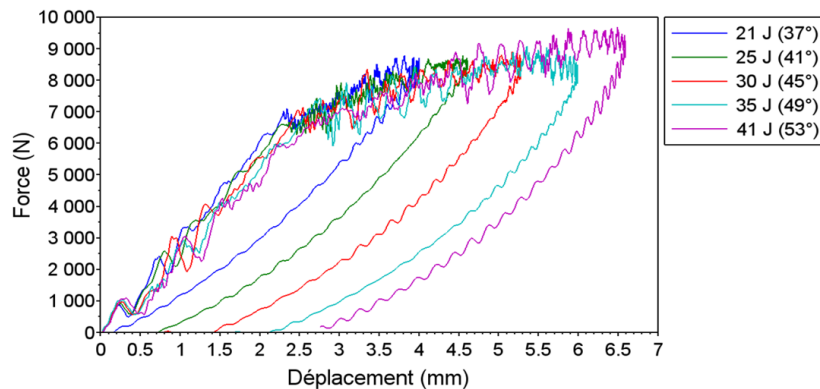
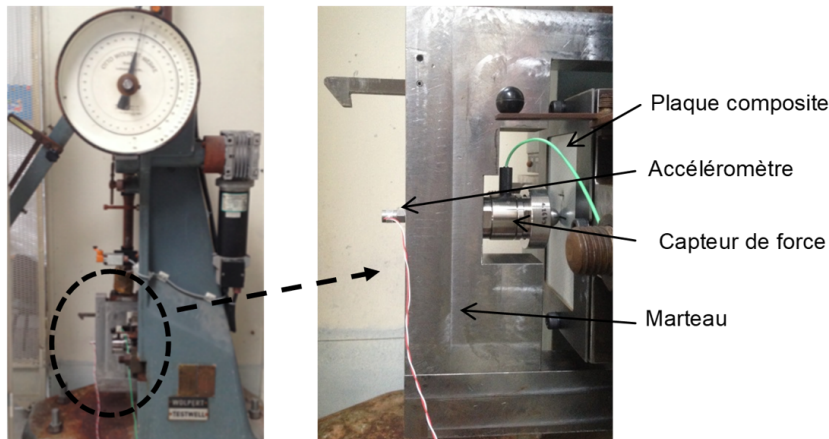


Projet de Physique P6
STPI2/P6/2020

Tolérance à l'impact des matériaux composites stratifiés tissés à matrice thermoplastique



Etudiants :

ANTUNEZ Louis FALIGOT DE LA BOUVRIE Victor

BEGON Nicolas FAURE-VINCENT Julie

DIEZ Marie MARTIN Nathan

Enseignant-responsable du projet :

Juan Daniel PUJOLS GONZALEZ

Cette page est laissée intentionnellement vierge.

Date de remise du rapport : **15/06/2020**

Référence du projet : **STPI/P6/2020 – 031**

Intitulé du projet : Tolérance à l'impact des matériaux composites stratifiés tissés à matrice thermoplastique

Type de projet : bibliographique et expérimental

Objectifs du projet (10 lignes maxi) :

- Réaliser une campagne d'essais sur différents composites stratifiés au moyen d'un mouton de Charpy
- Quantifier la tolérance aux dommages à partir des observations des faciès de rupture par microscope optique et des mesures énergétiques.
- Évaluer l'influence du drapage et de l'épaisseur sur la tolérance à l'impact des composites stratifiés.

Mots-clefs du projet (4 maxi) : Matériau composite, stratifié tissé, tolérance à l'impact, mouton de Charpy

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

TABLE DES MATIÈRES

1. Méthodologie et organisation du travail	5
2. Introduction	5
3. Contexte d'étude	6
1. Les matériaux composites	6
1. Qu'est-ce qu'un matériau composite ?	6
2. Les différents types de matériaux composites	6
1. Suivant la forme des renforts	6
1. Les différentes fibres	7
2. Les fibres longues	7
3. Les fibres courtes	7
4. Les particules	7
2. Suivant la nature de la matrice	7
1. Les composites à matrice organique (CMO)	7
1. Matrice Thermodurcissable	8
2. Matrice Thermoplastique	8
2. Les composites à matrice céramique (CMC)	8
3. Les composites à matrice métallique (CMM)	8
3. Cas particulier : les matériaux composites stratifiés	8
1. Les matériaux composites stratifiés tissés	8
4. Les différents niveaux d'analyse	9
5. Mécanismes d'endommagement dans les matériaux composites	10
1. Ruptures	11
2. Décohésion fibre-matrice	11
3. Délaminage	11
2. Essai d'impact faible vitesse sur des plaques composites	11
1. Essai d'impact faible vitesse par masse tombante	11
1. Pourquoi fait-on l'impact sur des plaques composites ?	11
2. Les appareils utilisés pour réaliser l'essai d'impact faible vitesse	12

