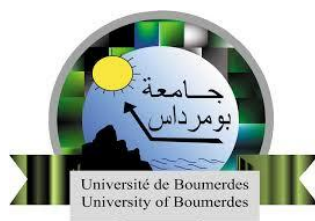


REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES



Faculté de Technologie

Thèse de Doctorat

Présentée par :

Mr GRABI MASSINISSA

En vue de l'obtention du diplôme de **DOCTORAT LMD** en :

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Construction Mécanique

**Comportement à l'impact et post impact des matériaux
composites renforcées par les fibres de luffa**

Devant le jury composé de :

Mr Aknouche	Hamid	Pr.	UMBB	Président
Mr Chellil	Ahmed	Pr	UMBB	Directeur
Mr Belouadah	Zouheyr	MCA	ENP -Alger	Examineur
Mr Lecheb	Samir	Pr	UMBB	Examineur
Mr Mechakra	Hamza	MCA	UMBB	Examineur

Année Universitaire 2021/2022

Remerciements

Ces travaux de thèse ont été effectués à l'université de Boumerdes au sein du Laboratoire Dynamique des Moteurs et Vibroacoustique et au sein du Laboratoire de mécanique et éco-matériaux de l'université du Québec à Trois-Rivières, Canada.

Mes premiers remerciements vont naturellement à mon directeur de thèse, Mr Chellil Ahmed, Professeur à l'Université de Boumerdes. Je voudrais leur exprimer ma profonde gratitude et mon admiration pour leurs valeurs tant humaines que professionnelles dont ils ont fait preuve tout au long de cette thèse.

Les remerciements suivants reviennent bien évidemment à l'ensemble des membres du jury qui ont accepté de juger mon travail de thèse :

J'adresse mes remerciements à Mr Aknouche Hamid, Professeur à l'université de Boumerdes, pour avoir accepté de présider mon jury de thèse. Je suis très reconnaissante envers Mr Belouadah Zouheyr, Maître de Conférences (MCA), à l'Ecole Nationale Polytechnique (ENP), Alger et Mr Lecheb Samir, Professeur à l'Université de Boumerdes et Mechakra Hamza, Maîtres de Conférences (MCA) à l'université de Boumerdes, qui m'ont fait l'honneur d'être examinateurs de ce travail. J'ai pu ainsi tirer bénéfice de leur expertise.

Un grand merci également au Professeur Nour Abdelkader, directeur de laboratoire dynamique des moteurs et vibroacoustique, pour les essais d'impact réalisé au sein de laboratoire.

Je tiens ensuite à remercier vivement Dr Habibi Mohamed, pour leurs précieuses aide matière de mise en œuvre des composites et les essais mécaniques au sein de laboratoire de mécanique et éco-matériaux de l'université du Québec à Trois-Rivières, Canada.

Mes remerciements vont aussi au Professeur Luc Laperrière, directeur du laboratoire de mécanique et éco-matériaux de l'université du Québec à Trois-Rivières, Canada., de m'avoir accueilli au sein de son laboratoire.

Dédicaces

Je dédie cette thèse à mes parents qui m'ont toujours soutenues et sans lesquelles ce travail n'aurait jamais abouti.

À mes frères et sœurs.

À Kamilia d'avoir été toujours à mes côtés, pour son soutien dans les moments les plus durs et d'avoir su me remonter le moral dans mes moments de faiblesse.

À tous mes collègues ainsi qu'à tout ceux qui ont contribué à ce travail de près ou de loin.

Table des matières

Introduction Générale.....	1
-----------------------------------	----------

Chapitre I

Les composites à base des fibres naturelles et leurs caractéristiques

1. Introduction.....	4
2. Matériaux composites et leurs constituants	4
2.2. Matrices	5
2.2.1. Résines thermoplastiques.....	5
2.2.2. Résine thermodurcissables.....	6
2.3. Le renfort	7
2.3.1. Fibres synthétiques	7
2.3.2. Fibres naturelles	7
2.3.3. Types de renforts et architectures	8
3. Fibres naturelles, leurs structures et leurs caractéristiques	10
3.1. Source des fibres.....	10
3.2. Types des fibres	11
3.3. Présentations quelques fibres végétales.....	12
3.4. Structure de la fibre végétale	16
3.5. La composition chimique de la fibre végétale.....	18
3.6. Modifications des fibres naturelles	21
3.6.1. Méthodes chimiques	22
3.6.2. Méthodes physiques.....	26
4. Techniques d'élaboration des composites.....	26
4.1. Moulage au contact	27
4.2. Moulage par compression.....	27
4.3. Moulage par transfert de résine (RTM).....	28
4.4. Moulage par injection.....	28
5. Avantages, propriétés et applications des composites renforcés des fibres naturelles	28
6. Fibre luffa	31
6.1. Plante luffa.....	31
6.2. Extraction la fibre de Luffa	32
6.3. Structure et composition de la fibre de luffa	33
6.4. Autres propriétés et applications	34
6.5. Autre domaine d'utilisation.....	36
7. Conclusion	37
Références bibliographiques	38

Chapitre II

Comportement d'impact et post d'impact des matériaux composites

1. Introduction	43
2. Impact sur les matériaux composites : définition et classification	43
2.1. Techniques d'essai d'impact.....	44
2.1.1. Tour de chut	45
2.2. Différents régimes de réponse aux impacts	46
2.3. Classification des impacts	46
3. Comportement des composites sous sollicitation d'impact	47
3.1. Courbe Déplacement-temps	48
3.2. Courbe Force-temps	49
3.3. Courbe Force-déplacement.....	50
3.4. Courbe Energie-temps	53
4. Paramètres influencent sur la réponse d'impact	54
4.1. Influence des constituants sur la réponse d'impact	55
4.1.1. Type de fibre	56
4.1.2. Système de matrice et d'interface.....	57
4.2. Facteurs géométriques	58
4.3. Caractéristiques de l'impacteur	58
4.4. Conditions de service environnemental.....	59
5. Les mécanismes d'endommagement par impact à basse vitesse	60
5.1. Fissures matricielles	62
5.2. Délaminage	62
5.3. Rupture des fibres	64
5.4. Indentation permanente	64
6. Comportement post-impact –Compression après impact (CAI)	66
7. Résumé des travaux du comportement d'impact et post d'impact sur les composites en fibres naturelles	68
8. Techniques de mesure de l'état d'endommagement	72
8.1. Essais non destructifs et techniques d'évaluation	72
8.1.1. Emission acoustique (EA)	74
8.1.2. Corrélation d'image numérique (CIN)	76
8.1.2.1. Principes de base de la corrélation d'images numériques	77
9. Résumé quelques travaux d'utilisation d'EA et CIN sur les composites	78
10. Conclusion	80
Références bibliographiques	81

Chapitre III

Matériaux et description des techniques de caractérisations

1.	Introduction.....	88
2.	Matériau	88
2.1.	Mat de luffa	88
2.2.	Matrice	89
3.	Traitement alcalin	90
4.	Fabrication du composite	91
4.1.	Composites pour les essais statiques et quasi-statiques	91
4.2.	Composites pour les essais dynamiques.....	92
5.	Calcul de la fraction volumique des fibres	95
6.	Dispositifs des essais mécaniques	96
6.1.	Essai de traction	96
6.2.	Essai de flexion 3 points.....	99
6.3.	Essais d'impact à basse vitesse (IBV)	101
6.4.	Essais post d'impact-Compression après impact (CAI)	104
6.5.	Essais d'indentation	107
7.	Evaluation des endommagements	108
7.1.	Image J	108
7.2.	Emission acoustique (EA)	108
7.3.	Corrélation d'image numérique (CIN)	109
7.4.	Microscopie électronique à balayage (MEB).....	110
8.	Conclusion	111
	Références bibliographiques	112

Chapitre IV

Comportement mécanique d'un composite luffa /époxy en statique, quasi-statique, et dynamique

1. Introduction.....	113
2. Comportement en traction	113
2.1. Comportement en traction de composite luffa/époxy.....	113
2.2. Analyse de l'endommagement	116
2.2.1. Observation des endommagements par VT	116
2.2.2. Observation des endommagements par EA	117
2.2.2.1. Analyse globale des dommages accumulés	117
2.2.2.2. Identification des modes d'endommagement	119
2.2.2.3. Contribution de chaque mode de dommage.....	124
2.2.3. Observation des endommagements par (MEB).....	125
2.4. Evaluation des déformations et déplacements par (CIN).....	128
3. Comportement en flexion	130
3.1. Processus d'endommagement des éprouvettes de flexion.....	132
4. Méthode RTM, la disposition de mat et comparaison	133
5. Comportement en impact à basse vitesse (IBV)	135
5.1. Réponse Forcé-temps	137
5.2. Réponse Déplacement - temps	140
5.3. Réponse Force-déplacement	144
5.4. Réponse Energie-temps.....	144
5.5. Coefficient de restitution (CoR) et degré de dommage.....	146
5.6. Comparaison avec d'autres résultats de la littérature	148
5.7. Caractérisation des endommagements	149
5.7.1. Analyse la surface endommagée par Image J	152
6. Comportement en indentation.....	154
6.1. Analyse de l'endommagement	155
6.1.1. Observation des endommagements par VT	155
6.1.2. Observation des endommagements par EA	155
6.1.3. Observation des endommagements par MEB	157
6.1.4. Observation des déformations et déplacements par CIN	158
7. Comportement en compression après impact (CAI).....	160
7.1. Propriétés mécaniques résiduelles	160
7.2. Analyse de l'endommagement	162
7.2.1. Observation des endommagements par VT	162
7.2.2. Observation des endommagements par EA	165
7.2.3. Observation des endommagements par MEB	169
7.2.4. Evaluation des déformations et déplacements par CIN.....	171
8. Conclusion	174
Références bibliographiques	176

Conclusion générale	180
Annexe	184

Numérotation des figures

CHPITRE I

Figure 1. Constituants d'un matériau composite.....	5
Figure 2. Classification des fibres de renfort des composites	8
Figure 3. Exemple d'architectures de renfort : a) Tissu quasi-unidirectionnel, b) Tafta, c) sergéet d) Tissu 3d.	9
Figure 4. Architectures courantes de matériaux composites : a) composite chargé, b) compositefibres courtes, c) composite stratifié à plis unidirectionnels et d) structure sandwich.....	10
Figure 5. (a) Pourcentage relatif de la production des FV par les différentes nations, (b) consommation mondiale de fibres naturelles.....	10
Figure 6. Diagramme d'Ashby comparant les performances mécaniques spécifiques des fibres naturelles comparées aux fibres synthétiques	11
Figure 7. Fibres naturelles les plus couramment utilisées.....	13
Figure 8. Structure de la fibre naturelle.....	17
Figure 9. Influence de la densité des fibres (a) et de l'angle des micro-fibrilles (AMF) (b) sur les propriétés mécaniques des fibres naturelles, et (c) Module de traction de différentes fibres naturelles en fonction de leur angle de microfibrille	17
Figure 10. Structure de la ligno-cellulose	18
Figure11. Les propriétés des fibres naturelles sont influencées par leurs constituants chimiques	21
Figure 12. Exemples des méthodes de traitement et de modification des fibres naturelles	22
Figure 13. Morphologie de surface des fibres de chanvre avant (a) et après (b) le traitement auNaOH,et (c) Schéma montrant les changements dans la structure des fibres dus au traitement alcalin.....	23
Figure 14. Micrographie de la morphologie de la surface de la fibre d'abaca (a) non modifiée(b) modifiée (c) modifiée	25
Figure 15. Techniques de fabrication des NFRC. (a) Procédé de stratification à la main, (b) moulage par compression, (c) moulage par transfert de résine, et (d) processused'extrusion.....	26
Figure 16. Application des matériaux composites à base de fibres naturelles.....	30

Figure 17. (a) luffa cylindrique, (b) luffa éponge avec cortex, (c) luffa éponge.....	32
Figure18. Caractéristiques géométriques de la colonne de luffa sponge (a) Différentes régions, (b) orientation de la couche externe, (c) Orientation de la couche intermédiaire, (d) Orientation de la couche médiane, (e) Orientation de la couche interne	33
Figure 19. La structure poly-poreuse hiérarchique de l'éponge luffa.....	34
Figure 20. Application des matériaux composites à base de fibres naturelles	36

CHPITRE II

Figure 1. a) Impact oiseau sur A340 (Iberia); b) Impact de débris moteurs A380 (Quantas).....	44
Figure 2. Techniques d'essai d'impact, (a) Essai Charpy, (b) Essai izod, (c) Barre d'Hopkinson, et(d) Tour de chut	45
Figure 3. Classification des différents impacts	46
Figure 4. Courbe déplacement/temps lors d'un impact.....	49
Figure 5. Réponse classique à un impact basse vitesse d'une plaque composite stratifiée en fibres de verre, avec rebond de l'impacteur : historique de la force de contact.....	50
Figure 6. Comportement effort-déplacement de plaques à faible énergie et faible vitesse.....	51
Figure 7. Courbes force-déplacement sous l'impact d'un poids tombant : (a) type fermé, (b) type semi-fermé, et (c) type ouvert	51
Figure 8. Courbes d'absorption d'énergie et de force de contact en fonction du temps dans les cas (a) de rebondissement et (b) de perforation	54
Figure 9. Facteurs influençant la réponse à l'impact des matériaux composites.....	55
Figure 10. Différents types de pénétrateurs/impacteurs utilisés pour l'essai IBV	59
Figure 11. Schéma montrant les différents mécanismes d'endommagement dus à la charge d'impact (a) haute énergie, (b) énergie moyenne et (c) basse énergie	61
Figure12. Coupe micrographique d'un stratifié composite impacté	61
Figure 13. Fissuration matricielle de cisaillement (a) et de traction (b).....	62
Figure 14. Mécanismes d'amorçage et propagation des délaminages	63
Figure 15. Indentation permanente dans une mesure expérimentale	64
Figure 16. Outillage nécessaire pour l'essai de CAI	66
Figure 17. Exemple de résistance résiduelle à la traction et à la compression en fonction de l'énergie d'impact avec deux types de stratifiés	67

Figure 18. (a) Pourcentage de fibres naturelles utilisées dans les composites pour les applications d'impact de 2000 à 2020, (b) Pourcentage des matrices polymères utilisés avec des fibres naturelles pour l'application d'impact.....	68
Figure 19. Catégories de techniques de contrôle et d'évaluation non destructifs.....	72
Figure 20. Comparaison du nombre de publications sur les différentes méthodes de contrôle non destructif et leurs applications aux matériaux/structures composites au cours des 30 dernières années.....	73
Figure 21. Principe de fonctionnement de l'émission acoustique	74
Figure 22. Principaux descripteurs d'EA calculés. a) dans le domaine temporel ; b) dans le domaine fréquentiel.....	75
Figure 23. Mesure de déformation par corrélation d'images	76
Figure 24. Étapes d'évaluations de la méthode CIN.....	77

CHPITRE III

Figure 1. Luffa cylindrique	88
Figure 2. Orientation des fibres dans la structure du mat de luffa, parties A (quasi-unidirectionnelle) et B (aléatoire).....	89
Figure 3. Préparation des mats de luffa	90
Figure 4. Traitement alcalin des fibres de luffa : (A) concentration de 2%, (B) concentration de 5%, et (C) neutralisation de 1%	90
Figure 5. Influence du procédé de fabrication sur les propriétés en traction des composites	91
Figure 6. Superposition des mats de luffa afin de fabriquer des composites pour les essais traction, flexion, CAI et indentation	92
Figure 7. Préparation des quatre composites luffa/époxy	92
Figure 8. Étapes de préparation, (a) four, (b) thermocompression, et (c) plaques de mat de luffa	93
Figure 9. Moulage par transfert de résine (RTM)	94
Figure 10. La plaque composite luffa/époxy	95
Figure 11. Éprouvettes pour l'essai de traction.....	97
Figure 12. Essai de traction de composite luffa/époxy	98
Figure 13. Courbe théorique contrainte/déformation des matériaux polymères.....	98
Figure 14. Éprouvettes pour l'essai de flexion.....	100
Figure 15. Essai de flexion de composite luffa/époxy	101

Figure 16. Spécimens pour les essais d'impact à basse vitesse	102
Figure 17. Machine d'impact à poids tombant Imatek IM10 ITS	103
Figure 18. Dispositifs d'essai d'impact	105
Figure 19. Spécimens pour les essais d'impact et CAI.....	105
Figure 20. Dispositifs d'essai compression après l'impact (CAI)	106
Figure 21. Dispositifs d'essai indentation.....	107
Figure 22. Spécimen pour le test d'indentation	108
Figure 23. Système d'acquisition d'émission acoustique	109
Figure 24. Système d'acquisition de corrélation d'image numérique.....	110
Figure 25. Microscope électronique à balayage (MEB).....	110

CHPITRE IV

Figure 1. Impact du traitement chimique : (A) Courbes de contrainte-déformation, (B) Module d'Young, et (C) Résistance à la traction	115
Figure 2. Exemples de modes de rupture pouvant survenir lors d'un essai de traction.....	116
Figure 3. Faciès de rupture des composites stratifiés	117
Figure 4. Courbes de contrainte-déformation et d'énergie acoustique et nombre total de coupscumulés des composites : ((A) NT, (B) T2%, et (C) T5%) en essai de traction ..	118
Figure 5. Distribution temporelle et énergie acoustique cumulative de chaque mode d'endommagementpour les essais de traction sur composite : ((A ₁ . A ₂) : NT, (B ₁ . B ₂) : T2%,et (C ₁ .C ₂) : T5%	122
Figure 6. Contribution des modes d'endommagement (DC) en traction.....	125
Figure 7. Images du MEB des surfaces de rupture des composites (A) NT, (B) T2%, et (C) T5%.....	128
Figure 8. Courbes de déformation en fonction du temps et images CIN prises pendant l'essai de traction dans le plan XY, (a) NT, (b) T2%, et (c) T5% composites.....	130
Figure 9. Courbes contraintes-déformation en flexion	131
Figure 10. Impact du traitement chimique : (a) Module d'Young, (b) Contrainte, et (c) Déformation à la rupture	132
Figure 11. Faciès de rupture des composites en flexion	132

Figure 12. Polymère et procédés utilisés pour la préparation de composites renforcés de fibres de luffa	135
Figure 13. (a) Courbe charge-déplacement, (b) Courbe typique charge-temps, (c) Courbe déplacement-temps, et (d) Courbe énergie-temps relative au composite (A) avec $E_i = 10 \text{ J}$	136
Figure 14. Comparaison des courbes Force - temps pour un impact de (a) 5 J, (b) 15J, et (c) 20 J	139
Figure 15. Comparaison des courbes de déplacement en fonction du temps pour un impact de (a) 5 J, (b) 15 J et (c) 20 J.....	140
Figure 16. Comparaison des courbes de déplacement de la force pour (a) un impact de 5 J, (b) de 15 J et (c) de 20 J.....	142
Figure 17. Comparaison des (a) Force maximale et (b) Déplacements maximale des spécimens testés sous différentes énergies d'impact	143
Figure 18. Comparaison des courbes énergie-temps pour (a) un impact de 5 J, (b) de 15 J et (c) de 20 J.....	144
Figure 19. Comparaison (a) des énergies absorbées et (b) de l'énergie élastique des spécimens testés sous différentes énergies d'impact.....	145
Figure 20. (a) Coefficient de restitution (CoR) en fonction de l'énergie d'impact et (b) Rapport d'absorption d'énergie en fonction de l'énergie d'impact à différentes énergies d'impact pour les composites	147
Figure 21. Images des dommages causés par l'impact sur les composites en fonction de l'énergie de l'impact, (a) face avant et (b) face arrière	150
Figure 22. La profondeur de l'endommagement des composites luffa/époxy proposé à différents niveaux d'énergie d'impact 5 ,15, et 20J.....	151
Figure 23. Application Image J pour le composite (B) impacté à 20J	152
Figure 24. Surface de dommage de la face avant et (b) Surface d'ouverture de dommage de la face arrière.....	152
Figure 25. Surface d'ouverture des dommages sur la face arrière des composites impactés, (a) 15J et (b) 20J	154

Figure 26. Courbe Force-déplacement de l'essai d'indentation.....	155
Figure 27. Dommages subis par l'indentation	155
Figure 28. (a) Les événements acoustiques d'amplitudes avec la classification des modes d'endommagements, (b) l'énergie EA cumulative	157
Figure 29. Les modes de dommage subi par indentation.....	158
Figure 30. Images CIN prises pendant l'essai d'indentation, effet de l'indentation sur le déplacement, déformations ϵ_{xx} , et ϵ_{yy} , du composite	160
Figure 31. Courbe contrainte-déformation de compression après l'impact (CAI)	162
Figure 32. Effet de l'impact sur les propriétés résiduelles de compression, (a) Module résiduel de compression, (b) Résistance résiduelle à la compression, et (c) Déplacement à la rupture	163
Figure 33. (a) Échantillon impacté à l'aide de l'image J, (b) Zone endommagée de la face avant, (c) Zone endommagée de la face arrière, et (d) Longueur de la fissure de la face arrière	164
Figure 34. Effet de l'énergie d'impact sur le développement des dommages de CAI ; (a) Face avant, et (b) Face arrière.....	166
Figure 35. Courbes force-déplacement de la compression après les essais d'impact et les événements acoustiques d'amplitudes avec la classification des modes d'endommagement ; (a) CAI 0J, (b) CAI 1J, (c) CAI 2J, et (d) CAI 3J.....	167
Figure 36. Courbes force-déplacement de la compression après les essais d'impact et l'énergie EA cumulative de : (a) CAI 0J, (b) CAI 1J, (c) CAI 2J, et (d) CAI 3J.....	169
Figure 37. Images de MEB des surfaces de rupture des spécimens impactés.....	170
Figure 38. Images MEB des surfaces de fracture des spécimens impactés après compression ; (a) CAI 0J, (b). CAI 1J, (c) CAI 2J, et (d) CAI 3J.....	172
Figure 39. Courbe force-déplacement et champs de déplacement longitudinal mesurés par CIN en compression pour les spécimens impactés (a) CAI 0J, (b) CAI 1J, (c) CAI 2J, et (d) CAI 3J.....	173

Numérotation des tableaux

CHAPITRE I

Tableau 1. Propriétés de la résine thermoplastique.....	6
Tableau 2. Propriétés de la résine thermodurcissable	7
Tableau 3. Propriétés physico-mécaniques des fibres végétales comparés aux renforts synthétiques	16
Tableau 4. Composition chimique de certaines fibres végétales.....	20

CHAPITRE II

Tableau 1. Particularité du mode de dommage pour les composites en fibres naturelles sous IBV	65
Tableau 2. Résistance résiduelle après impact des composites en fibres naturelles impactés.....	70

CHAPITRE III

Tableau 1. Les propriétés chimiques et physiques de la fibre de luffa	89
Tableau 2. Paramètres appliqués lors du procédé RTM.....	95
Tableau 3. Séquences d'empilement et fraction volumique des différents composites traités et non traités pour les essais traction et flexion	101
Tableau 4. Paramètres et conditions des essais d'impact à basse vitesse	104
Tableau 5. Paramètres et conditions des essais de CAI	107
Tableau 6. Informations sur le composite pour le test indentation	108

CHAPITRE IV

Tableau 1. Propriétés mécaniques des essais de traction d'un composite de fibres de luffa traitées et non traitées dans cette étude	114
Tableau 2. Mécanismes d'endommagement basés sur l'événement de l'amplitude, résultats de la littérature	120
Tableau 3. Résultats de l'analyse multivariée utilisée dans cette étude	120
Tableau 4. Propriétés mécaniques des essais de flexion des composites en fibres de luffa traitées et non traitées dans cette étude.....	131

Tableau 5. Propriétés mécaniques des composites renforcés de fibres de luffa	133
Tableau 6. Propriétés d'impact à faible vitesse	138
Tableau 7. Comparaison des performances d'impact des composites luffa/époxy analysés avec celle d'autres composites rapportés dans la littérature.....	148

Symboles et abréviations

1. Symboles

ν_{xy} et ν_{xz} : Coefficients de Poisson

E_{abs} : L'énergie absorbée (J)

E_c : L'énergie cinétique (J)

E_{diss} : L'énergie dissipée (J)

E_{elast} : l'énergie élastique (J)

E_{end} : L'énergie d'endommagement (J)

E_f : Module Young en flexion (GPa)

E_{fib} : L'énergie associée à la rupture des fibres (J)

E_{imp} : L'énergie d'impact (J)

E_{indent} : L'énergie d'indentation (J)

E_{mat} : L'énergie d'endommagement matriciel (J)

E_p : L'énergie potentielle (J)

F_{max} : la charge maximale (N)

k_c : L'énergie absorbée par le matériau lors d'essai Charpy

v_{imp} : Vitesse atteinte par l'impacteur (m/s)

ε_f : Déformation à la rupture en flexion (MPa)

ε_{xx} : Déformation dans la direction de traction x (%)

ε_{yy} : Déformation dans la direction de traction y (%)

ε_{zz} : Déformation dans la direction de traction z (%)

σ_c : Résistance à la compression après l'impact (MPa)

σ_f : Contrainte à la rupture en flexion (MPa)

σ_{xx} : Contrainte nominale dans la direction de traction x (MPa)

b : Largeur du spécimen de compression après l'impact (mm)

CoR : coefficient de restitution

e : L'épaisseur de l'éprouvette (mm)
 E_i : Energie cumulée de l'EA pour le i_e mode (J)
 E_x : Module d'Young dans la direction de traction x (GPa)
 F : Force (N)
 g : L'accélération de la pesanteur (m/s^2)
 h : La hauteur de l'impacteur (m)
 h : Epaisseur de l'éprouvette pour l'essai de flexion (mm)
 L : Longueur entre appuis dans l'essai de flexion (mm)
 L : Largeur (mm)
 m : Masse du projectile (Kg)
 M_s : Masse par unité de surface (kg/m^2)
 N : Nombre de plis
 P_f : Densité des fibres (g/cm^3)
 S : Surface (mm^2)
 v : Vitesse (m/s)
 V_f : Fraction volumique (%)
 b : Largeur de l'éprouvette pour l'essai flexion (mm)

2. Abréviations

2D : Deux dimension
 3D : Trois dimension
 4D : Quatre dimension
 AMF: l'angle des micro fibrilles
 ASTM: Anciennement American Society for Testing and Materials
 BVID: Barely visible impact damage
 CAI : Compression après impact
 CCD : Charge Coupled Device
 CIN : Corrélation d'image numérique
 CPFN : Composite polymère en fibre naturelle
 CR : Croise
 CRFN : Composite renforcé en fibre naturelle

DC : Contribution de dommage

EA : Emission Acoustique

FV : Fibre végétale

HDPE : Polyéthylène à haute densité

IBV : Impact à basse vitesse

ISO : Organisation internationale de normalisation

VT : Visuelle test

LDPE : Polyéthylène à basse densité

LMEM : Laboratoire de mécanique et éco-matériaux

MAPP : Polypropylène greffé par anhydride maléique

MC : Moulage par compression

MEB : Microscopique électroniques à balayage

NT : Non traité

PE : Polyéthylène

PLA : Acide poly lactique

PP : Polypropylène

PS : Polystyrène

PVA : L'alcool polyvinylique

QI : Quasi-isotrope

RTM : Moulage par transfert de résine

T2% : Traité à 2% d'alcalin

T5% : Traité à 5% d'alcalin

TD : Thermodurcissables

TP : Thermoplastiques

UD : Unidirectionnels

UQTR : Université du Québec à Trois-Rivières

UV : Ultraviolet

Résumé :

Cette étude porte sur le comportement à l'impact et post-impact d'un composite à fibre de luffa et à matrice époxy. La première partie a été consacrée sur l'effet de traitement alcalin (2% et 5% de NaOH) sur les propriétés mécaniques et les endommagements. Pendant les essais de traction, les tests ont été couplés à l'émission acoustique (EA) et corrélation d'images numériques (CIN), afin de surveiller et d'évaluer les mécanismes d'endommagements et les champs des déformations. Sur la base des résultats EA, CIN et les propriétés mécaniques, le composite T5% est le plus performant.

Des essais d'impact à basse vitesse ont été réalisés sur quatre composites nommés (A), (B), (C), et (D). Les résultats montrent que le composite (C) est le plus résistant au impact suivi par le composite (A), par contre le composite (D) est le plus absorbant d'énergie suivi par le composite (B). Par la suite des essais d'indentations ont été réalisés et des techniques d'analyses ont été menées sur des éprouvettes qui sont couplé aussi aux techniques de caractérisation par émission acoustique et la corrélation d'image numérique. Les résultats d'EA identifier quatre modes d'endommagement, y a compris la fissuration de la matrice, décohésion fibre-matrice, délaminage, et la rupture des fibres.

La dernière partie de ce travail a été consacrée sur la compression après impact (CAI). L'effet de l'énergie d'impact et l'influence de la zone endommagée sur les propriétés mécaniques résiduelles sous compression ont été déterminé. L'émission acoustique (EA), la corrélation d'images numériques (CIN) et la microscopie électronique à balayage (MEB) ont été utilisées, pour l'évolution des différents modes de dommages et des champs de déplacements. Les résultats révèlent que les CAI 1J, CAI 2J et CAI 3J montrent un effet de l'endommagement résiduel diminue la résistance résiduelle à la compression, par rapport au composite non impacté, par contre le module de Young n'est pas affecté de manière significative. L'analyse des signaux EA a permis d'identifier quatre classes de dommages, elle a également montré que le mode d'endommagement des composites non impactés, qui présente la majorité des événements d'amplitude des signaux EA, est principalement dû à la rupture des fibres, alors que pour les composites impactés, est principalement dû au décohésion fibre-matrice. La technique CIN a constaté que l'augmentation de l'énergie d'impact augmente la concentration de contraintes autour de la zone impactée.

Mots clés

Composites mat luffa/époxy, Propriétés mécaniques, Impact basse vitesse, Post impact, Endommagements, Emission acoustique, Corrélation d'image numérique.

Abstract:

This study deals with the impact and post-impact behavior of a luffa fiber composite with an epoxy matrix. The first part was devoted to the effect of alkaline treatment (2% and 5% NaOH) on mechanical properties and damage. During the tensile tests, the specimens were coupled to acoustic emission (AE) and digital image correlation (DIC), in order to monitor and evaluate the damage mechanisms and the deformation fields. Based on the AE, DIC and mechanical properties results, the T5% composite is the best performing.

Low-velocity impact tests were performed on four composites named (A), (B), (C), and (D). The results show that the composite (C) is the most resistant to impact followed by the composite (A), on the other hand the composite (D) is the most energy absorbing followed by the composite (B). Subsequently, indentation tests were carried out and analysis techniques were carried out on test specimens which are also coupled with characterization techniques by acoustic emission and digital image correlation. The EA results identify four modes of damage, including matrix cracking, fiber-matrix decohesion, delamination, and fiber breakage.

The last part of this work was devoted to the compression after impact (CAI). The effect of impact energy and the influence of the damaged area on the residual mechanical properties under compression were determined. Acoustic emission (AE), digital image correlation (DIC) and scanning electron microscopy (SEM) were used, for the evolution of the different damage modes and displacement fields. The results reveal that CAI 1J, CAI 2J and CAI 3J show an effect of residual damage decreases the residual compressive strength, compared to the unimpacted composite, however the Young's modulus is not significantly affected. The analysis of the AE signals identified four classes of damage, it also showed that the damage mode of the unimpacted composites, which presents the majority of the amplitude events of the AE signals, is mainly due to fiber breakage, while for the impacted composites, is mainly due to fiber-matrix de-bonding. The DIC technique found that increasing the impact energy increases the stress concentration around the impacted area.

Key words

Luffa mat/epoxy composites, Mechanical properties, Low-velocity impact, Post impact, Damage, Acoustic emission, Digital image correlation.

ملخص:

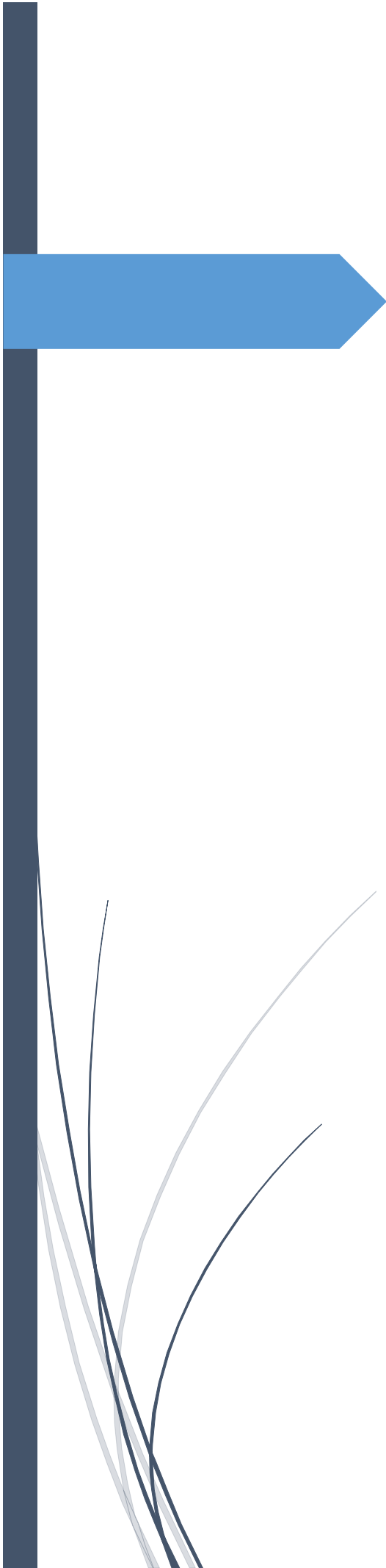
تركز هذه الدراسة على تأثير السلوك أثناء وما بعد الصدمة لمادة مركبة من ألياف نبات الليف ومصفوفة الايبوكسي. خصص الجزء الأول لتأثير المعالجة القلوية (2% و 5% هيدروكسيد الصوديوم) على الخواص الميكانيكية والضرر أثناء اختبارات الشد، تم تجهيز العينات بالانبعاث الصوتي (EA) وترابط الصورة الرقمية (CIN)، من أجل مراقبة وتقييم آليات الضرر وحقول التشوه. بناءً على نتائج EA و CIN والخصائص الميكانيكية، يكون أداء مركب T5% أفضل.

تم إجراء اختبارات تأثير السرعة المنخفضة للصدم على أربعة مركبات تم تسميتها (A) (B)، (C) و (D). أظهرت النتائج أن المركب (C) هو الأكثر مقاومة للقدم يليه المركب (A)، ومن ناحية أخرى فإن المركب (D) هو الأكثر امتصاصاً للطاقة يليه المركب (B). بعد ذلك، تم إجراء الاختبارات شبه الساكنة وتم إجراء تقنيات التحليل على عينات الاختبار التي تقترن أيضاً بتقنيات التوصيف عن طريق الانبعاث الصوتي وترابط الصورة الرقمية. تحدد نتائج EA أربعة أنماط للضرر، بما في ذلك تكسير المصفوف، وفك تماسك مصفوفة الألياف، وكسر الألياف.

تم تخصيص الجزء الأخير من هذا العمل للتأثير الإنضغاط بعد الصدم (CAI). تم دراسة تأثير طاقة الصدم وتأثير المنطقة المتضررة على الخواص الميكانيكية المتبقية تحت الإنضغاط. تم استخدام الانبعاث الصوتي (EA)، وارتباط الصورة الرقمية (CIN) والفحص المجهر الإلكتروني (MEB)، لتطور أوضاع الضرر المختلفة وحقول الإزاحة. كشفت النتائج أن CAI 1J و CAI 2J و CAI 3J تظهر أن تأثير الضرر المتبقي يقلل من المقاومة المتبقية في الإنضغاط، مقارنة بالمادة المركبة غير المتأثرة، من ناحية أخرى، لا يتأثر معامل يونغ بشكل كبير. حدد تحليل إشارات EA أربع فئات من الضرر، وأظهر أيضاً أن وضع الضرر للمواد المركبة غير المصدومة، والذي يعرض غالبية سعة إشارة EA، يرجع في المقام الأول إلى فك تماسك الألياف مع المصفوفة. وجدت تقنية CIN أن زيادة طاقة الصدم تزيد من تركيز الإجهادات حول المنطقة المصدومة.

الكلمات المفتاحية:

مواد مركبة ألياف الليف/مصفوفة الايبوكسي، الخواص الميكانيكية، صدم بسرعة منخفضة، بعد الصدم، التلف، الانبعاث الصوتي، ارتباط الصورة الرقمية.



Introduction Générale

Introduction Générale

Les matériaux composites sont de plus en plus utilisés dans différents secteurs industriels : automobile, aéronautique, bâtiment...etc, grâce à leurs très bonnes caractéristiques mécaniques, ils présentent l'avantage d'être beaucoup plus légers que les matériaux métalliques. Néanmoins, les matériaux composites sont, dans la plupart des cas, constitués de fibres synthétiques obtenues par divers procédés chimiques et de résines pétrochimiques.

Cependant, au cours des dernières années une attention croissante a été accordée à l'utilisation des ressources renouvelables, notamment l'exploitation des bio sources en particulièrement les fibres végétales qui sont considérées comme potentiellement utilisables comme agents de renforcement dans les matériaux composites polymères en raison de leurs principaux avantages comme la disponibilité et leur biodégradabilité dans l'environnement et leur rentabilité et le faible coût, par contre les fibres synthétiques comme le carbone, le verre, l'aramide, et certaines fibres à base de pétrole ont été les plus utilisées comme renforcement pour les composites, mais ces fibres inorganiques sont non biodégradables, non recyclables, et coûteuses, et elles posent même des risques pour la santé et l'environnement. Les composites polymères à base de fibres végétales ont été trouvés dans plusieurs applications, dans les meubles, emballages, isolation acoustique et vibrations, bâtiment, automobile, aéronautique et naval. Plusieurs fibres végétales telles que : Lin, sisal, jute, et chanvre ont été étudiées et sont largement utilisées comme renfort dans la fabrication des bio-composites.

L'Algérie possède les capacités qui la qualifient pour être un pays leader dans l'utilisation de nombreux types de produits agricoles tels que les fibres, l'alfa, palmier dattier, luffa...etc, qui peut être utilisé dans les produits composites biodégradables. En Algérie, les mats de luffa sont souvent utilisés seulement comme une éponge de nettoyage. L'éponge luffa peut être utilisée comme renforts en polymère pour développer les propriétés des matériaux bio-composites, fournissant ainsi des emplois et améliorant les conditions de vie de la population rurale. Toutefois, les composites renforcés par des fibres végétales présentent quelques inconvénients qui limitent leurs utilisations dans le domaine industriel. En effet, les propriétés morphologiques et mécaniques des fibres sont variables d'une plante à une autre ainsi que dans une même plante. Le problème est dans le caractère hydrophile de ces fibres qui tend à fragiliser les composites. Afin de limiter ces problèmes et d'optimiser les propriétés mécaniques de ces composites, il est tout d'abord nécessaire d'approfondir la connaissance de

leur comportement en statique, quasi statique, et dynamique, notamment sous impact basse vitesse. Beaucoup de travaux se sont intéressés à la caractérisation mécanique des composites renforcés par des fibres végétales, un grand nombre d'entre eux concerne la caractérisation mécanique en traction, flexion, et compression. Cependant, relativement peu d'études se sont intéressées à la caractérisation d'impact et post d'impact et l'identification des endommagements des composites renforcés par des fibres végétales.

Afin de déterminer et de suivre le développement des mécanismes d'endommagement, un certain nombre de techniques ont été utilisées. On peut notamment citer microscopie électronique à balayage, l'émission acoustique, et la corrélation d'images. Dans ce contexte, le choix du renfort pour cette étude s'est porté sur les mats de luffa. En effet, ces fibres présentent de bonnes propriétés mécaniques et sont relativement peu étudiées.

C'est pourquoi, dans ce travail de thèse, nous étudierons un composite en fibre naturelle, constitué de fibres de luffa sous forme de mat, et d'une matrice époxy.

Le plan de la rédaction de cette thèse est composé de quatre chapitres :

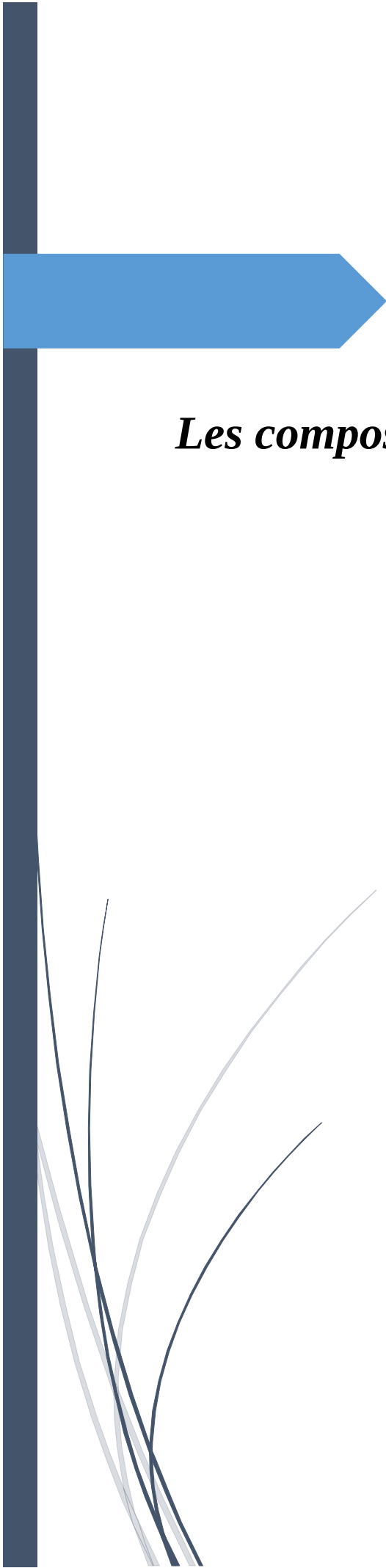
La première partie de chapitre I sera consacrée à une étude bibliographique des matériaux composites. Dans un premier temps, nous effectuerons un état de l'art en ce qui concerne les fibres naturelles. Une partie présente les grandes classes des fibres végétales, présente également la morphologie de la fibre à des différentes échelles. Dans un deuxième temps, il s'agit de présenter les principales composantes chimiques ainsi que les différents traitements chimiques et physiques utilisés pour améliorer les propriétés mécaniques. Par la suite, une étude bibliographique sur les méthodes d'extraction des fibres végétales, les procédés de mise en œuvre, et les propriétés mécaniques des composites en fibres naturelles et leurs applications. Les avantages et inconvénients des composites bios sources renforcées à base de fibres végétales ont été énumérés et à la fin on termine avec une petite bibliographie sur la fibre luffa.

Le deuxième chapitre sera réservé sur une bibliographie sur le comportement d'impact à basse vitesse et à la compression après impact sur les matériaux composites. Des techniques et des essais de types d'impact seront aussi présentés. L'influence des paramètres comme les constituants de matériau, les caractéristiques d'impacteur et les conditions environnementales sur la réponse d'impact à basse sur les composites sera bien détaillé et un accent est mis sur les techniques de détection et de caractérisation des endommagements dans les structures composites comme l'émission acoustique et la corrélation d'image. Un résumé des études d'impact sur les composites en fibres naturelles sera discuté à la fin de ce chapitre.

Le troisième chapitre sera dédié à l'étude expérimentale, décrira les renforts et les matrices qui seront utilisés dans cette thèse ainsi que l'équipement et les méthodes avec les différentes concentrations de traitement alcaline appliquées sur les mats de luffa et aussi la méthode de transfert de la résine (RTM) qui sera employée pour l'élaboration des composites. Les moyens d'essais en statique, quasi statique et en dynamique seront également détaillés. À l'issue de deuxième partie, il sera discuté la caractérisation de ces plaques composites, les techniques utilisent pendant les essais traction, flexion, impact basse vitesse, compression après l'impact et indentation, pour d'évaluer les modes d'endommagements, les déformations et les déplacements par inspection visuelle, Image J, émissions acoustique (EA), corrélation d'image numérique (CIN), et microscopique électronique à balayage (MEB).

Le dernier chapitre sera consacré sur l'analyse beaucoup des résultats, en premier, l'influence deux différents traitement alcaline de 2% et 5% sur les propriétés mécaniques en traction et en flexion sera identifiée, par la suite l'évaluations des endommagements et des déformations sur les composites traites et non traites en utilisant l'émission acoustique (EA), corrélation d'image numérique (CIN), et microscopique électronique à balayage (MEB). La deuxième partie de ce chapitre concerne l'étude du comportement à l'impact basse vitesse de 5,15 et 20J sur les composites mat luffa/époxy, L'influence de la séquence d'empilement et l'orientation des fibres dans la structure des composites sera analysée par la comparaison de quatre composites renforcée en mat de luffa. Les endommagements créés par l'impact seront étudiés par inspection visuelle et le (MEB). Ensuite, une autre partie est consacrée à l'étude du comportement quasi-statique indentation, et d'évaluer les modes d'endommagement, les déplacements, et les déformations avec les techniques (EA), (CIN), et (MEB). La dernière partie de chapitre concerne l'analyse des résultats des essais d'impact (1,2, et 3J) et post-impact (CAI1J, CAI2J, et CAI3J), afin de déterminer les propriétés mécaniques résiduelles des composites en compression ; ainsi l'utilisation, des techniques d'analyses comme (EA), (CIN), et (MEB) qui permettra d'identifier les mécanismes d'endommagements des composites.

Pour finir, cette thèse s'achève par une conclusion générale qui comporte à la fois les points essentiels et des perspectives prometteuses de notre travail.



Chapitre I :

Les composites à base des fibres naturelles et leurs caractéristiques

1. Introduction

De nos jours, plusieurs fibres naturelles ont fait l'objet de nombreux travaux de recherche afin d'étudier leur capacité à remplacer les fibres synthétiques [1,2]. La synthèse de ces travaux a montré que les fibres végétales extraites des plantes, ont des propriétés mécaniques intéressantes et qui peuvent rivaliser avec les fibres de verre [3]. Elles présentent plusieurs points forts, en matière des performances mécaniques, de légèreté, d'amortissement des vibrations, d'isolation thermique ou phonique, d'absorption/désorption ou de bilan écologique, qui justifient leur utilisation. Elles laissent toutefois, apparaître un certain nombre de points faibles comme leur caractère hydrophile, leur faible résistance aux hautes températures et variation de ces propriétés selon les conditions climatiques.

Ce chapitre se poursuit par une brève description des matériaux composites. Par la suite, une présentation détaillée sera consacrée aux fibres naturelles qui ne cessent de se développer durant de ces dernières années. Nous abordons ensuite les différents domaines d'utilisation ainsi que les avantages et inconvénients de ces nouveaux matériaux. Leurs structures et composition, leurs propriétés mécaniques seront présentées en tenant compte de leur composition chimique et des différents éléments structuraux de ces fibres. Puisqu'elle représente la principale des travaux effectués dans cette thèse, la dernière partie de ce chapitre sera consacrée à la présentation de la plante et la fibre luffa. Ce chapitre se finira par une conclusion.

2. Matériaux composites et leurs constituants

Les matériaux sont considérés comme le pilier de toute industrie de production. Différents matériaux sont utilisés dans l'industrie de la fabrication, allant des métaux purs aux alliages et aux composites. Cette évolution des matériaux des métaux purs vers les composites est due à l'incapacité des métaux purs à répondre aux attentes des produits modernes. À présent, les matériaux composites sont largement utilisés dans l'industrie de la fabrication et remplacent les matériaux traditionnels dans une plus large mesure en raison de leurs propriétés prometteuses telles qu'une résistance spécifique élevée, une forte capacité d'amortissement et un module spécifique élevé.

Les matériaux composites sont constitués de l'assemblage de matériaux de natures différentes, afin d'avoir un matériau ayant des performances supérieures à celui des composants pris séparément [4]. D'une manière courante, les composites stratifiés sont définis comme l'association d'un renfort et d'une matrice. Le résultat obtenu par cette association est

un ensemble plus au moins hétérogène et anisotrope. Les propriétés du composite élaboré dépendent du choix du renfort, de la matrice et du type de procédé de fabrication des composites. Les matériaux composites peuvent être classés suivant la nature du renfort (particules ou fibres) et suivant la nature de la matrice [5], en général les constituants principaux d'un matériau composite sont montrés dans la Figure 1.

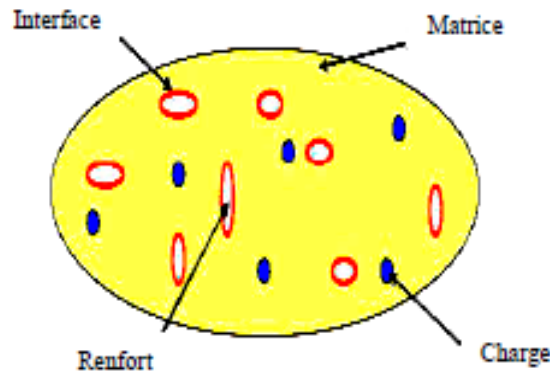


Figure 1. Constituants d'un matériau composite [6].

2.2. Matrices

La matrice est la phase continue du composite. Elle a pour rôle de maintenir les renforts, les protéger et de leur transmettre les forces mécaniques. Il existe de nombreux types de matrices, y compris les matrices métalliques, céramiques, organiques ou polymères. Cette dernière fera l'objet d'une attention particulière. La forme, l'aspect de surface, la tolérance environnementale et la durabilité globale des composites sont dominés par la matrice. Le marché des polymères est dominé par les plastiques de base, 80 % des matériaux consommés étant basés sur des ressources pétrolières non renouvelables. Les gouvernements, les entreprises et les scientifiques sont poussés à trouver une matrice alternative à la matrice conventionnelle à base de pétrole par la sensibilisation du public à l'environnement, au changement climatique et aux ressources limitées en combustibles fossiles. C'est pourquoi les plastiques bio sources, qui se composent de ressources renouvelables, ont connu une renaissance au cours des dernières décennies [7].

2.2.1. Résines thermoplastiques : sont extrêmement courantes et sont généralement moins chères à fabriquer que les thermodurcissables ou les élastomères. Les composites thermoplastiques présentent deux avantages majeurs. Tout d'abord, de nombreuses résines thermoplastiques sont caractérisées par une forte résistance aux chocs et à la ténacité par

rapport aux résines thermodurcissables. La capacité à être facilement recyclés et reformés c'est 'un autre avantage majeur des composites thermoplastiques, ce qui est très appréciée sur le marché commercial actuel. Toutefois, il convient de noter que l'imprégnation des fibres de renforcement dans les résines thermoplastiques est beaucoup plus difficile car les résines sont naturellement à l'état solide. Parmi les exemples de résines thermoplastiques, on peut citer l'acrylonitrile butadiène-styrène, le chlorure de polyvinyle, le PP, le PE, le PS, le polyamide (nylon), le polycarbonate, et ainsi de suite [8].

2.2.2. Résine thermodurcissables : est un polymère sous forme liquide qui se transforme irrémédiablement en une matière infusible et insoluble par durcissement [9]. Le processus de recyclage des composites thermodurcissables est très difficile car la résine thermodurcissable n'est pas recyclable en soi. Les résines thermodurcissables sont fragiles et ont une faible résistance à la rupture et une faible élasticité ou allongement une fois durcies. Elles offrent également une grande stabilité thermique, une bonne rigidité, résistance aux solvants et aux agents corrosifs, résistance au fluage, résistance chimique et grande stabilité dimensionnelle. Les résines thermodurcissables les plus couramment utilisées dans la fabrication de composites sont le polyester, l'époxy, le vinyle et le polystyrène, le polyuréthane, le silicone, le polyamide et le polyamide-imide.

Il existe plusieurs types résines thermoplastiques et thermodurcissables sur le marché et les plus courants sont présentés dans les Tableaux 1 et 2.

Tableau 1. Propriétés du la résine thermoplastique [10].

Propriétés	PP	LDPE	HDPE	PS	PLA
Densité (g/cm ³)	0.899-0.920	0.910-0.925	0.94-0.96	1.04-1.06	1.252
Absorption d'eau-24h (%)	0.01-0.02	< 0.015	0.01-0.2	0.03-0.10	N/A
T _g (C)	10 à 23	125	133 à 100	N/A	55
T _m (C)	160-176	105-116	120-140	110-135	165
Température de déviation thermique (C)	50-63	32-50	43-60	Max.220	55
Coefficient de dilatation thermique (mm/mm/C10 ⁵)	6.8-13.5	10	12-13	6-8	N/A
Résistance à la traction (MPa)	26-41.4	40-78	14.5-38	25-69	59
Modules élastiques (GPa)	0.95-1.77	0.055-0.38	0.4-1.5	4-5	3.5
Allongement (%)	15-700	90-800	2.0-130	1-2.5	7
Résistance aux chocs Izod (J/m)	21.4-267	> 854	26.7-1068	1.1	26

Tableau 2. Propriétés du la résine thermodurcissable [10].

Propriétés	Polyester	Vinylester	Epoxy
Densité (g/cm ³)	1.2-1.5	1.2-1.4	1.1-1.4
Absorption d'eau-24h (%)	0.1-0.3	0.1	0.1-0.4
Résistance à la traction (MPa)	40-90	69-83	35-100
Modules élastiques (GPa)	2-4.5	3.1-3.8	3-6
Allongement (%)	2	4-7	1-6
Résistance aux chocs Izod (J/m)	0.15-3.2	2.5	0.3
Résistance à la compression (MPa)	90-250	100	100-200
Rétrécissement à la polymérisation (%)	4-8	N/A	1-2

2.3. Le renfort

Le rôle fondamental du renforcement est d'augmenter les propriétés mécaniques de la matrice. Dans un composite à matrice polymère, le renforcement peut être soit des fibres synthétiques (verre, carbone, Kevlar, etc.) ou des fibres naturelles (jute, sisal, banane, bambou, etc.). Les fibres synthétiques ayant une faible densité et une résistance spécifique élevée par rapport aux fibres naturelles et ont été largement utilisés dans les industries aérospatiales. Les fibres naturelles sont des matériaux biologiques abondants et renouvelables. Les propriétés (faible densité, abondance et résistance spécifique élevée) des fibres naturelles en font des matériaux bio sources abondants et renouvelables et en font un meilleur substitut aux fibres synthétiques pour des raisons environnementales [11].

2.3.1. Fibres synthétiques

Les fibres synthétiques sont des matériaux en forme de fil inventés par des chercheurs humains et inexistantes dans la nature [12]. Les types de fibres synthétiques comprennent l'acier, l'amiante, le basalte, l'alcool polyvinylique (PVA), le polypropylène (PP), le verre, le nylon et l'aramide, le polyéthylène, le polyester, le polyéthylène téréphtalate, l'acrylique et les nano-fibres de carbone [13].

2.3.2. Fibres naturelles

Les fibres naturelles proviennent d'animaux, de plantes et de processus géologiques [14]. Ces fibres sont généralement bon marché, légères, largement disponibles, non dangereuses, biodégradables et ont une résistance à la traction adéquate [15]. Les fibres naturelles à base de plantes, telles que le lin, le jute, le coco, le chanvre, le coton et le sisal (Figure 2), sont considérées comme des matériaux de remplacement durables dans les matrices cimentaires et ont montré une tendance croissante à l'utilisation dans l'industrie et la recherche [16]. Les

avantages attrayants des fibres naturelles comprennent une faible consommation d'énergie pendant la production et un impact positif sur l'environnement [16].

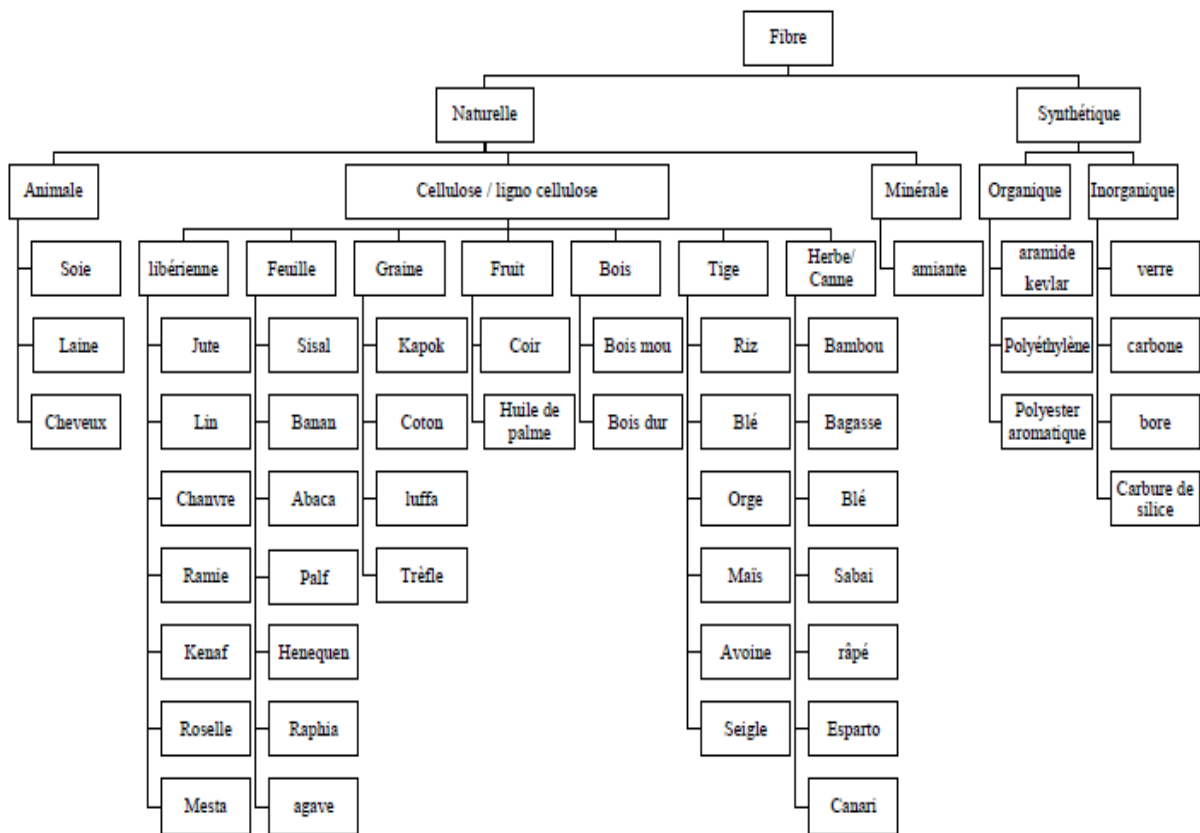


Figure 2. Classification des fibres de renfort des composites [17].

2.3.3. Types de renforts et architectures

Il existe des renforts de différentes natures et à différentes échelles. Parmi les renforts les plus fréquents, on trouve :

- Les additifs : souvent sous la forme de poudres micro ou millimétriques, qui n'ont pas pour but de renforcer réellement la matrice, mais de lui ajouter des fonctionnalités (retard au feu, protection contre les UV, etc.)
- Les charges ponctuelles : à une échelle un peu plus grande (millimétrique), comme le sable ou les graviers qui constituent certains bétons.
- Les fibres courtes (centimétriques), dont l'orientation souvent aléatoire conduit à l'obtention d'un matériau qui peut être considéré comme homogène et isotrope à une certaine échelle.
- Les fibres longues ou continues, dont l'orientation est le plus souvent contrôlée pour renforcer des directions privilégiées [18].

Pour améliorer les propriétés mécaniques, les renforts de type "fibre" sont très couramment utilisés. Afin de faciliter leur manipulation, on utilise également des différentes architectures de tissage, permettant de disposer les renforts ayant souvent un élanement très élevé, selon des configurations bien spécifiques. Parmi ces architectures, dont certaines sont représentées sur la [Figure 3](#) on peut citer :

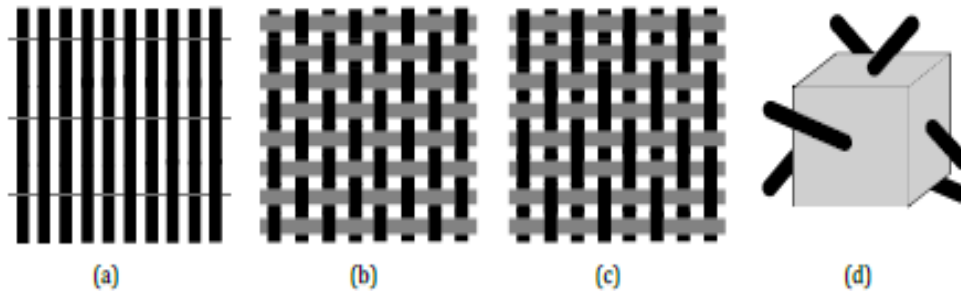


Figure 3. Exemple d'architectures de renfort : a) Tissu quasi-unidirectionnel, b) Tafta, c) sergé et d) Tissu 3d.

- Les mats : il s'agit d'un assemblage de fibres courtes non tissées maintenues par enchevêtrement (et éventuellement une faible quantité de matrice ou de liant).
- Les rovings : il s'agit de mèches de fibres unidirectionnelles de faible largeur.
- Les unidirectionnels : Dans une nappe UD, les fibres sont assemblées parallèlement les unes par rapport aux autres à l'aide d'une trame très légère. Taux de déséquilibre très grand. Les tissus se composent de fils de chaîne et de trames perpendiculaires entres eux.
- Les tissus bi-axiaux : tissage architecturé de mèches de fibres unidirectionnelles. Il existe différents tissages identiques à ceux que l'on peut trouver dans l'industrie textile. Le tissage tafta, sergé ou satin en sont trois exemples. Ces tissages permettent de renforcer deux directions perpendiculaires.
- Les tissus multiaxiaux : pour permettre de renforcer un plus grand nombre de directions, on peut utiliser des tissus 3D ou 4D, dont l'architecture est plus complexe.

Il est possible d'élaborer différentes architectures de matériaux composites, avec des niveaux de performance très différents et/ou de renforcer des directions privilégiées en jouant sur l'orientation des fibres. La [Figure 4](#) présente quatre configurations fréquemment rencontrées,

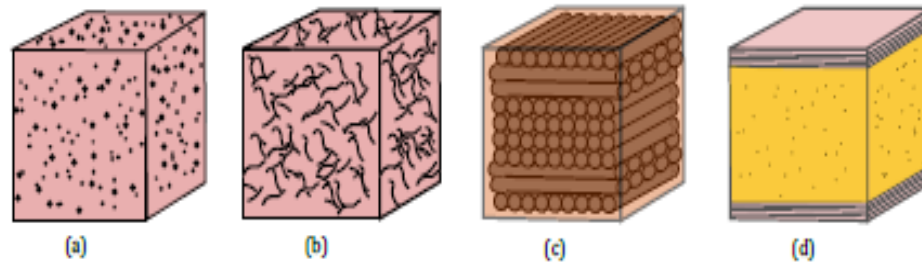


Figure 4. Architectures courantes de matériaux composites : a) composite chargé, b) composite fibres courtes, c) composite stratifié à plis unidirectionnels et d) structure sandwich. [18]

3. Fibres naturelles, leurs structures et leurs caractéristiques

3.1. Source des fibres

Les plantes, qui produisent des fibres naturelles, sont classées comme primaires et secondaires en fonction de leur utilisation. Les plantes primaires sont celles qui sont cultivées pour leur contenu en fibres tandis que les plantes secondaires sont des plantes dans lesquelles les fibres sont produites comme sous-produit. Le jute, le chanvre, le kenaf et le sisal sont des exemples de plantes primaires. L'ananas, le palmier à huile et le coco sont des exemples de plantes secondaires [19]. La Figure 5(a) indique la production relative de fibres végétales par différents pays, la Chine étant en tête de liste. La consommation mondiale de fibres naturelles est également représentée dans la Figure 5(b), cette dernière montre que la consommation de fibres de lin est la plus élevée, suivie par le jute, la noix de coco, les autres légumes, le sisal et le chanvre. Le lin a le contenu cellulosique le plus élevé et possède donc une grande résistance, c'est la raison de sa plus grande consommation [20].

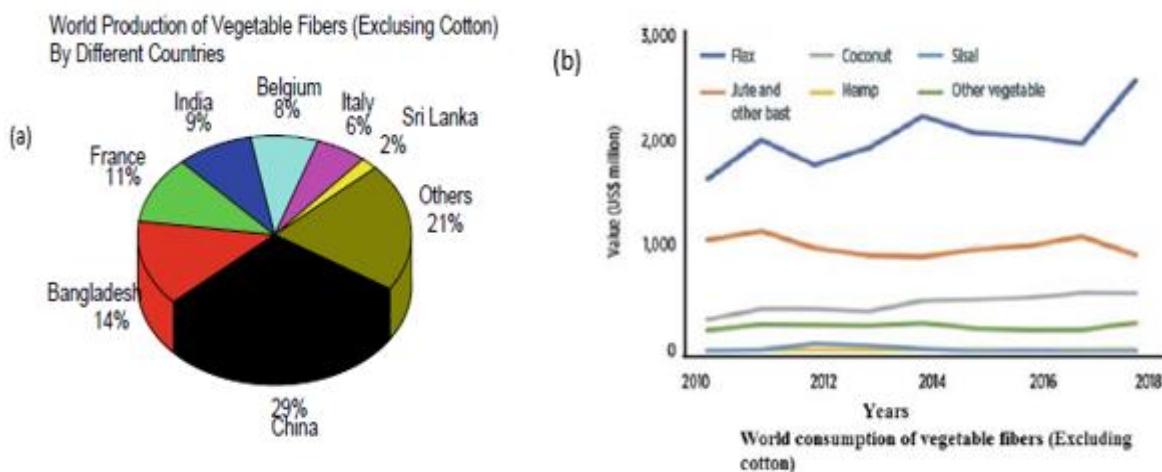


Figure 5. (a) Pourcentage relatif de la production des FV par les différentes nations, (b) Consommation mondiale de fibres naturelles [20].

3.2. Types des fibres

Les fibres naturelles ne sont ni synthétiques ni fabriquées par l'homme ; elles sont d'origine végétale ou animale. Elles peuvent être utilisées comme renfort ou comme charge [21]. Les fibres naturelles sont subdivisées en trois grands groupes selon leur origine, animale, végétale et minérale. Dans cette étude, nous nous intéressons uniquement aux fibres naturelles d'origine végétale en particulier la fibre luffa. Les fibres végétales telles que le jute, le kenaf, le lin, la ramie, le sisal et le chanvre sont couramment utilisées dans les textiles et autres applications industrielles [22].

Les fibres naturelles gagnent de plus en plus d'attention dans les industries composites, en raison de leurs propriétés spécifiques et de leurs avantages environnementaux [23]. C'est dans cette direction qu'Ashby [24] a mis en place un diagramme qui consiste à optimiser deux indices de performance : la rigidité spécifique et la contrainte spécifique. L'objectif est de trouver un bon compromis entre ces deux indices afin de classer et sélectionner les matériaux. Les données d'un diagramme d'Ashby [24] sur les fibres naturelles, confirment que les fibres végétales et plus précisément les fibres libériennes (Lin, chanvre, jute) possèdent une rigidité spécifique supérieure à celle des fibres de verre. La résistante spécifique reste meilleure pour le verre. D'après le diagramme d'Ashby, le lin et le chanvre semblent être des bons concurrents pour le verre dans le domaine des composites. (Figure 6).

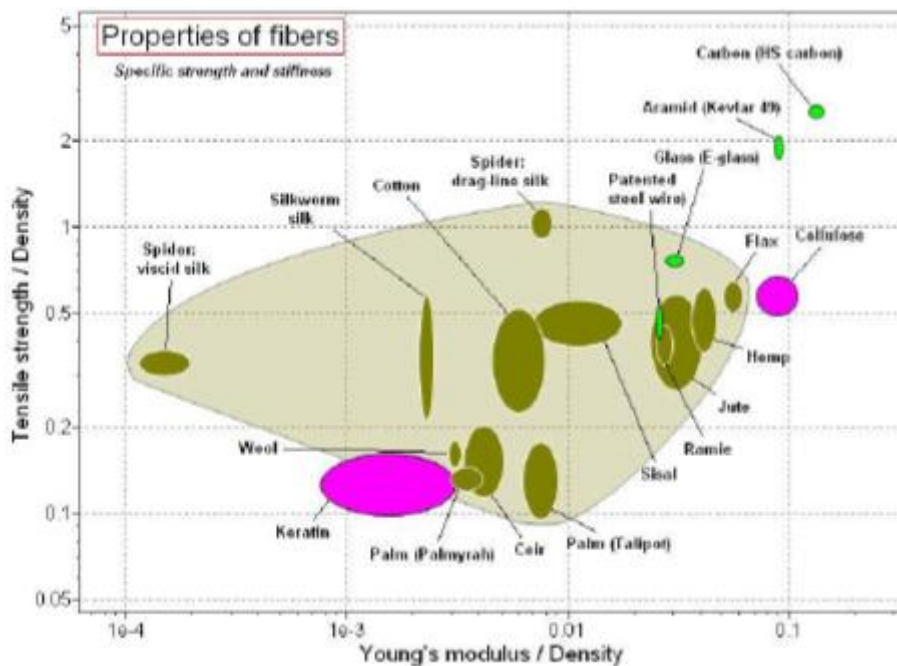


Figure 6. Diagramme d'Ashby comparant les performances mécaniques spécifiques des fibres naturelles comparées aux fibres synthétiques. [24].

La densité des fibres naturelles est inférieure à celle de la fibre de verre, ce qui donne des composites appelés fibres légères. Par conséquent, la consommation industrielle des CPFN dans différents secteurs manufacturiers a pris de l'ampleur [25]. En général, les fibres ayant un rapport longueur/diamètre et une teneur en cellulose plus élevés ont des propriétés mécaniques supérieures [26].

3.3. Présentations quelques fibres végétales

Les chercheurs ont effectué des travaux sur les composites renforcés avec diverses fibres naturelles en fonction de leurs l'application. Ils ont également mis en œuvre des différentes techniques comme la caractérisation après la préparation de l'échantillon, l'évaluation des propriétés physiques, mécaniques et autres propriétés pertinentes pour convenir à l'application ciblée. Beaucoup d'auteurs et de chercheurs ont trouvé l'utilisation principale des fibres naturelles des composites polymères sous l'application du renforcement par l'addition des fibres de jute et de kenaf qui a lieu pour l'augmentation de l'économie. Les résultats montrent qu'elles sont moins dangereuses que les fibres synthétiques [27].

Dans cette partie on donne une description sur les fibres naturelles les plus couramment utilisées.

- **Fibre de lin**

Le lin, (*Linum usitatissimum*), appartient aux fibres libériennes (Figure 7(a)). Il est cultivé dans les régions tempérées et est l'une des plus anciennes récoltes de fibres au monde. C'est une plante annuelle dont la tige atteinte de 0.6 à 1.2 m de hauteur pour un diamètre de 1 à 3 mm. Le lin textile est une culture septentrionale, on le trouve en Russie, en Pologne, en Belgique et en France (principalement en Normandie). Le lin est soit coupé, soit arraché. On récupère la matière textile qui se trouve être la tige de la plante, sous forme de faisceaux qui constituent la fibre. Cela requiert trois opérations : le rouissage, le teillage et le peignage. Les fibres libériennes du lin sont le plus souvent utilisées sur les marchés textiles à forte valeur ajoutée. Aujourd'hui, elle est largement utilisée dans le domaine des composites [22].

- **Fibre de Chanvre**

Une autre variété remarquable de fibre libérienne est le chanvre (*cannabis sativa*) comme montré dans la Figure 7(b), qui appartient à la famille des Cannabid. Il s'agit d'une plante annuelle dont la hauteur varie de 1 à 3 m, qui pousse dans les climats tempérés.

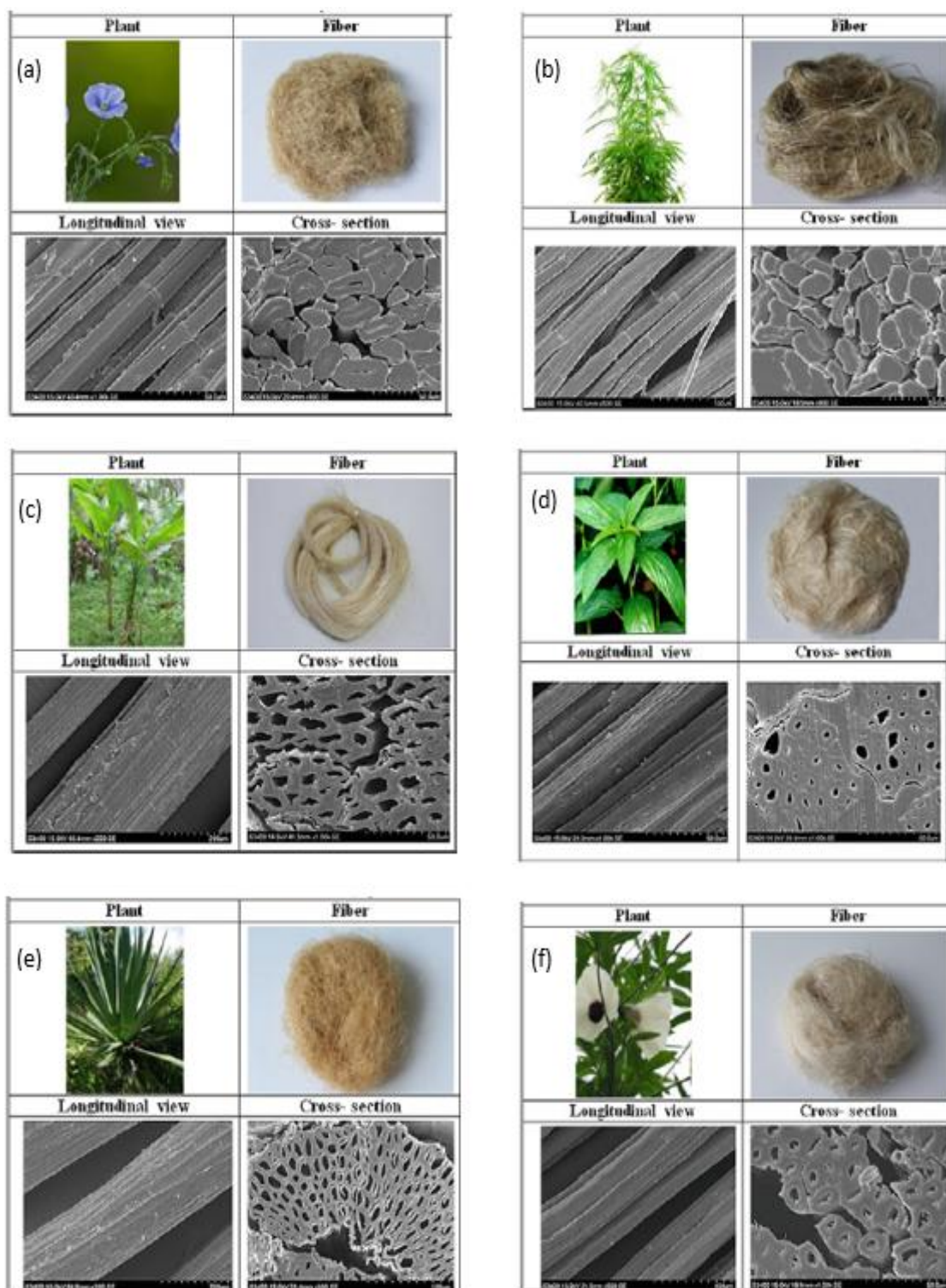


Figure 7. Fibres naturelles les plus couramment utilisées [28].

