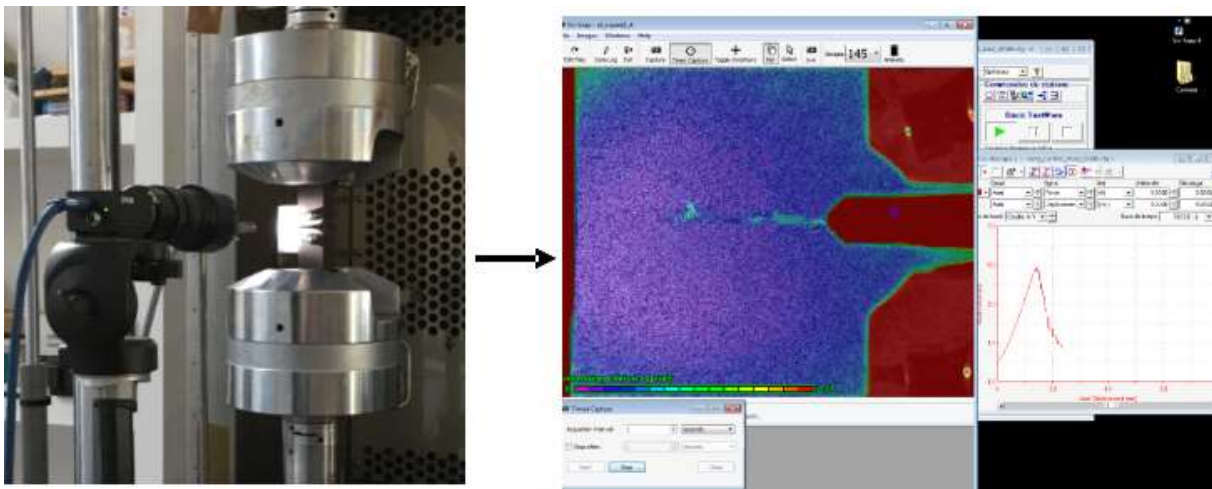


**Mesure de la ténacité à l'aide de la corrélation  
d'images numériques sur des matériaux  
composites quasi-fragiles**



Enseignant-responsable du projet :  
Juan Daniel PUJOLS GONZALEZ

Etudiants :

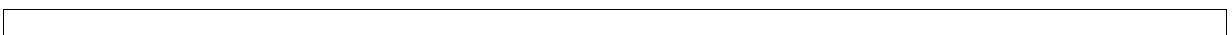
Axel BEAUSEJOUR

Margot SALZENSTEIN

Robin BOULOT

Xavier SESBOUE

*Cette page est laissée intentionnellement vierge.*



Date de remise du rapport : 15/06/2020

Référence du projet : STPI/P6/2020 – 032

Intitulé du projet : **Mesure de la ténacité à l'aide de la corrélation d'images numériques sur des matériaux composites quasi-fragiles**

Type de projet : **bibliographie et expérimental**

Objectifs du projet (10 lignes maxi) :

- **Évaluation de la ténacité translaminaire dans des stratifiés tissés**
- **Utilisation de la corrélation d'images numériques pour suivre l'évolution de la fissure et de la Fracture Process Zone**
- **Développement d'un script basé sur les images numériques pour quantifier la ténacité avec l'implémentation d'une intégrale de contour autour de la pointe de fissure.**

Mots-clefs du projet (4 maxi) :

- **Matériau composite**
- **Stratifiés tissés**
- **Ténacité**
- **Rupture translaminaire**
- **Corrélation d'images**

Si existant, n° cahier de laboratoire associé : **B28639 (GPM UMR 6634 - ERMECA)**

## TABLE DES MATIERES

<b>1- Introduction .....</b>	<b>5</b>
<b>2- Contexte de l'étude .....</b>	<b>6</b>
<b>2.1-Les matériaux composites .....</b>	<b>6</b>
<b>2.1.1- Matrice.....</b>	<b>6</b>
<b>2.1.2- Renfort (fibre) .....</b>	<b>8</b>
<b>2.1.3- Cas particulier : les matériaux composites stratifiés.....</b>	<b>9</b>
<b>2.1.4- Les différents niveaux d'analyse des matériaux composites .....</b>	<b>11</b>
<b>2.1.5- Mécanismes d'endommagement dans les matériaux composites ....</b>	<b>11</b>
<b>2.2-Corrélation d'images numériques et ténacité .....</b>	<b>13</b>
<b>2.2.1-Corrélation d'images numériques .....</b>	<b>13</b>
<b>2.2.2-Ténacité.....</b>	<b>14</b>
<b>3.Partie expérimentale.....</b>	<b>15</b>
<b>3.1-Eprouvettes utilisées pour mesurer la ténacité .....</b>	<b>15</b>
<b>3.2-Stratifiés testés .....</b>	<b>16</b>
<b>3.2.1-Propriétés élastiques du stratifié orthotrope équivalent .....</b>	<b>17</b>
<b>3.3-Mise en place d'essais mécaniques .....</b>	<b>17</b>
<b>3.4-Exploitation des essais expérimentaux .....</b>	<b>18</b>
<b>3.4.1- Courbe force-déplacement et calcul de la ténacité .....</b>	<b>18</b>
<b>3.4.2- Calcul de la ténacité .....</b>	<b>19</b>
<b>3.4.3- Corrélation d'image numérique - champ de déformation et propagation de la fissure .....</b>	<b>20</b>
<b>4.Conclusion .....</b>	<b>23</b>
<b>5.Bibliographie.....</b>	<b>24</b>
<b>6.Annexe.....</b>	<b>25</b>

## 1- Introduction

Ces dernières années l'industrie en générale a connu une grande révolution dû à l'utilisation d'un nouveau type de matériaux : les matériaux composites. De nos jours, ces matériaux composites sont utilisés dans un très grand nombre de domaines. Ils ont notamment séduit de nombreux producteurs dans les domaines de l'aéronautique, l'automobile, l'éolien, les articles de sports. Par exemple, dans l'aéronautique, la part d'utilisation de matériaux composites dans les récents avions comme le Boeing 787 et l'Airbus A350 dépasse les 50% de leur structure totale.

L'essor que connaît le monde des matériaux composites est dû à leurs avantages non négligeables par rapport aux autres matériaux. Les principaux atouts de ces matériaux sont leur rigidité, leur résistance et leur légèreté. En effet, de leur structure composée de fibres et d'une matrice, le matériau composite offre une grande résistance aux contraintes pour un poids plus faible que l'acier ou l'aluminium. Par exemple, toujours dans l'aéronautique, l'utilisation des composites a permis de réduire de poids de certains avions de plusieurs tonnes. Ce qui par ailleurs peut avoir un impact bénéfique sur l'environnement en réduisant la consommation d'essence.

Un autre grand atout des matériaux composites est leur diversité. En effet les constructeurs peuvent jouer à la fois sur les matériaux de la matrice, sur le matériau des fibres et sur l'agencement fibres/matrice pour ainsi trouver le matériau qui répondra le mieux aux problématiques du client. Enfin on peut noter le fait qu'une bonne partie des composites sont sur le point de pouvoir être recyclés.

Bien que les matériaux composites présentent de nombreux avantages, leur étude présente certaines problématiques. Du fait de leur diversité les différents matériaux composites ne présentent pas tous les mêmes propriétés mécaniques. Donc les résultats d'une étude d'un composite ne peuvent pas, ou avec précaution, être généralisés à d'autres composites. De plus les propriétés mécaniques d'un composite ne sont souvent pas isotropes, donc les études doivent être menés sur différentes directions.

L'objectif de ce projet est d'étudier le comportement à rupture de matériaux composites stratifiés tissés, cela passe notamment pour la mesure la ténacité comme une grandeur pour mesure la résistance à la propagation d'une fissure.

Au-delà de cette étude, un des intérêts majeurs de ce travail est également de nous faire découvrir le domaine des matériaux composites plus profondément que nous avons pu le faire auparavant. En effet, le terme de matériaux composite est généralement bien connu mais leurs particularités le sont moins car très diversifiées.

Par ailleurs, le but d'un tel projet est aussi de nous apprendre à nous organiser et à travailler en groupe, chose rendue d'autant plus complexe du fait de la mise en place du travail à distance. Enfin, un des objectifs de ce projet a été de nous faire acquérir des connaissances portant sur l'utilisation de nouveaux logiciels auxquels nous n'avons pas forcément été confrontés, et qui sont exploités dans le monde du travail actuel, tels que Scilab ainsi que VIC-2D.

## 2- Contexte de l'étude

### 2.1- Les matériaux composites

Les matériaux composites, matériaux constitués d'une matrice et d'un renfort, ont de très bonnes propriétés mécaniques. Le bois fut le premier matériau composite utilisé par les hommes car il est l'un des rares exemples des matériaux composites naturels. Pour répondre à ses besoins et faire face à des problèmes d'ordres mécaniques l'homme a, grâce à la recherche et aux avancées technologiques, inventé et conçu de nombreux matériaux composites de différents types (le béton armé, la fibre de verre, la fibre de carbone...). Ces matériaux sont aujourd'hui utilisés dans de nombreux domaines comme l'aéronautique, l'automobile, l'électricité, le bâtiment, le sports ...