3. Différents types d'endommagement observés après l'impact	12
2. Essai d'impact pour quantifier la tolérance aux dommages des structures composites aéronautiques	13
1. Indentation permanente	13
2. Compression après impact ou CAI	14
3. Tenue résiduelle en fonction de l'indentation permanente pour quantifier la tolérance aux dommages	14
4. Partie expérimentale	14
1. Mise en place de l'essai d'impact	14
2. Éprouvettes utilisées pour faire les essais d'impact	15
3. Stratifiés testés	15
4. Formulation appliquée	16
1. Calcul de la vitesse initiale pendant l'impact de la plaque	16
2. Calcul de l'énergie d'impact initiale	16
3. Calcul du déplacement pendant l'impact de la plaque	17
4. Calcul de l'énergie dissipée pendant l'impact de la plaque	17
5. Acquisition et traitement des données	17
6. Exploitation des essais expérimentaux	18
1. Courbe : force - déplacement et énergie dissipée - temps	18
2. Répétabilité des essais d'impact	19
3. Différents niveau d'énergie (voir annexe)	19
5. Conclusions et perspectives	21
6. Bibliographie	22
7. Annexes	23

1. Méthodologie et organisation du travail

Pour réaliser ce projet, notre encadrant nous envoyait régulièrement des documents, des pistes à étudier et des données à analyser. Ensuite nous nous répartissons le travail avant de l'envoyer. Suivant le retour de notre encadrant, nous modifions notre travail ou nous continuons la rédaction du rapport.

Pendant cette période de télétravail, les échanges se sont fait majoritairement par mails entre les étudiants et l'encadrant. Pour répondre à des questions plus complexes, comme la résolution d'erreurs de l'exécution de scripts scilab par exemple, nous avons eu 2 réunions Zoom.

Entre les étudiants nous avons majoritairement communiqué via les réseaux sociaux (groupe messenger) mais aussi via l'application discord (pour les discussions vocales). Enfin pour nous partager les documents et permettre un avancement simultané sur le rapport, nous avons utilisé un google drive.

2. Introduction

Dans le cadre de notre deuxième année d'étude à l'Insa, et plus précisément de l'EC P6, nous avons décidé de mener un projet bibliographique et expérimental avec pour thème la "Tolérance à l'impact des matériaux composites stratifiés tissés à matrice thermoplastique".

La généralisation des composites à matrice organique dans de nombreux secteurs industriels s'est confrontée à la compréhension et à la quantification des mécanismes de rupture au sein de matériaux. En outre, dans le domaine aéronautique, ils peuvent être soumis à différents chargements mécaniques. L'impact faible vitesse (caractéristique de la chute d'un outil lors d'une phase de maintenance par exemple) est une des sollicitations les plus critiques pour les composites stratifiés, car il induit généralement un délaminage (décollement des plis) qui affecte leur résistance résiduelle et donc leur durabilité.

Le but de ce projet est tout d'abord de faire un étude bibliographie sur les matériaux composites, et plus généralement un étude bibliographique sur les différentes appareils et grandeur qui aident à comprendre la tolérance des matériaux composites quand ils sont soumis a un impact de faible vitesse.

Dans la deuxième partie, des essais d'impact à faible vitesse réalisées en laboratoire, permettront d'analyser le comportement et la tolérance à l'impact d'un matériau composite stratifié à plis tissés, une série de capteur relèvera les données d'impact du pendule à mouton de Charpy sur le matériau testé, et une analyse des données nous permettra, à travers plusieurs essais d'évaluer les propriétés de ce matériau

3. Contexte d'étude

3.1. Les matériaux composites

3.1.1. Qu'est-ce qu'un matériau composite ?

Les matériaux "composites" se distinguent des matériaux macroscopiquement homogènes. Un matériau composite est un matériau composé de deux matériaux de différentes natures : un matériau résistant (renfort) et un matériau liant de résistance beaucoup plus faible (matrice). Cet arrangement permet de créer un nouveau matériaux ayant des performances supérieures aux deux matériaux initiaux seuls.

