

People's Democratic Republic of Algeria
Ministry of Higher Education and Scientific Research
Mohamed Boudiaf University of M'sila
Faculty of Technology

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة المسيلة
كلية التكنولوجيا



Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie Mécanique

Option : Génie des Matériaux

Présenté par :

AKRAM BENAMRA

Thème

Comportement en flexion trois points d'un matériau composite par photographie de speckle

Devant le jury composé de :

NOM et Prénom	Grade	Qualité
HOCINE Mostapha	MCB	Président
ZEMMAMOCHE Redouane	MCB	Encadreur
ROUABHI Youcef	MCB	Examineur

Année Universitaire : 2021 / 2022

N° d'ordre : GM/...../2022

بسم الله .. والحمد والشكر لله ..

Remerciements

Au-delà de la formalité d'usage, c'est avec un grand plaisir je suis très heureux d'exprimer tout d'abord Je souhaite avant tout remercier mon directeur de mémoire, Redouane ZEMMAMOUCHE, pour le temps qu'il a consacré à m'apporter les outils méthodologiques indispensables à la conduite de cette recherche. Son exigence m'a grandement stimulé.

Je remercie également pour ses précieux conseils, pour son investissement dans tous les aspects de notre travail, ainsi que pour le temps qu'il a passé à suivre toutes les étapes de notre mission, malgré ses nombreux engagements.

L'ensemble de notre honorable jury de thèse, qui a bien voulu examiner et valoriser notre travail, une place à cet égard grâce au personnel administratif ainsi qu'à tous les enseignants du département d'électronique de la faculté de technologie de l'Université Mohammed Boudiaf de M'sila

Enfin, nous adressons nos sincères remerciements à tous ceux qui nous ont aidés à effectuer ce travail prochainement.



Ceux qui m'ont aidé et m'ont offert cette occasion :

- ★ *Je* dédie ce mémoire à toute ma chère famille **BenAmra** et la famille **Zeghlache**
- ★ *A* monsieur le professeur Mr. **Redouane ZEMMAMOUCHE**
- ★ *A* Mon grand frère Mr. **Radouane Gherbi**
- ★ *A* mes frères, mes fidèles amis et mes camarades de l'école
- ★ *A* toutes les personnes qui me respectent et qui m'aiment
- ★ *A* tous mes amis et mes collègues de la promotion **2017/2022**

A tous ceux que j'aime.

Merci !

Remerciements.....	i
Dédicace	ii
Liste des figures	vi
Liste des tableaux	viii
Liste des abréviations.....	ix
Introduction générale	2
 Chapitre-1 : Généralités Sur les Matériaux Composites 	
1.1 Définitions des composites	5
1.2 Les types de matériaux composites	6
1.2.1 Composites à renforts de particules	6
1.2.2 Composites à renforts de fibres	6
1.2.3 Composites à renforts de paillettes	7
1.2.4 Composites stratifiés	7
1.3 Classification des composites en fonction de la nature de la matrice	7
1.3.1 les composites à matrices organiques (CMO)	8
1.3.1.1 Les matrices thermodurcissables	9
1.3.1.2 Les matrices thermoplastiques	10
1.3.2 Les composites à matrice céramique (CMC)	10
1.3.3 les Composites à matrice métallique (CMM)	11
1.4 Constituants des matériaux composites	11
1.5 Description de l'interphase	12
1.6 Les renforts	13
1.6.1 Architecture des renforts	14
1.6.1.1 Le taffetas	15
1.6.1.2 Le sergé	15
1.6.1.3 Le satin	15

1.6.2	Différents types de renfort	16
1.6.2.1	Les renforts fibreux	17
1.7	Architecture des matériaux composites	17
1.7.1	Monocouche	17
1.7.1.1	Désignation des structures stratifiées	18
1.7.2	Sandwichs	19
1.7.2.1	Désignation des structures sandwiches	19
1.7.3	structure multi échelles	20
1.7.4	Structures composites tissées multidirectionnelles	21
1.7.4.1	2D SiC-SiC	21
1.7.4.2	Aerolor 32 C/C	22
1.7.4.3	3D–Evolatif C/C	22
1.7.4.4	Sepcarb(r) 4D C/C	23
1.8	Les composites à fibres	23
1.8.1	Fibres de verre	24
1.8.2	Fibres de carbone	25
1.8.3	Fibres aramides	25
1.8.4	Fibres céramiques	25
1.9	Caractéristiques mécaniques des fibres	26
1.10	Conclusion	26
Chapitre-2 : Généralités Sur la Phénomène de Speckle		
2.1	Définition	28
2.2	Propriétés statistiques du speckle	29
2.2.1	Fonction de densité de probabilité	29
2.2.2	Le contraste	30
2.3	Types et dimensions du speckle	30
2.3.1	Speckle objectif	31
2.3.2	Speckle subjectif	31
2.4	Photographie speckle	32
2.4.1	Photographie de speckle focalisée	33
2.4.2	Photographie de speckle non focalisé	34
2.4.3	Observation des franges et détermination des déplacements	35

2.4.3.1	Filtrage point par point et franges de Young	35
2.4.3.2	Filtrage à champ complet et franges isothétiques	37
2.5	De la photographie de speckle classique à la photographie de speckle numérique ...	39
2.5.1	Corrélation de l'intensité et de l'amplitude	40
2.5.1.1	Déplacement du speckle objectif	41
2.5.1.2	Déplacement du speckle subjectif	44
2.5.2	Détermination des déplacements par photographie de speckle	47
2.6	Conclusion	50

Chapitre-3 : Partie Expérimentale

3.1	Introduction	52
3.2	Définition du matériau composite utilisé	53
3.3	Principe La technologie du moulage sous vide	54
3.4	L'essai de flexion 3 points	55
3.5	Procédure expérimentale	57
3.6	Résultats expérimentaux	58
3.7	Analyse et interprétation des résultats	61
	Conclusion générale.....	64
	Bibliographie.....	66

Figure 1.1 structure d'un matériau composite	5
Figure 1.2 Les différents types de composites	7
Figure 1.3 Les types des matrices	8
Figure 1.4 Constituants des matériaux composites	12
Figure 1.5 Observation au microscope à force atomique (AFM)	13
Figure 1.6 Schéma de diffusion de l'ensemblage dans la matrice	13
Figure 1.7 Principaux matériaux de renfort Les Différents Types de Renforts	13
Figure 1.8 Représentation d'un pli unidirectionnel : en zoom un toron et une fibre	14
Figure 1.9 Représentation d'un tissu taffetas.....	15
Figure 1.10 Représentation d'un tissu sergé.....	15
Figure 1.11 Représentation d'un tissu satin pour n=4	16
Figure 1.12 architecture des Stratifiés	18
Figure 1.13 Désignation des structures stratifiées	19
Figure 1.14 Une structure Sandwichs	19
Figure 1.15 Une structure multi échelles	20
Figure 1.16 Une structure composite tissée multidirectionnelles	21
Figure 1.17 Une structure composites 2D SiC-SiC	21
Figure 1.18 Géométrie tri-orthogonale de l'Aerolor 32	22
Figure 1.19 Sepcarb(r) 4D C/C renfort carbone/matrice carbone	23
Figure 1.20 Exemples de fibres les plus utilisées dans la construction des stratifiés	24
Figure 1.21 Organisation hexagonale du tissu des atomes de Carbone	25
Figure 2.1 Contour microscopique d'une surface diffusante	28
Figure 2.2 Figure de speckle produite par une plaque d'Aluminium	29
Figure 2.3 Fonction de densité de probabilité de la distribution de l'intensité	30
Figure 2.4 Formation du speckle objectif	31
Figure 2.5 Formation du speckle subjectif	32
Figure 2.6 Arrangement optique de photographie de speckle focalisé	33
Figure 2.7 Arrangement optique de la photographie speckle non focalisé	35

Figure 2.8 Principe de Filtrage point par point d'un specklogramme à double expositions..	36
Figure 2.9 Principe de Filtrage à champ complet	37
Figure 2.10 Figure de speckle dans le champ de diffraction avant et après un déplacement.	40
Figure 2.11 Système de coordonnées pour le calcul du déplacement de speckle objectif	41
Figure 2.12 Système de coordonnées pour la détermination de déplacement de speckle.....	45
Figure 2.13 Suivi du déplacement des grains de speckle par corrélation.....	48
Figure 2.14 Champs des déplacements mesurés par notre algorithme de corrélation (DSP).	50
Figure 3.1 Matériau composite utilisé	53
Figure 3.2 Moulage sous vide	53
Figure 3.3 Moulage sous vide réel	54
Figure 3.4 Flexion 3 points	55
Figure 3.5 Principe d'essai de flexion 3 points	55
Figure 3.6 Localisation de la rupture	56
Figure 3.7 Machine universelle en montage de flexion	56
Figure 3.8 Fabrication de l'éprouvette	57
Figure 3.9 L'essai d'éprouvette par flexion 3 points	57
Figure 3.10 Le déroulement de l'essai	58
Figure 3.11 Figures de speckle avant et après flexion	58
Figure 3.12 Première série de mesure	59
Figure 3.13 Deuxième série de mesure	60
Figure 3.14 Troisième série de mesure	60
Figure 3.15 Quatrième série de mesure	61
Figure 3.16 courbe de flexion de la couche inférieure de l'échantillon	62

Liste des tableaux

Tableau 1.1	Caractéristique mécanique moyennes des résines TD polyesters.....	9
Tableau 1.2	Caractéristique mécanique moyennes en traction de fibres seules.....	17
Tableau 1.3	Composition et Propriétés des fibres de verre	24
Tableau 1.4	Propriétés mécaniques des fibres	26

CMO	Composites à matrice organique
CMC	Composites à matrice céramique
CMM	Composites à matrice métallique
TD	Thermodurcissables
TP	Thermoplastiques
Tf	Température de fusion
C	Carbone
SiC	Silicium
UD	Unidirectionnels
2D	Deux directions
3D	Trois directions
4D	Quatre directions
SiO ₂	Silice
Na ₂ O	L'oxyde de sodium
K ₂ O	L'oxyde de potassium
F	Le fluor
CaO	L'oxyde de calcium
MgO	L'oxyde de magnésium
B ₂ O ₃	L'oxyde de bore
DSP	Digital speckle photography
CCD	Charged coupled device
FTM	Fonction de transfert de modulation

Introduction générale

Introduction générale

De nos jours, les matériaux composites ont atteint un nouveau niveau d'excellence. Ils ont continué à se développer et à gagner en importance, et dominent maintenant de nombreuses industries, comme l'industrie automobile, Aéronautique, militaire, etc...

L'objectif d'un matériau composite est de combiner deux ou plusieurs matériaux tout en créant une synergie entre ces différents matériaux afin qu'il en résulte un composite plus performant que chacune des composantes prises individuellement.

Selon les exigences nous sommes immédiatement concernés par les matériaux composites du fait de la demande toujours plus forte des consommateurs, qui nécessite le développement de nouveaux biens répondant à ces besoins.

Le jute est principalement utilisé pour le marché de l'emballage. Les tissus, les sacs et les sacs en toile de jute tissée sont largement utilisés pour le transport et le stockage de produits agricoles, d'engrais, de ciment et de certains produits chimiques. Avec la croissance de la manutention en vrac et des matériaux d'emballage synthétiques bon marché, le marché de ces matériaux de jute traditionnels a été sérieusement affecté.

L'objectif de ce travail est l'analyse de comportement mécanique de jute/résine en utilise la méthode d'essais de flexion à 3 points pour suivre l'évolution des déplacements des échantillons image par image.

Et obtenir les données de déplacement. Le déclenchement de la machine d'essai et de l'appareil vidéo.

Ce mémoire est subdivisé en trois chapitres :

Le premier chapitre est réservé aux généralités sur les matériaux composites, ses éléments constitutants, les différents procédés de mise en forme, ensuite leur constitution et les classifications.

Le deuxième chapitre donne les détails sur le phénomène de speckle et les Types et dimensions lié au phénomène pour le but de savoir déterminer les déplacements par photographie de speckle digitale.

Le troisième chapitre consacré à la procédure expérimentale ce partie Contient la réalisation des échantillons jute/résine, la présentation des essais de flexion à 3 points, en fin la présentation des résultats obtenus et les discussions.

Généralités Sur les Matériaux Composites

Chapitre 1

1.1 Définitions des composites

Un matériau composite est un mélange d'un ou plusieurs composants, dans la même phase continue, les phases séparées se propagent et crée une nouvelle substance avec des qualités considérées comme supérieures à celles des éléments individuels. Composants de phase est un terme utilisé dans le vocabulaire de la résistance des matériaux (les phases), généralement distingués en renfort et Matrice, Ils sont appelés "renforts" en général. La fonction principale des renforts est d'assurer le maintien de la résistance mécanique du mélange. "La Matrice" est le nom de la phase continue.

La matrice assure la cohésion structurelle et le transfert des efforts mécaniques aux renforts elle garantit la cohésion de la structure et la transmission des efforts mécaniques aux renforts. Elle fournit également une protection à ces derniers contre diverses agressions chimiques qui pourraient provenir de l'environnement extérieur [1]

On peut utiliser des renforts de type particulaire ou fibreux (**Fig 1.1**)

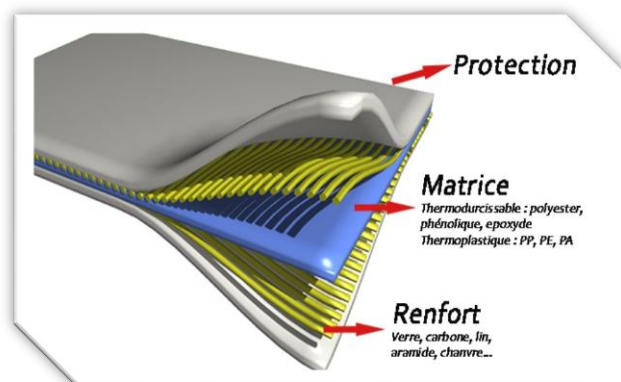


Fig 1.1 structure d'un matériau composite

Les fibres utilisées comme renfort ont des propriétés mécaniques nettement meilleures (résistance et rigidité) du même matériau en forme massive, la diminution des dimensions caractéristique s'implique, souvent, une amélioration des prestations mécaniques car la fibre a, par le procédé de fabrication, une structure plus parfaite du matériau massif et parce que la probabilité de trouver des défauts importants diminue avec les dimensions. [1]

1.2 Les types de matériaux composites

En général, le domaine des composites est très vaste et, ceux-ci peuvent être divisés en quatre types [2] :

- ✚ composites à renforts de particules
- ✚ composites à renforts de fibres
- ✚ composites à renforts de paillettes
- ✚ composites stratifiés.

1.2.1 Composites à renforts de particules

Les matériaux composites de particules consistent à mettre des particules d'un ou plusieurs matériaux en suspension dans une matrice. En fait, le meilleur exemple est sûrement le béton. Le béton est composé de particules de sable et de gravier et elles sont liées ensemble par la réaction chimique du ciment et de l'eau qui donne la pâte (matrice). Le béton est donc un composite de particules très complexes puisqu'une multitude de paramètres influence ses propriétés. Plusieurs ouvrages de référence traitent de ces paramètres. (Draiche K., 2015) (Beeby A.W., 1979) [2]

1.2.2 Composites à renforts de fibres

Les composites de fibres sont des matériaux composés d'une matrice dans laquelle divers types de fibres sont ajoutés. Le comportement des composites de fibres est beaucoup influencé par le type de fibres et leur nature. Il existe deux grands types de fibres ; les macros fibres et les microfibres. Les macros-fibres (≈ 10 mm de longueur et plus) qui sont ajoutées à la structure afin d'augmenter sa ténacité et les microfibres (≈ 10 mm de longueur et moins) qui sont ajoutées afin d'améliorer principalement la résistance à la traction. La longueur qui caractérise les fibres comme microfibres ou macro-fibres peut varier en fonction de la composition de la matrice.

Le rôle des fibres dans la structure est le même que celui des armatures, c'est-à-dire reprendre les efforts de traction. Les composites à renforts de fibres limitent la formation, la propagation et la coalescence des microfissures au sein de la matrice [2]

1.2.3 Composites à renforts de paillettes

Les paillettes ont une dimension très faible par rapport aux autres dimensions. La dispersion de ces « particules minces » est généralement aléatoire. Cependant, les paillettes peuvent être rangées parallèlement l'un à l'autre afin d'avoir des propriétés plus uniformes dans le plan. [2]

1.2.4 Composites stratifiés

Un stratifié se compose d'au moins deux couches minces de matériau. Les couches peuvent être constituées de différents matériaux monolithiques comme dans les métaux plaqués ou de même matériau composite empilé selon différentes orientations comme pour des stratifiés composites à renforts de fibres longues. Ce dernier devient une classe hybride du composite comportant à la fois le composite à renfort de fibres et la technique de stratification (Draiche K., 2015) [2]

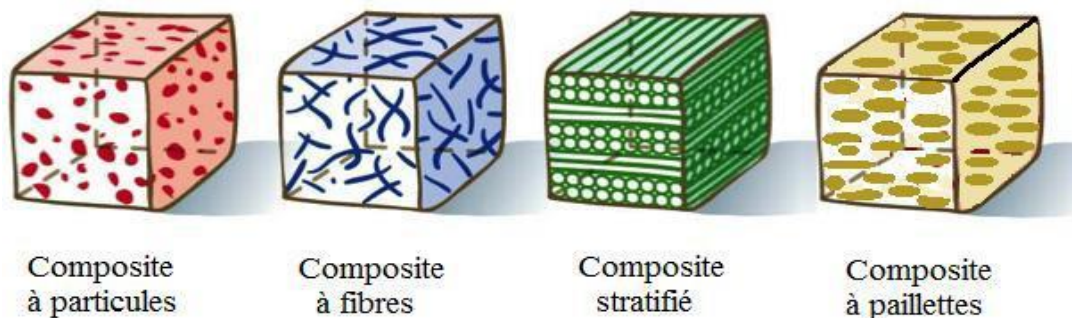


Fig 1.2 Les différents types de composites

1.3 Classification des composites en fonction de la nature de la matrice

Il existe aujourd'hui un grand nombre de matériaux composites que l'on classe généralement en trois familles en fonction de la nature de la matrice :

- ✚ Les composites à matrice organique (CMO) qui constituent, de loin, le volume le plus important aujourd'hui à l'échelle industrielle
- ✚ Les composites à matrice céramique (CMC) réservés aux applications de très haute technicité et travaillant à haute température comme le spatial, le nucléaire et le militaire, ainsi que le freinage (freins céramique)

- ✚ Les composites à matrice métallique (CMM) qui intéressent les concepteurs des industries automobiles, électroniques et de loisir pour leur capacité à répondre à des exigences mécaniques spécifiques

Chacune de ces familles possède des propriétés différentes et pour chacune d'entre elles, différents types de renforts sont employés. [3]

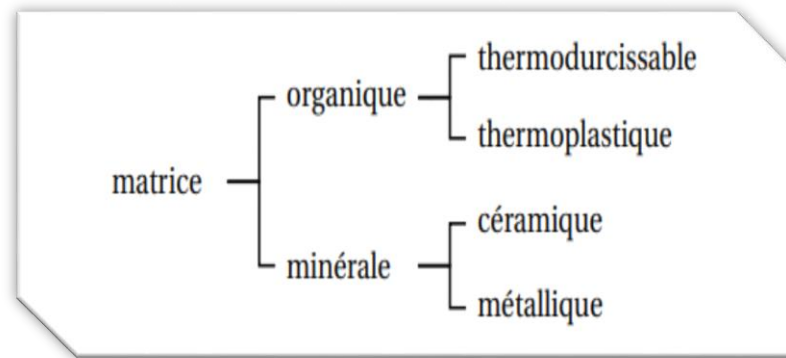


Fig 1.3 Les types des matrices

1.3.1 Les composites à matrices organiques (CMO)

Il s'agit, des composites les plus répandus, ce sont en effet les seuls composites ayant, pour beaucoup d'entre eux, des coûts unitaires suffisamment réduits pour pouvoir être produits en grandes séries. Plus précisément, on distingue généralement deux types de CMO [3]

✚ Les matériaux composites à grande diffusion :

Les matériaux composites à grande diffusion offrent des avantages essentiels, qui sont optimisation des coûts par diminution des prix de revient, sa composition de polyester avec des fibres de verre longues ou courtes (sous forme de mat ou tissu) et la simplicité du principe d'élaboration des matériaux (moulage par contact, SMC et injection)

✚ Les matériaux composites à Hautes performances

Les matériaux composites à hautes performance (HP) comprennent essentiellement des résines thermodurcissables et dans une moindre mesure des résines thermoplastique, associées à des fibres de verre, carbone, aramide, bore, SiC et SiN.