Un matériau composite est composé d'un assemblage de deux différents matériaux avec des natures également différentes, se complétant et permettant d'aboutir à un matériau dont les performances globales sont supérieures à celles des composants pris séparément. Il s'agit d'un arrangement de fibres d'un matériau résistant qui sont noyées dans une matrice dont la résistance mécanique est beaucoup plus faible. Ainsi, les matériaux composites sont donc des matériaux très hétérogènes et fortement anisotropes (c'est-à-dire que leurs propriétés mécaniques dépendent de la direction des sollicitations). Ces matériaux sont donc aussi définis par le type d'agencement entre la matrice et le renfort modifiant les capacités du matériau en fonctions de la direction de efforts auxquels ils sont soumis.

#### 2.1.1- Matrice

La matrice est un matériau homogène dans lequel est plongé le renfort. Elle permet de lier les fibres entre elles et de conserver la disposition géométrique du renfort pour ainsi optimiser les fortes propriétés mécaniques des fibres étant trop fines pour être utilisées directement dans des applications mécaniques. La matrice protège également les fibres de l'environnement extérieur. Elle permet également de donner la forme voulue au produit réalisé.

Les composites sont classés selon la nature de leur matrice. En effet, la matrice assure toutes les fonctions autres que la tenue et conditionne le choix du procédé de mise en forme. On a pour habitude de distinguer trois grandes familles :

##### 2.1.1.a- Les composites à matrice organique (CMO)

Il s'agit de la famille des composites la plus répandue : 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. On distingue généralement deux types de CMO : tout d'abord les composites à grande diffusion, qui ont un faible coût et représentent près de 95% des CMO fabriqués. Ils sont utilisés pour toutes sortes de pièces faiblement sollicitées ainsi que pour les composites à haute performance, plus onéreux mais présentant des qualités mécaniques nettement supérieures, employés entre autres dans l'aéronautique, le nautisme, les sports et loisirs ou encore la construction industrielle.

Les deux types de CMO les plus utilisés sont les thermodurcissables et les thermoplastiques :

- Les matériaux composites thermodurcissables : ne peuvent être mis en œuvre qu'une seule fois car ceux-ci deviennent infusibles et insolubles après polymérisation. Une fois durci, leur forme n'est plus modifiable, un chauffage éventuel ne permettra même pas de le fondre : il n'est pas recyclable, mais on peut néanmoins l'incorporer dans d'autres matériaux comme renfort. Les matériaux thermodurcissables sont en général bien plus résistants que les matériaux thermoplastiques. Ils sont dotés de très bonnes propriétés de résistance électrique, mécanique, ainsi qu'aux produits chimiques et à la chaleur. Quelques exemples de matériaux thermodurcissables : résines polyesters insaturés, résines époxydes, résines vinylester, résines phénoliques, ...
- Les matériaux composites thermoplastiques : ont la propriété de se ramollir lorsqu'ils sont chauffés suffisamment et qui en se refroidissant redeviennent durs. On dit qu'ils conservent leur thermoplasticité initiale de manière réversible. De plus, ils sont mécaniquement déformables, cette déformation étant figée par le refroidissement. Cette qualité rend le matériau recyclable. Quelques exemples de matériaux thermoplastiques : polypropylène, le polyamide, le polyétherimide,....

### **2.1.1.b- Les composites à matrice céramique (CMC)**

Les CMC sont utilisés dans diverses domaines tel que ; l'industrie spatiale, l'aéronautique militaire, la conception d'organes hauts de gamme (des plaquettes de freins ou des disques). Les céramiques en général possèdent de nombreux atouts pour de telles applications : elles peuvent résister à des températures très élevées, sont plus légères que de nombreux métaux, et présentent une bonne stabilité chimique. Malheureusement, leur domaine d'utilisation se retrouve fortement limité à cause de leur grande fragilité limite fortement leur domaine d'utilisation. Le principe des CMC est de faire en sorte que les céramiques soient moins cassantes en les façonnant sous forme de renforts et d'une matrice, c'est-à-dire en leur donnant une structure composite. Les CMC comptent ainsi parmi les matériaux les plus performants pour les applications thermomécaniques exigeantes. Malheureusement, la diffusion de ces matériaux est assez faible à cause de leur coût de revient est très élevé. Cela est dû à des procédés de fabrication employés : il s'agit de mettre en place un tissu de fibres, puis d'y infiltrer des précurseurs gazeux ou liquides qui vont réagir chimiquement pour former la matrice, couche après couche. Cette réaction s'effectue à température élevée et à vitesse lente et requiert des équipements lourds. Ces matrices sont habituellement constituées de carbone ou de carbure de silicium ou d'alumine.

### **2.1.1.c- Les composites à matrice métallique (CMM)**

Un CMM est constitué d'une matrice métallique (en aluminium, acier, zinc, ...) et d'un renfort métallique ou céramique tels que des fils d'acier, des particules de carbure de silicium (SiC), des fibres de carbone, alumine,.... Les composites à matrice métallique ont été élaborés pour tenter de concilier les qualités des métaux (ductilité, propriétés intrinsèques de la matrice métallique, bonne tenue face au vieillissement et au feu...)

avec la légèreté et les bonnes caractéristiques mécaniques propres aux structures composites. Ce sont des matériaux performants, mais pénalisés par une masse volumique élevée mais surtout un coût de revient encore très élevé et réservés à des applications relativement exigeantes, dans divers domaines. Les CMM possèdent une matrice en métal léger (aluminium, magnésium, titane...). La matrice métallique présente l'avantage d'assurer au composite d'avoir des caractéristiques mécaniques intrinsèques généralement bonnes. A noter qu'il est en général impossible de faire cela avec des matrices polymères (en raison de leur faible résistance) ou céramiques (en raison de leur fragilité). Un inconvénient cependant est la réactivité importante chimique des métaux. En effet, lors de la mise au point du composite, il faut s'assurer que la matrice et le renfort ne peuvent pas réagir entre eux. Sinon il faut s'attendre à des conséquences sur les propriétés mécaniques catastrophiques.

### 2.1.2- Renfort (fibre)

Les fibres (aussi appelées « renfort ») apportent au matériau composite ses performances mécaniques élevées, à savoir, la rigidité, la résistance à la rupture, la dureté, etc. Elles permettent également d'améliorer certaines propriétés physiques du matériau telles que le comportement thermique, les propriétés électriques, la tenue au feu... Les fibres possèdent généralement une bonne résistance à la traction mais une résistance faible à la compression. Le renfort peut être associé à un renfort de nature différente (appelé composite hybride), mais peut aussi se trouver seul au sein d'une matrice (appelé composite homogène).

On distingue d'abord deux types de fibres, les longues et les courtes (Figure 1) :

- Les fibres longues sont disposées de façon ordonnée et orientée dans une matrice isotrope. Elles font toute la longueur de la pièce composite, elles ont toutes les propriétés du matériau, ce qui les rend très performantes et utilisées partout. Les fibres sont dispersées aléatoirement dans une matrice isotrope ; le comportement mécanique macroscopique est isotrope.
- Les fibres courtes sont dispersées aléatoirement dans une matrice isotrope ; le comportement mécanique macroscopique est isotrope. Leur longueur moyenne est une dizaine de centimètres. Leurs propriétés sont nettement diminuées par rapport aux fibres longues, cependant elles permettent la mise en forme du matériau.

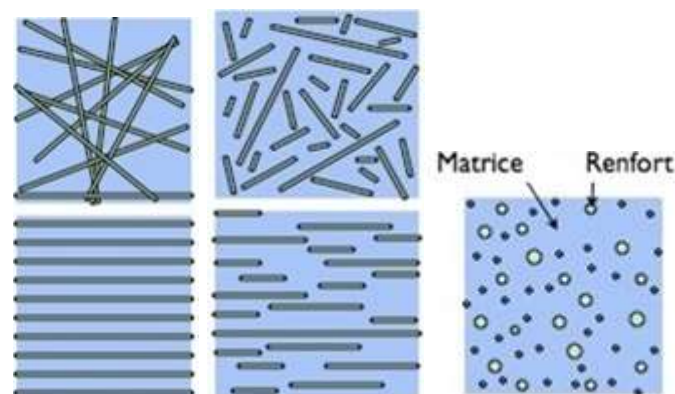


Figure 1 : Différents types de fibres dans les matériaux composites : (a) fibres longues, (b) fibres courtes, (c) particules.



### 2.1.2.a - Types de fibres les plus utilisés

- Les fibres de verres

Elles sont imprégnées dans une matrice constituée d'une résine après avoir été tissées. Souvent, la matrice est thermodurcissable (elle ne peut pas être fondue) comme par exemple les polyépoxydes (époxy). Applications : coques de bateau de moyennes dimensions, etc.

- Les fibres de carbone

Les matériaux composites en fibres de carbone sont très utilisés en aéronautique (avec une matrice en résine polymère) à cause de leur résistance et leur légèreté. Dans les avions de ligne récents, 50 % de leur masse est faite de matériaux composite, dont une part importante en fibres de carbone [1]. On en trouve aussi par exemple dans le domaine du sport. Cependant, les fibres de carbone ne sont pas parfaites et présentent des défauts : elles sont en effet sensibles aux chocs et sont des conducteurs électriques (indésirable pour certaines applications : cannes à pêche ...).

- Le poly-para-phénylène téréphtalamide ou kevlar

Il appartient à la famille des aramides, qui est la contraction d'*aromatic polyamide*. Leur solidité, mais aussi leur résistance aux chocs, leur permettent d'être employées pour confectionner par exemple les gilets pare-balles. Les fibres kevlar présentent une sensibilité à l'humidité et aux UV, la matrice est là pour assurer un rôle de protection vis-à-vis de ces agressions extérieures. Cela consiste à superposer des couches de fibres tissées les unes sur les autres, et de les inclure dans la matrice. Ils forment des matériaux tridimensionnels.