Exemples de matériaux composites :

- Les arcs mongols (composés de cornes, bois, soies et tendons de boeuf)
- Le béton (constitué de ciment, sable et granulats)
- Les pneumatiques (caoutchouc, toile et acier)

3.1.2. Les différents types de matériaux composites

Il existe plusieurs types de matériaux composites dont la classification peut se faire suivant la forme des renforts ou suivant la nature de la matrice.

3.1.2.1. Suivant la forme des renforts

On distingue 2 catégories de composites : Les composites à particules et les composites à fibres (Figure 1).

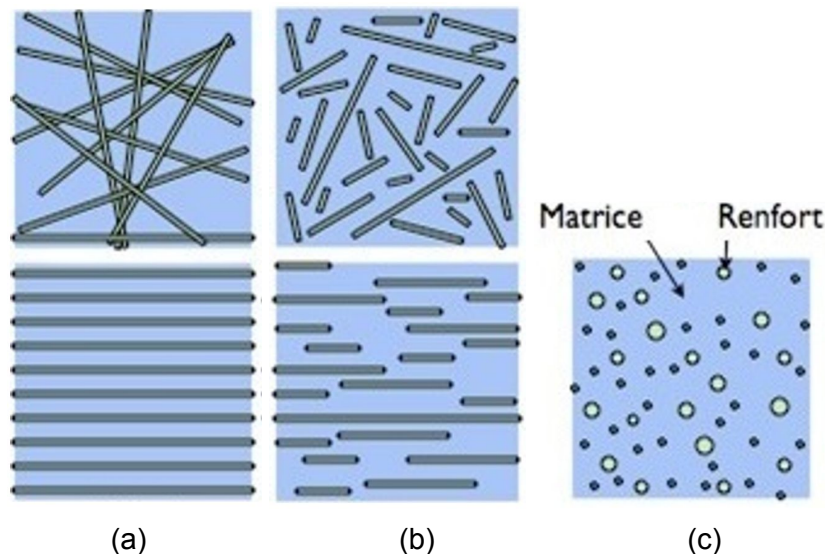


Figure 1 : Différents types de fibres dans les matériaux composites : (a) fibres longues, (b) fibres courtes, (c) particules.

Les composites à fibres peuvent utiliser soit des fibres longues (continues) soit des fibres courtes (discontinues). L'organisation des fibres au sein de la matrice module les propriétés mécaniques du matériau (notamment l'isotropie/anisotropie).

3.1.2.1.1. Les différentes fibres

Les fibres de verre, les fibres de carbone, les fibres aramides, les fibres céramiques et les fibres synthétiques thermostables sont les principales types de fibres que l'on peut retrouver dans les matériaux composites (mais il y en existe aussi d'autres).

Dans notre cas, nous avons étudié la fibre de carbone pour les 14 plis à coeur et la fibre de verre pour les 2 plis extérieurs.

3.1.2.1.2. Les fibres longues

Les fibres longues sont des fibres qui sont coupées au moment de la fabrication et utilisées telles quelles. Se sont alors des fibres continues. Par exemple, la fibre de carbone est composée de graphite, où les atomes de carbone ont de faibles liaisons entre eux, ce qui permet ainsi au graphite d'avoir des propriétés de conduction thermique et électrique très intéressantes. Les fibres de carbone possèdent de plus de très bonnes caractéristiques mécaniques.

3.1.2.1.3. Les fibres courtes

Les fibres courtes font seulement quelques centimètres, voire quelques millimètres, parmi les fibres longues. On les nomme alors fibres discontinues.

3.1.2.1.4. Les particules

On parle de composites à particules lorsque le renfort du composite est fait de particules et non pas de fibres, les particules ne possèdent pas de dimension privilégiée. On remplace les fibres par des particules de manière à améliorer certaines propriétés (rigidité, tenue à la température...). On fait ce choix suivant les propriétés que l'on veut obtenir sur notre matériau (comme pour le type de fibre).