Ils sont utilisés dans le domaine d'aéronautique où le besoin d'une grande performance déduite des hautes valeurs ajoutées, les renforts sont plutôt des fibres longues. Le taux de renfort est supérieur à 50%. Ces composites sont élaborés par les procédures suivantes : [4]

- ✚ Drapage autoclave, enroulement filamentaire, RTM.
- ✚ Beaucoup de procédés encore manuels.
- ✚ CMM, CMC.

1.3.1.1 Les matrices thermodurcissables

Elles sont obtenues à partir de pré polymères de faible poids moléculaire qui sont tréculés sous l'effet de la chaleur en présence de catalyseurs et de durcisseurs. Les principales résines thermodurcissables utilisées dans l'industrie composite sont les résines époxydes, polyesters et vinylesters (**Tableau 1-1**)

Elles présentent une bonne résistance à la chaleur, un vieillissement lent et une bonne tenue aux agressions extérieures mais des durées de stockage avant mise en œuvre limitées, des temps de cuisson élevés ou encore des difficultés de recyclage [1].

Tab 1.1 Caractéristique mécanique moyennes des résines TD polyesters, époxydes et vinylesters[1]

	Résines polyesters	Résines époxydes	Résines vinylesters
Masse Volumique (Kg/m ³)	1200	1100 à 1500	1200
Module d'élasticité en traction (GPa)	2.8 à 3.5	3 à 5	3.4 à 3.5
Module d'élasticité en flexion (GPa)	3 à 4.5		3.1 à 3.8
Contrainte à la rupture en traction (MPa)	50 à 80	60 à 80	70 à 85
Contrainte à la rupture en flexion (MPa)	90 à 130	100 à 150	115 à 140
Allongement au rupture en traction (%)	2 à 5	2 à 5	2.5
Résistance au cisaillement (MPa)	10 à 20	30 à 50	
Température de fléchissement sous charge à 1.8 MPa (°C)	60 à 100	290	100 à 140

1.3.1.2 Les matrices thermoplastiques

Elles sont constituées d'un ensemble de macromolécules longues, linéaires ou ramifiées et enchevêtrées entre elles. Les résines TP sont mises en forme à l'état liquide à une température supérieure à leur température de transition vitreuse (T_g) pour les polymères amorphes (exemple : le Polyétherimide) ou à leur température de fusion (T_f)

Pour les polymères semi-cristallins (exemple : le polyamide). Elles sont susceptibles d'être ramollies par chauffage ou durcies par refroidissement, et cela de manière répétée. Comme cela a été évoqué précédemment, les résines thermoplastiques sont de plus en plus fréquemment employées dans l'industrie composite : actuellement le développement de matériaux à matrice TP est deux fois supérieur à celui basé sur des matrices TD. On classe généralement en trois catégories distinctes, les résines TP entrant dans la fabrication de composites :

- ✚ Les polymères dits de "grande diffusion", dont les propriétés mécaniques sont plus faibles mais bénéficient d'un coût compatible avec une production en grande série.
- ✚ Les polymères dits "d'utilisation technique", dont les propriétés mécaniques sont supérieures aux polymères de grande diffusion et qui sont utilisés pour des objets industriels courants comme les pièces de structures.
- ✚ Les polymères dits de "hautes performances", présentant des propriétés mécaniques spécifiques élevées et un coût unitaire important [1]

1.3.2 Les composites à matrice céramique (CMC)

L'emploi simultané de fibres réfractaires et de matrices céramiques permet de réaliser les composites structuraux destinés aux très hautes températures. Les fibres (en carbone ou carbure de silicium) sont disposées unidirectionnellement ou sont tissées suivant deux ou plusieurs orientations. La matrice, quant à elle, également à base de C ou SiC, peut être introduite entre les fibres par voie liquide ou gazeuse. Ces composites, dits « thermostructuraux » présentent un ensemble de caractéristiques intéressantes [5] :

- ✚ Ils sont légers ($\rho < 3,2 \text{ g/cm}^3$),
- ✚ Leur résistance mécanique se conserve lorsque la température croît jusque (1500°C), ou plus,

- ✚ Ils conservent une excellente stabilité chimique à très haute température en milieu neutre ou réducteur.

En revanche, l'utilisation de CMC soulève les problèmes suivants :

- ✚ Compatibilité entre les coefficients de dilatation thermique des constituants,
- ✚ Compatibilité chimique entre fibre et matrice,
- ✚ Dégradation des propriétés mécaniques avec la température,
- ✚ Résistance à la corrosion.

Bien que les problèmes soulevés soient difficiles et nombreux, des solutions sont envisagées et appliquées pour y remédier.

1.3.3 Les composites à matrice métallique (CMM)

La possibilité de profiter des propriétés particulières du matériau pour répondre aux besoins spécifiques est la motivation la plus importante pour le développement des composites de nos jours, de plus en plus de matériaux composites à matrice métallique remplacent des métaux classiques de façon à optimiser les propriétés de ces derniers, surtout au niveau de la densité et de la résistance à l'usure. Les matériaux composites sont constitués d'une matrice « molle » (qui en général offre une très bonne ductilité, formabilité et conductivité thermique) dans laquelle sont introduits des renforts « durs » de dureté élevée et de faible expansion thermique. Les renforts peuvent être continus ou discontinus, orientés ou désorientés. Du point de vue de la nature des particules de renfort [6], la même source bibliographique (Masounave et al.1994) donne la classification suivante :

- ✚ Les particules molles, telles que le graphite et le talc ; leur incorporation dans la structure des composites apporte des propriétés de friction appréciables.
- ✚ Les particules dures, telles que le carbure de silicium (SiC), ont comme effet l'augmentation de la résistance à l'abrasion mais usent très agressivement les outils de coupe.
- ✚ Les particules d'alumine, intermédiaires entre les deux classes précédentes.

1.4 Constituants des matériaux composites

Un matériau composite est constitué de différentes phases nommées renforts et matrice. Lorsque le matériau composite est non endommagé, les renforts et la matrice sont parfaitement liés et il ne peut pas y avoir ni glissement ni séparation entre les différentes phases. Les renforts se présentent sous forme de fibres continues ou discontinues. Le rôle du renfort est d'assurer la

fonction de résistance mécanique aux efforts. La matrice assure quant à elle la cohésion entre les renforts de manière à répartir les sollicitations mécaniques. L'arrangement des fibres, leur orientation permettent de renforcer les propriétés mécaniques de la structure. Nous étudions plus particulièrement les matériaux composites à renfort fibre longue continue utilisés dans l'industrie nautique, automobile, aéronautique et spatiale. Les pièces structurales sont réalisées par empilement de nappes en optimisant les directions des renforts en fonction des charges qu'elles doivent subir. La nature de la résine ou du renfort est choisie en fonction de l'application finale visée.

Nous présentons les différents types de matrices et renforts classiquement employés dans l'industrie. Les propriétés mécaniques de l'interface entre fibres et matrice sont très importantes dans la réalisation d'une structure composite. En effet, il ne doit y avoir ni glissement ni séparation entre les différentes phases de la structure pour obtenir de bonnes caractéristiques mécaniques élastiques [7]

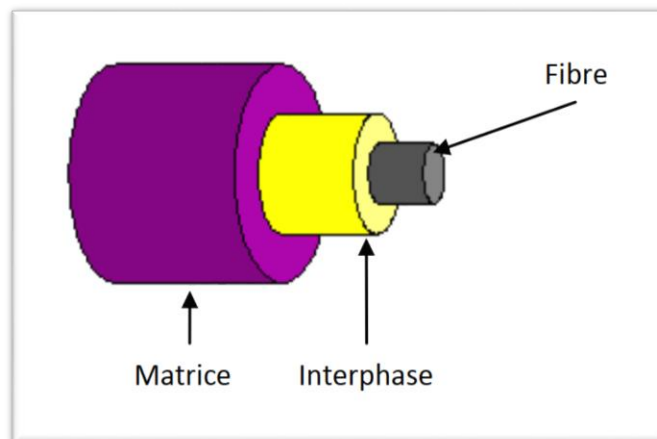


Fig 1.4 Constituants des matériaux composites

1.5 Description de l'interphase

La jonction fibre-matrice formée par la présence de l'ensimage n'est pas réductible à une simple surface. Cette région intermédiaire appelée interphase s'étend en fait dans les trois directions de l'espace. Du point de vue microstructural, elle correspond à un réseau d'interpénétration issu de la diffusion des espèces chimiques composant l'ensimage au sein de la matrice essentiellement [8]. La (figure 1.6) schématise bien le mécanisme d'inter-diffusion des molécules d'agents couplant au sein de l'interphase. Il est commun de considérer cette zone comme une troisième phase présente dans le matériau dont l'épaisseur et les caractéristiques sont

différentes de la fibre et de la matrice en masse (**figure 1.5**). Dans la littérature scientifique, les tailles rapportées pour l'interphase sont extrêmement variables allant de quelques nm à quelque μm [1]

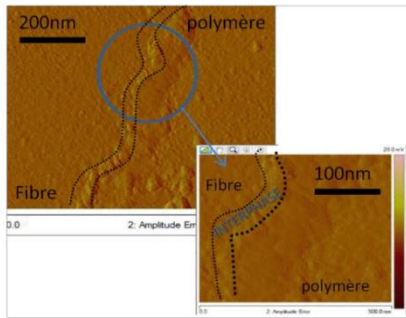


Fig 1.5 Observation au microscope à force atomique (AFM) de l'interphase pour un composite verre/époxy

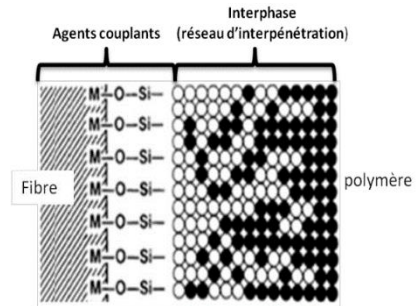


Fig 1.6 Schéma de diffusion de l'ensimage dans la matrice

1.6 Les renforts

Les renforts contribuent à améliorer la résistance mécanique à la traction et la rigidité des matériaux composites et se présentent sous forme filamentaire (des fibres organiques ou inorganiques). [9]

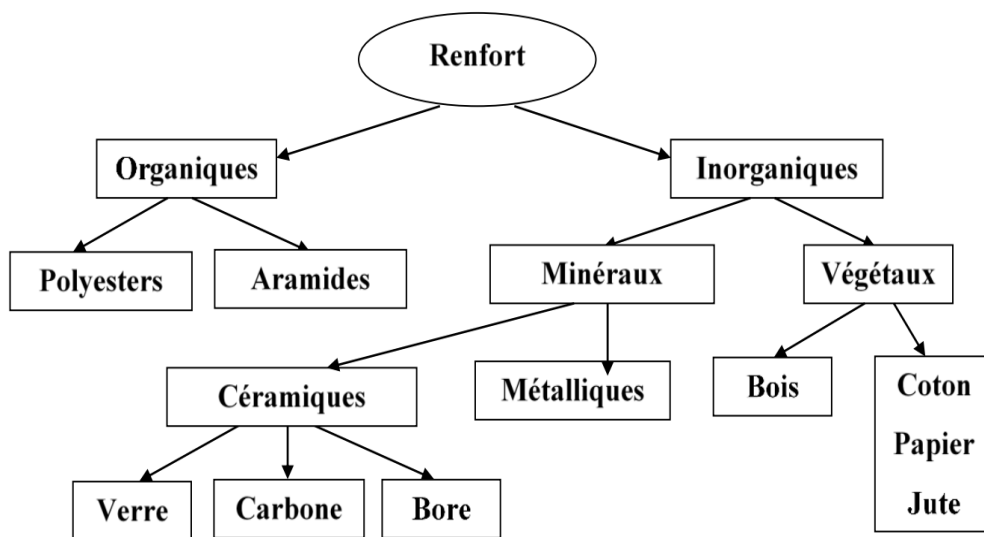


Fig 1.7 Principaux matériaux de renfort Les Différents Types de Renforts.

1.6.1 Architecture des renforts

Dans une structure composite, ce sont les sollicitations mécaniques qui définissent la nature, l'orientation et l'architecture du renfort. Dans le cas de matériaux réalisés avec des fibres longues, on utilise fréquemment des tissus (satin, sergé, taffetas) ou des stratifiés obtenus à partir de plis unidirectionnels (UD) (**figure. 1.8**). Pour un renfort tissé, la période spatiale représente le plus petit intervalle pour qu'un motif se reproduise suivant les directions de chaîne ou de trame (**figures 1.9 et 1.10**)

Généralement, les mèches de base, ou torons, constituant les armatures sont fabriquées à partir de plusieurs centaines de filaments enrobés dans de la matrice. Les torons sont caractérisés par leurs :

- ✚ Diamètre (2 à 4 mm)
- ✚ Nombre de filament
- ✚ Titre : exprimé en tex (g/Km) correspondant à la masse de 1000m de fil.
- ✚ Torsion : nombre de tours par mètre
- ✚ Ténacité : valeur de la rupture en traction

❖ Les plis unidirectionnels

Ce qu'on appelle pli correspond à une nappe de torons parallèles, assemblés et maintenus entre eux par des fils de trame légers et cousus perpendiculairement. [1]

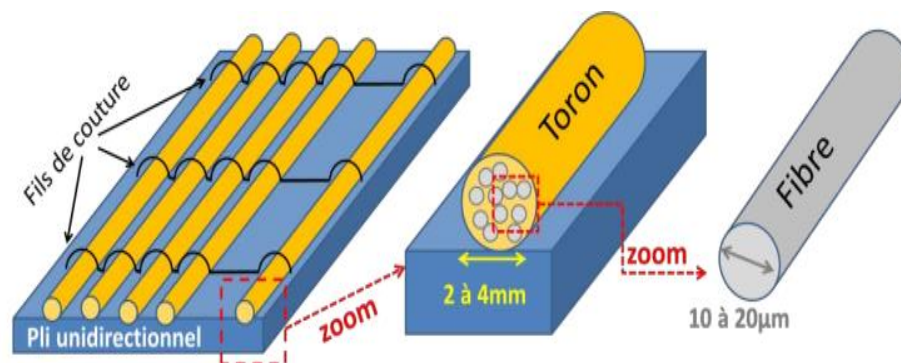


Fig 1.8 Représentation d'un pli unidirectionnel : en zoom un toron et une fibre

1.6.1.1 Le taffetas

Le taffetas correspond à une nappe de tissu où chaque toron de chaîne passe successivement en dessous puis au-dessus de chaque toron de trame (**figure 1.9**). Le tissu possède de bonnes propriétés en termes de stabilité lors de la mise en œuvre du composite. Toutefois du fait des nombreux entrecroisements successifs, un embuvage important est créé. Cela correspond à l'ondulation des fibres qui peut réduire les propriétés mécaniques d'ensemble. [1]

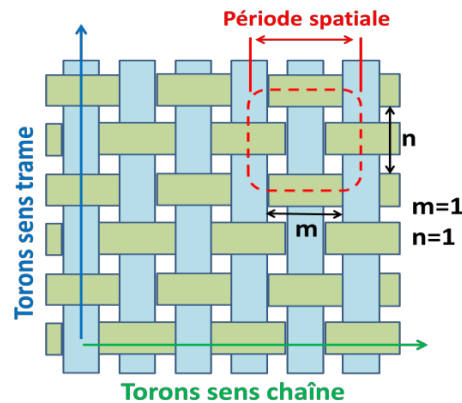


Fig 1.9 Représentation d'un tissu taffetas.

1.6.1.2 Le sergé

Le sergé correspond à une nappe de tissu où chaque toron de chaîne passe au-dessus de ($n=2$) torons de trame et où chaque toron de trame passe au-dessus de ($m=2$) torons de chaîne (**figure 1.10**). Cette armure offre une plus grande souplesse que le tissu taffetas en gardant une bonne densité de fils. [1]

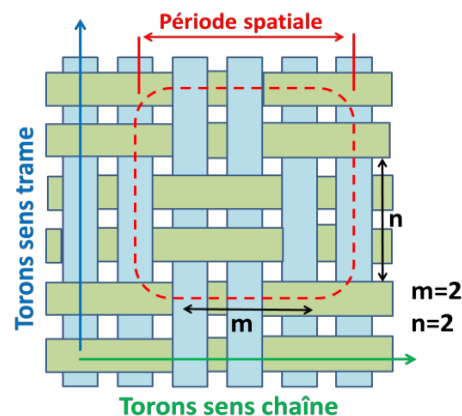


Fig 1.10 Représentation d'un tissu sergé.

1.6.1.3 Le satin

Le satin correspond à une nappe de tissu où chaque fil de chaîne passe au-dessus de $(n-1)$ fils de trame et réciproquement. Sur la (**figure 1.11**) on représente un tissu satin pour « $n=4$ ». Ces tissus présentent un aspect différent sur chaque face. Ils présentent également une forte masse spécifique tout en restant assez souples et adaptés à la mise en forme de surfaces complexes. [1]

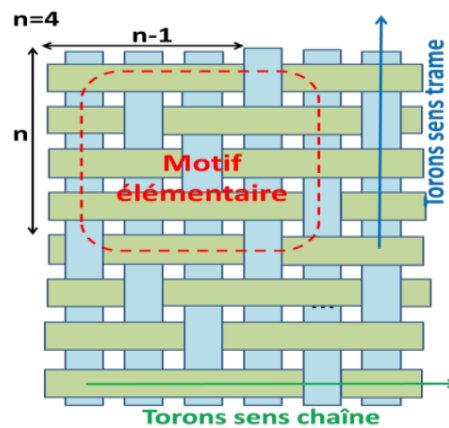


Fig 1.11 Représentation d'un tissu satin pour $n=4$.

1.6.2 Différents types de renfort

Les renforts les plus utilisés se présentent sous forme de fibres ou formes dérivées et constituent une fraction volumique de matériau composite généralement comprise entre 0.3 et 0.7, Les renforts fibres se présentent sous diverses formes commerciales [10].

- ✚ Sous forme de roving (fils, mèches, etc. ...), le roving est un assemblage de fils de bases parallèles groupés sans torsion.
- ✚ Sous forme de tissus (tissus taffetas, toiles, serge, etc.) : le tissu est formé par l'entrecroisement perpendiculaire des roving, les tissus de roving peuvent peser jusqu'à 800 g/m².
- ✚ Sous forme de mat (à fil coupé, à fil continu) : le mat est un matelas de fils coupés ou continu à ensimage plastique, agglomérés par un liant à solubilité rapide ou lente dans la résine.

1.6.2.1 Les renforts fibreux

Les fibres ont pour rôle principal d'améliorer les caractéristiques mécaniques du matériau rigidité, résistance à la rupture, dureté. Cependant, elles peuvent aussi influencer sur d'autres propriétés d'usage, liées par exemple au comportement thermique : tenue en température ou tenue au feu [1]. Dans l'industrie, le choix de la fibre se fait généralement parmi les trois matériaux suivants : carbone, verre ou aramide. Le (tableau 1.2) donne à titre d'exemples quelque unes de leurs propriétés mécaniques.

Tab 1.2 Caractéristique mécanique moyennes en traction de fibres seules (verre-E, carbone, aramide) [1]

	Verre-E	Carbon	Aramide
Résistance à la traction (GPa)	3.8	5.5	3.0
Module d'élasticité en traction (GPa)	72	294	112
Elongation à la rupture (%)	4.9	1.9	2.4

1.7 Architecture des matériaux composites

Le choix de la matrice dépend du domaine d'application auquel est destiné le composite (résistance à des températures élevées, résistance à la corrosion, coût de revient etc.). Le rôle de la matrice est de transmettre les charges entre les fibres pour utiliser leurs propriétés mécaniques et de maintenir les renforts dans une forme compacte. Les résines les plus utilisées sont les époxydes et les polyesters insaturés qui sont des résines à polymérisation irréversible [11]

1.7.1 Monocouche

Les monocouches représentent l'élément de base de la structure composite. Les différents types de monocouches sont caractérisés par la forme du renfort : à fibres continue, à fibres courtes, fibres tissées et mat.

