une densité de $\rho_0$=0,65 $gr/cm^3$. Pour des conditions différentes, les corrections doivent être apportées sous la forme généralisée suivante :

$$\delta_{ij} = V_i.(\frac{\rho}{\rho_0})^n \left[1 - a_{ij}.(HI - 12)\right] \left[1 - b_{ij}.HI.(T - 20)\right] \tag{5.1}$$

où $\delta_{ij}$ signifie les $E_i$, les $G_{ij}$ et les $Q_{ij}$ des formules de 5.3 à 5.5. $HI$ et $T$ représentent respectivement la valeur de l'humidité interne du bois et T la température autre que celle de référence. L'exposant $n$ est une corrélation puissance à partir des données mesurées. Dans le cas des feuillus cet exposant est tiré de la relation :

$$\begin{cases} y = ax^n = y_0(\frac{\rho}{\rho_0})^n \\ y = y_0 \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^n \\ log(y) = log(y_0) + n(log(\rho) - log(\rho_0)) \end{cases} \tag{5.2}$$

Cette correlation puissance est donc un point de la tangente dans un repère $log(y)$ en fonction de $log(\rho) - log(\rho_0)$.

Les valeurs des constantes $a_{ij}$ et $b_{ij}$ sont données dans le tableau 5.1 :

| direction | RT | | | | RT+L | | | | L |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ij | 11 | 22 | 12 | 66 | 44 | 55 | 13 | 23 | 33 |
| a x $10^{-2}$ [107, 108] | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 12 | 12 | 1 |
| b x $10^{-5}$ [109] | 18 | 18 | 27 | 18 | 13 | 13 | 9 | 9 | 9 |

TABLE 5.1 – Valeurs de quelques constantes.

L'équation 5.2 donne les formules de calcul des différents modules d'élasticité longitudinal ($E_L$), radial ($E_R$) et transversal ($E_T$) en fonction de l'humidité interne ($HI$), de la densité relative ($\rho$) et la température ($T$) de chaque essence étudiée.

$$\begin{cases} E_L = 14400 * (\rho/0,65)^{1,03} * (1 - 0,01 * (HI - 12)) * (1 - 0,00009 * HI * (T - 20)) \\ E_R = 1810 * (\rho/0,65)^{1,30} * (1 - 0,03 * (HI - 12)) * (1 - 0,00018 * HI * (T - 20)) \\ E_T = 1030 * (\rho/0,65)^{1,74} * (1 - 0,03 * (HI - 12)) * (1 - 0,00018 * HI * (T - 20)) \end{cases} \tag{5.3}$$

D'après [107, 108, 109], les formules (voir équations 5.3) permettent de déterminer les différents modules de rigidité de la manière suivante :

$$\begin{cases} G_{TL} = 971 * (\rho/0,65)^{1,26} * (1 - 0,02 * (HI - 12)) * (1 - 0,00013 * HI * (T - 20)) \\ G_{RL} = 1260 * (\rho/0,65)^{1,14} * (1 - 0,02 * (HI - 12)) * (1 - 0,00013 * HI * (T - 20)) \\ G_{RT} = 366 * (\rho/0,65)^{1,74} * (1 - 0,027 * (HI - 12)) * (1 - 0,00018 * HI * (T - 20)) \end{cases} \tag{5.4}$$

Les opposés des inverses des éléments non diagonales de la matrice de complaisance, toujours d'après [107, 108], s'écrivent avec les expressions données par l'équation 5.4 :

$$\begin{cases} Q_{TL} = 31200 * (\rho/0,65)^{1,09} * (1 - 0,012 * (HI - 12)) * (1 - 0,00009 * HI * (T - 20)) \\ Q_{RL} = -37300 * (\rho/0,65)^{0,913} * (1 - 0,03 * (HI - 12)) * (1 - 0,00009 * HI * (T - 20)) \\ Q_{RT} = -2680 * (\rho/0,65)^{1,41} * (1 - 0,03 * (HI - 12)) * (1 - 0,00027 * HI * (T - 20)) \end{cases} \tag{5.5}$$

Les calculs des différents coefficients de Poisson, toujours d'après [107, 108, 109], s'écrivent de la manière suivante :

$$\begin{cases} \nu_{RT} = -\dfrac{E_R}{Q_{RT}} \\ \nu_{TR} = -\dfrac{E_T}{Q_{RT}} \\ \nu_{RL} = -\dfrac{E_R}{Q_{RL}} \\ \nu_{LR} = -\dfrac{E_L}{Q_{RL}} \\ \nu_{TL} = -\dfrac{E_T}{Q_{TL}} \\ \nu_{LT} = -\dfrac{E_L}{Q_{TL}} \end{cases} . \tag{5.6}$$

Le Tableau 5.2 récapitule toutes les valeurs des trois essences obtenues et utilisées dans ce chapitre :

| Désignation | iroko | okoumé | padouk |
|---|---|---|---|
| densité relative $\rho$ | 0,64 | 0,44 | 0,79 |
| humidité interne (%) | 7,94 | 9,12 | 7,29 |
| Température ($^0$ C) | 21 | 21 | 21 |
| $E_L$ (MPa) | 14737 | 9904 | 18421 |
| $E_R$ (MPa) | 1987 | 1182 | 2658 |
| $E_T$ (MPa) | 1123 | 567 | 1648 |
| $G_{TL}$ (MPa) | 1028 | 627 | 1357 |
| $G_{RL}$ (MPa) | 1337 | 853 | 1720 |
| $G_{RT}$ (MPa) | 395 | 200 | 578 |
| $\nu_{RT}$ | 0,677 | 0,706 | 0,661 |
| $\nu_{TR}$ | 0,383 | 0,338 | 0,410 |
| $\nu_{RL}$ | 0,048 | 0,042 | 0,052 |
| $\nu_{LR}$ | 0,357 | 0,349 | 0,362 |
| $\nu_{TL}$ | 0,035 | 0,027 | 0,040 |
| $\nu_{LT}$ | 0,458 | 0,470 | 0,452 |

TABLE 5.2 – Caractéristiques mécaniques et élastiques des essences.

## 5.3 Modélisation par éléments finis (EF)

### 5.3.1 Présentation de Cast3M

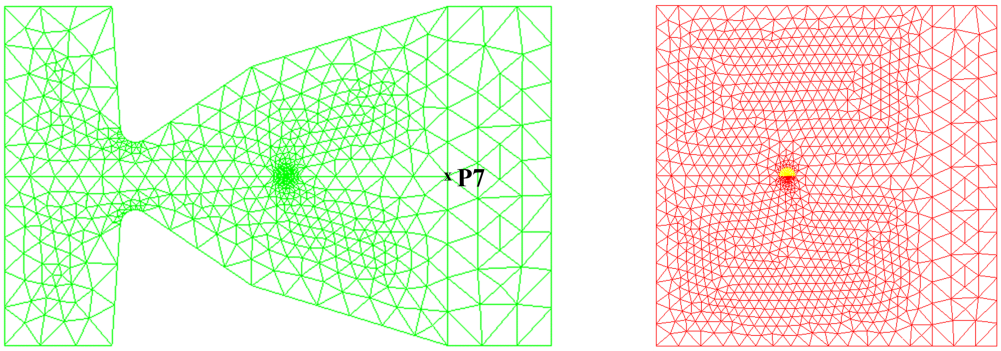
D'après [110], Cast3M est un logiciel de calcul par la méthode des éléments finis qui traite de problèmes divers et variés dans les domaines de la mécanique des structures et des fluides. Ce logiciel a été initialement développé au Département de Modélisation des Systèmes et Structures (DM2S) de la Direction de l'Energie Nucléaire du Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives (CEA) qui est un organisme public de recherche.

Le développement de Cast3M entre dans le cadre d'une activité de recherche dans le domaine de la mécanique dont le but est de définir un instrument de haut niveau, pouvant servir de support pour la conception, le dimensionnement et l'analyse de structures et de composants. Dans cette optique, Cast3M intègre non seulement les processus de résolution (solveur) mais également les fonctions de construction du modèle (pré-processeur) et d'exploitation des résultats (post-traitement). Cast3M est un logiciel « boîte à outils » qui permet à l'utilisateur de développer des fonctions répondant à ses propres besoins. Cast3M est notamment utilisé dans le secteur de l'énergie nucléaire, comme outil de simulation ou comme plateforme de développement d'applications spécialisées. En particulier, Cast3M est utilisé par l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN) dans le cadre des analyses de sûreté des installations nucléaires françaises.

### 5.3.2 Géométrie et maillage

La résolution d'un problème mécanique par un logiciel d'éléments finis, passe d'abord par la définition de la géométrie et la génération de son maillage. Les deux géométries de la présente étude ont des épaisseurs faibles par rapport aux autres dimensions. C'est ce constat qui nous permet de considérer et d'émettre les hypothèses que la résolution peut être effectuée en contraintes planes. Nous allons donc nous placer dans la configuration des pièces minces pour la modélisation (cas des membranes). Pour le maillage des éprouvettes, notre choix est porté sur les éléments triangulaires à 3 nœuds. La pointe de fissure quant à

elle est définie par un maillage rayonnant crée en utilisant un opérateur de Cast3M @*RAYO* afin de définir le domaine d'intégration (le champ $\theta$ voir 5.4.5). Nous devons davantage raffiner le maillage en pointe de la fissure et cela passe par une discrétisation plus fine de la zone concernée. L'objectif est de pouvoir étudier le comportement mécanique de cette zone singulière. L'opérateur appelé DENS permet de varier la densité du maillage dans cette zone. La Figure 5.1 présente les deux géométries d'éprouvettes MMCG (a) et CTS (b) avec le maillage utilisé. La figure 5.2 (a) présente l'emplacement des angles du système Arcan avec éprouvette MMCG. La figure 5.2 (b) présente le maillage d'une éprouvette MMCG et du dispositif Arcan.




**(a)** Maillage de l'éprouvette bois MMCG

**(b)** Maillage de l'éprouvette bois CTS

FIGURE 5.1 – Eprouvettes maillées : (a) MMCG et (b) CTS.

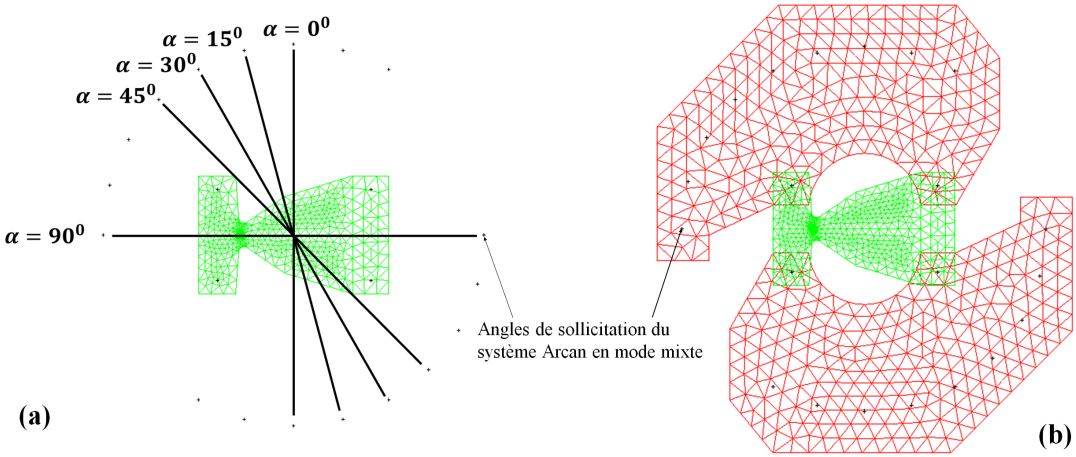



FIGURE 5.2 – Dispositif Arcan et éprouvette MMCG avec position des angles de chargement.

**Conditions aux limites et maillage rayonnant**

Nous sommes dans le cas des éléments triangulaires à 3 nœuds. De plus, les éléments étudiés ici sont des éprouvettes de faibles épaisseurs par rapport aux deux autres dimensions, ce qui rend possible la modélisation en plan et comme hypothèse en contraintes planes. Concernant les conditions aux limites la partie inférieure de l'éprouvette est bloquée, notamment au niveau du point $P7$ (voir figure 5.1 (a). De même, le déplacement longitudinal suivant l'axe $OX$, ainsi que le déplacement en pointe de fissure sont bloqués. En terme d'effort on considère que la partie inférieure de l'éprouvette est bloquée en pratique et en théorie on tire par symétrie de part et d'autre.