Le chanvre fait actuellement l'objet d'une subvention de l'Union européenne pour l'agriculture non alimentaire, et une initiative considérable est en cours pour son développement en Europe, on en trouve dans l'est de l'Europe en France et en Italie. Le processus d'obtention de la fibre du chanvre est identique à celui du lin. La fibre ultime est moins régulière, plus aplatie

et légèrement plus lignifiée que celle du lin. Les fibres de chanvre sont très recherchées comme renfort dans les composites à matrice thermoplastique à cause de sa grande rigidité et de son intérêt économique. Elles sont appliquées dans les structures internes, les pièces automobiles et les matériaux de construction [22].

- **Fibre d'abaca**

L'abaca (*Musa textiles nee*) appartient à la famille des bananiers. L'abaca est une fibre de feuille, composée de longues cellules minces qui font partie de la structure de soutien de la feuille (Figure 7(c)). La plante d'abaca est composée d'environ 12 à 30 tiges qui rayonnent à partir d'un système racinaire central [29]. La fibre d'abaca est extraite de la gaine de la feuille de manière traditionnelle par arrachage manuel ou mécanique. Le processus de décortication permet d'obtenir beaucoup plus de fibres des feuilles, par exemple 3-3,5 % par rapport à l'extraction manuelle, où il est possible de récupérer environ 1 % des fibres. Après l'effeuillage ou la décortication, les rubans de fibres, qui peuvent mesurer jusqu'à 3 m de long, sont suspendus pour sécher. Les fibres d'abaca sont traitées de la même manière que d'autres fibres dures comme le sisal [30].

- **Fibre de Jute**

Les jutes sont des arbustes de 2 à 4 m de haut, à tige rigide et fibreuse de 2 cm de diamètre environ, (Figure 7(d)). Les feuilles, longuement pétiolées, à limbe triangulaire font 10 à 15 cm de long sur 5 cm de large. Le jute se situe en sud-est asiatique. Les principaux producteurs sont l'Inde, le Bangladesh et la Chine. Le jute est produit à partir de plantes du genre *Corchorus*, qui comprend une centaine d'espèces. C'est l'une des fibres naturelles les moins chères et c'est actuellement la fibre libérienne dont le volume de production le plus élevé. Le Bangladesh, l'Inde et la Chine offrent les meilleures conditions pour la croissance du jute [22]. Les composites à matrice thermoplastique renforcée par des fibres de jute ont été utilisés dans l'industrie en Allemagne pour fabriquer les portes en panneaux composites.

- **Fibre de Sisal**

Les feuilles de sisal poussent jusqu'à 1.5-2 m de hauteur, ce qui produit environ 25 feuilles utilisables au cours d'une vie de 7 ans. La fibre naturelle la plus utilisée est le sisal, qui est originaire du sud du Mexique et du Brésil, qui sont de grands producteurs de sisal. Le sisal a une racine fibreuse, qui pousse sur des terrains vagues et est cultivé dans des sols peu enrichis

[31]. La plante ressemble à un énorme ananas. Après la récolte, les feuilles sont enlevées et les fibres sont produites après plusieurs traitements tels que le séchage, le brossage et l'élimination de la saleté. Les fibres de sisal sont durables ; elles ont une faible charge d'entretien, sont biodégradables, n'absorbent pas l'humidité, ont un bon son et d'excellentes propriétés d'absorption des impacts [32]. Le sisal permet l'utilisation de fibres végétales rigides dans l'industrie automobile, les vêtements, les chaussons et les tapis. La Figure 7(e) montre le sisal et sa fibre.

- **Fibre de Kenaf**

Le kénaf est généralement appelé kénaf industriel en raison de son grand intérêt pour la production de matières premières industrielles. La fibre de kénaf appartient à l'espèce *Hibiscus cannabinus*, dont le genre est *Hibiscus* et la famille *Malvaceae* (Figure 7(f)), obtenue à partir de tiges de plantes [33] qui comprennent également le coton (*Gossypium* spp.) et le gombo (*Abelmoschus esculentus* L. Moench). Le kenaf est une plante dicotylédone sauvage des régions subtropicales et tropicales d'Afrique et d'Asie. Le mot kenaf est d'origine perse et explique que la plante a des jours courts, une saison chaude et une plante herbacée annuelle [34]. Le kenaf est une plante résistante, solide et dure avec une tige fibreuse, résistant aux dommages causés par les insectes et nécessitant relativement peu ou pas de produits chimiques [35]. Le kenaf est comparativement disponible dans le commerce et économiquement bon marché parmi les autres matériaux de renforcement en fibres naturelles.

Les propriétés des fibres naturelles sont différentes, parce que différentes fibres ont été utilisées, différentes conditions d'humidité étaient présentes, et différentes méthodes de test ont été employées. Les performances des composites polymères renforcés par des fibres naturelles dépendent de plusieurs facteurs, notamment la composition chimique des fibres, les dimensions des cellules, l'angle des micro-fibrilles, les défauts, la structure, les propriétés physiques et les propriétés mécaniques, ainsi que l'interaction d'une fibre avec le polymère. Afin de développer l'utilisation des fibres naturelles pour les composites et d'améliorer leurs performances, il est essentiel de connaître les caractéristiques des fibres. La gamme des valeurs caractéristiques, qui est l'un des inconvénients de tous les produits naturels, est remarquablement plus élevée que celle des fibres de verre, ce qui peut s'expliquer par des différences dans la structure de la fibre dues aux conditions environnementales globales pendant la croissance. Les fibres naturelles peuvent être traitées de différentes manières pour produire des éléments de renforcement aux propriétés mécaniques différentes. Les propriétés mécaniques des fibres naturelles peuvent être influencées par de nombreux facteurs [36].

Le [Tableau 3](#) présente les principales propriétés physicomécaniques des fibres naturelles couramment utilisées.

Tableau 3. Propriétés physico-mécaniques de fibres végétales comparées aux renforts synthétiques [\[36\]](#).

Fibres	Masse volumique (g/cm ³)	Resistance (MPa)	Module d'Young (GPa)	Allongement (%)
Lin	1.4	88-1500	60-80	1.2-1.6
Chanvre	1.48	550-900	70	1.6
Jute	1.46	400-800	10-30	1.8
Ramie	1.5	500	44	2
Coir	1.25	220	6	15-25
Sisal	1.33	600-700	38	2-3
Abaca	1.5	980	-	-
Cotton	1.51	400	12	3-10
Kenaf (bast)	1.2	295	-	2.7-6.9
Banana	1.35	355	33.8	53
Coco	1.2	175	4-6	30
Verre-E	2.5	2000-3500	70	2.5
Verre-S	2.5	4570	86	2.8
Aramide	1.4	3000	63-67	3.3-3.7

3.4. Structure de la fibre végétale

Les fibres végétales ont une structure très complexe, comme montre dans la [Figure 8](#). Les fibres simples sont connectées par la lamelle centrale, une substance composée de pectine, qui fonctionne comme une colle [\[37\]](#). Les fibres simples sont constituées de deux parois importantes, la paroi primaire et la paroi secondaire ; ces parois entourent un canal rempli de protéines et de pectine appelé lumen [\[37\]](#). La paroi primaire possède une structure rigide de micro fibrilles de cellulose dans un réseau d'hémicellulose, de composés de pectine et de glycoprotéine. Alors que la paroi secondaire est la plus grande avec une structure à trois couches (S1, S2, S3). Toutes ces couches sont constituées de cellulose, d'hémicellulose et de lignine. La couche intermédiaire (S2) forme la plus grande partie de la fibre (environ 70-80% de la masse) [\[38\]](#). Ainsi, l'attribut le plus élevé d'une fibre unique est contrôlé par la couche S2, et il détermine la résistance mécanique globale [\[39\]](#).

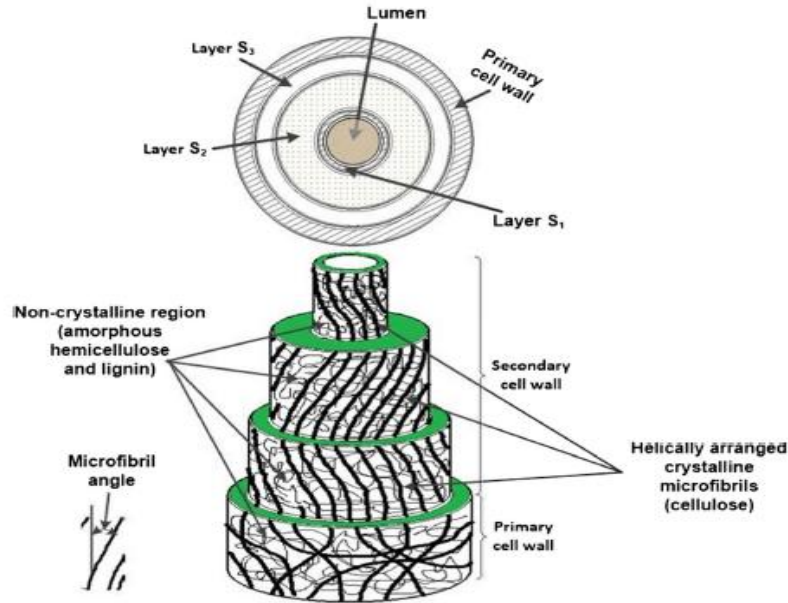


Figure 8. Structure de la fibre naturelle [40].

Les grandes variations dans la structure et les dimensions des fibres naturelles, la densité des fibres (rapport paroi cellulaire-lumen) et l'angle des microfibrilles (AMF), affectent directement leurs propriétés mécaniques. Les propriétés mécaniques des CRFN dépendent des propriétés mécaniques inhérentes de ces fibres naturelles [41]. Comme le montre la Figure 9(a), les fibres à haute densité présentent souvent une résistance et une rigidité élevées par rapport à celles à faible densité. D'autre part, les fibres naturelles à fort AMF présentent généralement une grande déformation plastique et donc une grande ténacité [42].

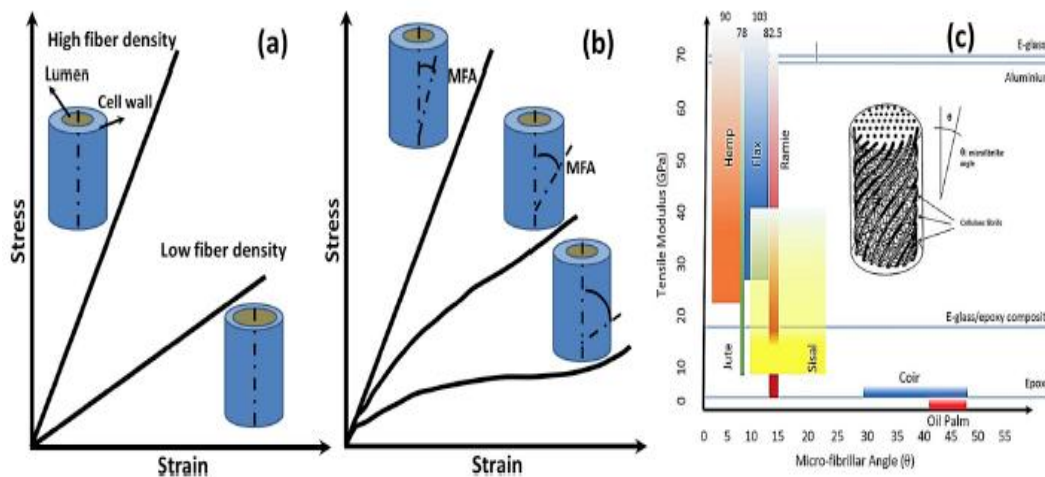


Figure 9. Influence de la densité des fibres (a) et de l'angle des micro-fibrilles (AMF) (b) sur les propriétés mécaniques des fibres naturelles [43], et (c) Module de traction de différentes fibres naturelles en fonction de leur angle de microfibrille [44].

De même, le module d'élasticité des fibres naturelles dépend fortement de l'AMF et un faible AMF donne des fibres plus rigides ([Figure 9\(b\)](#) et [\(c\)](#)), car un faible AMF permet l'orientation des fibrilles de cellulose presque parallèlement à l'axe de chargement et peut donc supporter plus de charge, ce qui conduit à une rigidité accrue. Cependant, ces fibres à faible AMF présentent un comportement fragile en raison de leur rigidité élevée. D'autre part, les fibres naturelles à fort AMF présentent généralement une grande déformation plastique et donc une grande ténacité [\[42\]](#).

3.5. La composition chimique de la fibre végétale

La composition chimique varie d'une plante à l'autre et dans différentes parties d'une même plante, en fonction du degré de maturité de la plante, de la géomorphologie de cette dernière [\[45\]](#) et de l'organe d'origine de la fibre. De plus, la composition chimique ainsi que la structure de la fibre sont assez complexes. La fibre végétale est un matériau composite conçu par la nature. La plupart, à l'exception du coton, sont composées de cellulose, d'hémicellulose, de lignine, de cires et de certains composés hydrosolubles, la cellulose, l'hémicellulose et la lignine étant les principaux constituants [\[46\]](#), comme montre dans la [Figure 10](#).

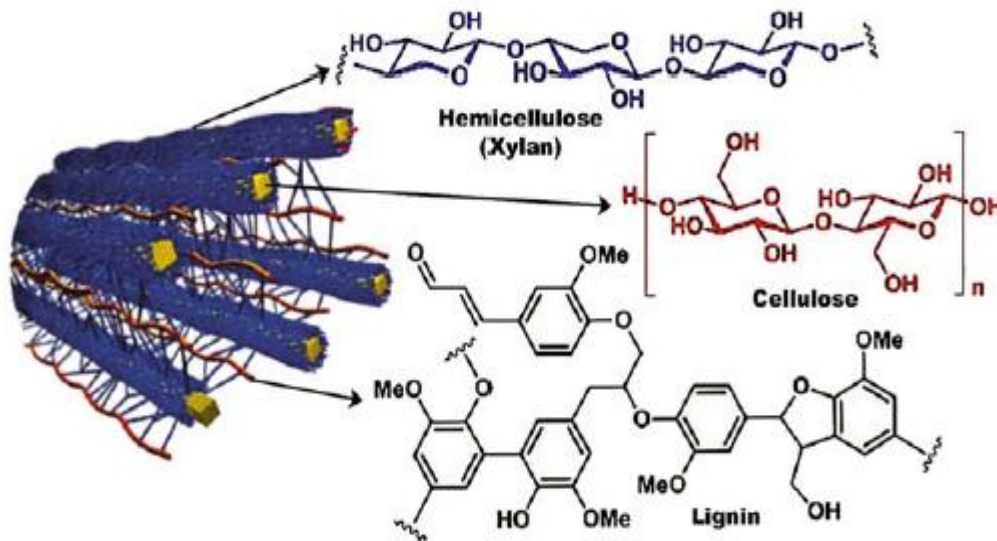


Figure 10. Structure de la ligno-cellulose [\[47\]](#)

- **La cellulose**

La cellulose est un composant structurel important des fibres naturelles. C'est le polymère organique le plus abondant sur terre [\[48\]](#). D'un point de vue chimique, la cellulose est une macromolécule constituée par une très longue chaîne stéréo-régulière composée de maillons de

glucose $C_6H_{12}O_6$. La façon dont les unités de glucose sont liées dans le polymère linéaire détermine les propriétés de la cellulose [47]. La cellulose, qui est constituée de milliers d'unités de glucose, peut s'empiler pour former des formes cristallines avec des liaisons hydrogène intramoléculaires fournissant un polymère stable avec une grande résistance à la traction. Les groupes hydroxyle et leur capacité à former des liaisons hydrogène jouent un rôle majeur dans l'orientation du réseau cristallin et régissent les propriétés physiques de la cellulose [47]. Outre les régions ordonnées ou cristallines de la cellulose, il existe d'autres régions moins ordonnées, ou régions amorphes. Ces différences peuvent avoir une influence considérable sur les caractéristiques et la fonctionnalité de la fibre [47]. Le pourcentage de cellulose varie d'une fibre à l'autre. Les fibres de cellulose sont utilisées brutes pour la fabrication de la pâte à papier ou employées après transformation. Dans l'industrie, elles sont utilisées pour la fabrication de matières plastiques, elles sont utilisées également pour la fabrication de fibres textiles artificielles.

- **Hémicellulose**

Après la cellulose, l'hémicellulose est considérée comme l'hydrate de carbone le plus abondant dans les parois cellulaires des plantes. L'hémicellulose est composée d'une association de groupes très hétérogènes de polysaccharides, dont la structure et la composition diffèrent selon leur origine. Les polysaccharides non cellulotiques tels que les glucanes $(C_6H_{12}O_6)_n$, les mannanes $(C_6H_{12}O_6)_n$, les galactanes $(C_6H_{12}O_6)_n$, les arabinanes $(C_5H_{10}O_5)_n$ et les xylanes $(C_5H_{10}O_5)_n$ représentent l'hémicellulose [47]. Les hémicelluloses non linéaires sont associées aux pectines, aux constituants aromatiques et à la cellulose dans les parois cellulaires des plantes [47]. Elles représentent la matrice de support des micro-fibrilles de cellulose. Contrairement à la cellulose, les chaînes d'hémicellulose sont ramifiées et beaucoup plus courtes que la cellulose [49].

- **Lignine**

La lignine est la seconde substance organique renouvelable la plus présente sur la terre après la cellulose. La lignine est un copolymère tridimensionnel complexe constitué de composés aromatiques et aliphatiques de très haut poids moléculaire. Il s'agit d'un matériau amorphe et hydrophobe dans la nature. Sa chimie n'a pas encore été établie avec précision, mais la plupart de ses groupes fonctionnels et des unités structurales de la macromolécule ont été identifiés. Elle est caractérisée par une forte teneur en carbone mais une faible teneur en hydrogène. La lignine confère force et rigidité aux parois cellulaires en plus d'une protection contre les

pathogènes microbiens. La teneur en lignine dans les plantes est très variable car elle dépend souvent de la méthode d'analyse. Les lignines sont intimement associées à l'hémicellulose et à la cellulose dans les parois cellulaires des plantes [47].

- **Matières extractibles**

Ces matériaux sont considérés non structurels, ils ne forment pas la structure de base de la paroi comme la cellulose, l'hémicellulose et la lignine. Néanmoins, ils ont un effet considérable sur les matériaux ligno-cellulosiques. Ces substances chimiques naturelles peuvent être éliminées ou extraites du matériel végétal à l'aide d'un traitement chimique relativement doux, car elles sont généralement solubles dans l'eau et/ou les solvants organiques. La composition extractible varie selon l'espèce considérée et influence la couleur et l'odeur [49].

Le [Tableau 4](#) montre les propriétés de la composition chimique (cellulose, hémicelluloses, lignine, pectine, humidité et cire) des fibres naturelles.

Tableau 4. Composition chimique de certaines fibres végétales [36].

Fibres	Celluloses (wt%)	Hemicelluloses (wt%)	Lignines (wt%)	Pectines (wt%)
Lin	60-81	14-18.6	2-3	1.8-2.3
Jute	51-72	12-20.4	5-13	0.2
Sisal	43-88	10-12	4-12	0.8-2
Chanvre	70-78	17.9-22	3.7-5	0.9
Kenaf	36	21	18	2
Ramie	68.6-76	13.1-15.0	0.6-1	1.9-2
Coton	82.7-90	2-5.7	0.5-1	5.7
Bois	45-50	23	27	-
Palmier dattier	41-45	6-10	30-40	-

La [Figure 11](#) montre que les propriétés mécaniques des composites renforcées en fibres naturelles dépendent fortement des constituants chimiques des fibres, notamment la cellulose cristalline, la cellulose non cristalline, l'hémicellulose et la lignine [50], qui affectent directement les paramètres modules et la contrainte de la fibre. Les fibres ont la tendance à se dégrader avec une forte proportion d'hémicellulose. D'autre part, l'augmentation de la cellulose cristalline permet d'améliorer la résistance de la fibre.

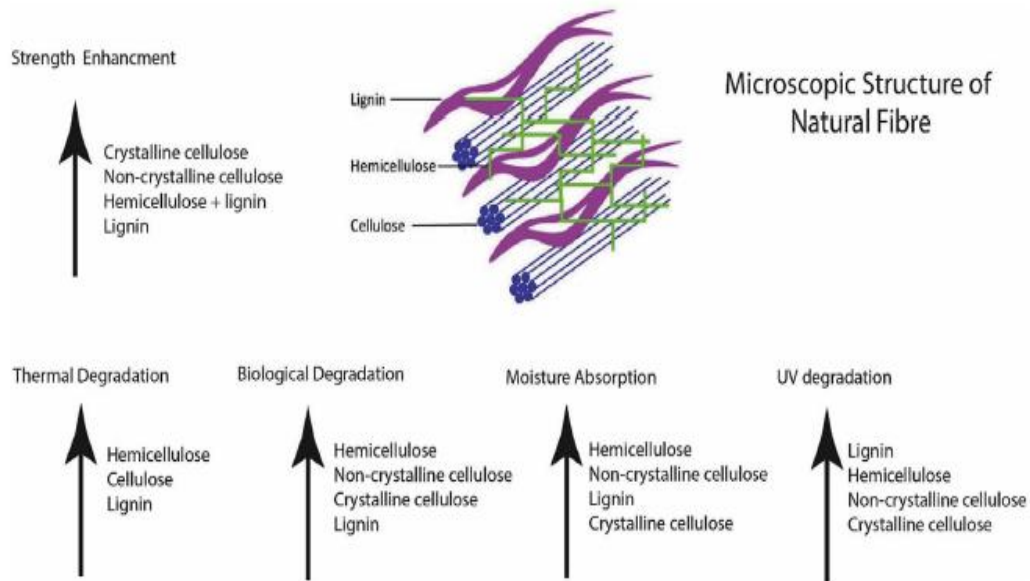


Figure 11. Les propriétés des fibres naturelles influencées par leurs constituants chimiques [51].

3.6. Modifications des fibres naturelles

Les fibres naturelles ont la tendance à absorber l'eau en raison de leur richesse en cellulose et de leur nature hydrophile. De nombreux chercheurs ont observé que la teneur en humidité provoquait une dégradation significative des composites renforcés par des fibres naturelles en provoquant des fissures dans les matrices fragiles. Afin de surmonter la teneur en humidité et d'améliorer la force d'adhérence, il est donc essentiel d'appliquer un traitement à la surface, que ce soit physiquement ou chimiquement. Le traitement des fibres élimine partiellement la lignine, l'hémicellulose, les cires et autres impuretés. Cependant, il y a moins de chance que l'humidité pénètre dans le matériau en réduisant la teneur en vide des composites et en améliorant l'adhésion entre les fibres et la matrice. Il existe actuellement diverses techniques de modification de la surface des fibres naturelles, qui permettent d'améliorer leurs propriétés. Les principales techniques utilisées pour le traitement et la modification des fibres sont présente dans la [Figure 12](#).

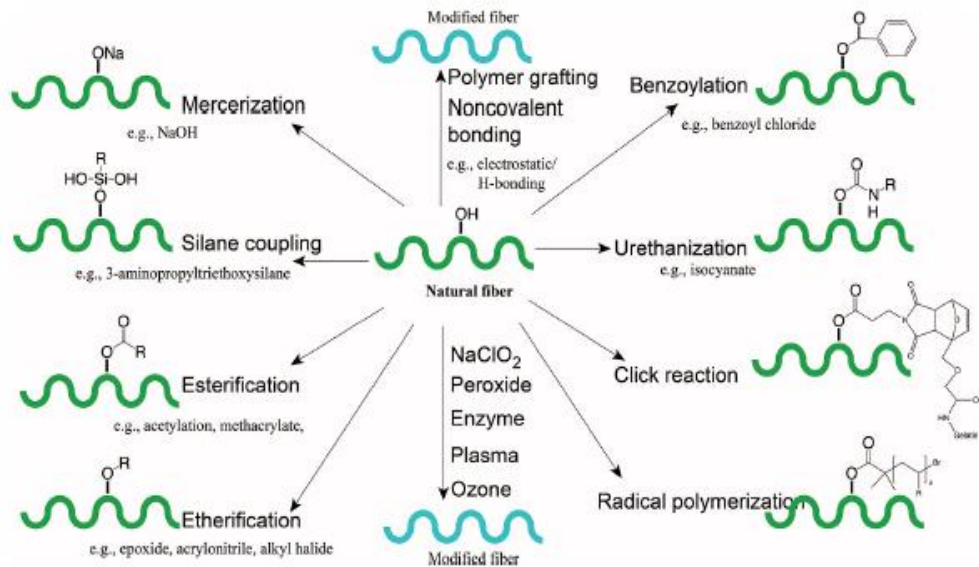


Figure 12. Exemples des méthodes de traitement et de modification des fibres naturelles [52].

3.6.1. Méthodes chimiques

Les fibres de cellulose, qui sont fortement polarisées, sont intrinsèquement incompatibles avec les polymères hydrophobes en raison de leur nature hydrophile. Dans de nombreux cas, il est possible d'induire la compatibilité de deux matériaux incompatibles en introduisant un troisième matériau qui a des propriétés intermédiaires entre celles des deux autres. Il existe plusieurs mécanismes de couplage dans les matériaux (par exemple, la mouillabilité, la liaison chimique et l'effet acide-base). Le développement d'une théorie définitive pour le mécanisme de liaison utilisant des agents de couplage dans les composites est un problème complexe. La théorie principale de la liaison chimique n'est pas suffisante à elle seule. La prise en compte d'autres concepts semble donc nécessaire. Ceux-ci incluent la morphologie de l'interphase, les réactions acide-base dans l'interface, l'énergie de surface et les phénomènes de mouillage [22].

- **Traitement Alcalin**

Le traitement alcalin en raison de sa rentabilité, est l'un des traitements chimiques les plus populaires. Ce traitement élimine les constituants des fibres tels que la cire, la pectine, l'huile, la lignine et l'hémicellulose de la surface et augmente également la rugosité de la surface (forme une surface poreuse) améliorant ainsi la liaison avec la matrice [53]. Le succès du traitement dépend du temps de traitement, de la température, du type de solution alcaline et de sa concentration [54]. Il peut être vu sur la Figure 13(a), que les fibres de chanvre telles

qu'elles sont reçues ont une couche protectrice de surface principalement composée d'huile et de cire. Cependant, après le traitement au NaOH, ces impuretés sont éliminées de la surface de la fibre et améliorent ainsi sa compatibilité avec les matrices polymères. On a également constaté que la mercerisation augmentait ou diminuait la cristallinité de la cellulose en fonction de la sévérité du traitement et qu'une cristallinité accrue pouvait améliorer la résistance des fibres [55].

- **Traitement au silane**

L'énergie de surface des fibres est étroitement liée à la nature hydrophile de la fibre. Certaines recherches portent sur des méthodes permettant de diminuer l'hydrophilie. Les agents de couplage silane peuvent contribuer aux propriétés hydrophiles de l'interface. Le primaire peut fournir beaucoup plus de fonctionnalité qui peut éventuellement réagir avec la résine dans l'interphase. Ces amines, qui ne peuvent pas réagir, sont hydrophiles et donc responsables de la mauvaise résistance à l'eau des liaisons. Une façon efficace d'utiliser les silanes hydrophiles est de les mélanger avec des silanes hydrophobes tels que le phényltriméthoxy silane. Les apprêts à base de siloxanes mélangés présentent également une meilleure stabilité thermique, ce qui est typique des silicones aromatiques.

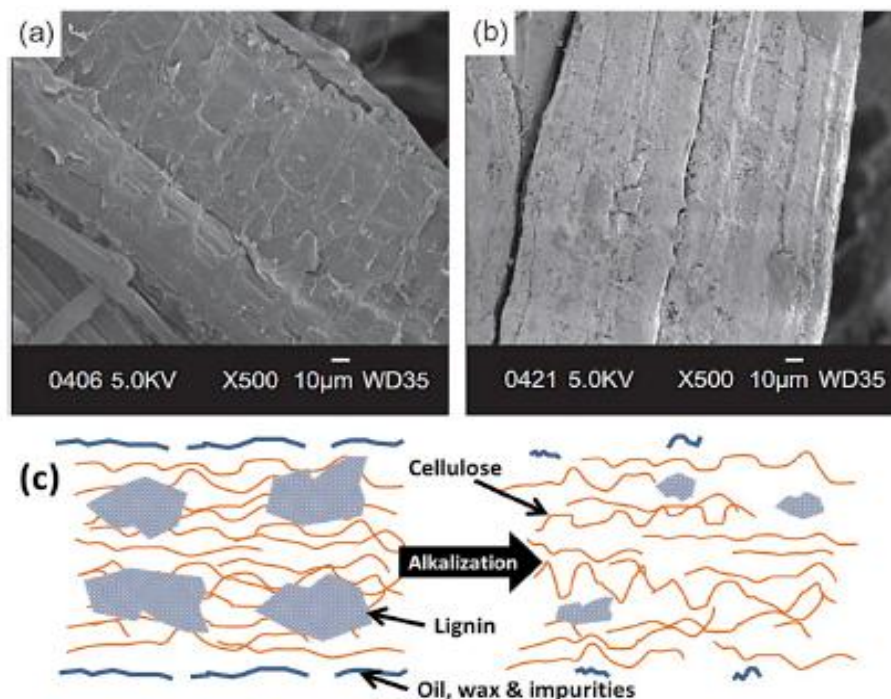


Figure 13. Morphologie de surface des fibres de chanvre avant (a) et après (b) le traitement au NaOH [56], et (c) Schéma montrant les changements dans la structure des fibres dus au traitement alcalin [57].

La surface de la fibre de kenaf a été modifiée à l'aide d'un agent de couplage silane pour favoriser l'adhésion avec la matrice PS [58]. L'adhésion fibre-matrice a augmenté grâce à une réaction de condensation entre l'alcoxy silane et les groupes hydroxyle de la cellulose de kenaf. En raison de la modification de la fibre, les composites kenaf/PS ont présenté un module de stockage plus élevé, indiquant une plus grande interaction inter-faciale entre la résine de la matrice et la fibre.

- **Traitement Acétique.**

L'acétylation est une autre méthode pour modifier la surface des fibres naturelles et les rendre plus hydrophobes. Elle décrit l'introduction d'un groupe fonctionnel acétyle dans un composé organique. L'idée principale de l'acétylation est de recouvrir les groupes OH des fibres, responsables de leur caractère hydrophile, par des molécules de nature plus hydrophobe. Seena et al. ont étudié l'effet de l'acétylation sur des composites phénol-formaldéhyde renforcés par des fibres d'abaca et ont rapporté que la résistance à la traction, le module de traction et la résistance à l'impact ont été améliorés par rapport aux composites de fibres d'abaca non traités [59].

- **Accouplement maléique**

De nos jours, le couplage maléique est largement utilisé pour renforcer les composites renforcés de fibres naturelles. La différence fondamentale avec les autres traitements chimiques est que l'anhydride maléique n'est pas seulement utilisé pour modifier la surface des fibres mais aussi la matrice polymérique pour obtenir une meilleure liaison inter-faciale entre la fibre et la matrice et améliorer les propriétés mécaniques des composites. Il existe de nombreuses études publiées dans lesquelles l'effet du greffage de l'anhydride maléique sur les propriétés mécaniques des fibres naturelles a été étudié, par exemple, Mohanty et al. [60] ont utilisé le MAPP comme agent de couplage pour la modification de la surface des fibres de jute. Ils ont constaté qu'une charge de fibres de 30 % avec une concentration de MAPP de 0,5 % dans le toluène et un temps d'imprégnation de 5 minutes avec une longueur moyenne de fibres de 6 mm donnait les meilleurs résultats possibles. Une augmentation de la résistance à la flexion de 72,3 % a été observée pour les composites traités.

- **Traitement enzymatique**

L'utilisation de la technologie enzymatique est de plus en plus importante pour le traitement des fibres naturelles. Actuellement, l'utilisation des enzymes dans le domaine de la modification des textiles et les fibres naturelles augmente rapidement. L'une des principales raisons de l'adoption de cette technologie est le fait que l'application des enzymes est respectueuse de l'environnement [61]. Bledzki et al. [61] ont étudié des composites PP avec des fibres d'abaca traitées aux enzymes. Les morphologies de surface des fibres d'abaca traitées à l'enzyme et non traitées sont présentées dans la Figure 14. Dans la Figure 14(a), il a été observé que la surface de la fibre non traitée est rugueuse, contenant des parties cireuses et saillantes. La morphologie de la surface des fibres traitées est observée dans les Figures 14(b) et (c). Si la matière cireuse et la cuticule de la surface traitée sont éliminées, la surface devient plus lisse. La fibrillation est également connue pour se produire lorsque les matériaux de liaison sont retirés de la surface des fibres traitées. Des dommages à la surface des fibres ont également été observés pour les fibres digérées naturellement qui se produisent dans les systèmes de digestion naturels.

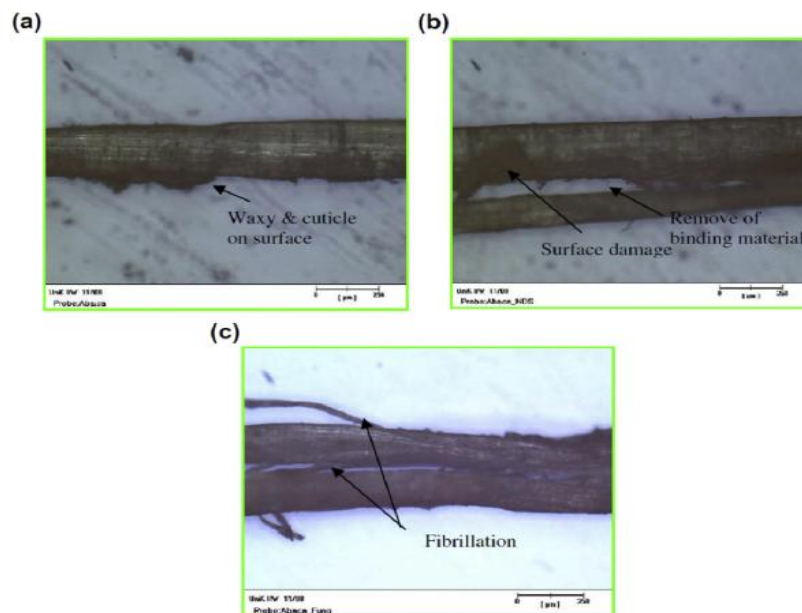


Figure 14. Micrographie de la morphologie de la surface de la fibre d'abaca. (a) non modifiée, (b) modifiée, et (c) modifiée. [61].

3.7.2. Méthodes physiques

Les traitements physiques courants comprennent le traitement au laser, le traitement thermique, et le plasma...etc. Les traitements physiques modifient les conditions de surface des fibres naturelles sans influencer leur composition chimique. Les avantages de ces traitements par rapport au traitement chimique sont l'amélioration des propriétés mécaniques, physiques et thermiques des Fibres traitées. Cependant, les traitements physiques sont plus coûteux que les traitements chimiques. Par conséquent, les chercheurs privilégient les traitements chimiques aux traitements physiques [62].

4. Techniques d'élaboration des composites

Il est nécessaire de comprendre et d'étudier les différents types des techniques de fabrication des composites afin de mettre en œuvre des techniques optimisées qui éviteront les défauts et donneront des résultats autonomes et durables qu'est efficace pour le domaine d'application souhaité [63].

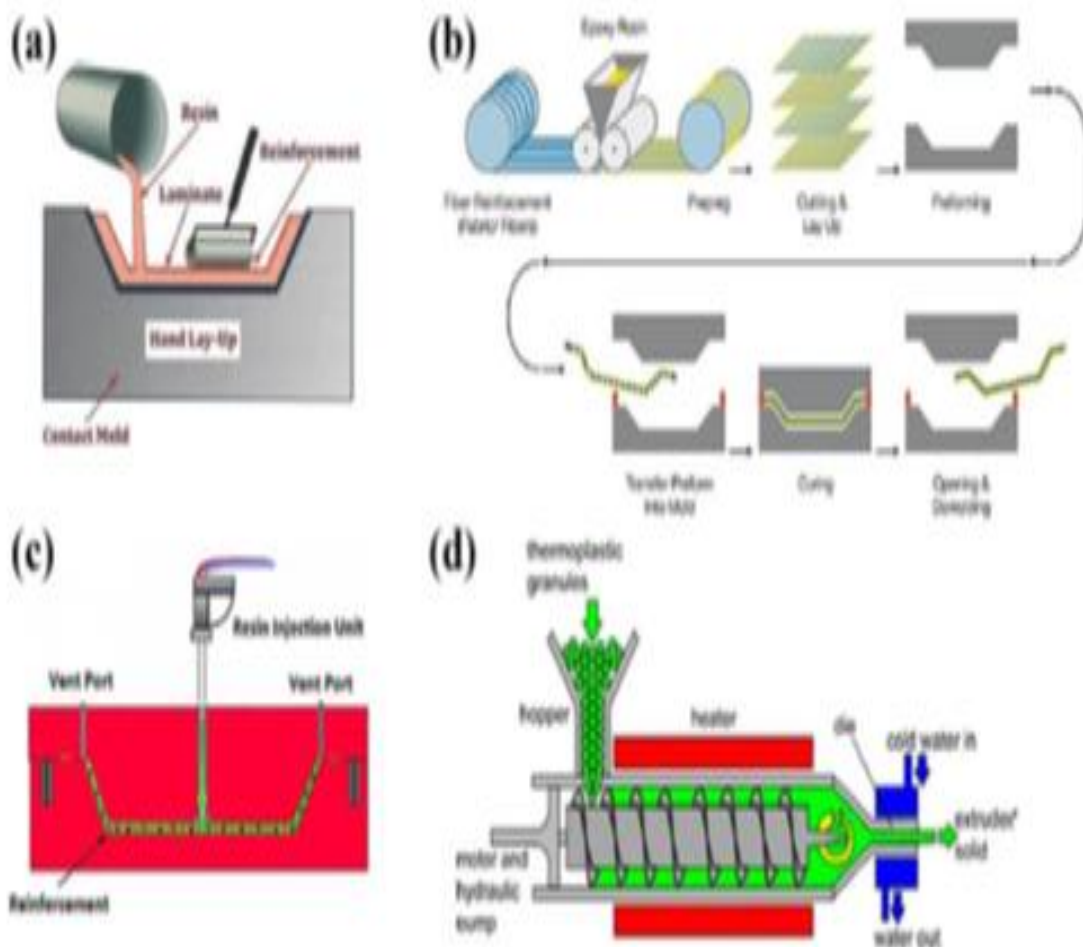


Figure 15. Techniques de fabrication des CRFN. (a) Procédé de stratification à la main, (b) Moulage par compression, (c) Moulage par transfert de résine, et (d) Processus d'extrusion [64].

La fabrication des matériaux composites peut se faire de différentes manières, selon le type de matrice utilisée, le type et l'architecture de renfort, et les attentes concernant la pièce finale. L'évaluation préliminaire pour choisir le procédé de fabrication le plus approprié implique la prise en compte de plusieurs critères principaux, notamment la forme, la taille et les propriétés souhaitées des composites, en plus du coût de fabrication, de la vitesse de production et des propriétés des matières premières [64]. Les techniques de fabrication plus utilisés sont présentées dans la Figure 15.

4.1. Le moulage au contact

C'est la méthode la plus simple de fabrication du composite thermodurcissable de fibres (synthétiques et naturelles). Dans cette technique de pose à la main, tout d'abord, un agent de démoulage est pulvérisé sur la surface du moule pour éviter le collage du composite à la surface (Figure 15(a)). Pour obtenir une bonne finition de surface du produit, des feuilles minces de plastique sont utilisées en haut et en bas du moule. Les fibres comme une armature soient sous forme de natte tissée soit en forme hachée sont placés à la surface supérieure du moule. Puis un mélange de résine thermodurcissable et de durcisseur adapté est versé sur la surface du tapis déjà placé dans le moule. Le polymère est étalé uniformément à l'aide d'un pinceau. Deuxièmement, une couche de renfort est ensuite placée sur la surface de moule, et un rouleau est utilisé pour éliminer l'air ainsi que excès de matrice présent. Le processus est répété pour chaque couche de renfort et matrice jusqu'à l'épaisseur requise est accompli. Après durcissement à température ambiante, le moule est ouvert et la partie composite développée est retirée [11].

4.2. Le moulage par compression

Le moulage par compression est un processus de moulage fermé avec applications à haute pression (Figure 15(b)). Le moulage par compression (MC) est le choix le plus courant pour les pièces composites de grand volume. L'utilisation de cette méthode de fabrication, près de 70 % en poids de fibres peuvent être incorporées et l'épaisseur peut être comprise entre 1 mm et 10 mm. Pour les composites de petite taille, le procédé MC est le plus souvent préféré, tandis que pour les pièces plus grandes, la stratification manuelle sont préférables [64]. Le principal avantage de ce procédé est la grande vitesse de fabrication. Beaucoup des pièces de l'industrie automobile tels que les panneaux et la structure sont élaborés selon ce procédé [11].

4.3. Le moulage par transfert de résine (RTM)

Le moulage par transfert de résine (RTM) est conçu pour l'imprégnation de plusieurs fibres de renforcement, qu'il s'agisse de fibres longues, tissées et mats, dans un moule fermé, rigide et serré (Figure 15(c)). La résine liquide est injectée dans un moule sous pression et, dans certains cas, sous vide, qui est ensuite maintenue tout au long du processus de polymérisation. Les résines les plus couramment utilisées dans ce procédé sont l'époxy, l'ester vinylique, la phénolique et le polyester. Plusieurs variables sont étroitement liées au procédé RTM, notamment la pression d'injection, caractéristiques de la résine, la température de préchauffage de la résine, la configuration du moule et l'architecture de la préforme en fibre [65]. Les avantages de ce procédé sont considérables par rapport aux autres procédés, notamment des exigences de température plus faibles, moins de déchets de matériaux, un piégeage d'air presque nul, il évite la dégradation thermomécanique. En bref, le RTM est une méthode de fabrication polyvalente qui peut être utilisée pour fabriquer des pièces complexes et de grande taille, avec des exigences élevées de résistance par rapport au poids à partir d'un large choix de renforts, de thermodurcissables.

4.4. Le moulage par injection

Le moulage par injection a la capacité de fabriquer des pièces composites avec une grande précision et à très temps de cycle bas. Dans un processus de moulage par injection, des composites de fibres sous forme de granulés sont alimentés à travers une trémie, puis ils sont transportés par une vis avec un baril chauffé, comme le montre la Figure 15(d). Une fois que la quantité requise de matériau est fondue dans un baril, la vis injecte le matériau à travers une buse dans le moule où il est refroidi et acquiert la forme désirée [66]. Ce procédé est utilisé pour la fabrication des pièces en plastique avec une excellente précision dimensionnelle. Les produits tels que les articles ménagers, les jouets, les pièces automobiles, les meubles, articles d'emballage, appareils et élimination médicale les seringues sont produites par un procédé de moulage par injection.

5. Avantages, propriétés et applications des composites renforcés de fibres naturelles

Les fibres naturelles sont largement utilisées dans différentes industries comme renfort dans les composites polymères et certains des avantages importants de ces CRFN comprennent :

- Le premier et principal avantage des fibres naturelles est le respect de l'environnement en raison de leur caractère renouvelable, de leur neutralité en matière de CO₂ et de leur biodégradabilité. Par exemple, 3 tonnes de CO₂/tonne de matériau peuvent être atteintes si la fibre de verre synthétique est remplacée par des fibres naturelles de chanvre.
- Des résidus abondamment disponibles et inoffensifs après une valorisation énergétique renforcée par incinération.
- Les fibres naturelles sont peu coûteuses et peuvent réduire le coût global des composites polymères.
- Réduire l'utilisation de produits à base de pétrole en les remplaçant par jusqu'à 50 % de fibres naturelles dans le moulage par injection et plus de 50 % dans le moulage par compression.
- Offrir un processus de fabrication relativement plus sûr et une meilleure sécurité professionnelle (réduction des irritations cutanées et respiratoires).
- Les procédés de fabrication et les voies d'élimination des CRFN sont sans danger pour l'environnement.
- Les fibres naturelles sont souples et augmentent donc la durée de vie globale et l'efficacité des équipements/outils de transformation.
- Les fibres naturelles offrent la meilleure alternative aux fibres de verre E, ces dernières posant des problèmes d'élimination.
- Les fibres naturelles sont légères et permettent donc des économies de poids significatives et un meilleur rendement énergétique pour les applications automobiles.
- Certaines fibres naturelles présentent une résistance spécifique, un module, une ténacité et une ductilité relativement élevés par rapport au verre E.
- Les CRFN présentent d'excellentes propriétés d'absorption acoustique.
- L'utilisation efficace des résidus agricoles génère des revenus et des opportunités d'emploi.
- La température de transformation relativement basse et les CRFN offrent une bonne isolation acoustique et thermique.

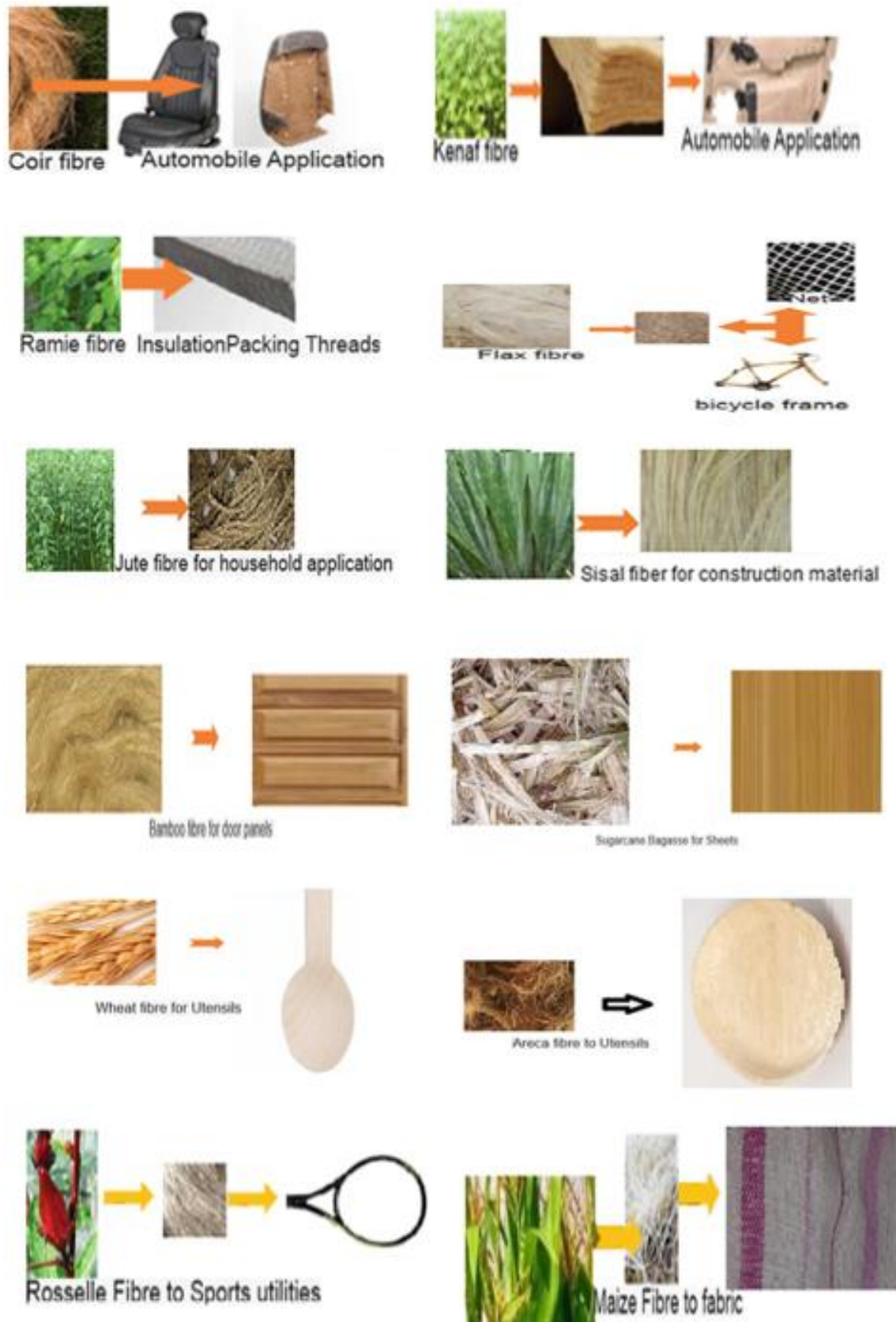


Figure 16. Application des matériaux composites à base de fibres naturelles.

Les fibres naturelles et les CRFN présentent également les inconvénients suivants.

- Forte absorption d'humidité (dépend du type de fibre) entraînant un gonflement, ce qui affecte les performances et la fiabilité des produits.
- La mauvaise mouillabilité (fibres hydrophiles et matrices hydrophobes) des fibres naturelles entraîne souvent une faible liaison inter-faciale fibre-matrice et diminue les propriétés mécaniques.
- Certaines fibres ne sont pas compatibles avec certaines matrices polymères.
- Les grandes variations des caractéristiques et des propriétés des fibres contribuent directement à une grande dispersion des propriétés des CRFN.
- Facilement sensibles aux attaques de champignons et d'insectes.
- Température de dégradation relativement basse et facilement inflammable.
- Grandes variations de la qualité/des caractéristiques des fibres naturelles en fonction des conditions météorologiques et de culture (moment de la récolte, qualité solide, fertilisation, situation géographique, climat, etc.)
- La conductivité thermique des CRFN est relativement inférieure à celle des composites renforcés de fibres de verre.
- Chaîne d'approvisionnement complexe, disponibilité géographique.
- Variations de prix et d'approvisionnement dues aux conditions météorologiques et au rendement des cultures.
- Les CRFN sont souvent limités à des composants non structurels et en raison de leur faible stabilité thermique, leur température de service est $\leq 200^{\circ}\text{C}$.

Les fibres végétales trouvent beaucoup d'applications dans le domaine du textile (habillement, ameublement). Vu leurs propriétés mécaniques spécifiques et leur caractère renouvelable, elles commencent à trouver des débouchés dans d'autres secteurs d'activité industrielle emballage, automobile (Figure 16)

6. Fibre luffa

6.1. Plante luffa

La plante luffa cylindrica est communément trouvée en Amérique du Sud, au Brésil, en Chine, au Japon, en Turquie et dans certains autres pays d'Asie et d'Afrique. Cette plante a la forme d'un fruit qui est recouvert d'une pelure verte à l'extérieur (Figure 17(a)). La couche verte extérieure commence à sécher lorsque la période de maturation des fibres à l'intérieur du

fruit est terminée (Figure 17(b)) et la structure fibreuse se développe sous la couche extérieure séchée (Figure 17(c)). La taille des plants de luffa varie en fonction de l'emplacement, allant de 0,15 m à 1 m (plus de 1 m dans certaines régions). En général, une fibre de luffa contient de la cellulose, de l'hémicellulose et de la lignine, bien que la composition chimique des fibres de luffa dépende de plusieurs facteurs, comme l'origine de la plante, les conditions climatiques (qui changent chaque année) et le sol. Par exemple, la teneur en cellulose varie de 55 à 90%, la teneur en lignine est comprise entre 10 et 23%, la teneur en hémicelluloses est d'environ 8 à 22%, les matières extractibles s'élèvent à près de 3,2% et les cendres représentent environ 0,4%. [67].

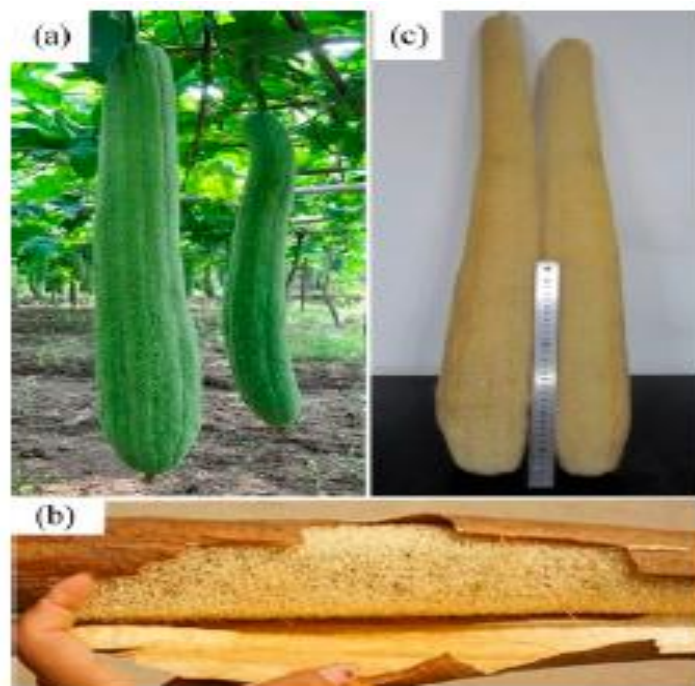


Figure 17. (a) Luffa cylindrique, (b) Luffa éponge avec cortex, (c) Luffa éponge [68].

6.2. Extraction la fibre de luffa

Les techniques conventionnelles utilisées pour l'extraction des fibres naturelles reposent sur la décortication et le rouissage à l'eau [69]. Cependant, il est observé que les fibres de Luffa ne sont pas extraites de cette manière. Une fois séchées, les fibres de Luffa deviennent généralement faciles à séparer des autres parties de la gousse. L'extraction se fait donc par séchage au soleil ou à l'air libre. Une fois séchée, la couche extérieure dure est coupée pour retirer la graine de la gousse. La couleur de la sève peut alors être éliminée par trempage dans l'eau. Le séchage de la plante Luffa c. est la méthode la plus courante d'extraction des fibres

de la plante bien que certains chercheurs aient acheté les fibres directement auprès d'une source particulière, d'autres n'ont pas donné les spécificités des fibres utilisées dans leurs recherches.

6.3. Structure et composition de la fibre de luffa

Le degré de performance des fibres de luffa lorsqu'elles sont utilisées dans un composite dépend de leurs compositions chimiques. Comme les autres biomasses, les fibres de Luffa sont principalement composées de cellulose, d'hémicellulose et de lignine. La cellulose est le composant souhaité dans les fibres utilisées pour le renforcement des composites polymères. Des niveaux élevés d'hémicellulose et de lignine conduisent généralement à des propriétés mécaniques médiocres des composites et des fibres qui le composent. Les fibres de Luffa proviennent de différentes espèces, comme *L. acutangula*, *L. cylindrica*, *L. aegyptiaca*, *L. sepium*, *L. operculata* etc. De toutes ces espèces, *Luffa c.* est la plus étudiée et appliquée.

Comme le montre la [Figure 18](#), chaque colonne de luffa sponge est composée d'une couche extérieure, d'une couche intermédiaire, d'une couche centrale et d'une couche intérieure. De plus, il est intéressant de noter que la densité des faisceaux de fibres provenant de l'éponge de luffa est comprise entre 385,46 et 468,70 kg/m³ [68]. Il se pourrait que la faible densité des faisceaux de fibres de l'éponge de luffa soit due à la structure poly poreuse hiérarchique des faisceaux de fibres et des cellules de fibres, comme le montre la [Figure 19](#).

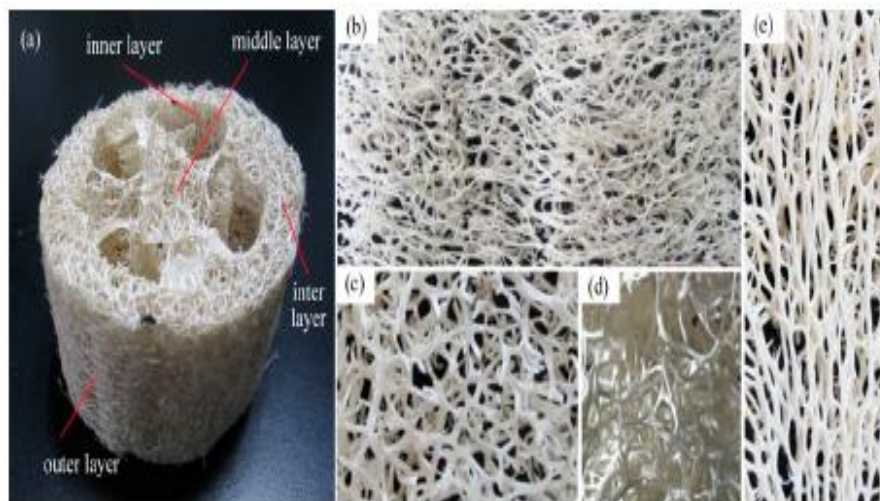


Figure 18. Caractéristiques géométriques de la colonne de luffa sponge (a) Différentes régions, (b) Orientation de la couche externe, (c) Orientation de la couche intermédiaire, (d) Orientation de la couche médiane, (e) Orientation de la couche interne [68].

Le module spécifique des faisceaux de fibres de luffa sponge se situe dans une plage normale. Plus précisément, le module spécifique de l'éponge de luffa est supérieur à celui des faisceaux de fibres d'*Arenca engleri*. La fibre végétale naturelle, en tant que renforcement du matériau composite, avec une résistance mécanique et un module spécifique plus élevés, peut fabriquer le matériau composite à matrice polymère avec des bonnes propriétés mécaniques [70].

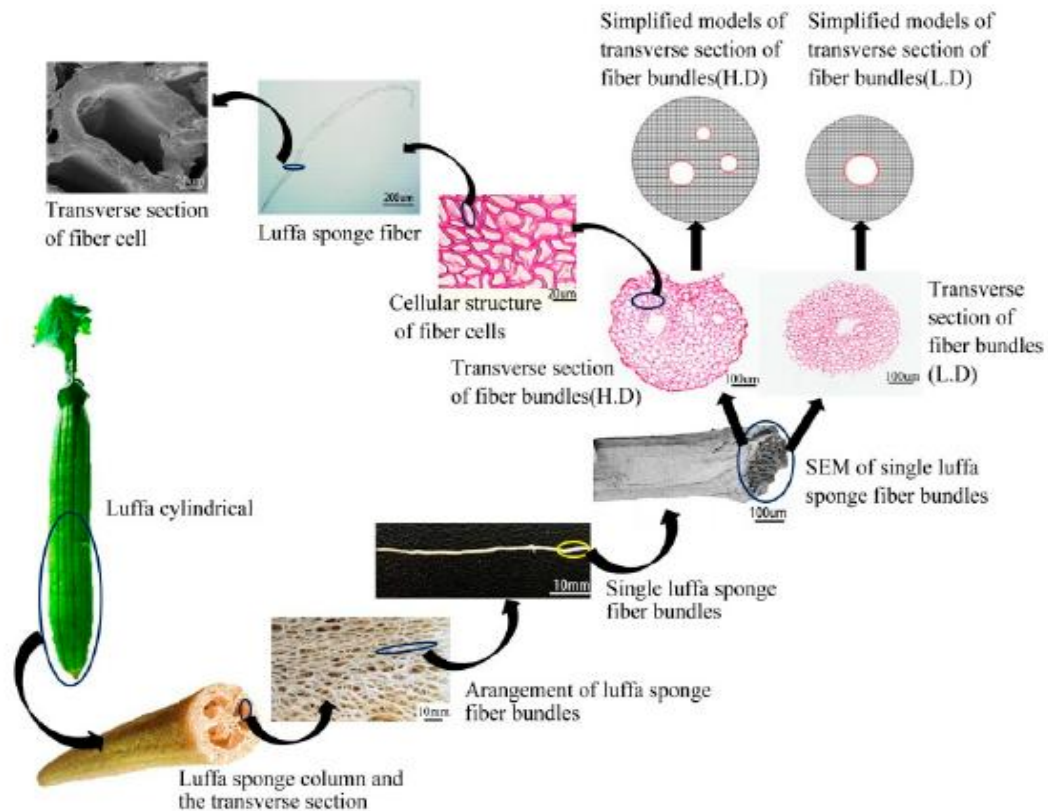


Figure 19. La structure poly-poreuse hiérarchique de l'éponge luffa [68].

6.4. Autres propriétés et applications

Plusieurs propriétés et applications ont été explorées pour les composites renforcés en fibres de luffa en particulier dans l'acoustique.

Genc et Ko"ru"k [70] ont étudié le coefficient d'absorption acoustique de l'échantillon composite de Luffa, qui a été mesuré en fonction de la fréquence à l'aide d'un tube d'impédance à deux microphones. Ils ont observé que le coefficient d'absorption sonore et la perte de transmission sonore du composite luffa augmentaient généralement avec l'augmentation de la fréquence. Ils ont également noté que l'amortissement du son est le facteur dominant du comportement vibro-acoustique du composite luffa et que des structures

avec un facteur de perte plus élevé pourraient être obtenues en optimisant le rapport luffa/époxy.

Thilagavathi et al. [71] ont utilisé une technique pour déterminer le coefficient d'absorption acoustique à partir des données mesurées de la fonction de transfert. Ils ont découvert que les nattes fibreuses de luffa ne présentaient pas un bon coefficient de réduction du bruit si elles étaient utilisées seules, même si les nattes fibreuses avaient une surface dentelée et une structure microporeuse, mais avec l'augmentation l'épaisseur des nattes, le coefficient de réduction du bruit des nattes de luffa a été amélioré.

Jayamani et al. [72] ont découvert que la modification de la concentration des fibres entraînait des changements dans le coefficient d'absorption acoustique du composite renforcé en luffa.

Parida et al [73] ont étudié les caractéristiques électriques, dont le facteur de perte diélectrique, la conductivité électrique et la constante diélectrique de la matrice polymère pure et du composite de fibres de Luffa traitées et non traitées. Ils concluent une diminution de la constante diélectrique et du facteur de perte de tous les échantillons ; cependant, la conductivité électrique de tous les échantillons a augmenté avec l'augmentation de la fréquence.

Dans une autre étude, la constante diélectrique, la perte diélectrique et la conductivité électrique de la matrice de PLA vierge et des composites préparés à partir de la matrice de PLA et de la fibre luffa irradiée par faisceau d'électrons ont été évaluées par Dalai et al [74]. La constante diélectrique a augmenté jusqu'à un maximum de 94 dans le composite et à partir de 61 dans le PLA vierge. Les valeurs de perte diélectrique et de conductivité des matériaux composites à différentes fréquences décideront de la manière dont ces matériaux se réchaufferont dans les applications de chauffage et micro-ondes. La représentation de Cole-Cole montre que le matériau est un matériau polaire impur avec de multiples mécanismes de relaxation. Les composites biodégradables peuvent être étudiés pour être utilisés dans les condensateurs, les plots et les transformateurs.

De nombreux travaux de recherche ont été menés sur l'utilisation du luffa dans d'autres domaines que les composites, dans l'assainissement comme un adsorbant efficace pour éliminer le bleu de méthylène et le vert malachite dans une solution aqueuse [75]. Même en médecine, le luffa avec le *Lippia nodiflora* a une puissante capacité anti-prolifération et agit comme un inhibiteur puissant de la croissance des cellules cancéreuses du poumon humain [76].

6.5. Autre domaine d'utilisation

- Luffa de bain de beauté

Le luffa de bain biologique pour hommes et femmes adultes est un substitut parfait au luffa en plastique pour le bain et la brosse. La houppette de douche exfoliante de qualité supérieure peut nettoyer le corps en profondeur, éliminer les peaux mortes et favoriser la circulation sanguine, rendant le corps plus lisse et plus frais (Figure 20).

- Éponges de nettoyage de la maison

Les éponges luffa à vaisselle sont parfaites pour le nettoyage de la maison ou de la cuisine. Elles permettent d'éliminer rapidement les huiles ou les taches sans rayer la vaisselle et évitent efficacement de laisser des résidus chimiques nocifs.

- Fournitures pour animaux de compagnie

Le luffa biologique naturel peut également être utilisé comme produit pour animaux de compagnie. Le luffa naturel peut non seulement être un jouet amusant et moins coûteux pour les animaux de compagnie, mais aussi le baigner et le garder propre.



Figure 20. Application de la fibre luffa [77].

7. Conclusion

Ces dernières années, plusieurs travaux de recherche se sont intéressés aux matériaux composites à fibres végétales. Cela est dû aux avantages que ces fibres offrent par rapport aux renforts synthétiques. En effet, les fibres végétales peuvent contribuer à résoudre les problèmes environnementaux et de fin de vie des matériaux. De plus, les matériaux composites à renfort végétal ont montré des propriétés mécaniques intéressantes en concourant celui de la plupart des composites à fibres synthétiques. Ces matériaux peuvent donc être utiles dans diverses applications. Toutefois, les fibres naturelles en particulier végétales ont un caractère hydrophile qui empêche leur utilisation dans certains cas. Afin de diminuer l'impact des renforts synthétiques sur l'environnement et profiter des avantages qu'offrent les renforts végétaux, il est primordial de faire des recherches approfondies sur ces fibres, ce qui a fait l'objet de ce chapitre qui a été consacré à une étude bibliographique des matériaux composites à base de fibre naturelle. Une attention particulière a été consacrée aux fibres naturelles de types végétales ou nous avons défini différents types des fibres et leurs compositions chimiques et les propriétés mécaniques ont été énumérées pour les différentes fibres végétales. Il a été remarqué que ces propriétés varient en fonction de la composition chimique de la fibre. La structure de ces fibres est complexe. Nous avons ensuite évoqué les avantages qui concernent leur faible coût et leur biodégradabilité et les inconvénients de ces fibres. Dans notre étude la fibre luffa est utilisée comme renfort, donc une présentation de la plante luffa a été expliquée à la fin de chapitre, une description sur cette fibre et leur structure et composition a été présentée.

Références bibliographiques

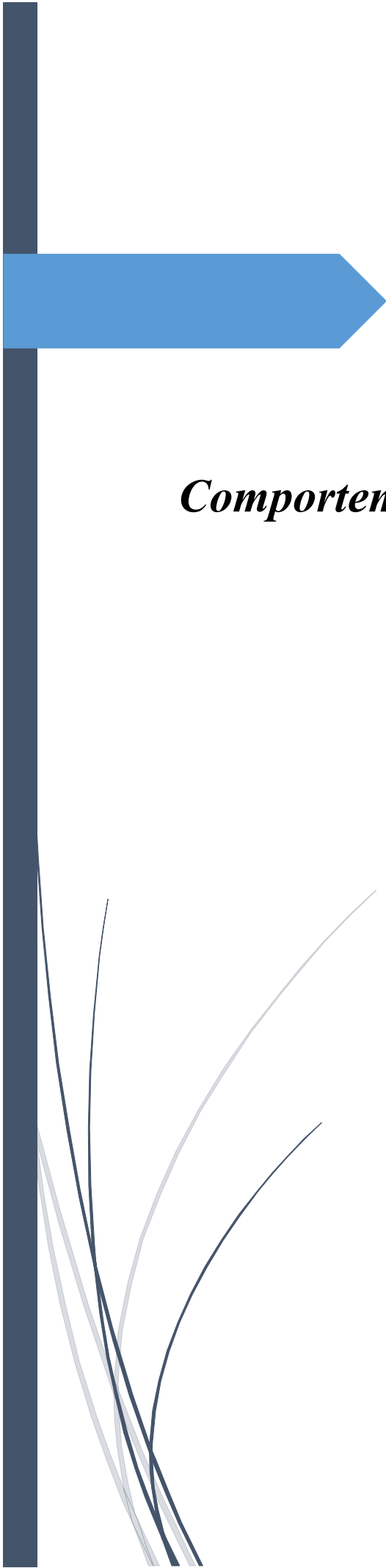
- [1] Shah, D.U., Schubel, P.J., Clifford, M.J. Can flax replace E-glass in structural composites? A small wind turbine blade case study, *Composites Part B : Engineering* 2013; 52 : 172-181.
- [2] Yan, L., Chouw, N., Yuan, X. Improving the mechanical properties of natural fibre fabric reinforced epoxy composites by alkali treatment, *Journal of Reinforced Plastics and composites* 2012; 31 (6) : 425-437.
- [3] Baley, C. Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites, *Techniques de l'ingénieur*, réf : N2220 V1, 10 avril 2005.
- [4] J.-M. Berthelot, matériaux composites, Comportement mécanique et analyse des structures, Éditions TEC & DOC, 4ème édition, 2006.
- [5] L. Marcin, “ Modélisation du comportement, de l'endommagement et de la rupture de matériaux composites à renforts tissés pour le dimensionnement robuste de structures”, Thèse de doctorat Université Bordeaux 1, (2010).
- [6] Jérémie Aucher. Etude comparative du comportement composite à matrice thermoplastique ou thermodurcissable. Thèse de doctorat, l'Institut National des Sciences Appliquées de Rouen, France 2009
- [7] Omar Faruk, Andrzej K.Bledzki, Hans-Peter Fink ,Mohini Sain . Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2012.04.003>
- [8] Saba N, Tahir PM and Jawaaid M. A review on potentiality of nano filler/natural fiber filled polymer hybrid composites. *Polymers (Basel)* 2014; 6: 2247–2273.
- [9] James M, Manoj GK, Mathew C, et al. Modification of fiber-reinforced plastic by nanofillers. *Int J Eng Innov Technol* 2013; 3: 234–240.
- [10] M. Muneer Ahmed , H.N. Dhakal, Z.Y. Zhang, A. Barouni, R. Zahari. Enhancement of impact toughness and damage behaviour of natural fibre reinforced composites and their hybrids through novel improvement techniques: A critical review.
- [11] M. K. Gupta & R. K. Srivastava (2016) Mechanical Properties of Hybrid Fibers-Reinforced Polymer Composite: A Review, *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 55:6, 626-642.
- [12] Y.H.M. Amran, Influence of structural parameters on the properties of fibred-foamed concrete, *Innovat. Infrastruct. Solut.* 5 (2020), <https://doi.org/10.1007/s41062-020-0262-8>.
- [13] H. Savastano Junior, J. Fiorelli, S.F. dos Santos, *Sustainable and Nonconventional Construction Materials Using Inorganic Bonded Fiber Composites*, 2017.
- [14] D. Melinamani, R.V. Prasad, *Keratin Based Materials for Sustainable Nanobiocomposite for multiple Applications and Method of its Processing*, 2018.
- [15] L. Yan, B. Kasal, L. Huang, A review of recent research on the use of cellulosic fibres, their fibre fabric reinforced cementitious, geo-polymer and polymer composites in civil engineering, *Compos. B Eng.* 92 (2016) 94–132.