Stratifié

Les stratifiés sont constitués de couches successives (appelées parfois plis) de renforts (fils, stratifiés, mat, tissus, etc.) imprégnés de résines.

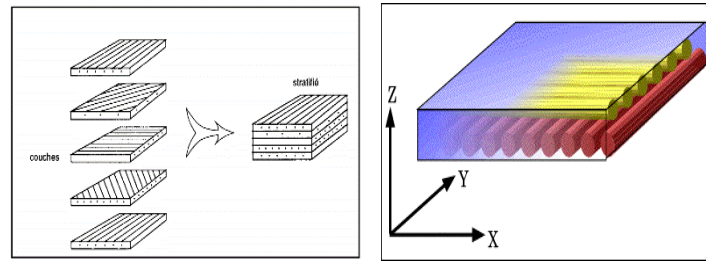


Fig 1.12 architecture des Stratifiés

1.7.1.1 Désignation des structures stratifiées

Les structures stratifiées à base de tissus unidirectionnels sont constituées d'un grand nombre de couches ou plis. L'épaisseur d'une couche dépend de son grammage. L'épaisseur de chacune des couches est généralement très faible, de l'ordre de 0,125 mm pour un matériau carbone époxy de type Aéronautique et 0,3 mm pour ceux qui sont utilisés dans l'industrie Nautique. Ces structures stratifiées sont constituées de couches unidirectionnelles avec des fibres orientées de façon différente d'une couche à l'autre afin d'obtenir les propriétés mécaniques souhaitées pour la structure finale [1]

Les propriétés globales du composite dépendent donc des propriétés des matériaux de chaque pli. Les séquences d'empilements constituant le stratifié sont codifiées par une nomenclature qui décrit, selon la direction de l'épaisseur, la position et l'orientation de chaque pli du composite. Afin de préciser leur orientation, il faut définir un repère de référence $\mathbf{R}_1(\mathbf{O}, \mathbf{X}_1, \mathbf{Y}_1, \mathbf{Z}_1)$ associé au stratifié avec :

- ✚ \mathbf{X}_1 : vecteur associé généralement à la direction du chargement principal, qui définit l'axe à partir duquel on mesure l'angle d'orientation de chaque pli.
- ✚ \mathbf{Z}_1 : vecteur correspondant à la direction perpendiculaire au plan du stratifié.

Ensuite on définit un repère local $\mathbf{R}_2^n(\mathbf{O}, \mathbf{c}, \mathbf{Y}_2^n, \mathbf{Z}_1^n)$ associé à chaque pli du stratifié avec :

\mathbf{n} : indice définissant le nième pli

\mathbf{X}_2^n : vecteur associé à la direction principale des fibres

$\theta_n = (\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2^n)$: l'angle d'orientation du $n^{\text{ième}}$ pli par rapport au repère local du stratifié.

Pour un composite à n plis à architecture identique, la description des empilements se fait du haut vers le bas en écrivant les angles d'orientations couche après couche $[\theta_1/\theta_2 \dots \theta_{n-1}/\theta_n]$.

(La figure 1.13) donne un exemple de stratifié à cinq couches pour un composite à renfort UD $[0^\circ/45^\circ/+45^\circ/0^\circ/-45^\circ/0^\circ]$. Cette nomenclature est également valable pour les renforts tissés.

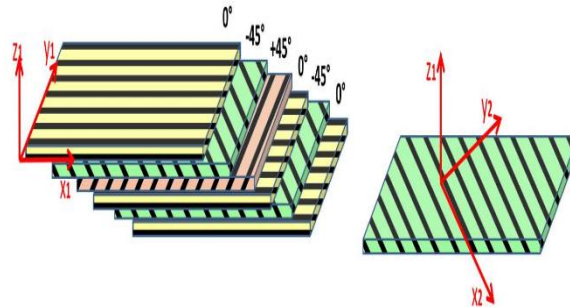


Fig 1.13 Désignation des structures stratifiées

1.7.2 Sandwichs

Matériaux composés de deux semelles (ou peaux) de grande rigidité et de faible épaisseur enveloppant une âme (ou cœur) de forte épaisseur et faible résistance. L'ensemble forme une structure d'une grande légèreté. Le matériau sandwich possède une grande rigidité en flexion et c'est un excellent isolant thermique. [12]

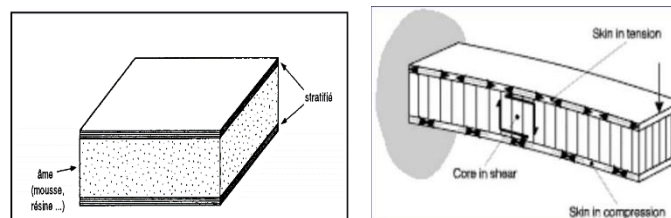


Fig 1.14 Une structure Sandwichs

1.7.2.1 Désignation des structures sandwichs

Les structures composites subissant des sollicitations de type flexion ou torsion sont généralement construites en matériaux sandwichs. Une structure sandwich est composée d'une âme et de deux peaux en matériaux composites. L'assemblage est réalisé par collage à l'aide d'une résine compatible avec les matériaux en présence. Les âmes les plus utilisées sont de type nid d'abeilles, âme ondulée ou mousse. Les peaux sont généralement constituées de structures stratifiées. Une âme nid d'abeilles est présentée sur la (figure 1.14). Ces structures ont une grande rigidité en flexion et torsion. L'âme de la structure sandwich résiste principalement aux contraintes de cisaillement et de compression hors plan, les peaux inférieures et supérieures supportent quant à elles les efforts dans leur plan. [13]

1.7.3 Une structure multi échelles

Un matériau composite est structuré à plusieurs échelles (**figure 1.15**). Dans la suite, on utilisera les appellations suivantes pour désigner ces différentes échelles :

- ✚ L'échelle macroscopique correspond naturellement à la taille de la pièce qui sera utilisée en service.
- ✚ L'échelle mésoscopique est associée à l'organisation du matériau qui est observable à une échelle millimétrique : épaisseur des plis qui constituent un stratifié ou tailles caractérisant le tissu (période spatiale du tissu, largeur d'un toron).
- ✚ L'échelle micrométrique correspond à la structuration du matériau qui est observable sur quelques dizaines de micromètres : diamètre des fibres, distance inter-fibre.
- ✚ L'échelle submicrométrique correspond à des régions spécifiques du composite dont l'extension spatiale s'étend sur une distance qui est égale ou qui est inférieure au micromètre : frontière fibre-matrice, interphase...etc.

Connaissant les caractéristiques des constituants élémentaires (fibre et matrice) ainsi que l'organisation du matériau aux différentes échelles, il est possible de prédire le comportement mécanique macroscopique d'un composite. Cela nécessite l'emploi de modèles qualifiés de « micromécaniques ». Ces modèles prennent en compte le comportement mécanique du composite aux échelles locales. Dans le paragraphe suivant, nous présentons les principaux modèles micromécaniques utilisés pour prédire le comportement mécanique macroscopique des composites et correspondant au couple : matrice polymère/fibres longues [1]

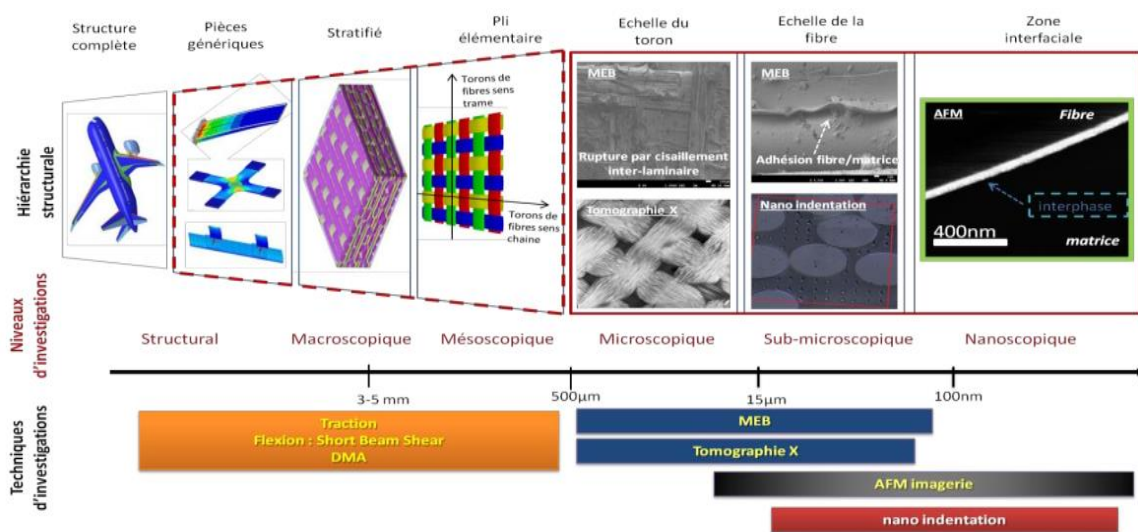


Fig 1.15 Une structure multi échelles

1.7.4 Structures composites tissées multidirectionnelles

Il est possible de créer des pièces en matériaux composites de type tridimensionnelles massives ou des formes de révolution. Des tissages volumiques de type 2D (deux directions de renfort), 3D–Evolutif (deux directions de renfort et un piquage dans la troisième direction), 3D (trois directions de renfort), 4D (quatre directions de renfort), ou plus sont élaborés dans l'industrie aérospatiale. Il est également possible de tisser des cylindres ou des cônes afin [13]

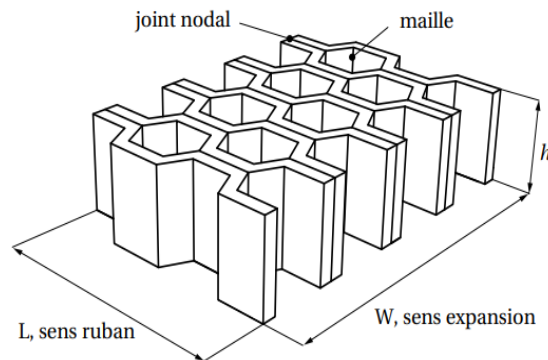
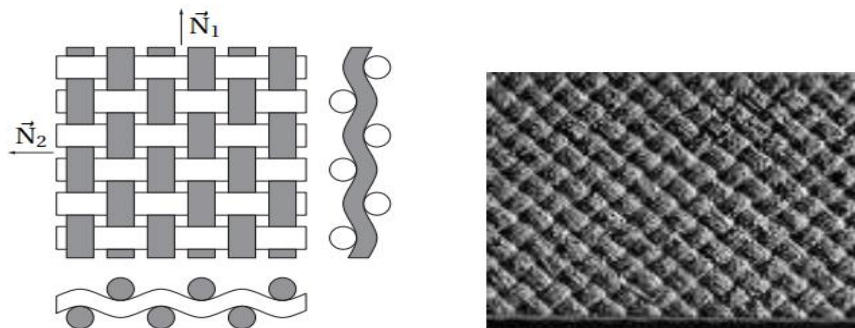


Fig 1.16 Une structure composite tissée multidirectionnelles

1.7.4.1 2D SiC-SiC

Le matériau composite 2D tissé SiC-SiC (fibre-céramique/matrice-céramique) a deux directions de renfort comme illustré sur les **figures 1.17(a) et 1.17(b)**. Ce type de matériau est destiné à des utilisations thermo-structurales (température d'utilisation de 1 000°C à 1 400°C). Ce type de matériau est réalisé par la Société Européenne de Propulsion / Groupe Snecma. Il est étudié pour être utilisé dans les parties chaudes des structures : moteurs d'avions, moteurs fusées et protections thermiques. [13]



(a) Schématisation

(b) illustration

Fig 1.17 Une structure composites 2D SiC-SiC

1.7.4.2 Aerolor 32 C/C

L'Aerolor 32 est un matériau thermo-structural réalisé par l'Aérospatiale. C'est un composite à renfort et matrice de carbone renforcé par trois directions de fibres, comme indiqué sur la (figure 1.18), La matrice est infiltrée dans les blocs préalablement tissés au moyen de mèches de 3 000 filaments. [13]

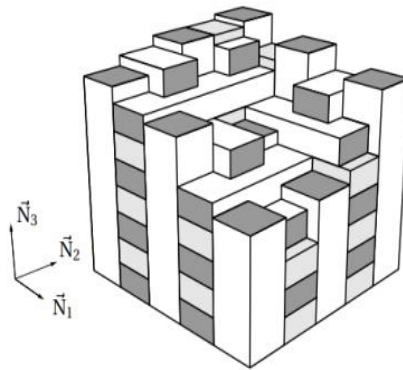


Fig 1.18 Géométrie tri-orthogonale de l'Aerolor 32

1.7.4.3 3D-Evolutif C/C

Le 3D-Evolutif est un matériau thermo-structural réalisé par l'Aérospatiale. Le concept de cette architecture fibreuse permet de concevoir des pièces de formes complexes. Il permet également une évolution des taux et directions de renforts fibreux en fonction des besoins mécaniques et thermiques. Le matériau avec quatre directions de renfort dans le plan au comportement mécanique global de type élastique fragile, les niveaux de non linéarité étant très faibles. C'est un composite à renfort et matrice de carbone renforcé par deux directions de fibres. Un tissage suivant la troisième direction de l'espace renforce le tissage-bidirectionnel. Les renforts et la matrice du 3D-Evolutif C/C sont en carbone. Les constituants sont :

- ✚ La fibre en carbone
- ✚ La matrice RA 101 carbonisée. C'est un carbone vitreux déposé par des phases successives d'imprégnation et de pyrolyse.

La méthode de tissage consiste à déposer des fils relativement jointifs de façon à réaliser des couches. Le nombre de couches et les orientations des renforts sont déterminés en fonction des propriétés thermomécaniques recherchées. On obtient ainsi un empilement de type multicouche

sans liant. Un piquage de mèches dans la troisième direction assure le maintien et le tassement du substrat fibreux. Ce piquage représente un faible taux volumique du total des fibres du composite.

La matrice est ensuite imprégnée au substrat et pyrolysée suivant des séries de cycles thermiques, le composite est légèrement dissymétrique puisque sur la face supérieure sont visibles les retours de piquage alors que la face inférieure est usinée au ras des picots lui donnant ainsi un aspect plus régulier. [13]

1.7.4.4 Sepcarb(r) 4D C/C

Le Sepcarb(r) 4D est un matériau thermostructural réalisé par la Société Européenne de Propulsion. C'est un composite à renfort et matrice de carbone renforcé par des fibres suivant quatre directions de l'espace. Les renforts sont notés r_1 , r_2 , r_3 et r_4 sur la figure 1.8.

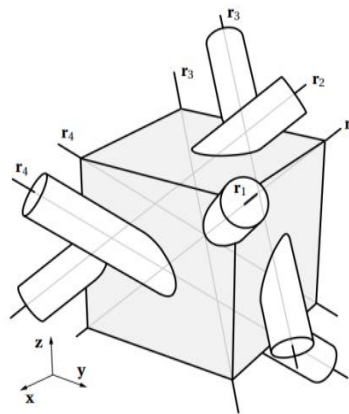


Figure 1.19 Sepcarb(r) 4D C/C renfort carbone/matrice carbone, tissage suivant quatre directions de l'espace

1.8 Les composites à fibres

Les fibres sont le constituant de base du renfort des composites qui possède une forme de matière extraordinaire possédant une résistance au rupteur et souvent un module d'élasticité beaucoup plus élevés que ceux du même matériau sous forme massive.

Le rôle des fibres est d'assurer les fonctions mécaniques. Les fibres les plus utilisées sont les fibres de verre, d'aramide et de carbone (**Fig. 1.20**). Elles présentent des caractéristiques intéressantes [3]

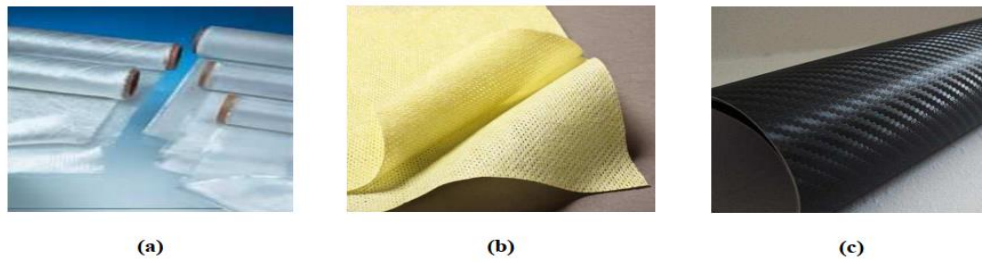


Figure 1.20 Exemples de fibres les plus utilisées dans la construction des stratifiés : a) verre, b) aramide etc) carbone

1.8.1 Fibres de verre

Le verre est composé essentiellement de silice (SiO_2), abondante puisqu'elle est le constituant principal du sable et peu chère, néanmoins la silice possède une température de fusion d'environ $1750\text{ }^\circ\text{C}$ et cette température élevée exclut la possibilité de filer de la silice fondue à travers une filière, faute de trouver un matériau pour la filière qui puisse résister à cette température. La silice est donc combinée avec d'autres éléments tel que l'oxyde de sodium (Na_2O), l'oxyde de potassium (K_2O), le fluor (F), l'oxyde de calcium (CaO), l'oxyde de magnésium (MgO) et l'oxyde de bore (B_2O_3) sont employés pour stabiliser la structure de verre et pour modifier ses propriétés physiques [2]. Les fibres de verre ont un excellent rapport performance-prix qui les placent de loin au premier rang des renforts utilisés actuellement dans la construction de structures composites. La composition des différents types de verre est donnée dans le (Tableau 1.3)

Tab 1.3 composition et Propriétés des fibres de verre

Type de verre	E	S	R	C	D
SiO_2	54	65	60	65	74
Al_2O_3	15	25	25	4	
CaO	18		9	14	0.2
MgO	4	10	6	3	0.2
B_2O_3	8			5.5	23
F	0.3				
Fe_2O_3	0.3				
TiO_2					0.1
Na_2O				8	1.2
K_2O	0.4			0.5	1.3
Propriétés					
Densité	2.54	2.49	2.49	2.49	2.16
Résistance (20 °c)(GPa)	3.5	4.65	4.65	2.8	2.45
Module élastique (20 °c) (GPa)	73.5	86.5	86.5	70	52.5
Déformation à la rupture (20 °c) (%)	4.5	5.3	5.3	4.0	4.5

1.8.2 Fibres de carbone

La fibre de carbone se compose de fibres ayant un diamètre moyen de l'ordre de 7 à 8 micromètres et constituée principalement d'atomes de carbone. Ces atomes sont arrangés dans des cristaux microscopiques selon une chaîne hexagonale comme le montre la (**figure 1.21**) Cet arrangement des cristaux rend la fibre extrêmement résistante. Plusieurs milliers de fibres de carbone sont enroulées ensemble pour former un fil, qui peut être employé tel quel ou sous forme de tissu [2]

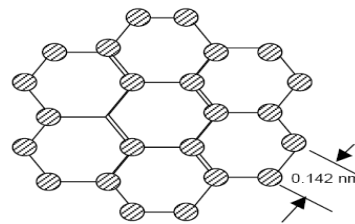


Fig 1.21 Organisation hexagonale du tissu des atomes de Carbone

1.8.3 Fibres aramides

Les fibres aramides ont des propriétés mécaniques élevées en traction comme les carbonés, mais leurs résistances à la compression est faible. La faible tenue mécanique en compression est généralement attribuée à une mauvaise adhérence des fibres à la matrice dans le matériau composite. Pour y remédier, des enzymes des fibres peuvent être utilisé. L'utilisation de composites à fibres hybrides permet également de remédier aux faiblesses des composites à fibres aramides. Des renforts hybrides de type verre-kevlar ou carbone-kevlar sont largement utilisés dans le domaine des loisirs (ski, raquette de tennis) [2]

1.8.4 Fibres céramiques

Les matériaux composites de type céramiques sont souvent constitués de renforts et de matrice en céramique. Les fibres sont élaborées par dépôt chimique en phase vapeur sur un fil support. Ces fibres sont rencontrées dans des applications où la température est très élevée entre 500°C et 2 000°C. Ces matériaux sont utilisés notamment dans les parties chaudes des moteurs D'avions, quelques exemples de fibres céramiques [2]

- ✚ fibres de Carbure de Silicium
- ✚ fibres de Bore
- ✚ fibres de Bore carbure de silicium

1.9 Caractéristiques mécaniques des fibres

Il existe différents types de fibres (**Tableau 1.4**). Elles peuvent être scindées en deux groupes, les fibres à haut module et les fibres à haute résistance. Les fibres à haut module ont une résistance faible et celles à forte résistance ont un module faible [13]

Tab 1.4 Propriétés mécaniques des fibres

fibre	densité	σ_r (MPa) en traction	Allongement à la rupture en %	E_L (MPa) Longitudinale	Diamètre du filament élémentaire μm
Verre E	2.54	3400	4.8	73000	3-30
Verre R	2.48	4400	5.4	86000	3-30
Aramide BM	1.45	3100	2	70000	12
Aramide HM	1.45	3100	1	130000	12
Kevlar	-	2900	2.3	130000	1.45
Aluminium	-	1380	0.7	380000	3.9
Carbone HT	1.78	2800	0.5	200000	8
Carbone HM	1.80	2200	-	400000	8
Bore	2.63	3500	0.8	400000	100-200

1.10 Conclusion

En conclusion, nous avons pensé qu'une simple présentation sur les composites serait utile du fait de leur légèreté, leurs matériaux composites apparaissent comme un véritable concurrent des métaux dans de nombreuses applications structurelles.