3.1.2.2. Suivant la nature de la matrice

Les différents types de composite selon la nature de la matrice sont les matériaux à matrice métallique, ceux à matrice organique et ceux à matrice céramique.

3.1.2.2.1. Les composites à matrice organique (CMO)

Il existe dans les composites à Matrice Organique, les matrices Thermodurcissable et les matrices Thermoplastiques. Les deux sont des matrices à base de polymère.

3.1.2.2.1.1. Matrice Thermodurcissable

Les matrices thermodurcissables ont des meilleures résistances aux contraintes, cependant une fois mis en forme le plastique ne peut plus être remodelé, ce qui en fait un plastique difficilement recyclable, les résines époxy en sont un bon exemple.

3.1.2.2.1.2. Matrice Thermoplastique

Les matrices thermoplastiques quant à elles, une fois mise en forme peuvent être réchauffées et être remodelées dans le but d'une autre utilisation. Cependant ces matrices ont une résistance plus faible aux contraintes que les matrices thermodurcissables. Le VC est un matériau à matrice thermoplastique.

3.1.2.2. Les composites à matrice céramique (CMC)

Les composites à matrice céramique sont des composites résistants aux très hautes températures, pouvant être utilisés dans des lieux sous contraintes mécanique. Ceux-ci sont composés de matériaux céramiques, étant durs mais fragiles. Les matériaux céramiques sont alors renforcés par des fibres, et d'autres composants supplémentaire pour les rendre moins fragiles. Les composites céramiques sont utilisés dans des cas où le matériau doit garder ses propriétés mécaniques quelque soit les changements du milieu.

3.1.2.3. Les composites à matrice métallique (CMM)

Les composites à matrice métallique ont des propriétés espérées supérieures aux alliages métalliques. Ce sont des composites toujours en développement. Ces matériaux sont plus résistants aux efforts, mais sont, par contre, moins ductiles. Ils présentent de nombreux avantages par rapports aux composites à matrice organique. En effet, leur température de fusion est plus haute et ils présentent une meilleur résistance à toutes sortes de contraintes. Les composites à matrice métallique sont majoritairement composés de renfort céramique, coûtant moins cher qu'un renfort métallique. Cependant leur fabrication est plus coûteuse, et plus complexe.

3.1.3. Cas particulier : les matériaux composites stratifiés

Les matériaux composites stratifiés sont composés de plusieurs couches de renforts (qui peuvent être composées de fibres ou de particules) imprégnées de résines..

3.1.3.1. Les matériaux composites stratifiés tissés

On peut retrouver les stratifiés à base de fils ou de tissus unidirectionnels (Figure 2), les directions des fils ou tissus sont décalées dans chaque couche (voir Figure 3), de plus suivant la direction choisie, le matériau pourra résister à différentes contraintes. On peut retrouver parmi ces stratifiés des symétriques (son plan moyen est le plan de symétrie) ou des hybrides (les couches sont de natures différentes).

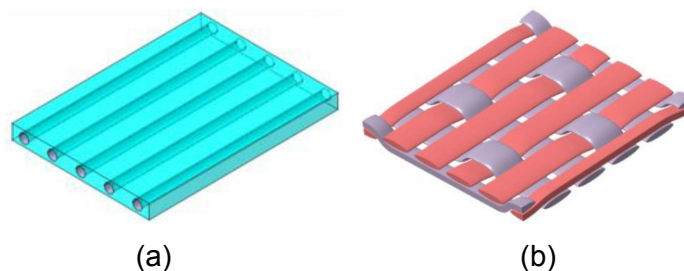


Figure 2 : Différents types de plis élémentaires : (a) pli unidirectionnel, (b) plis tissé