## 5.4 Résolution du problème d'amorçage et de propagation de fissure

### 5.4.1 Introduction

L'objectif ici est de généraliser, en statique, l'intégrale $M$ qui a été développée par Chen [111], au comportement viscoélastique orthotrope. Il sera ensuite proposé une modélisation numérique de cette intégrale. Nous rappelons de ce fait les intégrales de contour, issues du processus énergétique et des approches locales. Cela passe par l'introduction des méthodes d'évaluation des champs mécaniques en pointe de fissure introduites par Irwin [112] pour les matériaux isotropes et les formes singulières de Sih [113] pour les matériaux orthotropes. Le découplage des modes de rupture et l'algorithme de résolution implanté aux éléments finis seront exécutés par Cast3M. Pour différents angles de mixité, les valeurs du taux de restitution d'énergie sont calculées en fonction de la longueur de fissure.

### 5.4.2 Méthodes énergétiques

Ces méthodes ont pour but d'évaluer les paramètres de rupture loin du défaut introduit par la pointe de fissure où les champs mécaniques sont largement perturbés par une forte

singularité. Les différentes lois de conservation énergétiques ont déjà été développées par un certain nombre d'auteurs, notamment [114, 115]. Les intégrales indépendantes quant à elles ont été développées par [116, 117]. Nous rappelons ci-dessous quelques-unes de ces méthodes.

## Integrale $J$

L'intégrale $J$ a été définie par Rice [118]. Elle est utilisée en élasticité linéaire pour des configurations planes (2D). L'objectif de cette intégrale est de calculer l'énergie susceptible de créer de nouvelles surfaces de fissures en fond de fissures déjà existantes.

$$J = \int_{\Gamma} \left[ F.n_1 - \sigma_{ij}.n_j.\frac{\partial u_i}{\partial x_1} \right] d\Gamma \tag{5.7}$$

où $\Gamma$ représente un contour curviligne incluant la pointe de fissure. Il est orienté suivant la normale $\overrightarrow{n}$ de composante $n_j$, comme l'illustre parfaitement la Figure 5.3 (a).

## Integrale $G\theta$

Pour les besoins d'implémentation dans un code de calcul, comme c'est le cas ici avec les éléments finis sur Cast3M et de façon à assurer la continuité du domaine, il est préférable de passer d'un contour curviligne à un contour surfacique. L'objectif est d'éviter les projections de champ, sources d'erreurs numériques. De ce fait, Destunyder et al. [119, 120] ont ainsi défini un champ $\theta$. Ce champ est continu et dérivable à l'intérieur du domaine d'étude ($\theta_1 = 1$ à l'intérieur du domaine et $\theta_2 = 1$ à l'extérieur de celui-ci). L'illustration est donnée sur la Figure 5.3 (b). D'après [7], nous partons d'un champ $\theta$ qui doit respecter les propriétés suivantes :

- le champ $\theta$ doit être dans le plan de la fissure ;
- le champ $\theta$ doit être normal au front de fissure ;
- le support du champ $\theta$ est limité au voisinage de la fissure ;
- le champ $\theta$ est continûment dérivable et constant dans la zone entourant la pointe de fissure.

Nous aboutissons à une structure définie par deux contours $\Gamma_1$ et $\Gamma_2$ qui entourent la pointe de fissure, divisant ainsi la pièce en trois parties comme illustré sur la Figure 5.3 (b) [121].

- dans $C_{int}$, le champ $\theta$ est constant de norme unitaire $(1, 0)$ ;
- dans $C_{ext}$, le champ $\theta$ est nul $(0, 0)$ ;
- dans $C_{cour}$, le champ $\theta$ varie continûment de $(1, 0)$ à $(0, 0)$.

Ensuite, le taux de restitution d'énergie peut être exprimé par le calcul suivant :

$$G\theta = \int_v [F.\theta_{k,k} + \sigma_{ij}.u_{i,k}.\theta_k]\, dV \qquad k \in [1, 2] \tag{5.8}$$

Les intégrales $J$ et $G\theta$ sont employées uniquement pour des modes d'ouverture de fissure en cisaillement pur. Cette dernière observation est la conséquence du fait que ces deux intégrales permettent de déterminer un invariant aboutissant à l'état mécanique au voisinage de la fissure. Elles effectuent un calcul énergétique global indépendant de la mixité des modes de rupture.

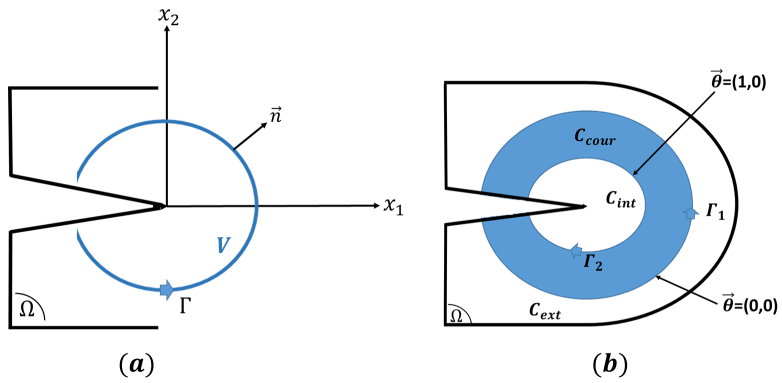



FIGURE 5.3 – Définition des paramètres autour de la pointe de fissure (a) et définition du champ $\theta$ (b).

## Integrales $M$ et $M\theta$

Pour permettre le découplage des modes de rupture (ou encore la séparation des modes mixte de rupture), une intégrale indépendante du domaine considéré a été proposée par Chen

et Shield [111]. Cette intégrale de contour appelée $M$ est donnée par l'expression suivante :

$$M = \frac{1}{2}\int_{\Gamma}\left[\sigma_{ij,1}^{(v)}.u_i - \sigma_{ij}^{(u)}.v_{i,1}\right]n_j d\Gamma \tag{5.9}$$

où $\sigma_{ij}^{(u)}$ et $\sigma_{ij}^{(v)}$ sont respectivement les expressions des champs de contraintes réelles et virtuelles qui proviennent de la méthode de Chen. Avec le mode mixte, la méthode de découplage des modes développée par Chen et Shield [111], basée sur la forme bilinéaire de l'énergie libre s'exprime de la manière suivante :

$$F(u,\nu) = \frac{1}{2}.\lambda.\delta_{ij}.u_{k,k}.v_{i,j} + \frac{1}{2}.\mu.(u_{i,j} + u_{j,i}).v_{i,j} \tag{5.10}$$

où $\lambda$ et $\mu$ désignent les coéfficients de Lamé, et où $u_i$ et $v_i$ sont les champs de déplacements réels et virtuels cinématiquement admissibles. Nous nous basons ici sur la loi de Hooke. Les expressions donnant les contraintes et les formes bilinéaires des tenseurs de déformations conduisent au produit tensoriel des formes réelles et virtuelles. Avec les lois de permutation indicielles, cela conduit à l'expression du potentiel $F$. L'équation 5.9, peut être généralisée à des symétries anisotropes avec bilinéarité. Cette bilinéarité peut être exprimée en termes de tenseur de déformation et de contrainte sous la forme suivante :

$$F(u,v) = \frac{1}{2}.\sigma_{ij}\left(u\right).\varepsilon_{ij}\left(v\right) = \frac{1}{2}.\sigma_{ij}\left(v\right).\varepsilon_{ij}\left(u\right) \tag{5.11}$$

Par analogie aux intégrales $J$ et $G\theta$, en tenant compte de l'intégrale $M$ définie sur un contour curviligne, Moutou Pitti [122] a défini une intégrale $M\theta$ sur un contour surfacique contenant la pointe de fissure. Cette integrale s'exprime pour des problèmes plans (2D) par la relation 5.12 :

$$M\theta = \frac{1}{2}\left[\sigma_{ij}^{(u)}.v_{i,k} - \sigma_{ij,k}^{(v)}.u_i\right].\theta_{k,j}dV \tag{5.12}$$

En nous référant aux expressions des champs mécaniques développées au chapitre 2, dans le cas des matériaux orthotropes comme le bois, les champs de déplacements virtuels $v$ sont donnés par les formes singulières de Sih [123], ceci pour chaque mode de rupture. Ces

expressions prennent les formes suivantes :

$$\begin{cases} v_1 = 2K_1^{\sigma}.\sqrt{\frac{r}{2.\pi}}.\Re e\left[\frac{1}{s_1-s_2}.\left(p_2.s_1.\sqrt{\rho_2} - p_1.s_2.\sqrt{\rho_1}\right)\right] \\ \quad +2.K_2^{\sigma}.\sqrt{\frac{r}{2.\pi}}.\Re e\left[\frac{1}{s_1-s_2}.\left(p_2.\sqrt{\rho_2} - p_1.\sqrt{\rho_1}\right)\right] \\ v_2 = 2K_1^{\sigma}.\sqrt{\frac{r}{2.\pi}}.\Re e\left[\frac{1}{s_1-s_2}.\left(q_2.s_1.\sqrt{\rho_2} - q_1.s_2.\sqrt{\rho_1}\right)\right] \\ \quad +2.K_2^{\sigma}.\sqrt{\frac{r}{2.\pi}}.\Re e\left[\frac{1}{s_1-s_2}.\left(q_2.\sqrt{\rho_2} - q_1.\sqrt{\rho_1}\right)\right] \end{cases} \tag{5.13}$$

avec :

$$\rho_j = cos(\theta) + i.s_j.sin(\theta) \quad avec \;\; j \in [1;2] \tag{5.14}$$

et

$$p_j = S_{11}.s_j^2 + S_{12} \quad et \quad q_j = \frac{S_{22}}{s_j} + S_{12} \tag{5.15}$$

Les termes $s_j$ désignent les racines du polynôme caractéristique suivant :

$$S_{11}.s_\beta^4 + (2.S_{12} + S_{33}).s_\beta^2 + S_{22} = 0 \tag{5.16}$$

Les expressions $S_{11}$, $S_{12}$, $S_{22}$ et $S_{33}$ sont les composantes du tenseur de rigidité pour une symétrie orthotrope. Les champs de déplacements réels sont identiques aux champs virtuels.

### 5.4.3 Interprétation physique de l'intégrale $M\theta$

Si nous considérons les champs de déplacements réels $u$ et virtuels $v$ cinématiquement admissibles, d'après Dubois [124], l'interprétation suivante peut être considérée :

$$M(u,u) = J = G \tag{5.17}$$

Le terme $M\theta$ est supposé être le potentiel d'énergie dissipé en pointe de fissure lors du pas d'avancement de celle-ci. Nous servant du principe de superposition défini par Moutou Pitti [122], l'intégrale $M\theta$ peut s'écrire sous la forme suivante :

$$M\theta(u,v) = C_1.\frac{{}^u\mathrm{K}_I.{}^v\mathrm{K}_I}{8} + C_2.\frac{{}^u\mathrm{K}_{II}.{}^v\mathrm{K}_{II}}{8} \tag{5.18}$$

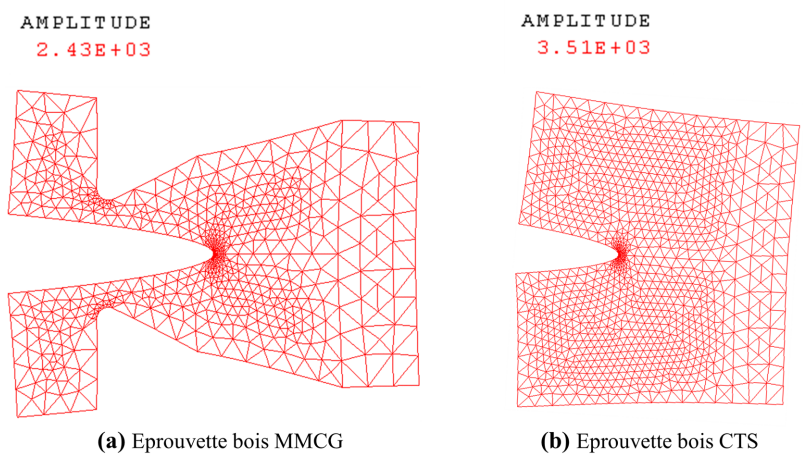
où $C_1$ et $C_2$ représentent, d'après Valentin [125], les complaisances reduites en mode 1 et en mode 2. Du fait des symétries orthotropes, ces valeurs prennent les valeurs suivantes :

$$C_1 = 4.\Re e\left[\frac{i\,(q_2.s_1 - q_1.s_2)}{s_1 - s_2}\right] \quad et \quad C_2 = 4.\Re e\left[\frac{i\,(p_2 - p_1)}{s_1 - s_2}\right] \tag{5.19}$$

Un découplage parfait des modes peut être obtenu en effectuant deux calculs distincts de l'intégrale $M\theta(u,v)$ pour obtenir les facteurs d'intensité de contraintes réels ${}^{u}\mathrm{K}_I$ et ${}^{u}\mathrm{K}_{II}$. Les valeurs des facteurs d'intensité de contraintes virtuelles ${}^{v}\mathrm{K}_I$ et ${}^{v}\mathrm{K}_{II}$ peuvent être choisies judicieusement, ceci en fonction des contraintes réelles, d'après Moutou Pitti [122], de la manière suivante :

$$ {}^{u}\mathrm{K}_I = 8.\frac{M\left({}^{\nu}\mathrm{K}_I = 1,\ {}^{\nu}\mathrm{K}_{II} = 0\right)}{C_1} \quad et \quad {}^{u}\mathrm{K}_{II} = 8.\frac{M\left({}^{\nu}\mathrm{K}_I = 0,\ {}^{\nu}\mathrm{K}_{II} = 1\right)}{C_2} \tag{5.20} $$

L'objectif ici est de faire travailler les contraintes réelles dans une configuration virtuelle afin de retrouver le mode voulu (mode 1 ou 2). Les figures 5.4 (a) et 5.4 (b) illustrent la visualisation du maillage des champs de déplacement virtuels respectivement avec l'éprouvette MMCG modifiée et CTS.