Les Propriétés mécaniques des différents composants du matériau composite. Nous avons également parlé des avantages des matériaux composites structuraux. Ces matériaux sont utilisés pour renforcer des structures performantes.

*Généralités Sur la
Phénomène de Speckle*

Chapitre 2

2.1 Définition

Lorsqu'un objet diffusé est éclairé par un faisceau laser, la surface semble être recouverte d'une très petite structure granulaire répartie de manière aléatoire dans un motif de diffraction, appelé spot. La dilution microscopique de la surface, ainsi que la cohérence de la lumière laser, produisent cet effet. La lumière diffusée en chaque point de cette surface interfère avec un grand nombre d'ondes lumineuses réfléchies par d'autres points adjacents si les changements d'épaisseur de cette surface sont supérieurs ou égaux à la longueur d'onde du laser, comme le montre la (**Figure 2.1**). Le point cible est un nombre d'interférence granulaire causé par la superposition d'ondes dont la phase est distribuée de façon aléatoire. Si la surface éclairée par la lumière laser est observée à travers un système optique, ce dernier présente également la forme d'une tache et dans ce cas on parle de spectre intrinsèque [14]

Un exemple d'une figure de speckle est représenté par la **figure 2.2**

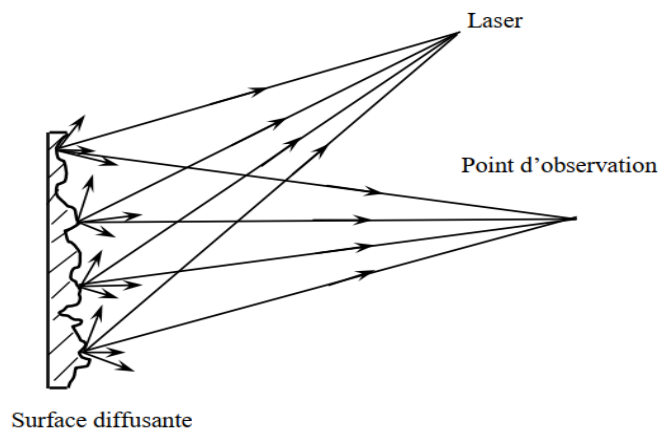


Fig 2.1 Contour microscopique d'une surface diffusante

L'intensité résultante dans un point donné sur l'écran d'observation est déterminée par la somme des amplitudes complexes des différents rayons lumineux qui arrivent à ce point. Si l'amplitude résultante est nulle, un speckle noir est observé par contre si tous les rayons qui arrivent sur ce point sont en phase, un speckle brillant est obtenu



Fig 2.2 Figure de speckle produite par une plaque d'Aluminium recouverte d'une poudre blanche diffusante.

2.2 Propriétés statistiques du speckle

Un speckle est dit Gaussien ou idéal quand ces propriétés statistiques sont indépendantes de la nature de l'objet diffusant. Par conséquent, la rugosité de l'objet n'a pour rôle que la modulation aléatoire de la phase des ondes diffusées et n'influence aucunement les lois des distributions statistiques d'intensité et de phase. Pour parvenir à une distribution Gaussienne [15]

On doit considérer les hypothèses suivantes :

- ✚ La longueur de cohérence de la source lumineuse, et le diamètre de la zone éclairé sont très grande devant la plus grande différence de marche causée par la rugosité de la surface.
- ✚ Les variations d'épaisseur de la surface sont supérieures à la longueur d'onde de la lumière d'éclairage.
- ✚ La longueur de corrélation de la surface doit être très petite devant les dimensions de la zone contribuant à la formation dur speckle.
- ✚ Un grand nombre N d'éléments de surface indépendants servent à la formation du speckle.
- ✚ La surface ne dépolarise pas les vibrations lumineuses incidentes

2.2.1 Fonction de densité de probabilité :

Le speckle est caractérisé par une distribution aléatoire de l'intensité et de la phase. La distribution d'intensité représentée par la fonction de densité de probabilité d'un speckle complètement développé et polarisé est donnée par :

$$p(I) = \frac{I}{\langle I \rangle} \exp - \frac{I}{\langle I \rangle} \quad I \geq 0 \quad (2.1)$$

$P(I)$, est la probabilité qu'un speckle qui a une intensité comprise entre les valeurs I et $I+dI$.

$\langle I \rangle$, est l'intensité moyenne. L'intensité de speckle montré par la figure 1.3, obéit ainsi aux statistiques d'une exponentielle négative. L'intensité la plus probable dans le champ speckle est l'intensité nulle, cela est confirmé expérimentalement par la présence d'un grand nombre de grains noirs dans la figure de speckle. [14]

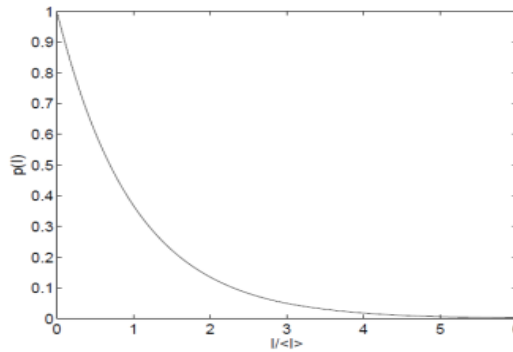


Figure 2.3. Fonction de densité de probabilité de la distribution de l'intensité dans un champ speckle

2.2.2 Le contraste :

Le contraste de la figure de speckle est donné par le rapport de la déviation standard est l'intensité moyenne :

$$C = \frac{\sigma}{\langle I \rangle} \quad (2.2)$$

La déviation standard de l'intensité dans une figure de speckle est déterminée par :

$$\sigma^2 = \langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2 = \langle I \rangle^2 \quad (2.3)$$

L'équation (1.3) démontre que pour un speckle complètement développé le contraste est unitaire.

2.3 Types et dimensions du speckle

La caractéristique la plus importante du speckle dans l'étude des déplacements et des déformations d'objet est sa dimension. Cette dernière est déterminée à partir des statistiques du second ordre du speckle, en particulier la fonction d'autocorrélation [14]

2.3.1 Speckle objectif

Dans le cas du speckle objectif, présenté dans in (**fig 2.4**), toute l'aire éclairée de l'objet participe à la formation de chaque speckle individuel sur l'écran d'observation. Donc les dimensions du speckle dépendent de l'aire éclairée de la surface objet

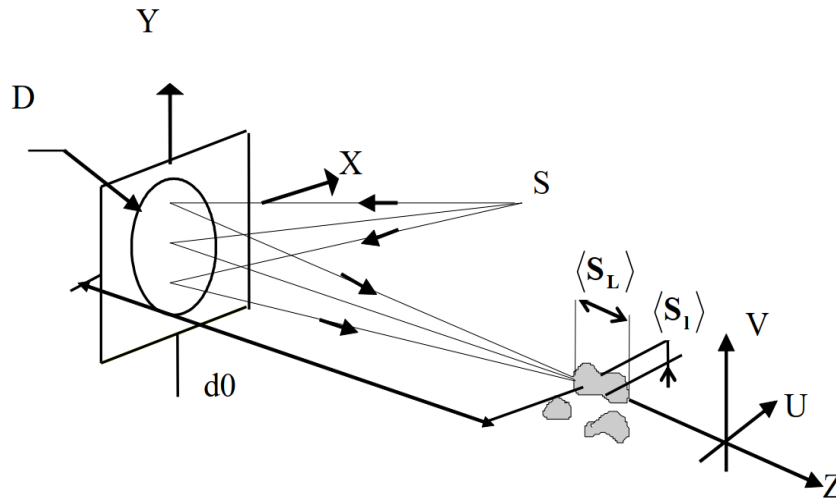


Fig 2.4 Formation du speckle objectif

Les dimensions moyennes latérales et longitudinales pour lesquelles l'amplitude, l'intensité ou la phase du speckle présentent une relation stable, sont données par les relations suivantes :

$$\langle s_l \rangle = 1.22 \frac{\lambda d_0}{D} \quad (2.4)$$

$$\langle s_L \rangle = \frac{8\lambda d_0^2}{D^2} \quad (2.5)$$

2.3.2 Speckle subjectif

Dans ce type d'arrangement, illustré dans la (**fig 2.5**), les dimensions des speckles sont aussi déterminées par la figure de diffraction d'une ouverture, qui est dans ce cas la pupille du système optique utilisé

$$\langle s_l \rangle = 1.22 \frac{\lambda d_i}{a} = 1.22 \lambda (1+g)F \quad (2.6)$$

$$\langle s_L \rangle = \frac{8\lambda d_i^2}{a^2} = 8\lambda(1+g)^2 F^2 \quad (2.7)$$

Où « F » est le nombre d'ouverture qui est le rapport entre la distance focale et le diamètre de l'ouverture de la lentille.

« g » est le grandissement de la lentille qui le rapport $(\frac{d_i}{d_o})$; où d_i et d_o sont respectivement les distances lentille-image et lentille-objet. [14]

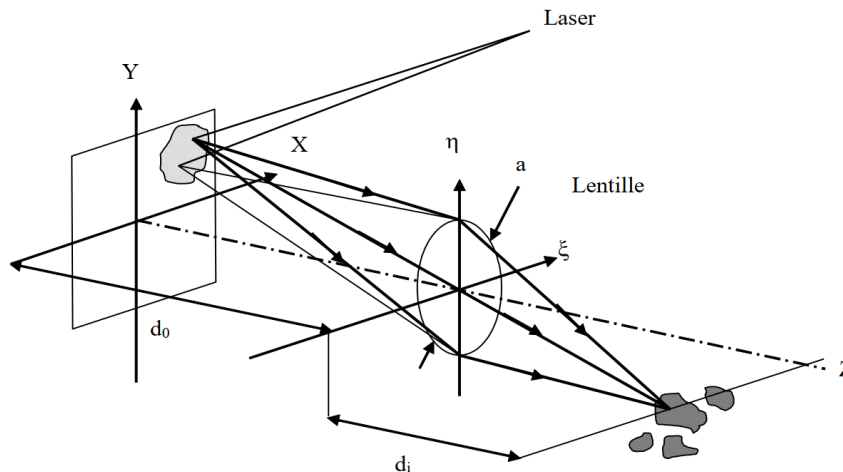


Fig 2.5 Formation du speckle subjectif

2.4. Photographie speckle

La photographie speckle est une technique qui rend simple la mesure des déplacements dans le plan, les dérivés des déplacements, et les inclinaisons de surfaces, en utilisant des systèmes optiques simples. La procédure générale consiste à éclairer l'objet par un seul faisceau laser et faire un enregistrement photographique sur une seule plaque photographique de l'objet avant et après déplacement. La plaque développée est appelée specklogramme à double exposition [16] Le plan d'enregistrement des figures de speckles doit être situé soit dans le plan où l'image de l'objet est formée ou bien dans le plan focal ou bien dans un plan intermédiaire du système optique. Par conséquent, on distingue deux types de photographie speckle selon la position du plan d'enregistrement, la

photographie speckle focalisée et non-focalisée. En général, la technique de photographie speckle focalisée génère des franges sensibles aux déplacements dans le plan, par contre la photographie speckle non-focalisée est sensible aux déplacements hors du plan.

2.4.1. Photographie de speckle focalisée

La méthode de photographie de speckle focalisée à double exposition développée par Archbal et al. [17], J.N.Butters et J.A.Leendertz [18], Archbal et Ennos [19], est la technique la plus utilisée pour déterminer les composantes de déplacement dans le plan basé sur l'effet speckle. Considérant la procédure d'enregistrement du specklogramme à double exposition illustrée dans la (Fig 2.6). Une surface diffusante est éclairée par un faisceau laser divergent. La lentille L de focale f et d'ouverture numérique F forme dans le plan (X, Y) l'image de la surface objet. La plaque photographique est exposée à deux reprises, l'une avant et l'autre après déplacement. En tenant compte du principe de l'optique géométrique, les distances d_o et d_i séparant l'objet et la lentille d'une part et la lentille et le plan d'enregistrement d'autre part, sont reliées à la distance focale f de la lentille par la relation

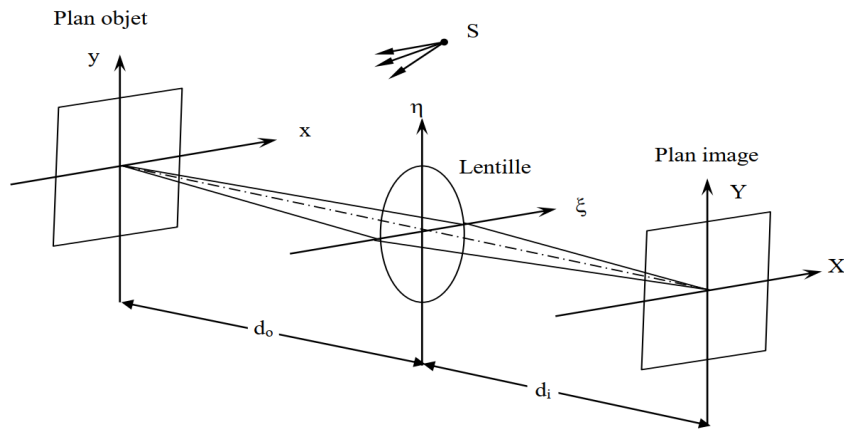


Fig 2.6 Arrangement optique de photographie de speckle focalisé

La distribution d'amplitude de chaque point (X, Y) dans l'image de l'objet est exprimée par:

$$U(X, Y) = K \iiint \int U_0(x, y) \cdot P_L(\xi, \eta) \cdot \exp\left\{\frac{-ik[\xi(X + gx) + \eta(Y + gy)]}{d_i}\right\} dx dy d\xi d\eta \quad (2.8)$$

K est une constante complexe, $U_0(x, y)$ représente la distribution d'amplitude juste devant la surface objet, $P_L(\xi, \eta)$ est la fonction pupillaire, et g est le grandissement du système optique.

La distribution d'intensité enregistrée sur la plaque avant déplacement est proportionnelle à $[U(X, Y)U_*(X, Y)] = I(X, Y)$

Lorsque l'objet subit une déformation de telle sorte que les points objet se déplacent d'une valeur qui dépasse le diamètre moyen d'un speckle, il y aura changement dans la distribution d'amplitude qui correspond à $(X + Ax, Y + Ay)$; où Ax et Ay sont les composantes de déplacement des grains de speckle dans le plan (X, Y) avec $(Ax, Ay) = g(u_x, u_y)$.

Avec (u_x, u_y) qui représentent les composantes de déplacement des grains de speckle dans le plan (x, y)

L'intensité totale enregistrée sur la plaque après les deux expositions est donnée comme suit :

$$\begin{aligned} I_T(X, Y) &= U(X, Y)U_*(X, Y) + U(X + Ax, Y + Ay)U_*(X + Ax, Y + Ay) \\ &= I(X, Y) + I(X + Ax, Y + Ay) \end{aligned} \quad (2.9)$$

Après le développement photographique du specklogramme à doubles expositions, ce dernier aura les propriétés d'une transparence ; d'où l'amplitude de la fonction de transmittance $h(X, Y)$ définie par :

$$h(X, Y) = h_0 + \beta\tau[I(X, Y) + I(X + Ax, Y + Ay)] \quad (2.10)$$

h_0 et β sont des constantes qui dépendent de l'émulsion photographique et τ est le temps d'exposition.

2.4.2. Photographie de speckle non focalisé

Plusieurs méthodes de photographie de speckle n'exigent pas la focalisation de la surface objet sur le plan image. C'est à dire que l'objet peut être placé en avant ou en arrière par rapport à son plan objet (**voir Figure 2.7**). Cette méthode est largement utilisée pour mesurer les différentes composantes de déformations. En conséquence, les caractéristiques du déplacement de speckle dans le plan image seront modifiées. L'espacement de franges produites par cette technique dépend de la forme du front d'onde d'éclairage et de la position du plan d'enregistrement [14]

Par un choix convenable de la géométrie d'éclairage et de la position du plan d'enregistrement, on peut séparer les déplacements hors du plan et rendre les décalages des grains de speckle sensibles seulement à ce type de mouvement.

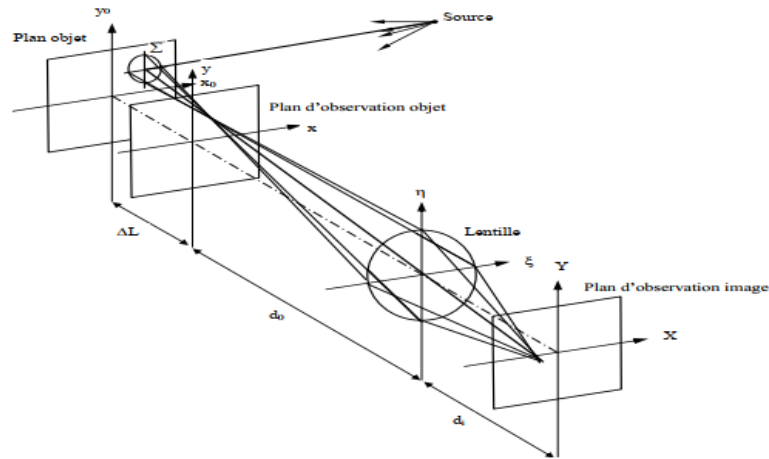


Fig 2.7 Arrangement optique de la photographie speckle non focalisé

Le plan d'observation image enregistre la figure de speckle produite dans le plan d'observation objet (x, y) (représenté par la surface Σ), homothétique de la pupille de la lentille d'enregistrement. Le specklogramme développé peut être analysé par l'une des techniques de filtrage spatial discutées dans les paragraphes qui suivent. La méthode à double exposition (mesure des rotations hors du plan) proposée par Tiziani [20], est un exemple de photographie de speckle non focalisée. La technique nécessite un enregistrement du specklogramme dans le plan focal image de la lentille d'imagerie. La surface objet est éclairée par un faisceau parallèle sous un certain angle par rapport à la normale. Le speckle produit dans le plan focal image reste stationnaire lorsque l'objet se déplace latéralement dans son plan.

2.4.3 Observation des franges et détermination des déplacements

2.4.3.1 Filtrage point par point et franges de Young

Le processus de filtrage point par point représenté par la (**figure 2.8**), est effectué par une simple projection d'un faisceau laser mince sur une région quelconque du specklogramme à double expositions. L'observation de la figure de diffraction doit être située à une distance L plus grande que celle du diamètre du faisceau d'éclairage. Cette figure est un halo de diffraction dont le diamètre est inversement proportionnel au diamètre moyen d'un speckle individuel. Le halo est modulé par un système de franges équidistantes résultant de l'interférence à travers deux grains de speckle identiques mais légèrement décalés l'un de l'autre. Ces franges de Young contiennent les informations concernant la direction et la valeur du vecteur du déplacement. Il faut noter que dans cette technique de filtrage, le déplacement des

grains de speckle est constant dans l'aire éclairée du specklogramme, sinon aucune frange n'apparaîtra dans le halo de diffraction.