- [16] R. de S. Castoldi, LMS de Souza, F. de Andrade Silva, Comparative study on the mechanical behavior and durability of polypropylene and sisal fiber reinforced concretes, *Construct. Build. Mater.* (2019), <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.282>.
- [17] Yan, L., Kasal, B., & Huang, L. (2016). A review of recent research on the use of cellulosic fibres, their fibre fabric reinforced cementitious, geo-polymer and polymer composites in civil engineering. *Composites Part B: Engineering*, 92, 94- 132.
- [18] Rthur Monti. Élaboration et caractérisation mécanique d'une structure composite sandwich à base de constituants naturels. *Acoustique [physics.class-ph]*. Université du Maine, 2016. Français. NNT : 2016LEMA1023. tel-01442610.
- [19] Staiger MP, Tucker N. Natural-fibre composites in structural applications. In: Pickering K, editor. *Properties and performance of natural-fibre composites*. Cambridge, UK: Woodhead Publishing; 2008. p. 269–300.
- [20] M. Jawaid and A. Khan (eds.), *Vegetable Fiber Composites and their Technological Applications*, composites Science and Technology, https://doi.org/10.1007/978-981-16-1854-3_8.
- [21] Jawaid M, Abdul Khalil HPS. Cellulosic/synthetic fibre reinforced polymer hybrid composites: A review. *Carbohydr Polym* 2011; 86(1):1–18.
- [22] Faruk O, Bledzki AK, Fink H-P, Sain M. Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000-2010. *Prog Polym Sci* 2012; 37(11):1552–96.
- [23] Kandemir A, Pozegic TR, Hamerton I, Eichhorn SJ, Longana ML. Characterisation of natural fibres for sustainable discontinuous fibre composite materials. *Materials* 2020; 13. <https://doi.org/10.3390/ma13092129>.
- [24] MAACHE Mabrouk. Elaboration et caractérisation des composites à renfort en fibres naturelles des plantes sauvages. 2018.Thèse de doctorat. Université du 8 mai 1945 guelma.
- [25] Thyavihalli Girijappa YG, Mavinkere Rangappa S, Parameswaranpillai J, Siengchin S. Natural Fibers as Sustainable and Renewable Resource for Development of Eco-Friendly Composites: A Comprehensive Review. *Frontiers in Materials* 2019; 6. <https://doi.org/10.3389/fmats.2019.00226>.
- [26] Kabir MM, Wang H, Aravinthan T, Cardona F, Lau K-T. Effects of Natural Fibre Surface on Composite Properties: a Review. *Energy, Environment and Sustainability* 2007.
- [27] N. Chethan, S. N. Nagesh, and L. Sunith Babu, *Mater. Today Proc.*, no. xxxx, 2020, Doi: 10.1016/j.matpr.2020.09.679.
- [28] Zimniewska M, Kicinska-Jakubowska A Fact sheet-plant fibers. www.dnfi.org
- [29] Vijayalakshmi K, Neeraja CYK, Kavitha A, Hayavadana J (2014) Abaca fiber, *transactions on engineering and sciences*, vol. 2, Issue 9, pp 16–19
- [30] Franck RR (2005) Bast and other plants fibers. In: Franck RR (ed) *Woodhead Publishing in Textiles*, 315–320

- [31] A. Devaraju, R. Harikumar, Life cycle assessment of sisal fibre, in: Reference Module in Materials Science and Materials Engineering, Elsevier Ltd., 2019. doi: 10.1016/B978-0-12-803581-8.10552-1.
- [32] D. Dash, S. Samanta, S.S. Gautum, et al., Mechanical characterization of natural fibre reinforced composite material, *Adv. Mater. Manuf. Characterization* 3 (1) (2013) 275–280.
- [33] Salleh Z, Taib YM, Hyie KM, Mihat M, Berhan MN, Ghani MAA. Fracture toughness Investigation on long kenaf/woven glass hybrid composite due to water absorption effect. *Procedia Eng* 2012; 41: 1667–73.
- [34] Mahjoub R, Yatim JM, Mohd Sam AR, Hashemi SH. Tensile properties of kenaf fiber due to various conditions of chemical fiber surface modifications. *Constr Build Mater* 2014; 55: 103–13.
- [35] Elsaid A, Dawood M, Seracino R, Bobko C. Mechanical properties of kenaf fiber reinforced concrete. *Constr Build Mater* 2011; 25: 1991–2001.
- [36] DJEBLOUN Youcef. (2018). Contribution à la caractérisation des matériaux composites renforcés de fibres végétales. Thèse de doctorat. Université Mohamed Khider – Biskra.
- [37] Terzopoulou ZN, Papageorgiou GZ, Papadopoulou E, Athanassiadou E, Alexopoulou E, Bikiaris DN. Green composites prepared from aliphatic
- [38] Zykwincka Agata, Thibault Jean-François, Ralet Marie-Christine. Competitive binding of pectin and xyloglucan with primary cell wall cellulose. *Carbohydr Polym* 2008; 74(4): 957–61.
- [39] Baley C. Analysis of the flax fibres tensile behaviour and analysis of the tensile stiffness increase. *Compos A Appl Sci Manuf* 2002;33(7):939–48.
- [40] Ashok, R.B., Srinivasa, C.V. & Basavaraju, B. Dynamic mechanical properties of natural fiber composites-a review. *Adv Compos Hybrid Mater* 2, 586–607 (2019).
- [41] Burgert I. Exploring the micromechanical design of plant cell walls. *Am J Bot* 2006; 93: 1391-401.
- [42] Keckes J, Burgert I, Fröhmann K, Müller M, Kölln K, Hamilton M, et al. Cell-wall recovery after irreversible deformation of wood. *Nat Mater* 2003; 2: 810–4.
- [43] Eder M, Burgert I. Natural fibres - function in nature. In: Müssing J, editor. *Ind. Appl. Nat. Fibres struct. Prop. Tech. Appl.* UK: John Wiley & Sons, Ltd; 2010. p. 23–40
- [44] Lau K tak, yan Hung P, Zhu MH, Hui D. Properties of natural fibre composites for structural engineering applications. *Compos B Eng* 2018; 136: 222–33.
- [45] Nishimura N, Izumi A, Kuroda KI (2002) Structural characterization of kenaf lignin: differences among kenaf varieties. *Ind Crops Prod* 15(2):115–122.
- [46] Bledzki AK, Gassan J (1999) Composites reinforced with cellulose based fibres. *Prog Polym Sci* 24(2):221–274.
- [47] Rahimi SK, Otaigbe JU (2017) Green hybrid composites from cellulose nanocrystal. Elsevier.

- [48] Rajala AshokReddy, K. Yoganandam, V. Mohanavel. Effect of chemical treatment on natural fiber for use in fiber reinforced composites–Review. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.982>.
- [49] Stokke DD, Wu Q, Han G (2013) Wood and natural fibers composites: an overview, 1st edn. Wiley
- [50] Ho MP, Wang H, Lee JH, Ho CK, Lau KT, Leng JS, et al. Critical factors on manufacturing processes of natural fibre composites. *Compos Part B Eng* 2012;43:3549–62.
- [51] Kin-takLau, Pui-yanHung, Min-HaoZhu, DavidHui. Properties of natural fibre composites for structural engineering applications. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.10.038>
- [52] Ali A, Shaker K, Nawab Y, Jabbar M, Hussain T, Militky J, et al. Hydrophobic treatment of natural fibers and their composites-a review. *J Ind Textil* 2018; 47 (8): 2153-83.
- [53] Arrakhiz FZ, El Achaby M, Malha M, Bensalah MO, Fassi-Fehri O, Bouhfid R, et al. Mechanical and thermal properties of natural fibers reinforced polymer composites: doum/low density polyethylene. *Mater Des* 2013; 43: 200–5.
- [54] Li X, Tabil LG, Panigrahi S. Chemical treatments of natural fiber for use in natural fiber-reinforced composites: a review. *J Polym Environ* 2007; 15: 25–33. <https://doi.org/10.1007/s10924-006-0042-3>.
- [55] Kabir MM, Wang H, Lau KT, Cardona F. Chemical treatments on plant-based natural fibre reinforced polymer composites: an overview. *Compos B Eng* 2012; 43:2883–92.
- [56] Dhakal HN. Mechanical performance of PC-based biocomposites. In: Misra M, Pandey JK, Mohanty AK, editors. *Biocomposites des. Mech. Perform.* Cambridge, UK: Woodhead Publishing Limited; 2015. p. 303–18.
- [57] Mwaikambo LY, Ansell MP. Chemical modification of hemp, sisal, jute, and kapok fibers by alkalization. *J Appl Polym Sci* 2002;84:2222–34.
- [58] Xu Y, Kawata S, Hosoi K, Kawai T, Kuroda S. Thermomechanical properties of the silanized-kenaf/polystyrene composites. *eXPRESS Polymer Letters* 2009;3:657–64.
- [59] Seena J, Koshy P, Thomas S. The role of interfacial interactions on the mechanical properties of banana fibre reinforced phenol formaldehyde composites. *Composite Interfaces* 2005; 12:581-600.
- [60] Mohanty S, Nayak SK, Verma SK, Tripathy SS. Effect of MAPP as a coupling agent on the performance of jute–PP composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 2004; 23: 625–37
- [61] Yang HS, Kim HJ, Park HJ, Lee BJ, Hwang TS. Effect of compatibilizing agents on rice-husk flour reinforced polypropylene composites. *Composite Structures* 2007; 77: 45–55.
- [62] Latif R, Wakeel S, Zaman Khan N, Noor Siddiquee A, Lal Verma S, Akhtar Khan Z. Surface treatments of plant fibers and their effects on mechanical properties of fiber-reinforced composites: A review. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2019; 38(1): 15-30
- [63] Rajak, D.K.; Pagar, D.D.; Menezes, P.L.; Linul, E. Fiber-Reinforced Polymer Composites: Manufacturing, Properties, and Applications. *Polymers* 2019, 11, 1667

- [64] Lotfi A, Li H, Dao DV, Prusty G. Natural fiber–reinforced composites: A review on material, manufacturing, and machinability. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. 2021; 34(2): 238-284.
- [65] Lee CL and Wei KH. Effect of material and process variables on the performance of resin transfer- molded epoxy fabric composites. *J Appl Polym Sci* 2000; 77: 2149–2155.
- [66] Leong, Y.W.; Thitithanasarn, S.; Yamada, K.; Hamada, H. Compression and injection molding techniques for natural fiber composites. In *Natural Fibre Composites*; Woodhead Publishing : Sawston, UK; Cambridge, UK, 2014; pp. 216–232.
- [67] Hasan Koruk, Garip Genc, 17 - Acoustic and mechanical properties of luffa fiber-reinforced biocomposites. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102292-4.00017-5>.
- [68] Chen, Y.; Su, N.; Zhang, K.; Zhu, S.; Zhao, L.; Fang, F.; Ren, L.; Guo, Y. In-Depth Analysis of The Structure and Properties of Two Varieties of Natural Luffa Sponge Fibers. *Materials* 2017, 10, 479.
- [69] Adeniyi AG, Onifade DV, Ighalo JO, Adeoye AS (2019) A review of coir fiber reinforced polymer composites. *Compos B Eng* 176:107305.
- [70] Genc G, Ko“ru“k H (2016) Investigation of the vibro-acoustic behaviors of Luffa bio composites and assessment of their use for practical applications. Paper presented at 23rd international conference on sound and vibration, Athense, July 2016.
- [71] Thilagavathi GNKS, Muthukumar N, Krishnan S (2017) Investigations on sound absorption properties of Luffa fibrous mats. *J Nat Fibers* 15(3):445–451
- [72] Jayamani E, Hamdan S, Rahman MR, Soon KH, Bakri MKB (2014) Processing and characterization of epoxy/ Luffa composites: investigation on chemical treatment of fibers on mechanical and acoustical properties. *BioResources* 9:5542–5556.
- [73] Parida C, Dash SK, Pradhan C, Das SC (2015) Dielectric response of Luffa fiber: reinforced resorcinol formaldehyde composites. *Am J Mater Sci* 5:1–8.
- [74] Sonismita Dalai, Subhashree Patra & Chhatrapati Parida (2022): Study of dielectric properties of electron beam irradiated *luffa* fiber/PLA composites, *Radiation Effects and Defects in Solids*, DOI: 10.1080/10420150.2021.2025056
- [75] Altınışık, A., E. Gür, and Y. Seki. 2010. A natural sorbent, *Luffa cylindrica* for the removal of a model basic dye. *Journal of Hazardous Materials* 179 (1):658–64. doi:10.1016/j.jhazmat.2010.03.053.
- [76] Vanajothi, R., A. Sudha, R. Manikandan, P. Rameshthangam, and P. Srinivasan. 2012. *Luffa acutangula* and *Lippia nodiflora* leaf extract induces growth inhibitory effect through induction of apoptosis on human lung cancer cell line. *Biomedicine & Preventive Nutrition* 2 (4):287–93. doi:10.1016/j.bionut.2012.03.002.
- [77] <https://www.walmart.ca/en/ip/Natural-Loofahs-Sponge-Eco-Friendly-Loofah-Organic-Exfoliating-Shower-Luffa-Real-Body-Scrubbers-Skin-Face-Back-Bath-Loofa-Men-Women-Adults-6-Pieces/3W4EWVDGYGDE>.



Chapitre II :

Comportement d'impact et post d'impact des matériaux composites

1. Introduction

Au cours des dernières années, de nombreux travaux se sont positionnés sur l'étude de matériaux composites à fibres naturelles, et notamment pour déterminer leurs propriétés mécaniques. En effet, les fibres naturelles, en particulier les fibres végétales peuvent être une alternative intéressante aux fibres synthétiques, en raison de leur disponibilité et de leur coût moins cher, ainsi que leur plus faible impact sur l'environnement. Ce n'est cependant valable qu'à condition d'avoir des propriétés mécaniques suffisantes, surtout dans le cas où leur usage serait destiné à des applications semi-structurelles et structurelles. L'une des propriétés mécaniques particulièrement importantes à considérer est la résistance à l'impact du composite, puisque c'est une situation qui peut toujours arriver, que ce soit au travers de la chute d'un outil sur le matériau ou un choc quelconque, d'autant plus que les composites sont particulièrement sensibles aux impacts. Au travers de cet état de l'art, nous avons pu constater qu'il existait déjà un certain nombre d'études sur l'impact des matériaux composites à fibres végétales, comme le lin, le sisal et le jute. En revanche, l'étude de l'impact en lui-même de ces matériaux reste assez limitée et on trouve peu d'études concernant le post d'impact. De plus, les techniques de corrélation d'images numériques (CIN) et émission acoustique (EA), qui présentent un très grand intérêt notamment pour des essais aussi rapides comme l'impact, sont très peu utilisées dans l'étude des matériaux composites en fibre naturelles, et pourraient apporter des éléments intéressants concernant la caractérisation des matériaux lors de l'impact à basse vitesse (IBV), l'indentation et compression après l'impact (CAI).

2. Impact sur les structures composites : définition et classification

En mécanique, le choc correspond à l'application d'une force importante durant un temps très court, généralement accompagné d'un brusque changement de vitesse [01]. Un impact peut être défini comme le cas particulier d'un choc de projectile sur une surface. Les impacts à fortes énergies entraînent souvent la perforation et semblent donc causer les dégâts les plus graves. Cependant, il ne faut pas négliger les impacts à faible énergie car ceux-ci provoquent des délaminages à l'intérieur des composites qui peuvent se propager sous sollicitation cyclique [2]. Les structures composites sont victimes de chocs accidentels (impact d'oiseau, chute de grêlon, chute d'outils, impact de ballast, de gravillons). La particularité des matériaux composites est qu'ils peuvent s'endommager sans laisser de traces visibles à l'extérieur lors des petits chocs. Ces impacts sont connus aussi comme étant dangereux pour l'intégrité structurelle du matériau. Le phénomène d'impact peut aller des configurations de

faibles énergies (chute d'outils, chocs de maintenance) aux grandes énergies (ingestion d'oiseau, impact de grêlons, impact de gravillons). Les Figures 1(a) et (b) présentent l'exemple du nez d'un avion A340 de la compagnie Iberia en 2012 qui a subi l'impact d'oiseau [3] et l'éclatement d'un moteur de A380 en 2010 qui suite à l'explosion d'un disque de turbine a entraîné la destruction du carénage du réacteur, la perforation de l'aile et l'endommagement de la zone d'approvisionnement en kérosène.

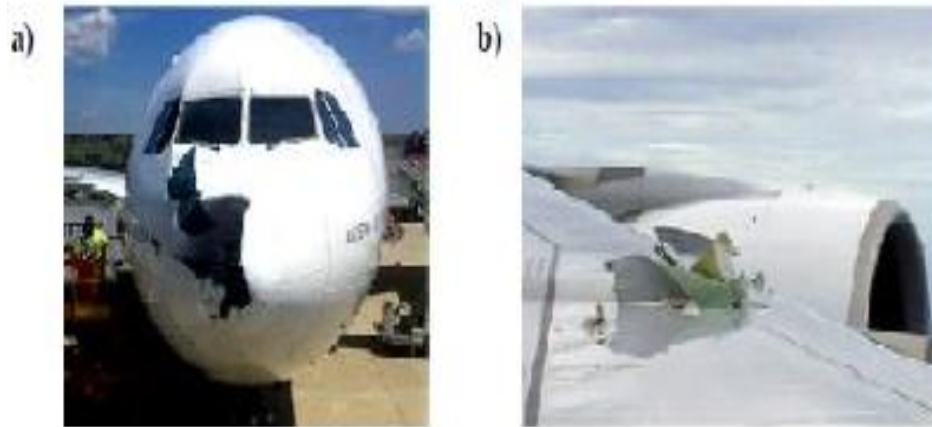


Figure 1. a) Impact oiseau sur A340 (Iberia) ; b) Impact de débris moteurs A380 (Quantas) [3].

2.1. Techniques d'essai d'impact

En fait, le montage de l'essai d'impact doit être conçu pour simuler les conditions de chargement aux quelles un composite est soumis dans un service opérationnel, puis reproduire les modes et mécanismes de défaillance, qui sont susceptibles de se produire. Les premières est généralement simulé à l'aide d'un poids tombant ou d'un pendule et le second à l'aide d'un canon à gaz ou d'un autre lanceur balistique. Cependant, en raison du manque de normes expérimentales une grande variété de techniques d'essais sont actuellement employées pour évaluer la réponse dynamique des plastiques renforcés, ce qui rend la comparaison directe difficile. Les méthodes d'essai les plus utilisées sont le pendule Charpy, le pendule Izod et les dispositifs de chute de poids, comme le montre la Figure 2.

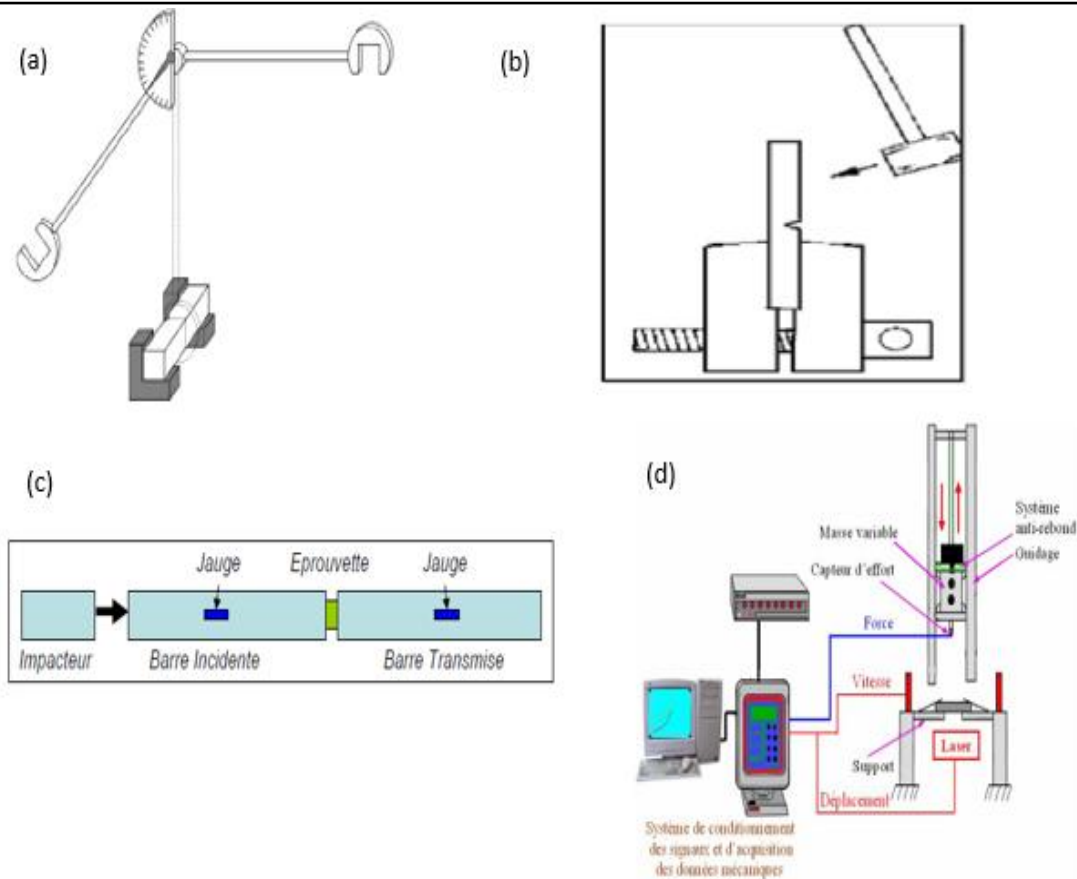


Figure 2. Techniques d'essai d'impact, (a) Essai Charpy, (b) Essai Izod, (c) Barre d'Hopkinson, et (d) Tour de chute [4,5].

2.1.1. Tour de chute

Une tour de chute est un dispositif possédant un impacteur de forme hémisphérique en général, pouvant être instrumenté avec divers capteurs tels que des accéléromètres ou capteurs de force. Il est généralement positionné sur une traverse glissant le long de rails de guidage verticaux. L'impacteur peut être lâché d'une hauteur variable et la masse de l'impacteur peut également être réglable (Figure 2(d)). L'échantillon se situe dans l'axe de l'impacteur sur un socle et est maintenu sur ses bords ou par un dispositif de bridage. Sur certaines tours de chute, un mécanisme anti-rebond peut également être utilisé pour empêcher l'impacteur de tomber plusieurs fois sur l'échantillon. Grâce à ce système, la valeur de l'énergie d'impact peut être connue à l'avance et dépend de la hauteur de chute ainsi que de la masse tombante. En effet, dans un cas parfait où il n'y a pas de frottements, l'énergie d'impact, qui est égale à l'énergie cinétique de l'impacteur, correspond également à la variation de l'énergie potentielle de pesanteur entre le lâcher de la masse (hauteur h) et l'impact (hauteur $h_0 = 0$) [5].

2.2. Différents régimes de réponse aux impacts

Il existe de nombreuses études traitant des problèmes d'impacts à des vitesses différentes. La gamme de vitesse va déterminer le type de réponse de la plaque, schématiquement trois régimes d'impact sont possibles (Figure 3) [6]. Le premier survient à énergie élevée et grande vitesse (des impacts types balistiques), entraînant une réponse de la cible dominée par la propagation des ondes vibratoires sur l'échelle de l'épaisseur avec un temps d'impact court (Figure 3(a)). Le temps de réponse est suffisamment court pour que ces ondes n'aient pas le temps d'atteindre les limites de la structure impactée. Les conditions aux limites de la plaque influent sur la réponse à l'impact. Le comportement global est alors davantage dicté par les propriétés du matériau constituant la structure. Le deuxième cas, avec un temps d'impact plus long, est un cas intermédiaire entre la configuration basse vitesse et la configuration haute vitesse. Ici, la réponse de la cible est dominée par les ondes de flexion et de cisaillement (Figure 3(b)). La dernière configuration correspond à des impacts de faible énergie et basse vitesse (Figure 3(c)). Le temps d'impact est suffisamment long pour que les ondes de déformations liées au choc se propagent et soient réfléchies aux limites de la cible. La réponse du spécimen impacté est alors fortement influencée par les conditions aux limites. Dans cette situation, il est alors possible d'établir une équivalence entre un impact et une indentation quasi-statique.

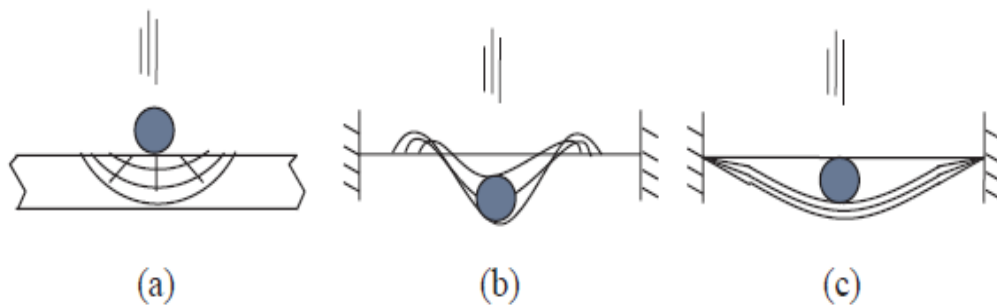


Figure 3. Classification des différents impacts [7].

2.3. Classification des impacts.

Les impacts sont classifiés de plusieurs façons. Certains auteurs établissent une classification à partir de la seule donnée de la vitesse d'impact. Les valeurs des vitesses d'impact sont référencées comme suit [5] :

- **Impact à basse vitesse** : entre 0 et 50 m/s

Ces impacts résultent typiquement de la chute d'un outil lors des phases de maintenance ou de la percussion de débris présents sur la piste et projetés sur la structure durant les phases de roulage. Il s'agit donc aussi bien de chocs mous, pour les débris de pneus éclatés notamment, que de chocs durs, pour les outils métalliques.

- **Impact à vitesse modérée** : entre 50 et 200 m/s

Ces impacts ont des conséquences qui peuvent être dramatiques pour l'aéronef et ce d'autant plus qu'ils se produisent généralement pendant des phases où l'aéronef est en l'air. Dans cette gamme de vitesse, on retrouve tout d'abord les chocs d'oiseaux lors des phases de décollage et d'atterrissage qui sont des chocs mous mais avec des énergies élevées de parts la masse du projectile (de l'ordre de 2 kg). Il y a aussi les impacts de grêle qui touchent la structure toute entière et qui sont des chocs durs mais avec des niveaux d'énergies plus faibles que pour le choc d'oiseau.

- **Impact à vitesse élevée** : entre 200 et 1000 m/s

Ces impacts sont à prendre en compte pour les aéronefs militaires car il s'agit pour la plupart d'impacts balistiques.

- **Impact hyper vitesse** : supérieure à 4000 m.s⁻¹

Ce type de charges dynamiques se retrouve pour les engins spatiaux et notamment les satellites qui peuvent être percutés par des projectiles en tout genre une fois en orbite dans l'espace. Les énergies d'impact sont par ailleurs très variées étant donnée la diversité des débris spatiaux présents. On relèvera aussi, que dans la modélisation de l'impact, il est nécessaire de prendre en compte, en plus le solide en lui-même, un effet de souffle lors du choc car avec sa vitesse, le débris explose littéralement au moment de l'impact.

3. Comportement des composites sous sollicitation d'impact

Plusieurs chercheurs ont trouvé que les essais Izod/Charpy ne sont pas bien précis et sont moins répétables que les essais réalisés avec une tour de chute. L'utilisation des composites croît rapidement et va être de plus en plus importante dans le futur. Il est donc nécessaire de mieux les caractériser à l'impact. Pour cela, les essais d'impact utilisant des dispositifs de type tour de chute sont particulièrement appropriés car ils permettent d'obtenir énormément d'informations sur le matériau et son comportement lors de l'impact, et permettent de simuler des types de chargements d'impact réels variés, comme la chute d'outils ou le contact avec d'autres matériaux [8]. Grâce à ce système, la valeur de l'énergie d'impact peut être connue à

l'avance et dépend de la hauteur de chute ainsi que de la masse tombante. En effet, dans un cas parfait où il n'y a pas de frottements, l'énergie d'impact, qui est égale à l'énergie cinétique de l'impacteur [9], correspond également à la variation de l'énergie potentielle de pesanteur entre le lâcher de la masse (hauteur h) et l'impact (hauteur $h_0 = 0$) [10]. L'équation (2) donne l'expression du calcul de l'énergie d'impact avec l'énergie cinétique.

$$E_{imp} = \frac{1}{2}mv_{imp}^2 \quad (1)$$

Avec m la masse tombante et v_{imp} la vitesse atteinte par l'impacteur lors de l'impact. Or, en chute libre et sans vitesse initiale, $v_{imp} = \sqrt{2gh}$, avec g l'accélération de la pesanteur et h la hauteur de chute, donc on retrouve bien l'énergie potentielle de pesanteur initiale égale à l'énergie d'impact (équation (3)) :

$$E_{imp} = mgh \quad (2)$$

Pour étudier le comportement et identifier les caractéristiques d'un matériau composite sous impact basse vitesse, il est essentiel d'analyser les quatre principales courbes, afin de comprendre la réponse de l'impact sur les échantillons.

3.1. Courbe Déplacement-temps

De nombreux résultats sont exploitables et permettent de bien analyser le comportement de l'impact à basse vitesse. Les premiers résultats que l'on peut habituellement obtenir sont le déplacement (la déflexion) de l'échantillon au cours du temps lors de l'impact, et la force en fonction du temps. Grâce à ces données, le temps d'impact peut être calculé et la force d'impact ainsi que la déflexion maximale peuvent également être déterminées. La Figure 4 est un exemple de courbe déplacement (ou déflexion) / temps que l'on peut obtenir lors d'un essai d'impact. Ici, la courbe a été tracée d'une façon d'avoir que le déplacement de l'impacteur lorsqu'il est en contact avec l'échantillon. En négligeant la déformation de l'impacteur, on peut considérer que ce déplacement correspond également à la déflexion du matériau. A l'aide de cette courbe, il est possible de déterminer la valeur de la déflexion maximale, le temps pour atteindre la déflexion maximale, et également la durée totale de l'impact ainsi que la déflexion résiduelle [11]. En effet, lorsque l'impact crée un endommagement, une déformation se crée dans le matériau, et malgré le retour élastique qui

peut être constaté avec la diminution du déplacement à la fin de l'impact (rebond de l'impacteur), la déflexion finale est non nulle.

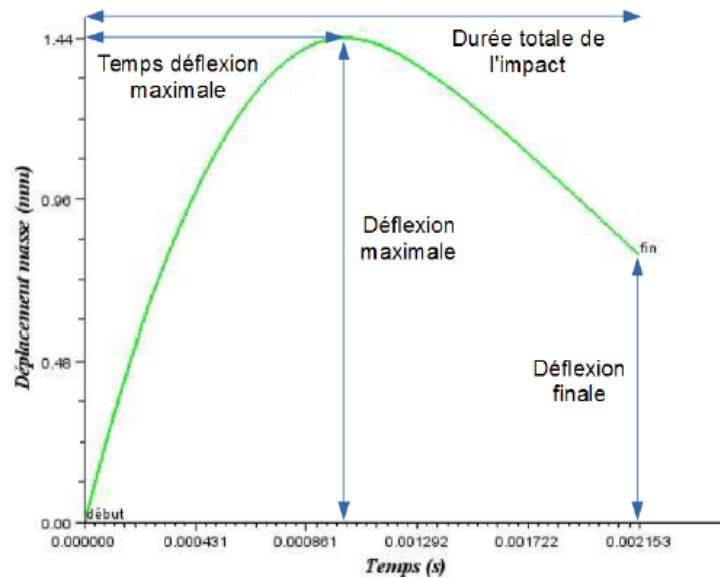


Figure 4. Courbe déplacement/temps lors d'un impact [12].

Notez que l'historique des déplacements a été obtenu à partir des données de force de contact mesurées, de la masse de l'impacteur et de la vitesse d'impact initiale pour chaque essai. L'historique du déplacement a été calculé à partir d'une double intégration de l'enregistrement de la force en fonction du temps par l'équation suivante [13] :

$$D = \int v_0 dt + \iint \frac{F(t) - Mg}{M} d^2t \quad (3)$$

Où D est le déplacement, F(t) est la force acquise par le système d'acquisition de données, M est la masse totale de l'impacteur, v_0 est la vitesse de contact calculée par la hauteur initiale de la masse tombante, et g est l'accélération gravitationnelle ($9,8 \text{ m/s}^2$).

3.2. Courbe Force-temps

L'énergie dissipée lors de l'impact est principalement due aux dommages dans le composite (Figure 5). Cet endommagement est visible sur l'historique de la force de contact avec l'apparition de deux seuils. Le premier seuil est marqué par de vives oscillations reliées aux premiers endommagements au sein du matériau. Le second seuil est caractérisé par une chute brutale de la force, suivie d'une nouvelle augmentation selon une pente plus faible. Ce second seuil est attribué à l'apparition de délaminage marquant des effets significatifs sur le

comportement global de la cible, c'est pourquoi il est nommé seuil d'endommagement ou seuil de délaminage [14].

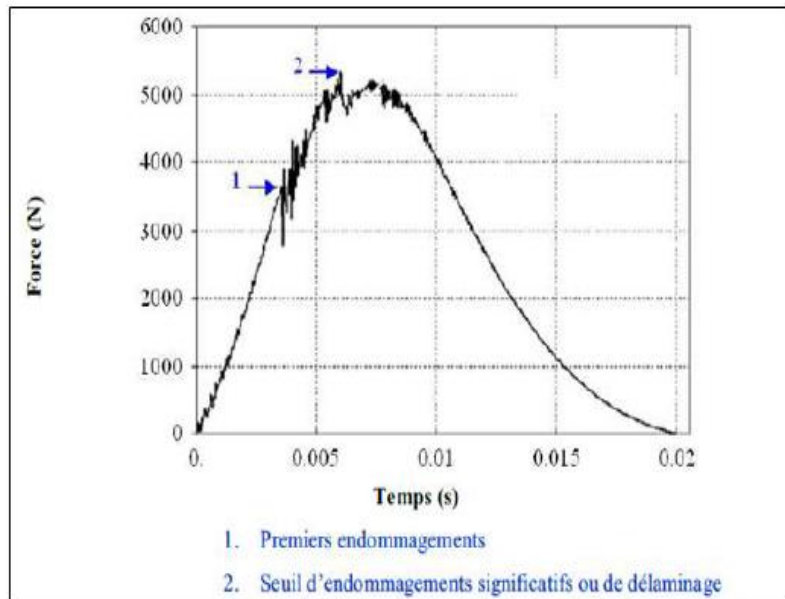


Figure 5. Réponse classique à un impact basse vitesse d'une plaque composite stratifiée en fibres de verre, avec rebond de l'impacteur : historique de la force de contact [15].

3.3. Courbe Force-déplacement

La réponse force-déplacement est considérée comme une signature importante de la réponse d'un matériau à une charge d'impact. A faible énergie et faible vitesse, la courbe représentant la force appliquée au composite en fonction du déplacement de l'impacteur a une allure bien spécifique comme montré sur la Figure 6. Elle peut être divisée en plusieurs zones :

- La zone 1 représente le comportement élastique non linéaire en flexion du composite (le contact composite / support change au cours du déplacement de l'échantillon)
- La zone 2 commence à partir d'une valeur de l'effort indépendante de l'énergie d'impact, et où la raideur diminue. C'est dans cette partie que l'endommagement par fissuration ou par délaminage de la plaque apparaissent. A la fin de cette zone, une chute importante de l'effort peut apparaître dans le cadre de deux types d'endommagement : une rupture de fibres, ou la perforation de l'échantillon
- La zone 3 correspond au retour élastique de flexion de l'échantillon et on observe finalement un déplacement résiduel causé par la présence de fissures et/ou la plastification de la matrice du composite [16].

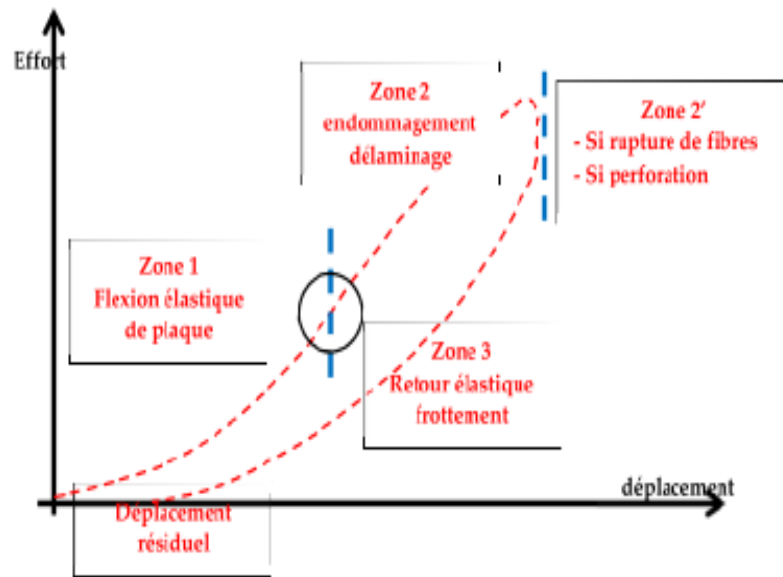


Figure 6. Comportement effort-déplacement de plaques à faible énergie et faible vitesse [16].

La Figure 6 donne un exemple de courbe force/déflexion que l'on peut obtenir lorsque l'échantillon n'est pas perforé, mais ce type de courbe peut avoir d'autres allures lorsque le matériau est fortement endommagé, et ce type de courbe peut donc également être un bon indicateur de l'état final du matériau testé [17]. On peut définir deux types de courbes force-déplacement, fermée et ouverte, correspondant aux cas non perforés et perforés des plaques composites sous une charge d'impact. De même, il existe trois types de courbes force-déplacement (c'est-à-dire les courbes fermées, semi-fermées et ouvertes) des composites sous diverses énergies d'impact, comme illustré à la Figure 7.

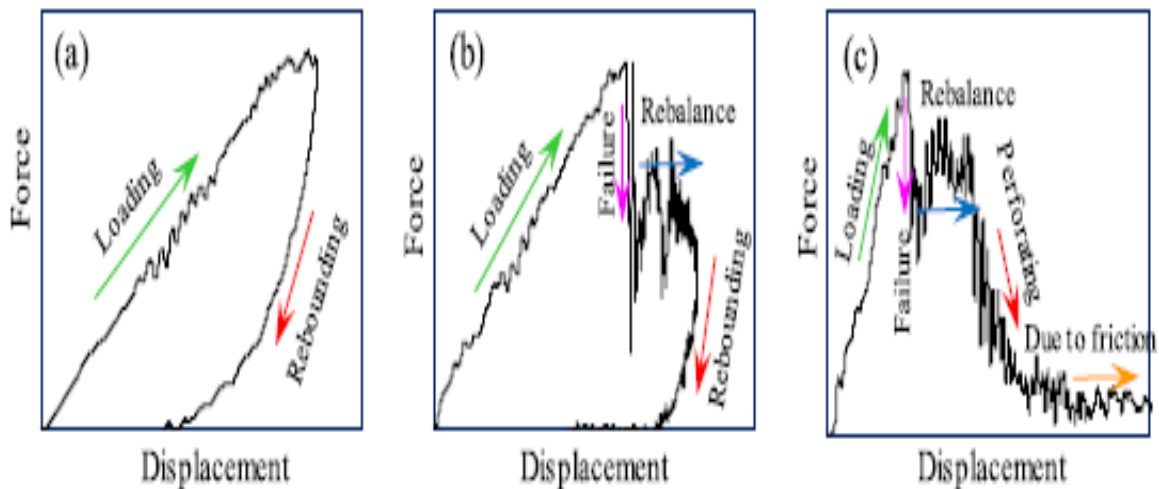


Figure 7. Courbes force-déplacement sous l'impact d'un poids tombant : (a) type fermé, (b) type semi-fermé, et (c) type ouvert [13].

Les trois types de courbes force-déplacement correspondent aux différents modes de dommage : (a) aucun dommage ou seulement une déformation plastique, (b) dommage partiel, et (c) dommage complet - perforation.

Les trois types de courbes force-déplacement se composent d'une section ascendante de chargement et d'une section descendante en général. La section ascendante pourrait également être appelée section de raidissement, car elle représente l'historique de la rigidité en flexion du composite sous la charge d'impact. Au début de l'impact, l'impacteur touche juste l'échantillon et la force de contact augmente lentement avec le déplacement, ce qui est représenté par une augmentation linéaire à faible pente dans la courbe. Le matériau se déforme élastiquement à ce stade. Avec un déplacement supplémentaire, la force de contact commence à augmenter plus rapidement après un coude et continue ensuite à augmenter presque linéairement jusqu'au pic. L'énergie d'impact est principalement absorbée par la déformation élastique et plastique du matériau et aucun dommage ne se produit à ce stade. En fonction du niveau d'énergie de l'impact, la section descendante peut présenter trois possibilités différentes. Un type fermé de courbe force-déplacement se produit sous de faibles énergies d'impact où l'impacteur rebondit sur l'échantillon sans lui causer de dommages (Figure 7a). Lorsque l'énergie d'impact augmente jusqu'à un certain niveau, la courbe force-déplacement apparaît de manière semi-fermée, ce qui indique un endommagement partiel de l'éprouvette et le rebond de l'impacteur (Figure 7b). Une courbe de type ouvert reflétant la perforation de l'éprouvette par l'impacteur apparaît sous des énergies d'impact plus élevées (Figure 7c).

A l'aide des courbes force/déflexion, il est possible de déterminer les énergies impliquées dans l'impact, qui sont l'énergie absorbée E_{abs} par l'échantillon et l'énergie élastique E_{elast} , cette dernière correspondant à la quantité d'énergie récupérée après impact. En effet, comme expliqué dans la Figure 6, l'énergie absorbée est équivalente à l'aire qui est à l'intérieur de la courbe force/déflexion, tandis que l'énergie élastique correspond à la zone située sous la courbe (l'énergie d'impact restituée). L'énergie absorbée peut être séparée en deux composantes différentes : l'énergie d'endommagement E_{endo} qui crée l'endommagement dans l'échantillon, et l'énergie dissipée par le système E_{diss} sous forme de frottements et de vibrations au niveau des conditions limites (dispositif d'essai, impacteur), de chaleur, elle peut donc être formulée par l'équation (5).

$$E_{abs} = E_{end} + E_{diss} \quad (4)$$

Enfin, l'énergie d'endommagement se décompose également en plusieurs termes (équation (6)) : l'énergie d'indentation E_{inden} , l'énergie d'endommagement matriciel E_{mat} et enfin, l'énergie associée à la rupture des fibres E_{fibre} [18].

$$E_{end} = E_{indent} + E_{mat} + E_{fib} \quad (5)$$

Il est également possible de définir l'énergie absorbée à l'aide des énergies cinétiques de début d'impact et de fin d'impact, comme montré dans l'équation (7), avec les vitesses v_0 et v_f correspondant respectivement à la vitesse de l'impacteur lorsqu'il entre en contact avec l'échantillon et la vitesse de l'impacteur à la fin du contact (rebond) [19].

$$E_{abs} = \frac{1}{2}m(v_0^2 - v_f^2) \quad (6)$$

3.4. Courbe Energie-temps

L'absorption d'énergie pendant l'impact est un paramètre essentiel pour l'analyse de la réponse dynamique des composites. L'aire comprise sous une courbe de force de contact en fonction du déplacement (voir la Figure 6) caractérise l'énergie absorbée par le matériau. Par conséquent ces niveaux d'impact peuvent être divisés en deux parties, à savoir l'énergie élastique (E_e qui n'est pas dissipée pendant l'impact) et l'énergie d'absorption (E_a qui est dissipée pendant l'impact), et E_i est l'énergie maximale (impact) à la force maximale. La relation entre E_i , E_e et E_a peut alors s'écrire comme suit :

$$E_i = E_a + E_e \quad (7)$$

La Figure 8 illustre deux courbes d'absorption d'énergie en fonction du temps qui représentent les cas de rebond et de perforation. Dans un cas de rebond, pour la réponse force-déplacement fermée ou semi-fermée présentée à la Figure 7(a et b), l'énergie cinétique initiale de l'impacteur est d'abord complètement absorbée par le matériau. Ensuite, une partie de l'énergie absorbée retourne à l'impacteur en raison de la résilience élastique du matériau (Figure 8a). Par conséquent, l'absorption finale d'énergie est inférieure à l'énergie initiale de l'impact. Alors que dans le cas où l'impacteur perfore le spécimen, correspondant à la réponse force-déplacement de type ouvert (Figure 7c), l'énergie d'impact est supérieure à la capacité

d'absorption d'énergie du matériau (Figure 8b). L'impacteur possède toujours une énergie cinétique résiduelle après avoir perforé le matériau.

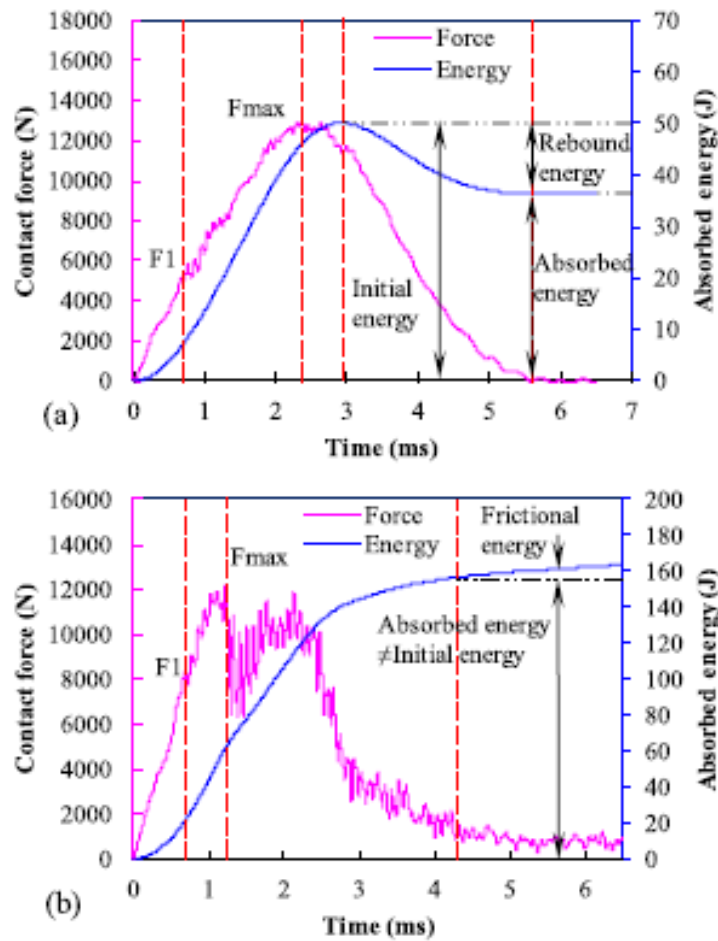


Figure 8. Courbes d'absorption d'énergie et de force de contact en fonction du temps dans les cas (a) de rebondissement et (b) de perforation [13].

4. Paramètres influencent sur la réponse d'impact

En raison de la structure hétérogène des matériaux, de la nature des contraintes et des déformations, de la rupture par délaminage et de la propagation des fissures, il est nécessaire de bien comprendre les différents paramètres qui influencent la réponse aux impacts des matériaux composites afin de développer la configuration la plus optimale. Les paramètres qui influencent le comportement dynamique à l'impact des matériaux composites soumis à des charges d'impact peuvent être regroupés en quatre types principaux, comme le montre la Figure 9.

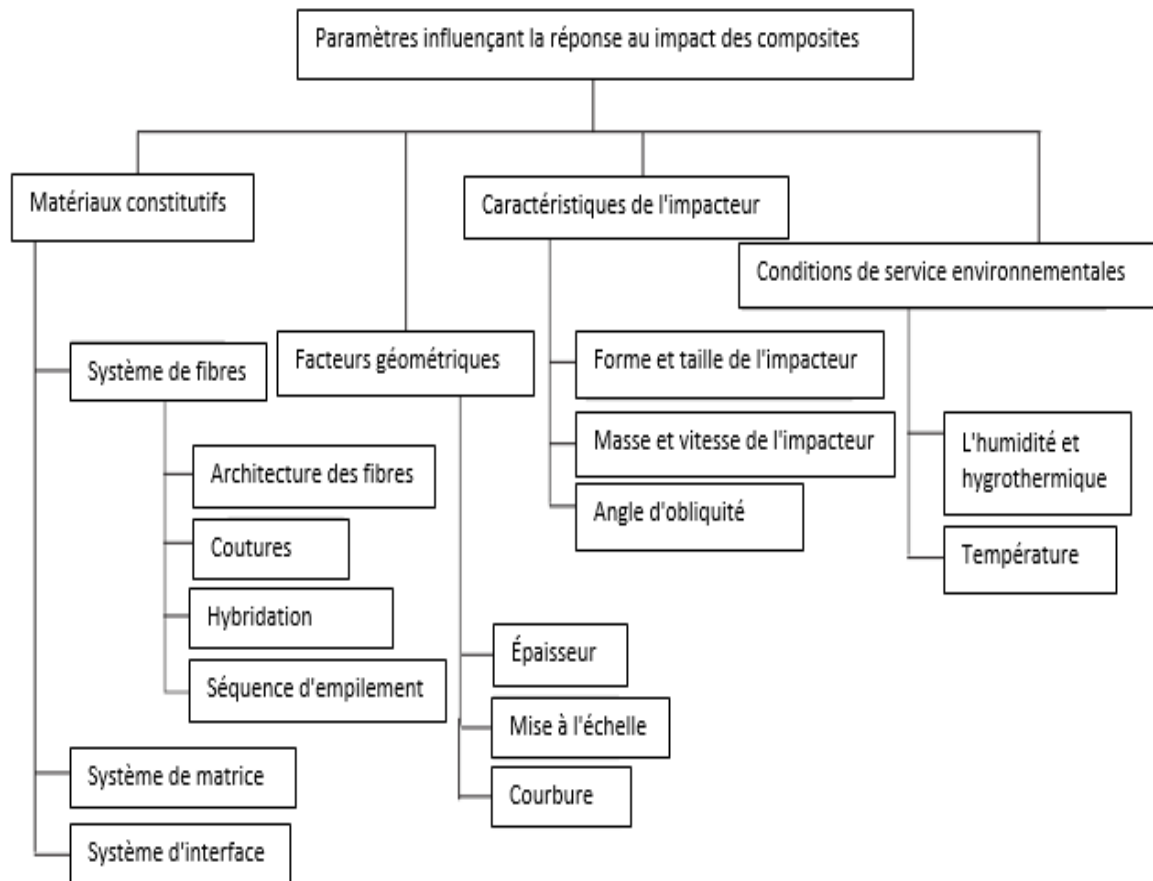


Figure 9. Facteurs influençant la réponse à l'impact des matériaux composites.

4.1. Influence des constituants sur la réponse d'impact

L'étude de l'influence des constituants sur la réponse à l'impact des structures composites a parcouru un long chemin pour arriver à son stade le plus optimal de la compréhension de la mécanique globale de ces matériaux et leur réponse aux dommages [20]. Un matériau composite comprend trois systèmes clés : le renforcement, la matrice et la zone d'interface. L'interface fibre/matrice est la région de liaison entre les renforts et la résine. Les caractéristiques mécaniques et chimiques des fibres, matrices et de l'interface influencent la façon dont le composite se déforme et se fracture. Les caractéristiques de ces systèmes influencent les contraintes mécaniques nécessaires pour déclencher les différents modes de dommages sous charge d'impact. Les modes d'endommagement qui comprennent la fissuration de la matrice ou de la zone d'interface fibre/matrice conduisent à de faibles énergies de rupture, tandis que les dommages comprenant la rupture des fibres conduisent à une dissipation d'énergie considérablement plus élevée. Les caractéristiques fondamentales des constituants et les conditions de chargement influencent la capacité d'absorption d'énergie de ces modes d'endommagement.

4.1.1. Type de fibre

L'influence des différents types de systèmes de fibres sur la réponse à l'impact des matériaux composites est énorme. Les renforts en fibres sont les éléments porteurs clés, offrant à la structure la plus grande partie de sa force et de sa rigidité [21]. Actuellement, de nombreuses variétés de fibres de renfort sont disponibles. L'aramide, le carbone et le verre sont les renforts les plus couramment utilisés pour fabriquer des composites. Dans chacun de ces groupes, des renforts présentant une large gamme de caractéristiques qui sont disponibles. Les renforts en carbone sont couramment utilisés dans le secteur de l'aérospatiale car ils possèdent les propriétés mécaniques spécifiques les plus élevées ; d'autre part, c'est la fibre la plus fragile. Les renforts en verre ont une déformation élevée jusqu'à la rupture et une faible résistance et rigidité. En outre, ils sont moins chers que les renforts en carbone. Les caractéristiques mécaniques de l'aramide se situent entre celles des renforts en verre et en carbone. Comparativement, peu d'attention a été accordée dans la littérature aux composites à base de fibres naturelles.

- **Architecture des fibres**

L'architecture des fibres a un effet important sur la réponse aux impacts des composites. Les composites unidirectionnels ont trouvé une large gamme d'applications dans l'industrie aérospatiale, comme le fuselage, les ailes et le caisson de voilure, mais leur réponse aux charges transversales est très faible et ils subissent des dommages importants à la matrice, la rupture des fibres et le délaminage. Les composites bidimensionnels ont été développés pour surmonter les inconvénients des composites unidirectionnels. En raison de l'ondulation des fils dans l'architecture des fibres, les composites bidimensionnels ont montré une plus grande résistance aux charges d'impact. Comparés aux composites bidimensionnels, les composites tridimensionnels se sont avérés capables d'absorber deux fois plus d'énergie [22].

- **Couture**

Une grande partie de la littérature a été consacrée à la caractérisation expérimentale du comportement dynamique des composites cousus lors d'un impact à faible vitesse. La plupart des études montrent que l'application de coutures diminue la zone de délamination générée par la charge d'impact en raison de l'amélioration des caractéristiques de fracture inter-laminaire du composite. Les recherches expérimentales ont montré que la densité linéaire du

fil et la densité surfacique des coutures influencent la performance des coutures en régissant la résistance au délaminage des composites [23].

- **L'hybridation.**

L'hybridation de différents matériaux, synthétiques ou naturels, a un effet significatif sur la résistance à l'impact des composites. En général, les fibres à faible déformation à la rupture sont combinées avec des fibres à forte déformation à la rupture pour améliorer le comportement à l'impact des composites. Au cours de la dernière décennie, l'attention s'est portée sur un groupe relativement nouveau de matériaux hybrides basés sur des renforts synthétiques (principalement en verre) et naturels, dans le but de fabriquer des matériaux composites respectueux de l'environnement et très résistants aux chocs. Les fibres naturelles peuvent être une alternative appropriée aux fibres synthétiques, telles que le carbone et le verre, pour de nombreuses caractéristiques écologiques mais pas pour la résistance à l'impact. L'amélioration de la résistance à l'impact des composites peut être obtenue par l'hybridation de fibres naturelles avec différentes fibres synthétiques [23].

- **Séquence d'empilement**

Comme le comportement dépend de la direction, la réponse à l'impact des matériaux composites ayant diverses orientations de fibres a été étudiée pendant plusieurs années. Pour obtenir des propriétés d'impact supérieures, les matériaux composites nécessitent le placement correct de renforts appropriés dans le matériau, ce qui offre une meilleure chance pour améliorer les propriétés du matériau ; d'autre part, cela augmente la difficulté du problème de conception [24].

4.1.2. Système de matrice et d'interface

Comme les systèmes fibreux, le comportement à l'impact des matériaux composites est fortement influencé par les systèmes de matrice et d'interface. Le système matriciel dans un matériau composite aide à défendre, aligner et stabiliser les renforts ainsi qu'à faciliter le transfert de charge d'une fibre à l'autre [25]. La ténacité des résines influence fortement l'amélioration de la résistance à l'impact des composites. Diverses études indiquent que la ténacité des composites thermoplastiques (TP) est beaucoup plus élevée que celle des

composites thermodurcissables (TD), ce qui conduit à l'amélioration de la performance sous charge d'impact [23].

4.2. Facteurs géométriques

Les sections précédentes ont discuté du rôle des différents constituants des matériaux sur le mécanisme d'impact. Afin d'avoir un point de vue plus large sur les facteurs géométriques, cette section met l'accent sur le facteur essentiel l'épaisseur.

- **Epaisseur**

Un facteur pratique lié à l'application des composites est l'épaisseur du composite, car les composites épais interagissent de différentes manières avec la charge appliquée extérieurement que les composites minces [26]. L'épaisseur est un paramètre vital car elle modifie le mode d'absorption d'énergie et la zone de rupture des composites [27]. Le mode de défaillance prédominant qui se produit pendant l'événement d'impact est principalement déterminé par l'épaisseur du composite stratifié. On considère que la réponse à la déformation dans le sens de l'épaisseur des structures composites minces c'est la même sur toute l'épaisseur. Cependant, si l'épaisseur de la structure composite est augmentée, la déformation et la réponse de la contrainte induite du stratifié peuvent être différentes à des endroits différents dans le sens de l'épaisseur [23].

4.3. Caractéristiques de l'impacteur

Les paramètres constitutifs et géométriques sont des paramètres largement discutés dans l'étude de la mécanique d'impact des composites. Relativement peu d'intérêt a été accordé dans la littérature à la forme, la taille, la vitesse, la masse et l'angle de l'impacteur [23].

- **Forme et taille de l'impacteur**

La géométrie de l'impacteur a un effet significatif sur les performances d'impact des composites en termes de résistance à l'impact et de tolérance aux dommages. L'examen de la littérature révèle que la majorité des tests d'impact à basse vitesse ont été réalisés en utilisant un impacteur hémisphérique [28] ; Les différentes formes de géométries d'impacteur utilisées pour impact à basse vitesse (IBV) sont présentées à la Figure 10.

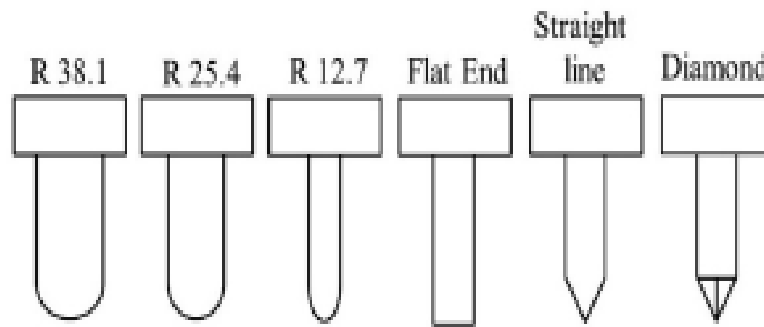


Figure 10. Différents types de pénétrateurs/impacteurs utilisés pour l'essai IBV [28].

- **Masse et vitesse de l'impacteur**

Quelques travaux de recherche ont porté sur l'investigation du rôle de masse et vitesse de l'impacteur sur la réponse à l'impact des matériaux composites. De nombreuses investigations antérieures sur ce domaine sont basées sur des approches d'essais à masse constante consacrées à considérer comment cette énergie d'impact est obtenue (combinaison vitesse et masse). Diverses vitesses d'impact entraînent divers taux de déformation, et certains chercheurs ont signalé que les effets du taux de déformation peuvent jouer un rôle important dans la réponse des composites soumis à des charges d'impact [29].

- **Angle d'obliquité**

Les recherches sur l'influence des angles d'impact sur les structures composites ne sont qu'à leurs débuts. Les publications sur le comportement des impacts obliques sont très rares. La plupart des recherches et publications concernant l'analyse des impacts sur les matériaux composites traitent de l'impact normal. Cependant, les impacts normaux ne se produisent pas souvent dans le cas pratique ; les structures composites sont principalement impactées à un certain angle oblique. De plus, selon l'angle d'impact par rapport à la cible, des rebonds ou des retours peuvent avoir lieu [23].

4.4. Conditions de service environnemental

L'effet des conditions de service environnementales sur l'impact a été étudié par de nombreux chercheurs car l'impact réel peut frapper une structure composite exposée à divers environnements [30]. Comme la plupart des composites sont utilisés à l'extérieur, il est probable que les composites soient soumis à des conditions environnementales critiques.

L'exposition à différentes conditions environnementales peut entraîner des dommages irréversibles ou permanents et réversibles (par exemple, le ramollissement de la matrice, la dégradation) [30].

- **Humidité et vieillissement hygrothermique**

La nécessité de l'application des composites dans un environnement marin augmente de manière significative. Les bateaux en composites sont environ 35% et 10% plus légers que les bateaux en acier et en aluminium, respectivement [31]. Il est vital pour les enquêteurs d'établir une relation entre les diverses conditions et leurs influences sur les composites, principalement les conditions de chargement dynamique comme les charges d'impact.

- **Température**

La réponse à l'impact des composites à matrice polymère renforcée de fibres exposés à diverses températures élevées a été étudiée et rapportée dans de nombreuses publications. Les matériaux composites peuvent être employés dans les structures aéronautiques ou spatiales, où ils sont exposés à des températures comprises entre 73 et 80 °C ou 140 et 120 °C, respectivement [32] et la plupart des recherches disponibles dans la littérature publiée sont liées aux fibres de verre ou aux fibres de carbone [23].

5. Les mécanismes d'endommagement par impact à basse vitesse

En raison de la nature anisotrope des matériaux composites et de la distribution inégale des contraintes sous le chargement dynamique, les processus de dommages des composites sont très compliqués. Dans les métaux conventionnels, les dommages induits par l'impact ne sont pas un problème de sécurité important en raison du mécanisme intrinsèque d'absorption d'énergie et de la ductilité du matériau. Au contraire, les matériaux composites sont naturellement fragiles et peuvent absorber l'énergie à l'état élastique, ce qui les rend sensibles aux dommages causés par les impacts [33]. Les possibilités complètes de dommages induits par l'impact sont illustrées à la Figure 11. Les dommages tels que la fissuration de la matrice et l'endommagement de l'interface fibre/matrice et le délaminage entre deux couches sont les modes d'endommagement dominants distincts lors d'un impact à faible énergie. La rupture des fibres est le mode de défaillance dominant associé en particulier à des événements d'impact à haute énergie [34].

Les zones endommagées sont plus restreintes au voisinage de la face impactée et s'étendent vers la face non impactée (Figure 12). La force de contact sous l'impacteur produit une région

localisée de contraintes élevées. Côté non impacté, la déflexion globale de la plaque induit des contraintes normales longitudinales dues à la flexion. Dans la région centrale du stratifiée, des contraintes de cisaillement favorisent l'apparition de fissures transverses [35].

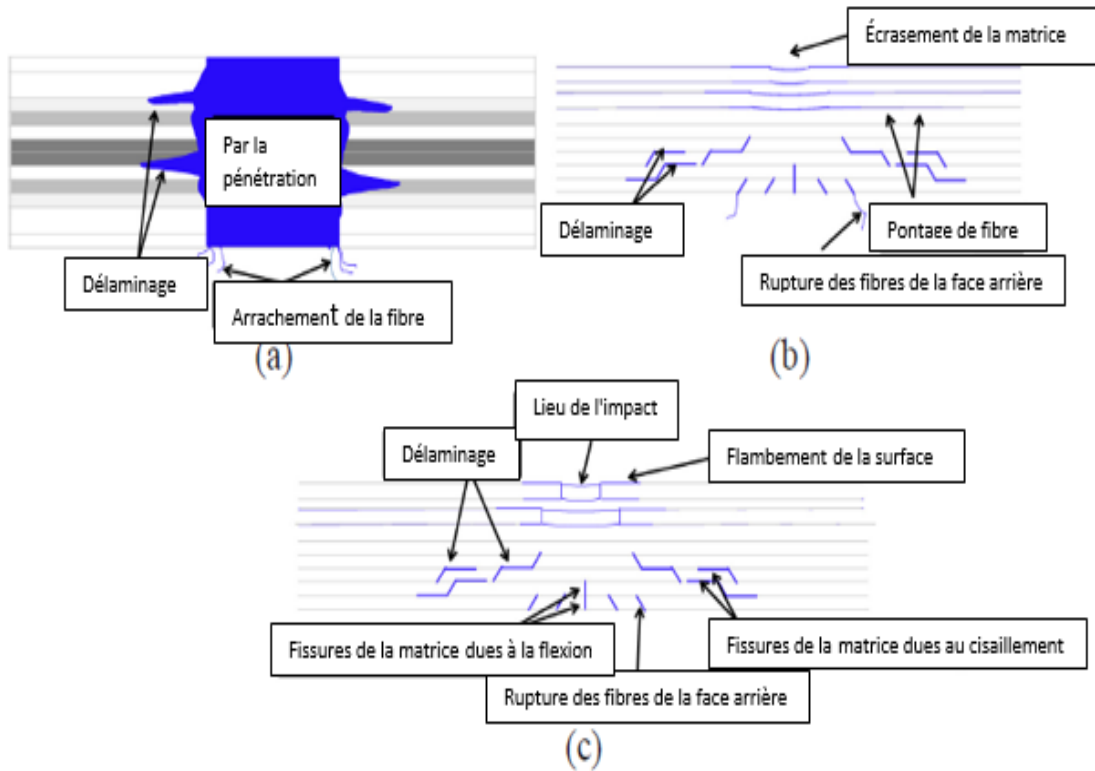


Figure 11. Schéma montrant les différents mécanismes d'endommagement dus à la charge d'impact (a) haute énergie, (b) énergie moyenne et (c) basse énergie [23].

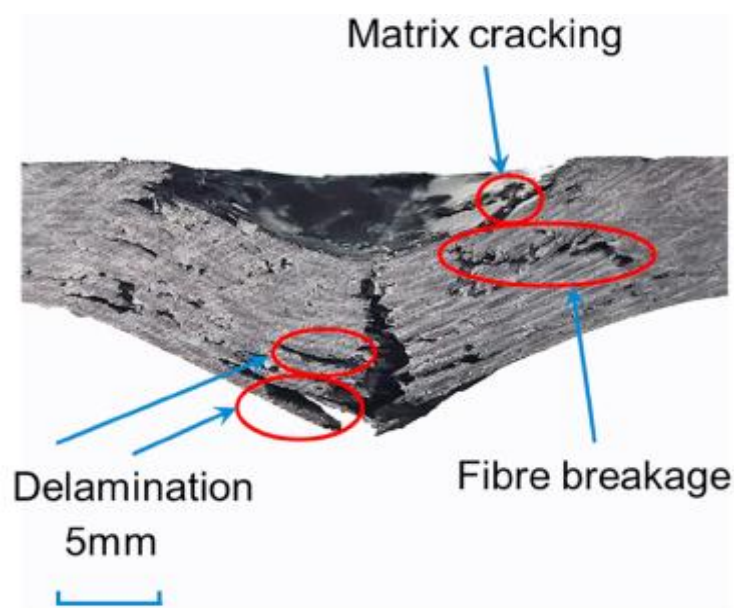


Figure 12. Coupe micrographique d'un stratifié composite impacté [36].

5.1. Fissures matricielles

La fissuration de la matrice est le premier type de dommage induite par l'impact et est généralement parallèle à la direction de la fibre dans le pli. Un système complexe de fissures matricielles se forme après l'impact. La Figure 13(a) et (b) montrent la fissuration de la matrice due à deux mécanismes différents. Fissuration dominée par le cisaillement est inclinée d'un certain angle par rapport au sens de l'épaisseur, ce qui implique l'effet d'une forte contrainte de cisaillement transversale sur la formation des fissures produites dans les couches supérieures et moyennes.

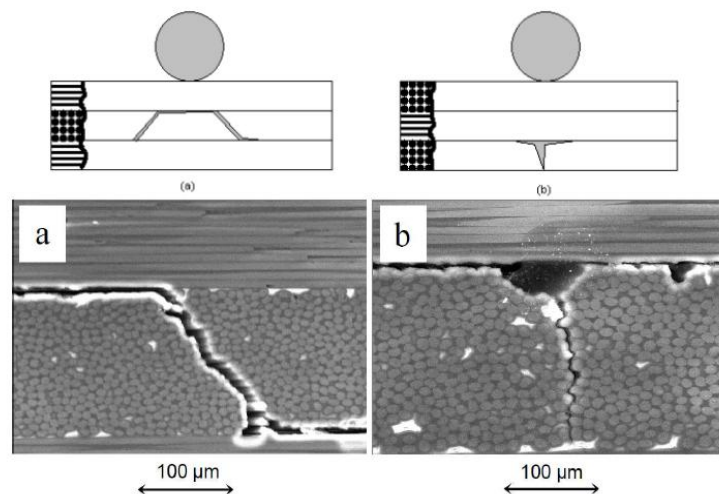


Figure 13. Fissuration matricielle de cisaillement (a) et de traction (b) [37].

Alors que les fissures dominées par la tension sont observées dans les couches inférieures où la contrainte de tension due à la déformation par flexion dépasse la résistance de la matrice. La concurrence des fissures de la matrice dominée par le cisaillement et la tension dépend étroitement de la structure de l'échantillon. Pour les plaques minces, les fissures de flexion se produisent dans les couches inférieures, tandis que les plaques épaisses sont plus rigides en flexion et la fissuration de la matrice due au cisaillement transversal est provoquée en premier lieu [37].

5.2. Délaminage

Les fissures matricielles débouchant sur les interfaces provoquent l'amorçage du délaminage dans les interfaces entre plis [38], qui se développe ensuite au cours de l'impact. Il existe donc un couplage entre ces deux modes d'endommagements inter et intra-laminaires. Le scénario d'endommagement a été expliqué par Renault et Wielgosz [39]. D'abord, les fissures matricielles se développent sous l'impacteur puis elles se propagent parallèlement à la

direction des fibres. Une fois la matrice du pli fissurée, des bandes de fibres se désolidarisent et peuvent glisser à l'interface entre deux plis. Le glissement provoque une bande de traction inter-faciale dans le pli inférieur et une bande de compression inter-faciale dans le pli supérieur. Cette différence de sollicitation dans l'interface provoque de fortes contraintes de cisaillement à l'interface induisant le délaminage. Le délaminage progresse au sein de la zone de traction, dans les limites de la zone de compression et en forme de triangles. La Figure 14 illustre ce phénomène dans le cas d'une stratification $[45^\circ/0^\circ/45^\circ]$.

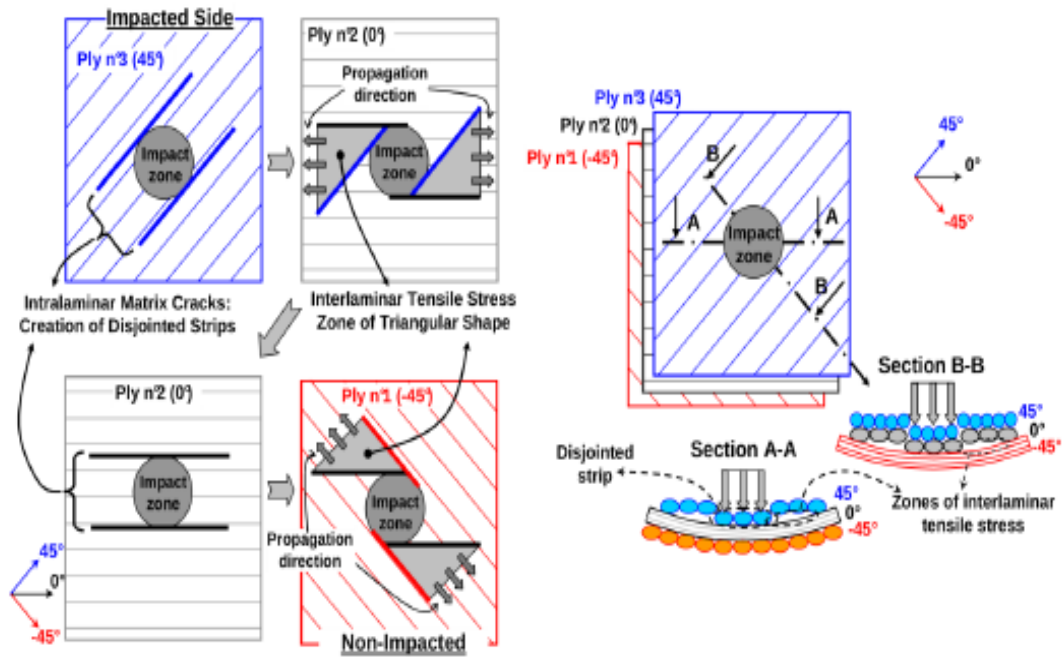


Figure 14. Mécanismes d'amorçage et propagation des délaminages [39].

L'orientation du pli inférieur pilote la direction de propagation. Les délaminages amorcés par les fissures à 45° sont instables et ceux amorcés par la fissuration verticale croissent de façon stable et proportionnellement à la force appliquée [40].

Dans le cas des plaques impactées, l'énergie élastique de déformation au niveau des délaminages, est donnée par l'expression suivante [41] :

$$E = \frac{2\tau^2 w L^3}{9E_f t} \quad (8)$$

τ est la contrainte admissible en cisaillement inter-laminaire. W et t sont respectivement la largeur et l'épaisseur de l'éprouvette. E_f est le module de flexion et L est la distance entre les appuis du montage d'impact.

5.3. Rupture des fibres

Les ruptures de fibres se localisent dans l'axe d'impact et sont visibles dans la face impactée et non impactée si l'énergie d'impact est assez importante. Lors d'un impact, la rupture des fibres peut se produire après la fissuration de la matrice et le délaminage. En général, la distribution de la rupture des fibres à travers l'épaisseur est plus étroite que la fissuration de la matrice et le délaminage. La rupture de la fibre se trouve clairement dans la zone située sous l'indenteur, en particulier la rupture de la fibre en tension, comme le montre la micrographie de la [Figure 12](#).

L'énergie nécessaire provoquant la rupture des fibres est [\[41\]](#) :

$$E_{fibre\ fracture} = \frac{\sigma^2 w t L}{18 E_f} \quad (9)$$

σ est la contrainte admissible en flexion de l'éprouvette.

5.4. Indentation permanente

Dans le cas d'un impact à faible vitesse, des dommages internes importantes, on observe souvent une indentation résiduelle à la surface de l'impacteur, appelée indentation. La déformation résiduelle après l'impact peut subir un processus de relaxation. L'indentation résiduelle finale après relaxation est appelée indentation permanente. Le mécanisme de l'indentation permanente est compliqué car il implique un phénomène de dommage complexe localisé autour de l'indenteur.

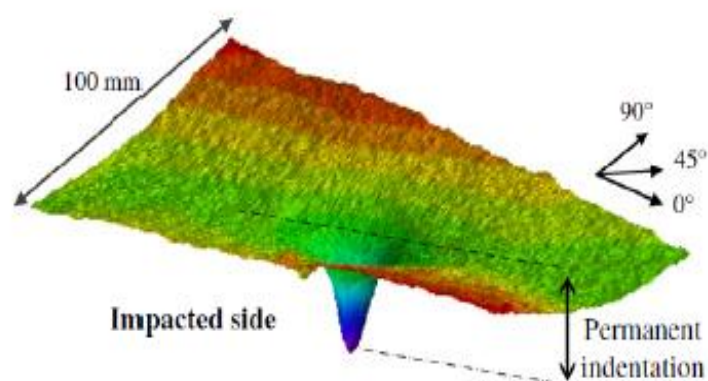


Figure 15. Indentation permanente dans une mesure expérimentale [\[42\]](#).

La [Figure 15](#) montre une indentation permanente obtenue par un impact à faible vitesse sur des stratifiés composites [\[42\]](#). Plusieurs mécanismes sont proposés pour être responsables de la formation d'une telle déformation permanente.

Les composites soumis à un impact à faible vitesse présentent des dommages à différents degrés, allant de dommages à peine visibles à des dommages visibles qui peuvent être observés dans les cas d'impact avec rebond et d'impact avec perforation. Chaque matériau de fibre et de matrice présente des modes de dommages particuliers lorsqu'il est soumis à une charge d'impact, qui dépendent de sa nature et de sa résistance propre. Les modes de dommage secondaires dépendent de la nature de l'interface fibre-matrice et de sa résistance associée. Le Tableau 1 présente les modes de dommage principaux présentés par les composites à fibres naturelles sous impact à basse vitesse (IBV).

Tableau 1. Particularité du mode de dommage pour les composites en fibres naturelles sous IBV.