**(a)** Eprouvette bois MMCG **(b)** Eprouvette bois CTS

FIGURE 5.4 – Visualisation des déplacements virtuels : (a) avec une éprouvette MMCG et (b) éprouvette CTS.

### 5.4.4 Algorithme de résolution

Cette partie présente l'algorithme numérique de résolution implémenté dans le code aux éléments finis Cast3M. La procédure de résolution ici consiste en une séparation des modes (encore appelée découplage des modes) de rupture. La figure 5.5 présente la procédure utilisée pour calculer les champs de déplacements et les contraintes virtuelles, mais aussi le taux de restitution d'énergie pour les deux modes comme expliqué dans [122].

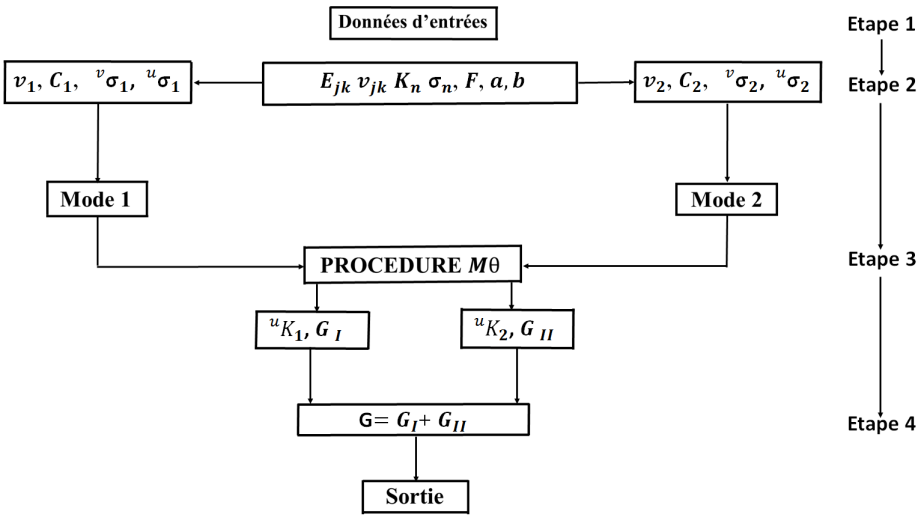



FIGURE 5.5 – Algorithme de fissuration numérique.

Nous devons admettre, pour expliquer l'algorithme de résolution, que les champs mécaniques sont connus à l'instant $t_{n-1}$, tout comme l'incrément de temps $\Delta t_n$. Les propriétés mécaniques des matériaux ont été calculées par la méthode de Guitard [107, 108]. Cette méthode a déjà été expliquée dans le paragraphe 5.1 de ce chapitre. Les différentes expressions et la procédure de résolution de cet algorithme sont les suivantes :

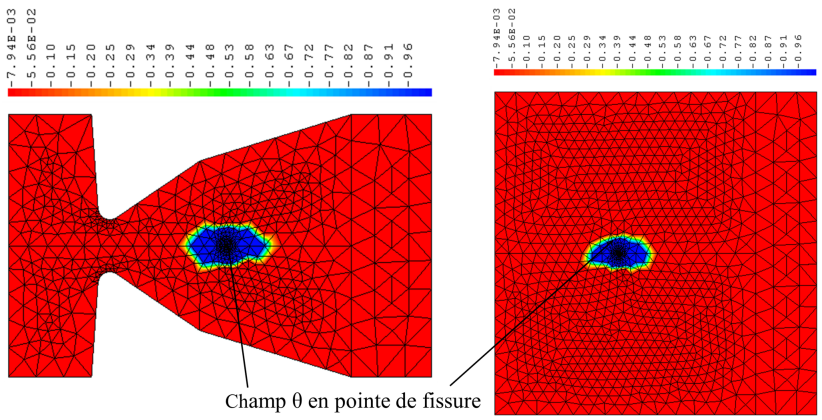
- étape 1 : étape au cours de laquelle sont introduites les données d'entrée telles que les constantes élastiques du matériau viscoélastique, la force appliquée, la longueur de fissure et l'épaisseur de l'éprouvette ;
- étape 2 : les déplacements virtuels $v_i$, voir expression 5.13, sont utilisés pour évaluer les les champs de contraintes réelles et virtuelles ${}^u\sigma_i$ et ${}^v\sigma_i$ ainsi que les complaisances $C_i$ ;
- étape 3 : la procédure $M\theta$ est utilisée pour calculer les facteurs d'intensité de contrainte ${}^uK_i$ et ${}^vK_i$ et les taux de restitution d'énergie $G_i$ ;
- étape 4 : le taux de restitution d'énergie final $G$ est obtenu en additionnant les différents taux de chaque mode $G_i$. Ce taux est calculé de la façon suivante :

$$G = G_I + G_{II} \tag{5.21}$$

avec $G_I$ et $G_{II}$ respectivement part du mode 1 et 2.

### 5.4.5 Procédure d'obtention du champ $\theta$

C'est une procédure qui a été développée par Suo [126] et reprise par Moutou Pitti [7] pour résoudre le problème du champ $\theta$ intégré dans le modèle éléments finis. D'après [7, 127], le champ $\theta$ est généré par une procédure dite $CH - THETA$. Cette procédure du champ $\theta$ a pour objectif de traiter des fissures rectilignes soumises soit à une translation, soit à une rotation pour simuler la progression de la fissure. Cette propagation de fissure représente les translations des nœuds du maillage parallèlement au plan de la fissure engendrant un accroissement unitaire de l'aire de celle-ci. Si l'accroissement de l'aire n'est pas unitaire, la procédure $CH - THETA$ effectue une normalisation du champ $\theta$. Les opérateurs permettant de construire le champ $\theta$ viennent de la boite à outils qui a été utilisée par Moutou Pitti et validé par plusieurs publications [7, 128, 129, 130]. Il faut noter que la procédure $CH - THETA$ construit en $2D$ un champ $\theta$ s'appuyant sur $(n+1)$ couches d'éléments autour de la pointe de fissure. Les figures 5.6 (a) et 5.6 (a) représentent le maillage rayonnant (champ $\theta$) en pointe de fissure respectivement les éprouvettes MMCG et CTS.




**(a)** Eprouvette bois MMCG **(b)** Eprouvette bois CTS

FIGURE 5.6 – Illustration du champ $\theta$ en pointe de fissure : (a) éprouvette MMCG et (b) éprouvette CTS.

### 5.4.6 Procédure $M\theta$

Cette procédure permet le découplage des modes de rupture. Dans le présent travail nous l'utilisons pour déterminer l'évolution du taux de restitution d'énergie $G_I$ en mode d'ouverture (mode 1), mais aussi les taux $G_I$ et $G_{II}$ en mode mixte. De façon à obtenir la procédure $M\theta$, nous utilisons deux principaux opérateurs $GRAD$ et $INTG$. Ces opérateurs ont des objectifs bien distincts :

- l'opérateur $GRAD$ permet de calculer aux nœuds de chaque élément le gradient des vecteurs déplacements, des champs de contraintes et du champ $\theta$. Il permet d'obtenir les valeurs des termes $u_{i,j}, v_{i,j}$ et $\theta_{k,j}$ ;

- l'opérateur $INTG$ permet de calculer l'intégrale de volume d'une composante d'un champ défini à chaque point d'intégration sur un domaine discrétisé prédéfini.

La procédure $M\theta$ est couplée avec une procédure de calcul des champs de déplacements et de contraintes virtuelles au moyen de la procédure $VIRT$ comme écrit dans [131].

## 5.5 Résultats numériques et analyse

### 5.5.1 Taux de restitution d'énergie

L'objectif de cette partie est de présenter et de comparer les résultats des différents taux de restitution d'énergie expérimentaux et numériques en mode d'ouverture de fissure ($\alpha$= $0^0$) et en mode mixte pour les angles $\alpha = 15^0, 30^0, 45^0$. Le taux de restitution d'énergie en mode 1 sera noté $G_I$. En mode 2, il sera désigné par $G_{II}$. $G_I(exp.)$ et $G_I(num.)$ représentent les valeurs obtenues en mode 1 expérimentalement et numériquement. Il en est de même pour le mode 2 ($G_{II}(exp.)$ et $G_{II}(num.)$). Les résultats de l'étude expérimentale ont été présentés aux chapitres 3 et 4. Pour l'étude numérique, en plus des caractéristiques mécaniques des matériaux calculés selon la méthode de Guitard, les forces et les longueurs de fissure obtenues aux chapitres 3 et 4 seront utilisées.

Les figures 5.7 (mode 1) et 5.8 (mode 2) comparent les valeurs expérimentales et numériques du taux de restitution d'énergie en fonction de la longueur de fissure des trois essences pour $b = 15\ mm$ et $\alpha = 15^0$. Nous remarquons que pour le mode 1, les valeurs obtenues numériquement sont légèrement supérieures aux valeurs expérimentales. Par contre pour le mode 2, les valeurs obtenues expérimentalement sont supérieures à celles obtenues numériquement. En observant l'allure des différentes courbes nous remarquons qu'elles sont plus rapprochées proche de la rupture qu'en début de propagation de fissure, excepté dans le cas d'iroko en mode 1.

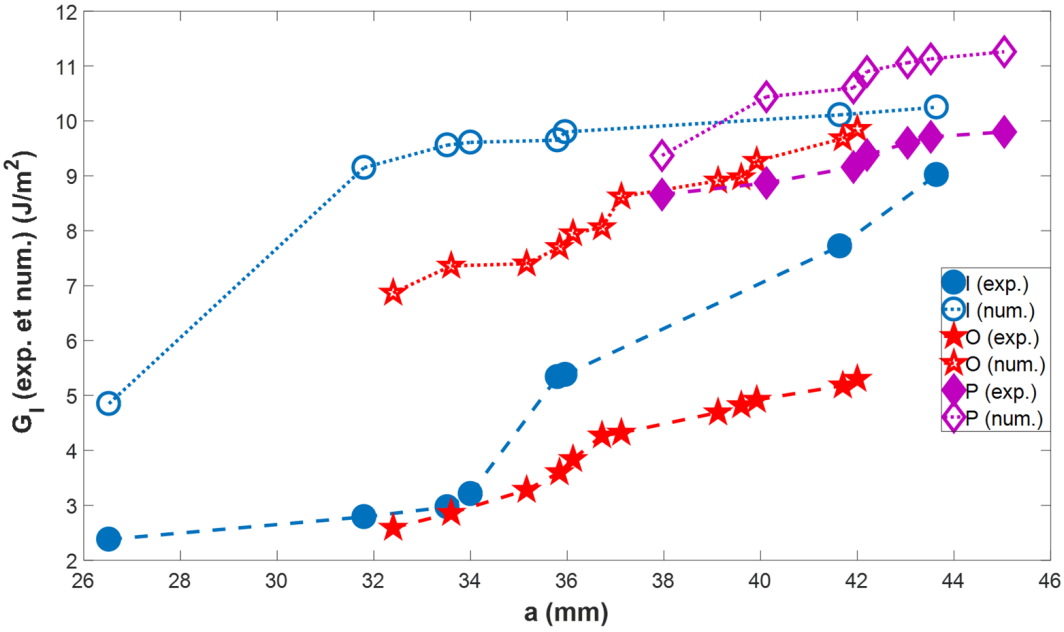



FIGURE 5.7 – Comparaison des courbes expérimentales numériques des trois essences (mode 1 pour b=15 $mm$ et $\alpha = 15^0$.