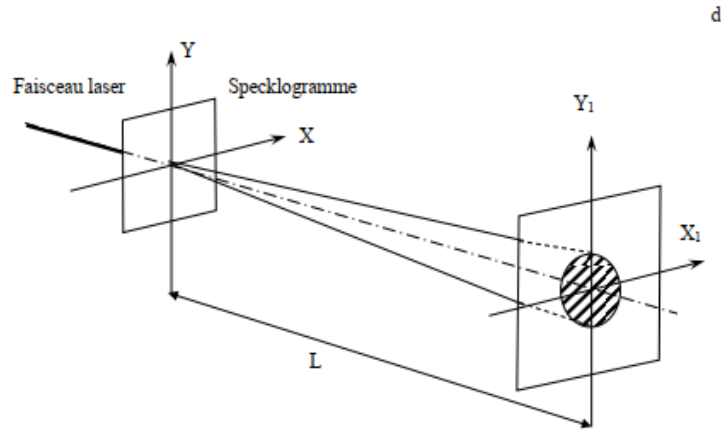


Fig 2.8 Principe de Filtrage point par point d'un specklogramme à double expositions.

Pour opérer dans une région de diffraction de Fraunhofer, une lentille peut être introduite entre le specklogramme et le plan d'observation [21], et ainsi obtenir des franges de meilleure qualité. L'amplitude complexe (X_1, Y_1) de l'onde lumineuse qui résulte de la diffraction du faisceau laser sur le specklogramme est présentée par la transformée de Fourier de la transmittance de l'équation (2.10). Les constantes et le facteur multiplicateur dans l'équation (2.10) peuvent être ignorés, L'équation de l'intensité devient :

$$U_1 = \mathcal{F}[I(X, Y) + I(X + A_X + Y + A_Y)]$$

$$= \iint [I(X, Y) + I(X + A_X, Y + A_Y)] \cdot \exp\left[-\frac{2\pi i(XX_1 + YY_1)}{\lambda L}\right] dXdY \quad (2.11)$$

L , représente la distance entre le specklogramme et le plan d'observation.

En utilisant la propriété de linéarité de la Transformée de Fourier, on réécrit l'équation (2.11) comme suit :

$$I_1(X_1, Y_1) = U_1(X_1, Y_1)U_1^*(X_1, Y_1) = 2|\mathcal{F}[I(X, Y)]|^2 \left[1 + \cos 2\pi \left(\frac{X_1 A_X + Y_1 A_Y}{\lambda L}\right)\right] \quad (2.12)$$

2.4.3.2. Filtrage à champ complet et franges isothétiques

L'arrangement optique utilisé dans le filtrage à champ complet est présenté dans la (**figure 2.9**). La transformée de Fourier de la transmittance du specklogramme est réalisée par la lentille

L_1 . Un filtre spatial sous forme d'un masque portant une petite ouverture, est placé dans le plan focal de la première lentille. Une seconde lentille dont le plan focal coïncide avec le plan de Fourier de la première lentille, collecte la lumière filtrée pour former une image de l'objet dans son plan focal image [22].

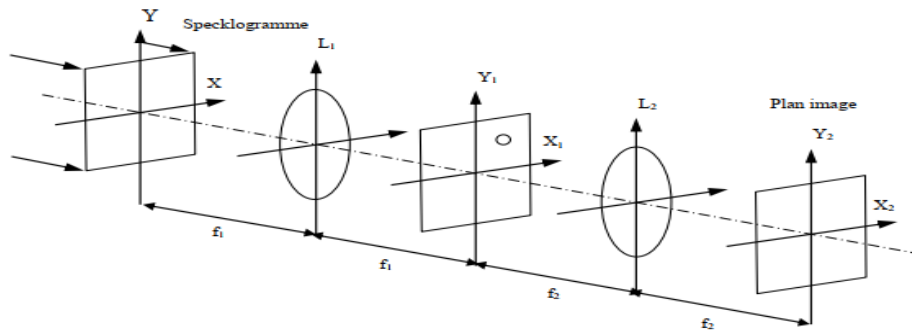


Fig 2.9 Principe de Filtrage à champ complet

Le masque placé dans le plan de Fourier de la première lentille bloque toute information provenant de différentes fréquences spatiales à l'exception d'un petit faisceau qui traverse la petite ouverture placée à un point de coordonnées (X_f, Y_f) . L'image formée dans le plan final de la lentille L_2 , aura

Des composantes dont les fréquences spatiales sont : $\frac{x_f}{\lambda f_1}, \frac{Y_f}{\lambda f_1}$

L'amplitude complexe dans le plan de Fourier de la lentille L_1 prend la forme :

$$U_1(X_1, Y_1) = \mathcal{F}[I(X, Y) + I(X + A_x, Y + A_y)]$$

$$= \iint_{-\infty}^{+\infty} (I(X, Y) + I(X + A_x, Y + A_y)) \exp[-i\lambda 2f\pi_1 (X_1 X + Y_1 Y)] dX dY$$

La distribution d'intensité dans le plan de Fourier prend la forme suivante :

$$I_1(X_1, Y_1) = U_1(X_1, Y_1) U_1^*(X_1, Y_1)$$

$$= \left| \iint_{-\infty}^{+\infty} I(X, Y) \exp\left[-\frac{i2\pi}{\lambda f_1} (X_1 X + Y_1 Y)\right] dX dY \left\{ 1 + \exp\left[2\pi i \frac{(X_1 A_x + Y_1 A_y)}{\lambda f_1}\right] \right\} \right|^2 \quad (2.13)$$

Lorsque la déformation est uniforme, des franges seront visualisées dans le halo correspondant à la variation du facteur harmonique. Si la déformation varie d'un point à l'autre (rotation dans le plan), aucune frange ne sera visible. Pour cela il faut sélectionner une bande particulière de fréquences par le positionnement d'une ouverture dans le halo à une distance (X_f, Y_f) .

Lorsque le filtre est placé sur l'axe à une distance $(X_f, 0)$, on obtient l'expression suivante (représentant les lignes de franges horizontales):

$$A_x(X, Y) = \frac{n\lambda f_1}{X_f} \quad (2.14)$$

Lorsque le filtre est placé sur l'axe Y_1 à une distance $(0, Y_f)$ on obtient l'expression suivante (représentant les lignes de franges verticales):

$$A_y(X, Y) = \frac{n\lambda f_1}{Y_f} \quad (2.15)$$

Le filtrage à champ complet permet donc de visualiser les lignes d'égal déplacement dans le plan, ou isothétiques, relatives à la figure de speckle enregistrée, avec une sensibilité variable et dans une direction bien choisie

A une distance X_f ou Y_f croissante, la densité des franges croît pour une même déformation, le filtrage à champ complet ne donne aucune frange lorsque le déplacement est uniforme. Dans la photographie de speckle focalisé, le specklogramme qui contient deux figures de speckle décalés latéralement peut être analysé par l'une des deux méthodes précédentes pour obtenir le déplacement dans le plan produit par la surface objet. En un point quelconque (x, y) de la surface diffusante, les décalages du speckle sont donnés par [22,23] :

$$u_x(x, y) = a_x(x, y) + \frac{x}{d_0} a_z(x, y) \quad (2.16)$$

$$u_y(x, y) = a_y(x, y) + \frac{y}{d_0} a_z(x, y) \quad (2.17)$$

2.5 De la photographie de speckle classique à la photographie de speckle numérique

Dans la formule classique de la photographie de speckle, les figures de speckle correspondant à l'objet avant et après déformation sont enregistrées sur la même plaque photographique. Après le développement de la plaque, le specklegramme est exploité par un filtrage point par point ou un filtrage à champ complet. Pour déterminer le champ de déplacement ou de déformation d'objet, le filtrage est effectué sur un grand ensemble de points dans le specklegramme. Le filtrage en plusieurs points du specklegramme est habituellement nécessaire puisque le speckle ne se déplace pas obligatoirement de façon monobloc. Le filtrage point à point permet donc d'établir une carte complète des déplacements sur l'ensemble de l'objet. Cependant, il est essentiel que les grains de speckle appartenant à une même région de filtrage aient subi un déplacement similaire pour voir apparaître les franges de Young. Autrement, on observe une superposition de plusieurs franges qui sont impossibles à discerner. Vu le grand nombre d'informations à traiter, un calcul manuel consomme beaucoup de temps et conduit à des erreurs plus au moins graves. Dans la version moderne de cette technique, appelée la photographie speckle digital (DSP), les deux images de l'objet avant et après déformation, sont enregistrées au moyen d'une caméra CCD et traitées numériquement à l'aide d'un ordinateur. Le déplacement des grains de speckle dans ce cas est déterminé numériquement par des algorithmes de corrélation [24,25]. L'utilisation des caméras CCD et le développement de techniques d'acquisition et de traitement d'images a fait de cette technique à la fois plus fiable, moins complexe et plus facile à utiliser. Lorsqu'une surface diffusante éclairée par un faisceau laser subit un déplacement ou une déformation ou les deux à la fois, les grains de speckle qui se produisent dans le champ diffusé ou dans son image, indique ce déplacement accompagné d'un changement de structure. Le déplacement du speckle causé par le déplacement d'une surface rugueuse est défini théoriquement par la position du pic de la fonction de corrélation entre les distributions d'intensités des figures de speckle dans un plan d'observation avant et après déplacement. La position du pic de la fonction de corrélation est déterminée par son écart de la position du pic de la fonction d'autocorrélation de la surface avant déformation et qui se localise toujours à zéro. D'autre part la diminution dans la hauteur du pic de corrélation correspond au changement de la structure du speckle, appelé décorrélation. La **(figure 2.10)** montre un exemple de calcul de déplacement par corrélation de speckle dans le champ de diffraction [25].

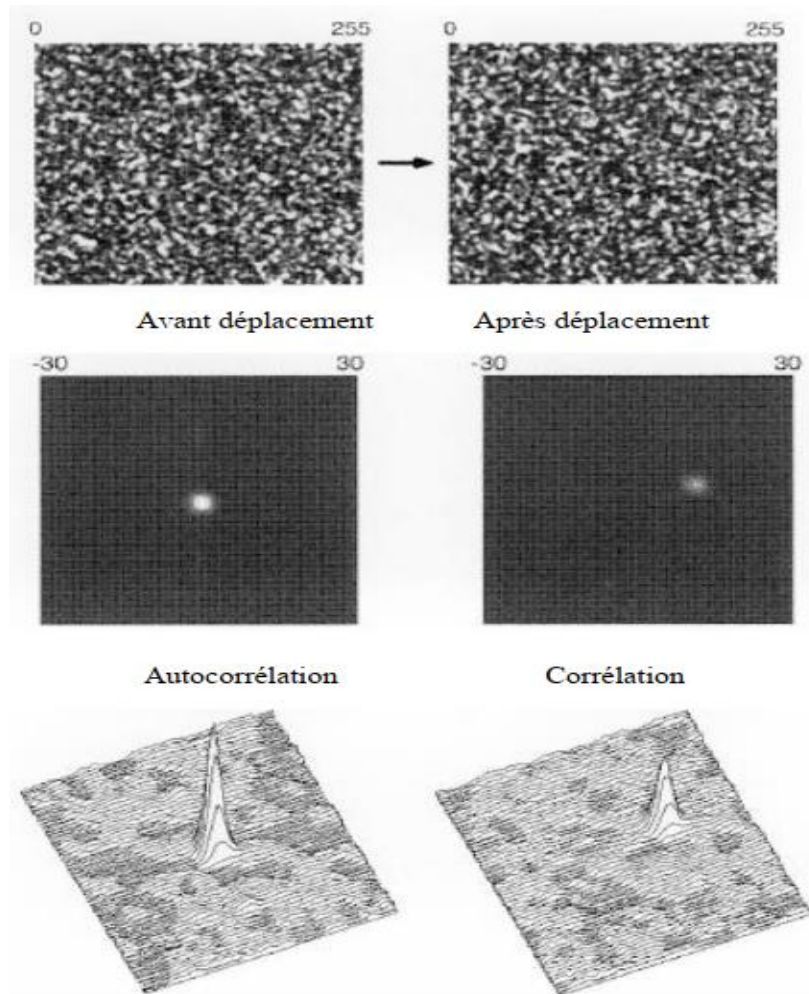


Fig 2.10 Figure de speckle dans le champ de diffraction avant et après un déplacement et leurs fonctions de corrélation.

2.5.1 Corrélation de l'intensité et de l'amplitude

Si l'amplitude complexe du champ de speckle peut être représentée par un processus aléatoire Gaussien, la fonction de corrélation de l'intensité sera exprimée par les fonctions de corrélations des amplitudes complexes $U_1(X, Y)$ et $U_2(X, Y)$ par [26] :

$$\begin{aligned}
 & \langle I_1(X, Y). I_2(X + X, Y + Y) \rangle \\
 & = \langle U_1(X, Y). U_1^*(X, Y). U_2(X + X, Y + Y). U_2^*(X + X, Y + Y) \rangle \\
 & = \langle I_1(X, Y) \rangle \langle I_2(X + X, Y + Y) \rangle + |\langle U_1(X, Y) U_2^*(X + X, Y + Y) \rangle|^2 \quad (2.18)
 \end{aligned}$$

Le premier terme de l'équation (1.18) est le produit entre les intensités moyennes avant et après déformation de l'objet et qui est constant.

Le second terme exprime la variation totale dans la corrélation de surface et qui est égale à la corrélation de la fluctuation d'intensité $\Delta I = I - \langle I \rangle$, donc on aura :

$$| \langle U_1(R) U_2^*(R + \mathbf{R}) \rangle |^2 = \langle \Delta I_1(R) \Delta I_2^*(R + \mathbf{R}) \rangle \quad (2.19)$$

Ainsi, la corrélation de l'intensité se réduit à la corrélation d'amplitude. La fonction de corrélation de l'amplitude complexe est calculée par l'application de l'intégrale de diffraction Fresnel Kirchhoff d'une onde qui se propage du point source au plan d'observation en passant par l'objet. Dans ce cas, l'étude du déplacement du speckle peut être faite selon une des deux configurations optiques suivantes:

- ✚ Speckle objectif
- ✚ Speckle subjectif

2.5.1.1 Déplacement du speckle objectif :

Dans la configuration du speckle objectif représentée par la (**figure 2.11**), $r(x, y)$ est la position d'un point sur la surface objet, et $R(x, y)$ la position d'un point image dans le plan d'observation.

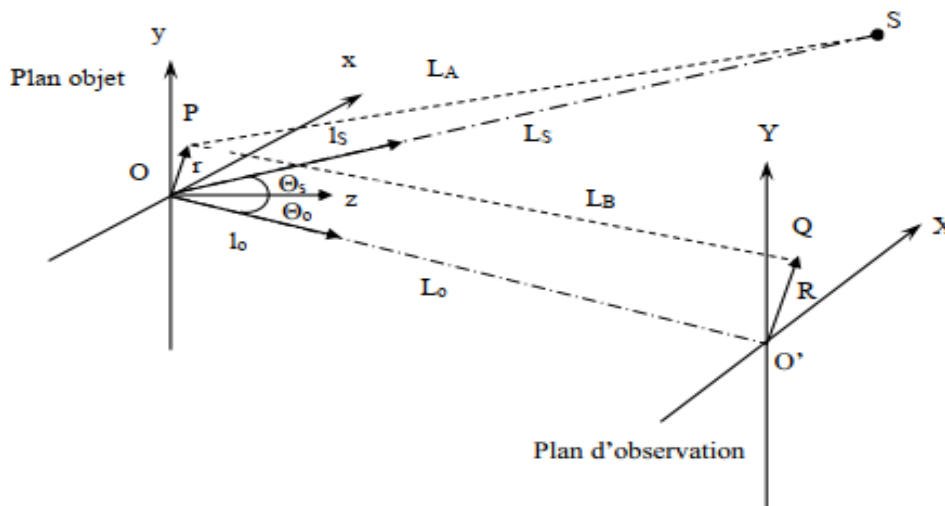


Fig 2.11 Système de coordonnées pour le calcul du déplacement de speckle objectif dans le champ de diffraction.

L'amplitude complexe dans un point d'observation avant déformation de l'objet qui est la superposition des ondes sphériques diffusées par le point objet $r(x, y)$ est donnée par [21] :

$$U_1(R) = \int \sqrt{I_0(r)} \exp[i\varphi(r)] \exp[ik\{LA(r) + LB(r, R)\}] d^2r \quad (2.20)$$

$$\text{Avec } k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

λ est le nombre d'onde

Soit $I_0(r)$ la distribution de l'intensité du faisceau incident, $\varphi(r)$ la phase aléatoire dû à la réflexion de la lumière sur la surface, $LA(r)$ le chemin optique entre s et r, $LB(r, R)$ le chemin optique entre r et R. En suppose que la rugosité de la surface est très fine devant le diamètre du spot incident et plus grande que la longueur d'onde du laser utilisé. Après la déformation, le point r se déplace vers $r+a(r)$ par le vecteur de déplacement $a(r)$, alors l'amplitude complexe est représentée par :

$$U_2(R) = \int \sqrt{I_0(r+a_T)} \exp[i\varphi(r)] \exp[ik\{LA(r+a) + LB(r+a, R)\}] d^2r \quad (2.21)$$

Où a_T est la composante de déplacement parallèle à la surface moyenne de l'objet.

Après substitution des équations (1.19) et (1.20), la fonction de corrélation de l'amplitude devient :

$$\begin{aligned} &< U_1(R) U_2^*(R + \bar{R}) > \\ &= \int \int \sqrt{I_0(r) I_0(r+a_T)} \exp[ik\{LA(r) \\ &- LA(r+a) + LB(r, R) - LB(r+a, R + \bar{R})\}] d^2r \end{aligned} \quad (2.22)$$

Lorsque le déplacement a_T est suffisamment petit que le diamètre du spot incident, la position du pic de $|< U_1(R) U_2^*(R + \bar{R}) >|$ dépend de l'exposant de l'équation (2.22), où on adopte l'approximation basée sur la supposition $|a| \ll LA(r) = \overline{SP}$

$$LA(r+a) = LA(r) - LA(r) \cdot a(r) \quad (2.23)$$

Avec $LA(r)$ le vecteur unité le long de \overline{PS}

De même, on fait l'approximation de la distance entre le point déplacé et le plan d'observation comme suit :

$$LB(r+a, R + \bar{R}) = LB(r, R + \bar{R}) - LB(r, R + \bar{R}) a(r) \quad (2.24)$$

D'où nous avons introduit $LB(r, R + \bar{R}) = \overline{PQ}$ et le vecteur unitaire $l_B(r, R + \bar{R})$ le long de \overline{PQ}

Cependant le rapport de l'exposant φ de l'équation (2.24) sur k devient

$$\begin{aligned} \frac{\varphi}{k} &= [l_A(r) + l_B(r, R + \bar{R})] \cdot a(r) + L_B(r, R) - L_B(r, R + \bar{R}) \\ &\approx [l_A(r) + l_B(r, R)] \cdot a(r) + L_B(r, R) - L_B(r, R + \bar{R}) \end{aligned} \quad (2.25)$$

Nous adoptons l'approximation $L_0 \gg |r|, |R|$, et en supposant que la déformation de la région éclairée est homogène, ainsi la distribution de déplacement de chaque point de surface est exprimée par une fonction linéaire de position. Donc au centre de la région éclairée l'équation (2.25) devienne comme suit :

$$\frac{\varphi}{k} = (l_s + l_0) \cdot a(0) + \frac{x \cdot \cos \theta_0}{L_0} (\bar{X} - A_x) + \frac{y}{L_0} (\bar{Y} - A_y) \quad (2.26)$$

$l_s = l_A(0)$, est la vectrice unité dirigée de O à S.