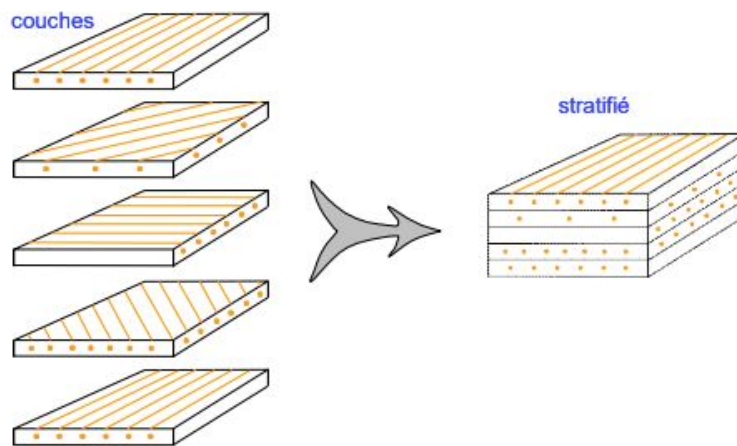


Figure 3 : Constitution d'un stratifié [2]

La nature et l'ordre des couches sont choisies en fonction de l'utilisation du composite et des contraintes auxquelles il sera soumis. Avec un stratifié hybride on pourra alors mieux s'adapter à différentes situations et être plus performant.

3.1.4. Les différents niveaux d'analyse

L'étude des matériaux composite peut se faire à différents niveaux. Du plus petit au plus grand, on trouve ainsi: le niveau microscopique, le niveau mésoscopique (pli élémentaire, par exemple pli unidirectionnel ou tissé (Figure 2)), le niveau macroscopique (stratification) et le niveau structural (allant des pièces génériques à la structure complète).

Une bonne compréhension et caractérisation des mécanismes de rupture au sein des matériaux composites permet de passer à une étude plus complexe. Dans le niveau structural on commence par étudier les applications des matériaux composites dans le domaine industriel. Par exemple dans le domaine aéronautique dans lequel l'utilisation des matériaux composites a été intensifiée au cours des dernières décennies, puisque près de 50% des matériaux qui constituent les avions sont composites (Figure 4).

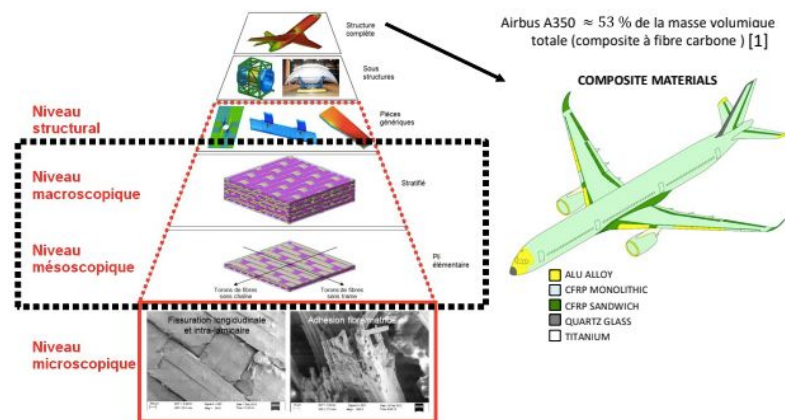


Figure 4 : Différents niveaux d'analyse des matériaux composites

3.1.5. Mécanismes d'endommagement dans les matériaux composites

Il faut comprendre par là tous les processus mécaniques pouvant produire au sein d'un matériau une fissure. La rupture d'un matériau et la création de fissures ont pour origine

l'apparition de microfissures, observables à l'échelle microscopique, provenant de défauts dans le matériau.

Dans le cas des matériaux composites, l'endommagement dépend surtout des fibres utilisées car ce sont elles qui supportent les efforts mécaniques. Mais les performances à la rupture et à l'endommagement d'un matériau composite peuvent être limitées par une possibilité de déformation trop faible de la matrice. Il est donc nécessaire d'adapter les propriétés de la matrice et des fibres pour optimiser la résistance à l'endommagement du matériau en fonction de son domaine d'application.

Il existe plusieurs mécanismes d'endommagement des matériaux composites qui dépendent tous des propriétés des fibres et de la matrice (Figure 5). La rupture d'un matériau composite est la conséquence d'une accumulation de plusieurs de ces mécanismes élémentaires.