La figure 5.9 représente les courbes de l'évolution du rapport $G_I/G_{II}$ en fonction de la longueur de la fissure d'okoumé. Ces différentes valeurs sont obtenues expérimentalement et numériquement pour les éprouvettes $b = 15\ mm$ et pour $\alpha = 30^0$. Nous remarquons que ce rapport obtenu avec les valeurs expérimentales évolue d'une manière constante, tandis que pour le calcul numérique il évolue d'une manière décroissante en début de propagation avant de devenir constant vers la rupture (voir figure 5.9. Nous constatons aussi que les valeurs de

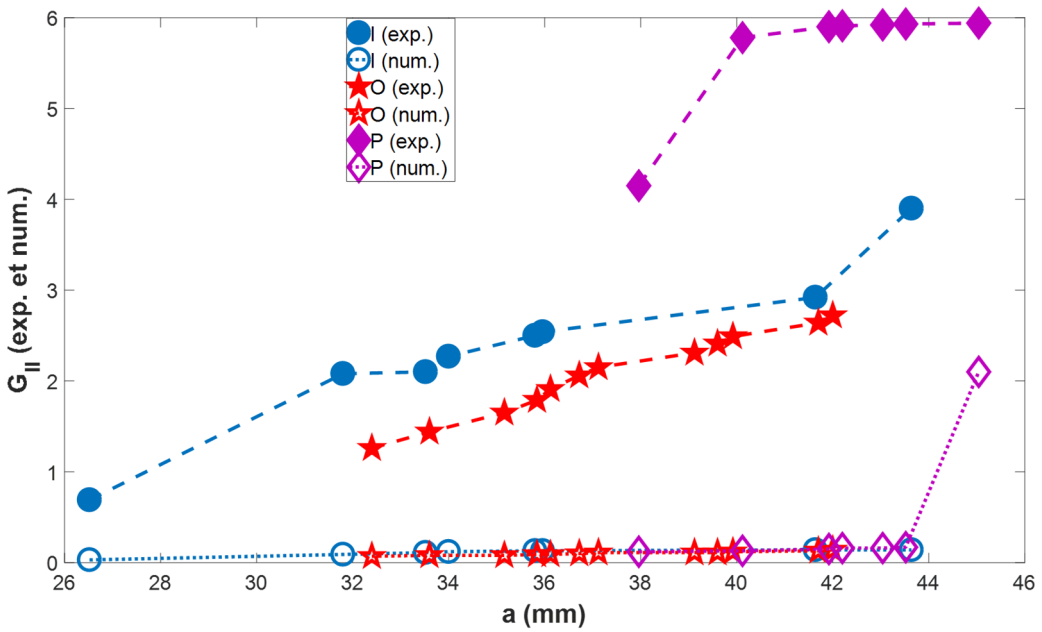



FIGURE 5.8 – Comparaison des courbes expérimentales numériques des trois essences (mode 2 pour b=15 $mm$ et $\alpha$ =15$^0$.

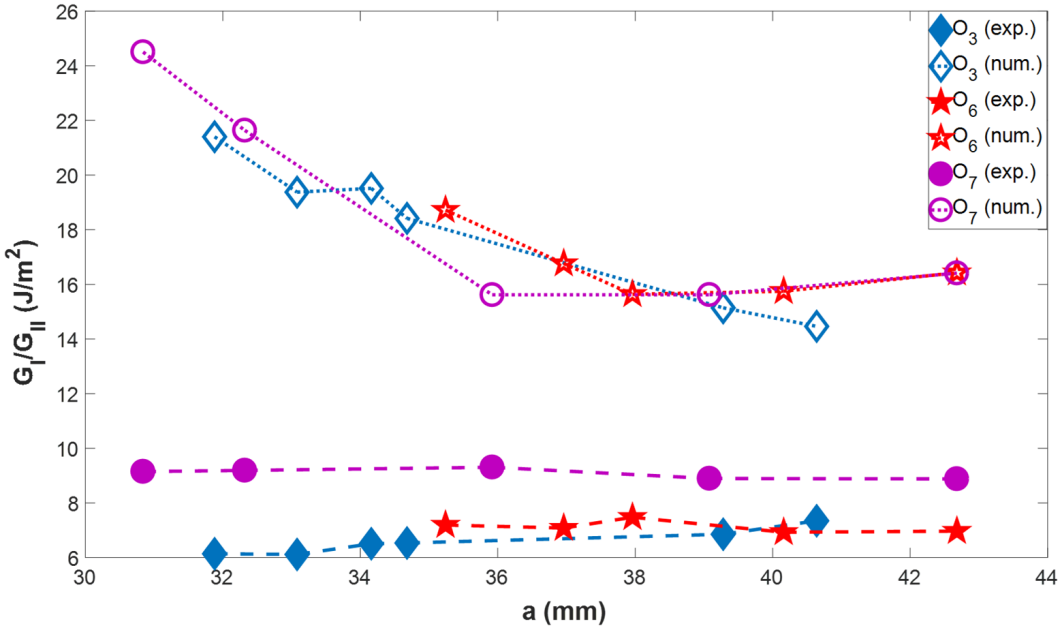



FIGURE 5.9 – Courbes de l'évolution du rapport $G_I/G_{II}$ : valeurs expérimentales et numériques des deux modes pour b=15 $mm$ et $\alpha$ =30$^0$. Avec $O_i$ nom et numéro de l'éprouvette (O=okoumé, i=3, 6 et 7 numéros des éprouvettes testées).

ce rapport obtenues numériquement sont toutes supérieures à celles obtenues expérimentalement.

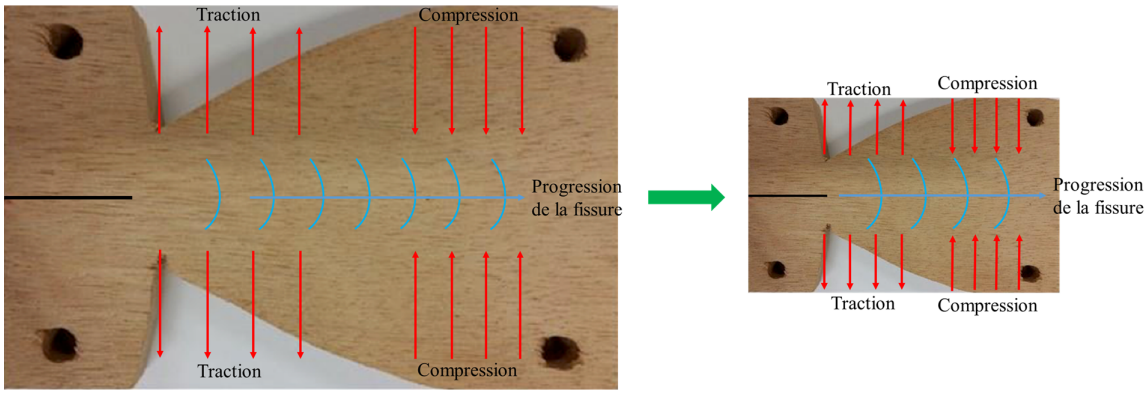
Les résultats obtenus (voir figures 5.7, 5.7 et tableaux 5, 6, 7 et 8 de l'annexe C) montrent globalement que la différence entre les valeurs expérimentale et numérique n'est pas très grande (un écart d'environ 10%). Cependant nous constatons que les valeurs numériques sont légèrement supérieures aux valeurs expérimentales, ceci pour le mode 1. Nous voyons par contre que cette tendance s'inverse lorsqu'il s'agit du mode 2, pour lequel les valeurs expérimentales deviennent légèrement supérieures à celles obtenues numériquement. La tendance des valeurs de l'évolution du taux de restitution d'énergie en fonction de la longueur de fissure est la même et sont d'un même ordre de grandeur. Les valeurs issues de la part du mode 2 sont largement inférieures à celle de la part du mode 1. Nous constatons que les valeurs expérimentales et numériques sont plus proches en mode 1 qu'en mode 2. Cependant, nous trouvons que les valeurs des résultats obtenues numériquement sont en accord avec celles obtenues expérimentalement. La petite différence que l'on peut observer entre les résultats expérimentaux et numériques peut provenir de :

- la non prise en compte de l'orientation des cernes lors de la propagation de fissure pour les calculs numériques ;
- la considération des calculs numériques dans le plan alors qu'en réalité il aurait fallu faire un calcul tridimensionnel ;
- la non-prise en compte des effets d'orthotropie ;
- l'approximation des caractéristiques mécaniques utilisées pour les différents calculs numériques qui ont été obtenues par une méthode de calcul et non par des essais sur les matériaux effectivement testés.

Les résultats supplémentaires sont dans les différents tableaux à l'annexe C. Le tableau 5 présente les valeurs obtenues avec les éprouvettes CTS pour $b = 20\ mm$ d'okoumé et de padouk. Les résultats obtenus avec les éprouvettes MMCG sont présentés dans les tableaux 6, 7 et 8 respectivement pour les essences d'iroko, d'okoumé et du padouk.

### 5.5.2 Réduction de l'éprouvette MMCG

La figure 5.10 (a) présente l'éprouvette MMCG d'origine et la figure 5.10 (b) l'éprouvette MMCG modifiée. Les raisons de la modification de l'éprouvette ont déjà été données aux chapitres antérieurs. Pendant les essais, la pointe de la fissure lors de sa propagation est soumise à une traction et loin de cette fissure l'éprouvette est soumise à la compression. Nous nous rendons compte qu'en réduisant de moitié les dimensions de cette éprouvette, nous avons aussi réduit la plage de propagation de la fissure. Sur les figures 5.7 et 5.8 la plage de propagation de fissure est d'environ 20 $mm$, tandis qu'avec l'éprouvette d'origine cette plage de propagation pouvait aller à plus de 30 $mm$ [7]. La diminution de la plage de propagation fait en sorte que nous restons toujours dans la partie évolutive (croissance) du taux de restitution d'énergie avec la petite éprouvette modifiée. Ce qui revient à dire que nous n'atteignons jamais la zone de stabilité observée avec la grande éprouvette. C'est ce qui justifie dans tout le manuscrit les valeurs toujours croissantes de $G$.




**(a) Eprouvette MMCG** **(b) Eprouvette MMCG modifiée**

FIGURE 5.10 – Eprouvette MMCG : (a) éprouvette bois MMCG et (b) éprouvette bois MMCG modifiée.

### 5.5.3 Plage de propagation des éprouvettes CTS et MMCG

L'objectif ici est de montrer que la plage de propagation de fissure observée sur l'éprouvette CTS reste inférieure à celle obtenue avec l'éprouvette MMCG. Dans cette partie, les

éprouvettes munies au préalable d'une fissure initiale de 28 $mm$ pour les CTS et de 22 $mm$ pour les MMCG sont comparées. Les résultats présentent les valeurs des différents taux de restitution d'énergie critique en fonction de la longueur de fissure obtenus expérimentalement et numériquement. Les valeurs donnant les plages de propagation des éprouvettes montrent que les MMCG propagent plus que les éprouvettes CTS. En effet, les résultats obtenus avec des éprouvettes pour $b = 20$ $mm$ ont été présentés au chapitre 3 et ont montré que les plages de propagation des éprouvettes MMCG pouvaient aller à plus de 20 $mm$. La figure 5.11 montre un exemple qui présente une éprouvette CTS et une éprouvette MMCG, illustrant parfaitement ce constat. Nous voyons que pour l'éprouvette CTS la plage de propagation est d'environ 3 $mm$ tandis que pour l'éprouvette MMCG cette plage est d'environ 8 $mm$. Ceci montre bien que l'éprouvette MMCG a été conçue pour obtenir une bonne plage de propagation, mais aussi une stabilité de la fissure.