### 2.1.3- Cas particulier : les matériaux composites stratifiés

Les applications actuelles des matériaux composites montrent l'intérêt des éléments de structure plaques ou coques, constituées de plusieurs couches (plis) empilées les unes sur les autres suivant différentes orientations : ce sont les stratifiés. Une structure couramment rencontrée dans les matériaux composites est la stratification. Dans un stratifié, les fibres sont disposées en couches fines (de quelques dixièmes de millimètre) appelées plis, qui sont empilées les unes sur les autres. Ces couches sont par la suite liées entre elles grâce à la matrice. On parle de stratifiés unidirectionnels, pour les fibres qui sont orientées dans une seule direction dans chaque pli (Figure 2).

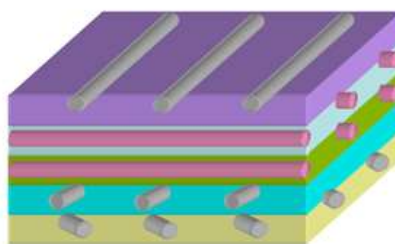


Figure 2 : Schéma d'un composite stratifié unidirectionnel

### 2.1.3.a- Les matériaux composites stratifiés tissés

Les tissus ainsi que les composites tissés permettent de réaliser de nombreuses pièces composites. Dans ces structures, les fibres sont nommés torons car elles sont alignées ou bien tressées en « câbles » comptant chacun quelques centaines ou milliers de fibres. Ces fils sont par la suite tissés selon des motifs parfois très sophistiqués. La matrice est présentée à deux niveaux différents, après avoir que la mise en forme soit terminée : au sein des fils (entre les fibres), et au sein du tissu (entre les fils), comme le montre la figure 3.

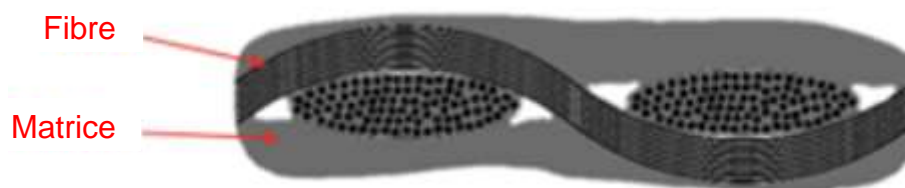


Figure 3 : Structure d'un composite tissé : fibres (regroupés en fils) et matrice (intra et inter fils)

Les motifs du tissu peuvent être extrêmement variés. Beaucoup de tissus ne possèdent qu'une couche de fils (Figure 4) et sont dits plans. En cousant plusieurs couches entre elles ou bien en les empilant pour former un stratifié, on obtient l'épaisseur de la pièce. Les tissus de la figure 4 comportent le même nombre de fils dans les deux directions de tissage, ils sont dits équilibrés. Ainsi, leur résistance et leur rigidité est la même dans les deux directions. Attention, ils n'ont pas pour autant un comportement isotrope : ils résistent à priori mieux en traction dans la direction des fils qu'en traction à 45° ou en cisaillement. De plus, afin de jouer sur l'anisotropie, il est judicieux de varier la proportion des fils dans les deux directions de tissage. Ce jeu sur l'anisotropie permet l'obtention de tissus dits non équilibrés.

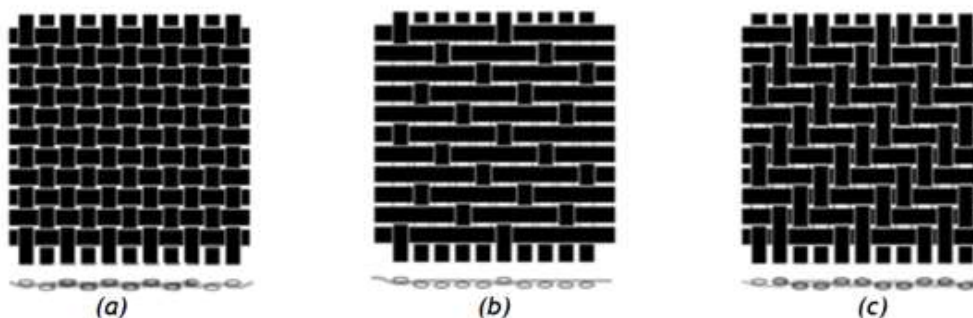


Figure 4 : Exemples de tissus plans courants

D'autres tissus sont appelés tridimensionnels, cela signifie qu'ils comportent des fils dans plusieurs directions non coplanaires (Figure 5). Ces tissus permettent de fabriquer des pièces d'épaisseur variable et, qui sont plus résistantes à l'arrachement que les assemblages de tissus plans, moyennant une fabrication plus complexe.

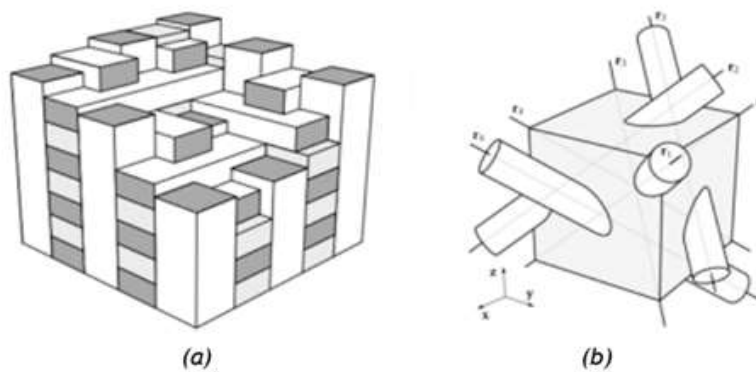


Figure 5 : Exemples de tissus tri-dimensionnelles

### 2.1.4- Les différents niveaux d'analyse des matériaux composites

L'échelle microscopique est celle des constituants (interaction fibre/résine/interphase), l'échelle mésoscopique est celle de pli du stratifié et l'échelle macroscopique celle du stratifié (Figure 6). L'étude à l'échelle mésoscopique met en évidence le fait que le composite stratifié est constitué par un empilement de pli.

Une bonne compression et caractérisation des mécanismes de rupture au sein de matériaux composites permet de passer à une étude plus complexe. Dans le niveau structural on commence à étudier les applications de matériaux composites dans le domaine industriel. Par exemple dans le domaine aéronautique dans lequel l'utilisation matériaux composites a été intensifiée au cours des dernières décennies, car presque le 50% des matériaux qui constituent les avions sont composites (Figure 6).

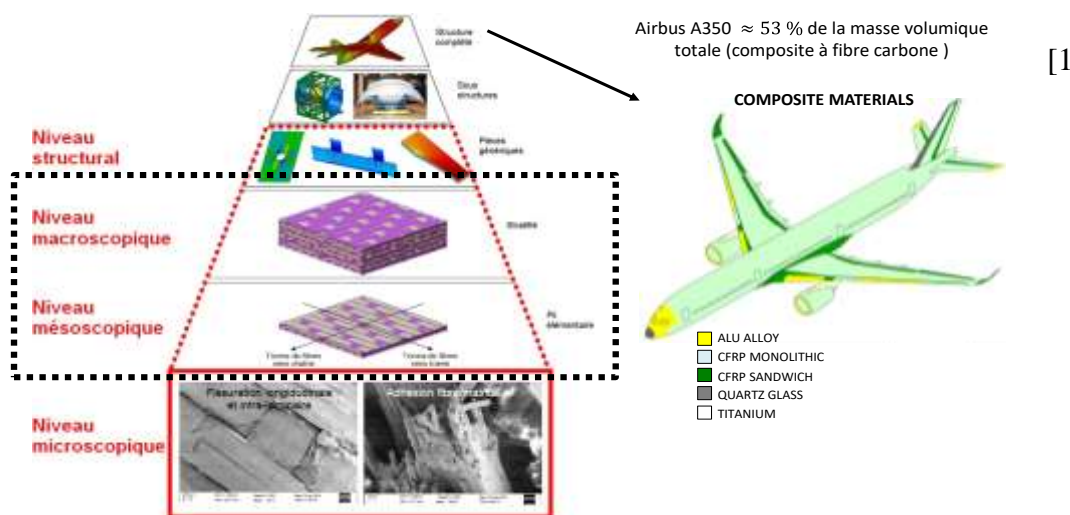


Figure 6 : Différents niveaux d'analyse des matériaux composites

### 2.1.5- Mécanismes d'endommagement dans les matériaux composites

Les endommagements qui interviennent dans les stratifiés peuvent être provoqués soit

par un défaut créé lors de la fabrication du matériau, soit par une sollicitation ou un chargement de la structure. Intéressons-nous aux endommagements créés par la sollicitation mécanique de la structure. Les différents types d'endommagements sont la fissuration matricielle, la décohésion fibre-matrice, la rupture de fibre, ainsi que le délaminage (confère figures 7 et 8 en annexe).