Dans l'équation (2.26) le vecteur (A_x, A_y) représente le déplacement de speckle causé par la déformation de l'objet :

$$\begin{aligned} A_x &= \frac{l_0}{\cos \theta_0} \left[\frac{\partial}{\partial x} \{ [l(r) + l_B(r, 0)] \cdot a(r) \} \right]_{x=y=0} \\ &= a_x \left(\frac{L_0 \cos^2 \theta_s}{L_s \cos \theta_0} + \cos \theta_0 \right) - a_z \left(\frac{L_0 \cos \theta_s \sin \theta_s}{L_s \cos \theta_0} + \sin \theta_0 \right) \\ &\quad - L_0 \left[\varepsilon_{xx} \left(\frac{\sin \theta_s}{\cos \theta_0} + \tan \theta_0 \right) - \Omega_y \left(\frac{\cos \theta_s}{\cos \theta_0} + 1 \right) \right] \end{aligned} \quad (2.27)$$

$$\begin{aligned} A_y &= -L_0 \left[\frac{\partial}{\partial x} \{ [l_A(r) + l_B(r, 0)] \cdot a(r) \} \right]_{x=y=0} \\ &= a_y \left(\frac{L_0}{L_s} + 1 \right) \\ &\quad - L_0 \left[\varepsilon_{xy} (\sin \theta_s + \sin \theta_0) - \Omega_x (\cos \theta_s + \cos \theta_0) + \Omega_z (\sin \theta_s + \sin \theta_0) \right] \end{aligned} \quad (2.28)$$

(a_x, a_y, a_z) , $(\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z)$ et $(\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z)$ sont respectivement les coefficients de translation, rotation et de contrainte de la région éclairée de l'objet. Ces coefficients sont reliés au vecteur de déplacement par :

$$(a_x, a_y, a_z) = [a_x(0), a_y(0), a_z(0)] \quad (2.29)$$

$$(\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z) = \left\{ \left(\frac{\partial a_z}{\partial y} \right)_0, - \left(\frac{\partial a_z}{\partial x} \right)_0, \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial a_y}{\partial x} \right)_0 - \left(\frac{\partial a_x}{\partial y} \right)_0 \right] \right\} \quad (2.30)$$

$$\varepsilon_{xx} = \left(\frac{\partial a_x}{\partial x} \right)_0, \quad \varepsilon_{yy} = \left(\frac{\partial a_y}{\partial y} \right)_0; \quad \varepsilon_{xy} = \varepsilon_{yx} = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial a_x}{\partial y} \right)_0 + \left(\frac{\partial a_y}{\partial x} \right)_0 \right] \quad (2.31)$$

θ_s et L_s sont l'angle d'incidence et le rayon de courbure du front d'onde du faisceau laser incident. Par substitution de l'équation (2.26) dans l'équation (2.22) et en utilisant l'équation (2.20), on aboutit à :

$$\langle \Delta I_1(X, Y) \cdot \Delta I_2(X + \bar{X}, y + \bar{Y}) \rangle = \left| \iint \sqrt{[I_0(x, y) \cdot I_0(x + a_x, y + a_y)]} \cdot \exp \left\{ - \frac{ik[x(\bar{X} - A_x) \cos \theta_0 + y(\bar{Y} - A_y)]}{L_0} \right\} dx \cdot dy \right|^2 \quad (2.32)$$

Pour les petites valeurs de a_x et a_y comparées avec le diamètre du spot, la fonction de corrélation donnée par l'équation (2.32) prend son maximum pour les valeurs $\bar{X} = A_x$ et $\bar{Y} = A_y$:

$$\begin{aligned} & \langle \Delta I_1(X, Y) \cdot \Delta I_2(X + \bar{X}, y + \bar{Y}) \rangle \\ &= \left| \int \int \sqrt{[I_0(x, y) \cdot I_0(x + a_x, y + a_1)]} dx \cdot dy \right|^2 \end{aligned} \quad (2.33)$$

La décorrélation de speckle est reliée à la valeur maximale de $\langle \Delta I_1(X, Y) \cdot \Delta I_2(X + \bar{X}, Y + \bar{Y}) \rangle$ qui est dépendante de la translation dans le plan comparé avec le diamètre du faisceau. Alors, le degré de corrélation est proportionnel aux aires chevauchées des spots laser décalés par la translation de l'objet.

2.5.1.2. Déplacement du speckle subjectif

Dans le cas des configurations contenant des lentilles, l'amplitude complexe au point d'observation R, peut être représentée comme une superposition linéaire d'amplitudes complexes arrivant de chaque point de l'objet. Pour cela, les amplitudes complexes avant et après la déformation de l'objet sont données par [21]:

$$U_1(R) = \int \sqrt{I_0(r)}.exp[i\varphi(r)]. exp[ikLA(r)]. K(R, r)d^2r \quad (2.34)$$

$$U_2(R) = \int \sqrt{I_0(r + a_T)}. exp[i\varphi(r)]. exp[ikLA(r + a)]. K(R, r + a)d^2r$$

(R, r) représente la fonction du système de transmission qui est la distribution de l'amplitude complexe causée par un point source placé au point objet r. Pour l'étude du déplacement et de décorrélation de speckle dans le champ image présenté dans la **(figure 2.12)**, on considère seulement la région avec une intensité moyenne uniforme $I_0(r) = I_0 = \text{constante}$; et en utilisant l'approximation de l'équation (2.25), la fonction de corrélation de l'amplitude complexe prend la forme suivante :

$$\langle U_1(R). U_2^*(R + \bar{R}) \rangle = I_0 \int exp[ik. lA(r). a(r)]. K(R, r). K^*(R + \bar{R}, r + a) d^2r \quad (2.35)$$

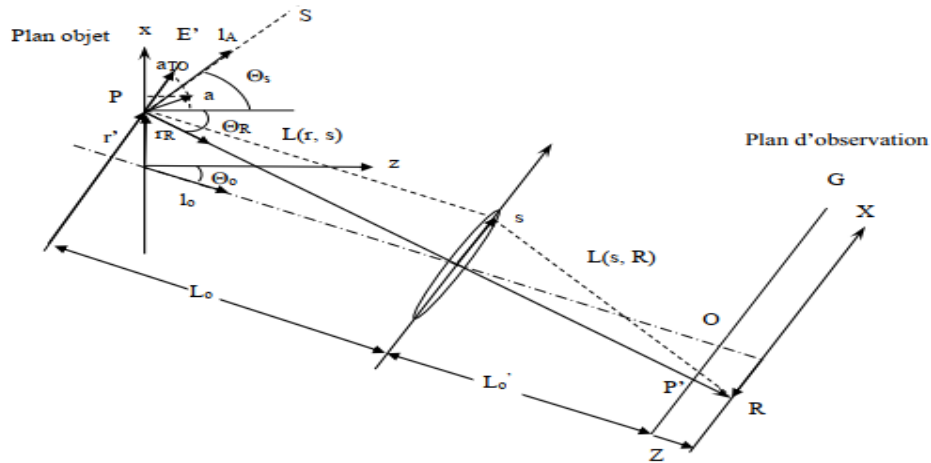


Fig 2.12 Système de coordonnées pour la détermination de déplacement de speckle dans le champ image

L'axe du système optique est incliné d'un angle θ_0 par rapport à l'axe z. Le plan d'observation se trouvant à une distance Z du plan gaussien G, est situé à l'intersection des rayons principaux à travers un point d'observation $(X, Y, Z) = (R, Z)$, provenant du point P du plan objet. La fonction du système de transmission à travers l'ouverture de la lentille, peut être représentée par l'intégrale de diffraction de Fresnel-Kirchhoff donnée par:

$$K(R, Z, r + a(r)) = \int exp[ik. |L(r, s) - a|]. P(s). exp(-ik \frac{|s|^2}{2F}). exp[ik. |(L_0 + Z). l_0 + R - s|] d^2s \quad (2.36)$$

$P(s)$ et F sont respectivement la fonction pupillaire et la distance focale de la lentille. En utilisant les approximations introduites par Yamaguchi [21], on obtient finalement :

$$\langle U_1(R, Z). U_2^*(R + \bar{R}, Z) \rangle = \exp \left\{ ik \left[m(r_R, 0) \cdot a(r_R) + \frac{R\bar{R}}{L'_0 + Z} \right] \right\} \cdot \int P^*(s) P(s + L_0[\nabla m(r, 0) \cdot a]_{r_R}) \cdot \exp \left\{ ik \frac{s}{L'_0 + Z} \cdot [\bar{R} \cdot A(R, z)] \right\} d^2s \quad (2.37)$$

Le pic de la corrélation est localisé à $\bar{R} = A$, qui représente le déplacement de speckle donné par:

$$A = \frac{L'_0 + z}{L_0} \mathbf{a}_{T_0} + \frac{L_0 z}{L'_0} [\nabla m(r, 0) \cdot \mathbf{a}]_{r_R} \quad (2.38)$$

Le vecteur de déplacement donné dans l'équation (2.38) a deux composantes ; une indépendante de Z et l'autre proportionnelle à la valeur de Z , qui s'écrivent comme suit:

*

$$A = -\frac{L'_0}{L_0} \cdot \mathbf{a}_{T_0} - \frac{z}{L'_0} \left\{ \frac{L'_0}{L_0} \mathbf{a}_{T_0} - L_0 [\nabla m(r, 0) \mathbf{a}]_{r_R} \right\} \quad (2.39)$$

Dans le système de coordonnées de la Fig.1.12, on peut facilement obtenir les relations des composantes dans le plan E' , exprimées par :

$$\mathbf{a}_{T_0X} = \mathbf{a}_x \cos \theta_R + \mathbf{a}_z \sin \theta_R \quad (2.40)$$

$$\mathbf{a}_{T_0Y} = \mathbf{a}_y \quad (2.41)$$

On utilise les équations (2.27) et (2.28) pour obtenir les nouvelles composantes du vecteur de déplacement de speckle

$$A_X = g \cdot (\mathbf{a}_x \cos \theta_R + \mathbf{a}_z \sin \theta_R)$$

$$\begin{aligned}
& -\frac{Z}{L'_0} \left\{ g \cdot (a_x \cos\theta_R + a_z \sin\theta_R) - a_x \left(\frac{L_0 \cos^2\theta_s}{L_s \cos\theta_R} + \cos\theta_R \right) \right. \\
& + a_z \left(\frac{L_0 \cos\theta_s \sin\theta_s}{L_s \cos\theta_R} + \sin\theta_R \right) \\
& \left. + L_0 \left[\varepsilon_{xx} \left(\frac{\sin\theta_s}{\cos\theta_R} + \tan\theta_R \right) - \Omega_y \left(\frac{\cos\theta_s}{\cos\theta_R} + 1 \right) \right] \right\} \quad (2.42)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
A_Y = g \cdot a_y - \frac{Z}{L'_0} \left\{ g \cdot a_y - a_y \left(\frac{L_0}{L_s} + 1 \right) \right. \\
+ L_0 \left[\varepsilon_{xy} (\sin\theta_s + \sin\theta_R) - \Omega_x (\cos\theta_s + \cos\theta_R) \right. \\
\left. \left. - \Omega_z (\sin\theta_s + \sin\theta_R) \right] \right\} \quad (2.43)
\end{aligned}$$

Où g est le grandissement de la lentille.

La valeur du pic de la fonction de corrélation qui définit le changement dans la structure du speckle accompagnant le déplacement est donnée par :

$$\langle \Delta I_1(R, Z) \cdot \Delta I_2(R + A, Z) \rangle = \int |P^*(s)P(s + A_p)| d^2s \quad (2.44)$$

$$A_p = L_0 [m(r, 0) \cdot \mathbf{a}]_{rR} \quad (2.45)$$

Cette dernière est le déplacement de speckle sur le plan pupillaire. L'équation (2.44) affirme que la hauteur du pic de corrélation est proportionnelle au carré de la fonction de transfert de modulation (FTM) du système optique ; d'où la fréquence spatiale est proportionnelle au déplacement de speckle dans le plan pupillaire. Pour cette raison l'effet de déplacement de speckle dans le champ image dépend du déplacement de speckle dans le plan pupillaire *

2.5.2. Détermination des déplacements par photographie de speckle digitale

La photographie speckle digitale (DSP) est une méthode non interférométrique pour la mesure des déformations. Les techniques DSP utilisent des montages optiques simples semblables à ceux présentés par les (**figures 2.4 et 2.5**). L'objet à étudier est éclairé par une source laser et une figure de speckle est obtenue sur une caméra CCD. Les mesures sont réalisées en analysant les déplacements de cette figure de speckle. Généralement, cette analyse se fait à partir de deux images du speckle. On prend

la première alors que le système est dans son état initial. Cette image est l'image de référence. Ensuite, on fait subir à l'objet une déformation, qui provoque un déplacement des grains de speckle dans le plan image. On enregistre alors une seconde image qui pourra être comparée à la référence. La DSP fonctionne avec le principe de corrélation d'images numériques. L'algorithme de calcul par DSP ne suit pas le mouvement des grains de speckle individuel ; mais le déplacement d'un certain nombre de grains de speckle qui agissent en tant que sous-image (**Fig 2.13**).

La taille des sous-images détermine la résolution spatiale du champ de déplacement. Si la taille des sousimages devient très faible, la corrélation entre les images avant et après déplacement diminuera. L'algorithme trouve la similarité statistique entre les sous images de référence et les différentes sous-images de l'image déplacée. La corrélation est développée pour chaque paire de sous images pour donner le déplacement moyen de chaque paire. Ce processus est répété pour tous les autres sous images de l'image déplacée trouvée, jusqu'à ce que l'ensemble du champ de déplacement soit déterminée. La hauteur du pic de corrélation fournit le degré de similitude entre les sous-images et par conséquent, il détermine la précision de la mesure. Il existe plusieurs méthodes pour le calcul des mouvements du speckle par corrélation. L'algorithme développé dans notre travail est basé sur l'algorithme proposé par Sjödaahl [27], qui calcule le champ de déplacement avec une précision de l'ordre du sous pixel. Les dimensions typiques des sous images proposées par Sjödaahl sont de l'ordre (32x32 pixels).

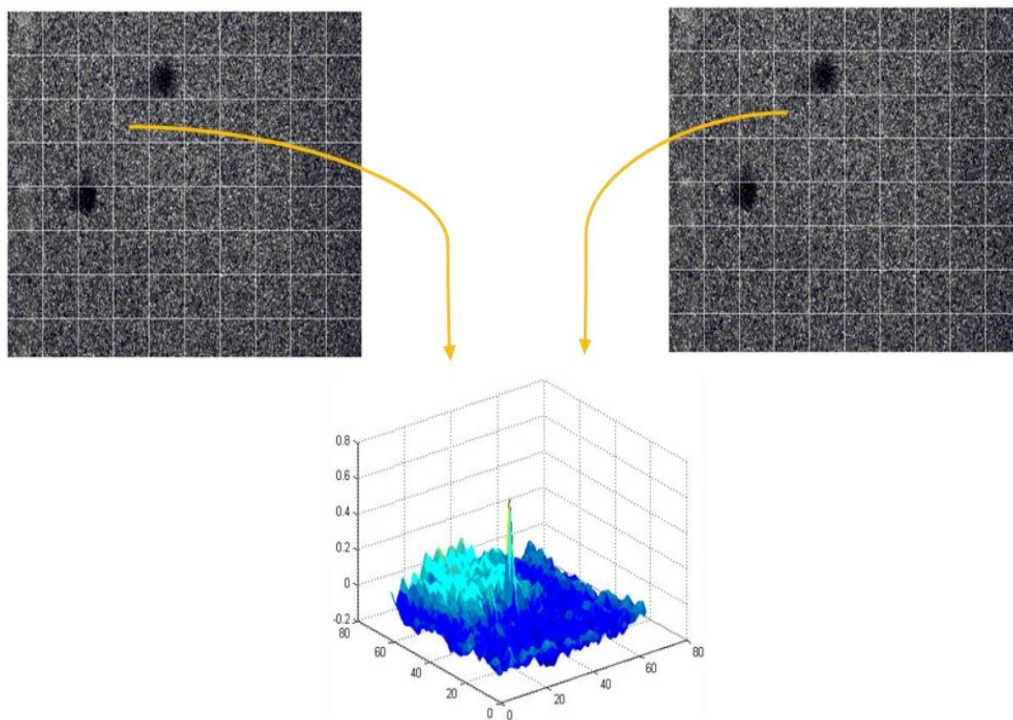


Fig 2.13 Suivi du déplacement des grains de speckle par corrélation. L'image de la figure de speckle est divisée en sous-images.

Si on considère deux images h_1 et h_2 avant et après déplacement de l'objet de dimensions $N \times M$, la détermination du déplacement d'une image par rapport à l'autre consiste à déterminer le déplacement de chaque point sur h_2 relatif au point correspondant sur h_1 . On suppose que le déplacement est suffisamment petit, on peut considérer que ce déplacement est constant dans des petites sous images de h_1 et h_2 . Le résultat de cette opération peut révéler le déplacement moyen entre ces sous images. Si une sous image carré de côté n_1 de h_1 est dénotée par h_{s_1} et la sous image correspondante de côté n_2 de h_2 est dénotée par h_{s_2} , la corrélation entre h_{s_1} et h_{s_2} est définie par :

$$C(k, l) = \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{m-1} [h_{s_2}^*(i, j) h_{s_1}(k+i, l+j)], \quad k, l=0, 1, \dots, m-1 \quad (2.46)$$

$m=n_1+n_2$

Les transformées de Fourier discrètes de h_{s_1} et h_{s_2} sont définies par :

$$H_{s_1} = F(h_{s_1}) = \frac{1}{m^2} \sum_{k=0}^{m-1} \sum_{l=0}^{m-1} \left\{ h_{s_1}(k, l) \exp \left[\frac{-2\pi i (rk+sl)}{m} \right] \right\} \quad (2.47)$$

$$H_{s_2} = F(h_{s_2}) = \frac{1}{m^2} \sum_{k=0}^{m-1} \sum_{l=0}^{m-1} \left\{ h_{s_2}(k, l) \exp \left[\frac{-2\pi i (rk+sl)}{m} \right] \right\} \quad (2.48)$$

$$r, s = 0, 1, \dots, m-1$$

Par la définition des transformées de Fourier discrètes, on peut réécrire l'équation (1.46) comme suit :

$$C(k, l) = F^{-1}(H_{s_2}^* H_{s_1}) \quad (2.49)$$

k et l , sont les indices de la matrice, F^{-1} est la transformé de Fourier inverse et le produit est effectué élément par élément. Ce calcul est similaire au filtrage point par point de la photographie de speckle classique. Dans ce cas, la zone hs du specklogramme éclairée par le faisceau laser est la somme de h_{s_1} et h_{s_2} , et la figure de diffraction est représentée par $|\mathcal{F}(hs)|^2 = Hs^* Hs$. La transformée de Fourier de cette figure de diffraction est la fonction d'autocorrélation de hs , c'est elle qui donne le déplacement. Chaque point de (k, l) représente le taux de corrélation entre h_{s_1} et h_{s_2} . La position de la valeur maximale de (k, l) , indique le déplacement moyen de h_{s_2} par rapport à h_{s_1} . Le champ de déplacement résultant est représenté par une figure de flèches (**Fig 2.14**). Chaque flèche dans

l'image représente un déplacement dans une sous-image. La longueur de chaque flèche représente l'amplitude de déplacement et la direction de la flèche indique la direction du déplacement. Si le déplacement entre les sous-images est grand, beaucoup de bruit est introduit dans la figure de déplacement, indiquant ainsi la présence d'une décorrélation.

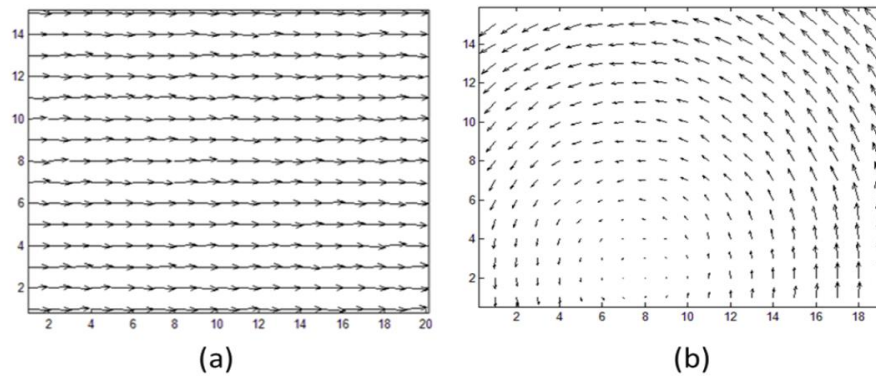


Fig 2.14 Champs des déplacements mesurés par notre algorithme de corrélation (DSP).
(a) Translation dans le plan ; (b) rotation dans le plan.

Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons apporté quelques bases théoriques nécessaires à la compréhension de l'origine du phénomène de speckle. Nous avons décrit les principales techniques de photographie de speckle utilisées pour la mesure des différentes composantes de déplacements et de déformations d'objets. La photographie de speckle focalisée mesure les déplacements dans le plan et les déplacements hors du plan sont mesurés par photographie de speckle non focalisée. Nous avons également présenté le principe de la photographie de speckle digitale, qui mesure les déplacements par la technique de corrélation de speckle.

Partie Expérimentale

Chapitre 3

3.1 Introduction :

L'essai de flexion 3 points permet de mesurer la résistance à la rupture d'un matériau. Une barrette du matériau à tester est placée sur deux appuis et l'on applique au centre de la barrette une force croissante jusqu'à rupture.

Comme l'essai de compression, l'essai de flexion ne permet généralement pas d'atteindre la rupture des matériaux ductiles. L'essai de flexion est surtout adapté aux matériaux fragiles. Cet essai se caractérise par la simplicité du montage de l'éprouvette et sa géométrie simple (peu ou pas d'usinage). Lors du test, la partie supérieure est en compression et la partie inférieure en traction.

Le procédé de mise en forme est un élément important dans la réalisation d'une pièce de composite puisque celui-ci aura une influence beaucoup plus marquée sur les performances que pour les matériaux traditionnels. En effet, le taux de renforts, le taux de vide ainsi que la qualité de l'imprégnation sont des indices de performance des composites et sont fortement influencés par le procédé de fabrication et l'opérateur.

Lors de la mise en forme, l'objectif général est de maximiser le taux de renfort, de minimiser le taux de vide en plus d'assurer une bonne imprégnation des renforts et l'uniformité du moulage. Le procédé le plus élémentaire est le moulage contact, où l'opérateur applique les plis de renforts un par un et les imbibe de résine manuellement. Toutefois, les limites de cette méthode sont évidentes. En plus d'être très sensible à l'expérience du travailleur, cette méthode ne permet pas un bon contrôle de la quantité de résine et présente des risques d'emprisonner des poches d'air dans le moulage. Plusieurs solutions existent pour améliorer ce processus, comme le moulage sous vide qui sera étudié ici.

Les étapes à suivre pour la réalisation de ce travail est comme suit :

- ✓ Réaliser des pièces de composite à partir d'une structure tissée de Jute/résine
- ✓ Assembler et découper les échantillons de deux manières différentes
- ✓ Effectués les essais de flexion trois points
- ✓ Résultat et discussions

3.2 Définition du matériau composite utilisé

Nous utilisons des pièces réalisées à partir d'un composite d'une structure tissée, dans notre cas on utilise le tissu de Jute. Lorsque le vide est appliqué (1 bars), l'air emprisonné entre les fibres et les différentes couches de tissus peut s'échapper. Ce procédé de mise en œuvre est très intéressant pour des pièces de petites et moyennes séries, grâce à des investissements relativement réduits. Il est en conformité avec les règles concernant l'hygiène du travail, et en particulier il permet la fabrication de pièces composites thermodurcissables, proposant ainsi une solution pour supprimer les rejets de styrène dans l'atmosphère. Par ailleurs, l'environnement de travail est propre, et les conditions de stockage du matériau ne sont pas contraignantes. Des solutions telles que l'application d'une peinture, d'un gel-coat, ou d'un film de surface permettent alors la réalisation de pièces composites d'aspect pour le marché du transport, du nautisme et du sport et loisirs.



Fig 3.1 Matériau composite utilisé

La **fig 3.2** présente un schéma de fabrication du moulage sous vide, des deux techniques de fabrication utilisées dans ce travail, celle-ci produit des laminés de moins bonne qualité que le moulage par infusion, entre autres à cause du volume de résine qui n'est pas contrôlé et qui est appliqué manuellement.

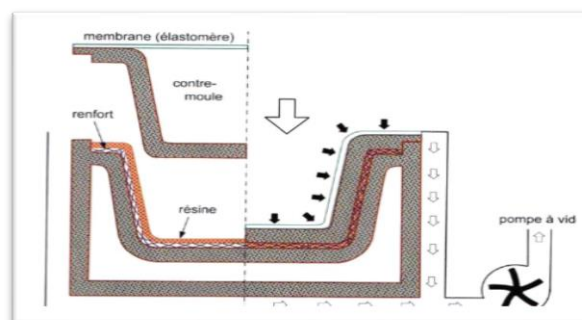


Fig 3.2 : Moulage sous vide

3.3 Principe La technologie du moulage sous vide

Le moulage sous vide s'effectue entre moule et contre-moule rigide, semi-rigide ou souple suivant la technologie de mise en œuvre. Le renfort (mat, tissu, préforme) est placé à l'intérieur du moule ; la résine catalysée est versée sur le renfort. Une pression est exercée sur le moule lors de la mise sous vide pour répartir la résine et imprégner le renfort. La résine peut également être injectée par l'aspiration consécutive au vide.

Ce procédé de moulage convient pour la fabrication de pièces en petites et moyennes séries. Il permet d'obtenir de bonnes qualités mécaniques, grâce à une proportion de résine uniforme et à une diminution des inclusions d'air. Dans le cas de l'utilisation d'un contre-moule rigide, un bel aspect de surface est obtenu sur les deux faces. Les cadences de production sont toutefois assez lentes.

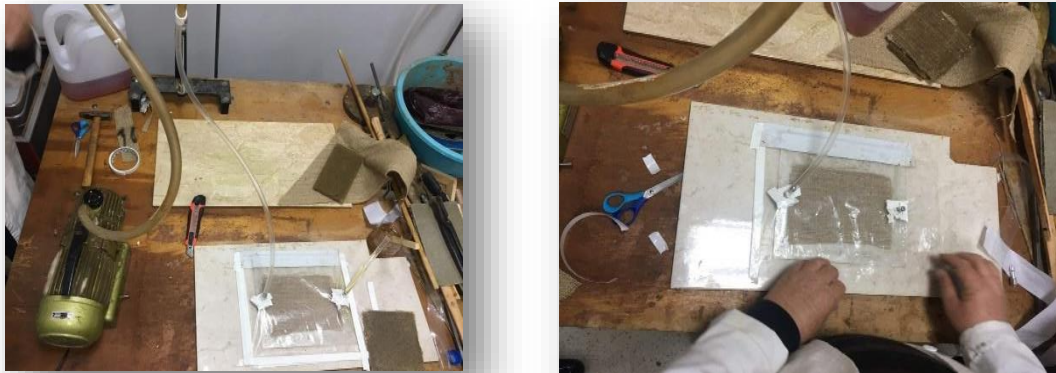


Fig 3.3 Moulage sous vide réel

Les avantages procurés par cette méthode sont principalement :

- augmentation du taux de renforts (v_f de 45 %) ;
- amélioration de l'adhésion entre les plis
- extraction de l'air emprisonnée dans le laminé
- amélioration du contrôle de l'épaisseur du laminé
- ajustement des plis pour épouser le moule
- réduction des émanations toxiques.

Certains problèmes sont toutefois liés à l'utilisation de cette méthode. Parmi ceux-ci, on compte :

- augmentation des déchets générés
- accroissement du nombre de manipulations lors de la fabrication et compétences additionnelles des opérateurs

- risque de vaporisation des solvants des résines engendrant une augmentation du taux de vides
- augmentation de la taille des bulles d'air restantes dans le laminé.

3.4 L'essai de flexion 3 points

❖ Principe de fonctionnement

L'essai de flexion est un test mécanique qui fait partie de la famille des essais indépendants du temps comme le choc et la dureté [28]. Il consiste à placer une barre rectangulaire sur deux appuis et d'appliquer un effort ponctuel au centre [29], comme illustré à la **fig 3.4**

L'objectif principal de l'essai de flexion en trois points est d'étudier les caractéristiques mécaniques de matériau de l'étude, nous avons recours à l'essai de flexion trois points. Nous nous intéressons à la détermination des propriétés mécaniques usuelles telles que le module d'élasticité E , la contrainte à la rupture σ_r , la déformation à la rupture ϵ_r , la force maximale P_r , la flèche à la rupture f_r , ainsi qu'au profil du comportement du matériau et des endommagement engendrés.

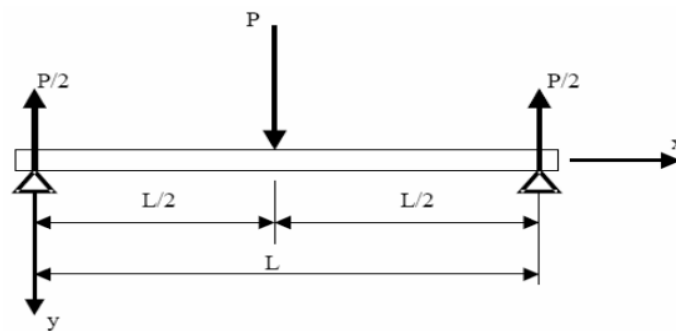


Fig 3.4 Flexion 3 points

La **fig 3.5** représente le principe d'essai, l'éprouvette est posée sur deux tiges cylindriques de cinq millimètres de rayon (pannes inférieures), la charge est appliquée au milieu de l'éprouvette à l'aide de la panne supérieure.

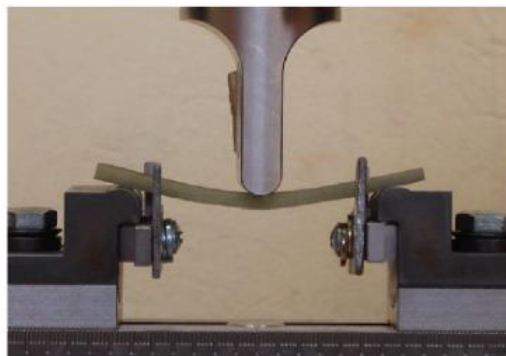


Fig 3.5 Principe d'essai de flexion 3 points

❖ Mécanisme de rupture

Dans cet essai normalisé, trois types d'endommagement peuvent être rencontrés, dont deux seulement sont recevables : endommagement en traction et endommagement en compression. Ils sont liés à l'effet d'une flexion et donc permettent de quantifier la contrainte maximale. Si un endommagement de cisaillement est observé, alors cette quantification n'est plus possible, et on constate que les hypothèses de l'essai ne sont pas remplies.

La rupture est due à la création et à la propagation de fissures, généralement localisées sur la fibre externe la plus sollicitée en extension (**fig 3.6**). Quand une contrainte locale devient égale à la résistance de cohésion de la matière, les liaisons interatomiques de cette région se rompent [28].

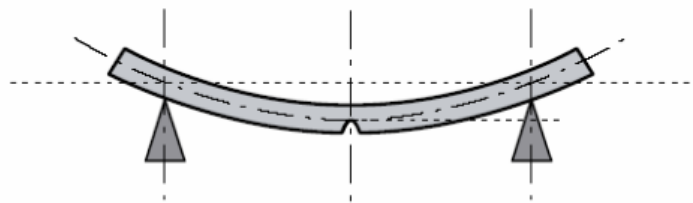


Fig 3.6 Localisation de la rupture

❖ Machines de flexion

La plupart des machines de flexion sont aujourd'hui dites universelles (traction, flexion, compression, fluage...), voir **fig 3.7**

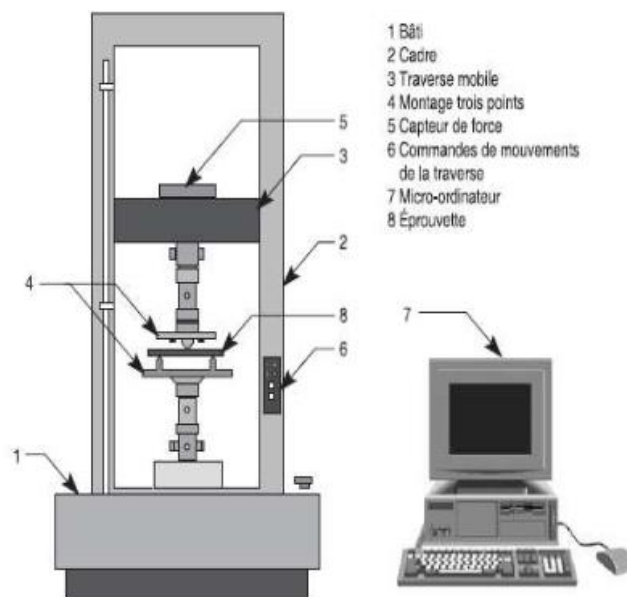


Fig 3.7 Machine universelle en montage de flexion

3.5 Procédure expérimentale

A) Fabrication de l'éprouvette

Les essais de traction menés sur les stratifiés jute/résine sont réalisés à partir d'une structure tissée, les échantillons sont découpés de deux manières différentes, certains échantillons sont découpés suivant les dimensions (10 mm×80 mm× 4mm) d'autres sont découpés suivant les dimensions (10 mm ×130 mm×4 mm) **Fig 3.8**



Fig 3.8 Fabrication de l'éprouvette

B) Le Montage expérimentale

Les essais de flexion 3 points ont été réalisés sur une machine de flexion, équipée d'un module de flexion 3 points et d'un capteur de force et une caméra. Avec Le système optique qui composé d'un appareil laser. Afin de réaliser au mieux le suivi optique, L'échantillon est placé sur la machine et nous appliquons une force à la surface pour suivre l'évolution des déplacements de l'éprouvette image par image, et obtenir les données de déplacement. Le déclenchement de la machine d'essai et de l'appareil photo étant indépendant, les données sont corrélées manuellement après les essais. **Fig 3.9**

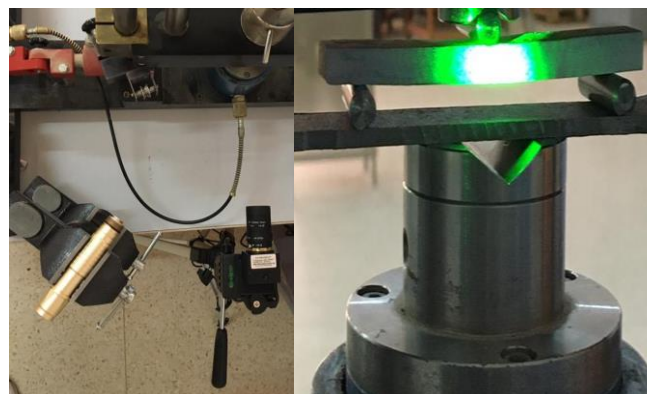


Fig 3.9 L'essai d'éprouvette par flexion 3 points

Le déroulement de l'essai s'effectue en suivant le protocole décrit ci-après :

- ✚ L'éprouvette est placée sur le module de flexion et positionnée manuellement au centre du dispositif (**Fig 3.10**)
- ✚ Le système d'applications de la force est positionné en contact avec l'éprouvette (**Fig 3.10**)
- ✚ L'essai est déclenché sur la machine et en parallèle sur la camera.

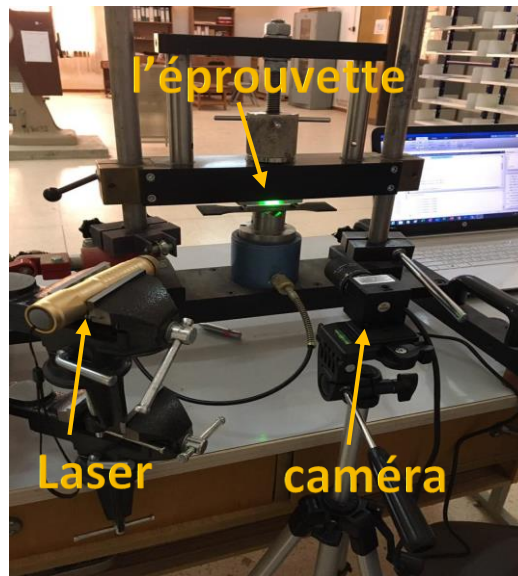


Fig 3.10 Le déroulement de l'essai

3.6 Résultats expérimentaux

Figures de speckle

On représente un exemple de figures de speckle avant et après charge, résultant de l'application de la photographie de speckle pour la mesure de la flexion de l'échantillon

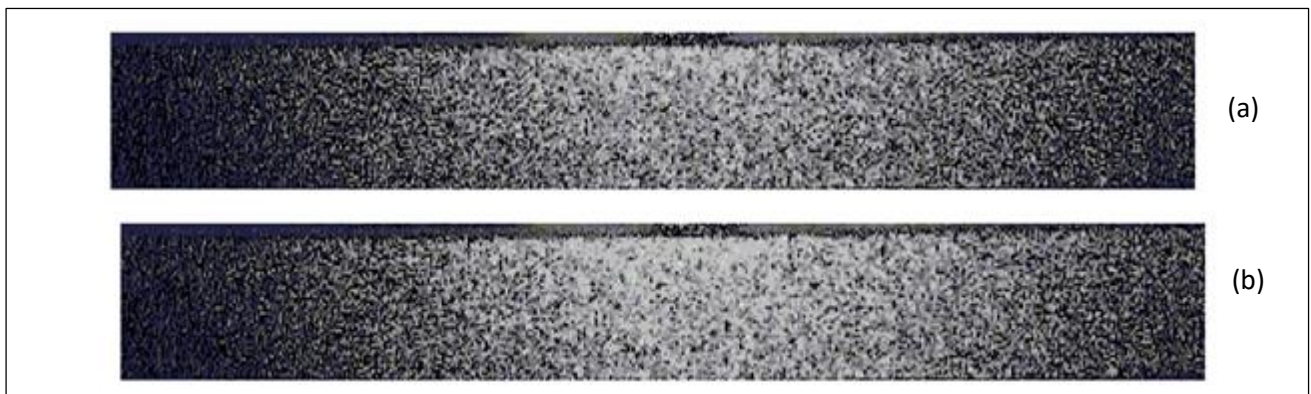


Fig 3.11 Figures de speckle avant et après flexion

1. Première série de mesure

Les premiers résultats sont obtenus en appliquant des faibles forces sur l'échantillon. Les quatre figures représentent la progression de la force appliquée sur l'échantillon (quatre forces) entre la première image de référence et les autres images de déformation.

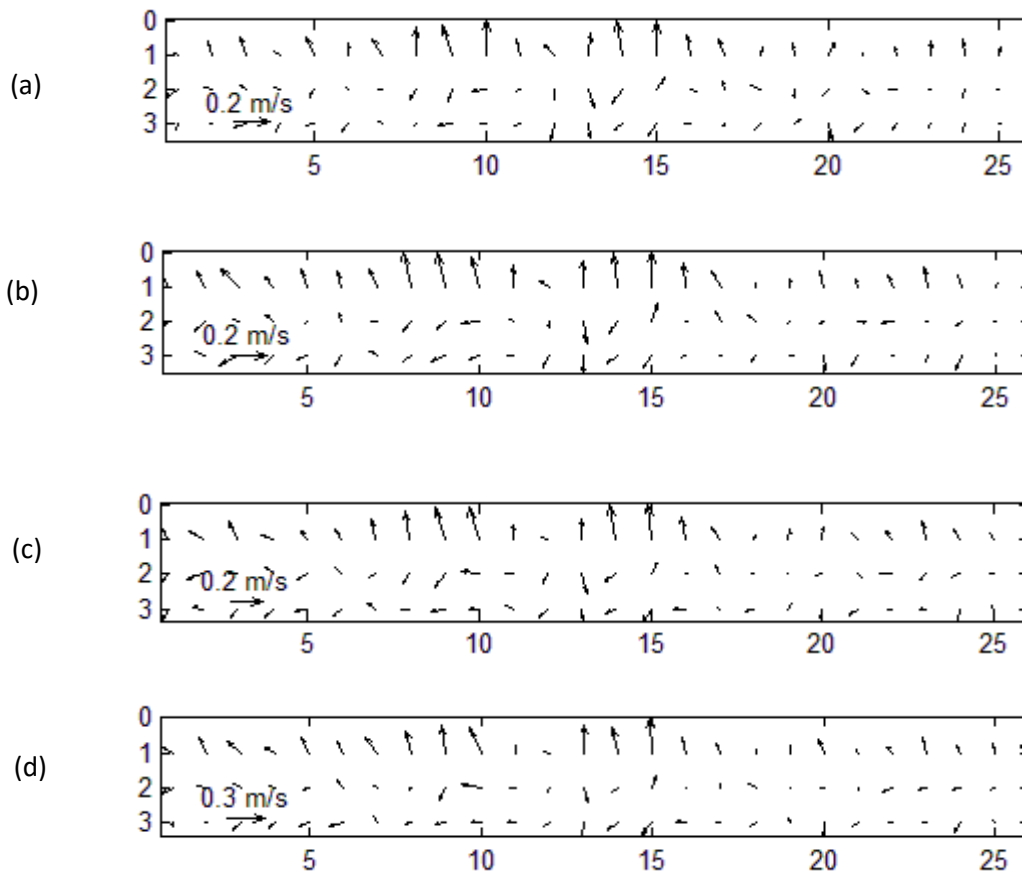


Fig 3.12 Première série de mesure

2. Deuxième série de mesure

Les deuxièmes résultats sont obtenus en appliquant des forces intermédiaires sur l'échantillon. Les quatre figures représentent la progression de la force appliquée sur l'échantillon (quatre forces) entre la première image de référence et les autres images de déformation.