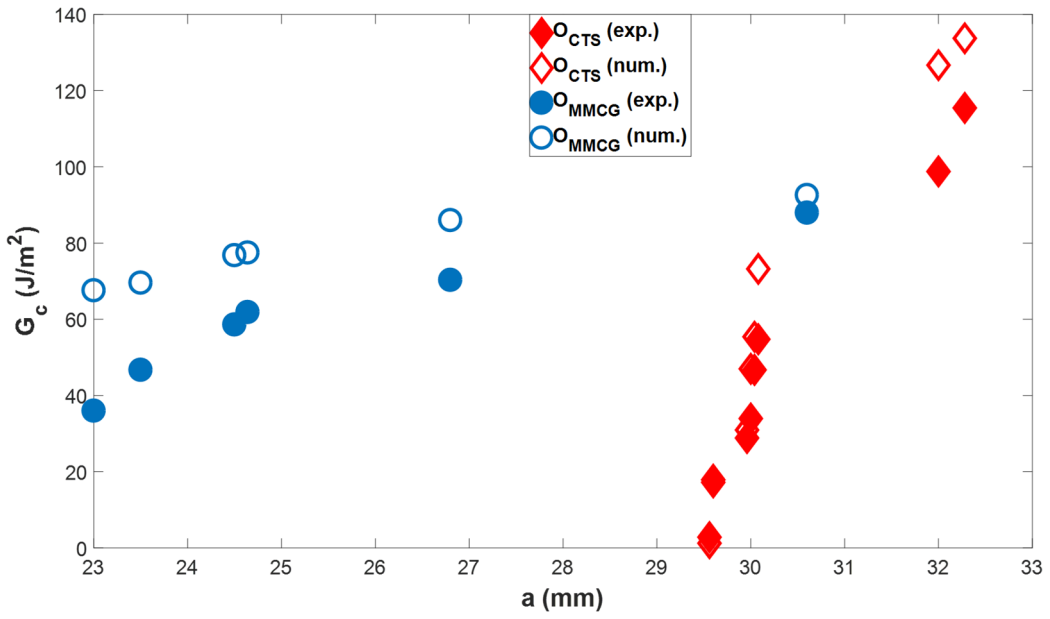



FIGURE 5.11 – Plage de propagation en mode d'ouverture ($\alpha$=$0^0$) des éprouvettes MMCG et CTS pour les éprouvettes de $b$=20 $mm$.

## 5.6 Conclusion

L'objectif de ce chapitre était de calculer numériquement les paramètres de rupture et de comparer les résultats ainsi obtenus avec les résultats expérimentaux obtenus dans les chapitres précédents. Pour ce faire, un algorithme de résolution numérique sous Cast3M pour prédire l'évolution de la fissure et permettre de calculer numériquement l'évolution du taux de restitution d'énergie des trois essences d'iroko, d'okoumé et du padouk a été utilisé. Les paramètres mécaniques des trois essences ont été calculés par les différentes formules de Guitard rappelées aux préalables. Pour permettre la comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux, la force et la longueur de fissure obtenues dans la partie expérimentale aux chapitres 3 et 4 sont utilisées dans ce chapitre. Les différents taux de restitution d'énergie ont été calculés et les résultats ont été donnés en fonction de la longueur de fissure. Ces résultats numériques obtenus, consignés dans les différents tableaux, sont similaires aux valeurs expérimentales.

# Conclusions générales et perspectives

## Conclusion

Ce travail avait pour objectif d'étudier les paramètres de rupture de trois essences tropicales issues de la forêt gabonaise à savoir *Milicia excelsa* (iroko), l' *Aucoumea klaineana Pierre* (okoumé) et le *Pterocarpus soyauxii* (padouk). Les éprouvettes bois solidaires du système Arcan en acier spécialement conçu pour cette étude ont été montées sur une machine d'essai traction-compression.

Les principaux constituants du matériau bois sur les plans microscopique et macroscopique ont d'abord été rappelés, et les formules de la mécanique de la rupture linéaire énoncées. Une revue bibliographique sur les éprouvettes utilisées en mécanique sur les essences tempérées a permis de rappeler un certain nombre d'entre elles. La méthode de la grille a été utilisée pour suivre l'avancée et l'ouverture de la fissure. Une description succincte du principe de la méthode de la grille a été donnée et l'origine des erreurs éventuelles a été estimée.

Les études ont ensuite été menées en mode d'ouverture (mode 1) sur les éprouvettes CTS et MMCG modifiées pour plusieurs épaisseurs. La méthode de la grille a été utilisée dans toute l'étude. Les cartes typiques de déplacements et de déformations ont été traitées avec cette méthode. La méthode de la complaisance a été utilisée afin de calculer le taux de restitution d'énergie critique de chaque éprouvette. Les résultats obtenus ont montré que le taux de restitution d'énergie critique augmente lorsque la densité augmente à la fois dans les processus de fissure stationnaire et de croissance de fissure. Ces résultats ont aussi permis de montrer que l'épaisseur de l'éprouvette a une influence sur la fissuration. Il ressort aussi que les résultats obtenus sont proportionnels à la densité de ces essences. Les valeurs moyennes de $G_{ic}$

et $G_{mc}$ pour les trois espèces testées (okoumé, iroko, padouk) ont été comparées à celles des essences tempérées données par la littérature (épicéa, pin, chêne) avec la même densité et les mêmes conditions expérimentales. La comparaison a montré que les résultats obtenus sont similaires.

Des études ont ensuite été menées en mode mixte pour les angles de mixité $\alpha$=$15^0$, $30^0$ et $45^0$, toujours avec les mêmes essences et pour différentes épaisseurs. La même méthodologie qu'en mode d'ouverture a été adoptée. Après découplage des modes (séparation des modes 1 et 2), le calcul des différents taux de restitution d'énergie calculés a montré une prédominance du mode 1 sur le mode 2. Les conclusions obtenues ont confirmé les tendances observées en mode d'ouverture. Les valeurs minimales du taux de restitution d'énergie $G_{ic}$ ont été calculées et comparées pour les trois essences, et le rapport de $G_I/G_{II}$ en fonction de la longueur de fissure a été donné pour l'okoumé. Ce rapport montre une évolution constante, ce qui laisse à penser que les valeurs caractérisant la fissuration obtenue sont des valeurs intrinsèques aux matériaux étudiés.

Enfin une partie a été dédiée à des études numériques conduites avec le logiciel d'éléments finis Cast3M. La méthode énergétique introduite par l'intégrale M$\theta$ qui permet de découpler les modes de rupture a été utilisée, un champ $\theta$ entraînant un domaine surfacique en pointe de fissure a été utilisé. Etant donné que le calcul a été effectué en contraintes planes, l'impact de l'épaisseur n'a donc pu être vérifié dans le cas du calcul numérique. Globalement les résultats numériques ont montré une similitude avec les résultats expérimentaux, confortant par la même occasion que la méthode de la grille était fiable pour ce genres d'études.

## Perspectives

En perspective, plusieurs pistes sont à envisager, notamment effectuer les essais avec l'éprouvette MMCG d'origine, cela permettra de voir si nous obtenons une zone de stabilité avec ces essences tropicales. Il serait aussi intéressant de conduire des essais avec les éprouvettes CTS pour différentes épaisseurs comprises entre 12.5 et 20 $mm$. L'objectif serait alors d'identifier l'épaisseur à partir de laquelle le début de propagation appréciable est observable,

autrement dit voir à partir de quelle épaisseur on passe d'une éprouvette avec rupture instantanée à une éprouvette avec propagation de fissure.

Ensuite d'autres études pourraient être menées sur une éprouvette MMCG usinée suivant les autres directions préférentielles du bois (LT et LR). En même temps il faudrait étendre la présente étude à d'autres essences tropicales en se référant notamment à la base de données du CIRAD.

Il serait aussi très intéressant de conduire les essais en humidité variable, dans une chambre climatique, de sorte que nous puissions voir l'effet de la température, mais aussi de d'humidité sur les caractéristiques des essences tropicales. L'objectif visé serait de nous mettre dans les mêmes conditions de température et d'humidité que celles du Gabon, où la température varie entre $20^0$ et $34^0$ C et où l'humidité qui règne est de plus de 80%.

Les essais de fluage sur les éprouvettes pré-fissurés en environnement variable pourraient aussi être réalisés afin de prendre en compte le comportement en service de ces essences tropicales, notamment dans leur environnement immédiat.

Lors de chargements complexes la fissure peut subir une bifurcation. Une analyse de ce processus pourrait aussi être conduite afin d'analyser et de prendre en compte cette propagation aléatoire.

Enfin, une étude numérique en 3D peut être conduite afin d'évaluer numériquement l'impact de l'épaisseur sur les processus de fissuration observé dans le cas expérimental. La thèse menée en parallèle sur la fissuration en 3D par [132] peut servir de support.

# Bibliographie


[1] B. Thibaut. Origine biologique et phisico-chimique de la diversité des bois. Cours de l'École Thematique Pluribois. Organisé par le CNRS Egletons 18-22, Mai 2015. 15, 34, 35, 44

[2] M. Seddik. *Modélisation des structures en bois en environnement variable*. PhD thesis, Thèse de Doctorat, Université de Limoges, 26 Septembre, 2006. 15, 37, 38, 47

[3] D. Grosser. *Die Holzer Mitteleuropas. Ein mikrophotographischer Lehratlas*, page 208. Berlin-New York-Heidelberg-Tokyo, 1977. 15, 41

[4] M. Meite. *Caractérisation des paramètres de fissuration par un couplage corrélation d'images et éléments finis*. PhD thesis, Limoges, 2012. 15, 68, 69

[5] F. Dubois. *Modélisation du comportement mécanique des milieux viscoélastiques fissurés : Application au matériau bois*. PhD thesis, 1997. 15, 70

[6] G. Valentin and P. Caumes. Crack propagation in mixed mode in wood : a new specimen. *Wood Science and Technology*, 23(1) :43–53, 1989. 15, 29, 30, 67, 70

[7] R. Moutou Pitti. *Découplage des modes mixtes de rupture dans les matériaux viscoélastiques orthotropes ; modélisation et expérimentation,*. PhD thesis, Université de Limoges, 2008. http ://www.unilmi.fr/theses/2008/sciences/2008limo4025/notice.htm. 15, 67, 71, 166, 172, 177

[8] S. Ma. *Propagation de fissure en mode mixte dans un milieu élasto-plastique avec prise*

*en compte des contraintes résiduelles.* PhD thesis, Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II, 2005. 16, 75

[9] A. Zeghloul. Concepts fondamentaux de la mécanique de la Rupture. Cours de DEA Mécanique-Matériaux-Procédés., 2003-2004. 16, 80, 82

[10] C Badulescu. *Calcul précis des déformations planes par la méthode de la grille. Application à l'étude dun multicristal daluminium.* PhD thesis, Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II., 2010. 16, 87

[11] B. Odounga, R. Moutou Pitti, E. Toussaint, and M. Grédiac. Mode I fracture of tropical woods using grid method. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 95 :1–17, 2018. 16, 29, 30, 103

[12] "EN NF DTU 31.1". Filière Bois Construction - Emploi du bois dans la construction - Classification, propriétés, durabilité et calcul des structures en bois, Octobre 2010. 21, 51, 52

[13] CIRAD. Agricultural research for development (1998) tropical specie reports. tropix 7-c, 1998–2011. 21, 62, 63, 99

[14] M. C. Gabon. Gabon économie. l'informatrion économique en temps réel. http ://www.gaboneconomie.net/ge/index.php/agriculture/environement/item/2357-secteur-forestier-la-foret-gabonaise-represente-88-97-du-territoire-national, 2010. 27

[15] M. Grédiac, F. Sur, and B. Blaysat. The grid method for in-plane displacement and strain measurement : A review and analysis. *Strain*, 52(3) :205–243, 2016. 28, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 102, 103

[16] F. Mambi-el Sendegele. règles–normes. *Innovations*, (1) :133–158, 2001. 33

[17] C. Hazard, J.P. Barette, and J. Mayer. *Mémotech Bois et matériaux associés.* 2013. 42

[18] J. Grill. Cours de DEA, Mécanique des matériaux et des milieux complexes, des structures et des systèmes Option I+II, Université de Montpellier II, 2003. 45

[19] T.A.C.M. Van der Put. A new fracture mechanics theory for orthotropic materials like wood. *Engineering Fracture Mechanics*, 74(5) :771 – 781, 2007. 46

[20] P. Bonneau. *Modélisations du séchage d'un matériau hétérogène : application à un bois de résineux.* PhD thesis, Bordeaux 1, 1991. 47

[21] A. Ylinen. The influence of latewood ratio and density on strength and elastic properties of softwood. *Acta forestalia fennica*, 50 :5–30, 1942. 49

[22] M. Moutee. Modélisation du comportement mécanique du bois au cours du séchage. *These doctorat, Université Laval, Québec, Canada*, 2006. 49

[23] J. Bodig and B. A. Jayne. Mechanics of wood and wood composites 1982. 49

[24] Larousse, 2016. 50

[25] J. Petitpas. *Technologie comparée des industries du bois.* 1948. 51

[26] R. Wagenfuhr, C. Scheiber Holzatlas, and W. Atlas. Veb fachbuchverlag, 1974. 52

[27] M. Roger Rowell. The chemistry of solid wood. *US Department of Agriculture*, 1984. 52

[28] J. Ralph. An unusual lignin from kenaf. *Journal of natural products*, 59(4) :341–342, 1996. 52

[29] A. Sosanwo Olumide, A. H. Fawcett, and D. Apperley. 13C CP–MAS NMR spectra of tropical hardwoods. *Polymer international*, 36(3) :247–259, 1995. 52