### **2.1.5.a- Fissuration matricielle**

La fissuration matricielle se traduit par l'apparition de microfissures dans les zones où le milieu est assez hétérogène ou lorsqu'il y a des inclusions. En effet, ces inclusions ont tendance à créer des concentrations de contraintes localisées d'où la matrice va commencer à se fissurer. Ces microfissures peuvent se propager selon la direction de sollicitation, soit dans le sens transversal ou longitudinal des fibres. Les fissures transversales traversent les plis où la fibre est le plus désalignée de l'axe de contrainte. Les fissures longitudinales quant à elles, sont perpendiculaires à la surface inter-plis et traversent l'épaisseur des plis orientés dans l'axe de la contrainte

Décohésion Fibre-matrice :

La décohésion fibre-matrice dépendante de la résistance relative de chaque composant est localisée dans la zone de transfert des charges entre le renfort et la matrice. Elle se traduit par une apparition de microfissures dans la matrice qui peuvent se propager au cours de la sollicitation et arriver jusqu'à l'interface fibre-matrice. Cette décohésion peut évoluer différemment selon l'adhérence de l'interface fibre-matrice.

- En cas de très faible adhérence, la fissuration matricielle est dirigée sur l'interface et la décohésion fibre-matrice peut alors se propager sur une relativement grande distance.
- En cas de très forte adhérence, il y aura une propagation de la fissure qui sera initiée soit par rupture de fibres, soit par rupture de la matrice.

### **2.1.5.b- La rupture de fibre**

En général, la rupture de fibres apparaît lorsque l'endommagement est déjà à un stade avancé dans les plis orientés suivant l'axe de sollicitation. Ce type d'endommagement apparaît lorsque la limite de rupture des fibres est atteinte. Une accumulation de multiples ruptures de fibres dans le matériau peut provoquer dans le matériau une perte de résistance partielle voir globale pouvant conduire à la ruine de la structure et à sa rupture.

### **2.1.5.c- Le délaminage**

Le délaminage se caractérise par la séparation de deux couches du composite, on peut ainsi souvent constater ce mécanisme à l'œil nu chose que l'on ne peut pas faire lors des mécanismes énoncés précédemment. Le type de stratifiés dans lequel ce mécanisme intervient le plus fréquemment est le stratifié à empilement de plis croisés, en effet, la différence de module entre les couches favorise leur séparation qui peut

avoir lieu soit dans les bords des structures soit près des discontinuités géométriques là où les gradients de contraintes sont plus forts et mènent à des contraintes hors plan.

## **2.2- Corrélation d'images numériques et ténacité**

### **2.2.1- Corrélation d'images numériques**

La corrélation d'images numérique est une technique de mesure très répandue dans les tests de mécanique moderne. Afin de mesurer avec précision les déformations qui ont lieu au sein d'un solide au cours d'un mouvement ou simplement soumis à une action mécanique (Figure 9).

Cette technique consiste à placer une ou plusieurs caméras braquées sur la pièce testée. Au préalable nous devons appliquer un moucheté de peinture dessus afin d'obtenir une pièce dite "texturée". Cela revient à déposer aléatoirement un ensemble de points de peinture sur la pièce afin de distinguer et de suivre chaque point grâce à son voisinage de points qui aura une forme unique. En effet en temps normal les pièces testées ont souvent une texture trop régulière et cela fait que discerner un point unique et le suivre dans le temps est presque impossible. L'idée d'appliquer un mouchetis de peinture est de rendre chaque point à la surface du solide analysé unique. A noter que certains matériaux comme le béton possèdent naturellement une texture de surface irrégulière, ceux-ci n'ont donc pas besoin d'être préparés avec de la peinture.

Une fois la surface du solide préparée nous effectuons le test en lui-même puis nous extrayons les images de la ou des caméras disposées autour de l'expérience. Les images sont ensuite analysées pixel par pixel afin de discerner la position de certains points par rapport aux autres au cours du temps. Les mesures se font par différence de niveaux de gris, cela permet une précision de l'ordre du centième de pixel dans les meilleurs des cas. C'est aussi la raison pour laquelle le moucheté se fait toujours avec de la peinture noire.

Une fois les images capturées nous passons à l'analyse de celles-ci. Nous établissons une corrélation entre le déplacement de tous les point par rapport au repère choisi afin d'évaluer très précisément la déformation de la pièce. Cela nous permet de déterminer la tendance générale du comportement de la pièce ainsi que les endroits où la pièce a été plus ou moins déformée, éventuellement les points de rupture de la géométrie. Cette analyse permet de repérer les erreurs de conception ou les défauts de construction et est un outil capital pour évaluer la ténacité des prototypes. Une fois les mesures analysées il est souvent très utiles de mettre en parallèle simulations numériques réalisées lors de la conception avec le comportement réel de la pièce afin de mesurer les écarts réalité/simulation.

Positionner une multitude de caméras sur différents angles améliore ce procédé afin d'obtenir, non pas une représentation en deux dimensions des déformations, mais de pouvoir construire une représentation détaillée des déformations de la pièce dans

l'espace.

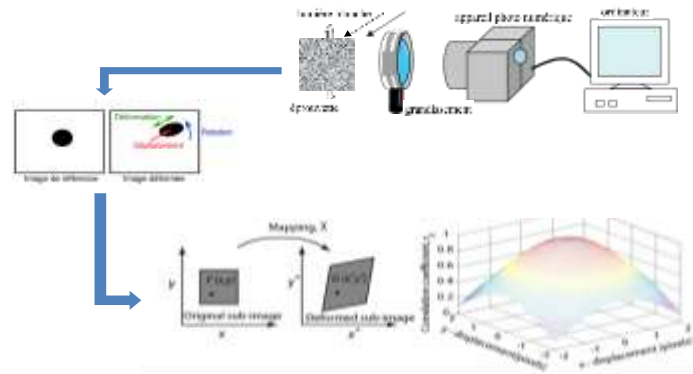


Figure 9 - Schéma de Principe de la technique de corrélation d'images numériques [2]

### 2.2.2- Ténacité

La ténacité caractérise la résistance à la rupture d'un matériau ou à résister à la propagation d'une fissure. Elle est déterminée à partir d'un test de traction ou compression en utilisant des éprouvettes pré-entallée (Figure 10).

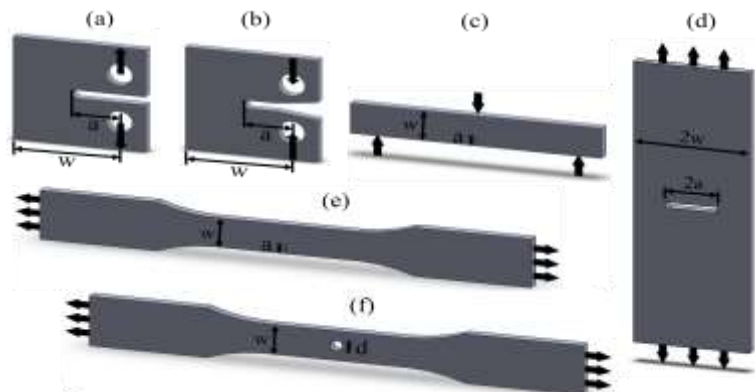


Figure 10 - Différents types des éprouvettes utilisées pour faire des essais de ténacité : (a) Compact Tension - (b) Compact Compression - (c) Single Edge Notched Bending- (d) Centre Notched Tension - (e) Single Edge Notched Tension – (h) Open Hole Tension

Par convention scientifique il est établi que la ténacité d'un matériau est égale à la force, en Newton, nécessaire pour rompre un fil d'un millimètre carré de section du matériau considéré. Les tests de ténacité consistent donc en une mesure de la limite plastique d'une éprouvette de section circulaire d'un millimètre carré grâce à une machine d'essai des matériaux en traction. Normalement la ténacité d'un matériau est une valeur constante, mais elle peut varier selon ses propriétés physico-chimiques ainsi que sa géométrie.

On peut déterminer la ténacité du matériau (capacité d'un matériau de résister à la propagation de la fissure) en sachant la quantité d'énergie qu'un matériau peut absorber avant de rompre (contrainte maximale). Avec la formule du factor d'intensité de

contrainte et la contrainte maximale on détermine le facteur d'intensité de contrainte critique  $K_{IC}$  (ténacité) [4] :

$$K_{IC} = \sigma_c \sqrt{\pi a} f \quad (a/w) \quad (1)$$

Où  $\sigma_c$  est la contrainte critique assurée à l'initiation de la fissure,  $w$  est la distance de la ligne de charge au bord droit de l'éprouvette (figure ci-dessus),  $a$  est la longueur de fissure et  $f(a/w)$  est une fonction de correction géométrique pour une éprouvette de largeur finie.

Par exemple les fibres tressées feront preuve de meilleures performances en termes de ténacité que des fibres non tressées. La ténacité d'un matériau composite est donc une grandeur très intéressante car nous disposons de nombreuses techniques pour faire varier la ténacité du matériau composite final que ce soit par des choix de matrice, de renfort, d'agencement des deux ou encore de géométrie interne.

### 2.2.2.a- Lien entre la ténacité et le taux de restitution d'énergie critique

Le taux de restitution d'énergie critique  $G_{IC}$  est lié à l'énergie de création de nouvelles surfaces  $\gamma_F$  par la relation  $G_{IC} = 2\gamma_F$  correspond à la valeur du taux de restitution d'énergie  $G$  pour laquelle la propagation de la fissure est observée.