Composites	Remarques	Réf
PLA/Lin	Rupture des fibres comme mode de dommage principal et l'absence le mode de délaminage	[43]
Époxy/ Lin unidirectionnel et à plis croisés	Le délaminage domine en tant que dommage de la face avant en raison des contraintes de cisaillement inter-laminaire entre les plis croisés, tandis que le dommage de la face arrière est contrôlé par la rupture des fibres.	[44]
Époxy/ Lin/Carbone	Le délaminage est le mode le plus importante dans la configuration CLC que dans la configuration LCL	[45]
Vinyl ester/ Lin/Verre	La configuration hybride a montré un délaminage plus important	[46]
Époxy/Lin/Verre	Les dommages subis à des températures élevées favorisent l'apparition de délaminage	[47]
Epoxy/lin	La configuration à couches croisées présente une direction de propagation des fissures perpendiculaire à celle observée dans les autres configurations.	[48]
Epoxy/lin	L'initiation des dommages commence sur la face non impactée et à proximité.	[49]
vinyl ester /Lin/Verre	Les configurations hybrides ont montré une rupture des fibres principalement attribuée à la nature fragile des fibres de verre	[50]
Polyester isophtalique/Jute	La rupture des fibres et la fissuration de la matrice sont importantes dans le jute pur et le délaminage est important dans les hybrides.	[51]
Epoxy Jute/Carbone	Rupture en compression et en traction dans les plis extrêmes, arrachement et flambage comme rupture de fibre, délaminage et fragmentation comme rupture de matrice.	[52]
Époxy/Kénafe/Verre	Fissuration circulaire importante dans les configurations verre vierge et hybride. Fissuration bi-axiale importante dans les stratifiés vierges renforcés de kénafe.	[53]
Polypropylène/chanvre	Rupture de la matrice, arrachement des fibres important d'après la fractographie au microscope électronique à balayage (MEB).	[54]
Epoxy/Jute/ Basalte	Changement des modes d'endommagement dû à la formation de défauts d'interface internes en raison de la diffusion de l'humidité.	[55]

6. Comportement post-impact-compression après impact (CAI)

Les composites renforcés des fibres sont sensibles à l'impact et réduisent ainsi les propriétés mécaniques, en particulier la performance de compression après impact. Pour étudier cette question, plusieurs auteurs ont effectué des tests de compression après impact (CAI) sur les composites renforcés de fibres synthétiques ou naturelles. Des déformations locales et des ruptures par cisaillement sont observées dans l'essai de compression. Lorsque l'énergie de l'impact augmente, la résistance à la compression et la déformation de rupture diminuent en raison des dommages causés par l'impact. En raison de l'impact, la zone endommagée augmente, ce qui entraîne une réduction de la surface d'appui et, par conséquent, une réduction de la capacité d'appui. Les dommages causés par l'impact réduisent fortement la résistance à la compression et la rigidité du matériau, et la résistance à la compression et la rigidité résiduelles seront réduites [56].

Le principe de l'essai de compression après l'impact (CAI) est de soumettre l'éprouvette à un chargement de compression dans son plan piloté par une vitesse de déplacement quasi-statique. Un outillage spécifique est utilisé pour empêcher le flambement global par le biais de couteaux anti-flambement, voir Figure 16.

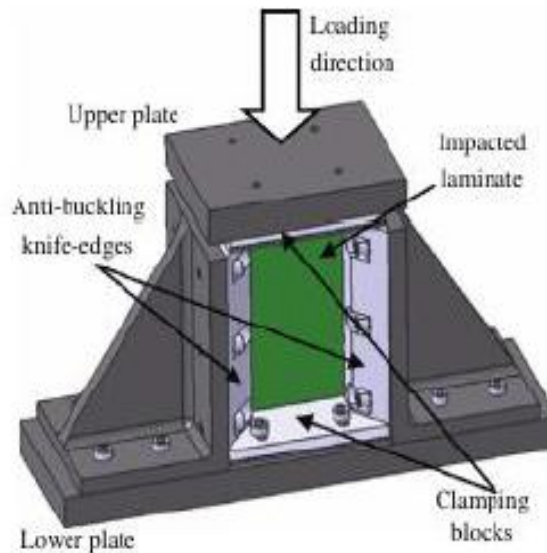


Figure 16. Outillage nécessaire pour l'essai de CAI [57].

Le test compression après impact est utilisée pour déterminer la résistance résiduelle / la tolérance aux dommages des structures composites impactées. En fait, d'autres post-charges comme la traction, la flexion ou la fatigue entraînent également une réduction de la résistance

résiduelle. Cependant, la post chargée de compression est considérée comme critique pour les spécimens endommagés par l'impact [15]. Par exemple, la Figure 17 montre que la réduction de la résistance résiduelle en compression est plus importante qu'en traction.

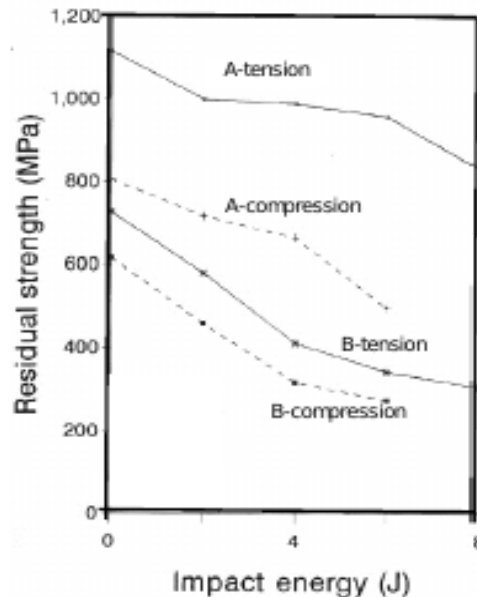


Figure 17. Exemple de résistance résiduelle à la traction et à la compression en fonction de l'énergie d'impact avec deux types de stratifiés [37].

Par conséquent, les études de la résistance résiduelle après impact ont été orientées vers la compréhension de la rupture soumise à une charge de compression, qui est classiquement appelée compression après impact ou "CAI".

Pour éviter des résultats non désirés pendant l'essai CAI, certaines directives tirées de l'expérience de l'auteur sont énumérées ci-dessous [37] :

- Les bords courts de l'éprouvette doivent être parallèles, afin que la charge de compression puisse se répartir uniformément sur l'éprouvette. Ce processus doit être pris en compte dès la fabrication avant de procéder à un essai de choc. Pour cette raison, une machine de découpe de haute précision est nécessaire.
- Avant d'effectuer un essai réel, une pré charge (environ 50 KN ou 10% de la résistance à la compression) doit être appliquée pour s'assurer que tous les signaux de sortie sont enregistrés et que l'éprouvette est bien installée. L'alignement de l'éprouvette peut être vérifié grâce à la technique de corrélation d'images 3D.
- Les conditions aux limites des bords courts sont modifiées par rapport à la norme. Une condition aux limites serrée est utilisée au lieu d'un support simple, afin d'éviter une défaillance indésirable causée par l'écrasement des extrémités.

7. Résumé quelques travaux du comportement d'impact et post d'impact sur les composites en fibres naturelles

Le pourcentage des différentes fibres naturelles utilisées comme renforts dans les composite polymères pour les applications d'impact, que ce soit sous forme hybride ou non hybride, est présenté dans la Figure 18 et il est évident, d'après la Figure 18(a), que le basalte est la fibre naturelle la plus préférée pour les applications d'impact. La Figure 18(b) montre les matériaux de matrice couramment utilisés avec des fibres naturelles et on observe que la matrice époxy est la plus utilisés et très peu des matrices ont été utilisées comme NP, le PE, le PP, [58].

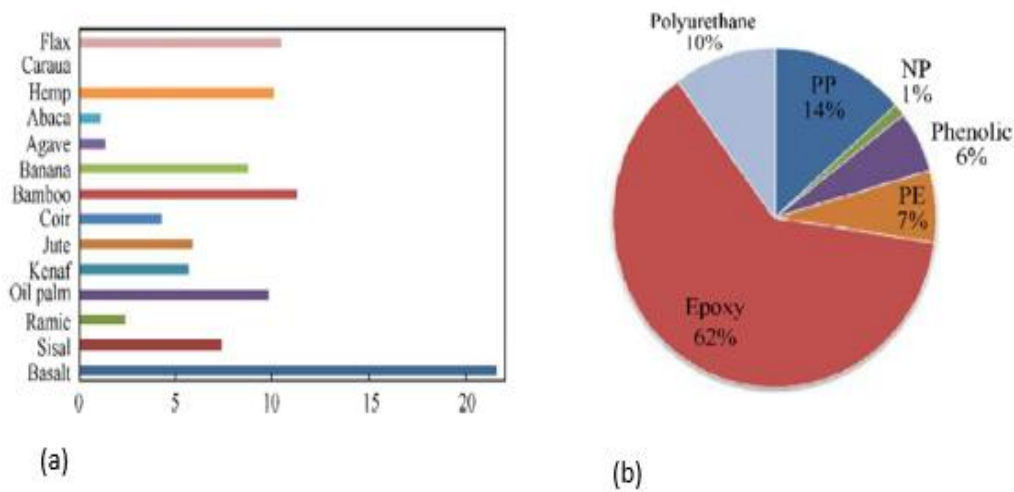


Figure 18. (a) Pourcentage de fibres naturelles utilisées dans les composites pour les applications d'impact de 2000 à 2020, (b) Pourcentage des matrices polymères utilisés avec des fibres naturelles pour l'application d'impact [58].

Les composites époxy à base de lin ont été étudiés par Shen et al. [59], ils ont conclu que la charge seuil d'endommagement a diminué avec l'augmentation du temps d'immersion dans l'eau, ce qui montre une dégradation des propriétés. La température après durcissement pendant la fabrication et la température d'exposition ont joué un rôle important dans la résistance à l'impact des composites. La charge de seuil de dommage a diminué avec l'augmentation de la température de post-durcissement et de la température d'exposition pour le composite lin /époxy.

Barouni et al. [46] ont découvert que l'hybridation des stratifiés composites lin/verre/ vinyle ester, sous une charge d'impact, a entraîné une augmentation de la pénétration et de la perforation par rapport au composite renforcé seulement de lin à des niveaux d'énergie de 25 et 50J.

Al-Hajaj et al. [60] ont étudié l'hybridation lin/carbone avec une matrice époxy sous une charge d'impact à faible vitesse (5-40 J), les résultats montrant que la fibre de carbone hybridée avec du lin à plis croisés est meilleures performances en termes d'absorption d'énergie plus faible.

Dhakal et al. [61] ont étudié les composites biodégradables à base de jute et d'huile de soja méthacrylate afin de déterminer l'effet de l'architecture des fibres et de l'épaisseur du stratifié dans des conditions de charge IBV. Les composites tissés ont montré une phase de propagation plus importante et donc une meilleure résistance à l'impact, attribuée à l'existence de points de croisement qui agissent comme des distributeurs de contrainte, par rapport au type non tissé.

Mache et al. [62] ont étudié l'effet de l'épaisseur des stratifiés et de la fraction volumique des composites en fibres de jute dans des conditions de perforation par impact. Les résultats montrent que la charge maximale et l'énergie absorbée augmentent avec l'augmentation de la fraction volumique et de l'épaisseur du stratifié.

De Rosa et al. [63] ont étudié l'hybridation des composites polyesters jute/verre sous impact. Ils ont conclu que l'hybride avec le verre comme couche externe est plus performant à faible énergie en empêchant les dommages au centre, tandis que l'hybride intercalé supporte des énergies d'impact plus élevées.

Mahesh et al. [64] ont montré que parmi les composites flexibles jute (J) - caoutchouc (C)/époxy testés, le stratifié JCJ absorbait l'énergie la plus élevée par rapport aux séquences JCCJ et JCJCJ, tandis que ces dernières présentaient une plus grande résistance aux chocs supportant des charges plus élevées sous la même énergie d'impact.

Shen et al. [65] ont préparé des composites en sandwich de jute avec de la fibre de ramie et matrice époxy et ils ont étudié l'effet du renforcement de la ramie (30 à 80 %) sur la réponse à l'impact (2–20 J). Ils ont trouvé que l'hybridation de la fibre de ramie augmentait la force maximale et le renforcement de 55 % a permis d'obtenir une optimale en ce qui concerne la force maximale, l'énergie absorbée et la zone de la surface endommagée.

Des expériences IBV ont été menées par Ismail et al. [66], ils ont montré qu'une configuration hybride avec un rapport 6:1 (kevlar: kenaf) présente une augmentation de l'énergie absorbée par rapport au composite non hybride (kenaf seul). Les impacts au niveau de la pénétration ont donné lieu à des courbes ouvertes force-déplacement avec un déplacement plus important pour les stratifiés moins rigides.

Les expériences de Majid et al. [53] sur l'hybridation kénaf /verre/ époxy a révélé que la charge maximale, l'énergie absorbée et le déplacement hors plan augmentaient avec l'augmentation des niveaux d'énergie et l'augmentation du renforcement du verre.

Smail et al. [67] ont étudié l'effet de l'orientation des fibres (0° – 45°) dans les composites de polyester renforcé en fibre kénaf sur la résistance aux chocs à la perforation par des tests d'impact. Il a été rapporté que les fibres orientées 15° présentaient la meilleure résistance à la perforation.

Bakar et al. [68] ont comparé les performances de matrices thermodurcissables et thermoplastiques avec un renforcement en fibres de kenaf. Ils ont montré que la plus grande absorption d'énergie avec la matrice polyester qu'avec l'époxy sous un impact à faible vitesse. Dhakal et al. [19] ont étudié l'effet des fibres de chanvre non tissées avec des fractions de volume de fibres variables pour des composites chanvre-polyester soumis à un impact à faible énergie. L'augmentation de la fraction volumique des fibres entraîne une augmentation de la propagation des dommages, de la charge (maximum), de l'absorption d'énergie et donc de la résistance aux chocs.

Scarponi et al. [69] ont étudié la performance de la matrice pour les composites en fibres de chanvre sous impact à faibles énergies. Leurs expériences ont révélé que le composite à base de bio-époxy supporte des forces plus élevées, mais une absorption d'énergie et des dommages hors du plan inférieur pour des impacts similaires par rapport au composite à base d'époxy traditionnel.

Les composites ayant subi des dommages peuvent posséder une propriété ou une résistance résiduelle significative qui peut encore fonctionner comme un élément structurel dans son application. Le [Tableau 2](#) présente les propriétés résiduelles après impact, comme la traction, la compression, pour les composites en fibres naturelles.

Tableau 2. Résistance résiduelle après impact des composites en fibres naturelles impactés.

Composites	Résistance Résiduelle	Remarques	Réf
Epoxy/Lin unidirectionnel	Résistance à la traction après impact	Réduite de manière significative au-dessus de 3 J d'énergie d'impact en raison de l'intensification de la délamination.	[70]
Epoxy /Lin non tissé	Résistance à la traction après impact	Pour un angle d'impacteur de 15° , un effet significatif des dommages induits par l'impact a été rapporté pour des énergies supérieures à 3 J.	[71]
Époxy/Lin/Carbone	Résistance à la traction après impact	Pour une énergie d'impact allant jusqu'à 10 J, la configuration LCL	[45]

		s'est mieux comportée que la configuration CLC, cette dernière révélant des fissures et une délamination précoces des fibres.	
Polyester isophthalique/ Jute	Résistance à la traction après impact	La résistance résiduelle normalisée a diminué avec l'augmentation des niveaux d'énergie d'impact et a augmenté avec le renforcement des fibres de verre.	[51]
Polyester/Jute	Résistance à la traction après impact	Dégradation de la résistance résiduelle avec l'augmentation d'énergie et module relativement n' a pas changé.	[72]
Époxy/ Kénaf/Verre	Résistance à la traction après impact	La diminution de la résistance résiduelle à la traction en fonction de l'énergie était progressivement différente de celle observée pour les hybrides.	[73]
Epoxy/Chanvre	Résistance à la traction après impact	La résistance résiduelle a diminué avec l'augmentation de l'énergie d'impact, tandis que le module d'élasticité est resté relativement inchangé. La rupture en traction était largement asymétrique en raison des dommages asymétriques causés par l'impact.	[74]
Epoxy/Lin unidirectionnel	Résistance à la compression après impact	Moins sensible pour une énergie d'impact inférieure à 2 J et un angle d'impact plus faible (15°) en raison d'une instabilité de flambage insuffisante, tandis que la résistance diminue significativement avec l'augmentation de l'angle d'impact.	[70]
Epoxy/Lin	Résistance à la compression après impact	La résistance résiduelle est plus élevée pour les couches croisées en raison d'une plus grande rigidité et plus faible pour les couches multidirectionnelles.	[48]
Polyester/Lin	Résistance à la compression après impact	Le composite renforcée à 10% de basalte présente la résistance résiduelle la plus élevée et diminue lorsque le pourcentage augmente.	[75]
Epoxy /Kenaf/Verre	Résistance à la compression après impact	La résistance résiduelle diminue avec l'augmentation des niveaux de dommages d'impact subis par les couches internes et s'étendant aux régions externes.	[76]

8. Techniques de mesure de l'état d'endommagement

8.1. Essais non destructifs et techniques d'évaluation

Le terme "contrôle non destructif" couvre un large éventail de techniques analytiques permettant d'inspecter, de tester ou d'évaluer les propriétés chimiques, physiques et mécaniques d'un matériau, d'un composant ou d'un système sans causer de dommages. Les premières techniques de contrôle non destructif comprennent les ultrasons, la radiographie aux rayons X, le ressuage, le contrôle magnétoscopique et le contrôle par courants de Foucault, qui ont été initialement développés pour l'industrie sidérurgique. Il est difficile de sélectionner les techniques CND appropriées pour un objectif spécifique ; cependant, la norme ASTM E2533 sert de guide pratique pour l'utilisation des méthodes CND sur les matériaux/structures composites pour les diverses applications [77].

À ce jour, il existe de nombreuses méthodes de CND basées sur différents principes, voir la Figure 19.

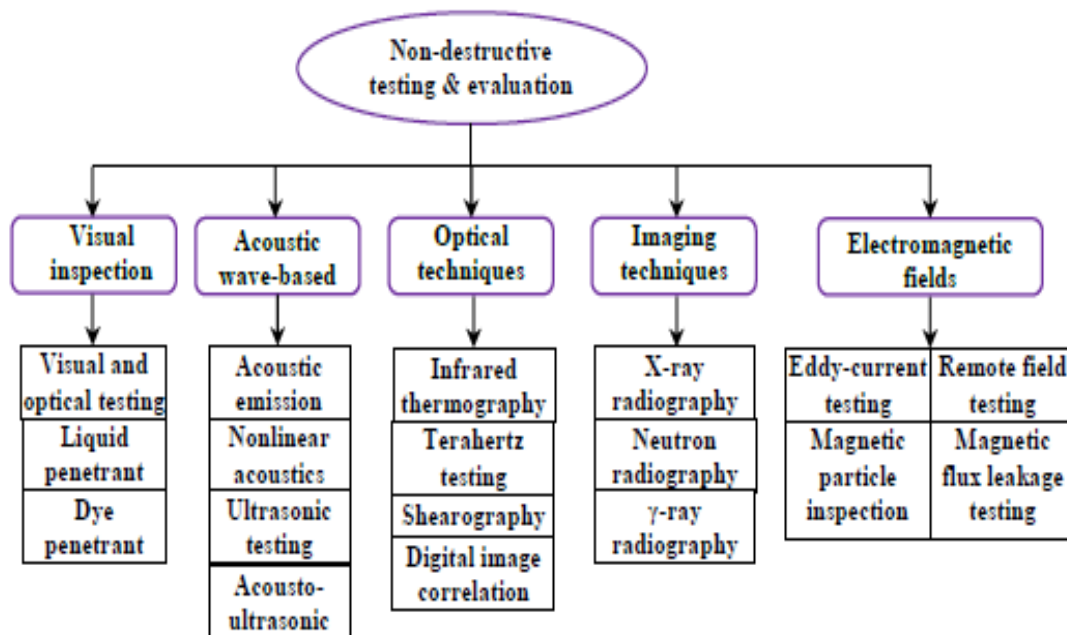


Figure 19. Catégories de techniques de contrôle et d'évaluation non destructifs [77].

Elles peuvent être classées en cinq groupes : (i) l'inspection visuelle (c'est-à-dire celles qui sont visibles à l'œil humain) ; (ii) les techniques basées sur les ondes acoustiques, telles que l'émission acoustique et les ondes ultrasonores ; (iii) les techniques optiques, qui comprennent la thermographie infrarouge, la corrélation d'images numériques ; (iv) les techniques basées sur l'imagerie, par exemple la radiographie/tomographie aux rayons X/neutrons et la micro-tomographie ; (v) les techniques basées sur les champs électromagnétiques, telles que le

contrôle par courants de Foucault, le contrôle à distance, le contrôle par particules magnétiques et le contrôle de fuite de flux magnétique [78].

À ce jour, les activités de recherche dans ce domaine sont de plus en plus nombreuses. Wang et al. [77] ont effectué une recherche électronique de base de données sur les articles publiés au cours des 30 dernières années (jusqu'au 31/12/2019) en utilisant la base de données Web of Science Core Collection, afin de retracer les tendances de l'utilisation de diverses techniques de CND dans la recherche sur les composites, voir la Figure 20.

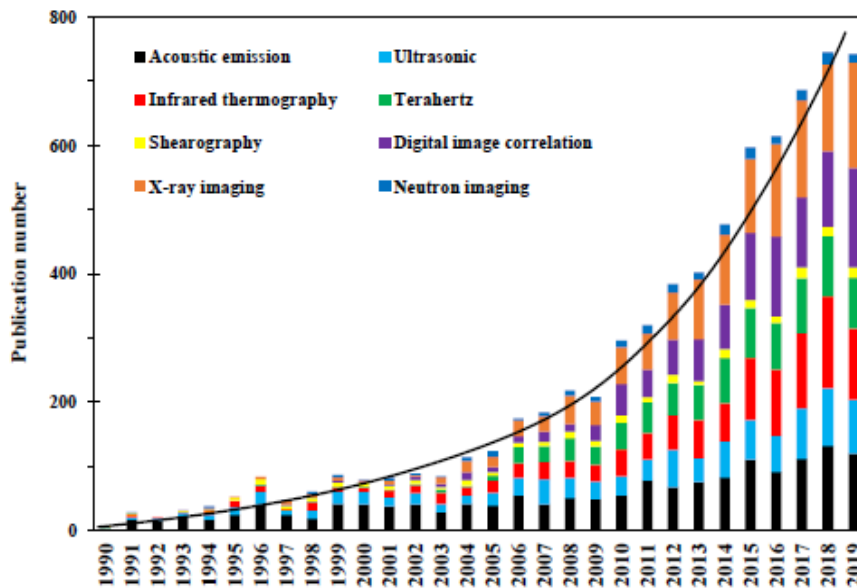


Figure 20. Comparaison du nombre de publications sur les différentes méthodes de contrôle non destructif et leurs applications aux matériaux/structures composites au cours des 30 dernières années [77].

L'utilisation de l'émission acoustique sur les composites a une longue histoire et est bien établie ; elle est toujours active dans un état relativement stable. Grâce à des développements significatifs dans la fabrication des équipements, la puissance de calcul, le traitement de l'imagerie et les techniques d'acquisition au cours des trois dernières décennies, l'application de la thermographie infrarouge, des ultrasons, de la corrélation d'images numériques et de l'imagerie par rayons X à la détection et à l'évaluation non destructives des matériaux/structures composites a connu une croissance rapide

Les méthodes de contrôle en continu, contrairement aux méthodes discrètes, permettent de faire un suivi de l'état de santé d'une structure lors de sollicitations mécaniques. Elles sont utilisées lorsque la pièce est en service. Ceci implique que l'excitation et la perturbation permettant de faire le contrôle sont générées par la sollicitation mécanique de la pièce elle-même. Les méthodes de cette catégorie permettent donc de faire un suivi de l'endommagement et des propriétés du

matériau en temps réel, sans perturber la sollicitation ou le matériau. Dans le cadre de notre étude, nous nous intéressons particulièrement à :

- L'émission acoustique (EA)
- Corrélation d'images numériques (CIN)

8.1.1. Emission acoustique (EA)

L'émission acoustique est définie comme étant des ondes élastiques transitoires engendrées par la libération d'énergie dans un matériau ou par un processus [79]. La technique de l'émission acoustique consiste donc à détecter ces ondes élastiques pour en extraire des informations [80]. Les ondes élastiques sont générées au sein du matériau lorsque la matière évolue, se déforme ou s'endommage sous l'action d'une ou plusieurs contraintes. Les ondes sont ensuite captées par des capteurs piézo-électriques qui convertissent le signal acoustique en signal électrique. Cette technique permet donc de détecter des endommagements en temps réel. La Figure 21 décrit le principe de fonctionnement de l'émission acoustique. Chaque signal d'émission acoustique enregistré peut être caractérisé par un ensemble de paramètres appelés descripteurs. La détermination de ces descripteurs ne nécessite pas forcément la numérisation des formes d'onde.

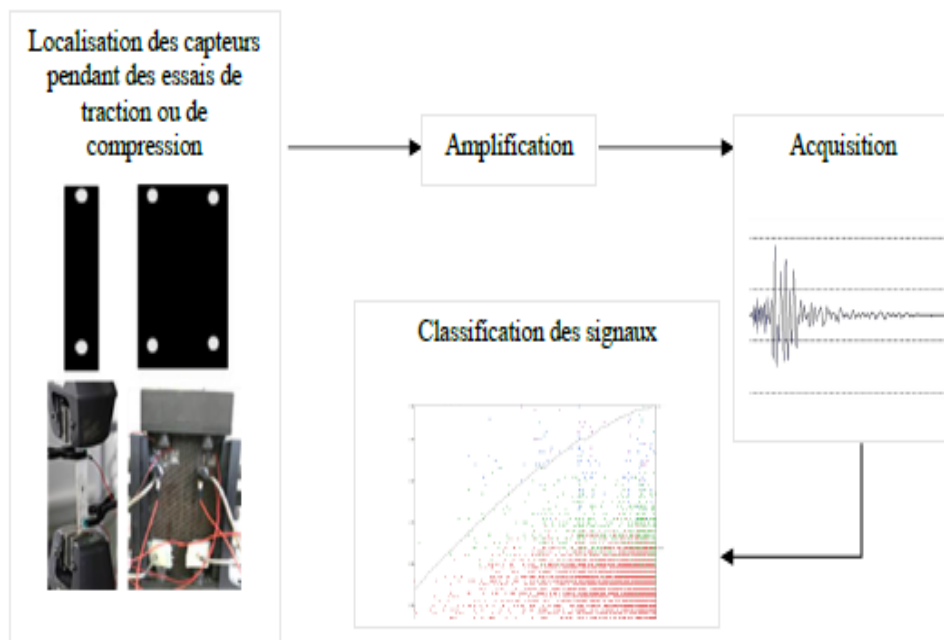


Figure 21. Principe de fonctionnement de l'émission acoustique [81].

On peut les calculer dans le domaine temporel (à partir du signal) (Figure 22(a)), dans le domaine fréquentiel (via une transformée de Fourier rapide du signal) (Figure 22(b)) et même dans le domaine temps-fréquence en effectuant par exemple une décomposition en paquets

d'ondelettes [82]. La dernière catégorie de descripteurs nécessite la numérisation des formes d'onde.

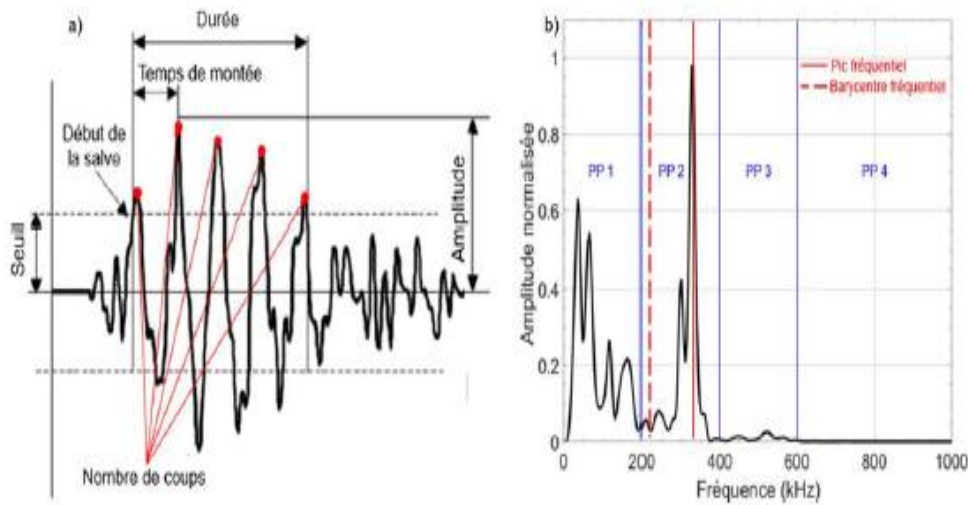


Figure 22. Principaux descripteurs d'EA calculés. a) Dans le domaine temporel ; b) Dans le domaine fréquentiel [83].

Les descripteurs les plus utilisés sont :

- L'amplitude maximale (dB) : elle correspond à l'amplitude crête du signal, elle est calculée à partir de l'amplitude V_{max} mesurée (en Volts) par la relation : $A=20 \log (V_{max}/V_{ref})$ où V_{ref} est la tension de référence (1 Volt au capteur).
- L'énergie du signal (aJ) : correspond à l'intégrale du carré de la tension sur la durée du signal.
- Le temps de montée (μs) : durée entre le premier dépassement du seuil et le moment où l'amplitude crête est atteinte.
- La durée (μs) : durée entre le premier et le dernier dépassement du seuil.
- Le nombre de coups : correspond au nombre de dépassement du seuil pendant la durée du signal.
- Barycentre fréquentiel (kHz) : fréquence pour laquelle la moitié de l'énergie du spectre est obtenue.
- Fréquence pic (kHz) : fréquence correspondant au maximum de l'amplitude du spectre.
- Puissance partielle (%) : proportion d'énergie du spectre contenue dans les plages de fréquences définies par l'utilisateur.

Pour l'extraction des caractéristiques des dommages à partir des signaux AE, de nombreux chercheurs ont utilisé diverses techniques de traitement du signal et de reconnaissance des formes. Une analyse multi-variable a été effectuée à travers les EA en utilisant des variables telles que le nombre, l'amplitude, la durée, le temps de montée et l'énergie. Différentes approches de classification ont été envisagées, telles que les k-means, les Fuzzy c-means, l'analyse en composantes principales (PCA), les réseaux neuronaux artificiels (ANN), individuellement ou en combinaison.

8.1.2. Corrélation d'image numérique (CIN)

La technique de corrélation d'images est une méthode optique sans contact de mesure de champs cinématiques, développée depuis les années 80 par Sutton et al. [84], la technique de corrélation d'images sert d'alternative aux méthodes classiques longtemps adoptées pour les mesures des champs de déformations et déplacements dans les structures en service. Cette méthode offre la possibilité de déterminer les champs (Figure 23) en tout point de la surface des objets, basée sur la comparaison de deux images prises à différents pas de chargement, l'une dite de référence, l'autre correspondant à l'état déformé. De façon explicite, la corrélation consiste à rechercher le degré de ressemblance entre les deux images. Elle doit donc reconnaître un même motif d'une image à l'autre et de l'utiliser comme un « marqueur » d'un sous ensemble de cette image.

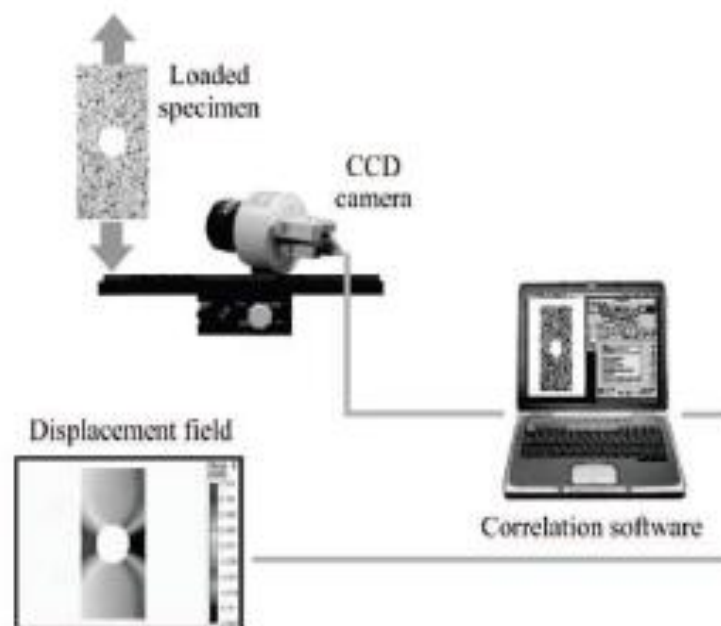


Figure 23. Mesure de déformation par corrélation d'images [86]

Comparativement aux méthodes de mesures locales standards, telles que les jauges de déformation, les extensomètres, la technique de corrélation présente de gros avantages, à savoir :

- Elle offre la possibilité d'effectuer et d'obtenir des mesures sans contact avec l'éprouvette testée. Les mesures ne sont donc pas affectées de la présence du capteur de mesures.
- Elle fournit des quantités locales et globales en termes de déplacements et de déformations.
- Elle offre la possibilité de générer un maillage éléments finis à partir des mesures [85].

8.1.2.1. Principes de base de la corrélation d'images numériques (CIN)

Dans l'analyse CIN, les images enregistrées sont divisées en petites régions (sous-ensemble) et en sous-régions présentant la même distribution de niveaux de gris dans la référence et les images déformées sont appariées à l'aide de l'un des algorithmes de corrélation mentionnés en (Figure 24).

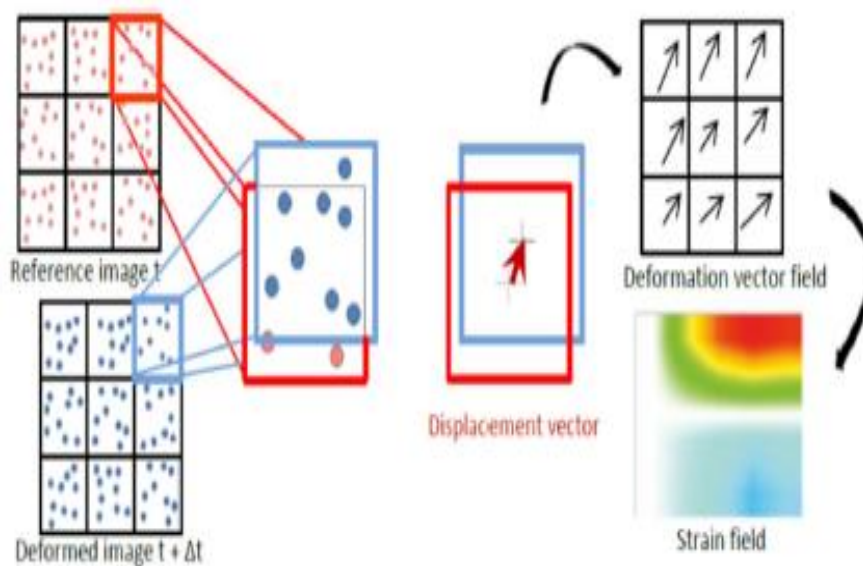


Figure 24. Étapes d'évaluations de la méthode CIN [87].

Le déplacement du spécimen est déterminé dans l'analyse CIN en utilisant des fonctions de forme ou des fonctions de cartographie [88]. L'adéquation du degré de la fonction de forme utilisée pour l'analyse varie en fonction du mouvement du spécimen. Par exemple, les fonctions de forme d'ordre zéro sont utilisées dans la translation du corps rigide, mais les

fonctions de forme d'ordre zéro ne sont pas adéquates lorsque les sous-ensembles subissent une combinaison de translation, rotation, déformation de cisaillement et déformation normale.

9. Résumé quelques travaux d'utilisation d'EA et CIN sur les composites

Mechakra et al. [89] ont étudié l'influence du traitement alcalin sur les caractéristiques mécaniques de bio-composite Alfa/PP (d'une fraction volumique de 30%) traitée pendant 24 et 48 heures. Des essais de traction et de fatigue ont été réalisés sur les échantillons sous contrôle d'émission acoustique afin de déterminer les types de dommages et ils ont utilisé des caractéristiques telles que l'amplitude du signal et un nombre de coups en fonction du temps. Les chercheurs sont parvenus à une conclusion sur l'initiation et la transmission des dommages à la structure des bio-composites. Ils ont réussi à identifier l'évolution de l'endommagement par fissuration de la matrice, le relâchement et la rupture des fibres dans le bio-composite Alfa/PP.

Bravo et al. [90] ont proposé une classification des signaux d'EA enregistrés lors d'essais de traction sur un composite Bois/PP par la méthode des k-mains. Trois descripteurs temporels ont été considérés pour la segmentation des signaux (amplitude, durée et nombre de coups). Les auteurs ont obtenu des classes bien séparées selon ces trois paramètres pour les événements correspondant à la fissuration matricielle, aux décohésions fibre/matrice et aux ruptures de fibres.

Monti et al. [91] ont également utilisé un algorithme pour segmenter les signaux d'EA trouvés lors de la caractérisation en traction d'un composite lin/Elium. Dans leur étude, ils n'ont considéré que des descripteurs temporels (amplitude, énergie, durée, temps de montée, et nombres de coups). Trois ou quatre groupes de signaux ont été observés, correspondant à la fissuration de la matrice (35- 42 dB à 45-60 dB), décohésions fibre-matrice (45-60 dB à 60-70 dB), l'arrachement de la fibre (60-80 dB) et la rupture de la fibre ont été attribués à différentes intervalle d'amplitude pour les événements EA (de 60-85 dB à 95-100 dB).

Les mesures des champs déformations et déplacements ont été utilisées dans de nombreuses études de la littérature pour examiner la réponse mécanique des composites stratifiés en fibres synthétiques. Cependant, un nombre limité d'études ont utilisé les techniques de corrélation d'images numériques (CIN) pour les composites en fibres naturelles.

Caminero et al. [92] ont utilisé la CIN pour expérimenter la présence du champ de déformation sur la surface d'un trou ouvert d'un composite carbone/époxy avec différentes séquences d'empilement. Leurs résultats ont montré des déformations localisées très élevées près du trou, et dans des directions suivant l'orientation des fibres (0, 90, +45/ - 45).

La CIN a été utilisée sur des composites Lin/époxy à trou ouvert dans une étude réalisée par Habibi et al. [93] Les résultats révèlent que le trou ouvert influence les champs de déformation et divers gradients de déformation élevés autour du trou et des concentrations de déformation dans les directions qui suivent l'orientation des fibres (0, 90, +45, -45).

Xu et al. [94] ont utilisé la technique CIN pour décrire les caractéristiques de quatre types de matériaux composites lors d'essais de traction : lin/époxy, jute/époxy, hybride lin/verre/époxy et hybride verre/jute/époxy. Les valeurs du coefficient de Poisson ν_{12} ont été déterminées par CIN. Ils ont conclu que le coefficient de Poisson ν_{12} le plus élevé a été trouvé dans le matériau composite jute/époxy (0,3219).

La combinaison des deux techniques EA et CIN offre une technologie complémentaire pour surveiller le comportement et d'évaluer les endommagements, les déformations et déplacements des composites, peu des études trouvées dans la littérature, on peut citer :

Zhou et al. [95] ont proposé de combiner l'émission acoustique avec la méthode de corrélation d'images numériques pour surveiller simultanément le processus de flambage et multi-délaminages des composites sous compression. Les résultats indiquent que les paramètres EA sont corrélés avec le processus d'endommagement des spécimens composites, tandis que la déformation critique des régions de délaminage est clairement mise en évidence par les résultats CIN. Par conséquent, les technologies complémentaires (combinant EA et CIN) de caractérisation et de surveillance sont bénéfiques pour l'étude l'évolution des dommages des composites.

Oz et al. [96] ont étudié si les événements EA à haute fréquence proviennent toujours de la rupture des fibres en utilisant l'EA et la CIN pour les stratifiés PRFC. Ils ont conclu que l'enregistrement d'EA à haute fréquence et faible amplitude représente les fissures de la matrice par rapport aux images CIN et microscopiques. Ainsi, ils ont fortement recommandé d'utiliser d'autres techniques complémentaires comme la CIN, la caméra et la thermographie pendant les essais pour trouver les sources des signaux EA générés.

Habibi et al. [93] ont réalisé une étude expérimentale pour évaluer le mécanisme d'endommagement des stratifiés à base de lin [0 +45 90-45]_{3s} avec et sans trous ouverts en utilisant les méthodes CIN et EA. Les résultats révèlent que le trou ouvert influence les champs de déformation et divers gradients de déformation élevés autour du trou et des concentrations de déformation dans les directions qui suivent l'orientation des fibres (0, 90, +45, -45). Ils ont conclu que la contribution des différents types de dommages sur le dommage total des stratifiés peut être caractérisée en utilisant les méthodes EA et CIN.

10. Conclusion

Dans ce chapitre l'accent est mis sur le comportement d'impact à basse vitesse et post d'impact des matériaux composites. Les matériaux composites sont très sensibles aux endommagements provenant d'impacts, et par conséquent, l'étude de leur comportement dans ces situations s'avère très important, même un impact à faible vitesse et faible énergie peut causer de sérieuses altérations des propriétés mécaniques du matériau. Cela peut causer du délaminage et des endommagements qui ne sont pas toujours visibles en surface (endommagements internes). L'influence des différents paramètres structuraux liés au matériau constituant la structure composite ainsi que l'influence des paramètres expérimentaux liés au test d'impact sont expliquées. Il est crucial d'analyser l'influence d'un impact basse vitesse sur les composites en particulier les composites renforcées en fibres naturelles, en étudiant l'impact, ainsi que le comportement de composite en post-impact, ou est nécessaire de déterminer les propriétés résiduelles de ces matériaux après avoir été soumis à l'impact, en suite à la fin de cette partie, un résumé de quelques travaux concernant l'impact et post d'impact sur les composites en fibres naturelles a été présenté. Les techniques d'évaluation des dommages et les déformations, comme émission acoustique (EA) et corrélation d'image numérique (CIN) sont bien expliquées. Des travaux de recherches réalisés sur l'application de ces deux techniques sur les composites ont été bien discutés à la fin de chapitre.

Références bibliographiques

- [1] F.A.Habib, A new method for evaluating the residual compression strength of composites after impact, *Composite structures*, 53, 2001, 309-316.
- [2] Robin Olsson, Analytical model for delamination growth during small mass impact on plates, *International Journal of Solids and Structures*, 47 (2010) 2884–2892.
- [3] <http://www.crash-aerien.news/forum/un-avion-de-iberia-heurte-un-vautour-en-plein-vol-t22284.html>.
- [4] Wikiversité. Introduction à la science des matériaux/propriétés mécaniques des matériaux ii-autres essais mécaniques-wikiversité,. <https://fr.wikiversity.org/>.
- [5] Abir al maghribi.comportement des materiaux composites a fibres courtes : applications a l'impact basse vitesse.These doctorat.universite toulouse.2008.
- [6] R. Olsson, “Mass criterion for wave controlled impact response of composite plates,” *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.*, vol. 31, no. 8, pp. 879–887, 2000.
- [7] Zheng Daihua. Low velocity impact analysis of composite laminated plates PhD. Thesis The Graduate Faculty of the University of Akron; 2007
- [8] N. R. Mathivanan and J. Jerald. Experimental investigation of low-velocity impact characteristics of woven glass fiber epoxy matrix composite laminates of EP3 grade. *Materials & Design*, 31(9) 4553–4560, 2010.
- [9] V. Shim and L. Yang. Characterization of the residual mechanical properties of woven fabric reinforced composites after low-velocity impact. *International Journal of Mechanical Sciences*, 47(4-5) :647–665, 2005.
- [10] N. V. Padaki, R. Alagirusamy, B. Deopura, B. Sugun, and R. Fangueiro. Low velocity impact behaviour of textile reinforced composites. *Indian Journal of Fibre & Textile Research*, 2008.
- [11] P. Reis, J. Ferreira, P. Santos, M. Richardson, and J. Santos. Impact response of Kevlar composites with filled epoxy matrix. *Composite Structures*, 94(12) :3520–3528, 2012
- [12] B. Ostre. Etude des impacts sur chant appliqués à des structures composites dans l'aéronautique. PhD thesis, Toulouse, ISAE, 2014.
- [13] Caizheng Wang , Dandan Su , Zhifeng Xie , Hongxu Wang , Paul J. Hazell , Zhifang Zhang , Ming Zhou. Dynamic behaviour of Bio-inspired heterocyclic aramid Fibre-reinforced laminates subjected to Low-velocity Drop-weight impact. *Composites: Part A* 153 (2022) 106733
- [14] G. Belingardi and R. Vadori, Low velocity impact tests of laminate glass-fiber-epoxy matrix composite material plates,” *Int. J. Impact Eng.*, vol. 27, no. 2, pp. 213–229, 2002.
- [15] E. Troussel, “Prévision des dommages d'impact basse vitesse et basse énergie dans les composites à matrice organique stratifiés,” *Arts et Métiers ParisTech*, 2013.
- [16] F. Lachaud. Contribution à l'analyse multi échelle du comportement mécanique non linéaire matériau des structures composites. Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Toulouse, 2011

- [17] C. Atas and O. Sayman. An overall view on impact response of woven fabric composite plates. *Composite Structures*, 82(3) :336 – 345, 2008.
- [18] C. Scarponi, C. Pizzinelli, S. Sánchez-Sáez, and E. Barbero. Impact load behaviour of resin transfer moulding (RTM) hemp fibre composite laminates. *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*, 3(3) :298–310, 2009.
- [19] H. Dhakal, Z. Zhang, M. Richardson, and O. Errajhi. The low velocity impact response of non-woven hemp fibre reinforced unsaturated polyester composites. *Composite structures*, 81(4) : 559–567, 2007.
- [20] Chai Gin Boay, Manikandan Periyasamy. Low velocity impact response of fibremetal laminates—a review. *Compos Struct* 2014; 107: 363–81.
- [21] Custódio J, Cabral-Fonseca S. Advanced fibre-reinforced polymer (FRP) composites for structural applications: 22. Advanced fibre-reinforced polymer (FRP) composites for therehabilitation of timber and concrete structures: assessing strength and durability. Elsevier Inc., Chapters; 2013.
- [22] R. Seltzer, C. González, R. Muñoz, J. LLorca, T. Blanco-Varela, X-ray microtomography analysis of the damage micromechanisms in 3D woven composites under low-velocity impact, *compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* 45 (2013) 49–60
- [23] J. Jefferson Andrew, Sivakumar M. Srinivasan, A. Arockiarajan, Hom Nath Dhakal. Parameters influencing the impact response of fiber-reinforced polymer matrix composite materials: A critical review.224 (2019) 111007.
- [24] Kalhor R, Akbarshahi H, Case SW. Numerical modeling of the effects of FRP thickness and stacking sequence on energy absorption of metal–FRP square tubes. *Compos Struct* 2016;147:231–46.
- [25] Hancox NL. An overview of the impact behavior of fibre-reinforced composites. In: Reid SR, Zhou G, editors. *Impact behavior of fiber-reinforced composite materials and structures*. CRC Press, Woodhead Pub. Ltd; 2000.
- [26] Abu Talib AR, Abbud LH, Ali A, Mustapha F. Ballistic impact performance of Kevlar-29 and Al₂O₃ powder/epoxy targets under high velocity impact. *Mater Des* 2012; 35:12–9.
- [27] Evci Celal. Thickness-dependent energy dissipation characteristics of laminated composites subjected to low velocity impact. *Compos Struct* 2015; 133: 508–21.
- [28] S.Z.H.ShahS.KaruppananP.S.M.Megat-Yusoff Z.Sajid. Impact resistance and damage tolerance of fiber reinforced composites: A review. *Composite Structures* 2017 (2019) 100-121.
- [29] Zabala H, Aretxabaleta L, Castillo G, Urien J, Aurrekoetxea J. Impact velocity effect on the delamination of woven carbon-epoxy plates subjected to low velocity equienergetic impact loads. *Compos Sci Technol* 2014; 94:48–53.
- [30] Ramesh C, Stanley Joseph, Arumugam Vellayaraj, Andrew JJefferson, Aruna Bharathi S. Effect of multiple impacts on GFRP laminates exposed to hydrolytic ageing using acoustic emission monitoring. *Int J Veh Struct Syst* 2014;6(1-2).
- [31] Heller SR. *Proc Fifth Symp Struct Mech* 1967:69e111.
- [32] Amaro AM, Reis PNB. Environmental effects on compressive strength after impact loads in composite laminates. *Adv Compos Lett* 2010;19:109e12.

- [33] Andrew J Jefferson, Srinivasan SM, Arockiarajan A. Effect of multiphase fiber system and stacking sequence on low-velocity impact and residual tensile behavior of glass/epoxy composite laminates. *Polym. Compos.* 2018.
- [34] Bull DJ, Scott AE, Spearing SM, Sinclair I. The influence of toughening-particles in CFRPs on low velocity impact damage resistance performance. *Composites Part A* 2014; 58: 47–55.
- [35] Davies G.A.O., Olsson R. Impact on composite structures, *The Aeronautical Journal*, vol. 108, p 541-563, 2004.
- [36] Bin Yang, Yuan Chen, Juhyeong Lee, Kunkun Fu, Yan Li. In-plane compression response of woven CFRP composite after low-velocity impact: Modelling and experiment. *Thin-Walled Structures* 158 (2021) 107186
- [37] Abrate, S. Impact on composite structures. 2005.
- [38] Choi, Hyung Yun ; Chang, Fu-Kuo: A Model for predicting Damage in Graphite/epoxy Laminated Composites Resulting from Low-Velocity Point Impact. In: *Journal of Composite Materials* vol. 26 (1992), Issue. 14, pp. 2134–2169.
- [39] Renault, Michel ; Wielgosz, C.: Compression après impact d'une plaque stratifiée-Compression après impact d'une plaque stratifiée: étude expérimentale et modélisation éléments finis associée, 1994.
- [40] Liu S., Kutlu Z. et Chang F.-K. Matrix cracking and delamination in laminated composite beams subjected to a transverse concentrated line load. *Journal of Composite Materials*, vol. 27, p. 557-584, 1993.
- [41] Dorey, G.; 1988. Impact damage in composites - development, consequences and revention. In 6th international conference on composite materials.
- [42] Christophe Bouvet, Samuel Rivallant and Jean-Jacques Barrau. Low velocity impact modeling in composite laminates capturing permanent indentation. *Composites Science and Technology*, vol . 72, no. 16, pages 1977–1988, 2012.
- [43] A. Rubio-López, J. Artero-Guerrero, J. Pernas-Sánchez, C. Santiuste, Compression after impact of flax/PLA biodegradable composites, *Polym. Test.* 59 (2017) 127–135,
- [44] B.L. Sy, Z. Fawaz, H. Bougherara, Damage evolution in unidirectional and crossply flax/epoxy laminates subjected to low velocity impact loading, *Compos.Part A Appl. Sci. Manuf.* 112 (2018) 452–467.
- [45] F. Sarasini, J. Tirillò, S. D'Altilia, T. Valente, C. Santulli, F. Touchard, L. Chocinski-Arnault, D. Mellier, L. Lampani, P. Gaudenzi, Damage tolerance of carbon/flax hybrid composites subjected to low velocity impact, *Compos. Part B Eng.* 91 (2016) 144–153.
- [46] A.K. Barouni, H.N. Dhakal, Damage investigation and assessment due to lowvelocity impact on flax/glass hybrid composite plates, *Compos. Struct.* 226 (2019), <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111224>.
- [47] M. Rajaei, N.K. Kim, D. Bhattacharyya, Effects of heat-induced damage on impact performance of epoxy laminates with glass and flax fibres, *Compos. Struct.* 185 (2018) 515–523, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.11.053>.
- [48] Y. Li, J. Zhong, K. Fu, Low-velocity impact and compression-after-impact behaviour of flax fibre-reinforced composites, *Acta Mech. Solida Sin.* (2020),

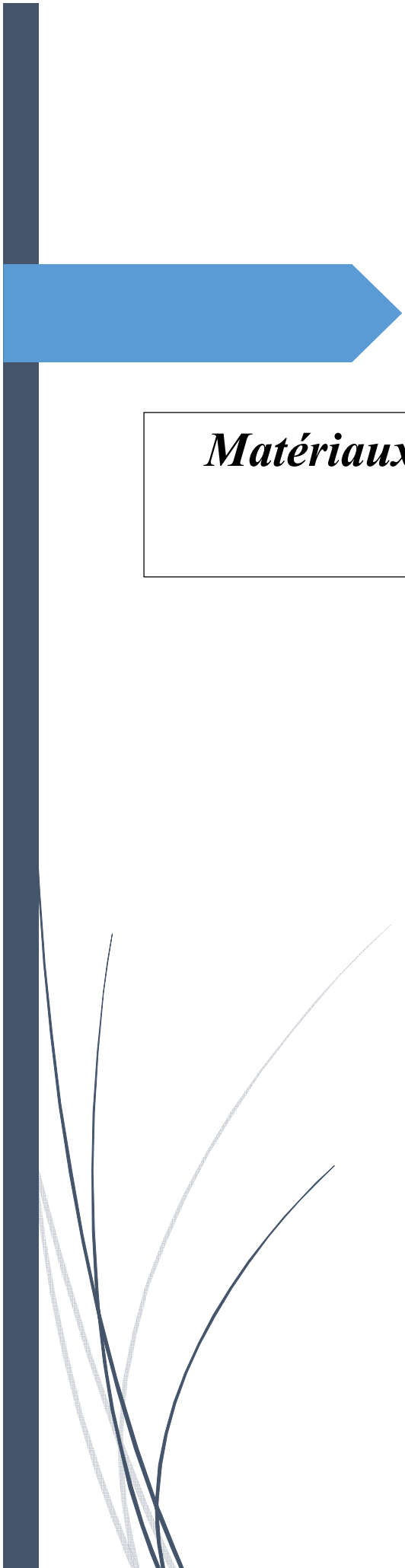
<https://doi.org/10.1007/s10338-019-00158-8>.

- [49] S. Liang, L. Guillaumat, P.-B. Gning, Impact behaviour of flax/epoxy composite plates, *Int. J. Impact Eng.* 77 (2014) 380–387.
- [50] A. Paturel, H.N. Dhakal, Influence of water absorption on the low velocity falling weight impact damage behaviour of flax/glass reinforced vinyl ester hybrid composites, *Molecules* 25 (2020) 1–16, <https://doi.org/10.3390/molecules25020278>.
- [51] K.S. Ahmed, S. Vijayarangan, A. Kumar, Low velocity impact damage characterization of woven jute-glass fabric reinforced isothallic polyester hybrid composites, *J. Reinf. Plast. Compos.* 26 (2007) 959–976, <https://doi.org/10.1177/0731684407079414>.
- [52] A. Ali, M.A. Nasir, M.Y. Khalid, S. Nauman, K. Shaker, S. Khushnood, K. Altaf, M. Zeeshan, A. Hussain, Experimental and numerical characterization of mechanical properties of carbon/jute fabric reinforced epoxy hybrid composites, *J. Mech. Sci. Technol.* 33 (2019) 4217–4226, <https://doi.org/10.1007/s12206-019-0817-9>.
- [53] D.L. Majid, Q. Mohd Jamal, N.H. Manan, Low-velocity impact performance of glass fiber, kenaf fiber, and hybrid glass/kenaf fiber reinforced epoxy composite laminates, *BioResources*. 13 (2018) 8839–8852.
- [54] L. Puech, K.R. Ramakrishnan, N. Le Moigne, S. Corn, P.R. Slangen, A. Le Duc, H. Boudhani, A. Bergeret, Investigating the impact behaviour of short hemp fibres reinforced polypropylene biocomposites through high speed imaging and finite element modelling, *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* 109 (2018) 428– 439,.
- [55] V. Fiore, T. Scalici, F. Sarasini, J. Tirilló, L. Calabrese, Salt-fog spray aging of jutebasalt reinforced hybrid structures: flexural and low velocity impact response, *Compos. Part B Eng.* 116 (2017) 99–112, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.01.031>.
- [56] Hongji Z, Yuanyuan G, Hong T et al (2019) Examination of low-velocity impact and mechanical properties after impact of fiber-reinforced prepreg composites. *Polym Compos* 40:2154–2164.
- [57] Pablo Garcia Perez. Méthodologie expérimentale et numérique pour la tenue résiduelle post impact des structures composites à matrice thermoplastique. Mécanique des matériaux [physics.class-ph]. Ecole nationale supérieure d'arts et métiers - ENSAM, 2018. Français. NNT : 2018ENAM0050. tel-02186328.
- [58] Vishwas Mahesh Sharnappa Joladarashi Satyabodh M.Kulkarni. A comprehensive review on material selection for polymer matrix composites subjected to impact load.17(2021)257-277.
- [59] Y. Shen, J. Zhong, S. Cai, H. Ma, Z. Qu, Y. Guo, Y. Li, Effect of temperature and water absorption on low-velocity impact damage of composites with multilayer structured flax fiber, *Materials (Basel)*. 12 (2019).
- [60] Z. Al-Hajaj, B.L. Sy, H. Bougherara, R. Zdero, Impact properties of a new hybrid composite material made from woven carbon fibres plus flax fibres in an epoxy matrix, *Compos. Struct.* 208 (2019) 346–356.
- [61] H.N. Dhakal, M. Skrifvars, K. Adekunle, Z.Y. Zhang, Falling weight impact response of jute/methacrylated soybean oil bio-composites under low velocity impact loading, *Compos. Sci. Technol.* 92 (2014) 134–141.

- [62] A. Mache, A. Deb, G.S. Venkatesh, A study on impact perforation resistance of jute-polyester composite laminates, SAE Tech. Pap. 1 (2014).
- [63] I.M. De Rosa, C. Santulli, F. Sarasini, M. Valente, Post-impact damage characterization of hybrid configurations of jute/glass polyester laminates using acoustic emission and IR thermography, Compos. Sci. Technol. 69 (2009) 1142–1150.
- [64] V. Mahesh, S. Joladarashi, S.M. Kulkarni, An experimental investigation on lowvelocity impact response of novel jute / rubber fl exible bio-composite, Compos. Struct. 225 (2019).
- [65] Y. Shen, Y. Guo, Y. Li, Investigation of hybrid natural fibre reinforced composite for impact energy absorption. IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 484 (2019).
- [66] M.F. Ismail, M.T.H. Sultan, A. Hamdan, A.U.M. Shah, A study on the low velocity impact response of hybrid Kenaf-Kevlar composite laminates through drop test rig technique, BioResources. 13 (2018) 3045–3060
- [67] A.E. Ismail, M.A. Hasan, K.A. Kamaruddin, Perforated impact strength of woven kenaf fiber reinforced composites, Appl. Mech. Mater. 773–774 (2015) 43–47.
- [68] N.H. Bakar, K.M. Hyie, A.F. Mohamed, Z. Salleh, A. Kalam, Kenaf fibre composites using thermoset epoxy and polyester polymer resins: Energy absorbed versus tensile properties, Mater. Res. Innov. 18 (2014) S6-505-S6- 509.
- [69] C. Scarponi, F. Sarasini, J. Tirillò, L. Lampani, T. Valente, P. Gaudenzi, Lowvelocity impact behaviour of hemp fibre reinforced bio-based epoxy laminates, Compos. Part B Eng. 91 (2016) 162–168.
- [70] M. Habibi, S. Selmi, L. Laperrière, H. Mahi, S. Kelouwani, Experimental investigation on the response of unidirectional flax fiber composites to low velocity impact with after impact tensile and compressive strength measurement, Compos. Part B Eng. 171 (2019) 246–253, [https://doi.org/ 10.1016/j.compositesb.2019.05.011](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.05.011).
- [71] M. Habibi, S. Selmi, L. Laperrière, H. Mahi, S. Kelouwani, Damage analysis of low-velocity impact of non-woven flax epoxy composites, J. Nat. Fibers. (2019) 1–10.
- [72] C. Santulli, Post-impact damage characterisation on natural fibre reinforced composites using acoustic emission, NDT E Int. 34 (2001) 531–536
- [73] Z. Salleh, K.M. Hyie, M.N. Berhan, Y.M.D. Taib, E.N.A. Latip, A. Kalam, Residual tensile stress of kenaf polyester and kenaf hybrid under post impact and open hole tensile, Procedia Technol. 15 (2014) 856–861, [https://doi.org/10.1016/j. protcy.2014.09.060](https://doi.org/10.1016/j.protcy.2014.09.060).
- [74] D.S. De Vasconcellos, F. Sarasini, F. Touchard, L. Chocinski-Arnault, M. Pucci, C. Santulli, J. Tirillò, S. Iannace, L. Sorrentino, Influence of low velocity impact on fatigue behaviour of woven hemp fibre reinforced epoxy composites, Compos. Part B Eng. 66 (2014) 46–57. [https://doi.org/10.1016/ j.compositesb.2014.04.025](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.04.025).
- [75] K.A. Prasath, V. Arumugaprabu, P. Amuthakkannan, V. Manikandan, R. Deepak Joel Johnson, Low velocity impact, compression after impact and morphological studies on flax fiber reinforced with basalt powder filled composites, Mater. Res. Express. 7 (2019), <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ ab611e>.
- [76] M.F. Ismail, M.T.H. Sultan, A. Hamdan, A.U.M. Shah, M. Jawaid, Low velocity impact behaviour and post-impact characteristics of kenaf/glass hybrid composites with various weight ratios, J. Mater. Res. Technol. 8 (2019) 2662–2673.

- [77] BingWang, Shuncong Zhong, Tung-Lik Lee, Kevin S Fancey and Jiawei Mi. Non-destructive Testing and Evaluation of Composite Materials and Structures – Review. *Advances in Mechanical Engineering* 2020, Vol. 12(4) 1–28.
- [78] Huang S and Wang S. *New technologies in electromagnetic non-destructive testing*. Berlin: Springer, 2016.
- [79] AFNOR : Essais non destructifs. Terminologie. Partie 9 : Termes utilisés en contrôle par Emission acoustique. Norme NF EN 1330-9, 2000.
- [80] M. PERRIN : Etude et caractérisation par émission acoustique et mesures électrochimiques de la fragilisation par l'hydrogène des câbles de précontrainte. Application aux ouvrages d'art. Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2009.
- [81] Yann Lebaupin. Comportement à l'impact et post-impact d'un composite lin/polyamide 11 élaboré par thermocompression. Autre. ISAE-ENSMA Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et d'Aérotechnique - Poitiers, 2016. Français.
- [82] E. Maillet. "Identification des mécanismes d'endommagement et prévision de la durée de vie des composites à matrice céramique par émission acoustique". Thèse de doctorat. Insa de Lyon, 2012.
- [83] Adem ALIA. Comportement à la rupture d'un composite à fibres végétales. Thèse de doctorat, université de lyon.2020.
- [84] SUTTON, M. A., CHENG, M. Q., PETERS, W. H., CHAO Y. J. McNEIL, S. R., 1986. Application of an Optimized Digital Correlation Method to Planar Deformation Analysis. *Image and Vision Computing*, 4(3), 143-151.
- [85] FEDELE R., RAKA B., HILD F., ROUX S., 2009. Identification of adhesive properties in GLARE assemblies using Digital Image Correlation. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 57, 1003-1016.
- [86] D. LECOMPTE : Elastic and elasto-plastic material parameter identification by inverse modeling of static tests using digital image correlation. Thèse de doctorat, Vrije Universiteit Brussel and Koninklijke Militaire School, 2007.
- [87] Crammond G. Development of optical techniques for the experimental analysis of local stress and strain distributions in adhesively bonded composite joints. Doctoral dissertation. University of Southampton; 2013.
- [88] Sutton MA, Orteu JJ, Schreier HW. DIC. Image correlation for shape, motion and deformation measurements: basic concepts, theory and applications, vol. 88. New York: Springer; 2009.
- [89] Mechakra, H., A. Nour, S. Lecheb, and A. Chellil. 2015. Mechanical characterizations of composite material with short Alfa fibers reinforcement. *Composite Structures* 124:152–62. doi:10.1016/j.compstruct.2015.01.010.
- [90] A. Bravo, L. Toubal, D. Koffi, and F. Erchiqui, "Characterization of Tensile Damage for a Short Birch Fiber-reinforced Polyethylene Composite with Acoustic Emission," *Int. J. Mater. Sci.*, vol. 3, no. 3, pp. 79–89, 2013.
- [91] A. Monti, A. El Mahi, Z. Jendli, and L. Guillaumat. "Mechanical behaviour and damage mechanisms analysis of a flax-fibre reinforced composite by acoustic emission". *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* vol. 90, pp. 100–110, 2016.

- [92] M. Caminero, M. Lopez-Pedrosa, C. Pinna, and C. Soutis, "Damage monitoring and analysis of composite laminates with an open hole and adhesively bonded repairs using digital image correlation," *Composites Part B: Engineering*, vol. 53, pp. 76-91, 2013.
- [93] Habibi, M., and L. Laperrière. 2020. Digital image correlation and acoustic emission for damage analysis during tensile loading of open-hole flax laminates. *Engineering Fracture Mechanics* 228:106921. doi:10.1016/j. engfracmech.2020.106921.
- [94] Xu, D., C. Cerbu, H. Wang, and I. C. Rosca. 2019. Analysis of the hybrid composite materials reinforced with natural fibers considering digital image correlation (DIC) measurements. *Mechanics of Materials* 135:46–56. doi:10.1016/j. mechmat.2019.05.001.
- [95] Zhou W, Lv ZH, Li ZY. Acoustic emission response and micro-deformation behavior for compressive buckling failure of multi-delaminated composites. *J Strain Anal Eng Des* 2016;51(6):397–407.
- [96] Oz FE, Ersoy N and Lomov SV. Do high frequency acoustic emission events always represent fibre failure in CFRP laminates? *Composites A: Appl Sci Manufacturing* 2017; 103: 230–235



Chapitre III :

*Matériaux et description des techniques de
caractérisations*

1. Introduction

Dans le domaine des composites, le renfort et le matériau lui-même doivent faire l'objet d'un examen approfondi avant d'être utilisés, afin de s'assurer que les exigences industrielles actuelles sont respectées. Ces investigations comprennent à la fois des essais réels et des techniques de caractérisation qui reconstituent le phénomène physique et les essais expérimentaux. Ce chapitre concerne une description sur le matériau composite a étudié, la méthode d'élaboration de matériau, les essais mécaniques et les techniques de caractérisation des dommages, déformations et déplacements. La première partie de ce chapitre traitera la fibre végétale et la résine utilise pour l'élaboration des matériaux composites et également les différentes d'éprouvettes a utilisée pour les différents essais statiques, quasi-statiques, et dynamiques. Une seconde partie donnera ensuite des précisions concernant l'émission acoustique (EA) et la technique de corrélation d'images numériques (CIN). En effet, ces techniques sont particulièrement intéressantes puisqu'elles permettent d'obtenir une quantité d'informations importante telles que les modes d'endommagement et les valeurs de déplacement ou de déformation sans affecter l'essai ou l'échantillon. Elles seront notamment utilisées dans le cadre des essais de traction et compression après impact et indentation.

2. Matériau

2.1. Mat de luffa

Les luffas cylindriques utilisés dans notre étude ont été achetés dans un magasin où se vendent les produits de l'agriculture dans la région de Mekla et d'Azazega, willaya de Tiziouzhou, les mats ont été obtenus à partir de fruits séchés de luffa. Elles ont été extraites manuellement de l'éponge de luffa, connu comme une éponge végétale, sa structure est subdivisée en trois parties : partie extérieure (1), partie centrale (2), partie intérieure (3) comme reçu dans la [Figure 1](#).



Figure 1. Luffa cylindrique.

Les mats extérieurs ont été soigneusement séparés de l'éponge de luffa, qui sont composés de deux parties différentes. Une partie où les fibres sont orientées de manière quasi-unidirectionnelle, qu'est éternommée partie (A) et l'autre partie nommée (B), où les fibres sont orientées de manière aléatoire, presque dans toutes les directions, comme indiqué sur la [Figure 2](#). Les propriétés chimie-physique de la fibre luffa sont affichées dans le [Tableau 1](#).

Tableau 1. Les propriétés chimiques et physiques de la fibre de luffa [1].

Constituants chimiques (%)		Propriétés physiques de la fibre de luffa	
Cellulose (%)	63±2.5	Densité (g/cm ³)	0.92±0.10
Lignine (%)	11.69±1.2	Diamètre (μm)	270±20
Hémicelluloses (%)	20.88±1.4	Rapport d'aspect	340±5
Cendres (%)	0.4±0.14	Angle micro fibrillaire (°)	12±2

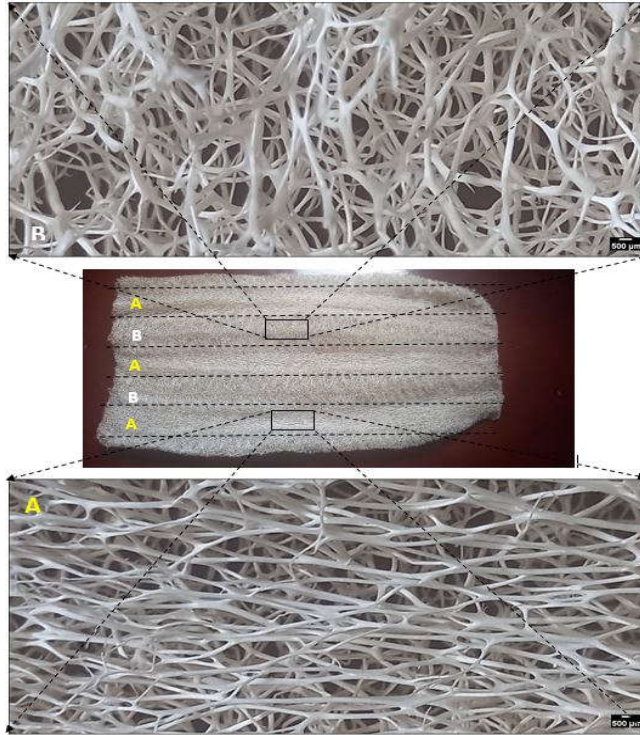


Figure 2. Orientation des fibres dans la structure du mat de luffa, parties A (quasi-unidirectionnelle) et B (aléatoire).

2.2.Matrice

Une matrice est utilisée dans cette étude, c'est une résine époxy, en utilisant le système de résine ADTECH 820 époxy/824 durcisseur fourni par Axson technologies inc (les propriétés chimie-physiques seront présentées dans l'annexe).

3. Traitement alcaline

La modification la plus importante qu'apporte un traitement alcalin est la rupture de la liaison hydrogène dans la structure de la fibre, ce traitement a un effet direct sur les fibrilles de cellulose, en extrayant une petite quantité de lignine, une cire huileuse qui recouvre la surface externe de la paroi cellulaire de la fibre [2,3]. Les mats de luffa externe ont été soigneusement séparées et coupées en forme rectangulaire, et ont été utilisées dans cette étude (Figure 3).

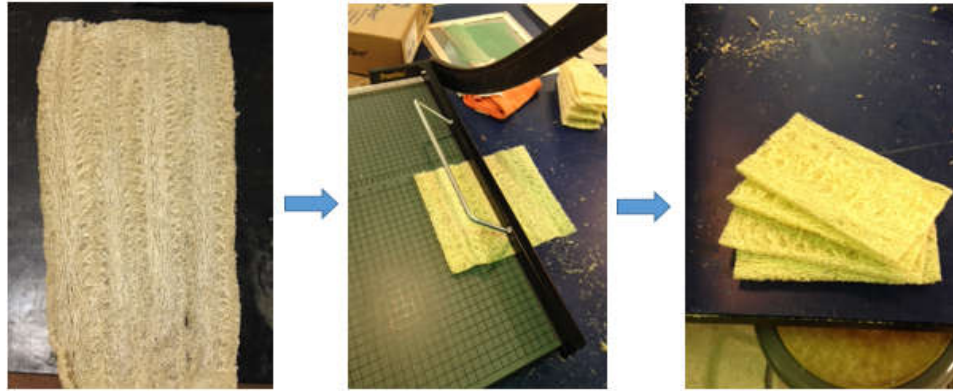


Figure 3.Préparation des mats du luffa

Ensuite, les mats ont été trempés dans différentes solutions de 2% et 5% NaOH pendant une heure de temps à température ambiante, comme montré dans la Figure 4 (A et B).

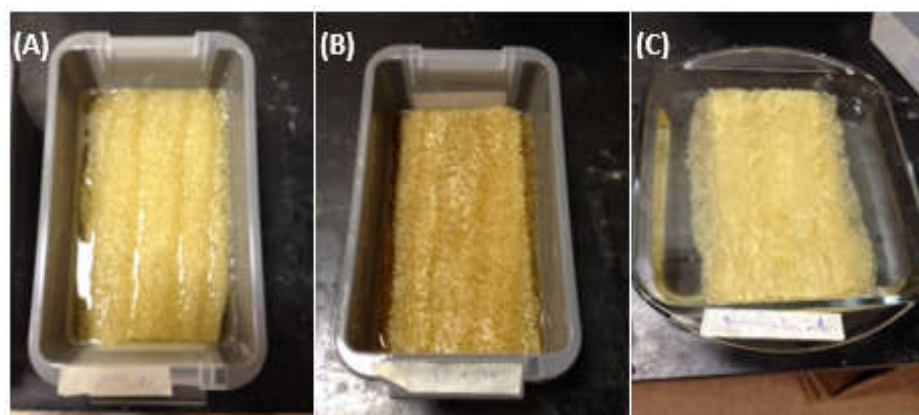
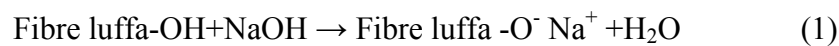


Figure 4. Traitement alcalin des fibres de luffa : (A) concentration de 2%, (B) concentration de 5%, et (C) neutralisation de 1%.