[30] ATIBT. Association Internationales Techniques des bois tropicaux. *Atlas des bois tropicaux.*, volume Tome 1-Afrique. 1986. 52

[31] Rapport de l'OIBT. Analyse préliminaire de l'industrie forestière dans le bassin du congo. Actualité des Forêts Tropicales 12(4), 2004. 52

[32] Savard et al. Wood Chemistry Ultrastructure Reactivity. Fengel D., Wegner E. Eds W. De Gruyter. Berlin. Number 58. 1960. 52

[33] N. Parameswaran. Zur Kristallinität der Cellulose in Rinde und Holz einiger tropischer Baumarten. *Holzforschung-International Journal of the Biology, Chemistry, Physics and Technology of Wood*, 27(5) :151–153, 1973. 53

[34] D. Vitiello. *Importance des glycoconjugues périphériques dans la différenciation myogenique Role particulier de l'(06072,6) sialylation.* PhD thesis, Univesité de Bordeaux I, 1983. 53

[35] G.-Y. Liang, A. L. Gray, and P. G. Waterman. Tirucallane and oleanane triterpenes from the resin of aucoumea klaineana. *Phytochemistry*, 27(7) :2283–2286, 1988. 53

[36] E. H. Bakraji, N. Salman, and I. Othman. Radiation-induced polymerization of acrylamide within okoume (aucoumea klaineana pierre). *Radiation Physics and Chemistry*, 64(4) :277–281, 2002. 53

[37] R. Safou-Tchiama. *Caracterisation physico-chimique stabilité supramoléculaire et réactivité chimique de quelques essences tropicales.* PhD thesis, Bordeaux 1, 2005. 53

[38] R. C. Sun, J. M. Fang, J. Tomkinson, and C. Hill. Wood chem. and technol. volume 19(4), pages 287–306. 1999. 53

[39] L. M. Comte. *Rythmes de croissance et structures spatiales periodiques d'arbres tropicaux : exemple de cinq espèces de forêt equatoriale.* PhD thesis, Université Montpellier II-Sciences et techniques du Languedoc, 1993. 53

[40] C. Edelin. Aspects morphologiques de la croissance rythmique chez les arbres tropicaux. *Compte Rendu du Séminaire du groupe dEtude de lArbre : le rythme de croissance, base de lorganisation temporelle de larbre. Angers*, pages 25–26, 1993. 53

[41] C. Loup. *Essai sur le déterminisme de la variabilité architecturale des arbres- le cas de quelques espèces tropicales.* PhD thesis, 1994. 53

[42] P. Détienne. Appearance and periodicity of growth rings in some tropical woods. *IAWA Journal*, 10(2) :123–132, 1989. 53

[43] C. Coster. *Zur anatomie und physiologie der zuwachszonen-und jahresringbildung in den tropen*. PhD thesis, Brill, 1927. 54

[44] P. de T Alvim. Tree growth periodicity in tropical climates, 1964. 54

[45] A. Fahn, J. Burley, K.A. Longman, A. Mariaux, and P.B. Tomlinson. Possible contributions of wood anatomy to the determination of the age of tropical trees. *Age and growth rate of tropical trees : new directions for research Bull. School For., Yale Univ*, 94 :31–54, 1981. 54

[46] P. Détienne, F. Oyono, L. D. de MADRON, B. Demarquez, and R. Nasi. L'analyse de cernes : applications aux études de croissance de quelques essences en peuplements naturels de forêt dense africaine. 1998. 54

[47] M. Tsalefac, F. Hiol Hiol, G. Mahé, A. Laraque, D. J. Sonwa, P. Scholte, W. Pokam, A. Haensler, T. Beyene, F. Ludwig, et al. Climat de l'Afrique centrale : passé, présent et futur. 2015. 57

[48] M. Fuhr, R. Nasi, and J. M. Minkoué. Les peuplements d'okoumés éclaircis au gabon. *Bois et Forêts des Tropiques*, (256) :5–20, 1998. 58

[49] A. A. Griffith. The phenomena of rupture and flow in solids. *Philosophical transactions of the royal society of london. Series A, containing papers of a mathematical or physical character*, 221 :163–198, 1921. 66

[50] H. Westergaard. Bearing pressures and cra ; c] ;< si. *Journal of applied mechanics*, 18, 1939. 66

[51] G. R. Irwin. Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate. *Spie Milestone series MS*, 137(167-170) :16, 1997. 66

[52] G. C. Sih and E. P. Chen. *Crack in composite materials*, volume 6. Springer, 1981. 66, 75, 76, 77, 78

[53] C. L. Chow and C. W. Woo. Orthotropic and mixed mode fracture in wood. In *Proceedings of the 1st international conference of wood fracture. Vancouver*, pages 39–52, 1979. 67, 68

[54] F. Dubois, C. Chazal, and C. Petit. Viscoelastic crack growth process in wood timbers : an approach by the finite element method for mode i fracture. *International journal of fracture*, 113(4) :367–388, 2002. 67, 69

[55] H. A. Richard. A new compact shear specimen. *International Journal of Fracture*, 17(5) :R105–R107, 1981. 67, 70

[56] E. K. Tschegg. New equipments for fracture tests on concrete. *Materialprüfung*, 33(11/12) :338–342, 1991. 67, 71

[57] M. Meite, F. Dubois, O. Pop, and J. Absi. Mixed mode fracture properties characterization for wood by digital images correlation and finite element method coupling. *Engineering Fracture Mechanics*, 105 :86–100, 2013. 67, 72

[58] M. F. Kanninen. A dynamic analysis of unstable crack propagation and arrest in the dcb test specimen. *International Journal of Fracture*, 10(3) :415–430, 1974. 69

[59] J. Fineberg, S. P. Gross, M. Marder, and H. L. Swinney. Instability in dynamic fracture. *Physical Review Letters*, 67(4) :457, 1991. 69

[60] K. Uenishi and H. P. Rossmanith. Stability of dynamically propagating cracks in brittle materials. *Acta mechanica*, 156(3) :179–192, 2002. 69

[61] M. Diakhate, E. Bastidas-Arteaga, R. Pitti Moutou, and F. Schoefs. Cluster analysis of acoustic emission activity within wood material : towards a real-time monitoring of crack tip propagation. *Engineering Fracture Mechanics*, 2017. 69

[62] G. H. Valentin and P. Morlier. Toughness of timber : experimental determination of K1c, Knc and Jc. *5th Intern. Conf. Fract.*, page Paper 249, 1981. 69

[63] P. F. Luo and F. C. Huang. An experimental study on the mixed-mode crack tip deformation fields in polymethyl methacrylate. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 38(4) :313–328, 2003. 70

[64] X. B. Zhang, S. Ma, N. Recho, and J. Li. Bifurcation and propagation of a mixed-mode crack in a ductile material. *Engineering fracture mechanics*, 73(13) :1925–1939, 2006. 70

[65] P. Caumes. *Rupture d'un matériau anisotrope en conditions polymodales (le bois)*. PhD thesis, Bordeaux 1, 1987. 70

[66] R. Moutou Pitti, F. Dubois, and O. Pop. A proposed mixed-mode fracture specimen for wood under creep loadings. *International journal of fracture*, 167(2) :195–209, 2011. 71, 95

[67] S. E. Stanzl-Tschegg, D.-M. Tan, and E. K. Tschegg. New splitting method for wood fracture characterization. *Wood science and Technology*, 29(1) :31–50, 1995. 71

[68] C. B. C. Rodriguez and F. J. Belzunce. Crack size dependence of the ductile fracture behaviour of a high strength steel. In *ECF11*, Poitiers, 1996. 72

[69] O. Akourri, M. Louah, A. Kifani, G. Gilgert, and G. Pluvinage. The effect of notch radius on fracture toughness jic. *Engineering Fracture Mechanics*, 65(4) :491 – 505, 2000. 72

[70] A. Bansal and M. Kumosa. Analysis of double edge-cracked iosipescu specimens under biaxial loads. *Engineering Fracture Mechanics*, 59(1) :89 – 100, 1998. 72

[71] G. Valentin and P. Caumes. Crack propagation in mixed mode in wood : a new specimen. *Wood Science and Technology*, 23(1) :43–53, Feb 1989. 72

[72] J. M. Q. Oliveira, M. F. S. F. de Moura, M. A. L. Silva, and J. J. L. Morais. Numerical analysis of the MMB test for mixed-mode I/II wood fracture. *Composites Science and Technology*, 67(9) :1764 – 1771, 2007. 73

[73] R. Moutou Pitti, F. Dubois, and O. Pop. A proposed mixed-mode fracture specimen for wood under creep loadings. *International Journal of Fracture*, 167(2) :195–209, Feb 2011. 73, 155

[74] H. Yoshihara. Initiation and propagation fracture toughness of solid wood under the mixed Mode I/II condition examined by mixed-mode bending test. *Engineering Fracture Mechanics*, 104(Complete) :1–15, 2013. 73, 152

[75] L. O. Jernkvist. Fracture of wood under mixed mode loading : I. derivation of fracture criteria. *Engineering Fracture Mechanics*, 68(5) :549–563, 2001. 73

[76] A. R. Gowhari Anaraki and M. Fakoor. General mixed mode I/II fracture criterion for wood considering T-stress effects. *Materials & Design*, 31(9) :4461 – 4469, 2010. 73

[77] J. Lemaitre and J. L. Chaboche. Mécanique des matériaux solides, 1985. *Dunod, Paris*. 75

[78] A. Zeghloul. Concepts fondamentaux de la mécanique de la rupture. Cours de Master Matériaux, Mécanique, Structures, Procédés. Mention Science pour l'Ingnieur, 2015–2016. http ://www.lem3.univ-lorraine.fr/mmsp/cours/Poly76, 77

[79] M. Grédiac and F. Hild, editors. *Full-field measurements and identification in solid mechanics*. Wiley, novembre 2012. ISBN : 9781848212947, 496 pages. 84

[80] W. H. Peters and W. F. Ranson. Digital imaging techniques in experimental stress analysis. *Optical engineering*, 21(3) :213427–213427, 1982. 85

[81] M. A. Sutton and J. Anderson. Application of digital correlation methods to rigid body mechanics. *Optical Engineering*, 22(6) :738–742, 1983. 85

[82] M. A. Sutton, W.J. Wolters, W.H. Peters, W.F. Ranson, and S.R. McNeill. Determination of displacements using an improved digital correlation method. *Image and vision computing*, 1(3) :133–139, 1983. 85

[83] F. Hild. Mesure de champs de déplacement par corrélation d'images et applications en mécanique des solides. 2004. https ://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00002906. 85

[84] J. L. Pensier and F. Hild. Principe de la corrélation d'imagesnumériques. http ://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr.sti/files/ressources/pedagogiques/5561/55 principe-de-la-correlation-dimages-numeriques-ens.pdf, Janvier 2004. 85

[85] M. Grédiac, B. Blaysat, and F. Sur. "A critical comparison of some metrological parameters characterizing local digital image correlation and grid method". *Experimental Mechanics*, pages 1–33, 2017. 86, 91

[86] R. Moutou Pitti, C. Badulescu, and M. Grédiac. Characterization of a cracked specimen with full-field measurements : direct determination of the crack tip and energy release rate calculation. *International Journal of Fracture*, 187(1) :109–121, 2014. 86

[87] J.-L. Piro and M. Grédiac. Producing and transferring low-spatial-frequency grids for measuring displacement fields with moiré and grid methods. *Experimental Techniques*, 28(4) :23–26, 2004. 86, 102

[88] C. Badulescu, M. Grédiac, and J. D. Mathias. Investigation of the grid method for accurate in-plane strain measurement. *Measurement Science and Technology*, 20(9) :095102, 2009. 87

[89] F. Sur and M. Grédiac. Influence of the analysis window on the metrological performance of the grid method. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, 56(3) :472–498, 2016. 88

[90] F. Sur and M. Grédiac. Towards deconvolution to enhance the grid method for in-plane strain measurement. *Inverse Problems and Imaging*, 8(1) :259–291, 2014. 90, 91, 108

[91] H. W. Schreier and M. A. Sutton. Systematic errors in digital image correlation due to undermatched subset shape functions. *Experimental Mechanics*, 42(3) :303–310, 2002. 91

[92] M. Grédiac and F. Sur. Effect of sensor noise on the resolution and spatial resolution of the displacement and strain maps obtained with the grid method. *Strain*, 50(1) :1–27, 2014. 91

[93] S. Merakeb. *Modélisation des structures en bois en environnement variable*. PhD thesis, Université de Limoges, 46, 2006. 100

[94] EN Standard. Profils en acier hle - profilage froid, outillage et galets de profilage .., 1995. 101