Le taux de restitution d'énergie critique est calculé à partir de  $K_{IC}$  [2] :

$$G_{IC} = C_I K_{IC}^2 \quad (2)$$

Où  $C_I$  est le coefficient élastique orthotrope pour des conditions de contraintes planes défini par :

$$C_I = \sqrt{\frac{1}{2E_x E_y}} \sqrt{\sqrt{\frac{E_x}{E_y} - \nu_{xy}} + \frac{E_x}{2G_{xy}}}$$

$E_x, E_y, G_{xy}$  et  $\nu_{xy}$  sont respectivement les rigidités dans les directions  $x$  et  $y$  le module de cisaillement et le coefficient de Poisson du stratifié.

## 3. Partie expérimentale

### 3.1- Eprouvettes utilisées pour mesurer la ténacité

Dans le cadre de notre étude, des essais de caractérisation expérimentale de la rupture translaminaire ont été fait dans le laboratoire. Des éprouvettes Compact Tension (CT) ont été utilisé pour induire la rupture translaminaire (Figure 11). Les éprouvettes sont découpées par jet d'eau à partir d'une plaque de  $600 \times 600 \text{ mm}^2$ . Les trous de fixation du dispositif de charge sont usinés au moyen de forêts carbure. Le rapport entre la longueur de l'entaille initiale et la largeur de l'éprouvette utilisée est d'environ  $a/w = 0.45$  pour les deux types d'éprouvettes.

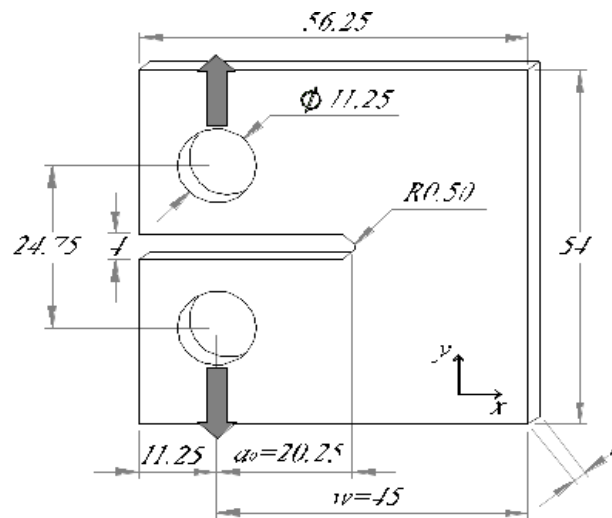


Figure 11 - Test specimen dimensions (in mm) for tension translaminal fiber-breaking fracture toughness tests. [6]

Selon la norme ASTM-399 [5], validée pour des matériaux isotropes métalliques, le facteur d'intensité de contrainte critique (ténacité) en mode I (ouverture) est donné par :

$$f(a/w) = \frac{2 + a/w}{(1 - a/w)^2} [0,886 + 4,64(a/w) - 13,32(a/w)^2 + 14,72(a/w)^3 - 5,6(a/w)^4] \quad (3)$$

Où  $P_c$  est la charge critique assurée à l'initiation de la fissure,  $t$  est l'épaisseur de l'éprouvette,  $w$  est la distance de la ligne de charge au bord droit de l'éprouvette (Fig. 3),  $a$  est la longueur de fissure, dont la valeur initiale est  $a_0$  et  $f(a/w)$  est une fonction de correction géométrique pour une éprouvette de largeur finie [5].

### 3.2- Stratifiés testés

La plaque stratifiée utilisées dans cette étude sont constituées d'une matrice thermoplastique PEEK renforcée par un tissu de fibres de carbone continues (Tenax®-E HTA40 3K), architecturé en motif satin de 5 (Figure 12). L'épaisseur moyenne du pli est 0.31 mm.

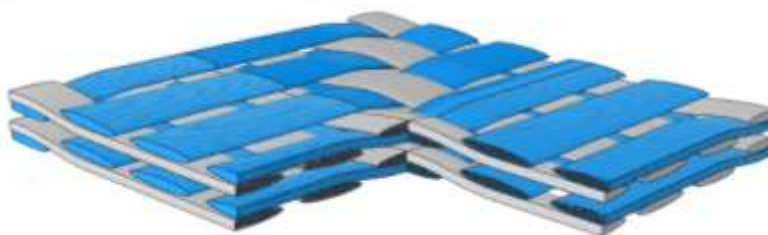


Figure 12 - Schéma architecture satin 5 [6]



**Tenax®-E TPCL PEEK-HTA40** est un stratifié consolidé thermoplastique (TPCL) composé de plusieurs couches de tissu tissé en poudre thermoplastique. Le tissu tissé en poudre est composé de la fibre de carbone à haute ténacité produit Tenax® -E HTA40 E13 3K 200tex et une matrice PEEK. Le stratifié consolidé peut être simplement chauffé au-dessus de sa température de fusion puis embouti dans un moule métallique au sein d'une presse en quelques minutes.

Le stratifié étudié a la même proportion de plis à 0°/90° et ±45°, [(0/90), (±45), (0/90), (±45), (0/90), (±45), (0/90)] (2.17 mm d'épaisseur, noté C7/PEEK), selon la distribution du dragage il est qualifié comme quasi-isotropes.

### 3.2.1- Propriétés élastiques du stratifié orthotrope équivalent

Les propriétés mécaniques du stratifié étudié sont spécifiées dans la Table 1.

**C7/PEEK quasi-isotropic**  
[(0/90), (-45), (0/90), (-45), (0/90), (-45), (0/90)]

	$E_x$ (GPa)	$E_y$ (GPa)	$G_{xy}$ (GPa)	$\nu_{xy}$
<b>TA</b>	46.57	46.57	15.12	0.25

Table 1 - Propriétés élastiques du stratifié orthotrope équivalent. [6]

### 3.3- Mise en place d'essais mécaniques

Les essais ont été effectués avec une machine de traction uni axiale servo-hydraulique MTS 810 (confère figure 13 en annexe) dotée d'une cellule de force de capacité de 100 kN. -Une caméra monochrome à haute vitesse Grasshopper® permet d'enregistrer des images numériques lors du chargement thermomécanique.

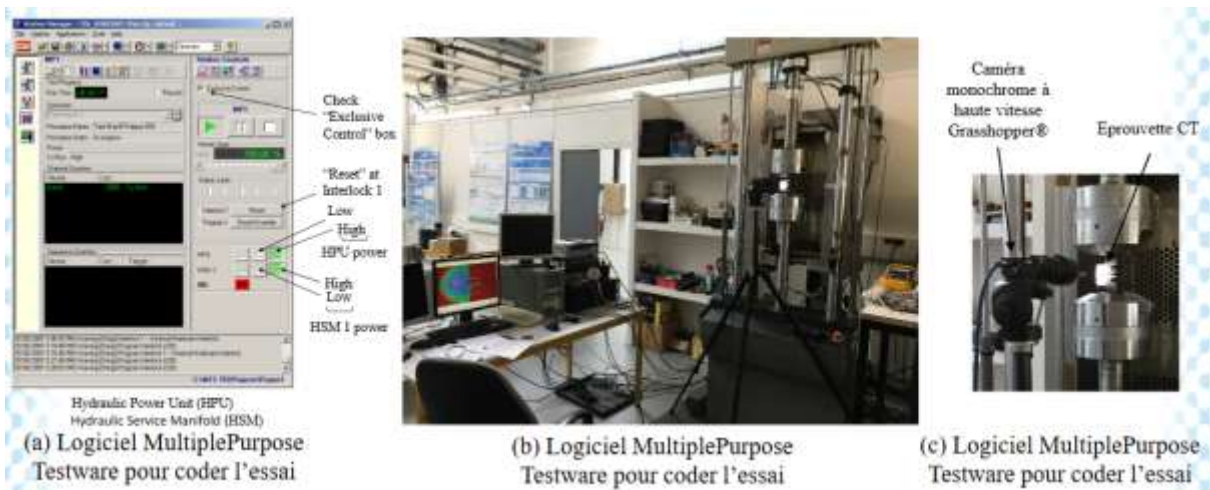


Figure 14 - Réalisation d'un essai mécanique de ténacité translaminaire en utilisant une éprouvette Compact Tension dans le laboratoire de mécanique de matériau a l'INSA-ROUEN

### 3.4- Exploitation des essais expérimentaux

#### 3.4.1- Courbe force-déplacement et calcul de la ténacité

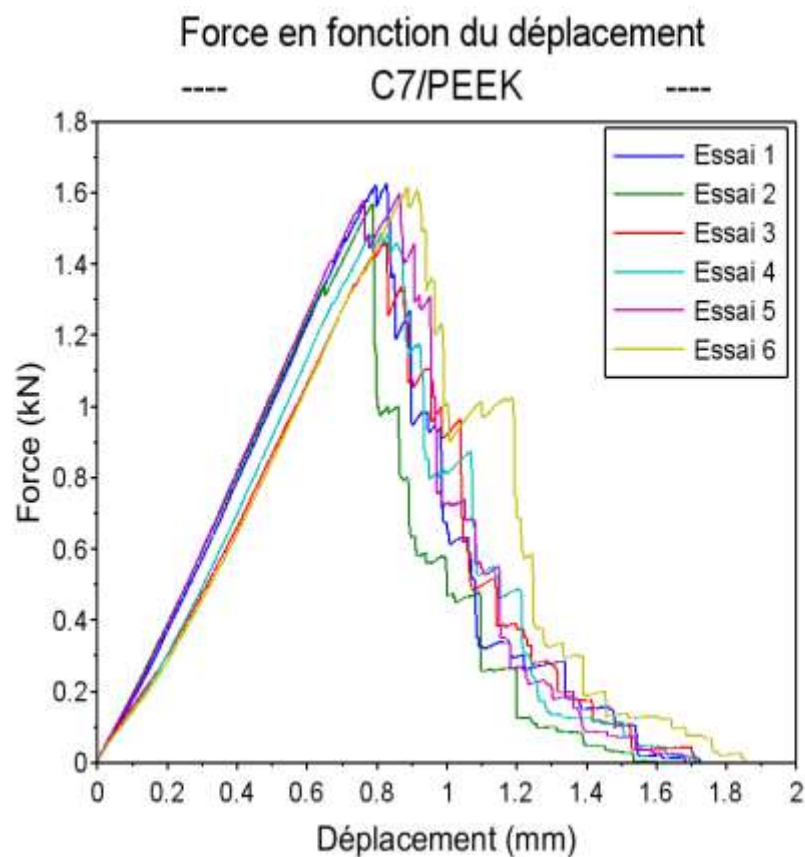


Figure 15 - Réponses mécaniques macroscopiques du stratifié C7/PEEK dans le cas d'un essai de rupture translaminaire en utilisant des éprouvettes Compact Tension (CT).