La réaction suivante se produit selon la formule suivante [4] :



Les mats du luffa sont ensuite neutralisés avec de l'acide acétique à 1 % (Figure 4 (c)), puis rincés avec de l'eau distillée pour éliminer tout reste de NaOH jusqu'à atteindre un PH = 7, et enfin séchés à l'air pendant quelques jours à température ambiante.

4. Fabrication du composite

Il existe plusieurs techniques de mise en œuvre des matériaux composites, mais dans le cadre de cette étude, seul le procédé Transfert de la résine (RTM) sera utilisé, nous avons choisi cette méthode pour la fabrication de tous les matériaux composites à étudier. Ce procédé a été

choisi parce qu'il permet d'avoir des fractions volumiques souhaitées, qu'il est facile à manipuler et qu'il est également utilisé dans plusieurs secteurs industriels [5]. La Figure 5 donne un aperçu comparatif des différentes techniques de moulages des composites thermodurcissables renforcées de fibres et leurs impacts sur les propriétés mécaniques, en particulier dans le cas des composites à fibres végétales.

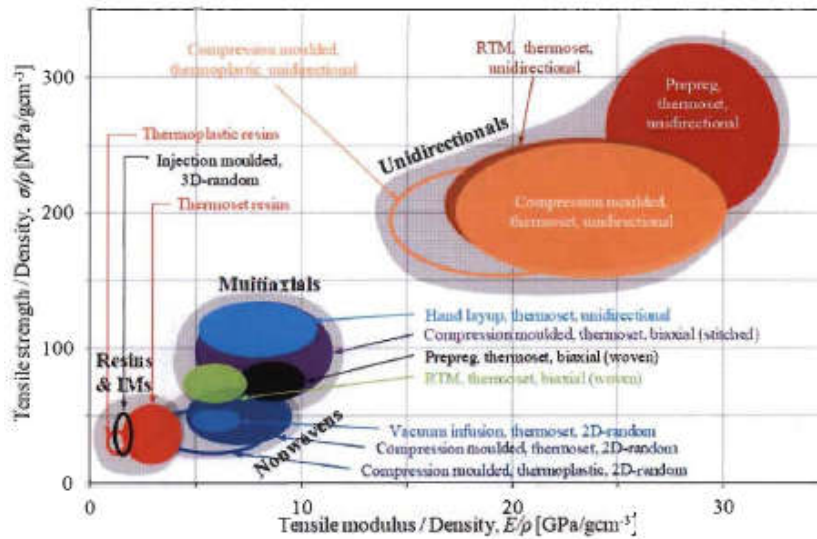


Figure 5. Influence du procédé de fabrication sur les propriétés en traction des composites[6].

Avant d'entamer la fabrication des composites pour les essais statiques et quasi-statiques et dynamiques, des processus de préparation et de superposition des mats ont été établis.

4.1. Composites pour les essais statiques et quasi-statiques

Pour les essais de traction, flexion, les mats du luffa sont traités à 2% et 5% NaOH et pour les essais CAI et indentation, les mats n'ont pas subi aucun traitement. Au début, une mise en place des quatre couches des mats de luffa, chaque partie (A) s'oppose à la partie (B) (voir Figure 2), avec une désignation (A/B), pour avoir au final une structure homogène et une surface égale, contrairement à ce qui se passe si on a placé (A/A) ou (B/B), voir Figure 6.

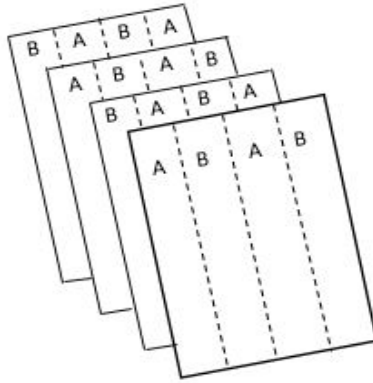


Figure 6. Superposition des mats du luffa afin de fabriquer des composites pour les essais traction, flexion, CAI et indentation.

4.2.Composites pour les essais dynamiques

Pour les essais impact à basse vitesse, quatre différents composites avec différentes séquences d'empilement (six couches) et orientation des fibres du luffa ont été préparées, comme la montre la [Figure 7](#).

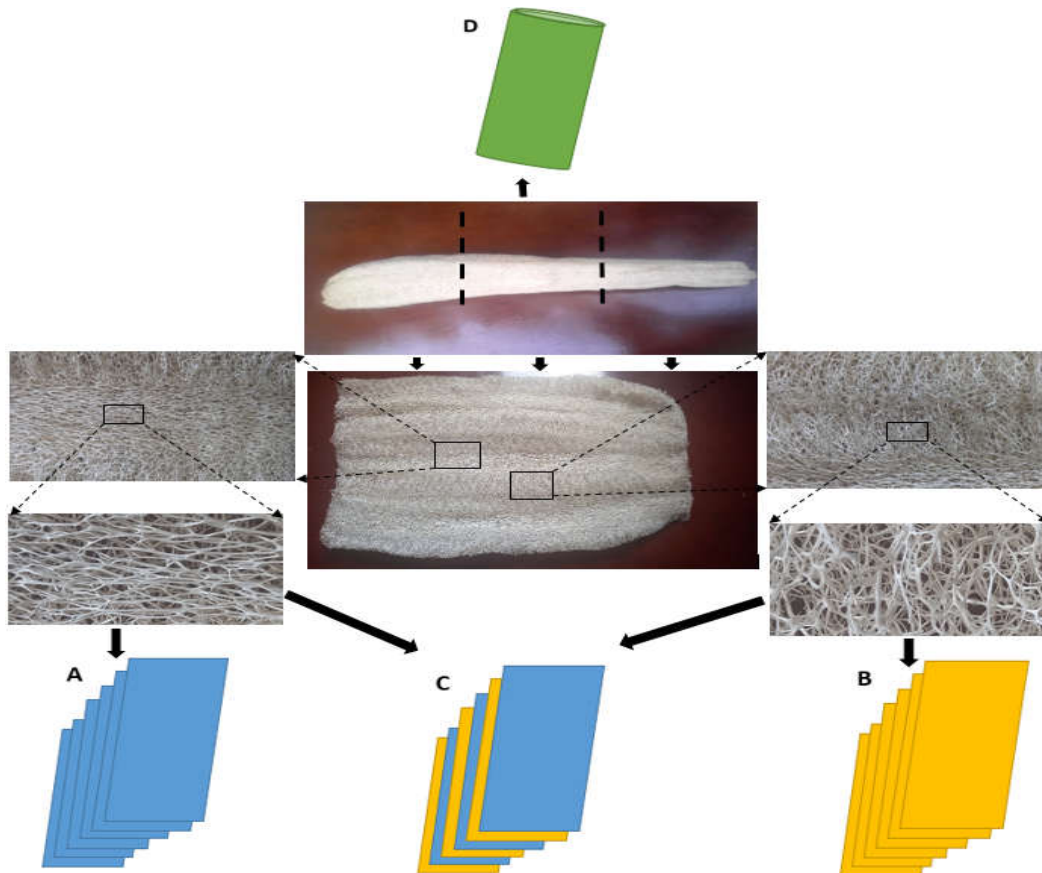


Figure 7. Préparation des quatre composites luffa/époxy.

Enfin, pour la dernière étape de fabrication des stratifiés composites luffa/époxy, avant de mettre les mats du luffa dans les moules, les mats sont séchés dans un four à 70°C pendant 6 heures ([Figure 8\(a\)](#)), puis ont été placés dans une presse à thermo compression de 100 tonnes

pendant quatre-vingt-dix minutes à une température de 40°C (Figure 8(b)) afin de réduire l'épaisseur des stratifiés et d'obtenir une surface uniforme, comme montrée la Figure 8(c).



Figure 8. Étapes de préparation, (a) Four, (b) Thermo compression, et (c) Plaques des mats du luffa.

Le procédé de moulage par transfert de résine (RTM) est utilisé. L'injection de la résine (résine époxy 820/824 durcisseur ADTECH fourni par Axson technologies inc, et a été mélangé avec le ratio durcisseur/résine (18/100) comme recommandé par le fournisseur) dans le moule se fait par un montage artisanal formé d'un pot à vide, un réservoir pressurisé pour la résine, des tubes d'injections en PVC et le moule (voir Figure 9). Le montage est relié à une pompe à vide pour le dégazage de la résine et un compresseur. Le moule en acier inoxydable comporte une partie inférieure en acier de 35 mm d'épaisseur avec les orifices d'injection et d'évacuation de la résine, une partie supérieure en acier et un cadre de fixation rigide pour limiter le plus possible la flexion des parois du moule lors de l'injection sous pression. Un autre joint en silicone, placé entre les deux parties du moule, sert à maintenir sur le pourtour des renforts un joint d'étanchéité pendant l'injection. Six cales d'épaisseur sont placées sur le pourtour du moule afin d'obtenir la fraction volumique désirée dans la plaque.



Figure 9. Moulage par transfert de résine (RTM).

Une couche de cire est ensuite appliquée en surface du moule pour faciliter le démoulage. Les couches de renfort luffa sont placées sur la partie du bas du moule jusqu'à obtenir le nombre de couches souhaité, soit 4 à 6 dans le cas présent. Le moule est fermé, serré sur le pourtour avec les vis prévues et relié au réservoir d'injection de résine. Le mélange de résine avec durcisseur est introduit dans le réservoir pressurisé qui est relié au pot à vide. Une pompe à vide effectue le dégazage de la résine pendant 15 min. Le réservoir sera ensuite mis sous pression en injectant de l'air comprimé. Un tube submergé dans la résine permet l'évacuation de celle-ci vers le moule. La pression d'injection est contrôlée par un régulateur de pression. Après l'imprégnation, le moule est laissé pendant 24 heures. Après l'extraction de la pièce, la plaque est refroidie à l'air libre pendant 24h (Figure 10). Elle est ensuite remise au four à 60°C pendant 6 h pour effectuer une post-cuisson.

Le [Tableau 2](#) résume les paramètres qui ont été utilisés pour cette mise en œuvre 4 à 6 plis de mat pour réaliser les plaques.



Figure 10. La plaque composite luffa/époxy.

Tableau 2. Paramètres appliqués lors du procédé RTM.

Nature de la performe	4 à 6 plis de mat
Dimension des plaques	300 x 200 mm ² et 200 x 100 mm ²
Pression d'aspiration	0.4 bar
Nombre de points d'aspiration	1
Nombre de points d'injection	1
Température	Température ambiante

5. Calcul de la fraction volumique des fibres

Pour trouver la fraction volumique des fibres des composites élaborés, on utilise l'équation (2) de la norme ASTM D 3171-99 [7],

$$V_f = \frac{N \times M_s}{P_f \times e} \quad (2)$$

Où V_f la fraction volumique des fibres du composite, N représente le nombre de plis, e l'épaisseur de l'éprouvette, P_f la densité des fibres, M_s la masse par unité de surface du luffa. Après durcissement à l'intérieur du moule à température ambiante, les composites ont été post-durcis à 60°C pendant quelques heures dans une étuve.

6. Dispositifs des essais mécaniques

6.1. Essai de traction

Afin de pouvoir étudier le comportement mécanique des matériaux composites, des essais de traction ont été mis en œuvre. Ils permettent d'obtenir trois grandeurs mécaniques : le module d'Young, les coefficients de Poisson et la contrainte à la rupture. Deux techniques sont utilisées pour mesurer les déformations au cours de l'essai :

- Une technique d'extensomètre classique, souvent utilisée pour ce type de mesure. Elle donne une valeur fiable du module d'Young, mais ne permet d'obtenir qu'une valeur moyennée des déplacements et déformations.
- Une technique d'imagerie (corrélation d'images numériques visibles), cette méthode, bien que moins précise pour les petites déformations que l'extensomètre, permet d'obtenir plus d'informations car elle permet de faire des mesures de champs et donne ainsi la possibilité d'avoir des données en n'importe quel point de la surface étudiée. Elle permet également d'obtenir des données sur la tranche de l'échantillon.

Afin de limiter le risque d'erreur, les deux techniques seront mises en œuvre et comparées entre elles. En effet, l'extensomètre classique a déjà beaucoup été utilisée dans ce domaine et permet d'obtenir des résultats de référence fiables, tandis que la technique de corrélation d'images reste moins précise pour ce type de mesures. Il est par conséquent important de bien déterminer les meilleures conditions d'essai et d'acquisition d'images par exemple pour obtenir des résultats optimisés au travers de la technique de corrélation d'images numériques. Les essais de traction ont été réalisés sur des éprouvettes rectangulaires, et découpées selon la norme ASTM D3039 dans les dimensions souhaitées ($250 \times 25 \times 2.2 \text{ mm}^3$) à l'aide d'une scie diamantée (Figure 11).

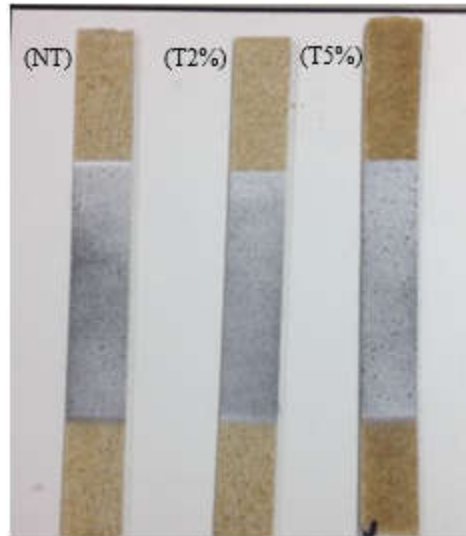


Figure 11. Eprouvettes pour l'essai de traction

La machine utilisée est une servo-hydraulique MTS, équipée d'une cellule de charge de 100 KN avec une vitesse de déplacement de 2 mm/min (Figure 12). La déformation est mesurée à l'aide d'un extensomètre avec une longueur de jauge de 25 mm, la résistance à la traction et la déformation à la rupture sont calculées et le module de Young est obtenu en calculant la pente de la courbe de traction dans l'intervalle de déformation (0,05% à 0,25%), conformément à la norme ISO-527-2. Après les essais, au moins trois spécimens valides sont conservés et la valeur moyenne est prise.

Les essais de traction réalisés permettent d'obtenir les informations suivantes : temps t , force F et déformations (longitudinales et transversales si on utilise la corrélation d'images numérique). Grâce à ces données, il est possible de calculer, dans la direction de traction x , le module d'Young du composite E_x et les coefficients de Poisson ν_{xy} et ν_{xz} .

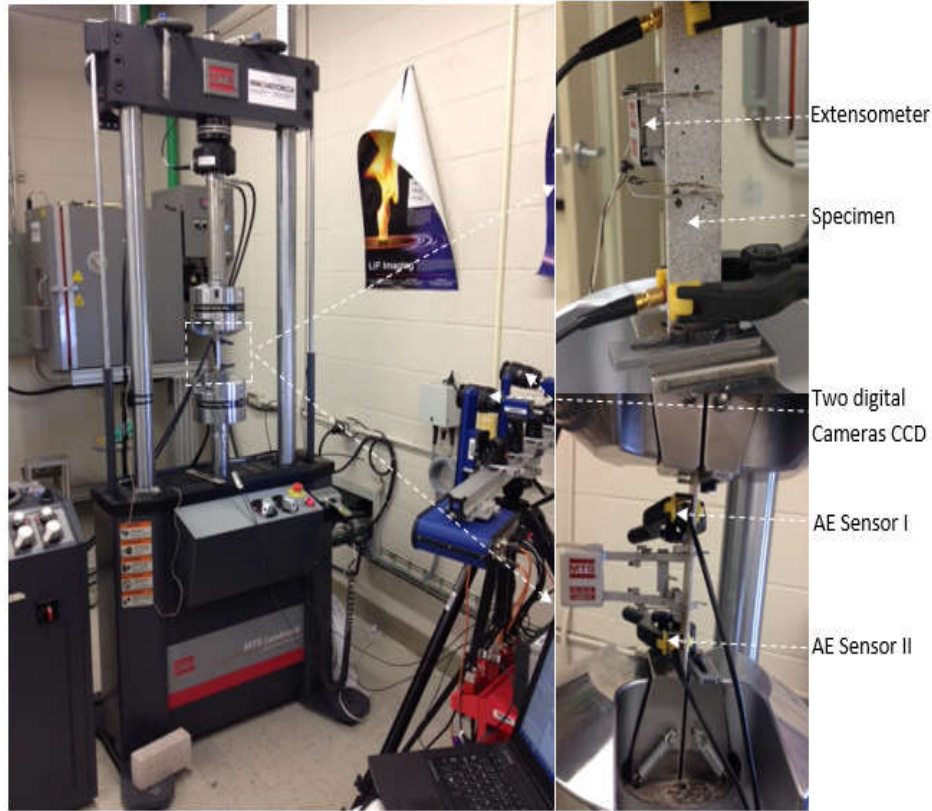


Figure 12. Essai de traction de composite luffa/époxy.

La Figure 13 représente la courbe théorique contrainte /déformation des matériaux polymères en général [8].

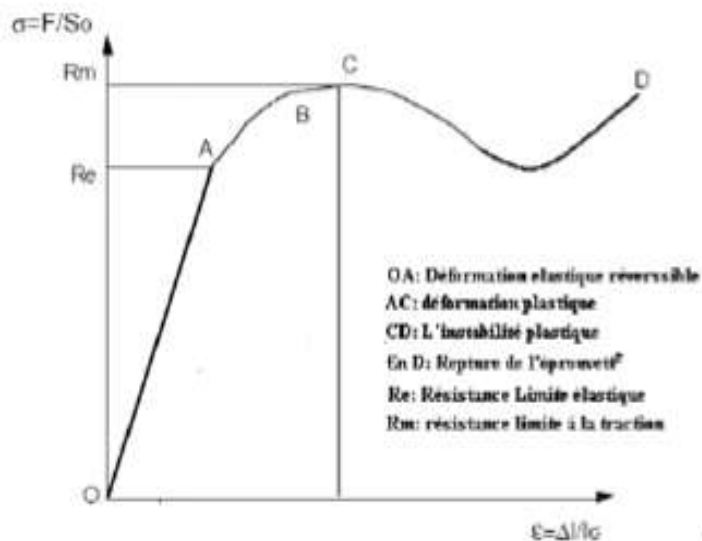


Figure 13. Courbe théorique contrainte/déformation des matériaux polymères [8].

La pente de la partie linéaire OA (Figure 13) représente le module d'Young (E) exprimé en MPa ou en GPa, appelé aussi module d'élasticité.

La contrainte nominale σ_{xx} est calculée à partir des dimensions de l'éprouvette mesurées avant l'essai et de la force F mesurée lors de l'essai.

$$\sigma_{xx} = \frac{F}{S} = \frac{F}{le} \quad (3)$$

Avec l et e la largeur et l'épaisseur de l'échantillon.

Dans le domaine élastique, la loi de Hooke est applicable dans la direction de traction x et s'exprime sous la forme :

$$\sigma_{xx} = E_x \times \varepsilon_{xx} \quad (4)$$

Le module d'Young recherché est déterminé à partir de la relation (5)

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (5)$$

Les coefficients de Poisson sont obtenus à l'aide des équations suivantes :

$$\nu_{xy} = -\frac{\varepsilon_{yy}}{\varepsilon_{xx}} \text{ et } \nu_{xz} = -\frac{\varepsilon_{zz}}{\varepsilon_{xx}} \quad (6)$$

6.2. Essai de flexion 3 points

Les essais de flexion 3 points ont été réalisés sur une machine d'essai universelle de type ZWICK ROELLE Z010 équipée d'une cellule de charge de 10 KN. L'essai consiste à placer une éprouvette de taille 80x10x2.2 mm³ (Figure 14), selon la norme ASTM D790 sur deux supports et à appliquer une force à vitesse constante perpendiculaire à sa surface (Figure 15).



Figure 14. Eprouvettes pour l'essai de flexion

La distance entre les supports est d'environ 64 mm (au moins 16 h pour avoir une flexion pure), la température de la salle d'essai est d'environ 24°C.

Les propriétés mécaniques (la contrainte à la rupture et le module de Young en flexion) sont déterminées par les formules suivantes :

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (7)$$

$$E_f = \frac{l^3 F}{4bh^3 S} \quad (8)$$

$$\varepsilon_f = \frac{6h}{h^2} S \quad (9)$$

Où :

F : la force (N)

S : flèche (mm)

L : la distance entre appuis (mm),

b et h sont respectivement l'épaisseur et la largeur de l'éprouvette (mm),

σ_f : la contrainte à la rupture (MPa),

ε_f : la déformation (%),

E_f : le module de Young en flexion



Figure 15. Essai de flexion de composite luffa/époxy.

Le **Tableau 3** donne les principales caractéristiques des composites traités et non traités ainsi que leur désignation pour les essais de traction et flexion.

Tableau 3. Séquences d'empilement et fraction volumique des différents composites traités et non traités pour les essais traction et flexion.

Configuration de composite	Nombre de pli	Séquence d'empilement	Fraction volumique(%)	Traitement chimique
NT	4	A/B/A/B	30%	0% NaOH
T2%	4	A/B/A/B	30%	2% NaOH
T5%	4	A/B/A/B	30%	5% NaOH

6.3. Essai d'impact à basse vitesse (IBV)

Les essais d'impact par chute ont été réalisés pour étudier le comportement des composites stratifiés mat luffa/époxy sous des charges d'impact à basse vitesse (IBV). Les tests d'IBV ont été effectués à l'aide du testeur d'impact à poids tombant Imatek IM10 ITS, conformément à la norme ASTM D7136. L'instrument était équipé d'un système d'acquisition de données connecté à un ordinateur standard pour analyser les données capturées. La machine est

équipée d'un impacteur ayant une pointe hémisphérique d'un diamètre nominal de 20 mm et d'une masse de 9,606 kg et est équipée d'un système anti-rebond. Des spécimens carrés de dimensions 60×60mm (Figure 16) ont été découpés dans le composite stratifié à l'aide d'une meule diamantée et ont été placés dans le support d'impact tout en étant serrée entre deux plaques d'acier avec une zone circulaire non soutenue de 40 mm de diamètre.

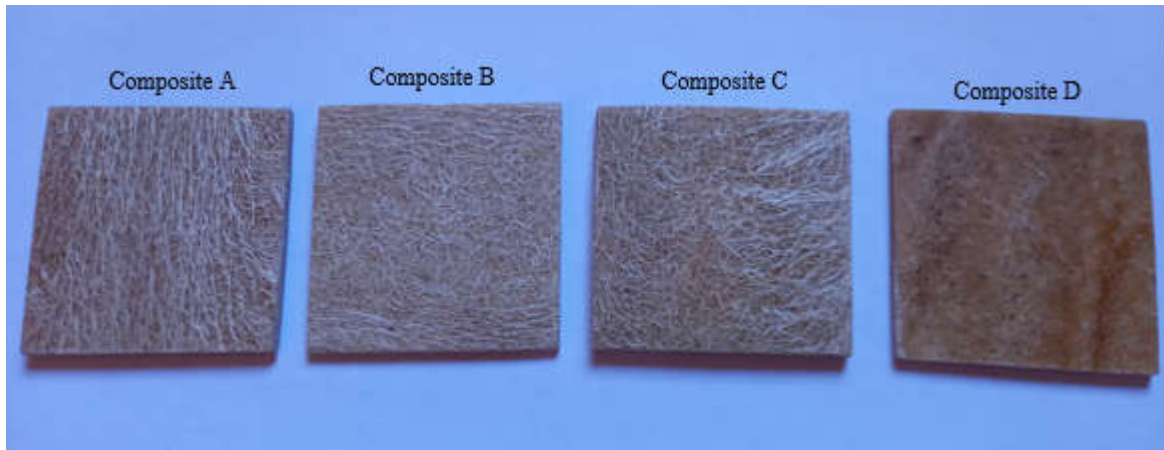


Figure16.Spécimens pour les essais d'impact à basse vitesse.

La Figure 17 présente une illustration détaillée de l'équipement utilisé pour les essais d'impact par chute de poids.

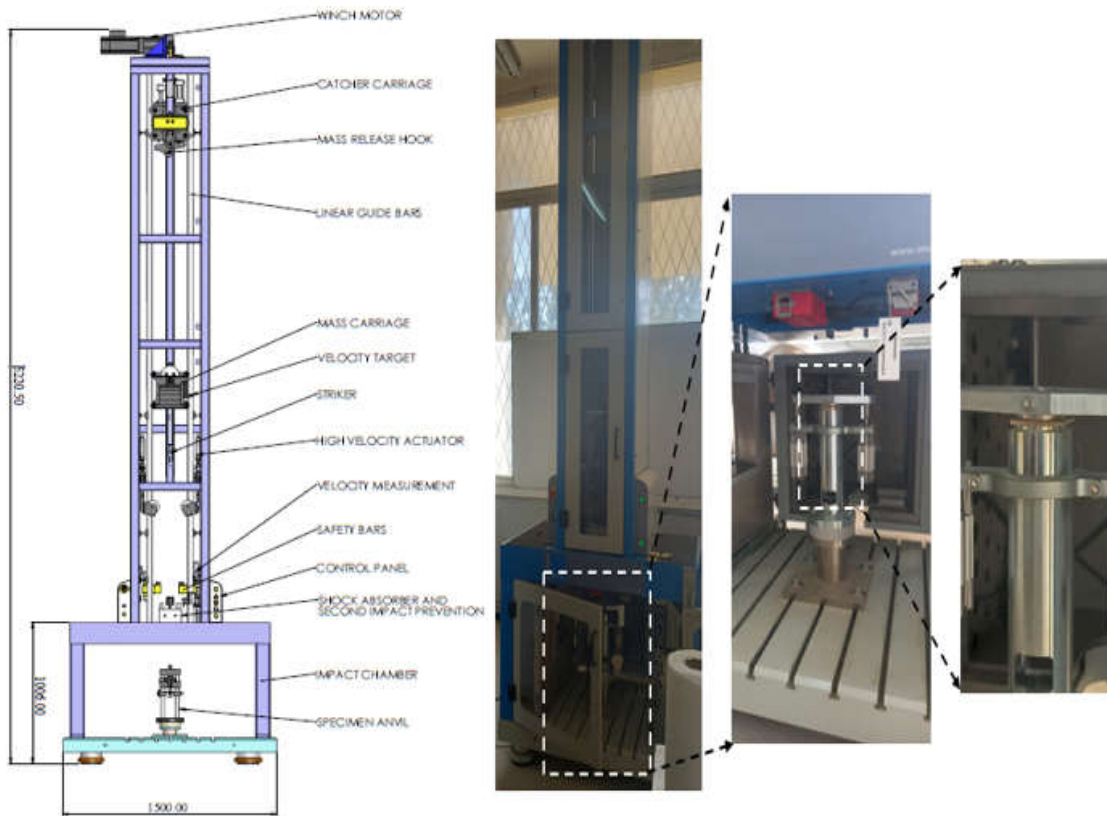


Figure 17. Machine d'impact à poids tombant Imatek IM10 ITS.

En particulier, pour chaque type de composite, les essais ont été effectués en augmentant l'énergie d'impact allant de 5 à 20 J, avec une vitesse d'impact correspondante allant d'environ 1,0015 à 2,0147 m/s. Ces trois énergies incidentes ont été choisies pour créer des dommages allant jusqu'à la pénétration (partiellement cassé, le projectile ne pénétrant pas dans l'éprouvette) et la perforation (complètement cassé, le projectile traversant l'éprouvette). Ces scénarios ont été choisis pour comparer les performances de perforation et de pénétration des quatre composites étudiés. En utilisant des échantillons composés de 3 spécimens pour chaque composite examiné, environ 40 tests d'impact ont été réalisés en tout. La machine d'essai fournit la force d'impact $F(t)$ que le frappeur applique à l'échantillon pendant l'essai, et son déplacement correspondant $D(t)$ mesuré à partir de la position d'impact initiale ; à partir de ces mesures, l'énergie totale absorbée E_a par l'échantillon et l'éventuelle énergie de retour élastique E_e , peuvent être immédiatement calculées en intégrant la courbe force-déplacement $F(d)$. Les informations sur les essais d'impact et sur les spécimens d'essai sont résumées dans le [Tableau 4](#).

Tableau 4. Paramètres et conditions des essais d'impact à basse vitesse.

Configuration des composites	Energie d'impact (J)	Vitesse d'impact (m/s)	Nombre de plis	Séquence d'empilement	Fraction volumique (%)	Epaisseur (mm)
A	5	1,00226		A/A/A/A/A/A	23.43	3.84
	15	1,74356		A/A/A/A/A/A	23.43	3.84
	20	2,01136		A/A/A/A/A/A	23.43	3.84
B	5	1,0020	6	B/B/B/B/B/B	24.32	3.70
	15	1,7424	6	B/B/B/B/B/B	24.32	3.70
	20	2,01476		B/B/B/B/B/B	24.32	3.70
C	5	1,00196		A/B/A/B/A/B	23.37	3.85
	15	1,74176		A/B/A/B/A/B	23.37	3.85
	20	2,01436		A/B/A/B/A/B	23.37	3.85
D	5	1,0015		Forme cylindrique	24.86	3.62
	15	1,7378		Forme cylindrique	24.86	3.62
	20	2,0119		Forme cylindrique	24.86	3.62

6.4. Essai post d'impact –Compression après impact (CAI)

Avant d'entamer des essais CAI, des essais d'impact à faible vitesse ont été réalisés en premier à l'aide d'une machine d'essai d'impact à usage intensif. La chute de poids de 4 livres(équivalant 1,81437kg) en chute libre est guidée dans un tube. L'énergie d'impact est ajustée en changeant la hauteur de l'impacteur hémisphérique de 12,7 mm de diamètre (Figure 18). Celle-ci est déterminée par l'énergie potentielle :

$$E_p = mgh(10)$$

Où m la masse du projectile et g l'accélération de la pesanteur et pour un calcul de la vitesse au moment de l'impact, nous considérons la conservation de l'énergie au moment de l'impact, nous avons équilibré entre l'énergie potentielle E_p et l'énergie cinétique E_c :

$$E_p = E_c(11)$$

Avec E_c définie par :

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2(12)$$

Le calcul de la vitesse peut obtenir par la formule(13)

$$v = \sqrt{2gh} \quad (13)$$

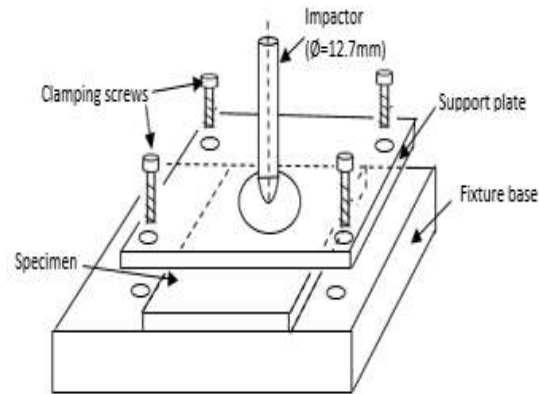


Figure 18. Dispositifs d'essai d'impact.

Des spécimens rectangulaires de la taille (75 mm x 60 mm x 3 mm) illustrée dans laFigure 19sont impacté au centre par des niveaux d'énergie d'impact de 1, 2, et 3J. Trois spécimens pour chaque niveau d'énergie sont testés selon la norme ASTM D5628. Les spécimens sont simplement soutenus par un support cylindrique en acier avec un trou interne dans la face supérieure.



Figure 19. Spécimens pour les essais d'impact et CAI.

Après les essais d'impact (1J, 2J, et 3J) effectués sur les spécimens, les essais de compression après impact (CAI) ont été réalisés à l'aide d'une machine de chargement statique servo-

hydraulique Landmark MTS d'une capacité de 100 KN, conformément à la norme ASTM D7137M-12 pour évaluer la résistance résiduelle à la compression.

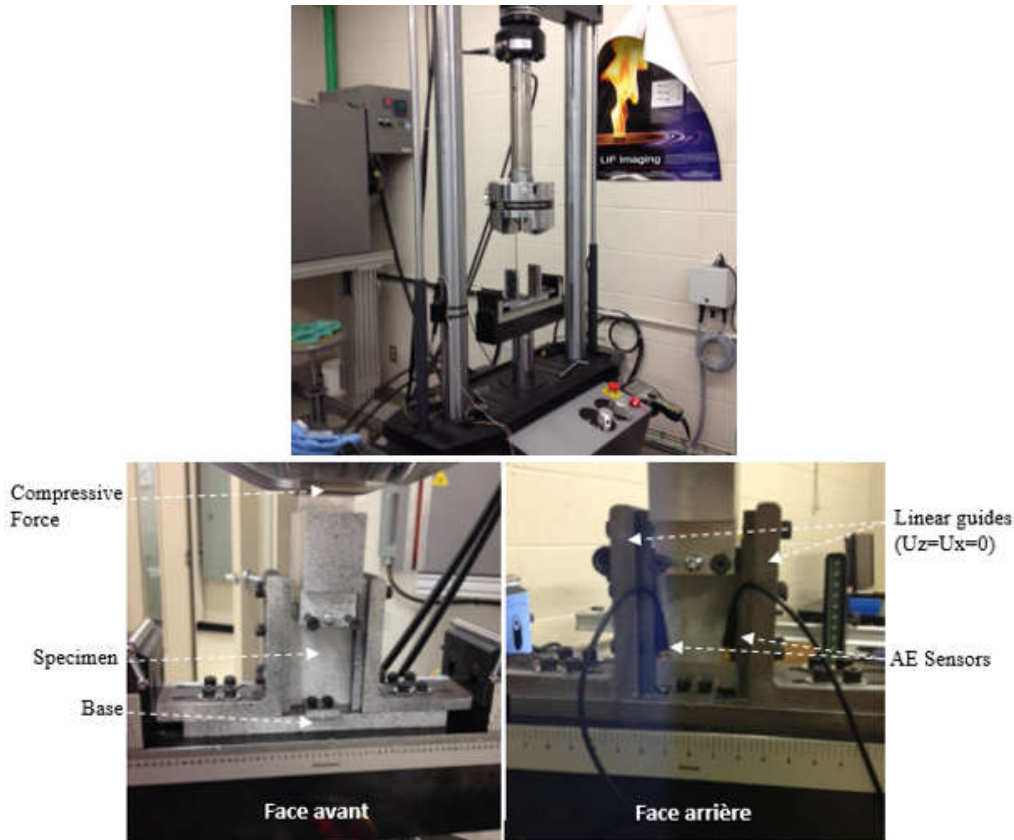


Figure 20. Dispositifs d'essai compression après l'impact (CAI).

Le dispositif expérimental CAI est constitué d'un corps, lui-même composé d'une base et de deux montants permettant de maintenir l'éprouvette en place ; ces deux montants permettent également un serrage linéaire. Le principe de l'essai est de soumettre l'éprouvette à une charge de compression dans son plan contrôlé par une vitesse de déplacement quasi-statique de 2 mm/min (Figure 20). L'essai se poursuit jusqu'à la rupture de l'éprouvette impactée. Pour valider le test, la dégradation totale doit avoir lieu au centre de l'éprouvette, au niveau de la zone impactée. La résistance CAI (σ_c) du spécimen est calculée en utilisant l'équation (14).

$$\sigma_c = \frac{F_{max}}{b \times e} \quad (14)$$

Où F_{max} désigne la charge maximale, b la largeur et e l'épaisseur du spécimen CAI, respectivement.

Les informations sur les essais de compressions après impact (CAI) et les composites sont résumées dans le [Tableau 5](#).

Tableau 5. Paramètres et conditions des essais de CAI.

Configuration des composites (J)	Energie d'impact	Nombre de pli	Séquence d'empilement	Fraction volumique (%)
CAI0J0 4A/B/A/B	20			
CAI1J	1	4A/B/A/B	20	
CAI2J	24A/B/A/B	20		
CAI3J	3	4A/B/A/B	20	

6.5. Essai d'indentation

Les essais d'indentation quasi-statique (QSI) ont été réalisés à l'aide d'une machine MTS servo-hydraulique Landmark équipée d'une cellule de charge de 100kN. Un dispositif d'indentation a été conçu, fabriqué et adapté à la machine MTS, comme illustré à la [Figure 21](#). Un pénétrateur hémisphérique en acier inoxydable de 12,7 mm de diamètre a été utilisé pour l'indentation conformément à la norme ASTM D 6264. L'échantillon (Dimension 70 mm x 70 mm x 3.3 mm) illustrée dans la [Figure 22](#), testé est serré sur le dispositif de fixation pendant le chargement, et la charge d'indentation est appliquée de manière centrale. Les essais QSI ont été réalisés sous contrôle de déplacement à une vitesse de chargement de 2 mm/min.

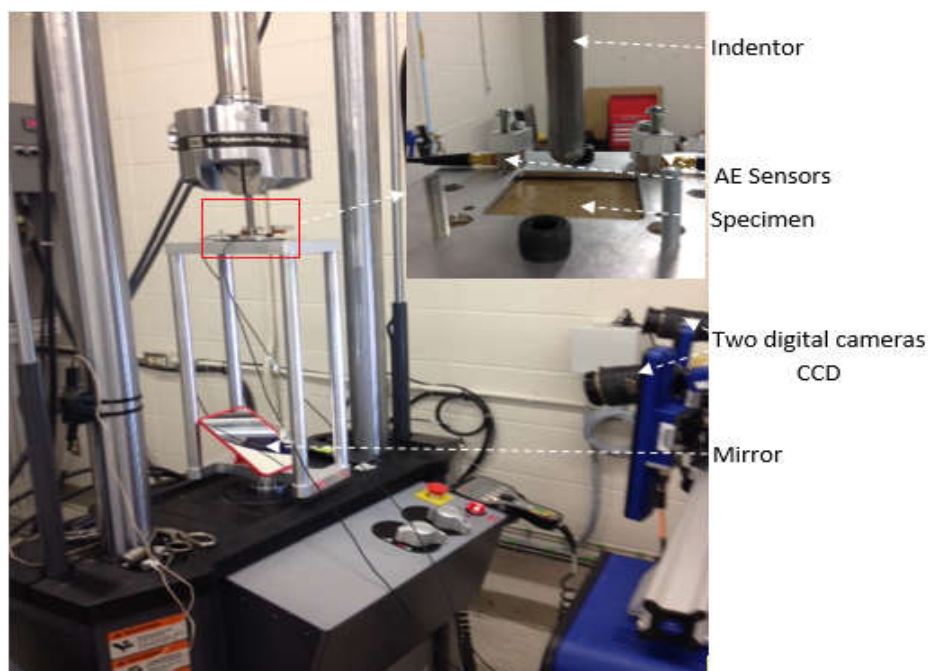


Figure 21. Dispositifs d'essai indentation.

Un miroir positionné en dessous de la face opposée à l'indentation de l'échantillon pour que la camera CCD puisse enregistrer les images de l'ensemble du comportement de déplacement et de déformation de la plaque pendant tout le chargement.



Figure 22. Spécimen pour le test d'indentation.

Les informations sur les essais d'indentation quasi-statique (QSI) et de composite sont résumées dans le [Tableau 6](#).

Tableau 6. Informations sur le composite pour le test indentation.

Composite de pli	Nombre d'empilement	Séquence (%)	Fraction volumique
Mat luffa/Epoxy	4	A/B/A/B	20

7. Evaluation des endommagements

7.1. Image J

Le logiciel d'analyse et de traitement d'images multiplateforme Image J a été utilisé pour mesurer la surface endommagée et la longueur des fissures à partir d'images de composites impactés. Pour cela, le rapport entre le nombre de pixels de l'image et ses dimensions (en mm) a été calculé. La longueur des fissures est obtenue à partir d'un relevé de la position des extrémités des fissures, c'est-à-dire de la distance entre les deux extrémités de la fissure. Afin de permettre une meilleure visibilité des fissures et donc une meilleure détection, un seuillage a été appliqué sur les images en niveaux de gris.

7.2. Emission acoustique (EA)

Pour la surveillance des dommages pendant les essais de traction, indentation, et compression après impact (CAI), un système EA à deux canaux fourni par Vallen avec un taux d'échantillonnage de 5MHz et une pré amplification de 40 dB a été utilisé. Les événements

EA ont été enregistrés par le logiciel AE AMSY-6. Le seuil des signaux EA a été ajusté à 40 dB. Un seuil de détection est appliqué pour séparer le bruit du signal significatif. Les mesures EA ont été effectuées à l'aide de deux capteurs KRNm 300.

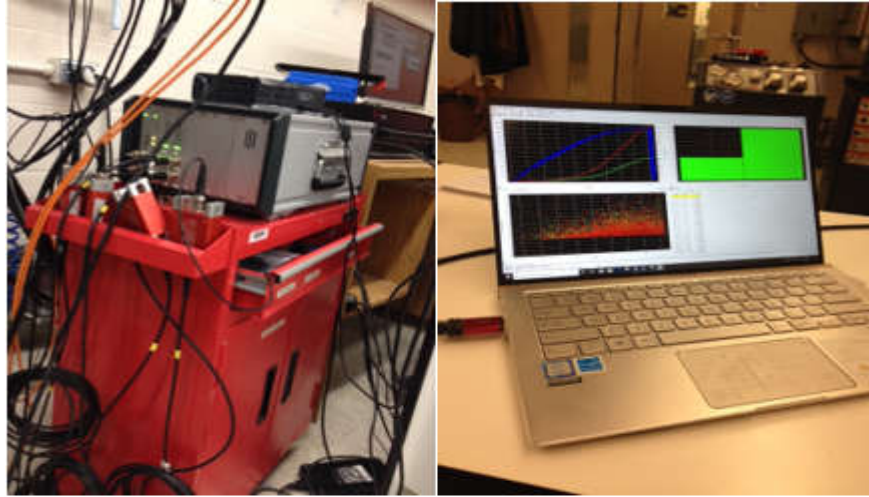


Figure 23. Système d'acquisition d'émission acoustique.

La vitesse du son est déterminée au début du test par un essai de rupture de crayon et le temps d'arrivée est mesuré pour chacun des deux capteurs, et divisé par la distance entre les capteurs (110 mm), dans notre cas, la vitesse est de 1250 mm/s. De la graisse de silicone à haut vide a été utilisée comme couplage entre les capteurs et la surface du spécimen. Les données de charge, de déformation et de déplacement de la tête ont été transmises au système Vallen et enregistrées à une fréquence d'échantillonnage de 10 Hz (Figure 23).

7.3. Corrélation d'image numérique (CIN)

Le système de corrélation d'images numériques (CIN) d'un système de(2D) a été utilisé pour mesurer le champ déformation et de déplacement des échantillons, pendant les essais de traction, indentation, et compression après impact. Pour la mesure du déplacement et déformation, deux caméras numériques CCD (Charge Coupled Device) de cinq millions de pixels, modèle Imager M-lite, ont été utilisées pour enregistrer les conditions de déplacement en formant une image du motif des points liés aux bords devant l'échantillon testé (Figure 24). La résolution de la caméra utilisée dans l'analyse CIN est de 12 Mpx. La distance entre la caméra et l'échantillon est d'environ 1,5m. Tous les échantillons ont été imagés à une fréquence d'imagerie constante de 14 Hz pendant les tests. Le logiciel LaVision est utilisé pour calculer le déplacement en fonction du déplacement des motifs de speckle, ainsi qu'en

fonction du temps et en corrélation avec la contrainte appliquée, tous les tests ont été effectués à température ambiante.

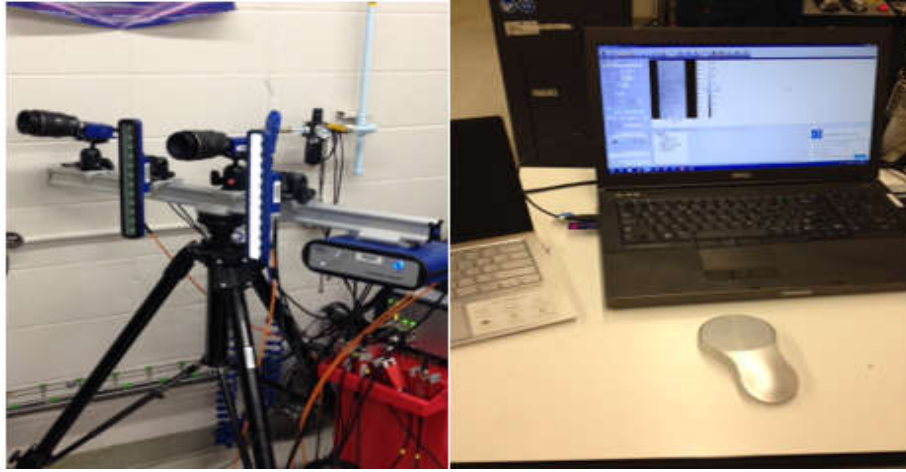


Figure 24. Système d'acquisition de corrélation d'image numérique

7.4. Microscopie électronique à balayage (MEB)

Pour identifier les mécanismes d'endommagement des échantillons à l'échelle microscopique, différents faciès de fracture issus des essais traction, indentation, et d'impact et de post-impact ont été observés à l'aide du microscope électronique à balayage (MEB), de type (FEI quanta 650 à filament de tungstène) (Figure 25).



Figure 25. Microscope électronique à balayage (MEB).

8. Conclusion

Le travail de cette thèse repose beaucoup sur le travail expérimental. L'étude de l'effet de traitement chimique sur les propriétés mécaniques et sur les endommagements en traction et en flexion. L'étude du comportement d'impact des quatre composites est notamment l'un des points particulièrement importants de ce travail, c'est pour cette raison que beaucoup d'attention y est portée. De plus, on s'intéresse également aux sollicitations post-impact, qui peuvent être de compression, et qui vont permettre de vraiment évaluer la résistance du matériau et les propriétés mécaniques résiduelles lorsqu'il est soumis à impact à basse vitesse. Les essais réalisés peuvent être divisés en cinq différentes parties :

- Les essais de traction, permettant de caractériser les composites renforcés en mat de luffa traité et non traité en traction (Module d'Young, contrainte à la rupture, déformation à la rupture, et coefficients de Poisson)
- Les essais de flexion, permettant de caractériser les composites renforcés en mat de luffa traité et non traité en flexion (Module d'Young, contrainte à la rupture, et déformation à la rupture)
- Les essais d'impact, qui vont être particulièrement importants puisque c'est lors de ces essais que l'on va pouvoir comprendre le comportement de composite (Courbes : Force-Temps, Déplacement-Temps, Force-Déplacement, et Energie –Temps) et les différents mécanismes d'endommagements.
- Les essais post-impact, qui permettent d'évaluer l'évolution des propriétés mécaniques résiduelles du composite suite à compression après impact (CAI) et les différents mécanismes d'endommagements et champs de déplacement.
- Les essais d'indentation, permettant d'identifier les modes d'endommagements par émission acoustique (EA) et les champs des déformations et déplacements par corrélation d'image numérique (CIN).

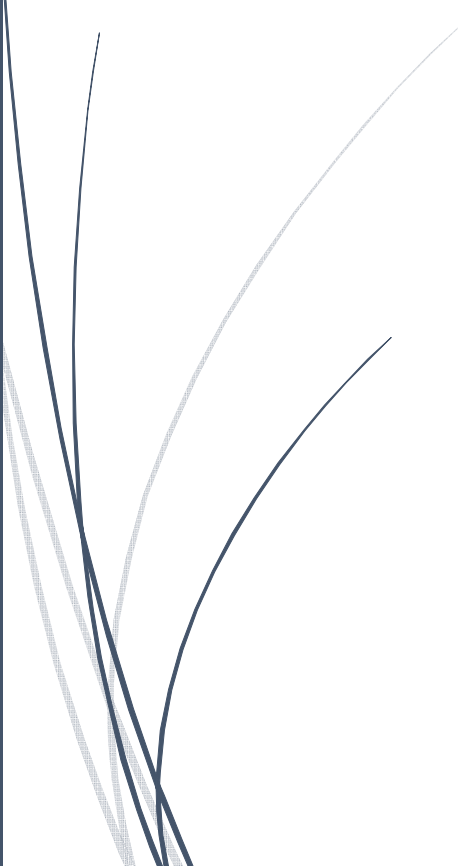
Références bibliographiques

- [1] Saw, S.K., et al., Fabrication, characterization, and evaluation of luffacylindrica fiber reinforced epoxy composites. *BioResources*, 2013.8(4): p. 4805-4826.
- [2] Jähn, A., M. W. Schröder, M. Fütting, K. Schenzel, and W. Diepenbrock. 2002. Characterization of alkali treated flax fibres by means of FT Raman spectroscopy and environmental scanning electron microscopy. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy* 58 (10):2271-2279.
- [3] Mohanty, A. K., M. Misra, and L. T. Drzal. 2001. Surface modifications of natural fibers and performance of the resulting biocomposites: An overview. *Composite Interfaces* 8 (5):313-343.
- [4] Jena, P.K., J.R. Mohanty, and S. Nayak, Effect of Surface Modification of Vetiver Fibers on Their Physical and Thermal Properties. *Journal of Natural Fibers*, 2020: 1-12.
- [5] Falaschetti MP, Rondina F, Zavatta N, et al. Material Characterization for Reliable Resin Transfer Molding Process Simulation. *ApplSci* 2020; 10: 1814.
- [6] M. Ashby, "The CES EduPack database of natural and man-made materials," ed: Granta Material Inspiration-Bioengineering, 2008.
- [7] Habibi, M., G. Lebrun, and L. Laperrière, Experimental characterization of short flax fiber ma composites: tensile and flexural properties and damage analysis using acoustic emission. *Journal of Materials Science*, 2017. 52(11): 6567-6580.
- [8] H. Lapeyre, Polyéthylène haute densité PE HD, *Technique de l'ingénieur*, 1990; A3315.



Chapitre IV :

*Comportement mécanique d'un composite
luffa /époxy en statique,
quasi-statique, et dynamique*



1. Introduction

Ce chapitre présente les résultats expérimentaux de la caractérisation mécanique de composite luffa/époxy. La première partie de ce chapitre sera consacrée sur l'influence deux différents traitements alcaline de 2% et 5% sur les propriétés mécaniques en traction et en flexion qui seront identifiées, par la suite les endommagements et les déformations des composites traites et non traites sont évaluées en utilisant l'émission acoustique (EA), la corrélation d'image numérique (CIN), et microscopique électronique à balayage (MEB). La deuxième partie de ce chapitre concerne l'étude du comportement à l'impact basse vitesse de 5,15 et 20J des différentes composites mat luffa/époxy, L'influence de la séquence d'empilement et l'orientation des fibres dans la structure des composites sont analysées par la comparaison de quatre composites renforcée en mat de luffa. Les endommagements créés par l'impact sont étudiés par inspection visuelle et Image J. Ensuite, une autre partie concerne l'étude du comportement quasi-statique indentation, afin d'évaluer et d'identifier les modes d'endommagement, déplacements, et déformations avec les techniques (EA), (CIN), et (MEB). La dernière partie de ce chapitre, présente une analyse d'impact (1,2, et 3J) et post-impact (compression après impact (CAI)) (CAI1J, CAI2J, et CAI3J), cette dernière sera effectuée pour déterminer les propriétés mécaniques résiduelles des composites luffa/époxy en compression ; ainsi l'utilisation les techniques d'analyse et d'évaluation, comme (EA), (CIN), et (MEB) permettra d'identifier les mécanismes d'endommagements et les déplacements.

2. Comportement en traction

2.1. Comportement en traction de composite luffa/époxy

La [Figure 1\(A\)](#) montre les courbes de contrainte-déformation des trois composites luffa/époxy obtenus à température ambiante. Les propriétés en traction sont indiquées dans le [Tableau 1](#). On peut observer que le comportement des courbes de traction est quasi linéaire, quelle que soit la concentration du traitement alcalin, la première phase linéaire des courbes de traction reflète le comportement élastique du composite luffa/époxy. Le module de Young a été calculé dans la gamme de valeurs appropriées à la déformation (entre 0,0005 et 0,0025) selon les normes ISO 527. La deuxième phase quasi-linéaire reflète les signes d'endommagement des composites. Les résultats obtenus montrent que les propriétés mécaniques (le module de Young) augmentent avec un traitement alcalin de 2%, par rapport au composite non traité ([Figure 1\(B\)](#)). La résistance à la traction est augmentée de 7% et 20% pour les composites T2% et T5%, respectivement ([Figure 1\(C\)](#)). Le traitement alcalin de 5% pendant une heure a

montré une amélioration du module de Young de $7,71 \pm 0,12$ GPa et de la résistance à la traction de $81,08 \pm 1,48$ MPa. Cependant, le traitement à 2% a montré une meilleure amélioration avec $8,94 \pm 0,5$ GPa et $71,81 \pm 0,41$ MPa, respectivement. L'augmentation du module de Young et de la résistance à la traction est attribuée au traitement alcalin, qui a amélioré l'état de surface des fibres [1-3], ce qui a renforcé l'adhésion entre les fibres et la matrice [1].

Tableau 1. Propriétés mécaniques des essais de traction d'un composite de fibres de luffa traitées et non traitées dans cette étude.

Composites (GPa)	Module d'Young (MPa)	Contrainte à la rupture (%)	Déformation	V_f Traitement chimique	Nature des fibres	Ref	
Epoxy	3.5	68.90	-	-	-	-	-
Luffa/Epoxy actuel	6.49 ± 0.20	67.08 ± 1.36	1.32 ± 0.15	30%	NaOH (0%) 0h	Mat	Travail
Luffa/Epoxy actuel	8.94 ± 0.53	71.81 ± 0.41	1.29 ± 0.9	30%	NaOH (2%) 1h	Mat	Travail
Luffa/Epoxy actuel	7.71 ± 0.12	81.08 ± 1.48	1.20 ± 0.07	30%	NaOH (5%) 1h	Mat	Travail
Luffa/Epoxy	0.6	25	-	13%	NaOH (5%) 4h	Mat	[3]
Luffa/Epoxy	-	22.5	-	40%	NaOH (2%) 1h	Mat	[4]
Luffa/Epoxy	-	18	-	40%	NaOH (2%) 1h	Courte	[4]
Luffa/Epoxy	-	17	-	40%	NaOH (2%) 1h	Particule	[4]
Agave/Epoxy	0.25	25.80	-	-	NaOH (5%) 30 min	Courte 3mm	[5]
Agave/Epoxy	0.23	21	-	-	NaOH (5%) 30 min	Courte 7mm	[5]
Agave/Epoxy	0.22	17.80	-	-	NaOH (5%) 30 min	Courte 1cm	[5]
Lin/Epoxy	10.2	149	3.2	55.9%	NaOH (5%) 30 min	Tissu	[6]
Linen/Epoxy	7.1	128	3.8	55.3%	NaOH (5%) 30 min	Tissu	[6]
Bambou /Epoxy	4.9	71	3	54.2%	NaOH (5%) 30 min	Tissu	[6]

Pour évaluer l'effet du traitement alcalin (NaOH) sur la modification des propriétés mécaniques, une comparaison de nos résultats avec d'autres travaux de recherche. Pour les composites renforcés avec des fibres de luffa traitées, par cela, Mohanta et al. [3] ont utilisé le traitement alcalin à 5% pendant 4h sur la même fibre de luffa. Pour une fraction volumique de fibres de 13%, le module de Young et la résistance à la traction étaient respectivement de 0.6 GPa et 25 MPa. Toujours sur les mêmes fibres de luffa avec le même protocole de traitement chimique(traitement alcaline), des composites à base des fibres courtes, particules, et mat, à 40% de la teneur en fibres, ont montré une résistance à la traction de 22.5, 18, et 17 MPa, respectivement [4]. Pour les composites renforcés avec d'autres fibres traitées, nous pouvons citer les travaux suivants : Mysamy et al. [5] ont effectué le même traitement pendant 30

minutes sur des fibres courtes d'agave de différentes dimensions de 3, 7 et 10 mm. Ils ont trouvé une amélioration du module d'Young de 0.25 GPa et de la résistance à la traction de 25.80 MPa pour la fibre courte de 3 mm. Yan et al. [6] ont réalisé presque le même protocole de traitement sur trois fibres de différentes natures : lin, linen et bambou, avec une teneur en fibre de 55% et une épaisseur d'échantillon de 5 mm, les résultats trouvés montrent une valeur de module d'Young de 10.2, 7.1 et 4.9 GPa, respectivement. Dans notre étude, les propriétés mécaniques trouvées sont meilleures que celles de la littérature mentionnée ci-dessus, nous pouvons donc conclure que notre traitement alcalin a un effet significatif sur l'état de la surface des fibres de luffa.

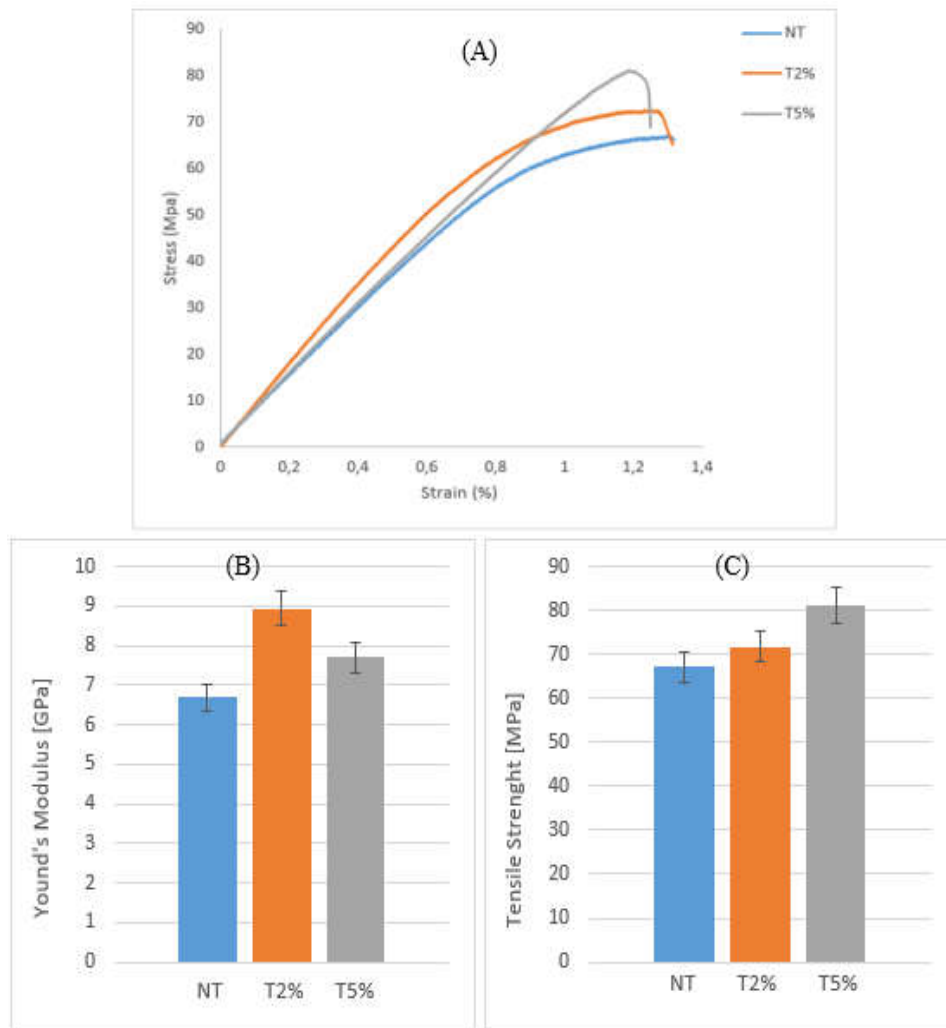


Figure 1. Impact du traitement chimique : (A) Courbes de contrainte-déformation, (B) Module d'Young, et (C) Contrainte.

2.2. Analyse de l'endommagement

2.2.1. Observation des endommagements par VT

L'une des difficultés majeures reliée à l'essai de traction est de déterminer si la rupture est acceptable ou si elle a été causée par les contraintes. En effet, pour un même matériau testé dans les mêmes conditions, la rupture peut prendre l'allure de balais, de déchirure transverse ou même explosée (Figure 2). Il est donc possible que certaines éprouvettes soient rejetées alors qu'elles présentent un mode de rupture caractéristique de ce matériau. Toutefois, prédire le processus de rupture d'un matériau composite dans son ensemble est une tâche relativement complexe. En effet, étant donné la nature hétérogène de ce dernier, le processus de rupture de chacune des parties individuelles (chaque fibre) doit être connu pour prédire la rupture globale.

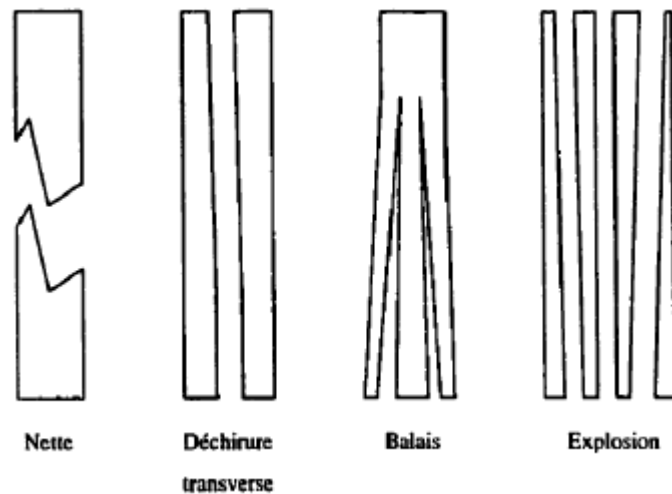


Figure 2. Exemples de modes de rupture pouvant survenir lors d'un essai de traction.

Les observations des faciès de rupture des éprouvettes NT, T2%, T5% testées en traction monotone, sont présentées dans la Figure 3. L'analyse de cette figure présente une rupture un peu fragile, montre que la rupture des fibres n'est obtenue qu'après la rupture de la résine et on constate aussi que certaines fibres n'ont pas rompues. En d'autres termes, les fibres les plus faibles se rompent en premier par rapport aux autres fibres.

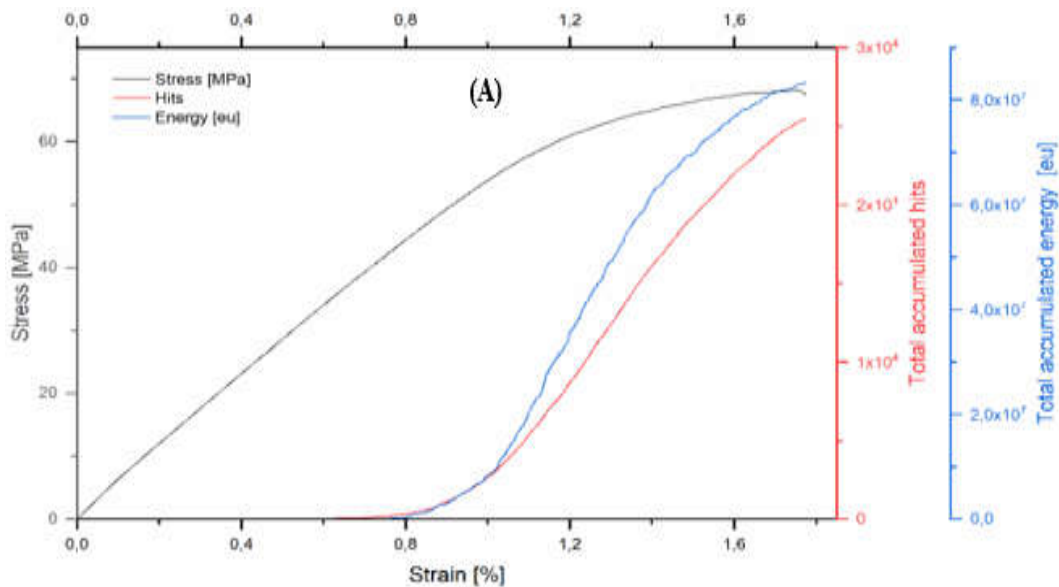


Figure 3. Faciès de rupture des composites stratifiés.

2.2.2. Observation des endommagements par EA

2.2.2.1. Analyse globale des dommages accumulés

Le suivi en temps réel des dommages a été effectué sur la base de l'énergie acoustique totale et du nombre de coups accumulés pendant les essais de traction. Cette approche a été adoptée pour caractériser l'effet du traitement sur le développement des différents mécanismes d'endommagement.



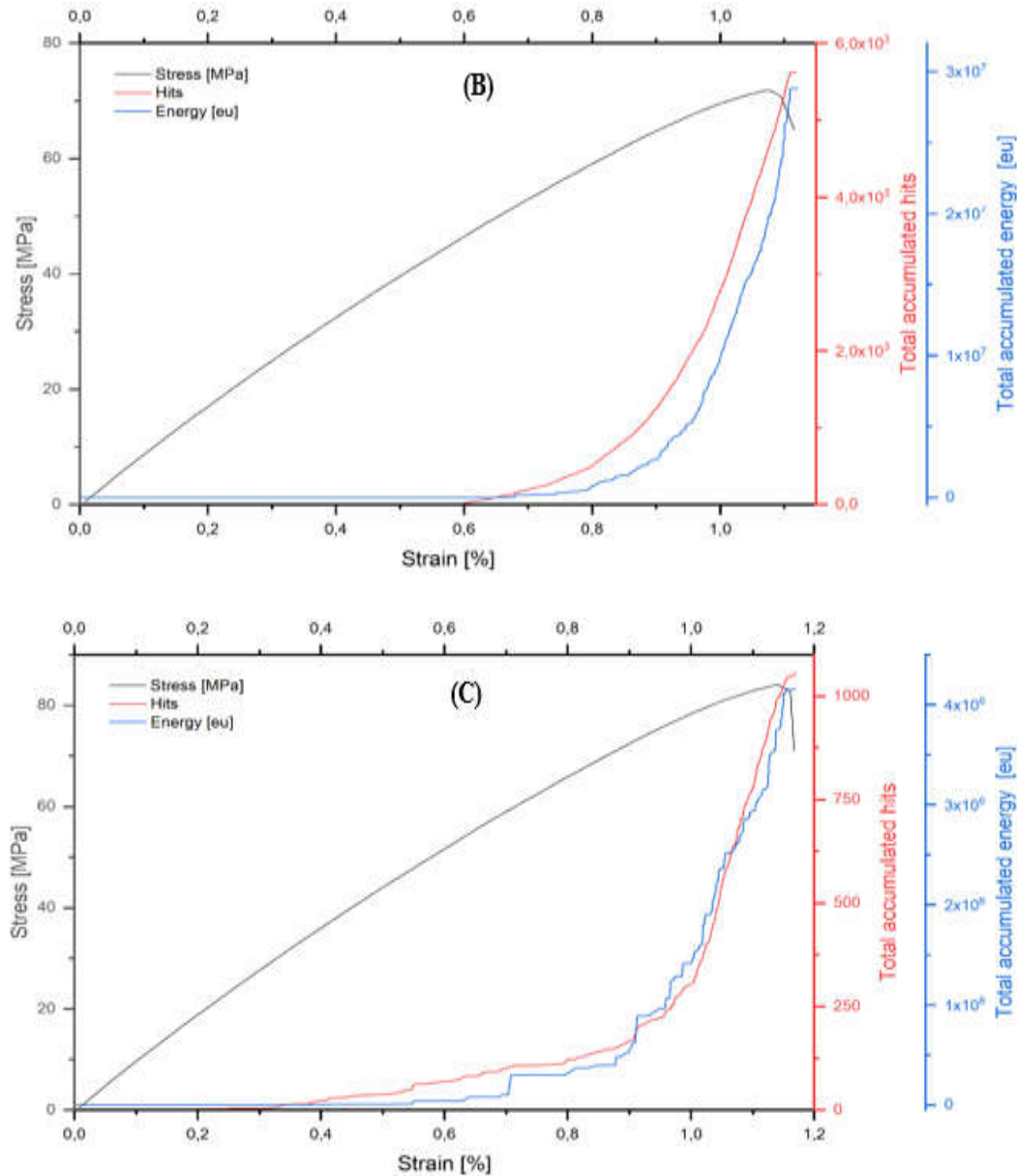


Figure 4. Courbes de contrainte-déformation et l'énergie acoustique et nombre total de coups cumulés des composites : ((A) NT, (B) T2%, et (C) T5%) en essai de traction.

La courbe de contrainte-déformation associée à chaque type de composite a été superposée à la courbe de l'énergie totale accumulée et du nombre de coups (Figure 4) afin de corréler les propriétés mécaniques à l'évolution des dommages dans le composite.

Des différentes tendances d'énergie d'EA sont observées en fonction du type de traitement des fibres. Pour le composite NT (Figure 4(A)), les premières salves ont été détectées après la phase élastique, ce qui signifie l'initiation d'un mécanisme de dommage qui apparaît à 0,7% de la déformation, une augmentation de l'énergie d'EA est observée à 0,8% de la déformation,

ce qui reflète une augmentation de l'activité acoustique et la possibilité d'initiation d'un ou plusieurs mécanismes de dommage, et nous avons observé une tendance à l'augmentation du nombre total de coups en parallèle avec la déformation. Dans le cas de composite renforcé en fibre traitée à 2% (Figure 4(B)), le nombre total de coups cumulés augmente à une déformation de 0,6%, l'énergie cumulée augmente exponentiellement dans l'intervalle de déformation [0,6%,0,7%], reflétant une augmentation de l'activité acoustique. Cela reflète également une possible initiation d'un ou plusieurs nouveaux mécanismes de dommages, après cela, les courbes de l'énergie acoustique et du total des coups continuent de croître. Pour le troisième composite (Figure 4(C)), l'énergie acoustique et le nombre total de coups accumulés sont inférieurs à ceux des autres échantillons, l'augmentation de l'activité acoustique est observée dans la l'intervalle de déformation [0,4%, 0,45%], [0,3%, 0,35%], respectivement. Cela confirme que les déformations d'initiation des dommages sont faibles par rapport aux composites NT et T2% et que la diminution des événements acoustiques est due au traitement alcalin. Il est également important de noter que l'énergie et le total des coups cumulés pour les composites NT (Figure 4(A)) sont plus élevés que ceux des composites T2% et T5% (Figure 4(B et C)). Cette observation confirme l'effet du traitement alcalin dans l'amélioration de l'adhésion fibre-matrice [1].

2.2.2.2. Identification des modes d'endommagement

L'analyse de la courbe d'énergie totale accumulée permet une description générale de l'évolution de l'endommagement interne. Cependant, cette description reste insuffisante pour identifier les différents modes d'endommagement contribuant à la rupture finale du matériau. Des informations supplémentaires peuvent être obtenues en effectuant une analyse multi-variable basée sur d'autres caractéristiques des signaux acoustiques (Amplitude, Durée, ...Ets). L'utilisation de l'analyse multi-variable pour classer les événements acoustiques a fait l'objet de plusieurs articles [7-9]. Dans notre étude, une analyse multi-variable a été effectuée pour déterminer la gamme d'amplitudes acoustiques spécifiques à nos matériaux. L'analyse multi-variable a été réalisée à l'aide du logiciel Noesis, logiciel d'analyse avancée de données, de reconnaissance de formes et de réseaux neuronaux, et en utilisant l'algorithme de regroupement k-means.

Le Tableau 2 présente un résumé des différents mécanismes d'endommagement et des plages d'amplitudes mesurées qui leur correspondent, tels qu'obtenus par plusieurs auteurs. Les différences sont dues aux propriétés de la matrice et du renforcement et aux caractéristiques

de l'équipement utilisé. L'analyse des salves d'EA par classification multi-variable avec l'algorithme k-means a permis d'identifier les modes d'endommagement pour les trois composites stratifiés luffa/époxy testés en traction. Ces signaux étaient dérivés de la fissuration de la matrice (classe 1), de l'arrachement des fibres (classe 2), de délaminage des couches (classe 3) et de la rupture des fibres (classe 4). Les résultats de l'analyse multivariée obtenus dans cette étude sont résumés dans le [Tableau 3](#), qui classe les événements acoustiques en quatre groupes principaux : fissuration de la matrice, arrachement des fibres, délaminage et rupture des fibres.

Tableau 2. Mécanismes d'endommagement basés sur l'événement de l'amplitude, résultats de la littérature.

Composites de la matrice	Fissuration et arrachement des fibres	Décohésion fibre-matrice	Délaminage	Rupture des fibres	Ref
Lin/Epoxy	38-70 dB	50-78 dB	-	58-85 dB	[07]
Lin/Epoxy	32-50 dB	40-65 dB	50-78 dB	75-78 dB	[10]
Chanvre/Epoxy	50-57 dB	54-64 dB	-	64-72 dB	[11]
Verre/Lin/Epoxy	32-60 dB	42-68 dB	55-80 dB	-	[10] Verre/Epoxy
	32-55 dB	39-66 dB	52-82 dB	78-99 dB	[10]
Carbone/Epoxy	58-90 dB	45-65 dB	55-82 dB	<60 dB	[12]

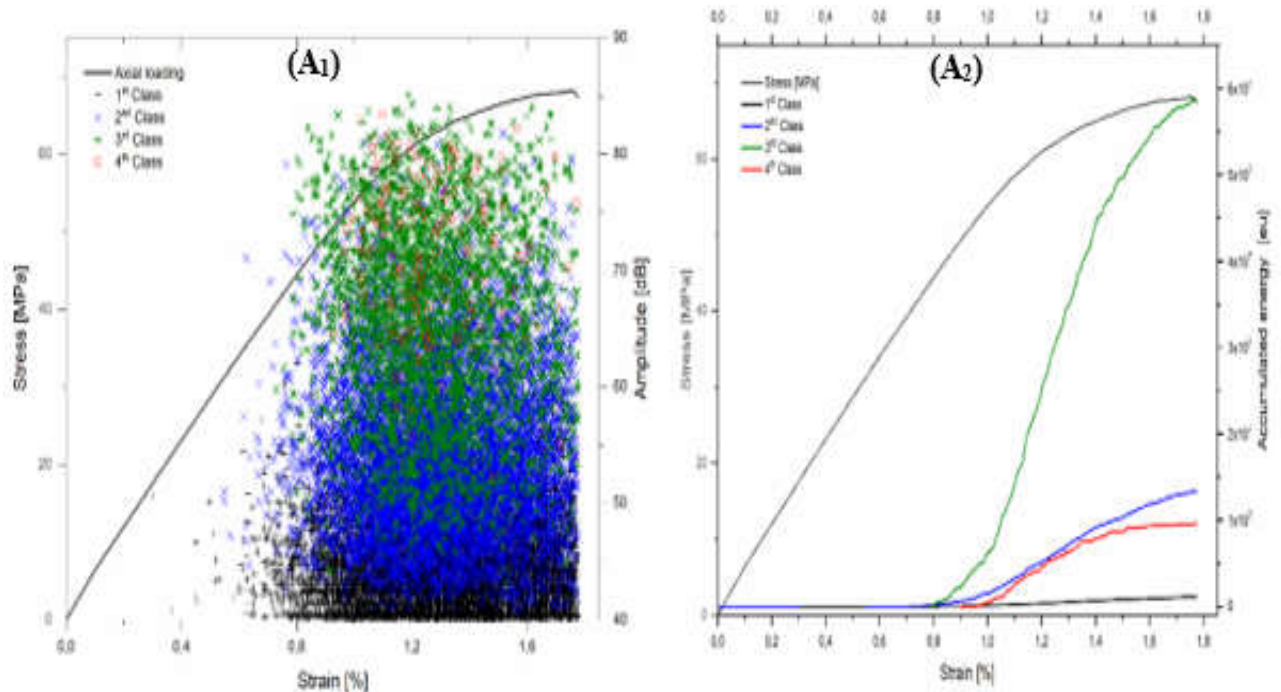
Tableau 3. Résultats de l'analyse multivariée utilisée dans cette étude.