[95] F. Sur and M. Grédiac. On noise reduction in strain maps obtained with the grid method by averaging images affected by vibrations. *Optics and Lasers in Engineering*, 66 :210–222, 2015. 103

[96] Internet. http ://www.thegridmethod.net, 2016. 103

[97] M. Grédiac, F. Sur, and B. Blaysat. The Grid Method for In-plane Displacement and Strain Measurement : A Review and Analysis. *Strain*, 52(3) :205–243, 2016. 107

[98] D. Atack, W. D. May, E. L. Morris, and R. N. Sproule. The energy of tensile and cleavage fracture of black spruce. *Tappi*, 44(8) :555–567, 1961. 111

[99] V. Bucur. *Initiation and Growth of Delamination in Wood and Wood-Based Composites, a Fracture Mechanics Approach*, pages 51–100. Springer Netherlands, Dordrecht, (2011). 125

[100] A. Reiter, S.E. Stanzl-Tschegg, and Tschegg E. K. Mode I fracture and acoustic emission of softwood and hardwood. *Wood Sci Technol*, 34(5) :417C–430, 2000. 125

[101] A. P., Schniewind and J. C., Centeno. Fracture toughness and duration of load factor. I. Six principal systems of crack propagation and the duration factor for cracks propagating parallel to grain. *Wood Fiber*, 34(2) :152C158, 1973. 125

[102] M. F. S. F de Moura, J. J. L. Morais, and N. Dourado. A new data reduction scheme for mode I wood fracture characterization using the double cantilever beam test. *Engineering Fracture Mechanics*, 75(13) :3852 – 3865, 2008. 150

[103] M. A. L. Silva, J. J. L. Morais, M. F. S. F. de Moura, and J. L. Lousada. Mode II wood fracture characterization using the ELS test. *Engineering Fracture Mechanics*, 74(14) :2133 – 2147, 2007. 150

[104] N. A. Phan, S. Morel, M. Chaplain, and J.-L. Coureau. R-curve on fracture criteria for mixed-mode in crack propagation in quasi-brittle material : Application for wood. *Procedia Materials Science*, 3(Supplement C) :973–978, 2014. 20th European Conference on Fracture. 150, 152

[105] N. A. Phan, S. Morel, and M. Chaplain. Mixed-mode fracture in a quasi-brittle material : R-curve and fracture criterion c application to wood. *Engineering Fracture Mechanics*, 156(Complete) :96–113, 2016. 150, 152, 157

[106] O. Pop and F. Dubois. Determination of timber material fracture parameters using mark tracking method. *Construction and Building Materials*, 102(Part 2) :977 – 984, 2016. SHATIS 2013 : Research on Timber Materials and Structures. 155

[107] D. Guitard. *Mécanique du matériau bois et composites*. 1987. 238 pages. 159, 160, 161, 162, 171

[108] D. Guitard. Mécanique du bois et des composites, 1987. http ://mecabois.overblog.com/tag/mecanique159, 160, 161, 162, 171

[109] L. C. Palka. Predicting the effect of specific gravity, moisture content, temperature

and strain rate on the elastic properties of softwoods. *Wood Science and Technology*, 7(2) :127–141, Jun 1973. 160, 161, 162

[110] E. Le Fichoux. *Présentation et utilisation de CAST3M*. 2011. http ://www-cast3m.cea.fr. 163

[111] F. H. K. Chen and R. T. Shield. Conservation laws in elasticity of the J-integral type. *Zeitschrift für angewandte Mathematik und Physik ZAMP*, 28(1) :1–22, 1977. 165, 168

[112] G. R. Irwin. Analysis of Stresses and Strains Near the End of a Crack Traversing a Plate. *J. Appl. Mech.*, 24 :361–385, 1957. 165

[113] G. C. Sih and E. P. Chen. *Cracks in composite materials*, volume 6. Mechanics of Fracture, springer edition, 1981. 165

[114] E. Noether. Invariant variation problems. *Transport Theory and Statistical Physics*, 1(3) :186–207, 1971. 166

[115] S. S. Wang, J. F. Yau, and H. T. Corten. A mixed-mode crack analysis of rectilinear anisotropic solids using conservation laws of elasticity. *International Journal of Fracture*, 16(3) :247–259, 1980. 166

[116] B. Moran and C. F. Shih. Crack tip and associated domain integrals from momentum and energy balance. *Engineering Fracture Mechanics*, 27(6) :615 – 642, 1987. 166

[117] H. D. Bui. Conservation laws, duality and symmetry loss in solid mechanics. *International Journal of Fracture*, 147(1) :163–172, Sep 2007. 166

[118] J. R. Rice. A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks. *Journal of Applied Mechanics*, 35 :379–386, 1968. 166

[119] P. Destuynder, P.E.M. Djaoua, L. Chesnay, and J.C. Nedelec. Sur une interprétation mathématique de l'intégrale de Rice en théorie de la rupture fragile. *Mathematical Methods in the Applied Sciences*, 3(1) :70–87, 1981. 166

[120] P. Destuynder, M. Djaoua, and S. Lescure. Quelques remarques sur la mécanique de la rupture élastique. *Journal de mécanique théorique et appliquée*, 2(1) :113–135, 1983. 166

[121] P. O. Bouchard. *Numerical Modelling in Fracture Mechanics and Multimaterials Structures*. Theses, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, September 2000. 167

[122] R. Moutou Pitti, F. Dubois, C. Petit, and N. Sauvat. Mixed mode fracture separation in viscoelastic orthotropic media : numerical and analytical approach by the M$\theta$v - integral. *International Journal of Fracture*, 145(3) :181–193, Jun 2007. 168, 169, 170

[123] G. C. Sih. Strain-energy-density factor applied to mixed mode crack problems. *International Journal of Fracture*, 10(3) :305–321, Sep 1974. 168

[124] F. Dubois, C. Chazal, and C. Petit. Modelling of crack growth initiation in a linear viscoelastic material. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2 :207–222, 1999. 169

[125] G. Valentin and P. Morlier. A criterion of crack propagation in timber. *Matériaux et Construction*, 15(4) :291–298, Jul 1982. 169

[126] X.-Z. Suo and A. Combescure. On the application of G() method and its comparison with De Lorenzi's approach. *Nuclear Engineering and Design*, 135(2) :207 – 224, 1992. 172

[127] M. Attigui. *Modélisation du comportement dynamique des structures fissurées par la mécanique de rupture*. PhD thesis, Limoges, 1997. 172

[128] R. Moutou Pitti and A. Chateauneuf. Statistical and reliability analysis for mixed-mode fracture tests applied to wood material. *Wood science and technology*, 46(6) :1099–1112, 2012. 172

[129] R. Moutou Pitti, F. Dubois, O. Pop, and J. Absi. A finite element analysis for the mixed mode crack growth in a viscoelastic and orthotropic medium. *International Journal of Solids and Structures*, 46(20) :3548 – 3555, 2009. 172

[130] H. Riahi, R. Moutou Pitti, F. Dubois, and A. Chateauneuf. Mixed-mode fracture analysis combining mechanical, thermal and hydrological effects in an isotropic and orthotropic material by means of invariant integrals. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 85 :424 – 434, 2016. 172

[131] R. Moutou Pitti, F. Dubois, C. Petit, and N. Sauvat. Mixed mode fracture separation in viscoelastic orthotropic media : numerical and analytical approach by the m$\theta$v -integral. *International Journal of Fracture*, 145(3) :181–193, Jun 2007. 173

[132] S. El Kabir, F. Dubois, N. Moutou Pitti, R. Recho, and Y. Lapusta. A new analytical generalization of the J and G-theta integrals for planar cracks in a three-dimensional medium. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, January 2018. 183

# Annexe A. Difficultés rencontrées

- **Annexe** $A_1$

Les figures 12 (a) et 12 (b) présentent respectivement une vue de l'éprouvette MMCG en 3D et des éprouvettes MMCG avec fissures au niveau de congés de raccordement. En effet, parmi les difficultés rencontrées celui de la fragilité des éprouvettes au niveau des congés de raccordement est justement celui qui a posé plus de problèmes. C'est d'ailleurs pour cette raison que plusieurs essais n'ont pas été exploités, il a fallu jouer avec l'épaisseur, la fissure initiale et renforcer ces zones pour résoudre le problème de fragilité de ces éprouvettes MMCG réduites.

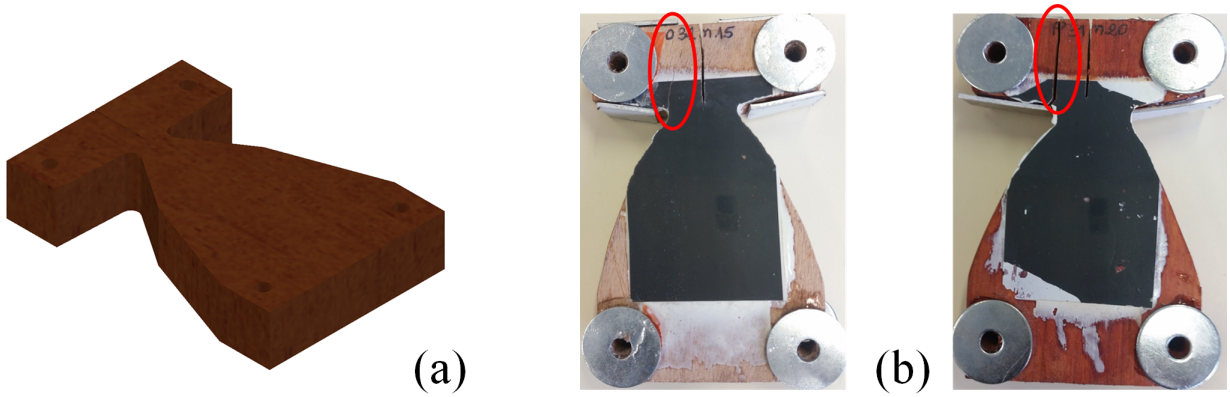



FIGURE 12 – Problèmes de cassures rencontrés au niveau des congés de raccordement

- **Annexe** $A_2$

Les figures 13 (a) et 13 (b) présentent deux exemples de cartes après passage de quelques éprouvettes au scanner (CT-scan) respectivement pour les bois tempérés et les bois tropicaux. Nous pouvons distinguer clairement les cernes bien visibles dans le cas des éprouvettes issues de bois tempérées (douglas et sapin blanc), ce qui n'est pas le cas pour les bois tropicaux (iroko, okoumé et padouk).

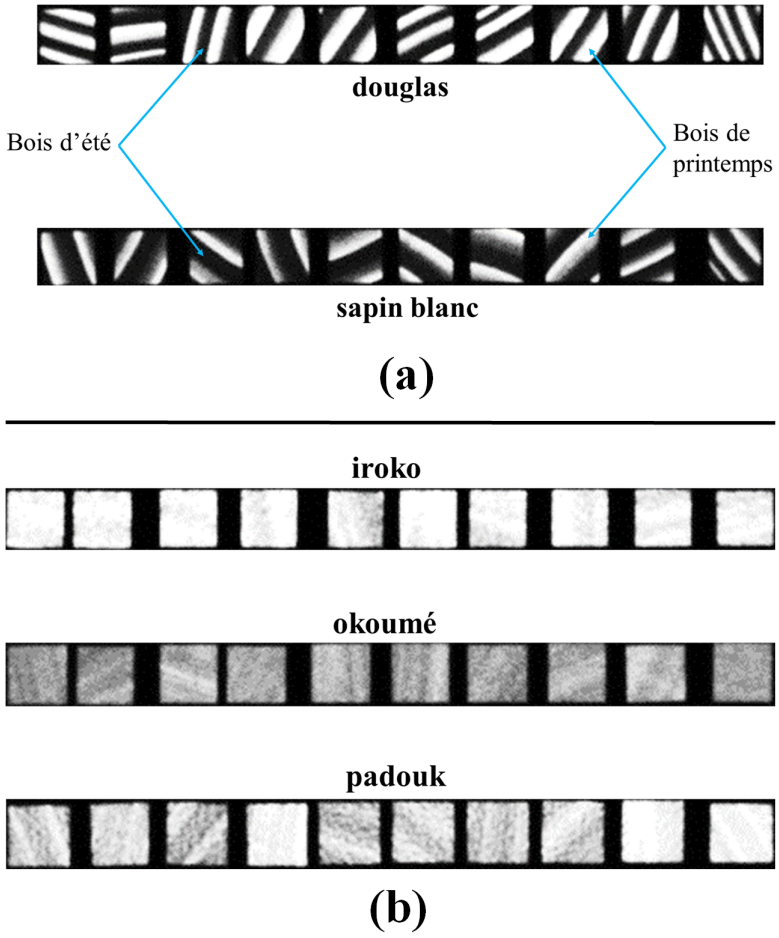



FIGURE 13 – Observation des cernes : (a) essences tempérées et (b) essences tropicales

# Annexe B. Caractéristiques de l'acier du système Arcan

## Propriétés de l'acier utilisé

Nous donnons ici quelques caractéristiques sur l'acier utilisé pour réaliser le système Arcan. Cette gamme d'aciers est conforme à la norme EN 10149.2 :1995. Ce type d'acier est appelé acier à haute limite d'élasticité (HLE). Les aciers à haute limite d'élasticité se caractérisent par une faible teneur en carbone et en éléments d'alliage, ce qui leur confère d'excellentes propriétés fonctionnelles telles que l'aptitude au formage à froid, profilage, soudage ou au revêtement. Leur durcissement obtenu par précipitation et affinement de la taille des grains permet d'atteindre de hauts niveaux de résistances mécaniques.