A partir des courbes de la Figure 15, on peut constater que le stratifié quasi-isotrope C7/PEEK présente une réponse macroscopique quasi-linéaire avant la propagation de la fissure, jusqu'au point de rupture atteint pour une force moyenne de 1.56 kN et pour un déplacement d'environ 0.8 mm.

On remarque donc que la courbe est divisée en deux parties distinctes : Dans un premier temps, elle présente une partie quasi-linéaire. Puis le point de rupture est atteint et enfin, on constate une partie de diminution de la charge (cela correspond à la propagation de la fissure).

On constate que tous les essais montrent un comportement pareil, ça nous donne une idée de la respectabilité de nos essais, car on est capable de reproduire presque la même réponse à chaque fois. L'intérêt de répéter les essais est d'obtenir une meilleure précision des résultats.

On peut observer dans la courbe force-déplacement des sauts qui sont traduits par la réduction de la charge mécanique avec une propagation de la fissure macroscopique, ce que nous permet d'utiliser une technique optique (Corrélation d'Image Numérique) pour suivre l'évolution de la Fracture Process Zone et de la pointe de fissure.

### 3.4.2- Calcul de la ténacité

Le coefficient élastique orthotrope pour des conditions de contraintes planes a été calculé avec l'équation (1) :

$$C_I = \sqrt{\frac{1}{2E_x E_y}} \sqrt{\sqrt{\frac{E_x}{E_y} - \nu_{xy}} + \frac{E_x}{2G_{xy}}}$$

En utilisant les propriétés élastiques du stratifié orthotrope équivalent C7/PEEK quasi isotrope (Table 1) on obtient :  $C_I = 2.2977 \cdot 10^{-11} \text{ Pa}^{-1}$

Après on peut utiliser les équations précédentes pour calculer la ténacité et le taux de restitution d'énergie (Table 2).

"Compact Tension - Ténacité et le taux de restitution d'énergie critique"

	Force maximale (kN)	K <sub>Ic</sub> (Mpa.m <sup>1/2</sup> )	G <sub>Ic</sub> (kJ/m <sup>2</sup> )
Essai 1	1.63	29.06	19.41
Essai 2	1.57	28.09	18.12
Essai 3	1.46	26.14	15.70
Essai 4	1.49	26.61	16.27
Essai 5	1.60	28.60	18.79
Essai 6	1.62	28.94	19.25
Moyenne	1.56	27.91	17.92
Ecart type	0.26	1.11	1.26

Table 2 – Récapitulatif des valeurs obtenues des essais CT pour le stratifié C7/PEEK

D'après la table 2, la ténacité  $K_{Ic} = 27.91 \text{ Mpa.m}^{1/2}$ . L'association de la matrice thermoplastique PEEK avec un tissu de fibres de carbone continues (Tenax®-

EHTA403K) avec une architecture en motif satin présente des résultats concluants, nous pouvons en déduire que la construction en motif satin des fibres de carbone est une architecture permettant un bon rendement en termes d'élasticité du matériau composite.

### 3.4.3- Corrélation d'images numériques – Champ de déformation et propagation de la fissure

Une caméra monochrome à haute vitesse Grasshopper® permet d'enregistrer d'images numériques lors du chargement thermomécanique. Pour analyser les déformations de la pièce et utiliser les techniques de corrélation d'image numériques décrites plus haut nous avons réalisé une vidéo du test de la pièce et l'avons analysé avec le logiciel VIC -2D (Figure 16).

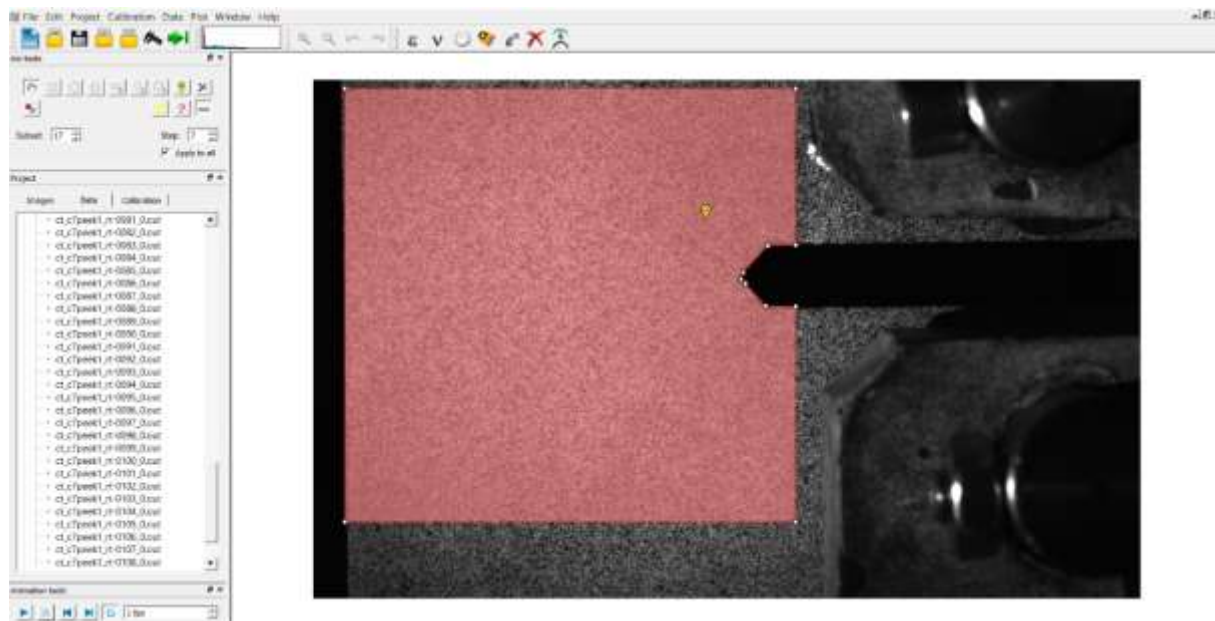


Figure 16 - Réalisation de la correction d'images numériques avec le logiciel VIC-2D

On peut observer à partir de la Figure 16 que les efforts de tension au niveau de l'entaille et de compression de l'autre côté de la pièce montent graduellement jusqu'à l'apparition de la fissure. Une fois cette fissure apparue on observe que l'ampleur des efforts diminue au fur et à mesure que la fissure progresse dans la pièce.

La progression de cette fissure se fait par à-coups et on observe que cette fissure dessine une trajectoire rectiligne perpendiculaire à la tranche de la pièce étudiée.

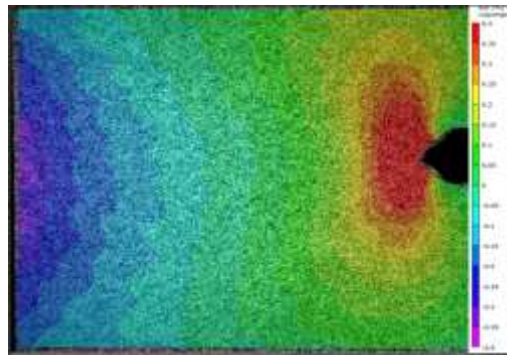


Figure 17 - Champ de déformation sur le stratifié C7/PEEK pendant un essai CT

Au moyen d'un algorithme implémenté dans le code Scilab [6], la pointe de la fissure est localisée via la discontinuité du champ de déplacement (Figure 18).