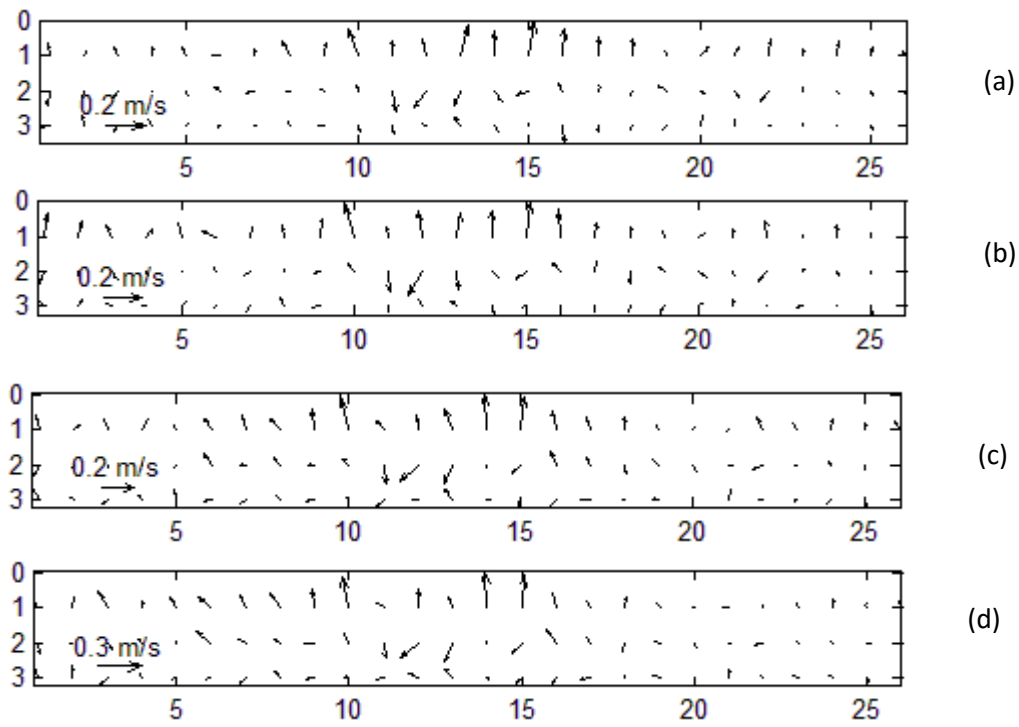


Fig 3.13 Deuxième série de mesure

3. Troisième série de mesure

Les troisièmes résultats sont obtenus en appliquant des forces importantes sur l'échantillon.

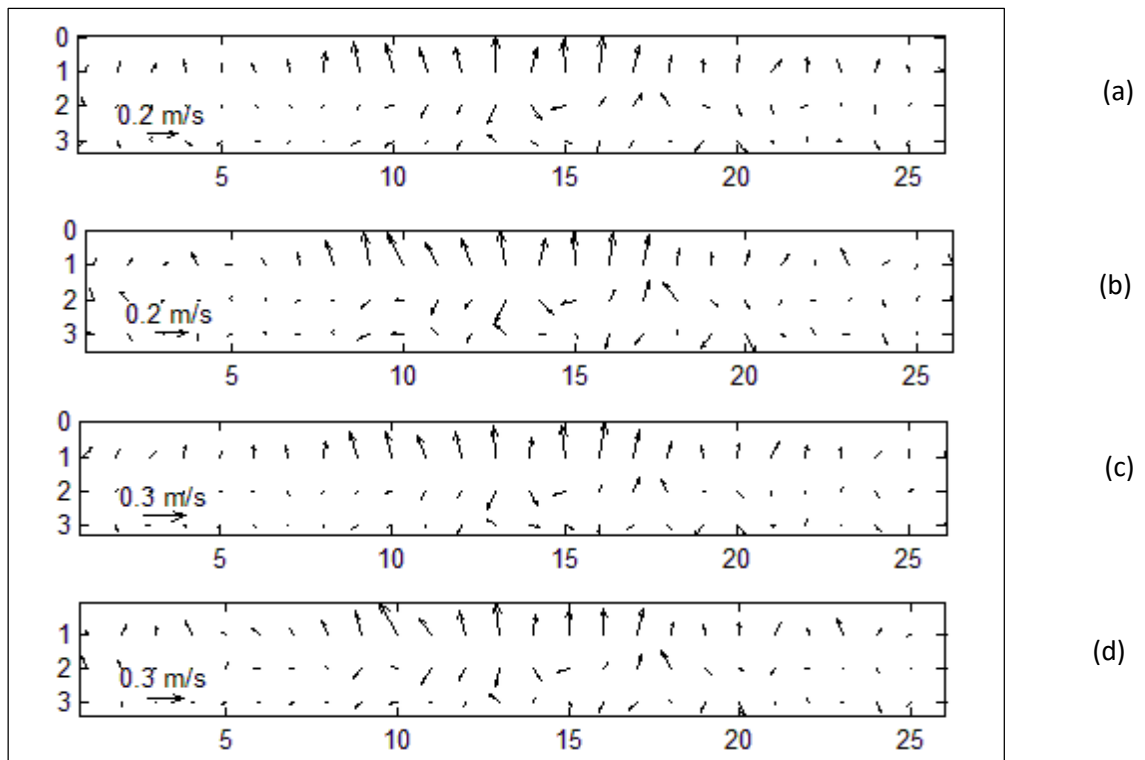


Fig 3.14 Troisième série de mesure

4. Quatrième série de mesure

En appliquant des forces plus importantes sur l'échantillon, on peut voir des changements dans le comportement à la flexion.

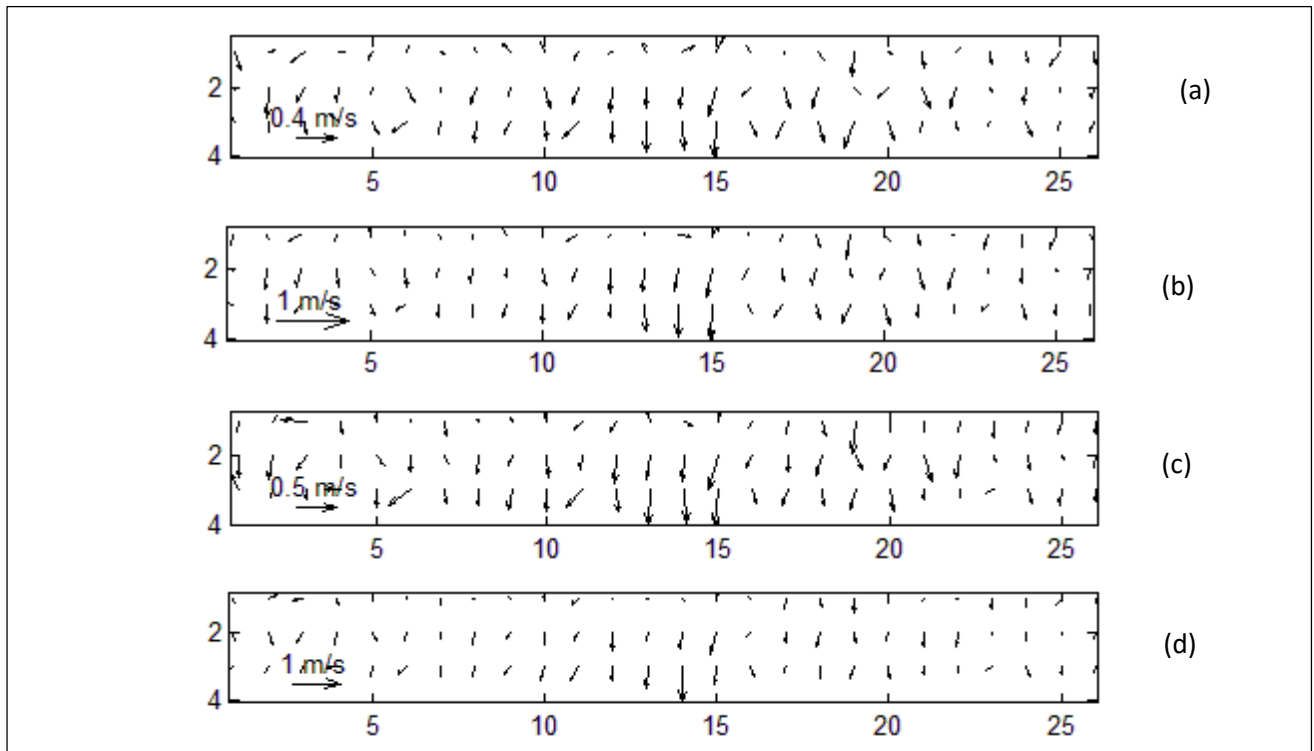


Fig 3.15 Quatrième série de mesure

3.7 Analyse et interprétation des résultats

Comme le montre les **figures (3.12, 3.13, 3.14)** le comportement à la flexion des formes initiales, lorsque nous avons appliqué des forces faibles à moyenne, nous constatons que la direction de la flexion était dirigée vers le haut uniquement pour la couche supérieure de la pièce sans les couches médiane et inférieure, et cela est peut-être dû à des défauts lors de la mise en œuvre du matériau composite. Pour cela nous pouvons constater une semi-séparation des trois couches les unes des autres.

Une autre explication qu'on peut donner pour ce phénomène est que la charge supérieure n'était pas stable, car la pièce s'est d'abord déplacée vers le haut jusqu'à ce qu'elle s'arrête avec l'augmentation de la force appliquée, et c'est ce que nous avons remarqué à travers le changement de direction de flexion.

La **figure 3.15** nous montre le comportement à la flexion lorsque la force appliquée à la pièce est grande. On remarque nettement une flexion totale de la pièce vers le bas. D'où on peut calculer la valeur de la flexion pour différentes charges pour chaque couches du composite.

Par exemple la flexion correspondante a la **figure 3.16** de la couche inférieure de l'échantillon, d'où on obtient une courbe de flexion après lissage quadratique de la courbe de flexion réelle. On remarque ici une flexion maximale au centre de l'éprouvette de 0.2 pixel.

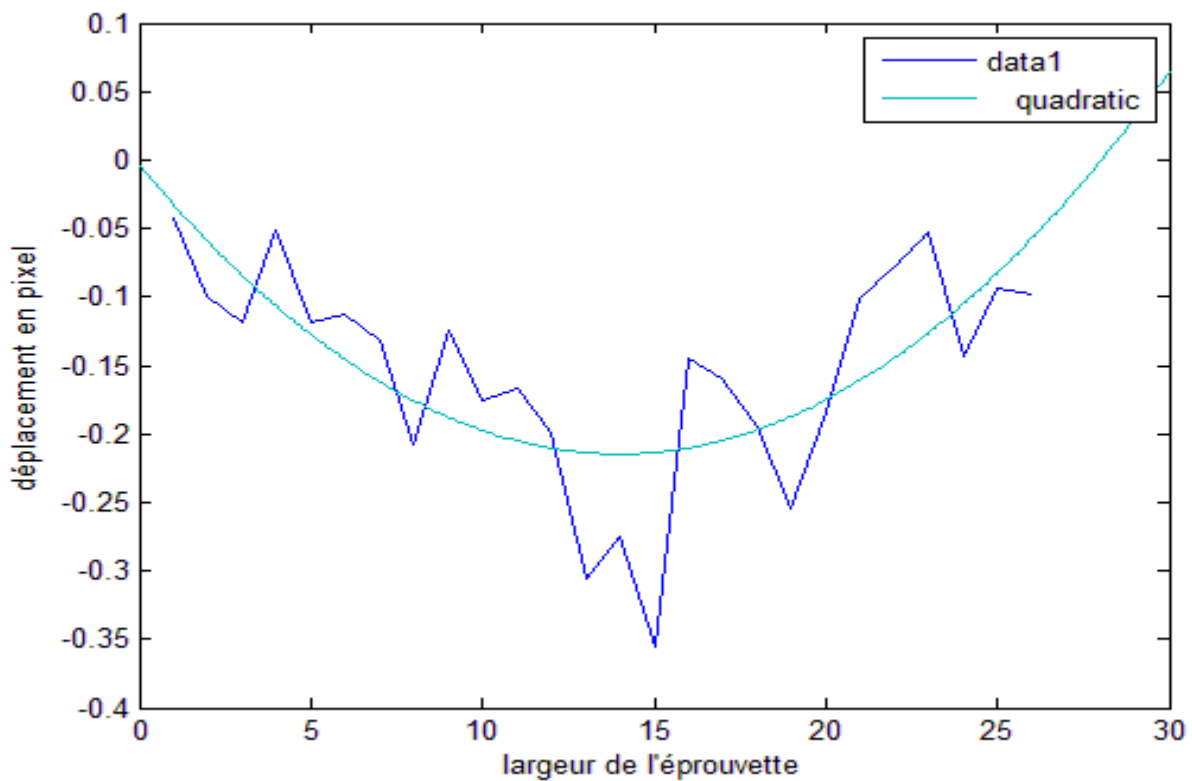


Fig 3.16 courbe de flexion de la couche inférieure de l'échantillon

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans notre travail on a proposé d'étudier les caractéristiques mécaniques d'une pièce composite à partir d'une structure tissée par fabrication en moulage sous vide, cette technologie permet de faire un mélange de deux matériaux composites.

Nous avons choisi d'utiliser un matériau composite élaboré à partir de deux matériaux la Jute et la résine par le procédé de moulage qui convient pour la fabrication de pièces en petites et moyennes séries. Il permet d'obtenir de bonnes qualités mécaniques, grâce à une proportion de résine uniforme et à une diminution des inclusions d'air. Dans le cas de l'utilisation d'un contre-moule rigide, un bel aspect de surface est obtenu sur les deux faces. Les cadences de production sont toutefois assez lentes.

On utilise dans cette étude la technique de photographie de speckle digitale. Cette technique plus précise permet de suivre l'évolution du comportement à la flexion de ce matériau composite. Nous avons bien constaté quand peut présenter qualitativement le comportement à la flexion de toute la surface de l'échantillon soumise à la force de flexion. On peut également mesurer la valeur de la flexion pour chaque région de la pièce ainsi pour chaque couche du composite si nous définissons les grandeurs des flèches de déplacements.

A partir des résultats obtenus, on peut remarquer aussi que la technique de speckle peut être utilisée pour déceler les défauts de mise en forme des matériaux composite. Donc une technique de contrôle de qualité.

Bibliographies

- [1] Boufaïda, Z. (2015). Analyse des propriétés mécaniques de composites taffetas verre/matrice acrylique en relation avec les propriétés d'adhésion des fibres sur la matrice (Doctoral dissertation, Université de Lorraine).
- [2] BENAHMED, A. (2017). *Contribution à l'étude du comportement mécanique des plaques composites en utilisant des théories d'ordre élevé avec un nombre réduit de variable* (Doctoral dissertation).
- [3] Masmoudi, S. (2013). *Comportement mécanique et caractérisation par implant piézoélectrique ultrasonore intégré d'un matériau composite* (Doctoral dissertation, Université du Maine).
- [4] Elouaer, A. (2011). *Contribution à la compréhension et à la modélisation du comportement mécanique de matériaux composites à renfort en fibres végétales* (Doctoral dissertation, Reims).
- [5] Grente, K. (2004). *Amélioration de la résistance à la corrosion à haute température de composites à matrice céramique élaborés par voie gazeuse* (Doctoral dissertation, Université Bordeaux 1).
- [6] Hosseiny, M. (2006). *Comparaison des outils Guhring et Iscar dans le perçage de composites à matrice d'aluminium*. École Polytechnique de Montréal.
- [7] Griesser, A. (2012). *Réalisation de matériaux composites à conductivité thermique accrue pour l'aéronautique* (Doctoral dissertation, Bordeaux 1).
- [8] P. Krawczak and A. Bergeret, "Liaison renfort/matrice: Définition et caractérisation, plastiques et composites." *Technique de l'ingénieur*, 2006
- [9] Korichi, A., & Tiaïba, W. (2019). *Amélioration et élaboration d'un matériau composite à base d'une matrice thermodurcissable (iso et ortho polyester insaturé) renforcé par les déchets de MAGHREB PIPE "M'sila"* (Doctoral dissertation, Université Mohamed BOUDIAF de M'Sila).
- [10] Nicollin, A. (2014). *Développement de matériaux composites écologiques à base de résines de tannins et de renforts de fibres végétales* (Doctoral dissertation, Université de Lorraine).
- [11] HOUIDEG, A. (2012). *Transfert de charge et frottement Fibre/Matrice d un Matériau Composite (T300/914)* (Doctoral dissertation, USTO).
- [12] Gharbi, A. (2005). Analyse des fissurations des matériaux composites et détermination de leur délaminage utilisant des capteurs piézo-électriques.
- [13] Gornet, L. (2008). Généralités sur les matériaux composites.
- [14] Zemmaouche, R. (2018). *Analyse des figures de speckle pour la mesure de déformations par corrélation d'images numériques* (Doctoral dissertation).
- [15] DOGHA, I., & DILMI, N. (2020). *Analyse du comportement mécanique d'une céramique par photographie de speckle digital* (Doctoral dissertation, Univ M'sila).
- [16] Pramod K. Rastogi, "Techniques of displacement and deformation measurements in speckle metrology," In *Speckle metrology*. Edited by Rajpal S.Sirohi. Marcel Dekker. Inc (1993)

- [17] E. Archbal, J.M. Burch, and A.E Ennos, "Recording of in-plane surface displacement by double-exposure speckle photography," *Opt. Acta.* 17, 883-898 (1970)
- [18] J.N. Butters and J.A. Leendertz, "A double exposure technique for speckle pattern interferometry," *J. Phys. E: Sci. Instrum* 4, 277-279 (1971).
- [19] E. Archbal and A.E. Ennos, "Displacement measurement from double exposure laser photography," *Opt. Acta.* 19, 253-271 (1972).
- [20] H.J. Tiziani, "A study of the use of laser speckle to measure small tilts of optically rough surfaces accurately," *Opt. Commun.* 5, 271-274 (1972).
- [21] D.W. Li, J.B. Chen, and F.P. Chiang, "Statistical analysis of one-beam subjective laserspeckle interferometry," *J. Opt. Soc. Am. A.* Vol. 2. N° 5, 657-666 (1985).
- [22] J.B. Chen, F.P. Chiang, "Statistical analysis of whole-field filtering of specklegram and its upper limit of measurement," *J.O.S.A.* Vol. 1, N° 8, 845-849 (1984)
- [23] P. Jacquot, IMAC, "Photographie de speckle," Ed. Press polytechniques Romandes. Lausanne, 149-204 (1982).
- [24] I. Yamaguchi, "Theory and Applications of Speckle Displacement and Decorrelation," In *Speckle Metrology*, Edited by Rajpal S.Sirohi. Marcel Dekker, Inc (1993).
- [25] I. Yamaguchi, "Shape and Deformation Measurements by Digital Speckle Correlation and Digital Holography," *Proceedings of the XIth International Congress and Exposition, Orlando, Florida USA* (2008).
- [26] M. Sjö Dahl, "Calculation of speckle displacement, decorrelation, and object-point location in imaging systems," *Appl. opt.* 34(34), 7998-8010 (1995).
- [27] M. Sjö Dahl and L. R. Benckert, "Electronic speckle photography: analysis of an algorithm
- [28] Joel Cugnani, « Identification par recalage modal et fréquentiel des propriétés constitutives de coques en matériaux composites », Thèse, Ecole Polytechnique fédérale de Lausanne, 2005.
- [29] J.Molimard, « Cours de mécanique expérimentale », Ecole nationale supérieure des mines de Saint-Étienne, 2005