## Avantages des aciers HLE

Ils combinent soudabilité améliorée due au très faible niveau de carbone et bonne formabilité. Leurs caractéristiques mécaniques facilitent le formage sur presses et sur lignes automatisées. Ils se caractérisent de plus par une bonne tenue à la fatigue et à la résistance au choc. Grâce à leur limite élastique élevée (Re), ils sont particulièrement adaptés lorsqu'une réduction de poids est recherchée, c'est pourquoi ces aciers s'utilisent fréquemment en remplacement des aciers de construction. Les aciers HLE sont particulièrement destinés aux pièces de structure telles que les tubes soudés, les profilés, les pièces pliées ou embouties légèrement.

Les aciers HLE sont mis en œuvre dans les secteurs tels que :

- l'automobile : renforts et supports emboutis, profilés ou sous forme de tubes soudés ;
- les sièges : tubes, glissières, éléments de mécanisme ou d'articulations ;
- les véhicules industriels, tracteurs, remorques et bennes pour les applications relatives aux châssis (tenue à la fatigue) ;
- le levage et la manutention (grues, hayons élévateurs, monte-charges, plateformes, rayonnages de stockage, ascenseurs) ;
- le secteur agricole pour les châssis et éléments de protection ;
- les arceaux de sécurités, le bâtiment, les conteneurs, les mâts d'éclairage urbains, les toupies à béton.

Les tableaux 3 et 4 présentent les caractéristiques chimiques et mécaniques de l'acier utilisé :

| C | Si | Mn | P | S | Nb | $V$ [1] | $Ti$ [1] | Al total |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $\leq 0,12$ | $\leq 0,50$ | $\leq 1,70$ | $\leq 0,025$ | $\leq 0,015$ | $\leq 0,09$ | $\leq 0,20$ | $\leq 0,15$ | $\geq 0,015$ |

Table 3 – Composition chimique (%).

| $R$ (1)(MPa) | $R_{eH}$ (1) (MPa) | $A$ (1)(%) | Pliage à 180 $^0$ avec un $\Phi$ *mini* de *mandrin* (2) |
|---|---|---|---|
| 550 - 700 | $\geq 500$ | 14 | 1 x e(3) |

Table 4 – Caractéristiques mécaniques à température ambiante au moment de la livraison.

Avec :

(1) valeurs d'essais de traction (selon EN 10002-1) s'appliquent aux éprouvettes longitudinales.

(2) valeurs d'essai de pliage s'appliquent aux éprouvettes transversales.

(3) e : épaisseur de la tôle.

# Annexe C. Résultats du chapitre 5

Le Tableau 5 représente les valeurs du taux de restitution d'énergie obtenues expérimentalement et numériquement en mode 1 sur des éprouvettes pour $b$=20 $mm$ et pour différents incréments de $a$. Les tableaux 6, 5 et 5 représentent les valeurs du taux de restitution d'énergie obtenues expérimentalement et numériquement en mode mixte (taux de mixité $\alpha$=$15^0$, $30^0$ et $45^0$ sur des éprouvettes pour $b$=12,5, 15 et 20 $mm$ respectivement pour l'iroko, l'okoumé et le padouk.

| Désignation | $a$ ($mm$) | $G_I$ ($exp.$) ($J/m^2$) | $G_I$ ($num.$) ($J/m^2$) |
|---|---|---|---|
| | 29,56 | 02,81 | 01,23 |
| | 29,96 | 28,84 | 30,93 |
| Epaisseur 20,0 $mm$ ($0^0$) | 30,00 | 33,95 | 46,99 |
| (okoumé) | 30,04 | 46,71 | 55,40 |
| | 30,08 | 54,75 | 73,22 |
| | 32,00 | 98,78 | 126,68 |
| | 32,28 | 115,45 | 133,73 |
| | 36,72 | 281,77 | 276,82 |
| | 38,40 | 305,37 | 313,33 |
| Epaisseur 20,0 $mm$ ($0^0$) | 39,64 | 313,6 | 336,00 |
| (padouk) | 39,94 | 330,25 | 342,12 |
| | 40,40 | 336,38 | 345,97 |

Table 5 – Tableau comparatif des résultats obtenus avec les éprouvettes CTS d'okoumé et de padouk : valeurs expérimentales et numériques pour $b = 20$ $mm$ et $\alpha = 0^0$.

| Désignation | $a$ $(mm)$ | $G_I$ $(exp.)$ $(J/m^2)$ | $G_I$ $(num.)$ $(J/m^2)$ | $G_{II}$ $(exp.)$ $(J/m^2)$ | $G_{II}$ $(num.)$ $(J/m^2)$ |
|---|---|---|---|---|---|
| | 27,40 | 182,83 | 198,95 | - | - |
| | 29,44 | 195,40 | 215,27 | - | - |
| Epaisseur 15,0 $mm$ ($0^0$) | 32,00 | 246,59 | 259,68 | - | - |
| | 32,92 | 255,95 | 269,00 | - | - |
| | 33,76 | 264,85 | 271,41 | - | - |
| | 26,52 | 02,38 | 04,85 | 0,69 | 0,03 |
| | 31,80 | 02,79 | 09,15 | 2,08 | 0,09 |
| | 33,52 | 02,97 | 09,56 | 2,10 | 0,11 |
| Epaisseur 15,0 $mm$ ($15^0$) | 34,00 | 03,21 | 09,61 | 2,27 | 0,12 |
| | 35,80 | 05,34 | 09,65 | 2,50 | 0,13 |
| | 35,96 | 05,38 | 09,80 | 2,54 | 0,13 |
| | 41,64 | 07,72 | 10,11 | 2,92 | 0,14 |
| | 43,64 | 09,02 | 10,25 | 3,90 | 0,14 |
| | 35,76 | 12,00 | 16,93 | 5,29 | 3,51 |
| | 38,12 | 19,15 | 24,14 | 8,95 | 4,76 |
| | 39,94 | 27,42 | 26,01 | 10,78 | 4,96 |
| Epaisseur 12,50 $mm$ ($45^0$) | 41,84 | 29,51 | 28,32 | 12,05 | 5,79 |
| | 48,28 | 36,95 | 38,61 | 18,94 | 7,27 |
| | 51,92 | 39,11 | 44,90 | 21,84 | 7,63 |
| | 53,48 | 39,93 | 48,01 | 22,25 | 7,65 |
| | 54,08 | 40,74 | 49,94 | 23,03 | 7,91 |

TABLE 6 – Tableau comparatif des résultats obtenus avec les éprouvettes MMCG d'iroko : valeurs expérimentales et numériques obtenues en mode 1 et mode 2.

| Désignation | $a$ $(mm)$ | $G_I$ $(exp.)$ $(J/m^2)$ | $G_I$ $(num.)$ $(J/m^2)$ | $G_{II}$ $(exp.)$ $(J/m^2)$ | $G_{II}$ $(num.)$ $(J/m^2)$ |
|---|---|---|---|---|---|
| | 24,72 | 23,62 | 54,24 | - | - |
| | 24,92 | 25,97 | 83,56 | - | - |
| | 26,52 | 45,69 | 115,23 | - | - |
| Epaisseur 15,0 $mm$ ($0^0$) | 27,32 | 52,67 | 119,64 | - | - |
| | 30,04 | 83,88 | 158,78 | - | - |
| | 32,12 | 103,56 | 167,06 | - | - |
| | 34,92 | 147,57 | 192,70 | - | - |
| | 35,92 | 161,07 | 192,91 | - | - |
| | 39,84 | 188,49 | 193,27 | - | - |
| | 32,40 | 2,59 | 6,87 | 1,26 | 0,07 |
| | 33,60 | 2,86 | 7,36 | 1,44 | 0,08 |
| | 35,16 | 3,28 | 7,40 | 1,65 | 0,08 |
| | 35,84 | 3,60 | 7,70 | 1,79 | 0,09 |
| | 36,12 | 3,84 | 7,95 | 1,91 | 0,09 |
| Epaisseur 15,0 $mm$ ($15^0$) | 36,72 | 4,27 | 8,06 | 2,06 | 0,10 |
| | 37,12 | 4,32 | 8,62 | 2,15 | 0,11 |
| | 39,12 | 4,69 | 8,91 | 2,31 | 0,11 |
| | 39,60 | 4,82 | 8,97 | 2,41 | 0,11 |
| | 39,92 | 4,92 | 9,27 | 2,49 | 0,12 |
| | 41,70 | 5,18 | 9,68 | 2,64 | 0,13 |
| | 42,00 | 5,30 | 9,85 | 2,72 | 0,14 |
| | 32,44 | 4,19 | 11,19 | 0,70 | 0,52 |
| | 35,24 | 8,17 | 13,28 | 1,14 | 0,71 |
| | 36,96 | 9,88 | 13,43 | 1,40 | 0,78 |
| Epaisseur 15,0 $mm$ ($30^0$) | 37,16 | 10,33 | 13,61 | 1,48 | 0,82 |
| | 37,96 | 12,24 | 13,73 | 1,64 | 0,84 |
| | 39,96 | 12,89 | 13,80 | 1,83 | 0,88 |
| | 40,16 | 13,02 | 14,09 | 1,88 | 0,89 |
| | 42,68 | 16,01 | 16,39 | 2,30 | 1,00 |
| | 29,12 | 1,56 | 17,20 | 1,25 | 2,3 |
| | 29,48 | 14,97 | 35,91 | 5,38 | 4,41 |
| | 32,92 | 48,29 | 61,31 | 10,79 | 10,19 |
| Epaisseur 12,50 $mm$ ($45^0$) | 33,16 | 50,35 | 62,83 | 10,97 | 10,29 |
| | 34,84 | 53,06 | 64,67 | 12,75 | 10,51 |
| | 35,08 | 55,72 | 64,68 | 21,21 | 10,76 |
| | 37,00 | 57,17 | 66,21 | 24,69 | 12,41 |

TABLE 7 – Tableau comparatif des résultats obtenus avec les éprouvettes MMCG d'okoumé : valeurs expérimentales et numériques obtenues en mode 1 et mode 2.

| Désignation | $a$ $(mm)$ | $G_I$ $(exp.)$ $(J/m^2)$ | $G_I$ $(num.)$ $(J/m^2)$ | $G_{II}$ $(exp.)$ $(J/m^2)$ | $G_{II}$ $(num.)$ $(J/m^2)$ |
|---|---|---|---|---|---|
| Epaisseur 15,0 $mm$ $(0^0)$ | 24,84 | 14,56 | 127,17 | - | - |
| | 25,00 | 103,12 | 193,31 | - | - |
| | 29,16 | 200,84 | 213,76 | - | - |
| | 30,00 | 271,23 | 285,83 | - | - |
| Epaisseur 15,0 $mm$ $(15^0)$ | 37,96 | 08,66 | 09,37 | 04,15 | 0,12 |
| | 40,12 | 08,87 | 10,44 | 05,78 | 0,13 |
| | 41,92 | 09,16 | 10,60 | 05,90 | 0,15 |
| | 42,20 | 09,38 | 10,90 | 05,91 | 0,16 |
| | 43,52 | 09,71 | 11,13 | 05,93 | 0,17 |
| | 45,04 | 09,80 | 11,26 | 05,94 | 2,10 |
| Epaisseur 12,5 $mm$ $(45^0)$ | 31,92 | 08,23 | 23,89 | 05,71 | 03,61 |
| | 34,76 | 20,05 | 47,66 | 19,05 | 08,25 |
| | 40,04 | 40,04 | 59,94 | 35,76 | 11,48 |
| | 40,16 | 40,08 | 61,30 | 36,19 | 12,44 |

TABLE 8 – Tableau comparatif des résultats obtenus avec les éprouvettes MMCG de padouk : valeurs expérimentales et numériques obtenues en mode 1 et mode 2.