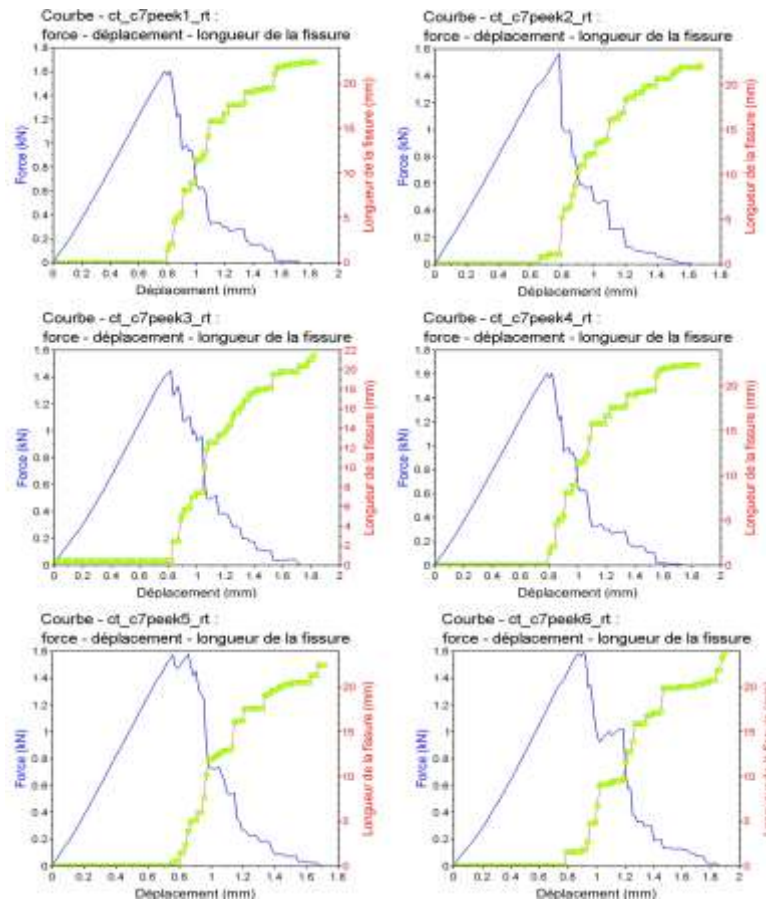


Figure 18- Courbe force – déplacement - longueur de la fissure pour C7/PEEK, longueur de la fissure a été calculée à partir d'un script implémenté sur Scilab basé dans la CIN.

A partir de ces essais nous pouvons émettre plusieurs observations. Tout d'abord, on observe une montée en amplitude des efforts de tension au niveau de l'entaille et de

compression à l'autre extrémité de la pièce jusqu'à une valeur d'1,6 kN avant l'apparition de la fissure. Cette valeur est en concordance avec les valeurs obtenues lors des 6 essais effectués pour la partie 3.4.1.

Ce qui va être le plus intéressant à observer sur les images ici va être la propagation de la fissure dans le matériau (Figure 19).

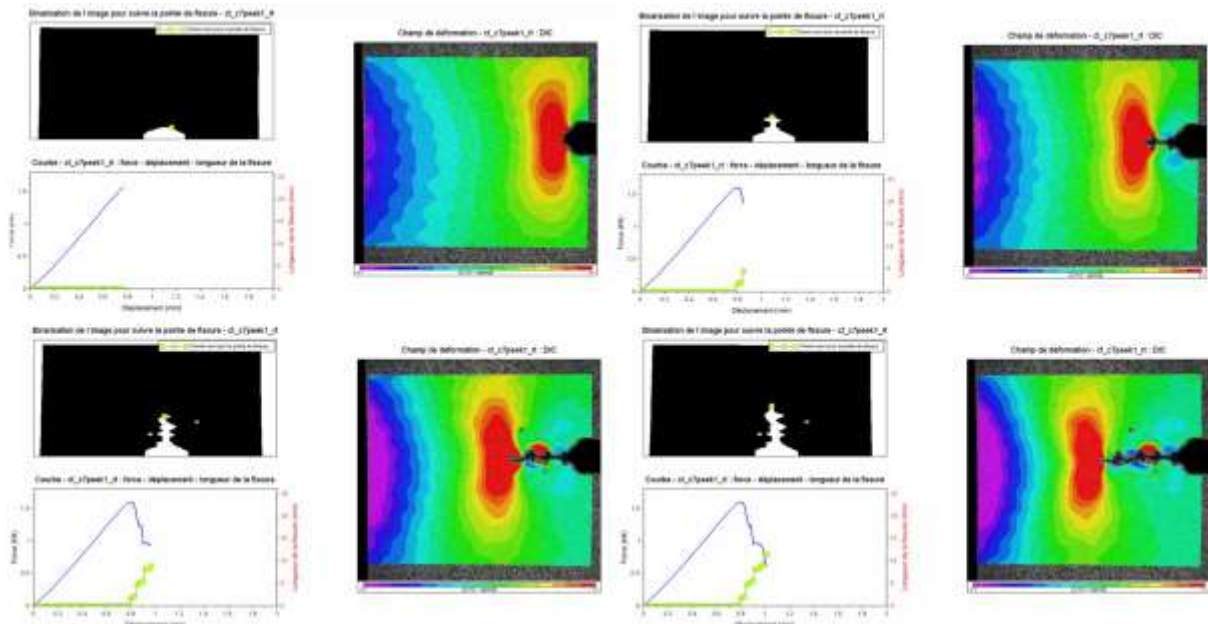


Figure 19 – Utilisation de la corrélation d'images numérique pour suivre l'évolution de la fissure et de la Fracture Process Zone

En effet on peut observer une propagation rectiligne selon un axe quasi-orthogonal à la tranche de la pièce soumise aux efforts. La progression de la fissure se fait de façon erratique et ne dessine évidemment pas de cassure bien nette mais on remarque que la taille des entailles qui apparaissent orthogonalement à la trajectoire de la fissure diminue au fur et à mesure que la fissure avance dans la pièce.

On peut constater dans Figure 19 l'évolution de la « Fracture Process Zone », la zone où se concentre la disparation d'énergie nécessaire pour la création d'une nouvelle surface (rupture de fibres). A partir de la FPZ on peut arriver aussi à tracer l'évolution du taux de restitution d'énergie (Figure 20), mais cette procédure requière l'utilisation de calculs complexes.

$$J = \frac{1}{2} \int_{\Gamma_0} \left( \{\sigma\} \{\varepsilon\}^T n_1 - 2 \left\{ \frac{\partial u}{\partial x_1} \right\}^T [\sigma] \{n\} \right) dS$$

Figure 20 – Équation qui permet de calculer le taux de restitution d'énergie à partir du champ de déformation généré par CIN

Il est intéressant de relever que sur le graphe des efforts ainsi que sur la vue faisant apparaître les tension/compression dans la pièce, on observe une diminution rapide et brutale des efforts mais qui reste progressive. Si nous disposions de plus de temps il serait intéressant d'y superposer un modèle de courbe exp(-x) pour analyser l'adéquation de notre courbe à ce modèle.

## 4- Conclusion

Au cours du semestre nous avons essayé de mesurer la ténacité du matériau composite quasi-fragile, le stratifié C7/PEEK, à l'aide de la corrélation d'images numériques. Pour ce faire, nous avons dû nous familiariser et apprendre à utiliser de nouveaux logiciels. A savoir, le logiciel VIC-2D pour le traitement de la corrélation d'images numériques en 2D, ainsi que la programmation du logiciel de calcul numérique Scilab. Notre projet comportait en effet une partie expérimentale importante qui nous a finalement permis de réussir à trouver une valeur précise de la ténacité pour le C7/PEEK. Ce projet nous a ainsi permis d'approfondir nos connaissances sur les matériaux composites stratifiés tissés, le procédé de corrélation d'images, la ténacité ou encore la rupture translaminaire.

Cependant, l'organisation pour réussir à travailler efficacement en groupe à distance à cause du confinement n'a pas été facile, surtout au début. Nous avons dû revoir celle-ci afin de ne pas mettre en péril l'avancée du projet. En effet, nous allions tout juste entamer la partie expérimentale lorsque le confinement a commencé. Nos nombreuses réunions de groupe Zoom ont permis de combler cela, notamment grâce à la fonction de prise de contrôle de l'écran à distance, qui permettait aux plus expérimentés d'entre nous sur certains logiciels de montrer aux autres membres du groupe comment utiliser certaines fonctions.

Sur le plan personnel, nous sortons donc enrichis de cette expérience de projet en groupe. En effet, l'encadrement par notre enseignant responsable nous a permis d'avoir une progression et un suivi réguliers de la réalisation du projet. Ce projet a permis de mieux cerner les enjeux du travail de groupe, le respect et la mise en place d'un cahier des charges, ainsi que d'une date limite. De plus, nous avons réalisé que l'organisation pour échanger entre nous, que ce soit sur le Drive Google ou sur la conversation de groupe Messenger, compte beaucoup afin d'assurer un avancement rapide et ordonné du programme initialement fixé. Nous avons ainsi développé de nouvelles compétences nécessaires à un travail de groupe sur une longue durée. En somme, nous avons acquis en méthodologie et rigueur qui nous aideront lors de nos futurs projets en tant qu'ingénieurs notamment.

Enfin, nous tenons à remercier notre responsable de projet Juan Daniel PUJOLS GONZALEZ pour son aide ainsi que pour ses conseils avisés tout au long du projet, et ce, malgré les conditions particulières et inédites imposées par le confinement, ainsi que tous les changements que cela a impliqué.

## 5- Bibliographie

- [1] Airbus, S. A. S. (2005). Aircraft characteristics airport and maintenance planning.
- [2] Lagattu, F., Gloanec, A. L., Hénaff, G., & Brillaud, J. (2005). Étude du rôle de la microstructure sur la résistance à la fissuration par fatigue des alliages TiAl à l'aide de la technique de corrélation d'images numériques de mouchetis. *Mechanics & Industry*, 6(5), 499-507.
- [3] Berthelot, J. M. (2010). Mécanique des matériaux et structures composites. Institut Supérieur des Matériaux et Mécaniques Avancés.
- [4] Berthelot, J. M. (2010). Mécanique des matériaux et structures composites. Institut Supérieur des Matériaux et Mécaniques Avancés.
- [5] Standard, A. S. T. M. (2012). E399-12. Standard Test Method for Linear-elastic Plane-strain Fracture Toughness  $K_{Ic}$  of Metallic Materials, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- [6] Pujols González, J. D., Vieille, B., & Bouvet, C. (2020). High temperature translamellar fracture in tension and in compression of woven-ply thermoplastic laminates. Under review.