Paramètres de la matrice	Fissuration des fibres	Arrachement	Délaminage	Rupture des fibres
Amplitude range (dB)	40-67	41-85	45-95	58-98
Duration ranges (µs)	0-185	184-539	540-1348	1370-4105
Count ranges	0-27	1-63	8-121	40-241

Le critère d'énergie cumulée de chaque mode d'endommagement a été utilisé pour caractériser les mécanismes de rupture des échantillons testés. La [Figure 5](#) montre également l'évolution des différentes classes pendant l'essai de traction. Pour les trois échantillons, le délaminage a eu une énergie cumulative la plus élevée, apparaît très tôt dans l'essai de traction, suivie par l'apparition de l'arrachement des fibres. Cependant, la rupture des fibres et la fissuration de la matrice contenant le plus petit nombre d'énergies cumulatives apparaissent vers la moitié du test de traction pour tous les composites. Nous avons observé que l'énergie cumulative de

chaque mode d'endommagement du composite NT est supérieure à celle des composites T2% et T5%.

La Figure 5(A₁et A₂)montre les résultats de composite NT, tandis que la Figure 5(B₁et B₂) et la Figure 5(C₁et C₂) montrent les résultats des composites T2% et T5%, respectivement. Les amplitudes des événements acoustiques sont indiquées à gauche (A₁, B₁ et C₁), tandis que les courbes de contrainte-déformation corrélées aux courbes d'énergie acoustique cumulative de chaque mode de dommage sont indiquées à droite (A₂, B₂ et C₂). Des couleurs et des symboles différents sont utilisés pour différencier les modes d'endommagement. En commençant par les amplitudes des événements acoustiques (courbes à gauche de la Figure 5), La classification des événements acoustiques en fonction de leurs amplitudes permet d'identifier quatre groupes distincts. La corrélation entre ces groupes et la courbe de traction permet ensuite d'identifier la présence et l'évolution des différents mécanismes d'endommagement générés lors des essais de traction sur les composites.



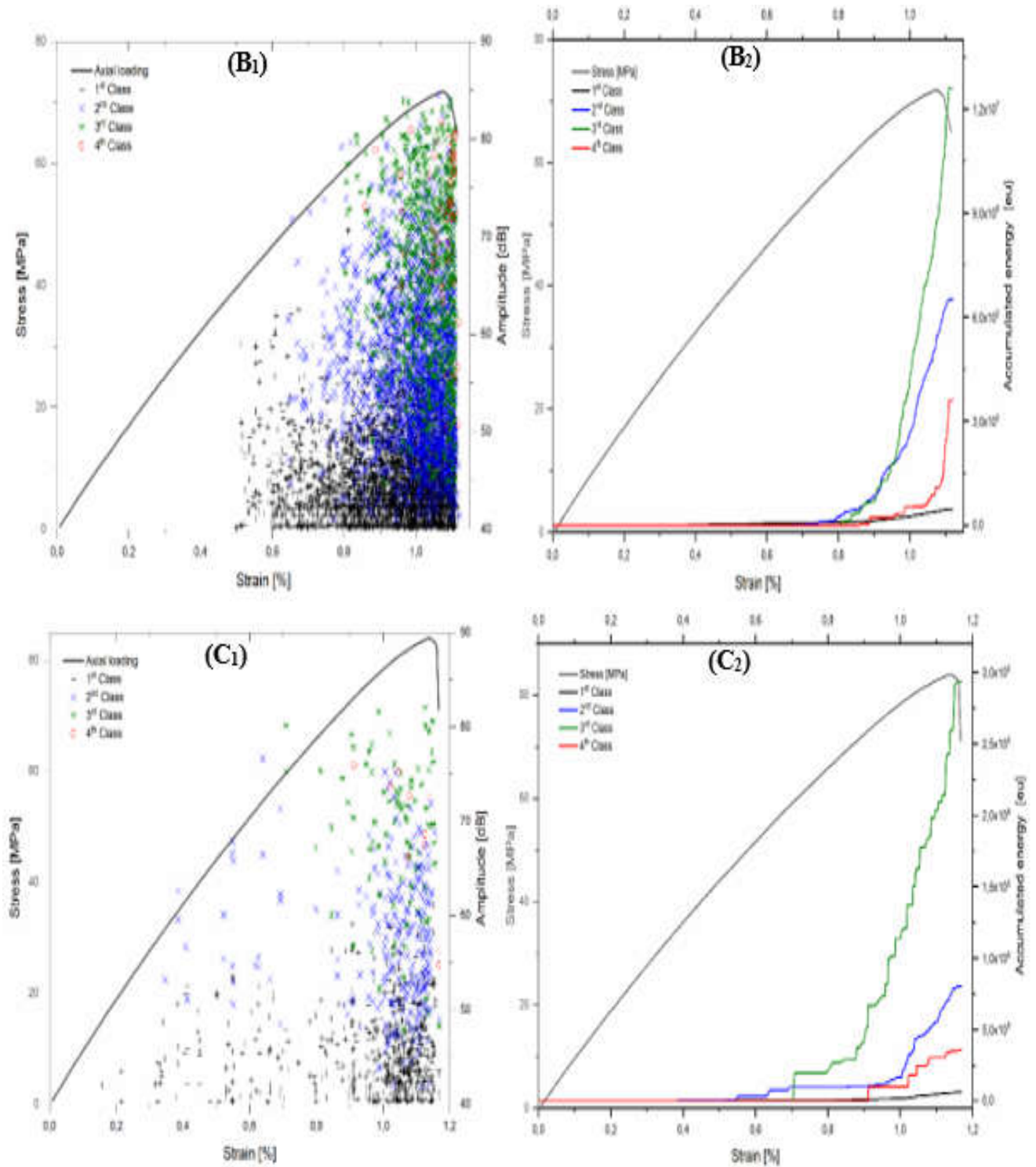


Figure 5. Distribution temporelle et énergie acoustique cumulative de chaque mode d'endommagement pour les essais de traction sur les composites : ((A₁, A₂) : NT, (B₁, B₂) : T2% et (C₁, C₂) : T5%).

Les figures de gauche montrent les résultats de la classification pour les spécimens NT, T2% et T5%. Quatre classes (1, 2, 3 et 4) ont été obtenues et apparaissent simultanément

pendant l'essai. Leurs apparitions coïncident avec le début de la deuxième phase (quasi-élastique) de la courbe contrainte-déformation. La classe (1), qui présente de faibles amplitudes entre 40 et 67 dB, est attribuée à la fissuration de la matrice. Les amplitudes de la classe (2) varient entre 41 et 85 dB, la classe (3) entre 45 et 95 dB, et la classe (4) entre 58 et 98 dB, ce qui correspond respectivement à des arrachements de fibres, délaminage, et ruptures de fibres. D'après les travaux réalisés par [10, 7, 11], la rupture des spécimens s'est produite après l'apparition de la classe 4, où ces événements ont des amplitudes plus élevées que les autres classes.

La Figure 5(B₁ et C₁) montre les résultats obtenus par la classification dans les spécimens T2% et T5%. Pour ces deux types de traitement, le nombre plus faible d'événements acoustiques accumulés, par rapport à NT, reflète un moindre endommagement de la structure dû au traitement alcalin. Dans la Figure 5(C₁), la fissuration de la matrice apparaît plus tôt pendant l'essai de traction et présente des événements acoustiques les plus élevés par rapport aux autres classes. Néanmoins, avec des amplitudes plus faibles, certains signaux de cette classe ont été détectés au début de l'essai dans la première zone élastique de la courbe contrainte-déformation. Les événements d'arrachement des fibres apparaissent immédiatement avec des amplitudes plus élevées. Ensuite, des événements de délaminage ont été détectés avec des valeurs d'amplitude élevées, l'apparition de cette classe coïncide avec la deuxième zone non linéaire de la courbe contrainte-déformation de la Figure 1(A). Des événements de rupture de fibres ont été observés à la fin de l'essai avec des valeurs d'amplitude très élevées. Les événements de cette dernière classe coïncident avec la diminution de la contrainte au cours de l'essai, ce qui a entraîné la rupture totale du spécimen.

Les courbes de droite de la Figure 5(à droite) montrent l'énergie acoustique cumulative pour chaque mode de dommage. Pour le composite NT, la fissuration de la matrice présente des valeurs d'énergie cumulative un peu élevées. Cette observation est également valable pour les énergies cumulées de l'arrachement et de la rupture des fibres, plus proches de 1×10^7 et 1.4×10^7 [eu], respectivement. Cependant, l'énergie du mode de délaminage est beaucoup plus élevée (6×10^7 [eu]). La Figure 5(B₂) montre que l'énergie cumulée de toutes les classes du composite T2% est inférieure à celle des classes du composite NT (Figure 5(A₂)). Nous avons observé que le premier mode d'endommagement, la fissuration de la matrice, a commencé à une valeur de déformation d'environ 0,5 % et qu'il présente de nombreux salves par rapport aux autres modes d'endommagement (Figure 5(A₁)). Néanmoins, en termes d'énergie cumulée, il est le plus faible. Pour le composite T5% (Figure 5(C₂)), l'énergie cumulée de toutes les classes, la fissuration de la matrice, l'arrachement des fibres, le délaminage et la

rupture des fibres (avec des valeurs de 10^5 , $7,8 \times 10^5$, $2,9 \times 10^6$, et $3,5 \times 10^5$ [eu], respectivement) est inférieure à celle du composite T2% et NT. Ce résultat confirme l'effet du traitement alcalin.

2.2.2.3. Contribution de chaque mode de dommage

La contribution de chaque type de dommage est le rapport entre l'énergie acoustique cumulée d'un mode donné et l'énergie cumulée totale du composite [7], comme le montre l'équation (1):

$$DC_i = \frac{E_i}{E_T} = \frac{E_i}{\sum_{i=1}^n E_i} \quad (1)$$

Avec, DC_i : Contribution aux dommages pour le i_e mode, $i= 1$ à n , E_i : Energie cumulée de l'EA pour le i_e mode, $i=1$ à $\sum_{i=1}^n E_i$: Énergie EA cumulée pour tous les modes.

Le diagramme de la Figure 6, montre la contribution de chaque mode d'endommagement (en pourcentage) obtenue à partir des résultats des essais de traction corrélés aux courbes d'énergie acoustique cumulative de chaque mode d'endommagement de la Figure 5(pour les trois essais composites NT, T2% et T5%). La contribution de chaque mode de dommage semble d'être influencée par le traitement alcalin. Selon cette étude, le troisième mode de dommage (délaminage) est le plus important, avec une DC d'environ 70%, 63%, et 70% pour les trois composites (NT, T2%, et T5%), respectivement. Une diminution de délaminage caractérise le composite T2% par rapport aux autres composites. Cette diminution est également accompagnée d'une augmentation significative des deuxièmes et quatrièmes modes. La contribution la plus importante est associée au deuxième mode d'endommagement (arrachement des fibres). Cependant, le mode de fissuration de la matrice est moins important, avec un DC très faible entre 1.43% et 1.81% pour tous les composites. Une diminution du DC est observée avec l'augmentation de la concentration du traitement alcalin de 2% à 5%.

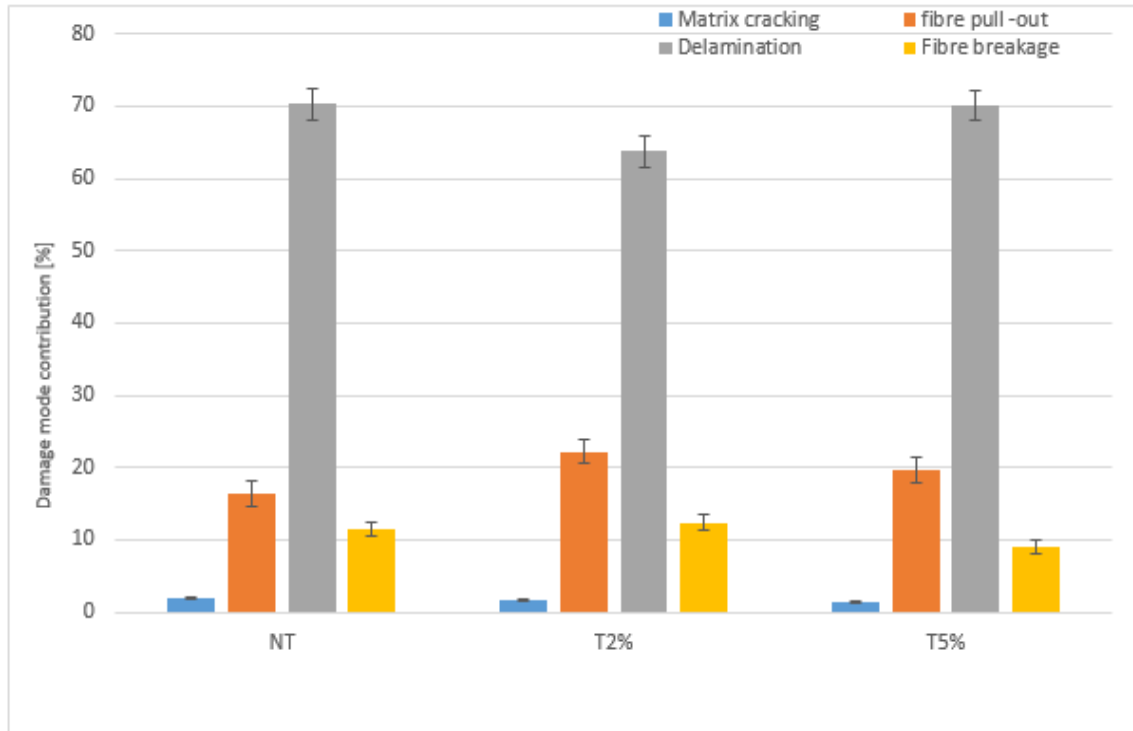


Figure 6. Contribution des modes d'endommagement (DC) en traction.

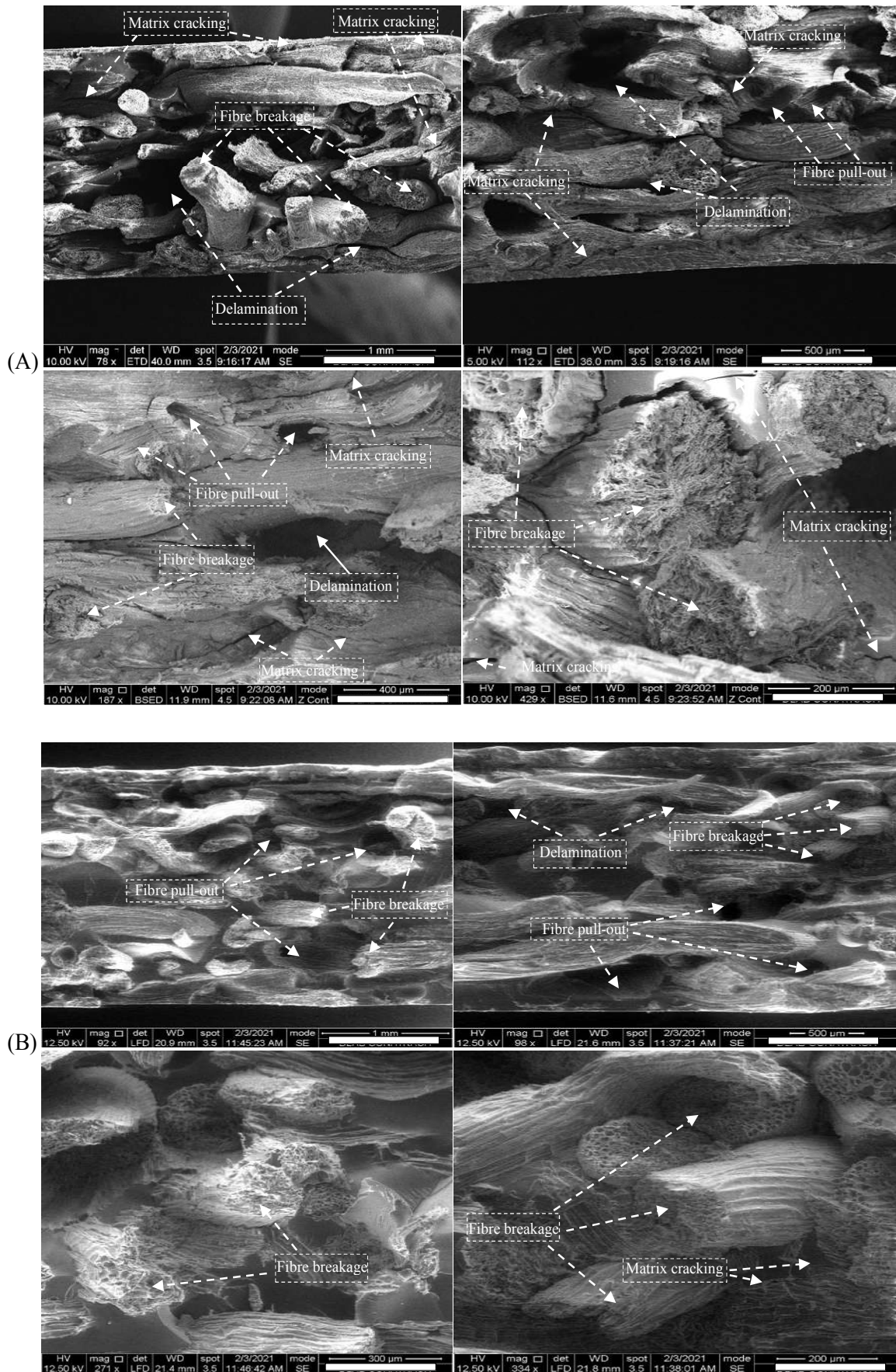
2.2.3. Observation des endommagements par MEB

La [Figure 7\(A, B et C\)](#) montre les images MEB des échantillons en rupture pour les composites NT, T2% et T5% et ont été étudiés pour valider la présence des différents modes de dommages identifiés par les événements acoustiques dans la section précédente ([Figure 5](#)). Les images sont de 200 μm à 1mm.

Pour le composite NT, la [Figure 7\(A\)](#) montre la présence visible des modes de dommages (fissuration de la matrice, arrachement des fibres, délaminage et rupture des fibres). Les fibres sont facilement arrachées de la matrice, ce qui indique une faible adhérence entre la surface des fibres non traitées et la matrice, ce qui est dû à la morphologie hydrophile des fibres non traitées et à la matrice hydrophobe. La fissuration de la matrice est dominante, ce qui nous permet de connaître la raison du nombre élevé des salves par rapport aux autres modes d'endommagement de la [Figure 5\(A₁\)](#). Cependant, un délaminage a été observé, où les empilements (couches) ont été arrachés, laissant un vide profond dans la surface de fracture. Cela nous permet également de déterminer la raison de l'augmentation de l'énergie acoustique cumulative due au délaminage ([Figure 5\(A₂\)](#)).

Pour le composite T2% (Figure 7(B)), les quatre types de dommages ont été identifiés. Nous avons observé l'augmentation du mode de rupture des fibres mais les autres modes ont été réduits, ou la charge appliquée lors de l'essai de traction a été transmise directement à la fibre, ce qui nous permet de trouver des meilleures propriétés mécaniques (module de Young). L'arrachement des fibres est plus apparent que le délaminage. Ceci confirme les résultats obtenus à partir de la contribution de chaque mode de dommage (DC), qui sont caractérisés par une diminution de délaminage, cependant, cette diminution est également accompagnée d'une augmentation significative du second mode (arrachement des fibres) (Figure 6). La fissuration de la matrice a été clairement observée sur le faciès de rupture.

Enfin, pour le composite T5% (Figure 7(C)), le second mode d'endommagement (arrachement des fibres) est également prédominant, unmoins de fissuration de la matrice et de délaminage ont été observées. Les mêmes mécanismes ont été détectés, mais ils ne sont pas beaucoup apparus sur les images, ce qui indique que l'échantillon a subi moins de dommages, comme le montrent les résultats de l'émission acoustique (Figure 4(C) et Figure 5(C₁, C₂)), et c'est encore une autre raison pour laquelle la fibre et la matrice adhèrent mieux que le composite T2%.



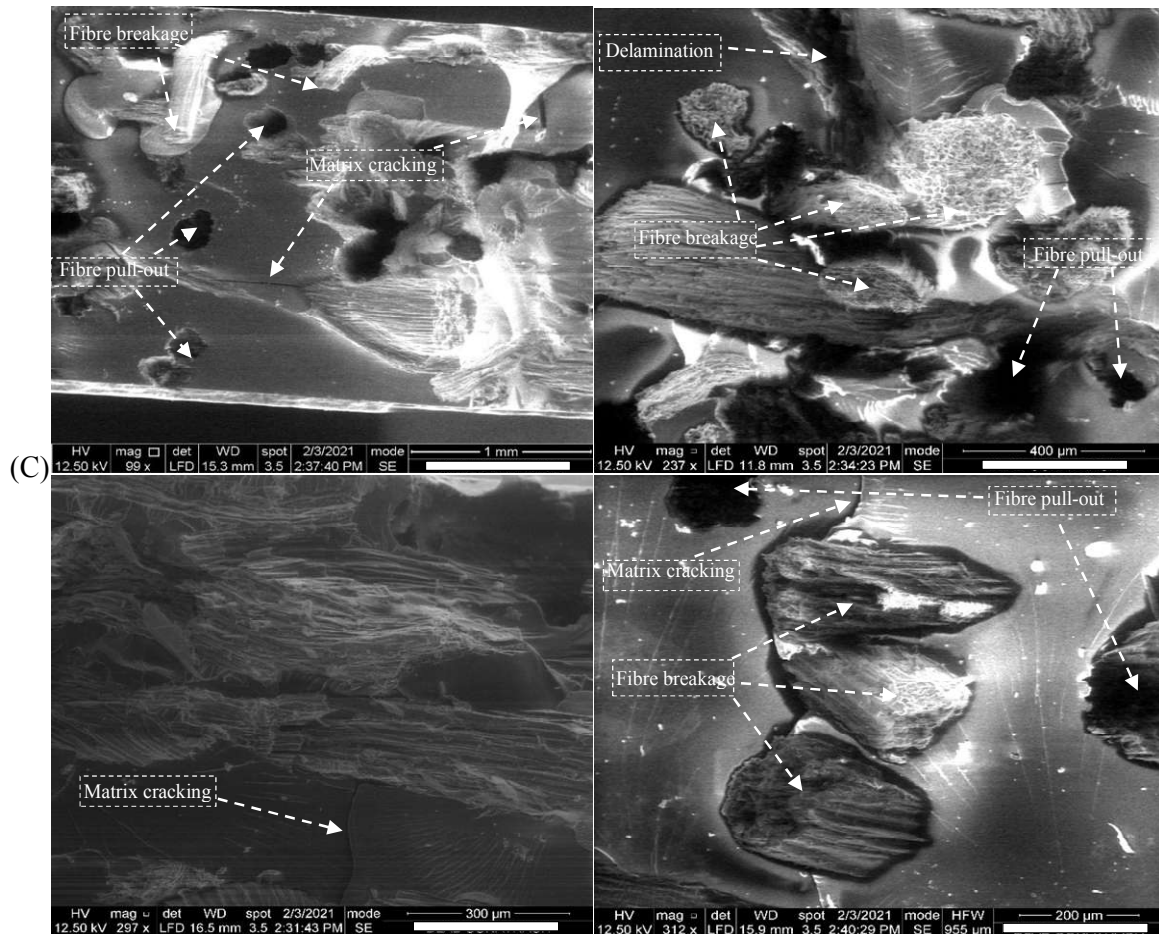
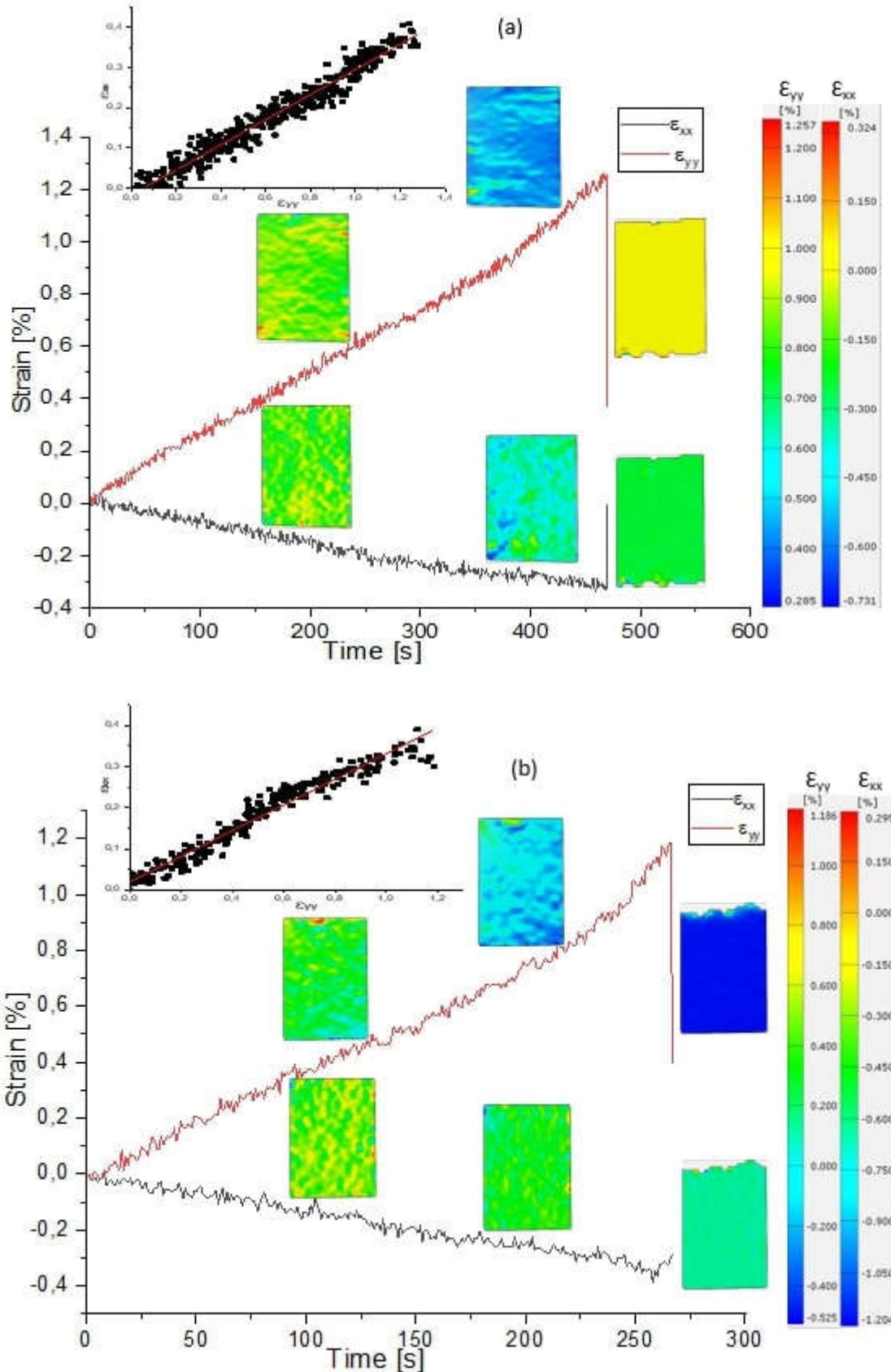


Figure 7. Images du MEB des surfaces de rupture des composites (A) NT, (B) T2%, et (C) T5%.

2.4. Evaluation des déformations et déplacements par CIN

Les images ont été prises par une caméra CCD tout au long de l'essai de traction jusqu'à la rupture totale de l'éprouvette ont été sélectionnées à chaque instant (t), pour voir l'évolution de la déformation longitudinale et transversale en fonction du temps d'essai. La Figure 8(a), (b) et (c) montre les champs des déformations longitudinales et transversales au cours du temps pendant l'essai sur des spécimens NT, T2% et T5%, respectivement. La zone observée est située sur le côté moucheté de l'éprouvette. A partir des images des champs de déformation enregistrées depuis le début de l'essai de traction jusqu'à la rupture de l'éprouvette, des courbes de déformation longitudinale et transversale ont été tracées en fonction du temps d'essai, comme le montre la Figure 8. Les déformations longitudinales (1.257, 1.186 et 1.160 %) pour les composites NT, T2% et T5%, respectivement, étaient positives pendant les essais et sont presque identiques à celles données par l'extensomètre. En revanche, la déformation transversale reflétait le rétrécissement de la section rectangulaire d'un spécimen pendant un essai de traction. Ceci explique ses valeurs négatives. Nous avons observé que le

développement de la déformation en fonction du temps d'essai est linéaire pour les NT, T2%, et T5%.



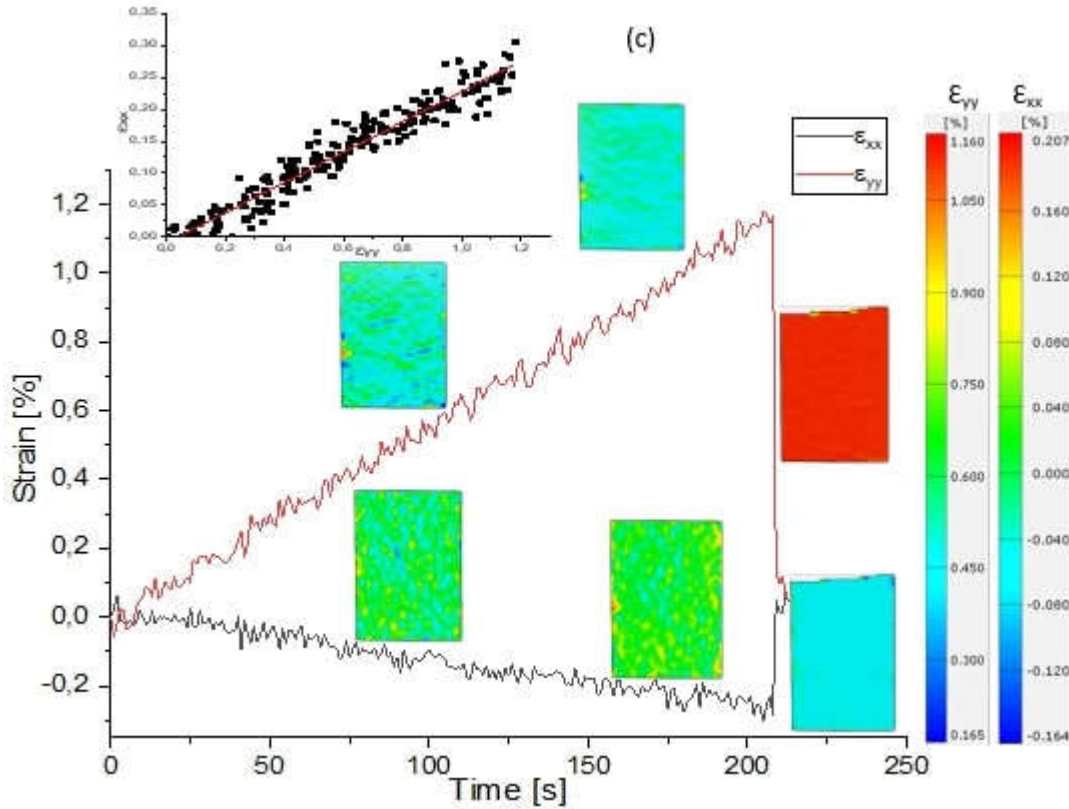


Figure 8. Courbes de déformation en fonction du temps et images CIN prises pendant l'essai de traction dans le plan XY, (a) NT, (b) T2%, et (c) T5% composites.

Pour évaluer le coefficient de Poisson du matériau composite, deux étapes sont réalisées : la détermination de l'évolution de la valeur absolue de la déformation transversale en fonction de la déformation longitudinale et le calcul de la pente de la partie linéaire de cette évolution (petites courbes ($\square_{xx}-\square_{yy}$) sur la [Figure 8](#)). Cette procédure nous a permis de trouver un coefficient de Poisson moyen égal à 0,3120, 0,3113 et 0,2378, pour les composites NT. T2% et T5%, respectivement. Nous avons remarqué que le renforcement avec des fibres traitées avec 5% de NaOH conduit à la diminution du coefficient de Poisson par rapport aux composites renforcés avec des fibres non traitées et traitées avec 2% de NaOH.

3. Comportement en flexion

La [Figure 9](#) montre les trois courbes de l'évolution de la contrainte-déformation des composites luffa/époxy traités en 2%, 5% et non traités testés en flexion. Les courbes montrent une fois de plus la faible dispersion, surtout dans la première phase. Ceci montre que le processus de fabrication des composites par le procédé de moulage par transfert de résine est bien efficace. Le comportement mécanique des composites est linéaire au début du chargement, puis non linéaire à partir d'une déformation donnée, caractérisé par une grande

diminution de la pente de la courbe de composite (NT) par rapport aux composites (T2%) et (T5%) jusqu'à atteindre une valeur moyenne de résistance à la traction, puis allant jusqu'à la rupture brutale de l'éprouvette.

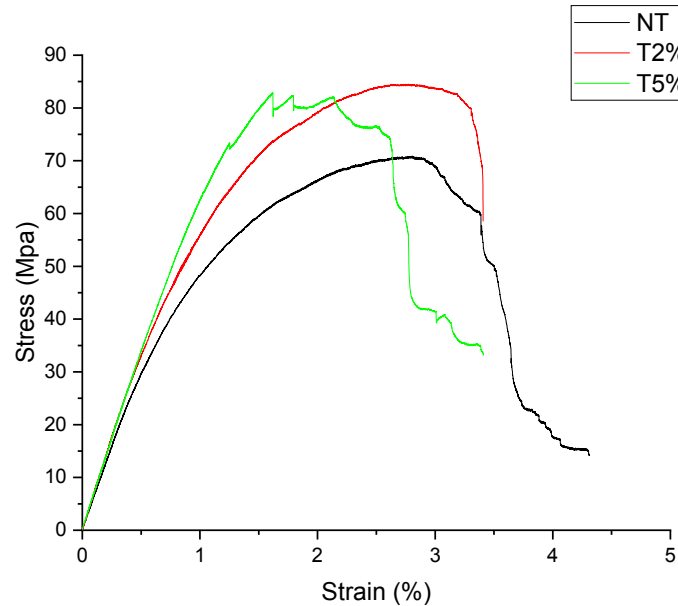


Figure 9. Courbes contraintes –déformation en flexion

Le [Tableau 4](#) ressemble les valeurs moyennes avec écart type de la contrainte maximale en flexion, du module de Young et du taux de déformation pour les trois types des composites NT, T2%, et T5%.

Tableau 4. Propriétés mécaniques des essais de flexion des composites en fibres de luffa traitées et non traitées dans cette étude.

Composites (GPa)	Module d'Young (MPa)	Contrainte à la rupture (%)	Déformation (%)	V_f Traitement chimique (%)	Nature des fibres	
Luffa/Epoxy	$6,79 \pm 0,3$	$67,57 \pm 4,29$	$4,29 \pm 0,44$	30%	NaOH (0%) 0h	Mat
Luffa/Epoxy	$7,45 \pm 0,66$	$84,31 \pm 6,64$	$3,4 \pm 0,65$	30%	NaOH (2%) 1h	Mat
Luffa/Epoxy	$7,12 \pm 0,36$	$82,46 \pm 5,14$	$3,38 \pm 0,6$	30%	NaOH (5%) 1h	Mat

Nous avons remarqué que les valeurs du module d'Young des composites traités en 2% et 5% sont un peu légèrement améliorées de $7,45 \pm 0,66$ et $7,12 \pm 0,36$ GPa, respectivement ([Figure 10\(a\)](#)), c'est la même remarque pour la contrainte, une amélioration importante pour le composite T2% ($84,31 \pm 6,64$ MPa) et T5% ($82,46 \pm 5,14$ MPa) (voir [Figure 10\(b\)](#)). Cependant,

on enregistre une baisse valeur sur le taux de la déformation à la rupture des compositestraités par rapport au composite non traités (NT) (Figure 10(c)).

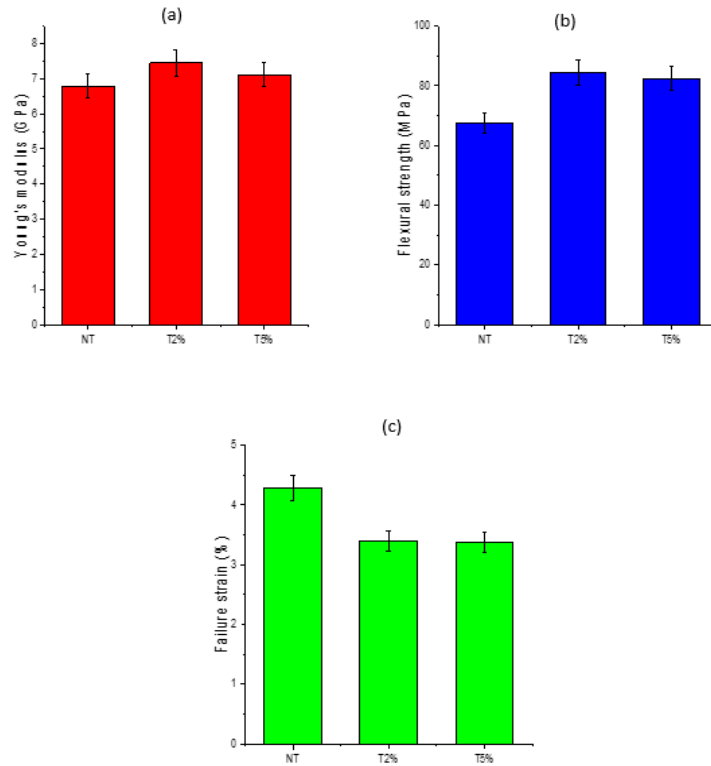


Figure 10. Impact du traitement chimique : (a) Module d'Young, (b) Contrainte, et (c) Déformation à la rupture.

3.1. Processus d'endommagement des éprouvettes de flexion

Dans de nombreuses situations notamment lors d'un essai de flexion, la fissuration matricielle et le délaminage sont des phénomènes fortement couplés. La Figure 11 montre les faciès de rupture obtenus des éprouvettes du composite testées en flexion. L'analyse de cette figure montre que les stratifié endommagé sous sollicitation de flexion présente une rupture un peu fragile où la face supérieure subi une traction et l'inférieur subi de compression.



Figure 11. Faciès de rupture des composites en flexion.

4. Méthode RTM, la disposition de mat et comparaison

Dans notre étude, le traitement alcalin a permis d'améliorer les propriétés mécaniques en traction et flexion des composites traités. L'effet de la disposition des mats et le processus de moulage par transfert de résine (RTM) jouent un rôle important sur les propriétés mécaniques de composite non traite ou ce dernier a montré aussi des bonnes propriétés en traction et flexion par rapport aux d'autres composites luffa/époxy trouvés dans la littérature. Les principales propriétés mécaniques en traction et en flexion de notre matériau composite luffa/époxy (non traité) obtenues sont regroupées avec les propriétés mécaniques d'autres composites renforcés de luffa dans le [Tableau5](#).

Tableau 5. Propriétés mécaniques des composites renforcés de fibres de luffa.

Composites (%) des fibresde fabrication	V _f or P _f	Nature	Technique	Module Tr (MPa)	Résistance à la Tr (GPa)	Module FI (MPa)	Résistance à la FI Ref	
Luffa/Epoxy work	30%	Mat	RTM	6.69 ± 0.20	67.08 ± 1.36	67.79 ± 0.3	67.57 ± 4.29	Present
Luffa/Epoxy	20%	Short	Moulage par compression	1.8	6.472	-	63.37	[13]
Luffa/Epoxy	30%	Mat	Moulage par compression	4.26	178.20	-	-	[14]
Luffa/Epoxy	13%	Mat	Moulage à main	0.8	17.5	2.1	33	[03]
Luffa/Epoxy	4%	Longue	Thermocompression	0.0112	13.5	180	-	[15]
Luffa/Epoxy	40%	Mat	Moulage à main	-	20	-	65	[04]
Luffa/Epoxy	30%	Mat	Moulage à main	-	24	-	59	[16]
Luffa/Epoxy	10%	Courte	Moulage à main	0.023	12.40	-	-	[17]
Luffa/Epoxy	15%	Mat	Moulage à main	0.0763	17.62	0.0722	41.36	[18]
Luffa/Epoxy	13%	Mat	Moulage à main	-	16.76	-	24.82	[19]
Luffa/Epoxy	20%	Particule	Moulage à main	-	50	-	45	[20]
Luffa/Epoxy	30%	Mat	Moulage à main	-	17	-	70	[21]
Luffa/Epoxy	40%	Mat	Moulage à main	-	20	-	59	[21]
Luffa/Epoxy	10%	Mat	Moulage à main	-	30	-	40	[22]
Luffa/Polyester	42%	Mat	Thermocompression	3.2	14	-	-	[23]
Luffa/Polyester	30%	Mat	Moulage à main	-	19	-	-	[24]
Luffa/Polyester	50%	Mat	Moulage par compression	3.005	30.02	1.45	31.59	[25]
Luffa/Polyester	20%	Mat	RTM	2.82 ± 0,4	7.96 ± 0,21	0.66 ± 0,11	43.75 ± 0,23	[26]
Luffa/Polyester	5%	Mat	Moulage à main	-	22.3	-	36	[27]
Luffa/Polyester	10%	Mat	Moulage à main	-	20.33	-	42	[27]
Luffa/polyester	28%	Mat	Moulage à main	2.86	49.7	2.30	81.1	[28]
Luffa/PHB	5%	Courte	Moulage par solvant	0.34	3.6	-	-	[29]
Luffa/PP/MMT	50%	Courte	Moulage par injection	1.594	8.029	2.742	17.68	[30]
Luffa/PP/MMT	55%	Courte	Moulage par injection	1.493	7.089	2.635	19.4	[30]
Luffa/PP	20%	Courte	Moulage par injection	-	24	-	10	[31]
Luffa/HDPE	30%	Particule	Moulage par injection	1.68 ± 0.158	21.2 ± 0.4	-	37.7 ± 0.5	[32]
Luffa/HDPE	40%	Particule	Moulage par injection	2.08 ± 0.237	20.8 ± 0.3	-	35.8 ± 0.3	[32]
Luffa/LDPE	25%	Particule	Thermocompression	0.165	13.10	-	-	[33]

La Figure 12 montre les différentes procédures de préparation et les composites employés dans la fabrication de composites renforcés de fibres de luffa. Pour la production de composites de luffa, la résine époxy est le polymère le plus largement utilisé. Dans plus de 53% des recherches, les polymères époxy ont été employés comme matrice polymère. Cela s'explique par le fait que les polymères époxy possèdent d'excellentes caractéristiques mécaniques, une forte adhésion fibre-matrice et une grande résistance thermique et chimique [34]. La deuxième résine utilisée après l'époxy est la résine polyester, elle représente environ 16%. Il y en a d'autres moins utilisées que nous avons trouvées, par exemple, le polypropylène tandis que d'autres polymères, notamment et le polyéthylène.

Les méthodes les plus courantes utilisées pour la fabrication de composites renforcés de luffa sont décrites ci-dessous. Nous avons trouvé en premier lieu les méthodes conventionnelles appelées "hand lay-up" (moulage à main). Cette méthode a été largement explorée pour fabriquer les matériaux composites en raison de sa flexibilité, de sa rentabilité et de sa simplicité [35]. Selon Adeyanju et al, le mélange manuel et la stratification manuelle sont considérés comme les méthodes les plus populaires. La deuxième méthode la plus utilisée est le moulage par compression (voir la Figure 12), un procédé de moulage qui est davantage recommandé pour les polymères thermoplastiques. Il est très avantageux dans la mesure où il est relativement peu coûteux, a un temps de cycle court, est adapté à la production de gros volumes, et offre une grande précision dimensionnelle et une densité uniforme [36]. D'autre part, le moulage par compression à froid a été utilisé à température ambiante, beaucoup d'études de recherche ont utilisé cette méthode, c'est une technique générale utilisée pour fabriquer des produits thermodurcissables. Bien que ce procédé soit très avantageux pour la production à grande échelle et pour les matériaux complexes avec un faible investissement en équipement, il demande beaucoup de travail, génère beaucoup de déchets, prend beaucoup de temps pour durcir et peut avoir des défauts d'uniformité dans le produit [36]. Il existe également des recherches qui ont utilisé le moulage par injection [30, 31, 32]. D'après nos recherches dans la littérature, nous n'avons trouvé qu'un seul article publié en 2021 [26] qui utilise la méthode de moulage par transfert de résine (RTM) pour la fabrication des composites en fibre de luffa, ce qui nous a permis de comparer davantage nos résultats. Les techniques de fabrication des composites de luffa les plus couramment utilisés sont résumées dans le Tableau 5.

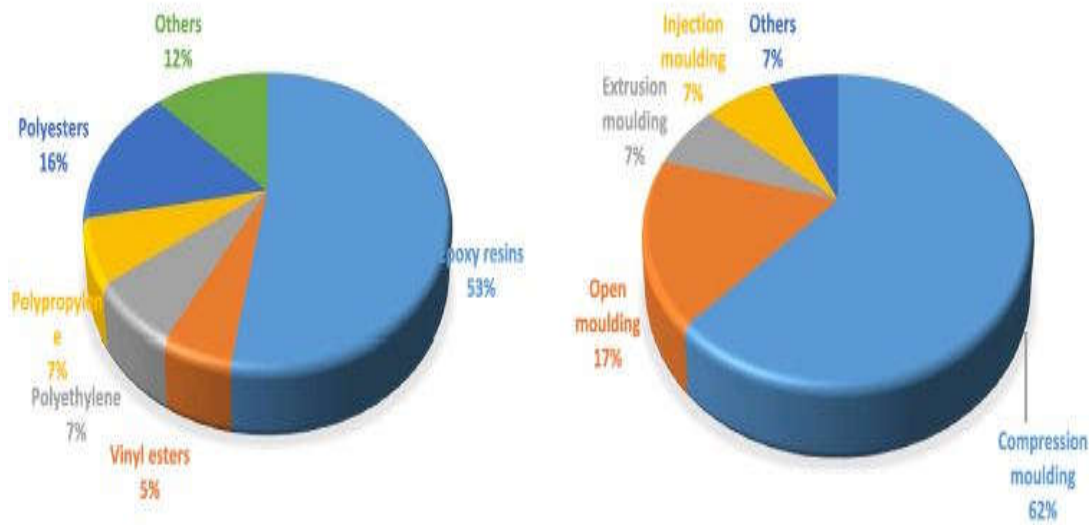


Figure 12. Polymère et procédés utilisés pour la préparation de composites renforcés de fibres de luffa [35].

Afin de comparer nos résultats, le [Tableau 5](#) montre le module d'Young et la résistance à la traction et à la flexion de divers composites à base de fibres de luffa, tirés de la littérature. La résistance à la traction et le module de Young des composites renforcés de fibres de luffa varient entre 3,6 et 178,20 MPa et 0,0112 et 4,26 GPa, respectivement. Les valeurs de résistance à la flexion les plus élevées ont été observées lorsque les composites époxy sont renforcés par les fibres de luffa. La rigidité des matériaux composites (module de Young) était plus élevée dans les matériaux en polyester par rapport aux autres matériaux composites. Le module de Young en flexion du composite a atteint la valeur la plus élevée de 2.742GPa [30]. Pour nos composites mat luffa-époxy, nous avons observé des meilleures propriétés mécaniques par rapport aux composites d'une matrice différente et renforcés en fibres de luffa sous forme de mat, longue, courte et particule. Ceci est mis en évidence par l'effet bénéfique du mode de préparation et du type de superposition des renforts en mat de luffa, et du procédé de fabrication RTM sur l'amélioration des propriétés mécaniques en traction et en flexion.

5. Comportement en impact à basse vitesse (IBV)

Afin de caractériser le comportement d'impact de notre matériau composite, il est essentiel de déterminer les quatre courbes dont : force-temps, déplacement-temps, force-déplacement et énergie-temps, afin que nous puissions identifier plus de paramètres tels que la charge d'impact, la vitesse d'impact, l'énergie d'impact (E_i) et l'énergie absorbée (E_a) qu'ont été évalués par le système d'acquisition des données.

Les Figures 13(a), (b), (c), et (d) montrent les résultats en termes de courbes $F(t)$, $F(d)$, $D(t)$, et $E(t)$ qui sont fournis par l'essai d'impact de stratifié composite (A), respectivement, effectué en utilisant une énergie d'impact relativement moyen $E_i = 10J$, qui ne provoque qu'un dommage partiel du stratifié. En détail, à partir de la courbe force-temps $F(t)$ (voir Figure 13(b)), il est possible d'identifier trois paramètres caractéristiques tels que : (1) la force d'initiation des premiers endommagement (F_{end}), qui correspond au point de la courbe où se produit la première réduction brutale de la charge avec redémarrage par la suite, (2) la force d'impact maximale (F_{max}) et (3) la force de la réduction de la charge (F_r), qui correspond au point à partir duquel la courbe devient décroissante de manière monotone[37-39]. En cas de dommage partiel des spécimens examinés (absence de perforation complète), comme c'est le cas dans la Figure13(a), ce dernier point correspond en pratique au point de départ du retour élastique.

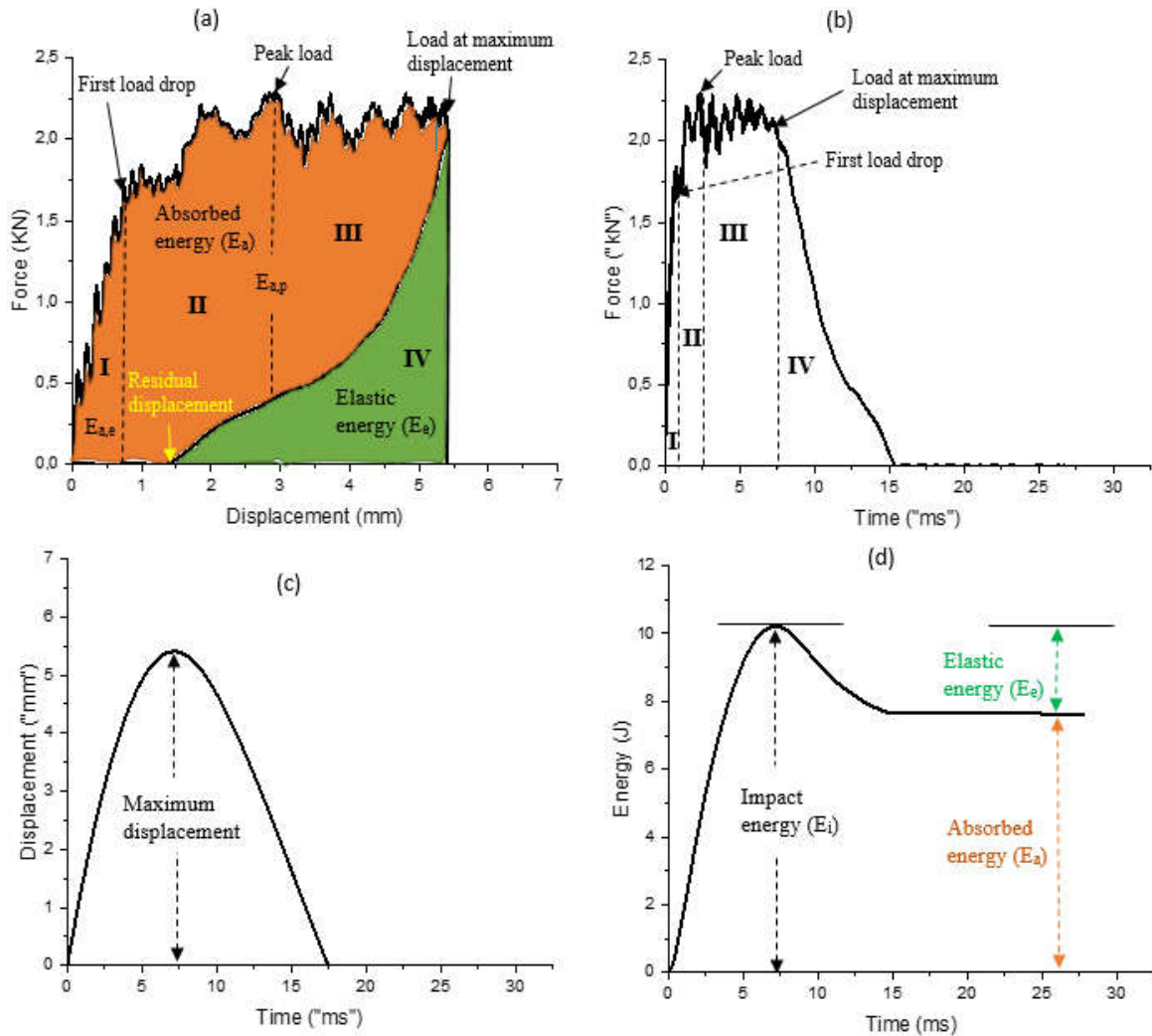


Figure 13. (a) Courbe charge-déplacement, (b) Courbe typique charge-temps, (c) Courbe déplacement-temps, et (d) Courbe énergie-temps relative au composite (A) avec $E_i = 10 J$.

Par conséquent, dans le diagramme de la courbe $F(t)$, il est possible d'identifier quatre différentes zones : la zone (I) comprise entre l'origine et la première force d'impact (F_{end}), correspondant au comportement élastique du matériau, la zone (II) comprise entre (F_{end}) et (F_{max}), correspondant à l'endommagement élasto-plastique progressif jusqu'à ce que la force maximale soit atteinte, la zone (III) comprise entre (F_{max}) et (F_r), correspondant à l'endommagement élasto-plastique successif après que (F_{max}) soit atteint, et la zone (IV) au-delà de (F_r), qui correspond au retour élastique du spécimen[37].

Tout d'abord, il faut noter que dans le cas examiné d'endommagement partiel, le diagramme a une forme fermée, et l'intégrale fermée représente l'énergie totale absorbée (E_a) par le spécimen, c'est-à-dire l'énergie dissipée par les mécanismes d'endommagement, comme il est indiqué dans la Figure 13(a)(la zone en couleur marron), aussi bien présenté dans la courbe énergie -temps dans la Figure 13(d). En particulier, l'aire correspondant à la zone (I) représente l'énergie absorbée ($E_{a,e}$) par l'échantillon dans la phase élastique, l'aire correspondant aux zones (II) + (III) représente l'énergie dissipée ($E_{a,p}$) par les processus d'endommagement élasto-plastique, tandis que l'aire correspondant à la zone (IV) représente l'énergie associée au retour élastique ($E_{e,r}$) de l'échantillon (voir la zone verte dans la Figure 13(a)). En cas d'endommagement complet de l'éprouvette (l'impacteur perce toute l'éprouvette), les tendances des diagrammes de $F(t)$ et $F(d)$ diffèrent de celles montrées ci-dessus dans les Figures 13(a)et(b); dans ce cas, le retour élastique est devenu négligeable ou nul et (F_{max})coïncide en pratique avec (F_r)[37,38].L'énergie absorbée par l'éprouvette en fonction du temps a été déterminée en calculant l'aire sous la courbe force-déplacement. Cette valeur de l'énergie absorbée se réfère à la quantité totale d'énergie dissipée par l'éprouvette à travers la formation de dommages dans le composite. La courbe d'absorption d'énergie totale en fonction du temps pour l'essai d'énergie d'impact de 10J pour le composite (A) est donnée dans la Figure 13(d).

5.1. Réponse Forcé-temps

L'historique typique force-temps des essais d'impact de 5, 15, et 20J est présenté respectivement sur les Figures14(a), (b), et (c). Dans la zone élastique, la force d'impact augmente linéairement jusqu'à ce qu'elle atteigne une force d'initiation d'endommagement F_{end} à laquelle un changement de rigidité se produit en raison de l'initiation des dommages. La valeur de F_{end} est donc considérée comme un indicateur de la capacité du stratifié à résister à l'initiation de dommages. Les valeurs de F_{end} pour les composites étudiés sont données dans le Tableau 6.Il a été constaté que la force d'impact (F_{end}) augmente avec l'augmentation de

l'énergie d'impact, la force d'impact pour les stratifiés (A), (B), et (D) à l'énergie d'impact de 5 J était inférieure par rapport au composite (C) en raison de l'affaiblissement de la structure par l'orientation aléatoire des fibres et la séquence d'empilements.

Tableau 6.Propriétés d'impact à faible vitesse.

Composites	Energie (J)			Force		Force	Déplacement	Rapport d'absorption d'énergie		CoR
maxi(KN)	end (KN)	maxi (mm)	(E _A /E _T) in (%)							
Impact	Totale	Elastique	Absorbé							
5	5.24	1.77	3.47		1.91	1.42	3.84		66.22	0.58
A	15	15.40	1.15	14.25	2.43	1.65	8.37		92.53	0.27
	20	21.13	0	21.13	2.48	1.82	17.41		100	0
B	5	5.28	1.7	3.58	1.67	1.32	4.18		67.80	0.56
	15	15.55	1.1	14.45	1.78	1.23	10.37		92.92	0.26
	20	20.54	0	20.54	2.27	1.64	27.54		100	0
C	5	5.19	1.62	3.57	2.15	1.94	3.19		68.78	0.55
	15	15.42	1.74	13.68	2.42	1.57	8.15		88.71	0.33
	20	20.25	0.28	19.97	2.73	1.82	10.20		98.61	0.11
D	5	5.19	1.79	3.40	1.55	0.98	4.67		65.61	0.58
	15	15.50	0.73	14.77	1.82	1.33	10.88		95.29	0.21
	20	21.14	0	21.14	2.02	1.71	18.37		100	0

Au-delà de F_{end} , le comportement de la force d'impact peut être attribué au développement des dommages dans le stratifié. On peut voir sur la [Figure 14](#) qu'il y a une différence apparente entre la réponse de la force des stratifiés (A), (B), (C), et (D), où une augmentation de la force juste après F_{end} suivie d'une courte période de perturbation de la force a été observée. Comme il est couramment rapporté dans la littérature [37-39], la première chute de la charge correspond principalement à l'apparition des dommages initiaux sous forme de fissuration de la matrice et de délamination, tandis que la deuxième chute de la charge, à ou près de la charge maximale, est associée à une fissuration étendue de la matrice, à la rupture des fibres, et au délaminage. Le premier point d'endommagement de tous les composites a montré une sensibilité à la vitesse de déformation. La nature de l'empilement des couches (composite (C)) a réussi à augmenter cette charge par rapport aux d'autres composites. Les valeurs de la force d'impact maximale (F_{max}) des stratifiés (C) sont plus élevées que celles des autres stratifiés (voir [Figure 14](#) et le [Tableau 6](#)), ce qui suggère que la séquence d'empilement des couches offre la plus grande résistance à la charge contre la propagation des dommages dus aux impacts à basse vitesse. D'après la [Figure 14\(b\)](#), la courbe de composite (A) est similaire avec le composite (C) et de même pour les composite (B) et (D).

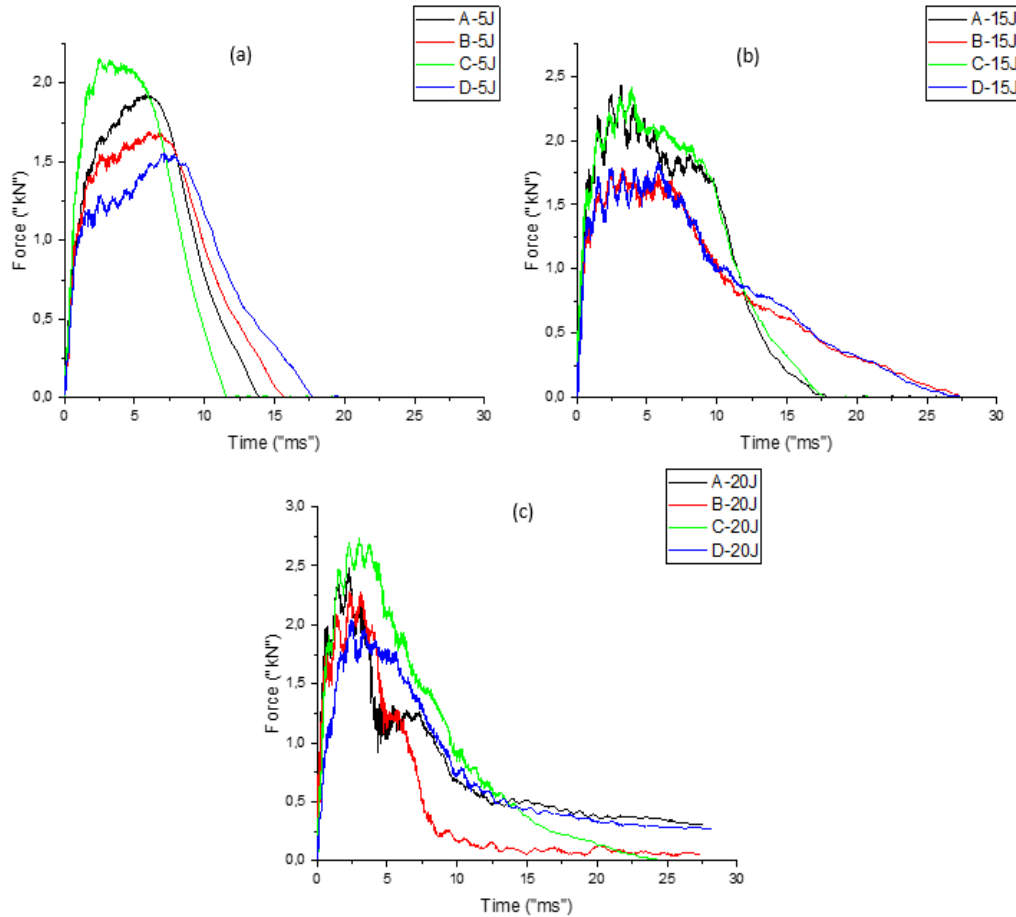


Figure 14. Comparaison des courbes Force - temps pour un impact de (a) 5 J, (b) 15J, et (c) 20 J.

Sur les courbes, nous pouvons voir que le temps augmente avec l'augmentation de la force d'impact. La forme des courbes montre que la fracture du spécimen s'est produite. Les forces d'impact des courbes ont augmenté jusqu'à une valeur maximale et ont diminué jusqu'à une force nulle, indiquant qu'une rupture des composites s'est produite. Comme l'énergie d'impact a augmenté, la force maximale obtenue a également augmenté. Tous les spécimens ont un temps de contact plus long à d'énergie d'impact supérieur que les niveaux d'énergie d'impact inférieurs. Les spécimens (D) avaient un temps de contact plus long que les autres spécimens, qui atteignait presque 27 ms pour une énergie d'impact de 15J (Figure 14(b)). Un temps de contact plus long indique que l'énergie plus élevée peut-être absorbée par les spécimens et que la zone endommagée peut devenir plus grande [40]. Le spécimen (C) à l'énergie d'impact de 5 et 20J avait la force maximale la plus élevée parmi les autres spécimens. La force maximale la plus faible a été obtenue par les spécimens (D) dont la force maximale n'a atteint que 1.55 et 2.02 KN pour une énergie d'impact de 5 et 20J, respectivement (Figure 14(a) et (c)).

5.2. Réponse Déplacement - temps

Le déplacement de la pointe de l'impacteur en fonction du temps, est illustré à la [Figure 15](#). Notez que l'historique du déplacement a été obtenu à partir des données de la force de contact mesurées, de la masse de l'impacteur, et de la vitesse d'impact initiale pour chaque essai. Sous la faible énergie d'impact de 5J, le déplacement augmente presque linéairement au début, puis il ralentit progressivement avant d'atteindre le maximum pour tous les composites. Après le pic, le déplacement commence à diminuer, indiquant le rebond de l'impacteur dû à la résilience élastique des composites ([Figure 15\(a\)](#)) [41].

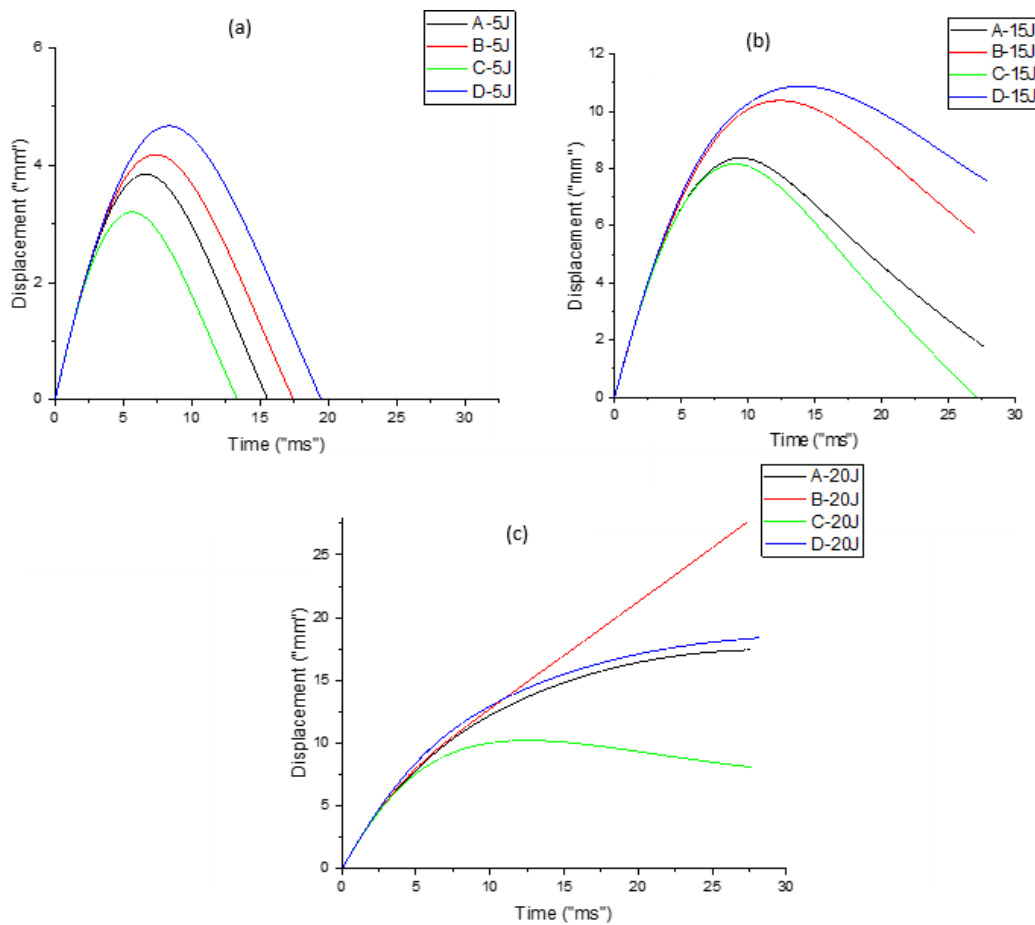


Figure 15. Comparaison des courbes de déplacement en fonction du temps pour un impact de (a) 5 J, (b) 15 J et (c) 20 J.

Les courbes déplacement-temps dans les essais d'impact sans perforation illustrés à la [Figure15\(b\)](#), les composites présentent des courbes d'historique de déplacement similaires, mais avec des déplacements maximums plus importants sous un impact de 15J, le déplacement maximal est presque élevé pour le stratifié (D) (10.88 mm) sous charge d'impact

15J par rapport aux composites (A), (B), et (C) (8.37,10.37, et 8.15mm, respectivement). Ceci malgré les observations de la rigidité en flexion dans la région élastique (zone (I)) qui est presque identique pour tous les spécimens. Cela pourrait être associé à la taille plus importante des dommages observés dans les stratifiés (D). Il s'avère que l'impacteur rebondit, même la rupture des fibres se produit sous ce niveau d'énergie d'impact. Cependant, lorsque les composites (A), (B), et (D) sont soumis à une énergie d'impact de 20J, le déplacement augmente presque linéairement jusqu'au maximum sans aucun retour en arrière, ce qui signifie que l'impacteur a perforé les échantillons (voir [Figure 15\(c\)](#)). Un déplacement plus élevé (27.54 mm) a été remarqué pour le composite (B). Concernant le déplacement de composite (C) commence à diminuer (avec un déplacement maxi de 10.20 mm) indiquant le rebond de l'impacteur, ce qui signifie que l'impacteur n'a pas perforé le l'échantillon.

5.3. Réponse Force-déplacement

La réponse force-déplacement est considérée comme une signature importante de la réponse d'un matériau à une charge d'impact. Les courbes force-déplacement de l'impacteur pour les trois énergies d'impact 5,15, et 20J sont illustrées aux [Figures 16\(a\), \(b\), et \(c\)](#), respectivement. La courbe force-déplacement peut généralement être divisée en quatre zones I, II, III, et IV comme le montre déjà dans la [Figure 13](#) pour tous les composites d'énergie d'impact. La zone I implique la réponse élastique du spécimen jusqu'à ce que la force atteigne le seuil d'initiation des dommages. Dans la zone II, l'endommagement est initié et se développe dans la zone III, alors que l'impacteur continue de se déplacer dans la plaque jusqu'à ce qu'il soit complètement arrêté (point de retournement). Les perturbations de la force dans cette zone sont associées à la formation de dommages aux fibres et à la matrice dans les plis, c'est-à-dire à la propagation des dommages. En général, une zone II+III plus grande indique un développement plus important des dommages à l'intérieur du stratifié, et par conséquent, une zone de dommages plus grande. Enfin, la zone IV (dans le cas d'un impact sans perforation, exemple de la [Figure 16\(a\)et\(b\)](#)) indique la partie de l'essai où la force est déchargée alors que l'impacteur est renvoyé par l'énergie élastique stockée dans la plaque jusqu'à ce qu'elle rebondisse complètement. La déflexion correspondante à la fin de la zone IV indique la dépression résiduelle et permanente de la plaque.

Les courbes de la [Figure 16\(a\)](#) montrent clairement que tous les spécimens testés présentaient des courbes fermées. Cela indique qu'aucun des spécimens n'a été pénétré à 5 J d'énergie d'impact. Cela signifie que ces types de composites peuvent résister à un impact plus de 5 J.

La chose différente dans les courbes qu'a été remarquée c'est l'inclinaison de la pente droite dans le domaine élastique des composites (A), (B), et (D) par rapport au composite (C), ce qui signifie que ce dernier est plus rigide.

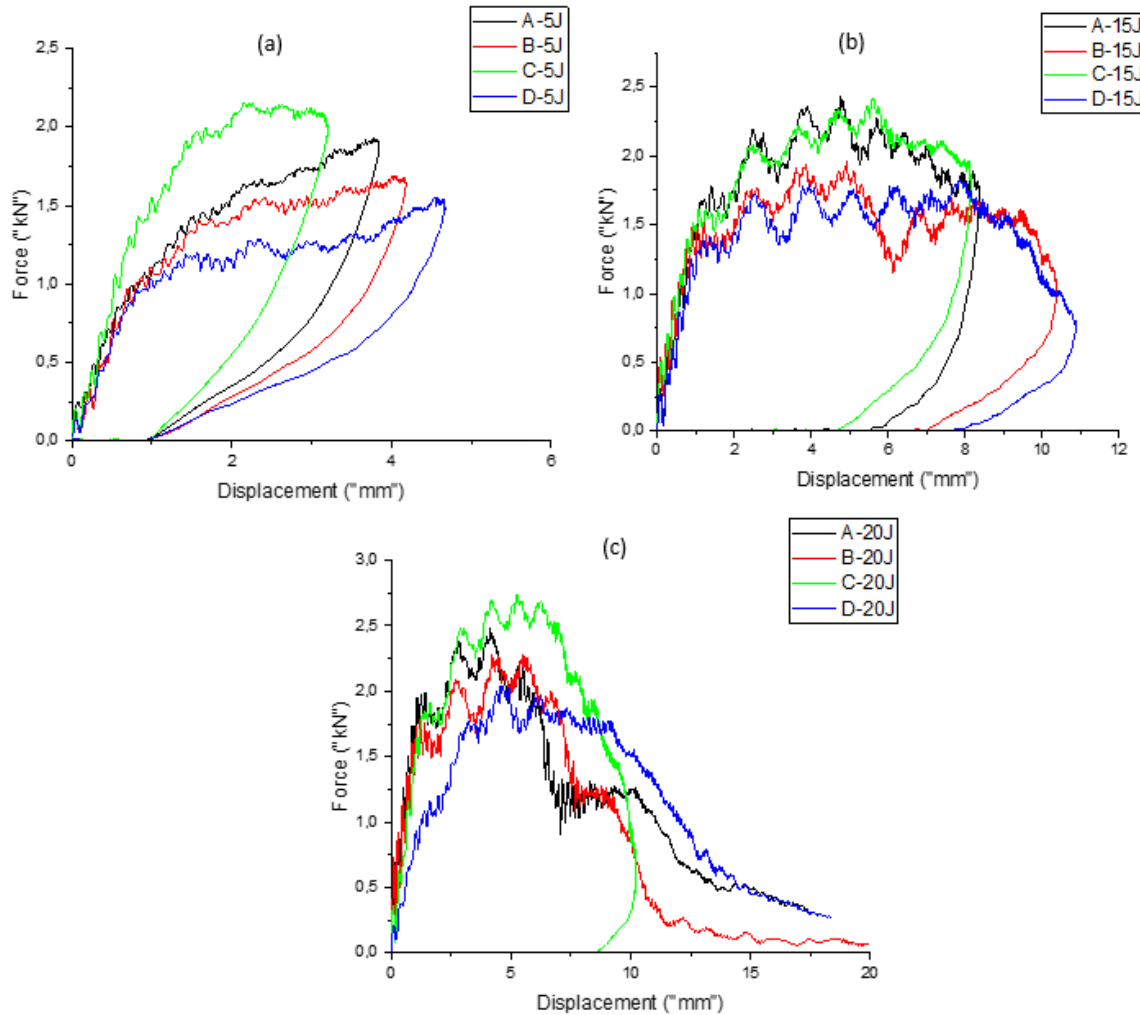


Figure 16. Comparaison des courbes de déplacement de la force pour (a) un impact de 5 J, (b) de 15 J et (c) de 20 J.