6- Annexe

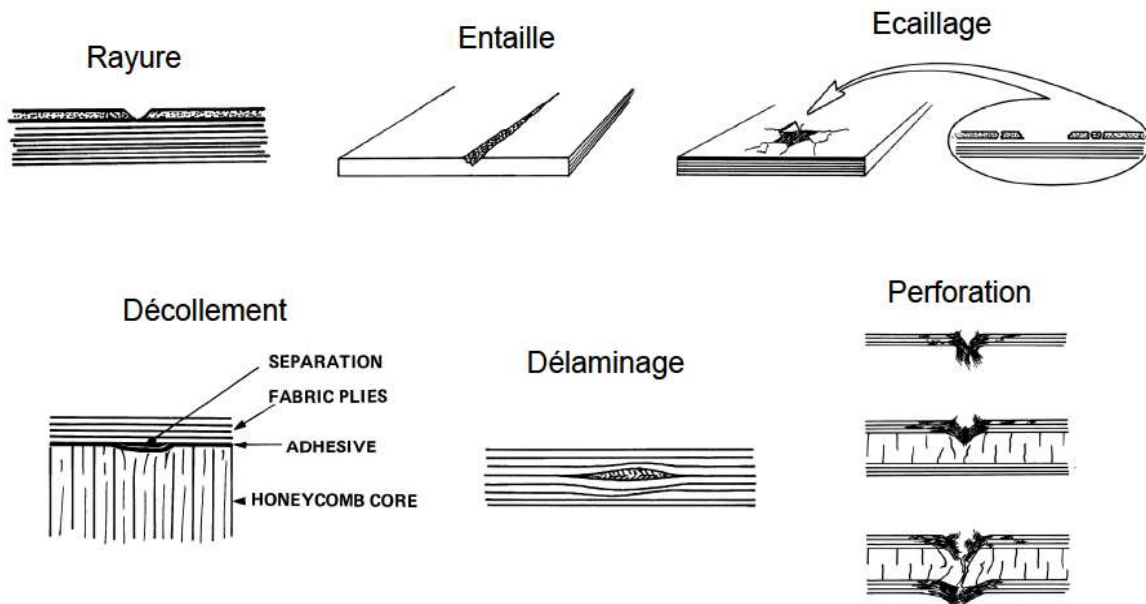


Figure 7- Différents types de défauts dans les composites. [Torres, 1986]

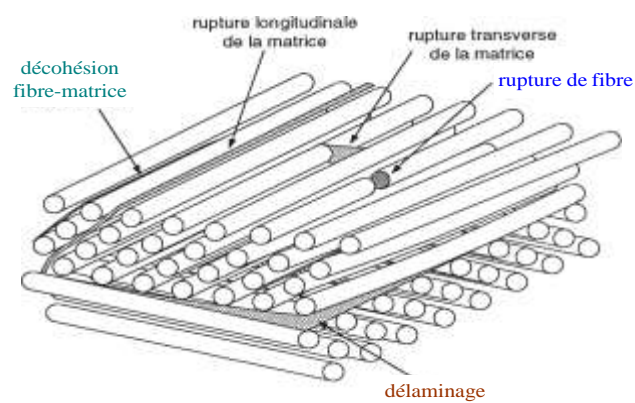


Figure 8 - Mécanismes de rupture observés dans les stratifiés [Berthelot, 2010] [3]

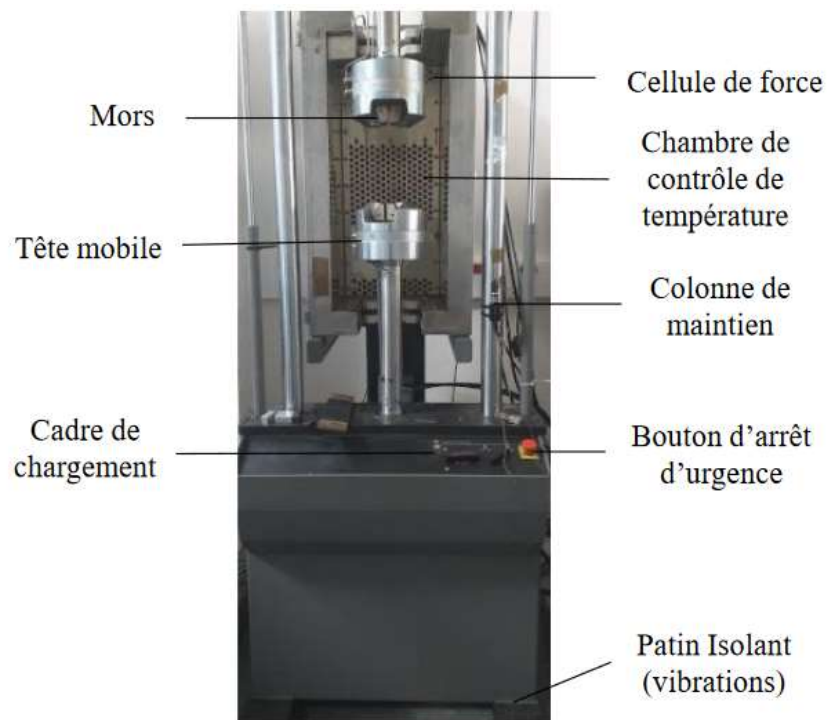


Figure 13 - Machine d'essai mécanique hydraulique. MTS 810

Code Scilab :

```

clc
clear
xdel(winsid()) // pour fermer tous les fenêtres

// Auteur : Daniel PUJOLS
// Penser à utiliser le navigateur d'aide si vous ne comprenez pas un command de Scilab

//// Essais Compact Tension ////

//// Ce script a pour but tracer les courbes force-déplacement des essais Compact Tension. Aussi calculer la ténacité et le
taux de restitution d'énergie critique ////

// PARAMETRES SCRIPT //
// Dimmensions éprouvette pour le post-traitement des données d'essai
a=20.04;
w=45;
aw=a/w;
t=2.17;
faw=((2+aw)/(1-aw)^(3/2))*(0.886+4.64*(aw)-13.32*(aw)^2+14.72*(aw)^3-5.6*(aw)^4);
// Propriétés élastiques du stratifié orthotrope équivalent
Ex=46.57;
Ey=46.57;
vxy=0.25;

```

```
Gxy=15.12;
Ci=sqrt(1/(2*Ex*Ey))*sqrt(sqrt(Ex/Ey)-vxy+Ex/(2*Gxy));

// Pour la sélection du repertoire
PathName=uigetdir('Sélectionner le repertoire des fichiers .mat')
cd (PathName)

quant_fichiers=evstr(x_dialog("Combien des fichiers vous voulez utiliser?",""));

// Boucle pour lire tous les fichier .mat
for i=1:quant_fichiers
// Sélection de fichier .mat contenant les données de l'essai //
[FileName,PathName]=uigetfile(['*.mat'], 'PathName', "Sélectionner le fichier .mat de l'essai");
loadmatfile(FileName,'donnees_essai');

colonne=size(donnees_essai,1); // Mesure de la quantité maximale de points enregistrés dans l'essai
temps(1:colonne,i)=donnees_essai(:,1); // s
deplac(1:colonne,i)=donnees_essai(:,2); // mm
force(1:colonne,i)=donnees_essai(:,3); // kN
for_cemax(i)=max(donnees_essai(:,3))
// Calcul du facteur d'intensité de contrainte critique (ténacité) en mode I (ouverture) :
Kic(i)=max(force(:,i))*faw/(t/10*sqrt(w/10)); // Mpa/m^1/2
// Calcul du taux de restitution d'énergie critique :
Gic(i)=Ci*Kic(i)^2; // kJ/m^2

n0(i)= 'Essai '+string(i);
execstr(part(FileName,1:length(FileName)-4)+"=donnees_essai") // Pour exécuter chaque fichiers

end

// On met "%nan" pour pouvoir faire une graphique de comparaison des toutes les essais
deplac(temps==0 & force==0)=%nan; // mm
force(temps==0 & deplac==0)=%nan; // kN

// Pour faire le graphique
scf(1)
gcf().figure_size = [900 850]
plot(deplac,force,'LineWidth',2)
titre=['Force en fonction du déplacement']
xtitle(titre)
graf=gca ();
graf.labels_font_size = 5.5
graf.thickness = 1.7
graf.title.font_size = 6.5
graf.data_bounds = [0,0;max(deplac),max(force)]
graf.x_location = "origin";
graf.title.auto_rotation = "off"
xlabel('Déplacement (mm)','fontsize',6)
ylabel('Force (kN)','fontsize',6)
legend(n0,1)

// Pour faire le table
disp('Compact Tension - Ténacité et le taux de restitution d`énergie critique')
mprintf("\n\t\t Kic\t\t Gic\n");
mprintf("\t\t(Mpa.m^1/2)\t (kJ/m^2)\n");
mprintf("%s \t %.2f \t %.2f\n", n0, Kic, Gic);
mprintf("\n%s \t %.2f \t %.2f\n", 'Moyenne', mean(Kic), mean(Gic));
mprintf("%s \t %.2f \t %.2f\n", 'Ecart type', sqrt(stddev(Kic)), sqrt(stddev(Gic)));
```