Dans les [Figures 16\(b\)](#) (énergie d'impact de 15J), les courbes force-déplacement montrent que les courbes fermées, indiquent que l'impacteur n'a pas réussi à pénétrer complètement dans les spécimens mais a rebondi après l'impact pour tous les composites. Une courbe ouverte se produit lorsque l'impacteur a complètement pénétré dans le spécimen. On peut conclure qu'aucun spécimen n'a subi de pénétration, car l'énergie incidente a été transférée vers le spécimen où le déplacement maximal s'est produit. Le déplacement maximal a été enregistré lorsque le spécimen transfère élastiquement l'énergie d'impact excédentaire vers l'impacteur, ce qui entraîne un phénomène de rebond entre l'impacteur et le

spécimen[37]. Dans le cas d'un impact à 20J, la zone IV est remplacée par une chute soudaine de la force sans récupération de la déformation en raison de la pénétration complète de l'impacteur[37]. L'augmentation de l'énergie d'impact à 20J a entraîné la perforation du stratifié et l'absence de rebond de l'impacteur dans la zone IV pour les composites (A), (B), et (D), contrairement au composite (C). Dans ce cas le composite (C) est le plus résistant au impact de 20J, comme le montre la Figure 16(c) qui décrit les résultats relatifs à l'essai d'impact des composites luffa/époxy soumis à une énergie d'impact $E_i=20J$. Dans les cas des stratifiés (A), (B), et (D) la valeur de la force maximale est relativement inférieure (2.48, 2.27, et 2.02KN, respectivement) par rapport aux stratifiés (C) (2.73 KN) en raison de la séquence d'empilement et l'orientation des fibres dans les mats du luffa. L'étude expérimentale a montré que la pénétration complète (perforation) des composites (A), (B), et (D) est donnée par une énergie d'impact $E_i = 20 J$, pour les composites examinés, le stratifié (D) présente une grande absorption d'énergie totale (voir Tableau 6).

Les forces de contact et les déplacements maximaux des essais d'impact réalisés sous différentes énergies d'impact sont comparés sur la Figure 17. Les résultats indiquent que les composites (C) ont toujours des forces de contact maximales plus élevées que celle des autres composites (Figure 17(a)). La force de contact maximale augmente avec l'énergie d'impact jusqu'à la rupture des fibres, mais la force maximale reste pratiquement inchangée. Quant au déplacement maximal, les spécimens (D) ont des valeurs plus élevées que d'autres composites dans les énergies d'impact de 5 et 15J (Figure 17(b)). Le déplacement maximal continue à augmenter avec l'augmentation de l'énergie d'impact de 20J. Le déplacement maximal cette fois il concerne le composite (B).

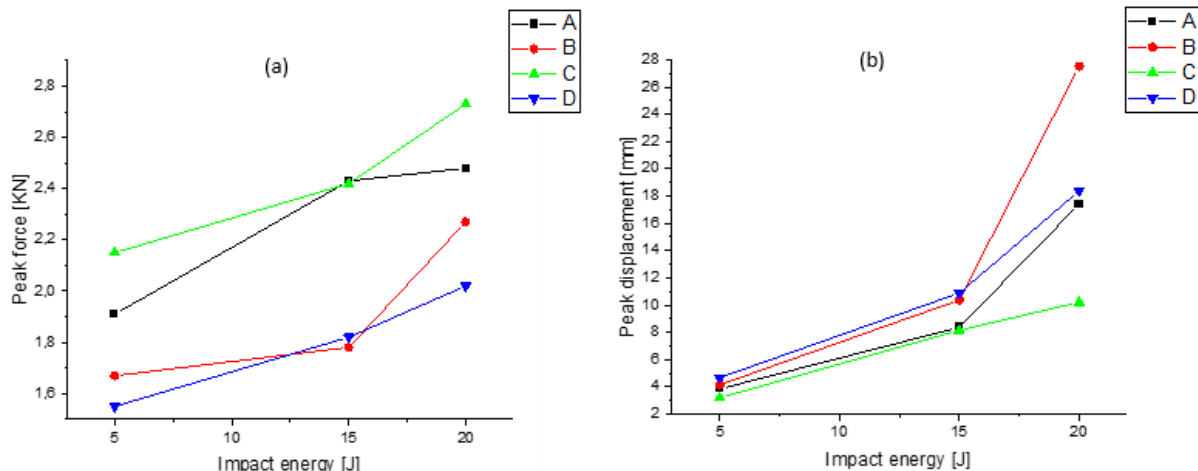


Figure 17. Comparaison des (a) Force maximale et (b) Déplacements maximale des spécimens testés sous différentes énergies d'impact.

5.4. Réponse Energie-temps

L'absorption d'énergie pendant l'impact est un paramètre essentiel pour l'analyse de la réponse dynamique des composites. L'aire comprise sous une courbe de force de contact en fonction du déplacement caractérise l'énergie absorbée par les composites luffa/époxy comme il est montré dans la [Figure 16](#).

La [Figure 18](#) illustre les données relatives à l'énergie en fonction du temps des composites mat luffa/époxy. Tous les spécimens ont montré une tendance similaire de la courbe énergie-temps. L'énergie a progressivement augmentée jusqu'à ce que l'énergie d'impact maximale soit atteinte et a commencée à diminuer jusqu'à ce que l'énergie atteigne une valeur constante. Le temps nécessaire augmente également à mesuré que l'énergie d'impact augmente. Le pic le plus élevé des courbes indique l'énergie d'impact. L'énergie absorbée peut être calculée à partir des courbes car l'énergie absorbée est égale à l'énergie à la valeur constante (voir [Figure 13\(d\)](#)). L'énergie de rebond peut être déterminée comme l'énergie d'impact moins l'énergie absorbée.

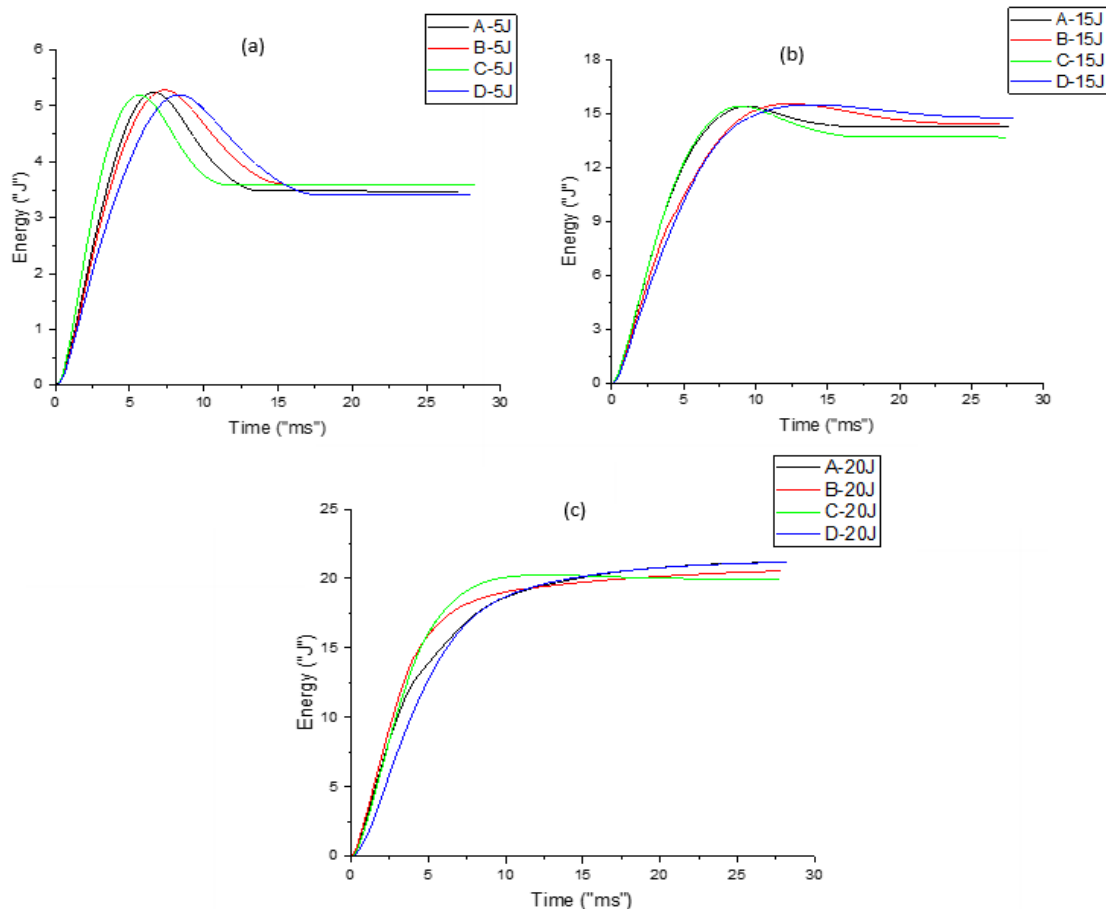


Figure 18. Comparaison des courbes énergie-temps pour (a) un impact de 5 J, (b) de 15 J et (c) de 20

Les Figures 18(a), (b), et (c) montrent deux typiques courbes d'absorption d'énergie en fonction du temps, représentant les cas de rebond et de perforation. Dans le cas d'un rebond, pour la réponse force-déplacement fermée ou semi-fermée montrée à la Figure 18(a) et (b), respectivement, l'énergie cinétique initiale de l'impacteur est d'abord complètement absorbée par les composites. Ensuite, une partie de l'énergie absorbée retourne à l'impacteur en raison de la résilience élastique des composites. Par conséquent, l'absorption finale d'énergie est inférieure à l'énergie d'impact initiale. Pour une énergie d'impact de 5J, les quatre types de spécimens avaient presque la même valeur d'énergie absorbée. Tous les courbes des composites d'une énergie d'impact de 5 et 15J sur la Figure 18(a) et (b) montrent qu'il y a de rebond, ce qui signifie qu'il n'y a pas de pénétration pendant les essais d'impact. Lorsque l'énergie d'impact augmente, l'énergie absorbée augmente également. Avec l'augmentation de l'énergie absorbée, les dommages se produisent sur les spécimens impactés et la zone endommagée est plus grande. On peut clairement voir que le composite (D) avait l'énergie absorbée la plus élevée pour une énergie d'impact de 15J (voir Figure 19(a)).

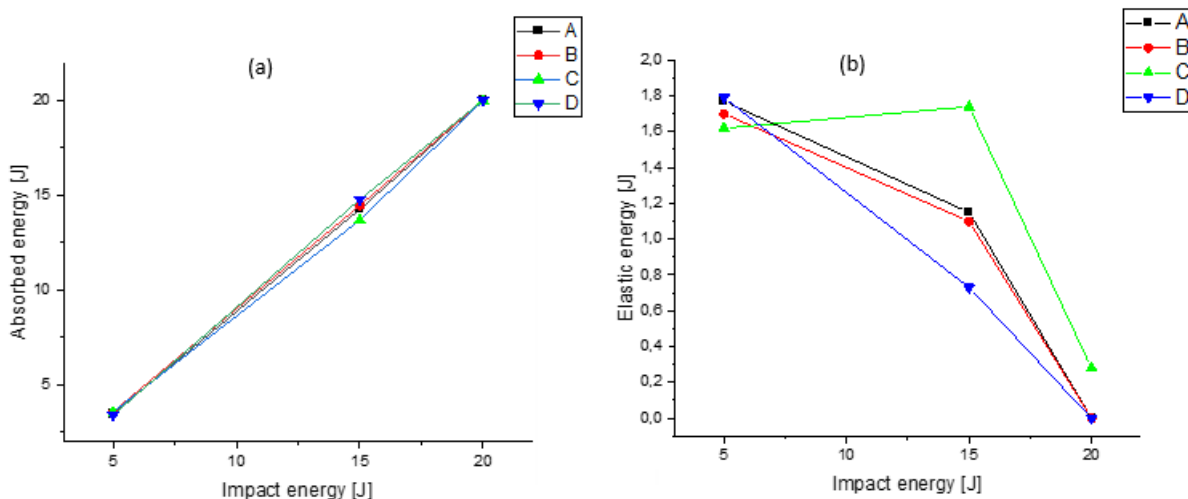


Figure 19. Comparaison (a) des énergies absorbées et (b) de l'énergie élastique des spécimens testés sous différentes énergies d'impact.

Alors que dans le cas où l'impacteur perce l'éprouvette, ce qui correspond à la réponse force-déplacement de type ouvert (Figure 18(c)), l'énergie d'impact est supérieure à la capacité d'absorption d'énergie des composites. Lorsque l'énergie d'impact augmente à 20J, l'énergie absorbée par les spécimens augmente également. On peut clairement voir que l'énergie d'impact à 20 J, les composites (A), (B), et (D) montrent qu'il n'y a pas de rebond (absence de l'énergie élastique), ce qui signifie qu'il y a de perforation pendant les essais d'impact, par

contre le composite (C) montre un rebond (présence d'énergie élastique), voir la [Figure 19\(b\)](#), d'après l'observation des données, l'énergie d'impact est supérieure à l'énergie absorbée. Cela indique que les spécimens n'ont pas été pénétrés même à l'énergie d'impact la plus élevée, ce qui signifie que l'énergie de 20J n'a pas arrivé à perforer le spécimen (C). L'énergie absorbé et élastique sont résumés dans le [Tableau 6](#).

5.5. Coefficient de restitution (CoR) et degré de dommage

Lors d'un impact entre deux corps, la simple résolution de l'équation de la quantité de mouvement linéaire ne permet pas de déterminer la vitesse du corps après l'impact, qui est principalement due à la déformation plastique associée aux deux corps. C'est pourquoi on introduit le coefficient de restitution (CoR), qui peut être défini comme le rapport entre les vitesses relatives des corps après et avant l'impact. Le CoR se situe entre 0 et 1. Lorsque le $CoR=0$, cela indique que la nature de l'impact est complètement plastique. Si $CoR=1$, il indique un impact complètement élastique. Dans les applications pratiques, la valeur de CoR se situe entre 0 et 1 [\[42\]](#). Parmi les deux corps qui s'impactent, si l'un des corps est au repos, le CoR peut être exprimé comme indiqué dans l'équation (2)[\[43\]](#).

$$CoR = \sqrt{\frac{E_i - E_a}{E_i}} \quad (2)$$

Où, E_i et E_a sont les énergies d'impact et absorbé, respectivement.

Le CoR diminue à mesure que l'énergie d'impact augmente, en raison d'une plus grande quantité d'énergie dissipée par les mécanismes d'endommagement dans les composites ([Figure 20\(a\)](#)). Dans le cas de l'énergie d'impact à 15J (pénétration), la valeur CoR approche vers zéro, et le composite (D) a la plus faible valeur de CoR (0.21). Dans le cas de l'énergie d'impact de perforation (20J), le CoR des composites (A), (B), et (D) est nul, cela indique que la nature de l'impact est complètement plastique, sauf le composite (C) avec une valeur de 0.11 (voir le [Tableau 6](#)).

Le rapport entre l'énergie absorbée et l'énergie d'impact totale ($E_{\text{absorbé}} / E_{\text{impact}}$), exprimé en pourcentage) et est également appelé "degré de dommage" [\[42\]](#), il est utilisé pour mesurer la quantité de dommage que le stratifié a subi pendant l'événement d'impact sans perforation et avec perforation, les résultats sont indiqués dans le [Tableau 6](#). La variabilité de ce rapport pour les différents types des composites est due aux effets des paramètres comme la séquence

d'empilement et l'orientation des fibres dans la structure des mats du luffa. Ces facteurs influencent inévitablement le développement des dommages et l'absorption d'énergie dans des conditions d'impact, le même degré de dommage a été observé pour tous les composites avec énergie d'impact de 5J. Une tendance à l'augmentation du degré d'endommagement avec l'augmentation de l'énergie d'impact. Au niveau d'impact sans perforation (15 J), le rapport $E_{\text{absorbé}}/E_{\text{impact}}$ pour le composites (C) était environ 88.71 % inférieur que celui des autres stratifiés (A), (B), et (D) (Figure 20b). Le composite (C) présente un degré d'endommagement plus faible à toutes les énergies d'impact, suivi par les composites (A) et (B), et (D) ce qui indique que le composite (C) présente la plus grande résistance aux dommages par rapport aux d'autres composites(A) et (B), et (D). Ceci est principalement dû au développement facile des dommages dans les autres composites. Dans le cas d'un impact à 20J avec perforation complète, toujours le degré de dommage de composite (C) (pas de perforation) est inférieur aux celui des autres composite. La résistance à l'impact plus élevée revienne toujours au composite stratifié(C), peut être attribuée aux séquences d'empilement et des couches, tandis que la faible résistance à la perforation des stratifiés (B) et (D) est associée aux l'orientation aléatoire des fibres dans les couches des mats du luffa et ils ont présenté les seuils de perforation les plus élevés.

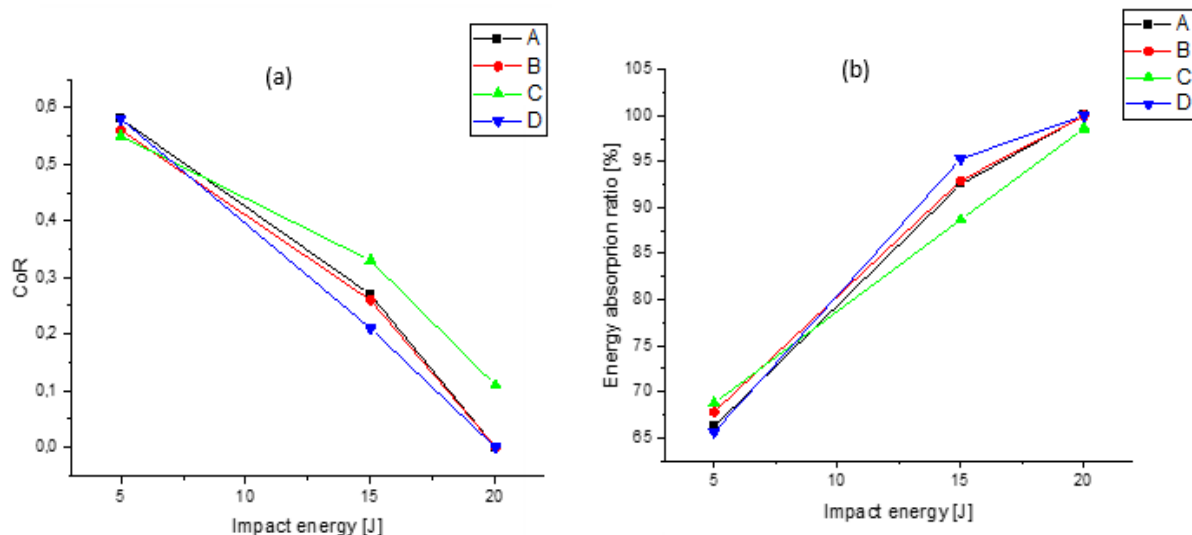


Figure 20. (a) Coefficient de restitution (CoR) en fonction de l'énergie d'impact et (b) Rapport d'absorption d'énergie en fonction de l'énergie d'impact à différentes énergies d'impact pour les composites.

5.6. Comparaison avec d'autres résultats de la littérature

Afin de comparer les performances d'impact des composites luffa/époxy analysés avec celles d'autres composites renforcés par des fibres naturelles et synthétiques, les principaux résultats disponibles dans la littérature pour ces matériaux, ont été reportés dans le [Tableau 7](#).

Tableau 7. Comparaison des performances d'impact des composites luffa/époxy analysés avec celle d'autres composites rapportés dans la littérature.

Composites forme [g/cm ³]	Mise en [mm]	ρ_t [%]	$V_f E_f E_a F_{max} D_{max}$ [J]	Ref [mm]
Composites avec fibre luffa (Travail actuel)				
Luffa/époxy -(C)-Mat	0.92	3.85	23.37	5 3.57 2150 3.19
Luffa/époxy -(C)- Mat		0.92	3.85	23.37 15 13.68 2420 8.15
Luffa/époxy -(C)- Mat		0.92	3.85	23.37 20 19.97 2730 10.20
Composites avec fibres naturelles				
Sisal (MAT)/époxy vert Mat	1.26	3.50	15	10 6.1 810 - [37]
Sisal (MAT)/époxy vert Mat	1.26	3.50	30	15 13.9 1630 - [37]
Sisal (MAT)/époxy vert Mat	1.26	3.50	35	10 9.1 1160 - [37]
Chanvre (tissé)/PLA	CR1.33	9.00	28	- 70 - - [44]
Chanvre (tissé)/époxy	CR1.17	3.70	20	- 8.2 - - [45]
Chanvre (MAT)/polyester	Mat	1.40	3.00	26 11 10.5 1078 - [46]
Lin (tissé)/époxy	CR1.23	3.20	24	- 12.4 - - [45]
Lin (UD)/époxy	CR1.22	4.50	56	5 3.28 2004 4.14 [47]
Lin (UD)/époxy	CR1.22	4.50	56	15 14.74 2472 8.64 [47]
Lin (UD)/époxy	CR	1.224.50	56	20 20 2549 11.02 [47]
Lin (tissé)/vinylester	CR	1.20	7.10	23 30 22.1 3870 7.9 [48]
Jute (tissé)/polyester	CR	1.22	6.80	36 5 3.05 1960 - [49]
Jute (tissé)/polyester	CR	1.22	6.80	36 15 11.17 2230 - [49]
Jute (tissé)/polyester	CR	1.22	6.80	36 20 16.84 2320 - [49]
Composites avec fibres synthétiques				
Verre (tissé)/polyester	CR	1.93	4.00	55 - 50.6 - - [50]
Verre (UD)/polyester	CR	1.79	4.00	44 - 38.8 - - [50]
Verre (tissé)/époxy	QI	1.63	2.70	63 30 19.82 3130 5.6 [51]
Carbone (tissé)/époxy	CR	1.62	3.50	32 12 9.2 4209 3.71 [52]
Carbone (UD)/époxy	CR	1.40	4.50	59 5 0.88 3837 2.6 [47]
Carbone (UD)/époxy	CR	1.40	4.50	59 15 10.6 5618 4.69 [47]
Carbone (UD)/époxy	CR	1.40	4.50	59 20 16.08 6223 5.47 [47]
Carbone(tissé)/époxy	QI	1.28	2.70	64 30 28.21 4380 6.6 [51]
Kevlar (tissé)/époxy	QI	1.29	2.70	68 30 24.78 3510 7.1 [51]
Basalte (tissé)/époxy	CR1.62	3.50	32	25 20.6 7238 6.06 [52]
Basalte (tissé) /vinylester	CR1.55	3.80	27	30 21.2 4630 9.1 [48]

En détail, pour chaque matériau considéré, le [Tableau 7](#) indique la disposition relative, la densité (ρ), l'épaisseur (t_s) des spécimens utilisés pour les essais d'impact, la fraction volumique des fibres (V_f), l'énergie d'impact (E_i), l'énergie absorbé (E_a).la force (F_{max}) et déplacementmaximum (D_{max}), d'après ces résultats, on peut conclure que notre matériau a des bonnes performances d'impact.

5.7. Caractérisation des endommagements

La [Figure21](#) montre les images des dommages causés par l'impact sur les faces avant et arrières des quatre matériaux composites avec une énergie d'impact de 5J, 15J et 20J. Sous l'action d'une énergie d'impact de 5J, sur la face avant aucun endommagement observé visuellement pour tous les composites, par contre dans la face arrière des petites fissurations ont été observé, qui n'sont pas vraiment visible pour le composite (C). Une fissuration d'une forme de croix bien claire observé sur le composite (D). Plus l'énergie d'impact augmente, plus la zone endommagée augmente. Lorsque l'énergie d'impact est de 15J, sur la face impactée (face avant), l'impacteur hémisphérique laisse une empreinte circulaire. Plus le niveau d'énergie est élevé, plus l'empreinte est grande. Les dommages s'aggravent, comme le montre la [Figure 22](#), les composites (A), (B) et (D) sont endommagés beaucoup plus par rapport au composite (C), une indentation induite autour du point d'impact a été révélée à énergie d'impact de 15J pour tous les composites sur la face avant, tandis qu'une localisation importante des dommages sur la face arrière a été détectée avec la caractéristique commune en forme de croix ouverte pour les composites (B) et (D). Le composite stratifié (C) a présenté un comportement différent, avec la plus faible capacité d'absorption d'énergie (degré d'endommagement le plus faible, comme il est montré sur [Figure 20](#) et [Tableau 6](#) et la plus faible profondeur ([Figure 21](#)), Il convient tout d'abord de mentionner que la séquence d'empilement des couche ou les fibres sont oriente quasi-unidirectionnel et aléatoire a entraîné une amélioration significative de la résistance à l'impact, avec une rigidité linéaire plus élevée ([Figures 14 et 16](#)) et une meilleure résistance à la pénétration. En plus d'une profondeur d'enfoncement résiduel plus faible par rapport aux d'autres stratifiés. Les composites stratifiés (B) et (D) ont montré un degré d'endommagement légèrement plus élevé (voir la [Figure 20\(b\)](#) et [Tableau 6](#)), ce qui peut être attribué à un endommagement interne plus important probablement dû à l'orientation des fibres aléatoire). La rupture des fibres a été observée, localisée sur la face arrière. La rupture apparaît plus tôt dans la face arrière parce

que des déformations plus importantes sont produites dans cette face en raison de l'effet combiné de la flexion et des forces de traction.

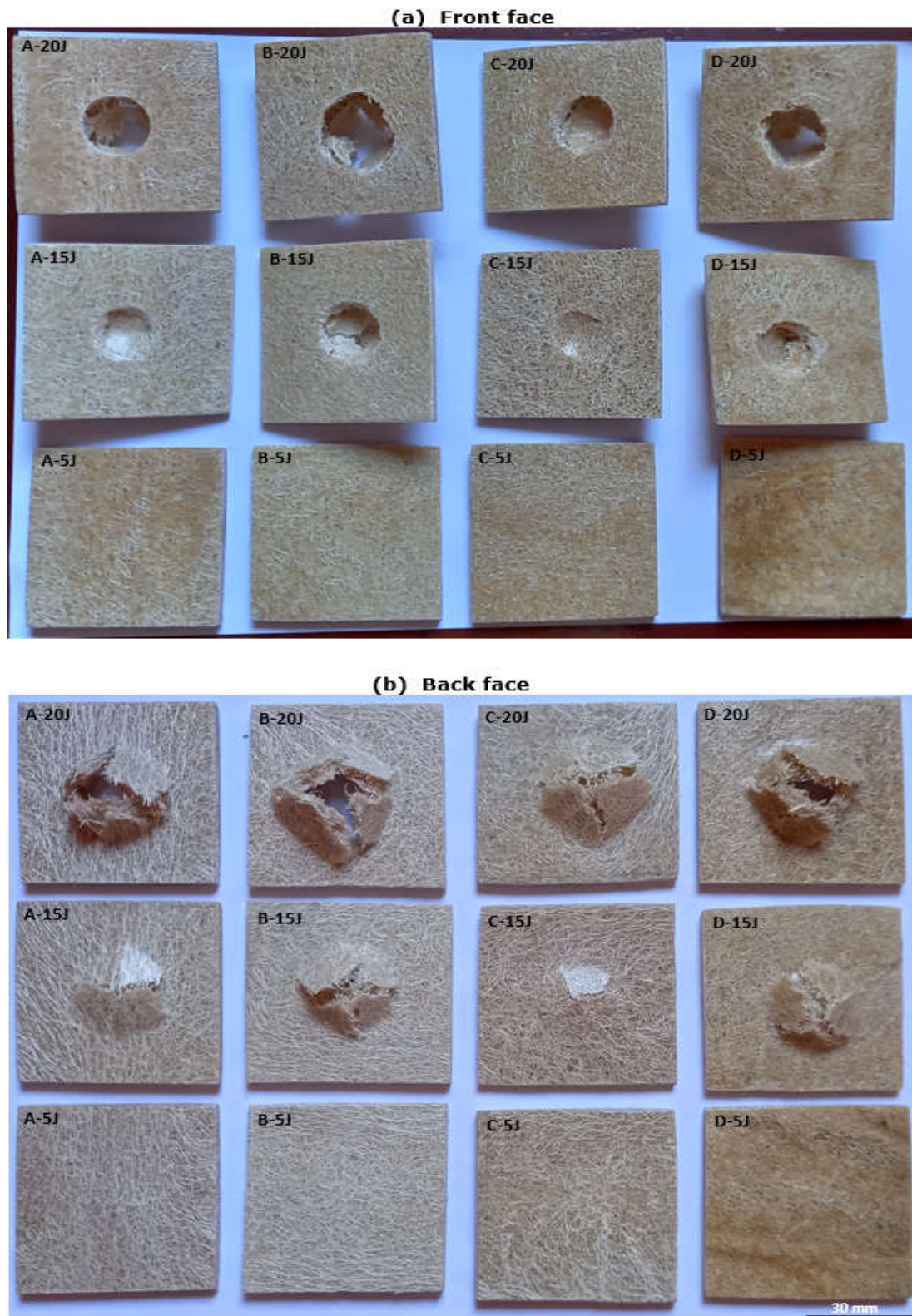


Figure 21. Images des dommages causés par l'impact sur les composites en fonction de l'énergie de l'impact, (a) face avant et (b) face arrière.

Enfin, dans le cas d'une énergie d'impact plus élevée (20J),l'énergie absorbée n'est plus utilisée pour étendre les fissures mais pour les ouvrir, poussant vers l'extérieur les quatre coins du matériau délimités par les fissures. La rupture des fibres est suffisante pour permettre la pénétration complète de l'impacteur pour les composites (A), (B), et (D), la rupture des fibres est le mécanisme d'endommagement le plus courant qui conduit à la rupture finale des composites.On peut voir comment la rupture des fibres sur la face avant est arrondie, tandis que sur la face arrière, elle a une forme croisée, créant une déformation pyramidale ouverte, par contre pas d'ouverture sur le composite (C) ce qui signifie qu'il n'y a pas de perforation. Un développement élevé des dommages dans les composites (B) et (D) implique une meilleure absorption d'énergie si on le compare aux composites (A) et (C) (voir Figure 16(c)).

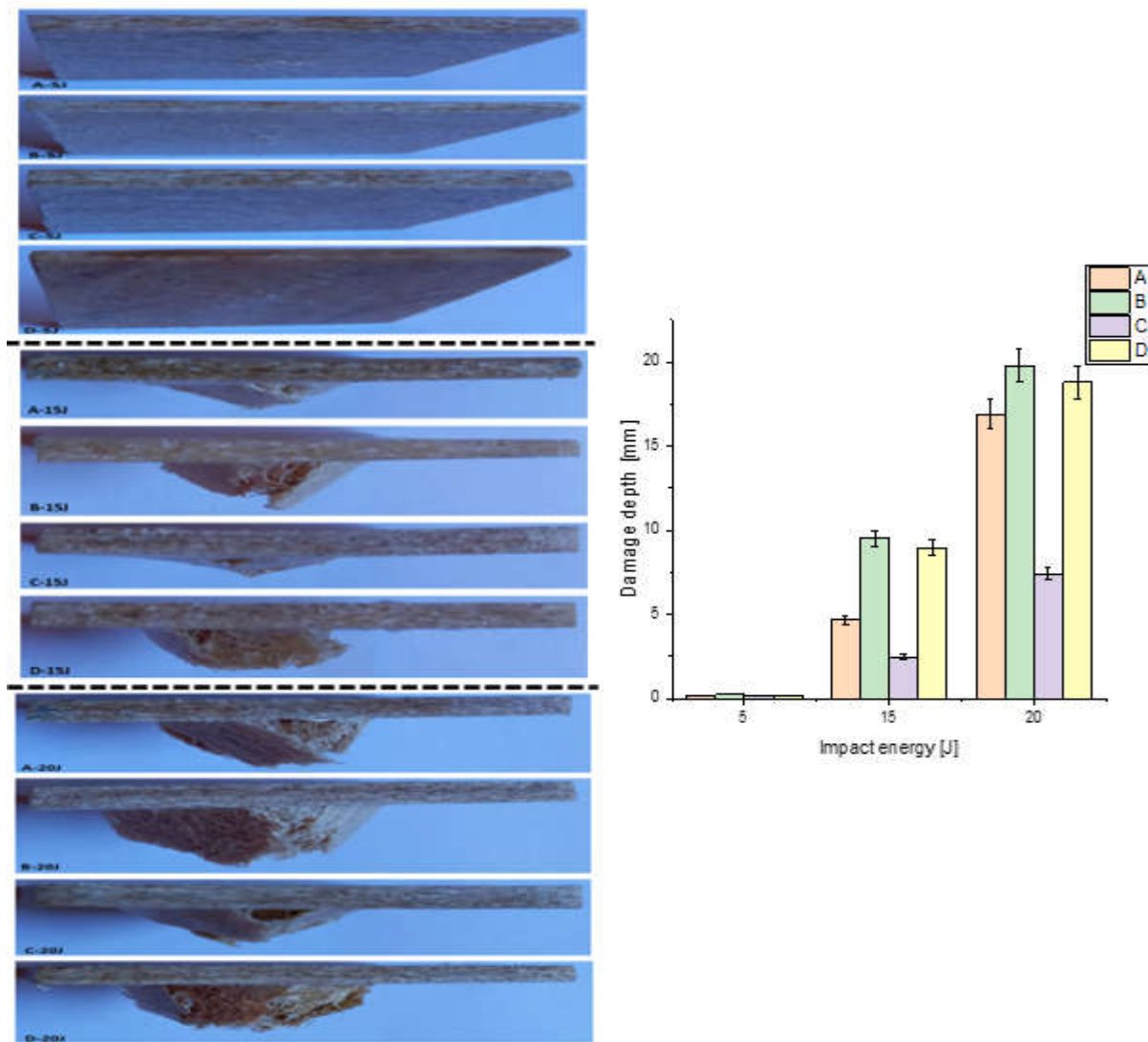


Figure 22. La profondeur de l'endommagement des composites luffa/époxy proposé à différents niveaux d'énergie d'impact 5 ,15, et 20J.

La profondeur de l'endommagement des composites luffa/époxy proposé à différents niveaux d'énergie d'impact 5,15, et 20J a été bien montrée sur la [Figure 22](#). La profondeur de l'endommagement est déterminée en insérant la tige du pied à coulisse digital dans l'endommagement créé par l'impact jusqu'à la couche non endommagée, puis en mesurant la longueur de la tige insérée dans la partie endommagée qui sont donnée numériquement. Pour une énergie d'impact de 5J, la profondeur est difficile de la mesuré, car elle est dans l'échelle de micro pour tous les composites. Concernant l'énergie d'impact de 15 et 20J, la grande profondeur d'endommagement a été observé dans le composite (B) puis suivi par le composite (D), contrairement au composite (C) une petite profondeur de dommage, ce qui signifie que le composite plus résistant aux impacts de 15 et 20J par rapport aux d'autres composites.

5.7.1. Analyse la surface endommagée par Image J

Afin de mesurer la surface d'impact sur la face avant et la surface d'ouverture des dommages sur la face arrière des composites impactés a 15 et 20J, Image J a été appliquée comme il est montré sur la [Figure 23](#), exemple de composite (B) impacté à 20J.

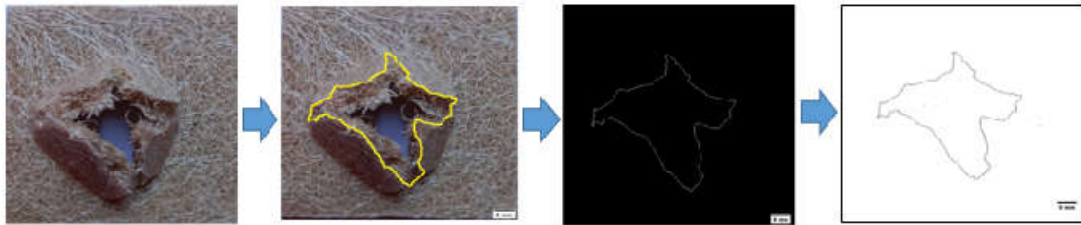


Figure 23. Application Image J pour le composite (B) impacté à 20J.

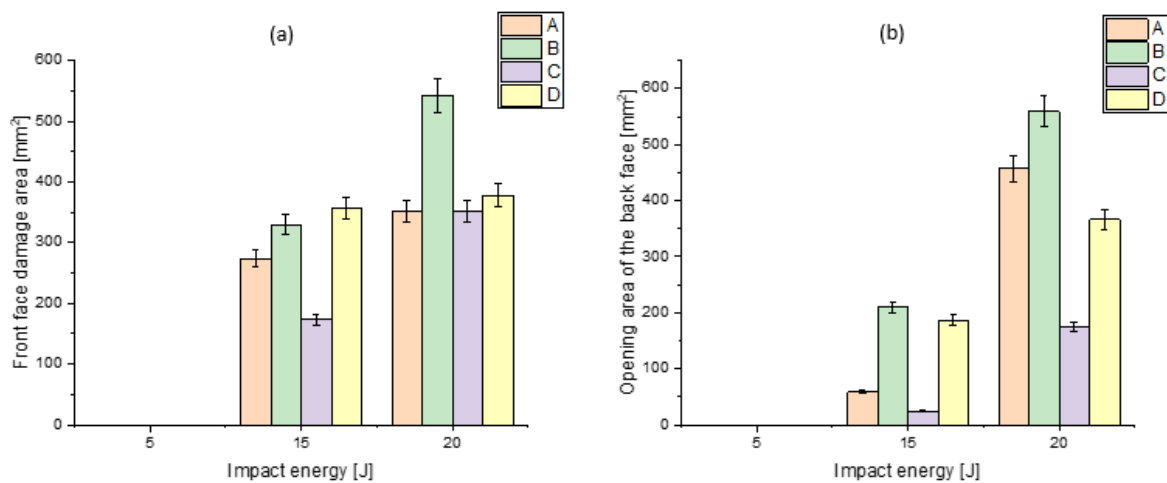
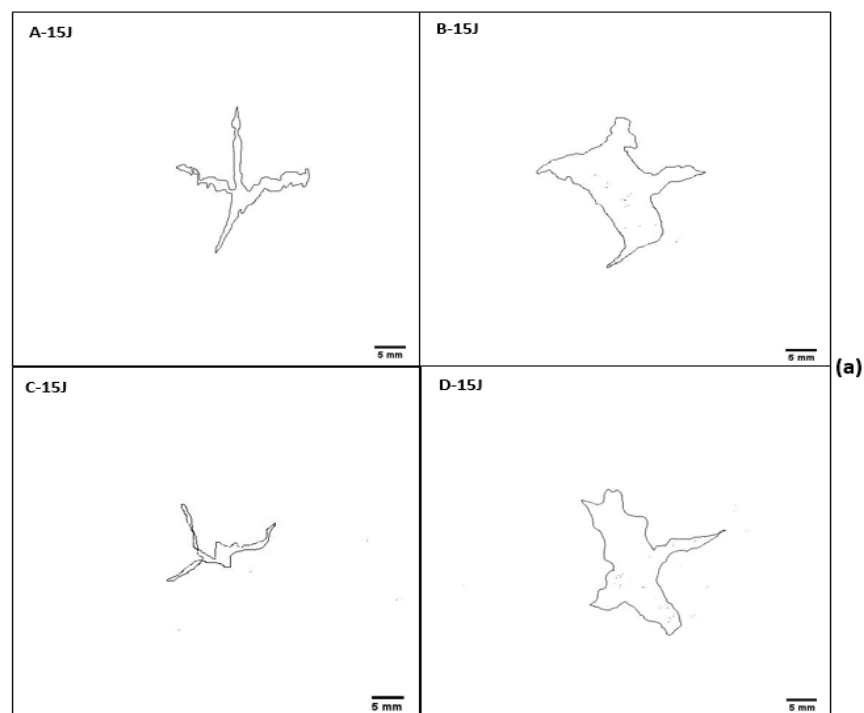


Figure 24. (a) Surface de dommage de la face avant et (b) Surface d'ouverture de dommage de la face arrière.

Pour une énergie d'impact de 5J aucun endommagement a été observé sur la surface avant de tous les composites, comme a été montré déjà sur la [Figure 21](#). Sur la face avant des composites impactés à 15J, la grande surface d'endommagement a été obtenue dans le composite (D) a suivi par les composites (B) et (A). Pour une énergie d'impact de 20J, le composite (B) a une surface d'endommagement plus que celle de composite (D), par contre le composite (C) toujours la surface d'endommagement de la face avant pour tous les niveaux d'énergie d'impact est inférieur au surfaces d'endommagement des autres composites ([Figure 24](#)).

La [Figure 25](#) montre la surface d'ouverture des endommagements des quatre composites sous charge d'impact de 15 et 20J de la face arrière, le composite (B) a la plus grande surface d'ouverture pour les deux énergies, suivi cette fois par le composite (A) pour une énergie d'impact de 20J puis le composite (D) (voir [Figure 24\(b\)](#)), on a observé que les mêmes remarques trouvent dans les résultats de la mesure de la profondeur dans la [Figure 22](#). Concernant le composite (C) leur surface d'ouverture toujours inférieure des autres surfaces des composites, ce qui prouve qu'il est toujours le plus résistant à une grande énergie d'impact. L'endommagement induit est plus important dans les composites stratifiés (B) et (D) que dans les deux autres configurations (A) et (C). Cette quantité élevée de dommages permet de dissiper une grande quantité d'énergie pendant la charge d'impact pour le deux composites, mais ces stratifiés présentent également une faible résistance à l'impact.



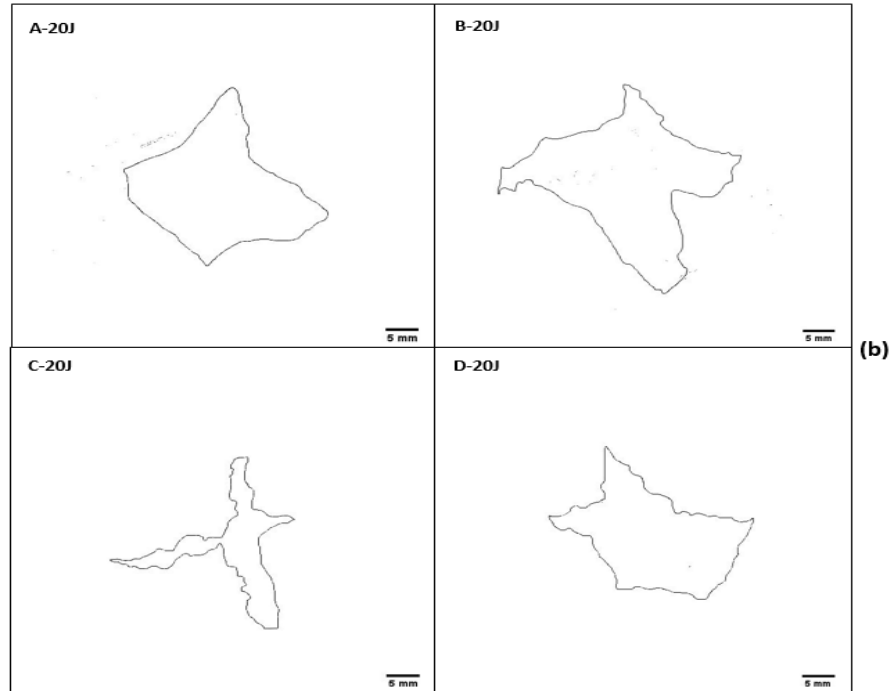


Figure 25. Surface d'ouverture des dommages sur la face arrière des composites impactés, (a) 15J et (b) 20J.

6. Comportement en indentation

De nombreuses études ont été effectuées sur l'étude de comparaison entre les essais d'indentation (quasi-statiques) et les impacts à faible vitesse (dynamique) sur les matériaux composites, ont révélé une similitude entre ces deux essais [44]. Des essais d'impact à faible vitesse et d'indentation quasi-statique réalisés sur les composites stratifiés par Trevor Allen et al. [53], afin de faire la comparaison entre eux. Ils ont montré aucune différence entre les tests d'indentation et l'impact à faible vitesse et ils ont conclu que l'indentation représente un analogue utilisable pour l'évaluation des dommages d'impact à basse vitesse. Dans une autre étude similaire, des essais d'indentation et d'impact à faible vitesse ont été réalisées par Yan et al. [54]. Ils ont basé sur l'étude l'énergie d'impact et le dommage. Ils ont sélectionné la profondeur d'impact comme paramètre de dommage pour définir la relation entre les deux tests. Les résultats ont montré qu'aucune différence distincte ne peut être observée entre les tests d'impact à faible vitesse et d'indentation, ce qui indique que le test quasi statique (indentation) peut être utilisé pour représenter un test d'impact à basse vitesse.

Le comportement mécanique des composites mat luffa/époxy sous chargements d'indentation présenté dans la Figure 26. On voit que y a trois phases, la phase (I), une partie linéaire ou le matériau composite se comporte élastiquement jusqu' à la limite élastique (le début de

domaine plastique). Dans la phase (II) c'est la partie non linéaire (domaine plastique), l'indenteur commence de pénétrer l'éprouvette et de subir des endommagements de forme d'ellipse (empreinte de la tête hémisphérique de l'indenteur). Concernant la dernière partie, la phase(III), la partie ou y' a beaucoup d'endommagements, l'indenteurperfore le composite, se voit dans la face arrière, ça veut dire la perforation complète de l'échantillon.

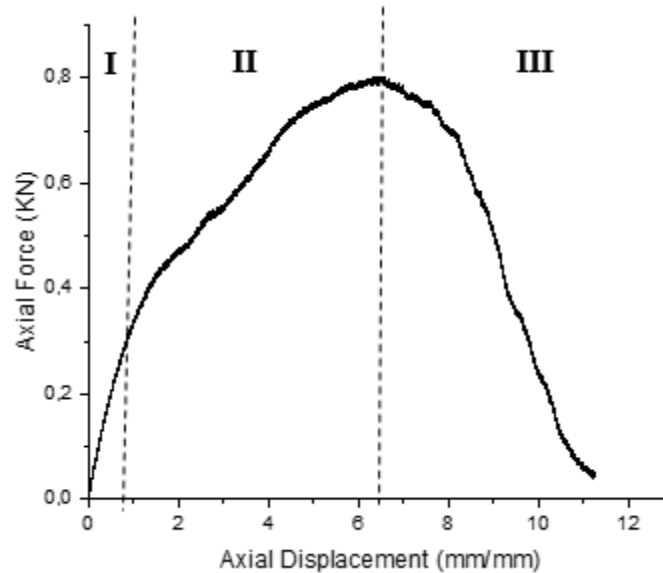


Figure 26. Courbe Force-déplacement de l'essai d'indentation.

6.1. Analyse de l'endommagement

6.1.1.Observation des endommagements par VT

L'évaluation des dommages externes après indentation des stratifiés a été réalisée par inspection visuelle des faces avant et arrières des composites. Des photos de haute résolution ont été prises pour évaluer les profils d'endommagement.

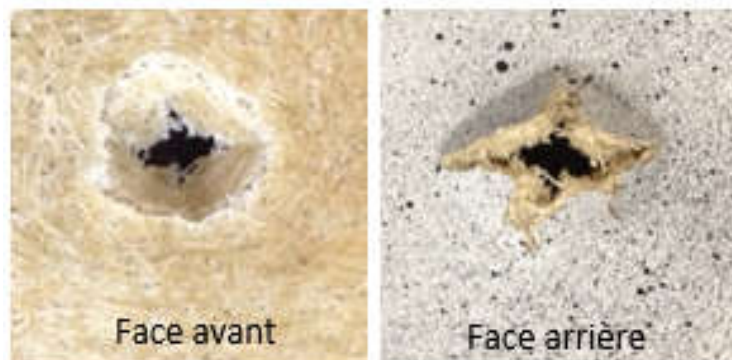


Figure 27. Dommages subis par l'indentation.

On pourrait avoir également une idée sur les modes d'endommagement induits de type du chargement indentation. Tandis que les dommages subis se caractérisent par une plus grande zone de pénétration avec des fissurations de la matrice autour du point d'indentation et déchirure de fibre et un dommage plus cassant concentré autour du point de contact (Figure 27). Il a été également relevé qu'il est possible de comparer directement les dommages créés lors des tests effectués dans le cadre des tests d'impact et quasi-statique [53]. D'après les résultats de l'observation visuelle des dommages, ont montré qu'il n'y a pas une grande différence distincte ne peut être observée entre les tests d'impact à faible vitesse (dynamique) et d'indentation (quasi statique), ce qui indique que le test d'indentation quasi statique peut être utilisé pour représenter un test d'impact à basse vitesse[54].

6.1.2. Observation des endommagements par EA

Afin d'identifier les différents modes de dommages produits lors d'un essai IBV, la technique EA a été utilisée pour surveiller les dommages lors des essais QSI. L'utilisation de l'EA pour surveiller les dommages pendant un test IBV était impossible en raison de sa nature dynamique et de la courte durée du test, ce qui limitait la capacité du capteur à détecter plusieurs événements acoustiques. Dans cette étude, une analyse k-means non supervisée des événements EA enregistrés a été utilisée pour regrouper les modes d'endommagement en fonction de trois paramètres des signaux acoustiques : l'amplitude, l'énergie et le nombre de coups. Quatre classes 1,2,3, et 4 de mode d'endommagement ont été obtenus pour les événements EA, comme illustré dans la Figure 28.

Les événements de la classe 1 montrent une initiation des dommages dès que la force axiale est appliquée. L'augmentation supplémentaire du niveau de charge d'indentation augmente le nombre d'événements enregistrés de la classe 1 (Figure 28(a)). Les classes (1) possèdent des faibles amplitudes comprises entre 40-55dB et sont attribuées à la fissuration matricielle. Ensuite, les événements de la classe 2 ont été détectés avec un nombre d'événements plus grand que la classe 1 et avec des valeurs d'amplitudes plus élevées comprise entre 41-68dB, elle correspond à la décohésion fibre-matrice. Par la suite, on retrouve une troisième classe notée (3) apparaissant presque au milieu des autres classes, les amplitudes de cette classe varient entre 42-72dB. Cette classe correspond au délaminage. Pour le dernier mode d'endommagement c'est la quatrième classe notée (4), la majorité des événements acoustiques de cette classe apparaît beaucoup plus à la fin de l'essai avec des amplitudes qui sont comprises entre 50-94dB et plus élevées que les trois autres classes. Ces

événements surviennent avant la rupture finale de l'éprouvette et elle est attribuée à la rupture des fibres.

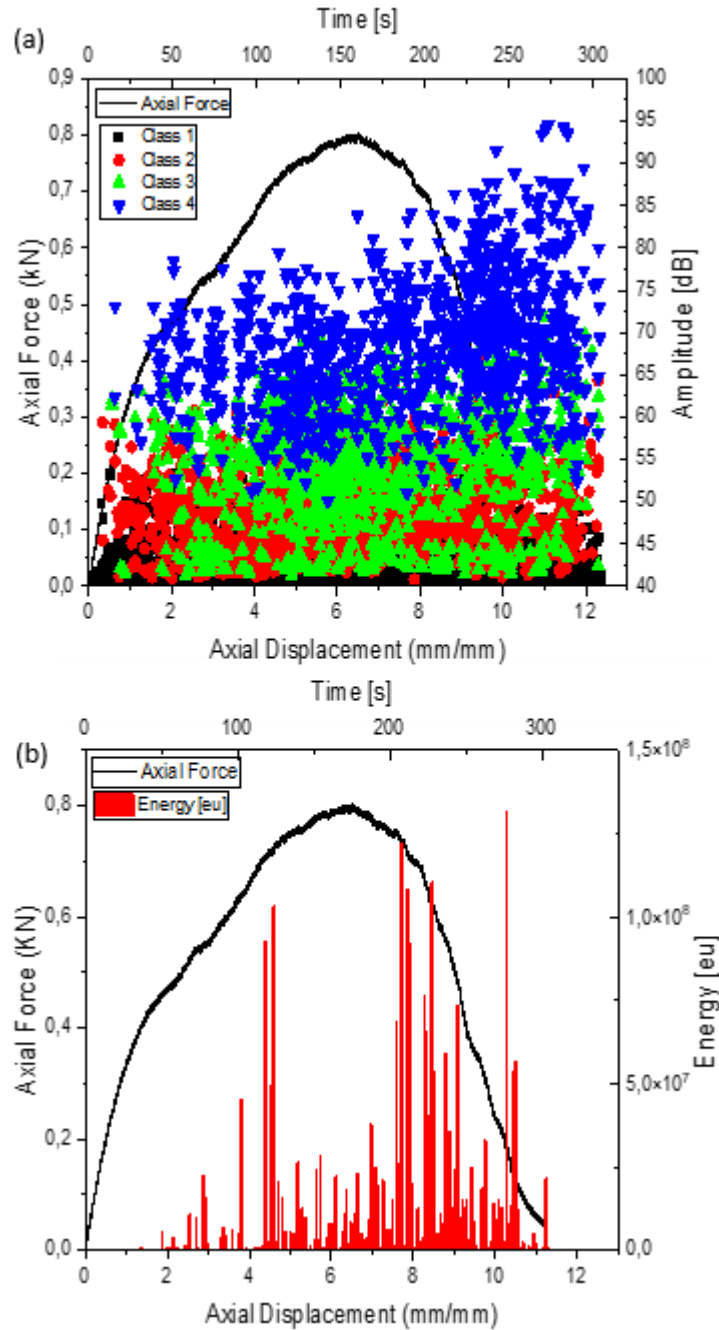


Figure 28.(a) Les événements acoustiques d'amplitudes avec la classification des modes d'endommagements, (b) L'énergie EA cumulative.

La Figure 28(b) montre que l'évolution de l'énergie cumulée de l'EA augmente avec l'augmentation de l'énergie d'impact tendance avec le dommage au sein de composites indenté, ce qui signifie l'effet la charge d'indentation sur l'endommagement. Les valeurs

cumulatives restent faibles jusqu'à un changement significatif après l'initiation d'un troisième type de dommage (classe 3). Cela confirme que les événements acoustiques de la première et la deuxième classe, se réfèrent à deux mécanismes de dommage à faible énergie EA, à savoir classe 1 correspondant à la fissuration de la matrice et classe 2 correspondant au décohésion fibre-matrice. Par la suite, une augmentation de l'énergie EA remarquablement avec des histogrammes au milieu de la courbe, ce qui signifie des autres classes d'un grand événement acoustique apparaît. Cependant, la plupart des chercheurs associent la fissuration de la matrice à une énergie et amplitude les plus faibles, et la rupture des fibres à une énergie et amplitude les plus élevées et le décohésion fibre-matrice est situé entre ces deux mécanismes de dommages[8,55].

6.1.3. Observation des endommagements par le MEB

La Figure 29 montre les vues en coupe hors plan de composite mat luffa/ époxy perforés sous la QSI. Les mécanismes de rupture détaillés dans le sens de l'épaisseur sont clairement visibles (Fissuration de la matrice, Décohésion fibres-matrice, délaminations, et rupture des fibres).

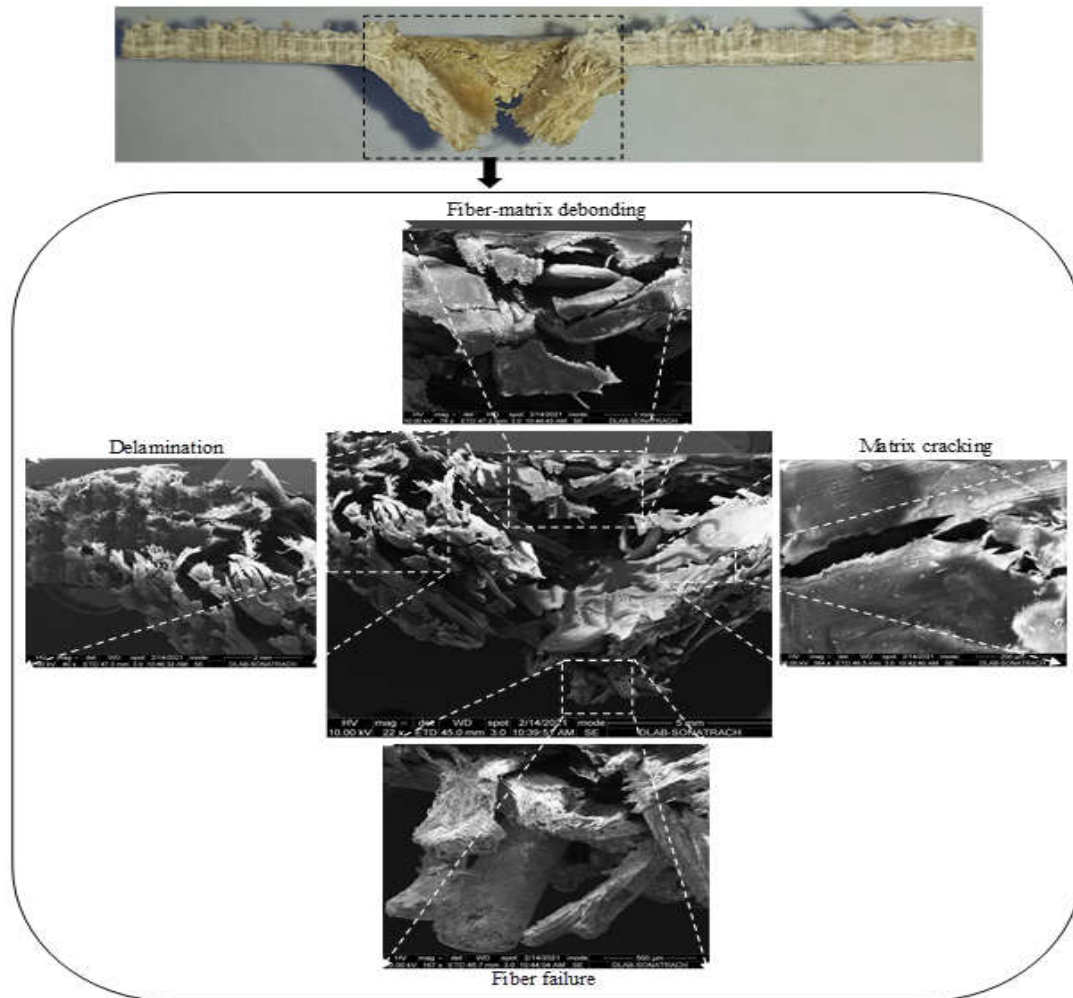


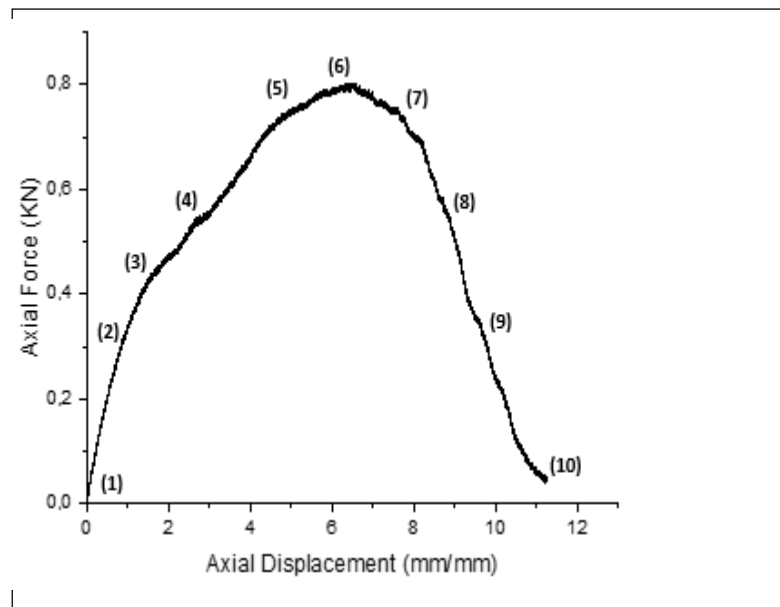
Figure 29. Les modes d'endommagement subi par indentation.

On peut remarquer que les fibres sont cassées sur les faces arrière des stratifiés en raison de l'étirement des plis arrière, ce qui correspond bien aux observations des stratifiés impactés dans la [Figure 21](#). La rupture des fibres augmente avec l'augmentation de l'indentation dans l'épaisseur pour le stratifié. L'ouverture de la fissure sous l'indentation initie et développe le délaminage des couches. Les modes de dommage trouvés par EA sont bien présentés et prouvés par l'analyse de MEB.

6.1.4.Évaluation des déformations et déplacements par CIN

La [Figure 30](#) montre l'utilisation des cartes de déformation, basées sur la mesure de la déformation et le déplacement à l'aide d'une caméra CCD. On observe sur les images de la déformation selon les deux directions longitudinales et transversales, des débuts des déformations apparaissent au centre de la plaque à la fin de la partie linéaire de la courbe Force-déplacement. La zone indentée est une zone circulaire qui représente le début de contact le haut de la tête de l'indenteur hémisphérique et la surface de l'échantillon. On

observe une augmentation de la zone rouge endommagée au centre de l'échantillon et un dommage jaune autour de la zone de contact (indenteur/stratifié) qui se propage avec l'augmentation de la charge d'indentation (équivalent l'augmentation de l'énergie d'impact) qui peut être attribuée à la fissuration de la matrice. Une certaine décohésion fibre-matrice et délaminage peut apparaître après la fissuration de la matrice entre la fin de la partie linéaire et la charge maximale, comme on a montré précédemment dans la présentation de mode de dommages délaminage sur les Figures 28 et 29.



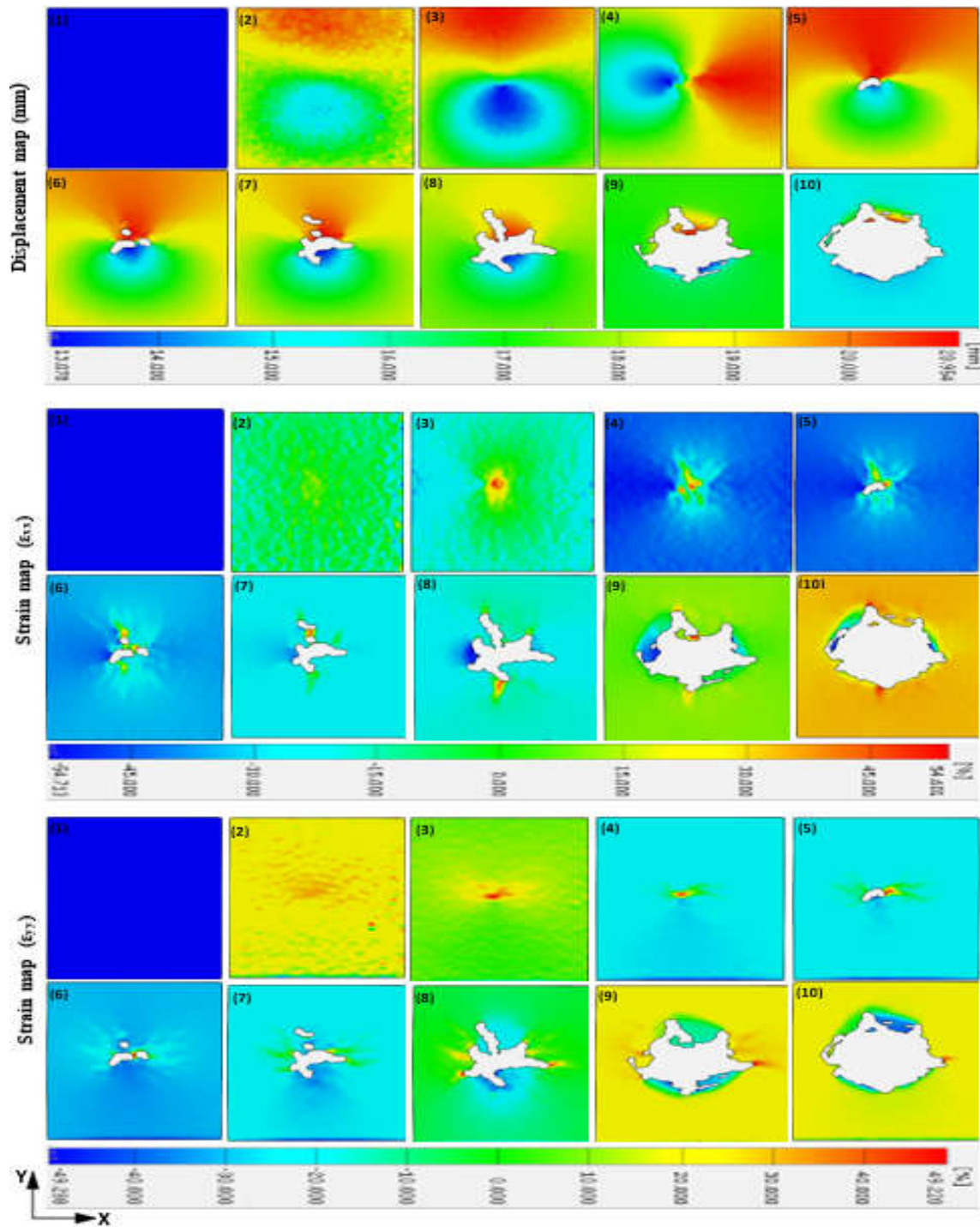


Figure 30. Images CIN prises pendant l'essai d'indentation, effet de l'indentation sur le déplacement, déformations ϵ_{xx} , et ϵ_{yy} , du composite.

Les valeurs de la déformation locale augmentent dans les deux directions de charge (valeurs locales de $|\epsilon_{xx}|$ et $|\epsilon_{yy}|$) en provoquant des dommages et on remarque des déformations longitudinales et transversales presque similaires. Les faces indenter des échantillons montrent que lorsque la charge incidente augmentait, la zone de dommage a également augmenté. On conclut qu'une augmentation de la force d'indentation augmente la

concentration de contrainte près de la zone indentée. Des débuts de perforations de l'échantillon sont remarqués quand la charge arrive au environ de 0.8KN, ce qui signifie le mode de dommage rupture des fibres sont bien apparaitre, l'augmentation de la chargeaugmente au même temps la perforation de composite jusqu'à l'ouverture complet.La déformation maximale apparaît près de la région d'indentation etla zone endommagées sous formes elliptiques jusqu'à la perforation complète de pénétrateur.

Plus ou moins les mêmes caractéristiques ont été mises en évidence pour les déplacements. Aucun endommagement n'a été constaté jusqu'à la fin de la partie linéaire et à partir de cette dernière le déplacement commence à changer autour du centre de la région d'indentation, ce qui montrer une dislocation entre chaque image. On a supposé que quelque chose en interne ou en surface peut s'être produite pendant cette période. Le changement de contours pourrait indiquer que la fissuration de la matrice sur la surface arrière a été initiée. L'augmentation des déplacements autour du point d'indentation (centre de la plaque) avec l'augmentation de la charge jusqu'à arrive la pénétration de l'indenteur. Le stratifié subira des dommages importants une fois qu'il aura atteint un niveau élevé d'indentation (charge maximale),avec un déplacement au environ de 6.3mm. Puis la charge se diminuait mais le déplacement augment jusqu'à maximum, environ 11.3mm.

7. Comportement en compression après impact(CAI)

7.1. Propriétés mécaniques résiduelles

Les endommagements causés par les impacts à faible vitesse sont classés comme dangereux car, dans certains cas, les endommagements ne sont pas visibles, et différents mécanismes de dommages (rupture des fibres, fissuration de la matrice, délaminage, etc.) provoqués par l'impact, qui ont tous un impact significatif sur la résistance et la rigidité des matériaux composites et peuvent conduire à leur rupture [56].

Des expériences de compression après impact (CAI) ont été réalisées pour étudier l'influence de l'impact sur les caractéristiques de compression du composite luffa mat/époxy impactés. La résistance maximale à la compression, le module de Young et le déplacement à la rupture ont tous été pris en compte. Les courbes force de compression-déplacement pour tous les échantillons impactés et non impactés de 0, 1, 2 et 3J sont présentées dans la [Figure 31](#).Un effet clair de l'énergie d'impact sur le comportement en compression du composite est observé. Les dommages induits par tous les niveaux d'énergie d'impact ont un effet négatif sur la réponse en compression des spécimens testés. Le spécimen non impacté (0J) a une

résistance à la compression égale à 42.59 MPa. Les spécimens impactés avec une énergie de 1J, sont caractérisés par une résistance à la compression d'environ 37.22 MPa ; les dommages causés réduisent la résistance résiduelle de 12.61%.Cependant, pour une énergie d'impact de 2J, une résistance à la compression de 32,31MPa, une diminution de la résistance à la compression de 24,14% est observée. On pense que cette réduction est liée à l'expansion de la zone endommagée et, en particulier, à l'aggravation de délaminage des couches. Par conséquent, pour une énergie plus élevée de 3J, une diminution remarquable de la résistance à la compression est observée à partir de 29,43 MPa et la résistance résiduelle est réduite de 30,9% par rapport au composite non impacté (0J), comme montre dans la [Figure 32\(b\)](#). Le matériau composite étudié est plus sensible à l'introduction de dommages de délaminage lorsque l'énergie d'impact est plus élevée. Une explication probable est que l'effet de délaminage, qui a provoqué des fissures dans la matrice, a provoqué une concentration de contraintes et, par conséquent, une perte de résistance du composite.

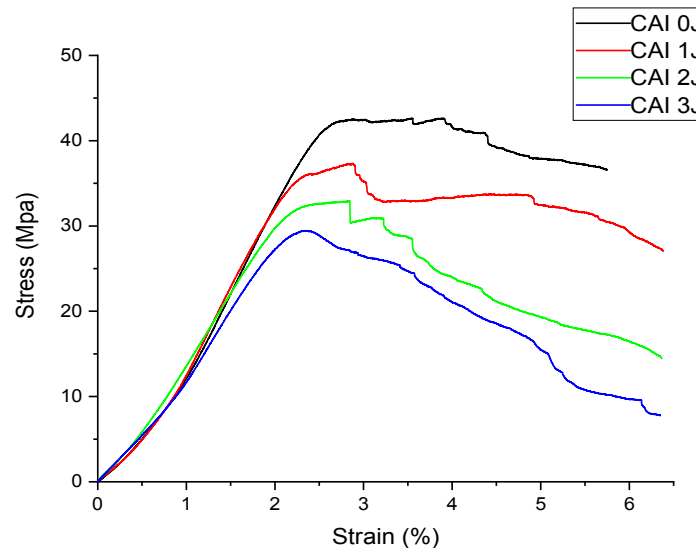


Figure 31. Courbe contrainte-déformation de compression après l'impact (CAI)

Sur la [Figure 32\(A\)](#), aucune réduction significative du module d'Young (1,04, 1,05, 1,1 et 1,09GPa) n'est observée pour tous les niveaux d'énergie d'impact ((0,1,2 et 3J), respectivement). Ce résultat indique que la présence de dommages n'a pas une influence suffisante sur la rigidité résiduelle du composite et nous remarquons de très faibles différences dans les valeurs du module d'Young, qui peuvent être dues à l'épaisseur de l'échantillon ou à l'orientation des fibres dans la structure composite. Dans la [Figure 32\(C\)](#), nous avons observé un déplacement à la rupture de 4.54mm pour le composite non impacté et une augmentation

identique du déplacement à la rupture (5.03, 5.02, et 5.01mm) a été observée pour tous les niveaux d'énergie d'impact ((1,2, et 3J), respectivement).

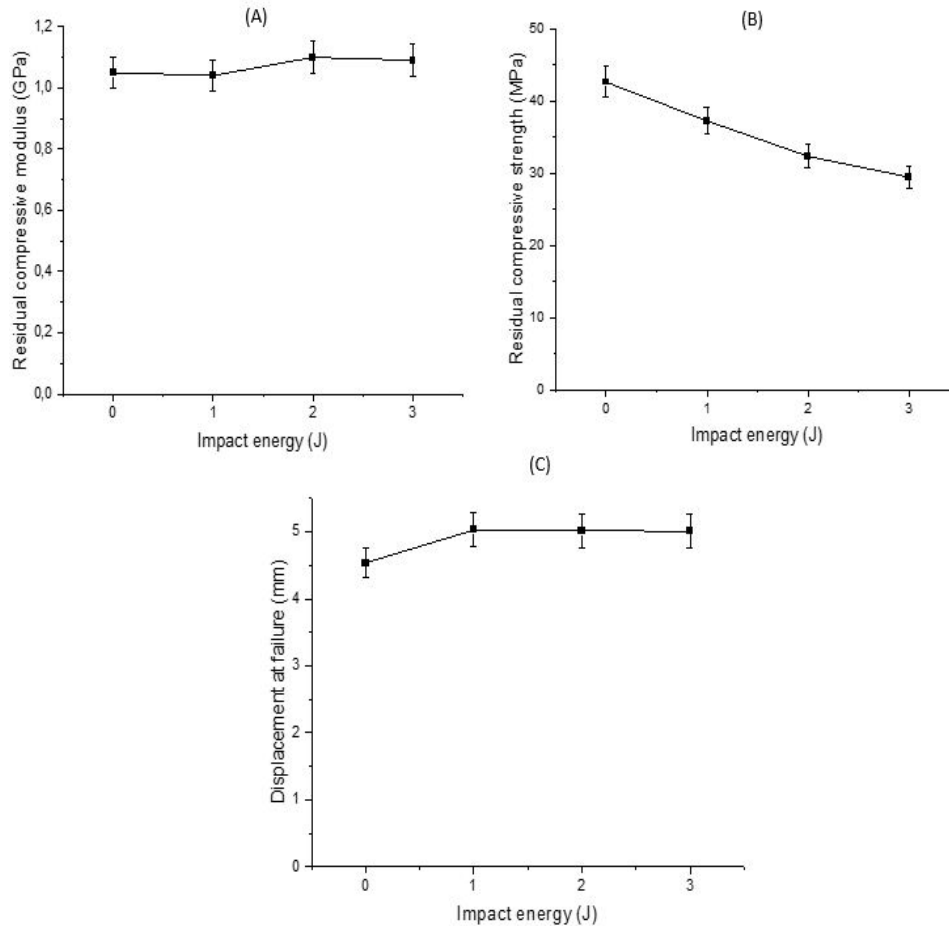


Figure 32. Effet de l'impact sur les propriétés résiduelles de compression, (a) Module résiduel de compression, (b) Résistance résiduelle à la compression, et (c) Déplacement à la rupture.

7.2. Analyse de l'endommagement

7.2.1. Observation des endommagements par VT

Dans cette partie, une inspection visuelle de l'endommagement externe de l'échantillon impacté avant et après la charge de compression, afin de comprendre l'effet de l'endommagement par impact sur la rupture d'un composite. Des images de haute résolution ont été prises, afin d'évaluer les profils d'endommagement à différentes énergies d'impact.

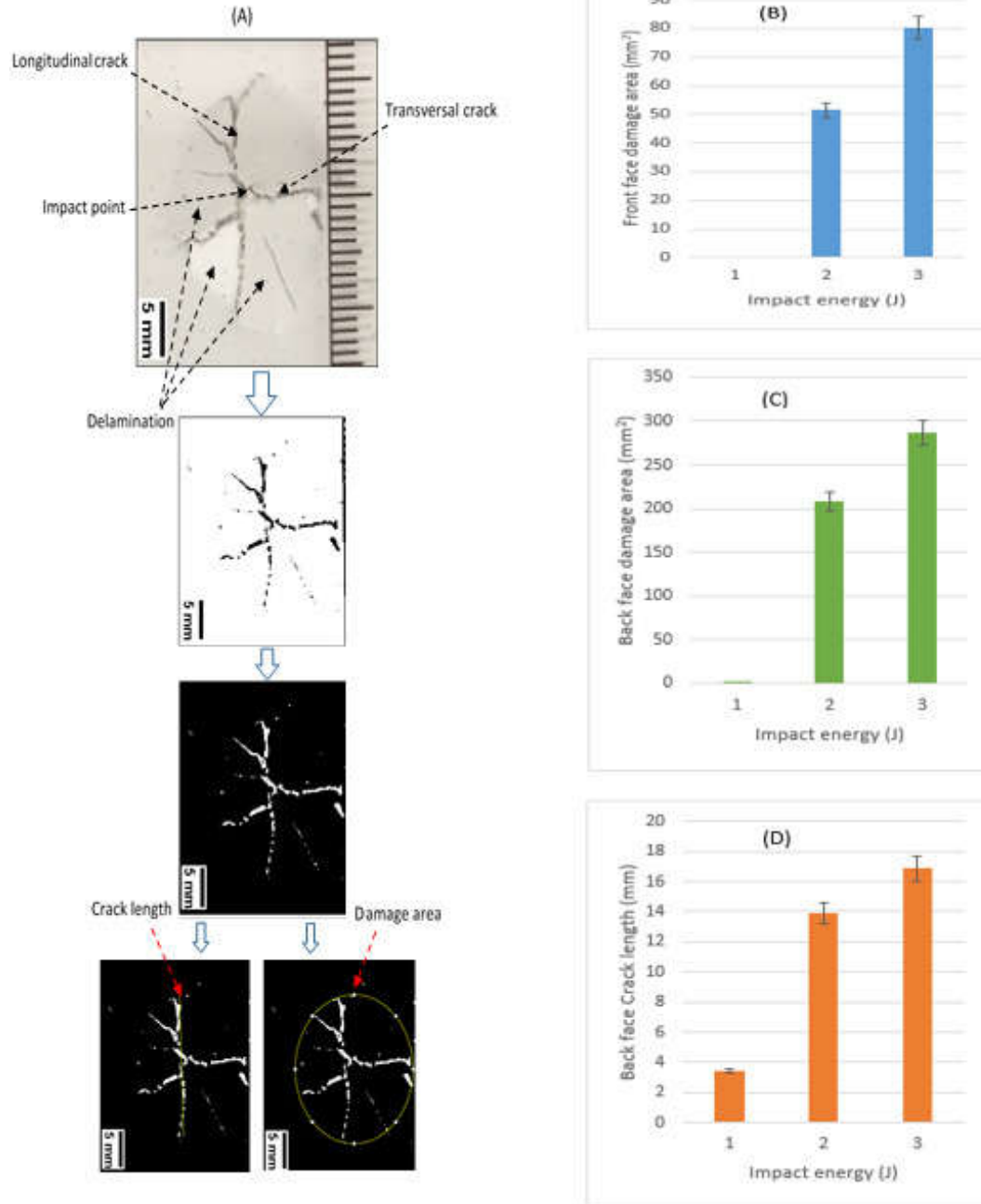


Figure 33. (a) Échantillon impacté à l'aide Image J, (b) Zone endommagée de la face avant, (c) Zone endommagée de la face arrière, et (d) Longueur de la fissure de la face arrière.

La Figure 34(A), (B), montre la face avant (face impactée) et la face arrière (face opposée) des échantillons impactés à différents niveaux d'énergie d'impact de 1J, 2J et 3J et après impact CAI1J, CAI2J et CAI3J. L'une des images originales des composites impactés à 3J et l'image modifiée correspondante à l'aide de la technique Image J, sont présentées à la Figure 33(A). Les types d'endommagements (fissures et zones endommagées) observés sur les

échantillons sont clairement différents et dépendent des niveaux d'énergie d'impact, comme le montrent les [Figures 33\(B\), \(C\)et\(D\)](#).

Pour l'énergie d'impact de 1J, on observe sur la [Figure 34\(A\)](#), la face avant ne présente quasiment aucune trace d'endommagement visible à l'œil, aucune trace de macro-indentation ne peut être identifiée visuellement, mais sur la face arrière, trois petites fissures matricielles apparaissent. L'endommagement résiduel après compression se présente sous la forme d'une fissure sur la face avant au niveau du point d'impact, par contre sur la face arrière, la fissure se propage dans plusieurs directions sous la forme d'une lettre majuscule (X).

Pour une énergie d'impact de 2J, les dommages apparaissent sur les deux faces du composite, la zone endommagée de la face avant est observée ; une pénétration visible est présente dans la forme elliptique. Sur la face arrière, une fissure longitudinale et une fissure transversale majeures apparaissent. Ces fissures se développent vers l'extérieur mais ne sont pas ouvertes et prennent naissance au centre de la plaque avec de petites fissures qui se propagent jusqu'à l'extrémité des fissures majeures. Le dommage résiduel de l'impact montre un effet clair sur la rupture en compression du matériau ; nous observons un déplacement significatif d'une couche qui a commencé à l'extrémité de la zone impactée sur la face avant. La charge de compression augmente la longueur des fissures avant que le flambage local ne se produise près des zones endommagées. La rupture en compression est due à la propagation de fissures résiduelles, qui, avec l'association de la zone délaminage, conduit au flambage global du composite ([Figure 34\(B\)](#)).

En revanche, pour l'énergie d'impact la plus élevée (3J) (à nouveau sur la [Figure 34\(A\) et\(B\)](#)), la pénétration et le délaminage ont été observées beaucoup plus sur les faces de la plaque par rapport à celle impactée par 2J, traces d'une empreinte d'une forme similaire de l'impacteur (hémisphérique) sur la face avant. Le même phénomène a également été observé par Lebaupin et al [\[57\]](#). Sur la face arrière, nous observons que des dommages importants sont très visibles sous le point d'impact qui sont accompagnés des fissures longitudinales et transversales ; ces fissures sont également développées vers l'extérieur mais sont ouvertes. Le chargement en compression des éprouvettes impactées montre la propagation des fissures de la matrice en particulier celle de la direction de chargement (longitudinale) sur les deux faces. L'augmentation de l'énergie d'impact à 3J, a augmenté la pénétration de l'impacteur ; puis le délaminage et le développement des fissures ont conduit à un flambage local qui a eu un effet clair sur la rupture en compression du composite.

Les dommages subis par toutes les énergies d'impact (1, 2 et 3J) sur les faces arrière de tous les échantillons sont plus importants que ceux des faces avant (voir [Figure 33\(B\) et \(C\)](#)).

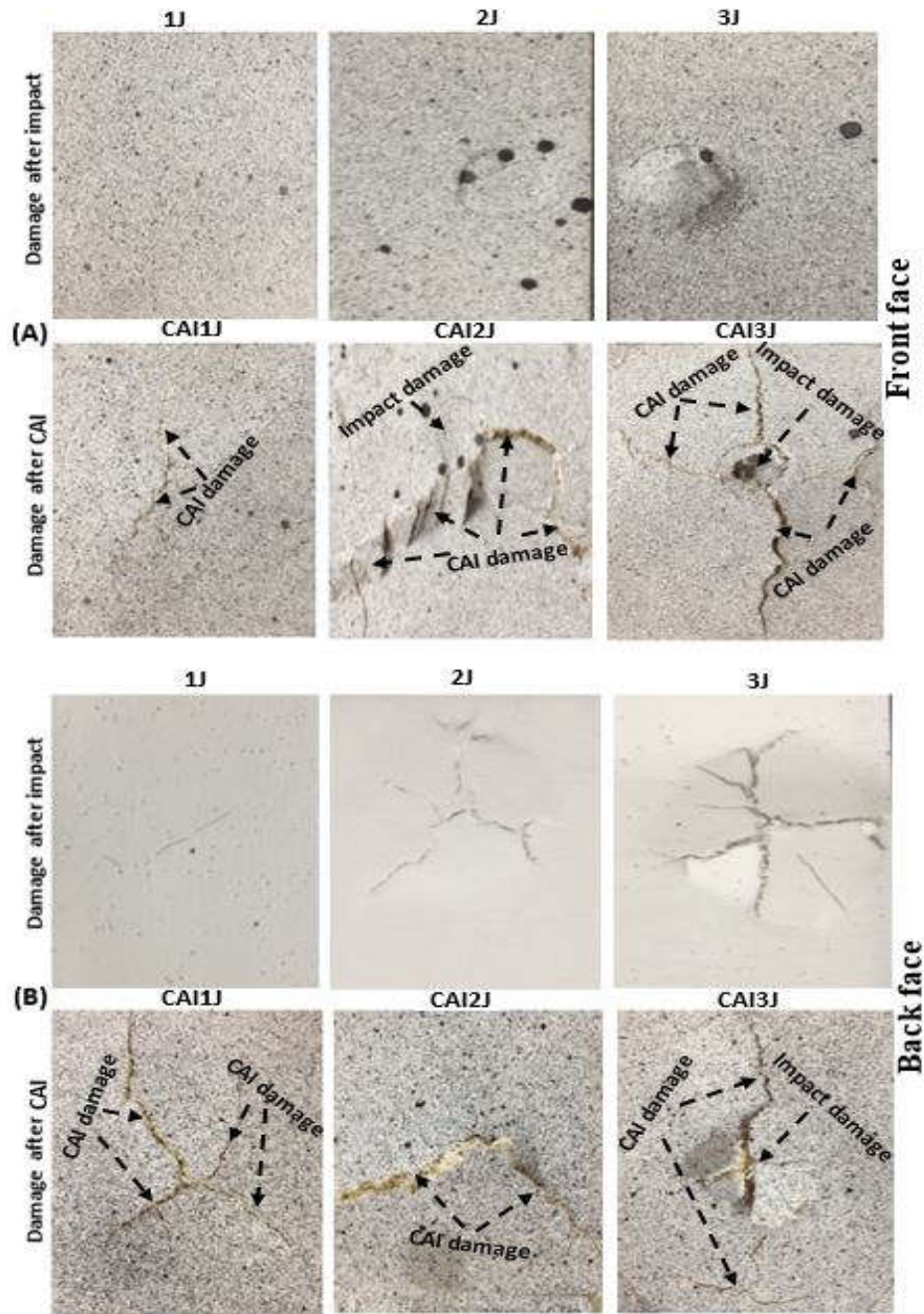


Figure 34. Effet de l'énergie d'impact sur le développement des dommages de CAI ; (a) Face avant, et
(b)Face arrière.

7.2.2. Observation des endommagements par EA

Afin d'évaluer les mécanismes d'endommagement dans les spécimens étudiés pendant les essais CAI, les signaux EA ont été enregistrés et analysés par une analyse multi-variable. En effet, les événements enregistrés sont classés avec l'algorithme des k-moyennes (mains) basé sur les paramètres de classification temporelle. Le traitement des données EA a été appliqué avec la même approche et la même méthode de classification pour tous les essais de

compression après impact sur les composites impactés et non impactés. La classification de l'amplitude et l'énergie des signaux d'EA en fonction du temps a été corrélée aux courbes Force-déplacement et présentée dans les Figures 35 et 36.

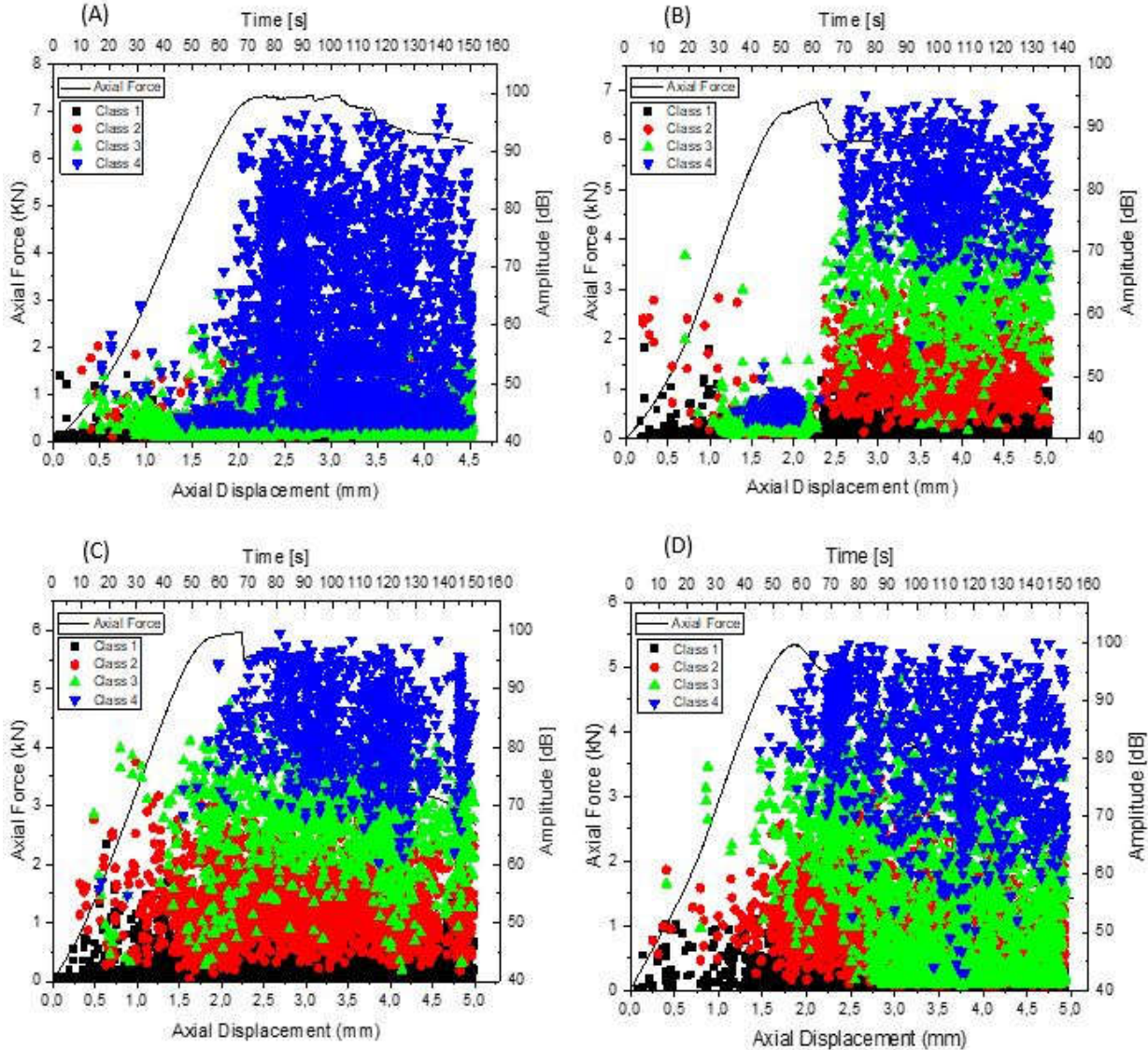


Figure 35. Courbes force-déplacement de la compression après les essais d'impact et les événements acoustiques d'amplitudes avec la classification des modes d'endommagement ; (a) CAI 0J, (b) CAI 1J, (c) CAI 2J, et (d) CAI 3J.

Il est crucial de corréler les signaux AE avec les différents modes d'endommagement afin d'étudier l'effet de l'énergie d'impact sur la rupture des composites impactés et non impactés sous une charge de compression. La Figure 35(A), (B), (C), et (D) présente les résultats de la classification pour les éprouvettes CAI 0J, CAI 1J, CAI 2J, et CAI 3J, respectivement, quatre classes (1, 2, 3 et 4) ont été obtenues et apparaissent simultanément au cours de l'essai de compression après l'impact. Une différence remarquable a été observée dans l'activité

acoustique des stratifiés, ce qui prouve l'effet de niveau d'énergie d'impact sur les composites. Un nombre inférieur d'événements acoustiques a été enregistré sur les composites non impactés (CAI 0J). Entre le début de l'endommagement et la rupture, les dommages dans les composites impactés est caractérisé par une activité acoustique plus élevée mais a survécu à une charge moins élevée avec une augmentation d'énergie d'impact. Les événements de la classe 1 montrent une initiation des dommages dès que la force axiale est appliquée. L'accroissement supplémentaire du niveau de charge augmente le nombre d'événements enregistrés de la classe 1, en particulier à partir de 13 s avec un déplacement d'environ 0,35 mm jusqu'à la rupture pour le composite non impacté (Figure 35(A)). Les classes (1) possèdent des faibles amplitudes comprises entre 40-58dB et sont attribuées à la fissuration matricielle, le nombre de type d'évènement de classe 1 augmente avec l'augmentation de l'énergie d'impact. Ensuite, les événements de la classe 2 ont été détectés avec un nombre d'événements plus grand que la classe 1 et avec des valeurs d'amplitudes plus élevées comprise entre 40-80dB. L'apparition de cette classe coïncide avec la deuxième phase (quasi-élastique) de la courbe de charge/temps. Elle correspond à la décohésion fibre-matrice. Par la suite, on retrouve une troisième classe notée (3) apparaissant presque aux milieux des autres classes, les amplitudes de cette classe varient entre 41- 93dB. Cette classe correspond au délaminage. Pour le dernière mode d'endommagement c'est la quatrième classe notée (4), la majorité des événements acoustiques de cette classe apparaît beaucoup plus à la fin de l'essai avec des amplitudes qui sont comprises entre 43-99dB et plus élevées que les trois autres classes. Ces événements surviennent avant la rupture finale de l'éprouvette et elle est attribuée à la rupture des fibres. Elle a un grand événement acoustique par rapport aux autres classes pour le composite non impacté (CAI 0J). Une différence de l'intervalle des amplitudes de la même classe de chaque composite impacté, une augmentation de l'amplitude avec le niveau d'énergie d'impact. Le plus nombre des événements des signaux d'EA des composites impactés est principalement dû à la décohésion fibre-matrice.

La Figure 36 montre que l'évolution de l'énergie cumulée de l'EA augmente avec l'augmentation de l'énergie d'impact tendance avec l'endommagement au sein des composites impactés, ce qui signifie l'effet d'énergie d'impact sur l'endommagement. Les valeurs cumulatives restent faibles jusqu'à un changement significatif après l'initiation d'un troisième type d'endommagement (classe 3). Cela confirme que les événements acoustiques de la première et la deuxième classe, se réfèrent à deux mécanismes de dommage à faible énergie EA, à savoir classe 1 correspondant à la fissuration de la matrice et classe 2 correspondant au décohésion fibre-matrice.

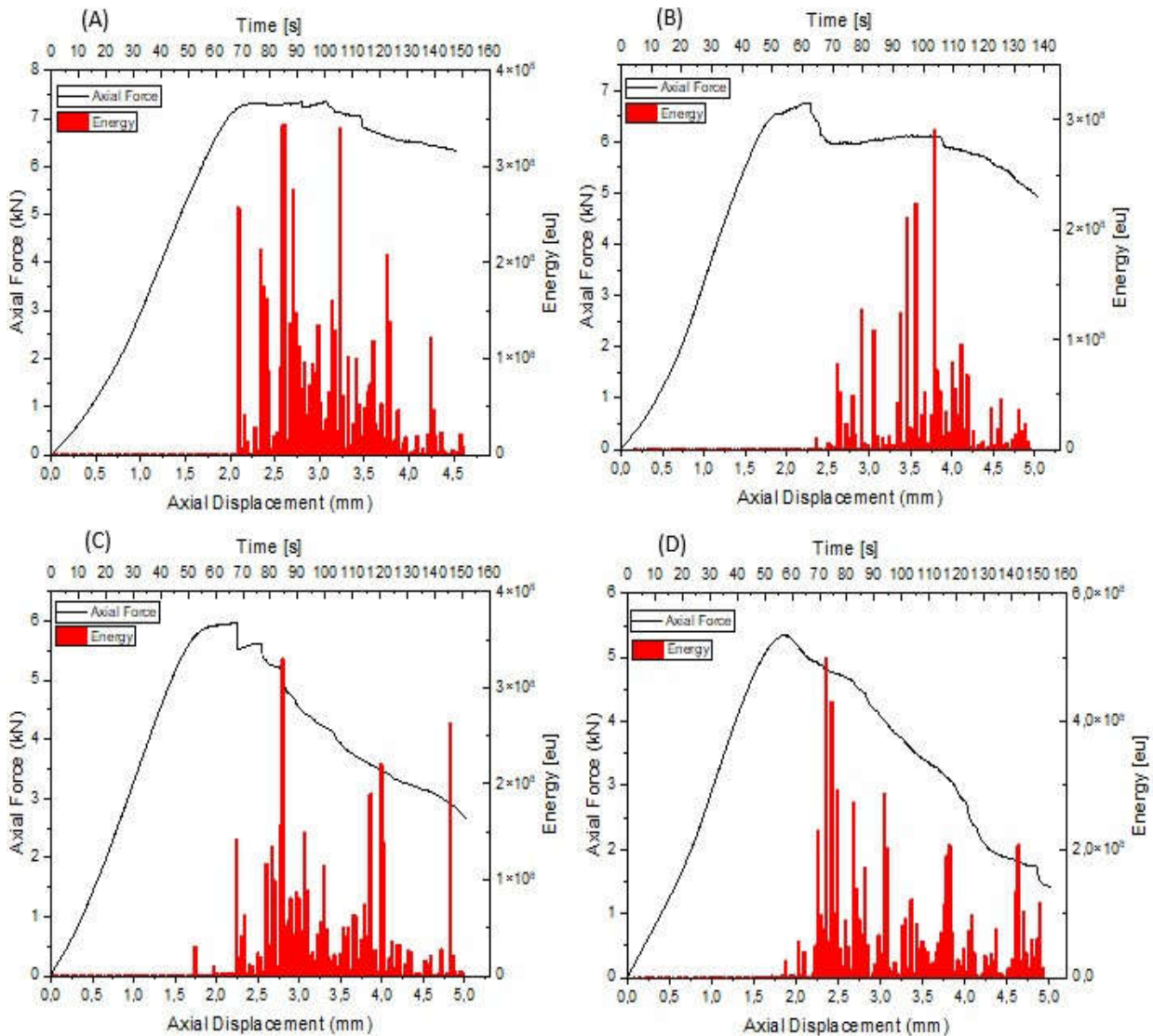


Figure 36. Courbes force-déplacement de la compression après les essais d'impact et l'énergie EA cumulative de : (a) CAI 0J, (b) CAI 1J, (c) CAI 2J, et (d) CAI 3J.

Par la suite, une augmentation de l'énergie EA remarquablement avec des histogrammes au le milieu de la courbe, ce qui signifie des autres classes d'un grand événement acoustique apparaitre. Cependant, la plupart des chercheurs associent la fissuration de la matrice à une énergie et amplitude les plus faibles, et la rupture des fibres à une énergie et amplitude les plus élevées et la décohésion fibre-matrice est située entre ces deux mécanismes de dommages [8,55]. Une présentation énergétique en plus grand histogramme pour tous les composites impactés et non impactés a permis de situer les événements à forte énergie au milieu de la courbe. Ces énergies correspondent au délaminage et les plus fortes énergies à la rupture des fibres. Cette attribution d'endommagement a été confirmée par les fortes amplitudes qu'était citée

précédemment dans la [Figure 35](#). On a observé que l'énergie d'EA des ruptures des fibres (2.91×10^8 , 3.30×10^8 , et 4.98×10^8 eu) pour les composites impactés augment avec l'augmentation de niveau d'énergie d'impact (1, 2, et 3J), comme montre dans la [Figure 36\(B\)](#), [\(C\)](#), et [\(D\)](#), respectivement, ce qui nous montre une autre fois l'effet de niveau d'énergie d'impact sur l'endommagement.

7.2.3. Observation des endommagements par MEB

Afin de confirmer nos résultats sur les mécanismes d'endommagement identifiés par l'EA pendant les essais CAI des composites luffa/époxy, nous avons effectué une analyse microscopique à l'aide d'un microscope électronique à balayage (MEB), sur des échantillons d'impactés et de post-impactés (CAI).

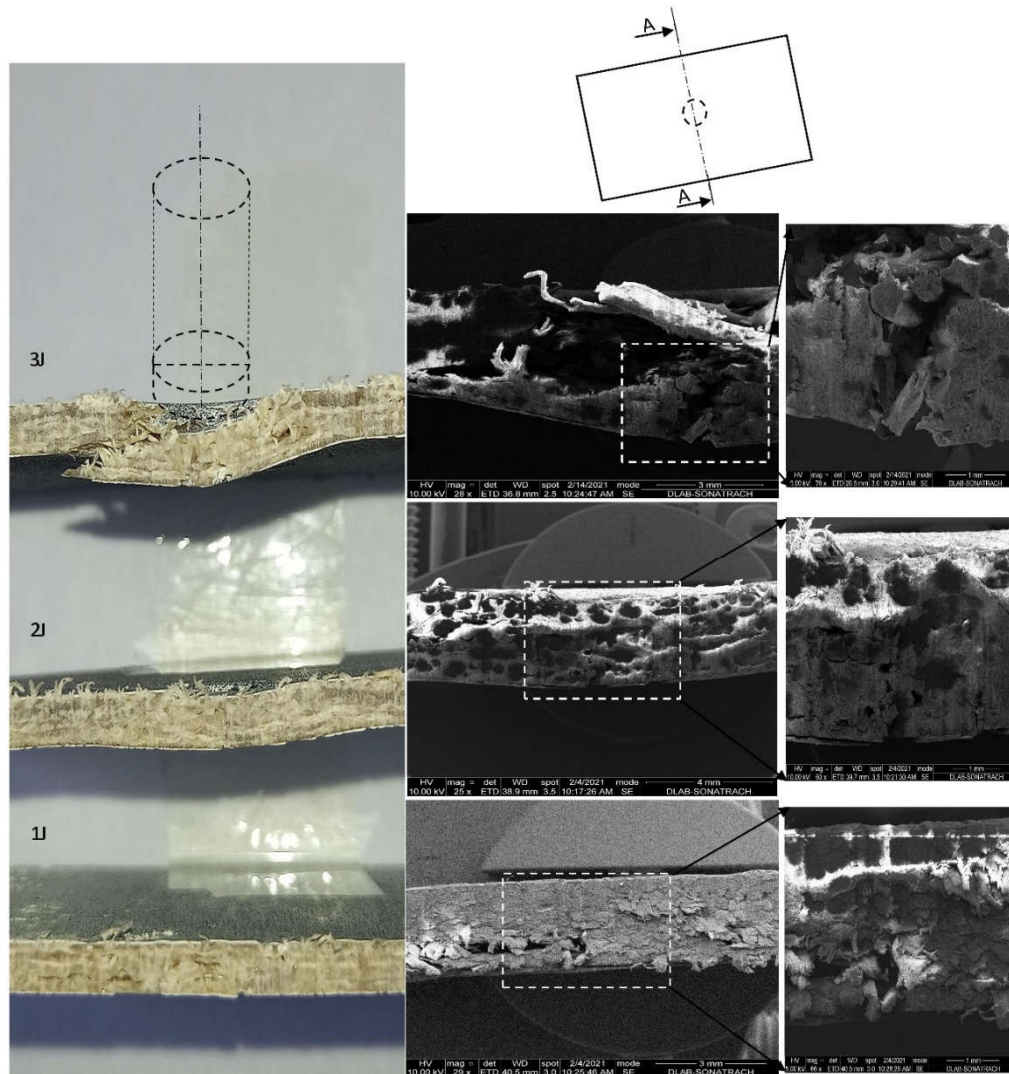


Figure 37. Images de MEB des surfaces de rupture des spécimens impactés.

Les Figures 37et38montrent des images MEB de la fracture en coupe transversale et des dommages à l'échelle microscopique des stratifiés impactés et compression après l'impact, respectivement. Plusieurs modes d'endommagement distincts, dont le plus visible est le délaminage et la rupture des fibres, et le moins observé est le décohésion fibres-matrice et la fissuration de la matrice. L'image de microscope électronique à balayage (MEB) de la surface de fracture du composite impacté par 1 J, montre le mode de délaminage, mais il n'était pas visible sur la face avant et arrière avec l'inspection visuelle dans la Figure 34(B), ce qu'on est appelé Barely Visible Impact Damage (BVID).Nous observons une déflexion du composite impacté 2J, qui implique un décohésion fibres-matrice sur la face arrière (qui était également invisible sur la Figure 34(B) lors d'une inspection visuelle), un délaminage et une fissuration importante a été observé dans le sens de l'épaisseur de l'échantillon. Les images MEB révèlent également que l'étendue des dommages augmente avec l'augmentation des niveaux d'énergie incidente. Ces images suggèrent également qu'à des niveaux d'énergie plus élevés, les composites subissent de graves dommages, avec des preuves de rupture des fibres et de délaminage (déplacement complet), en particulier dans le composite d'impact 3 J.

Les images MEB des composites subis la compression après impact CAI0J, CAI1J, CAI2J et CAI3J sont présentées respectivement dans les Figures 38(A), (B), (C) et (D). Le premier mode de fissuration de la matrice n'est pas très visible sur les images MEB, ce qui a été montré précédemment avec les événements à faible émission acoustique dans les Figures 35 et36, les modes de dommages suivants sont observés : décohésion fibre-matrice, délaminage, et rupture des fibres et se propagent beaucoup plus en tendance avec l'augmentation de l'énergie d'impact et sont très clairs sur les composites, en particulier les deux derniers modes de dommages (avec l'inspection visuelle de la Figure 34 (A et B) sur les faces avant et arrière), tandis que le délaminage induite par le flambement est le mode d'endommagement dominant dans les essais CAI. Les images MEB (dommages internes) nous montrent qu'un impact à faible vitesse ou à faible énergie (sur tous ceux qui sont vraiment invisibles) et qu'après le post-d 'impact surtout en compression sur le composite peut subir des dommages importants qui conduisent à la rupture du matériau composite. Au final, nous concluons que les mécanismes de dommages identifiés par EA ont été confirmés par les observations microscopiques.

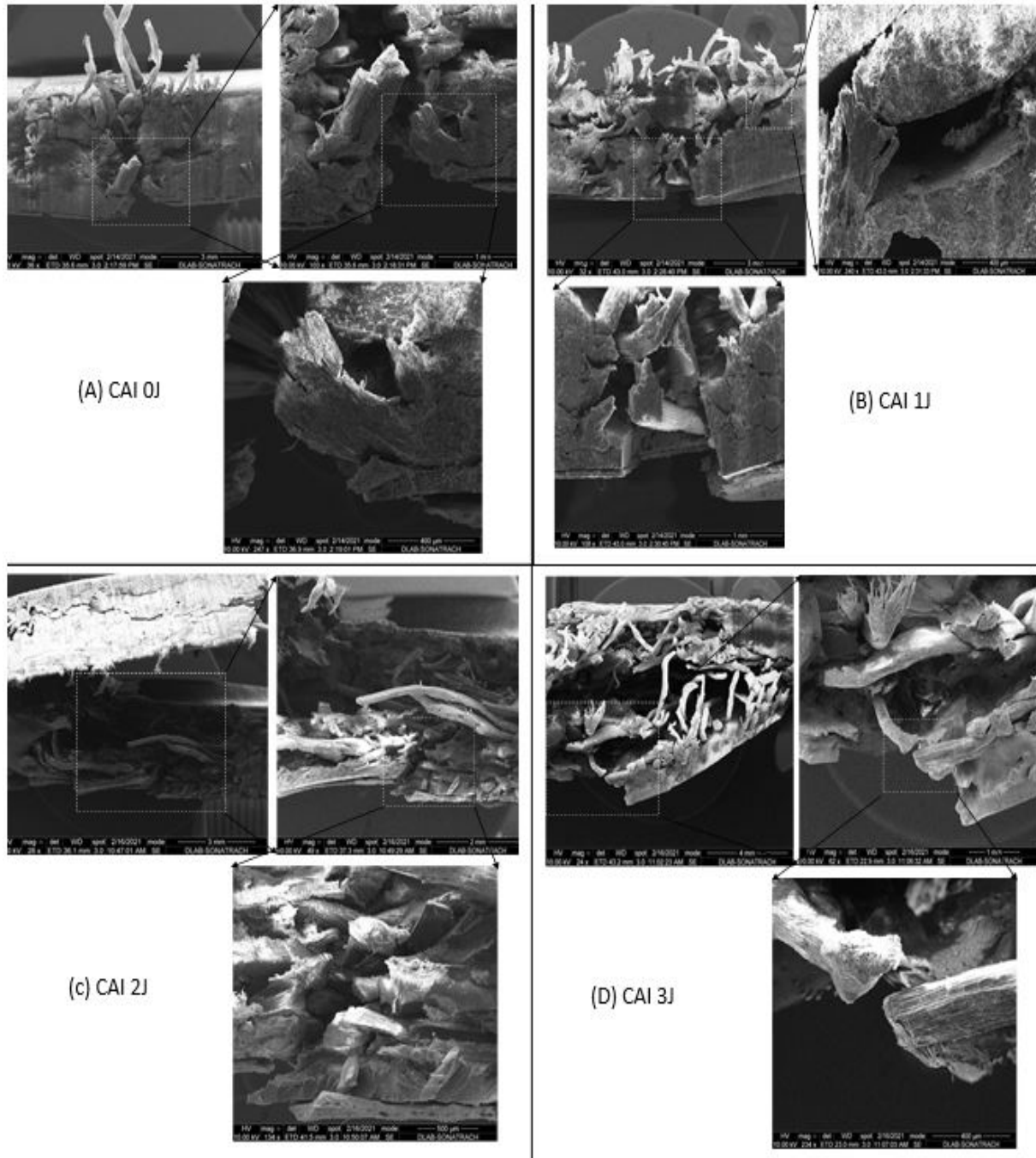


Figure 38. Images MEB des surfaces de fracture des spécimens impactés après compression ; (a) CAI0J, (b). CAI1J, (c) CAI2J, et (d) CAI3J.

7.2.4.Evaluation des déformations et déplacements par CIN

La mesure du déplacement avec une caméra CCD donne une distribution complète du champ de déplacement sur la face avant, tout en enregistrant les images du motif moucheté pendant l'essai de compression après impact (CAI).

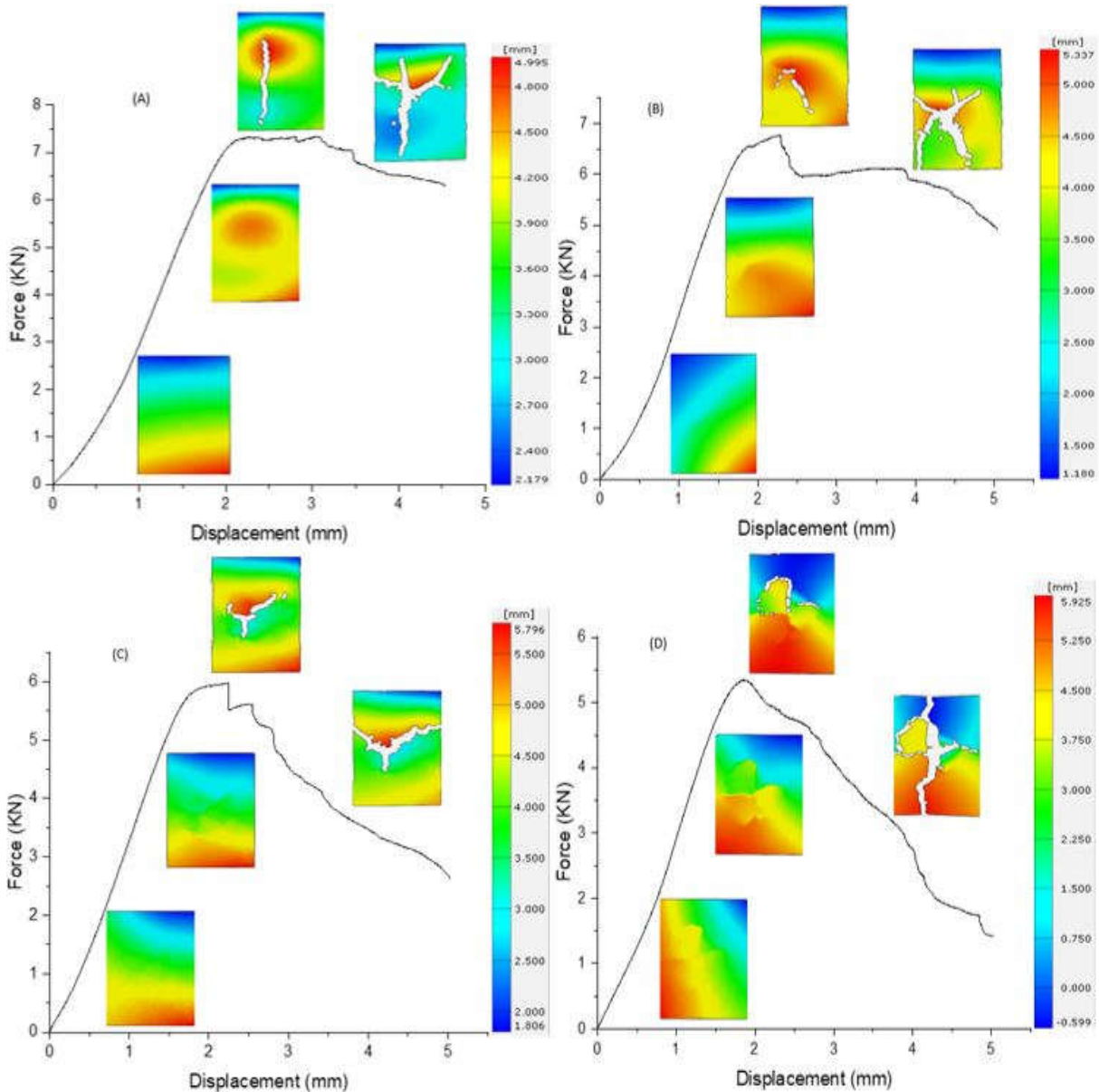


Figure 39. Courbe force-déplacement et champs de déplacement longitudinal mesurés par CIN en Compression pour les spécimens impactés (a) CAI 0J, (b) CAI 1J, (c) CAI 2J, et (d) CAI 3J.

La [Figure 39](#) montre le résultat de la corrélation d'images numériques (CIN), indiquant les contours des champs de déplacement résiduels des composites. On constate que le comportement de déplacement change en raison des dommages résiduels de l'impact, ce qui induit un changement dans les contours de la déformation. Il a été observé sur la [Figure 39\(A\)](#) que le champ de déplacement dans la zone centrale de l'échantillon non impacté (0J), commence à changer et l'apparition de fissures avec l'augmentation de la force de compression, ce qui a permis le développement de la fissure dans la direction de la charge pendant les essais jusqu'à la rupture finale. Une instabilité locale du champ de déplacement a été observée dès le début de l'essai sur le composite impacté 1J ([Figure 39\(B\)](#)) ; le développement de la fissure de

la matrice se fait dans plusieurs directions ; ceci est clairement visible sur la carte des déplacements avec la concentration locale des contraintes dans la zone centrale du point d'impact.

Pour le composite impacté avec une énergie d'impact de 2J en détail ([Figure 39\(C\)](#)), autour du centre de la zone d'impact, les contours de déplacement montrent des dislocations. L'augmentation de la charge de compression provoque la propagation de fissures résiduelles, ce qui a déjà été vu avec l'augmentation des événements acoustiques de classe 1 dans la [Figure 35\(B\)](#), ainsi qu'une augmentation du flambement local de la zone de délaminage, ce qui a été observé avec l'inspection visuelle CAI2J dans la [Figure 34\(A et B\)](#)et également avec la microscopie électronique à balayage (MEB) CAI2J dans la [Figure 36 \(C\)](#) et l'augmentation de la déformation de la zone de délaminage est observée. Dans une autre approche, l'état de déplacement indique que le délaminage se produit perpendiculairement à la direction de chargement, ce qui entraîne la rupture complète du composite. Un effet plus important de l'endommagement induit à 3 J est clairement visible sur le champ de déplacement du matériau composite. La [Figure 39\(D\)](#) montre les endommagement préexistants et nouvellement générés sous une charge de compression, qui conduit à une concentration plus rapide des contraintes autour de la zone d'impact, ce qui a été mentionné précédemment avec l'augmentation de l'énergie et de l'événement acoustique dans les [Figures 35\(D\) et 36\(D\)](#). L'augmentation de la charge de compression entraîne une propagation des fissures résiduelles autour de la zone d'impact, qui se développe dans la direction transversale et beaucoup plus dans la direction longitudinale (direction de la charge), ce qui signifie que la propagation des fissures est soumise à un flambement global, comme le montre l'inspection visuelle CAI3J dans la [Figure 34\(A et B\)](#). Cela suggère que l'instabilité se produit d'abord au niveau des fractures induites par l'impact et de la région la plus où y a le délaminage, qui se propagent ensuite pour conduire à une perte de résistance du composite.

8. Conclusion

Le comportement mécanique du composite luffa/époxy a été étudié grâce à des différents moyens. Des caractérisations des composites en traction et flexion ont été déterminées sur des éprouvettes ayant différents traitements alcalins. Les essais de traction ont été suivis par émission acoustique et corrélation d'image numérique afin de détecter et de suivre l'évolution des principaux mécanismes d'endommagement avec une approche de classification non supervisée par la méthode des "k-mans", ainsi les déformations et les coefficients de Poisson. Les résultats ont montré que le traitement alcalin de 5% a amélioré la résistance à la traction, mais le traitement de 2% a amélioré le module de Young. Quatre classes de mécanismes d'endommagements ont été identifiées, y compris la fissuration de la matrice, l'arrachement des fibres, le délaminage, et la rupture des fibres. L'énergie cumulée et les coups du composite traité à 5 % étaient inférieurs à ceux des composites non traités et traités à 2 %, ce qui signifie que le composite traité à 5 % a subi moins de dommages. La technique CIN permet également de trouver les déformations transversales des composites, elle est montrée aussi que le traitement alcalin à 5% conduit à la diminution du coefficient de Poisson par rapport aux composites traités à 2% et non traités. Donc, sur la base des résultats EA, CIN et les propriétés mécaniques, le composite T5% est le plus performant.

Des essais d'impact à basse vitesse ont été réalisés sur quatre composites nommés (A), (B), (C), et (D). Les résultats montrent que le composite (C) est le plus résistant à l'impact suivi par le composite (A), par contre le composite (D) est le plus absorbant d'énergie suivi par le composite (B). Par la suite des essais d'indentation ont été réalisés et des techniques d'analyses ont été menées sur des éprouvettes qui sont couplées aussi aux techniques de caractérisation par émission acoustique et la corrélation d'image numérique. Les résultats d'EA identifient quatre modes d'endommagement, y compris la fissuration de la matrice, la décohésion fibre-matrice, le délaminage, et la rupture des fibres.

La dernière partie de ce chapitre a été consacrée à la compression après impact (CAI). L'effet de l'énergie d'impact et l'influence de la zone endommagée sur les propriétés mécaniques résiduelles sous compression ont été déterminés. L'émission acoustique (EA), la corrélation d'images numériques (CIN) et la microscopie électronique à balayage (MEB) ont été utilisées, pour l'évolution des différents modes d'endommagements et les champs de déplacements. Les résultats révèlent que les CAI 1J, CAI 2J et CAI 3J montrent un effet de l'endommagement résiduel diminue la résistance résiduelle à la compression, par rapport au composite non impacté, par contre le module de Young n'est pas affecté de manière significative. L'analyse des

signaux EA a permis d'identifier quatre classes de dommages, elle a également montré que le mode d'endommagement des composites non impactés, qui présente la majorité des événements d'amplitude des signaux EA, est principalement dû à la rupture des fibres, alors que pour les composites impactés, est principalement dû à la décohésion fibre-matrice. La technique CIN a constaté que l'augmentation de l'énergie d'impact augmente la concentration de contraintes autour de la zone impactée.

Référencesbibliographiques

- [1] Li, X., L.G. Tabil, and S. Panigrahi, Chemical treatments of natural fiber for use in natural fiberreinforced composites: a review. *Journal of Polymers and the Environment*, 2007. 15(1): 25-33.
- [2] Al-Mobarak, T., M. Mina, and M. Gafur, Improvement in mechanical properties of spongegourd fibers through different chemical treatment as demonstrated by utilization of the Weibull distribution model. *Journal of Natural Fibers*, 2020. 17(4): 573-588.
- [3] Mohanta, N. and S. Acharya, Fiber surface treatment: Its effect on structural, thermal, andmechanical properties of Luffa cylindrica fiber and its composite. *Journal of composite materials*, 2016. 50(22): 3117-3131.
- [4] Anbukarasi, K. and S. Kalaiselvam, Study of effect of fibre volume and dimension onmechanical, thermal, and water absorption behaviour of luffa reinforced epoxy composites.*Materials &Design (1980-2015)*, 2015. 66: 321-330.
- [5] Mysamy, K. and I. Rajendran, Influence of alkali treatment and fibre length on mechanicalproperties of short Agave fibre reinforced epoxy composites. *Materials & Design*, 2011. 32(8): 4629-4640.
- [6] Yan, L., N. Chouw, and X. Yuan, Improving the mechanical properties of natural fibre fabricreinforced epoxy composites by alkali treatment. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*,2012. 31(6): 425-437.
- [7] Habibi, M., et al., Combining short flax fiber mats and unidirectional flax yarns for compositeapplications: Effect of short flax fibers on biaxial mechanical properties and damage behaviour. *Composites Part B: Engineering*, 2017. 123: 165-178.
- [8] Habibi, M., G. Lebrun, and L. Laperrière, Experimental characterization of short flax fiber matcomposites: tensile and flexural properties and damage analysis using acoustic emission. *Journal of materials science*, 2017. 52(11): 6567-6580.
- [9] Monti, A., et al., Mechanical behaviour and damage mechanisms analysis of a flax-fibre reinforcedcomposite by acoustic emission. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2016.90: 100-110.
- [10] Saidane, E.H., et al., Mode-I interlaminar fracture toughness of flax, glass and hybrid flax-glass fibre woven composites: Failure mechanism evaluation using acoustic emission analysis *Polymer Testing*, 2019. 75: 246-253.
- [11] Bonnafous, C., Analyse multi échelle des mécanismes d'endommagement de composites chanvre/époxy à renforts tissés. 2010, Chasseneuil-du-Poitou, Ecole nationale supérieure de mécanique.
- [12] Nimdum, P. and J. Renard. Use of acoustic emission to discriminate damage modes in carbonfibre reinforced epoxy laminate during tensile and buckling loading. in 15th Europeanconference on composite materials, Venice (ECCM–150). 2012.

- [13] K. Ashok, D. Ajith, C. Bibin, R. Sheeja, R. Nishanth, Influence of Nanofiller Lignite Fly Ash on Tribo-Mechanical Performance of Sansevieria Roxburghiana Fiber Reinforced Epoxy Composites, *J. Nat. Fibers*. (2021) 1-15.
- [14] S.K. Saw, R. Purwar, S. Nandy, J. Ghose, G. Sarkhel, Fabrication, characterization, and evaluation of luffacylindrica fiber reinforced epoxy composites, *BioResources*, 8 (2013) 4805-4826.
- [15] S. Dharmalingam, O. Meenakshisundaram, V. Elumalai, R.S. Boopathy, An Investigation on the Interfacial Adhesion between Amine Functionalized Luffa Fiber and Epoxy Resin and Its Effect on Thermal and Mechanical Properties of Their Composites, *J. Nat. Fibers*. 18 (2021) 2254-2269.
- [16] J. Cruz, R. Fangueiro, Surface Modification of Natural Fibers: A Review, *Procedia. Eng.* 155 (2016) 285-288.
- [17] R. Jino, R. Pugazhenth, K.G. Ashok, T. Ilango, P.R.K. Chakravarthy, Enhancement of Mechanical Properties of Luffa Fiber/Epoxy Composite Using B4C, *J. Adv. Microsc. Res.* 12 (2017) 89-91.
- [18] K.N. Raj, K. Ashok, Design and fabrication of vibration damping pad using Luffa Cylindrica fiber reinforced polymer composite, *Int J. Multidiscip. Res. Mod. Educ.* 2 (2016) 441-448.
- [19] N. Mohanta, S. Acharya, Tensile, flexural and interlaminar shear properties of Luffa cylindrica fibre reinforced epoxy composites, *Int J. Macromol. Sci.* 3 (2013) 6-10.
- [20] S. Ichetaonye, I. Madufor, M. Yibowei, D. Ichetaonye, Physico-mechanical properties of Luffa aegyptiacafiber reinforced polymer matrix composite, *Open J. Compos. Mater.* 5 (2015) 110.
- [21] R. Panneerdhass, A. Gnanavelbabu, K. Rajkumar, Mechanical Properties of Luffa Fiber and Ground nut Reinforced Epoxy Polymer Hybrid Composites, *Procedia. Eng.* 97 (2014) 2042-2051.
- [22] A. Behera, J. Dehury, M.M. Thaware, A comparative study on laminated and randomly oriented Luffa-Kevlar Reinforced hybrid composites, *J. Nat. Fibers*. 16 (2019) 237-244.
- [23] V.O. Tanobe, T. Flores-Sahagun, S.C. Amico, G. Muniz, K. Satyanarayana, Sponge gourd (Luffa cylindrica) reinforced polyester composites: preparation and properties, *Def Sci J.* 64 (2014) 273-280.
- [24] A. Dhanola, A.S. Bisht, A. Kumar, A. Kumar, Influence of natural fillers on physico-mechanical properties of luffa cylindrica/ polyester composites, *Mater. Today: Proc.* 5 (2018) 17021-17029.
- [25] G. Kalusuraman, I. Siva, Y. Munde, C.P. Selvan, S.A. Kumar, S.C. Amico, Dynamic-mechanical properties as a function of luffa fibre content and adhesion in a polyester composite, *Polym Test.* 87 (2020) 106538.
- [26] F.Z. Arrakhiz, K. Ben Hamou, F. Erchiqui, D. Hammiche, H. Kaddami, Development and characterization of hybrid composite laminate based on luffa and glass fibers, *Mater. Today: Proc.* 36 (2021) 22-28.
- [27] V.K. Patel, A. Dhanola, Influence of CaCO₃, Al₂O₃, and TiO₂ microfillers on physico-mechanical properties of Luffa cylindrica/polyester composites, *Eng. Sci. Technol. An*

Int. J. 19 (2016) 676-683.

[28] Y. Seki, K. Sever, S. Erden, M. Sarikanat, G. Nesar, C. Ozes, Characterization of Luffa cylindrica fibersand the effect of water aging on the mechanical properties of its composite with polyester, J. Appl. Polym.Sci.123 (2012) 2330-2337.

[29] A.M. Avecilla-Ramírez, M. del Rocío López-Cuellar, B. Vergara-Porras, A.I.Rodríguez-Hernández, E.Vázquez-Núñez, Characterization of poly-hydroxybutyrate/luffa fibers composite material, BioResources,15 (2020) 7159-7177.

[30] S.N.s. Umar Shaifudin, D. Kamarun, N.H. Seth, E.Z. Engku Zawawi, Mechanical Properties of HighLoading Luffa acutangula Fiber with Cloisite 15A and Polypropylene, Adv Mat Res. 1134 (2016) 178-184.

[31] M. Sakthivel, S. Vijayakumar, S. Ramesh, Production and Characterization of Luffa/Coir ReinforcedPolypropylene Composite, Proc.Mater. Sci. 5 (2014) 739-745.

[32] V.A. Escocio, L.L. Visconte, A.d.P. Cavalcante, A.M.S. Furtado, E.B. Pacheco, Study of mechanical andmorphological properties of bio-based polyethylene (HDPE) and sponge-gourds (Luffa-cylindrica)agroresidue composites, AIP Conference Proceedings, AIP Publishing LLC, 2015, 060012.

[33] A.N. Jarad, W.A. Radhi, K.A. Hussain, I.K. Ibrahim, F.J. Mohammed, Study Mechanical Properties ofLow Density Polyethylene/Luffa Composite, Misan J. Acad. Stud. 13 (2014).

[34] F.-L. Jin, X. Li, S.-J. Park, Synthesis and application of epoxy resins: A review, J. Ind. Eng. Chem. 29 (2015) 1-11.

[35] C.A. Adeyanju, S. Oggunniyi, J.O. Ighalo, A.G. Adeniyi, S.A. Abdulkareem, A review on Luffa fibres andtheir polymer composites, J. Mater. Sci. 56 (2021) 2797-2813.

[36] A.G. Adeniyi, D.V. Onifade, J.O. Ighalo, A.S. Adeoye, A review of coir fiber reinforced polymercomposites, Compos. B. Eng. 176 (2019) 107305.

[37] Militello, C.; Bongiorno, F.; Epasto, G.; Zuccarello, B. (2020). Low-velocity impact behaviour of green epoxy biocomposite laminates reinforced by sisal fibers. Composite Structures, (), 112744–. doi: 10.1016/j.compstruct.2020.112744

[38] Leroy, A., Scida, D., Roux, É., Toussaint, F., &Ayad, R. (2021). Are there similarities between quasi-static indentation and low velocity impact tests for flax-fibre composites? Industrial Crops and Products, 171, 113840. doi: 10.1016/j.indcrop.2021.113840

[39]Habibi, M., Abbassi, F., Laperrière, L., Quasi-Static Indentation and Acoustic Emission to Analyze Failure and Damage of Bio-composites Subjected to Low-Velocity Impact, Composites: Part A (2022),doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2022.106976>

[40]Spyros G Pantelakis, Christos V Katsiropoulos, Panagiota V Polydoropoulou.2016. Assessing the compression after impact behaviour of innovative multifunctional composites. Nanomaterials and Nanotechnology. <https://doi.org/10.1177/1847980416679627>

[41] Wang, C., Wang, H., Shankar, K., Morozov, E. V., &Hazell, P. J. (2021). On the mechanicalbehaviour of steel wire mesh subjected to low-velocity impact. Thin-Walled Structures, 159, 107281.doi: 10.1016/j.tws.2020.107281

[42]Mahesh, V., Joladarashi, S., &Kulkarni, S. M. (2019). An experimental investigation on

low-velocity impact response of novel jute/rubber flexible bio-composite. Composite Structures, 225, 111190. doi: 10.1016/j.compstruct.2019.111190

[43]Rubio-López, A.; Artero-Guerrero, J.; Pernas-Sánchez, J.; Santiuste, C. (2017). Compression after impact of flax/PLA biodegradable composites. Polymer Testing, 59(), 127–135. doi: 10.1016/j.polymertesting.2017.01.025

[44] Caprino, G., Carrino, L., Durante, M., Langella, A., Lopresto, V., Low impact behavior of hemp fibre reinforced epoxy composites, Composite Structures (2015), doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.08.029..>

[45] Petrucci R, Santulli C, Puglia D, Nisini E, Sarasini F, Tirillò J, et al. Impact and post-impact damage characterisation of hybrid composite laminates based on basaltfibres in combination with flax, hemp and glass fibres manufactured by vacuum infusion. Compos Part B Eng 2015;69:507–15.

[46] Dhakal HN, Zhang ZY, Richardson MOW, Errajhi OAZ. The low velocity impact response of non-woven hemp fibre reinforced unsaturated polyester composites. Compos Struct 2007;81:559–67.

[47] Sarasini F, Tirillò J, D’Altilia S, Valente T, Santulli C, Touchard F, et al. Damage tolerance of carbon/flax hybrid composites subjected to low velocity impact. Compos Part B Eng 2016;91:144–53

[48] Fragassa C, Pavlovic A, Santulli C. Mechanical and impact characterisation of flax and basalt fibrevinylester composites and their hybrids. Compos Part B Eng 2018;137:247–59.

[49] Ahmed KS, Vijayarangan S, Kumar A. Low velocity impact damage characterization of woven jute-glass fabric reinforced isothalic polyester hybrid composites. J Reinf Plast Compos 2007;26:959–76

[50] Evci C, Gülgeç M. An experimental investigation on the impact response ofcomposite materials. Int J Impact Eng 2012;43:40–51

[51] Bulut M, ErklığA. An experimental investigation on damage characteristics of laminated hybrid composites subjected to low velocity impact. Polym Compos 2018;39:3129–39.

[52] Sarasini F, Tirillò J, Ferrante L, Valente M, Valente T, Lampani L, et al. Drop-weight impactbehaviour of woven hybrid basalt-carbon/epoxy composites. Compos Part B Eng 2014;59:204–20.

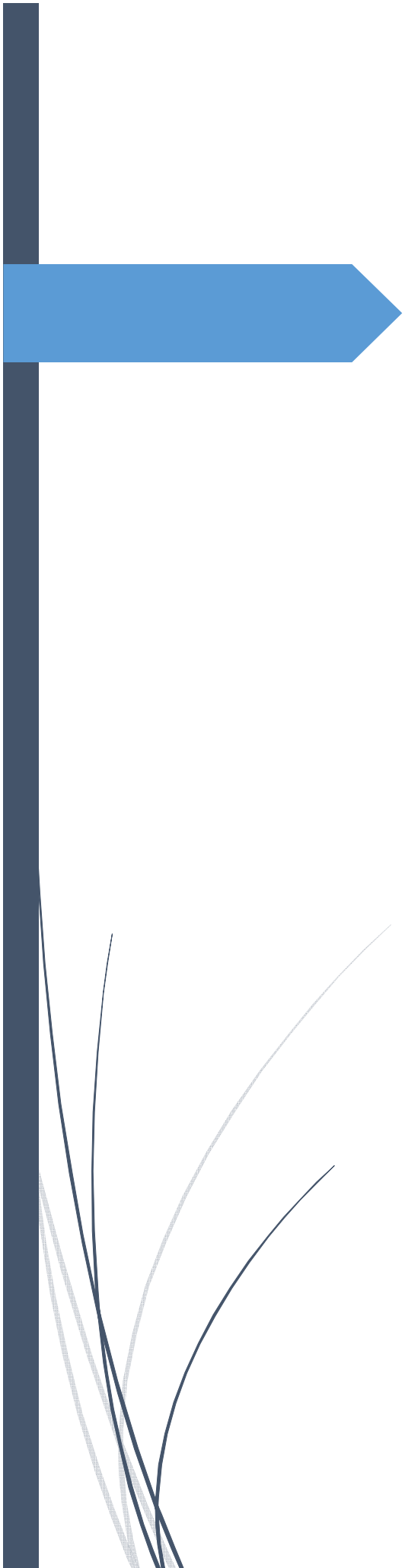
[53] Trevor Allen , Sharif Ahmed, Warren Hepples, Philippa A Reed , Ian Sinclair and Mark Spearing. A comparison of quasi-static indentation and low-velocity impact on composite overwrapped pressure vessels. JOURNAL OF COMPOSITE MATERIALS (2018). DOI: 10.1177/0021998318774401.

[54] Yan Li, An Xuefeng, and Yi Xiaosu. Comparison with Low-Velocity Impact and Quasi-static Indentation Testing of Foam Core Sandwich Composites. International Journal of Applied Physics and Mathematics (2012).

[55]Habibi M and Laperrière L. Digital image correlation and acoustic emission for damage analysis during tensile loading of open-hole flax laminates. Eng Fract Mech 2020; 228

: 106921.

- [56] Habibi M, Selmi S, Laperrière L, et al. Damage analysis of low-velocity impact of non-woven flax epoxy composites. J Nat Fibers 2019; 17: 1545-1554.
- [57] Lebaupin Y, Hoang T-QT, Chauvin M, et al. Influence of the stacking sequence on the low-energy impact resistance of flax/PA11 composite. J Compos Mater 2019; 53: 3187-3198.



Conclusion Générale

Conclusion générale

Les matériaux composites renforcés par des fibres naturelles sont de plus en plus utilisés dans divers secteurs de l'industrie dans le but de se substituer totalement ou partiellement aux composites à fibres usuelles. Leur développement dans les divers champs d'applications industrielles nécessite encore à améliorer la connaissance de ces nouveaux matériaux. L'utilisation éventuelle de ces composites plus respectueux de l'environnement dans des futures applications semi-structurelles et structurelles pose le problème de la tenue en service de ces matériaux, notamment lorsqu'ils sont soumis à des impacts à faible vitesse. Afin de limiter ces problèmes et d'optimiser les propriétés mécaniques de ces composites, il est tout d'abord nécessaire d'approfondir la connaissance de leur comportement et de leur tenue mécanique, notamment sous impact à basse vitesse. Beaucoup de travaux se sont intéressés à la caractérisation mécanique des composites renforcés par des fibres végétales, un grand nombre d'entre eux concerne la caractérisation mécanique statique et quasi-statique. Cependant, relativement peu d'études se sont intéressées à la caractérisation d'impact et post d'impact et l'identification des endommagements des composites renforcés par des fibres végétales.

Dans le cadre de cette thèse, les travaux ont porté principalement sur une analyse expérimentale en statique, quasi-statique, et dynamique des composites mat luffa/époxy.

Dans la première partie de cette thèse ça a été d'examiné l'effet de la superposition des mats et de la méthode de fabrication sur les propriétés mécaniques en traction des mats de luffa et des composites luffa/époxy. Le processus de préparation, la superposition du mat de luffa et la méthode de fabrication des composites (RTM) ont montré les meilleures propriétés mécaniques en traction et en flexion par rapport aux autres composites renforcés de luffa. Nous avons pu montrer que la fibre de luffa, comme les fibres de chanvre et de lin en Europe, peut être utilisée pour renforcer les matrices polymères dans les pays d'Afrique du Nord. On a conclu que le luffa est un matériau potentiel pour la fabrication des composites, et que, en raison de ses excellentes propriétés, il continuera probablement à jouer un rôle important dans les années à venir. Dans la deuxième partie on a étudié l'effet du traitement alcalin sur les propriétés mécaniques en traction, flexion, et l'endommagement des composites renforcés par des fibres luffa. Dans cet objectif, les différents composites avec des fibres non traitées et traitées ont été élaborés par le procédé de moulage par transfert de résine (RTM). La

technique EA a été utilisée pour la détection et l'évolution des mécanismes d'endommagement pendant l'essai de traction. Les images MEB des surfaces de fracture ont été utilisées pour identifier les différents mécanismes de dommages contribuant à la rupture du composite. Les conclusions les plus importantes sont présentées comme suite, une amélioration des propriétés mécaniques avec les traitements alcalins de 2% et 5%, un meilleur module d'Young pour le composite de 2% avec 8.94 ± 0.5 GPa et la meilleure résistance à la traction pour le composite de 5% avec une valeur de 81.08 ± 1.48 MPa. C'est presque à été les mêmes améliorations des propriétés mécaniques trouvées en flexion. Le composite renforcé des fibres traitées à 5% avait une énergie cumulée et des coups plus faibles que les composites non traités et traités à 2%, ce qu'implique que le composite T5% était moins endommagé. La contribution aux dommages (DC) de délaminage était la plus importante, avec une DC d'environ 70%, 63%, et 70% pour les trois composites, non traités, traités avec 2% et 5% de NaOH, respectivement. Les mécanismes d'endommagement (fissuration de la matrice, arrachement des fibres, délaminage, et rupture des fibres) des surfaces de fracture des échantillons NT, T2% et T5% trouvés par l'analyse au microscope électronique à balayage (MEB) sont les mêmes que ceux trouvés par émission acoustique (EA). La corrélation d'image numérique (CIN), permettra de donner les valeurs des déformations longitudinales qui sont très proches des valeurs trouvées par l'extensomètre, et même de calculer le coefficient de Poisson, il est montré que le renforcement avec des fibres traitées avec 5% de NaOH conduit à une diminution du coefficient de Poisson par rapport aux composites renforcés avec des fibres non traitées et traitées avec 2% de NaOH. Selon les résultats trouvés (propriétés mécaniques, EA, MEB, et CIN), on note que le meilleur composite vient de celui traité par 5%, on a conclu à la fin, on conclut que le choix un composite pour une certaine application, ne dépend pas seulement des caractéristiques mécaniques, mais aussi la déformation et les nombreux processus de dommages et leur importance relative, qui peuvent différer significativement entre les matériaux, et ceci est particulièrement pertinent pour l'utilisation à long terme.

L'étude expérimentale concerne le comportement d'impact à faible vitesse de 5, 15, 20J sur quatre composites luffa/époxy, nommés (A), (B), (C), et (D), leurs comportements en impact sont concentrés sur l'analyse des quatre courbes, Force-temps, Déplacement-temps, Force-déplacement, et Energie-temps. Les résultats montrent que le composite (C) est le plus résistant au impact à basse vitesse suivi par le composite (A), par contre le composite (D) est le plus absorbant d'énergie suivi par le composite (B). Par la suite des essais d'indentations ont été réalisés et des techniques d'analyses ont été menées sur des éprouvettes qui sont couplé à l'émission acoustique et la corrélation d'image numérique. Les résultats d'EA

identifient quatre modes d'endommagement, y a compris la fissuration de la matrice, décohésion fibre-matrice, délaminage, et la rupture des fibres.

L'étude des propriétés résiduelles de compression après impact de composite stratifié luffa mat / époxy, par l'utilisation l'émission acoustique (EA), pour l'évaluation des dommages en temps réel, a été quantifiée. Les images MEB des surfaces de fracture ont été utilisées pour identifier visuellement les différents modes de dommages contribuant à la rupture du stratifié et la corrélation d'image numérique, pour mesurer le champ du déplacement. Les résultats les plus importants sont déterminés, dont le module de compression n'est pas affecté par l'impact et que seuls la résistance à la compression et le déplacement sont influencés par les dommages induits. Une augmentation similaire du déplacement résiduel à la rupture des composites impactés. Une diminution de la résistance résiduelle de 42.59, 37.22, 32.31, et 29.43MPa avec l'augmentation de l'énergie d'impact, plus l'énergie d'impact est importante, plus la taille de la zone endommagée est grande, ce qui entraîne une diminution de la résistance du composite. L'analyse statistique multi-variable des signaux EA a identifié quatre classes d'endommagement : fissuration de la matrice, décohésion fibre-matrice, délaminage et rupture de la fibre. Les résultats obtenus à partir de cette analyse ont montré que le mode de dommage des composites non impactés qui présente la majorité des événements d'amplitude des signaux

EA est principalement dû à la rupture des fibres. En revanche, pour les composites impactés, le mode de dommage est principalement dû à la décohésion fibre-matrice. Cette identification a également révélé que le nombre d'événements associés à la fissuration de la matrice était le plus faible, même leur contribution à l'énergie EA cumulée était la moins importante. Ces résultats montrent également que le nombre d'événements EA augmente avec l'énergie d'impact pour les composites impactés. Les mécanismes d'endommagement (fissuration de la matrice, décohésion fibre-matrice, délaminage et rupture de la fibre) des surfaces de fracture des spécimens sous compression après un essai d'impact trouvés par l'analyse au microscope électronique à balayage (MEB) sont les mêmes que ceux trouvés par émission acoustique (EA). Les mesures des champs de déplacement effectuées par les systèmes CCD montrent l'effet des dommages induits sur la concentration des contraintes autour de la zone d'impact des composites. Une valeur de déplacement local plus élevée et une perturbation apparente de la carte de déplacement ont été observées à 3 J, ce qui explique la diminution la plus significative de la contrainte et l'augmentation de la déformation du composite.

Nos perspectives sont liées aux applications visées, celle de composite renforcé en mat de luffa. Nous recommandons pour le future d'effectuer des modèles numériques et analytiques d'impact et post d'impact pour valider les résultats de la partie expérimentales ainsi d'étudie le comportement en fatigue par impact et de réaliser des essais après impact de la traction, la flexion, et la fatigue. Nous souhaitons aussi de réalisation des études sur les effets d'hybridation des fibres de luffa avec d'autres fibres synthétiques ou naturelles et les conditions de l'environnement sur la réponse d'impact à basse et haute vitesse.

ANNEXE

Fiche technique de la résine Marine 820 (source : Bulletin produit fourni par ADTECH Marine Systems).

TYPICAL HANDLING CHARACTERISTICS @ 77°F (25°C)				
Test	Test Method	820/822	820/823	820/824
Mix Ratio	By Weight	100R:18H	100R:18H	100R:18H
Mix Ratio	By Volume	5R:1H	5R:1H	5R:1H
Mixed Viscosity	Brookfield	650 cps	350 cps	425 cps
Pot Life (236 gram mass)	Minutes	25-30	40-45	50-60
Specific Gravity	g/cc	1.10	1.10	1.09
Demold Time	Hours	24	24	24
V.O.C.	g/L	0 g/L	0 g/L	0 g/L
Color		Pale Amber	Pale Amber	Pale Amber
Minimum Cure Schedule	Hours	24	24	24
Complete Cure Schedule	Days	7	7	7
Shelf Life / D.O.M.		2 years	2 years	2 years
Tensile Strength	ASTM D-638.946	25,514psi (174MPa)	24,700psi (170MPa)	45,000psi (310MPa)
*Tensile Elongation	ASTM D-638.946	2%	3%	2%
Tensile Modulus	ASTM D-638.946	1,950,000psi (13,445MPa)	1,930,000psi (13,307MPa)	3,000,000psi (20,684MPa)
Flexural Strength	ASTM D-790.92	26,250psi (181MPa)	26,522psi (187MPa)	45,000psi (310MPa)
Flexural Modulus	ASTM D-790.92	1,840,000psi (12,686MPa)	1,650,000psi (11,376MPa)	2,200,000psi (15,168MPa)
*Compressive Strength	ASTM D-695.91	8,343psi (58MPa)	8,100psi (56Mpa)	8,400psi (58MPa)
*Compressive Modulus	ASTM D-695.91	170,283psi (1,174MPa)	154,240psi (1,064MPa)	160,000psi (1,103MPa)
*Impact Strength	ASTM D-256.93a	5.52 (in-lb/in)	4.50 (in-lb/in)	3.75 (in-lb/in)
*HDT(@ 66psi)	ASTM D-648.82	160°F (82°C)	160°F (82°C)	161°F (72°C)
*Average Moisture Absorption	ASTM D-570.81	0.17%	0.21%	0.25%

* Physical testing conducted on neat resin only. *HDT testing conducted on neat resin samples post cured 4 hours at 150°F (66°C).

Production scientifique

En plus de ce mémoire de thèse, ces travaux ont conduit aux publications et communications suivantes :

1. Communications

- Communications internationales

1- M. Grabi, A. Chellil, S. Lecheb, H. Mechakra, A. Nour, O. Andrianarison: Identification of vibratory characteristics to the damage of a composite plate. ICAMRE 2018.

2. Publications scientifiques

- Publications classe (A)

1-Grabi, M., Chellil, A., Habibi, M. *et al.* Alkaline Treatment's Effect on Mechanical Properties and Damage Assessment Through Acoustic Emission of Luffa Fiber Composite. *Fibers Polym* (2022). <https://doi.org/10.1007/s12221-022-4676-0>

2-Grabi M, Chellil A, Habibi M, Grabi H, Laperriere L. Characterization of low-velocity impact and post-impact damage of luffa mat composite using acoustic emission and digital image correlation. *Journal of Composite Materials*. 2022;56(11):1651-1665. doi:10.1177/00219983221083733

3-Massinissa Grabi, Ahmed Chellil, Mohamed Habibi, Luc Laperriere & Hocine Grabi (2022): Strain and Damage Assessment of Treated and Untreated Luffa Mat Composite Using Acoustic Emission and Digital Image Correlation, *Journal of Natural Fibers*. DOI: 10.1080/15440478.2022.2073314

4- M Grabi, A Chellil, and H Grabi. Effect of Mat Fiber Lay-Up and Resin Transfer Molding Process on Flexural and Tensile Properties of Luffa Mat Reinforced Composites. *Journal of Natural Fibers*. (Accepté).