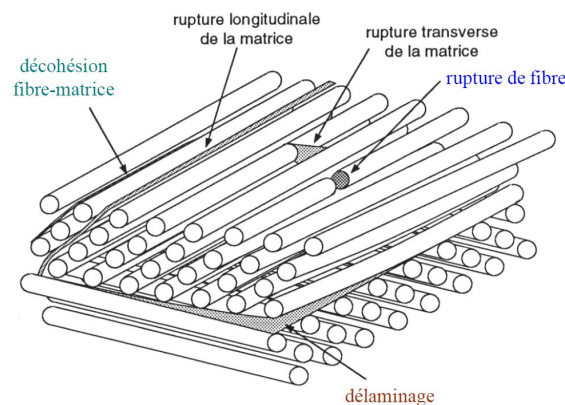


Figure 5 : Mécanismes de rupture observés dans les stratifiés [2]

3.1.5.1. Ruptures

Il y a trois types de ruptures observables dans le pli d'un stratifié.

- Rupture de fibre : la rupture des fibres intervient lorsque la contrainte de traction dans une fibre atteint la valeur de la contrainte de rupture.
- Rupture transverse de la matrice : la matrice se fissure perpendiculairement à la contrainte qu'elle reçoit.
- Rupture longitudinale de la matrice : la matrice se fissure parallèlement à la contrainte qu'elle reçoit.

3.1.5.2. Décohésion fibre-matrice

Mécanisme d'endommagement qui dépend des propriétés de cohésion entre les matériaux constituant la matrice et les fibres. Lorsque le matériau composite est soumis à une certaine force (dépendante des propriétés du composite) on observe une séparation des fibres et de la matrice. Ce mode de rupture se produit généralement lorsque la matrice résiste aux ruptures longitudinales.

3.1.5.3. Délaminage

Ce mécanisme d'endommagement est observé chez les composites stratifiés. Il s'agit d'une rupture entre différentes couches du composite stratifié.

3.2. Essai d'impact faible vitesse sur des plaques composites

3.2.1. Essai d'impact faible vitesse par masse tombante

3.2.1.1. Pourquoi fait-on l'impact sur des plaques composites ?

L'utilisation de matériaux composites est intense dans l'industrie, notamment dans l'aéronautique. L'impact faible vitesse est une sollicitation critique pour un composite stratifié car il engendre un délaminage (décollement des plis) réduisant ainsi la résistance et la durabilité du matériau. L'intérêt d'un essai d'impact faible vitesse est donc de connaître l'énergie absorbée par le matériau pour ensuite déterminer le niveau de rupture du matériau et pouvoir le dimensionner.

3.2.1.2. Les appareils utilisés pour réaliser l'essai d'impact faible vitesse

L'essai d'impact faible vitesse par masse tombante est effectué par la chute d'un impacteur hémisphérique sur une plaque composite. L'impact se fait perpendiculairement au plan de la plaque. Dans le cadre de notre projet, ces essais d'impacts seront réalisés par un mouton pendule de Charpy (Figure 6).

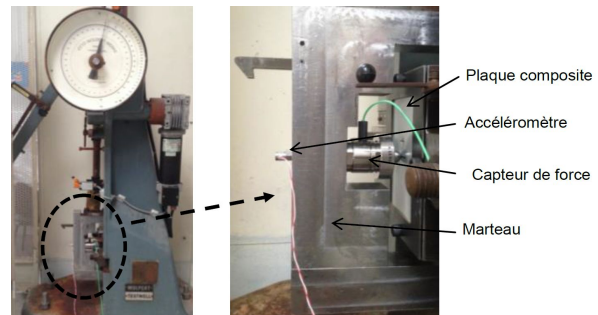


Figure 6 : Mouton pendule de Charpy à l'INSA de Rouen

3.2.1.3. Différents types d'endommagement observés après l'impact

Il existe divers types d'endommagement observés après un impact. Ces endommagements peuvent être superficiels (rayure, entaille, écaillage - Figure 5) mais aussi à l'intérieur du matériau (Délaminage, fissuration de la face arrière et matricielle, rupture de fibres, décohésion fibre-matrice - Figure 6).

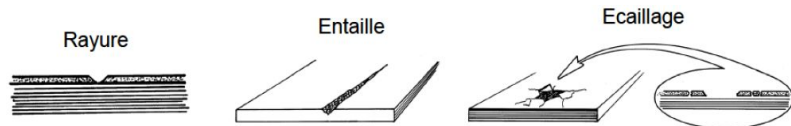


Figure 7 : Endommagements superficiels [Torres, 1986]

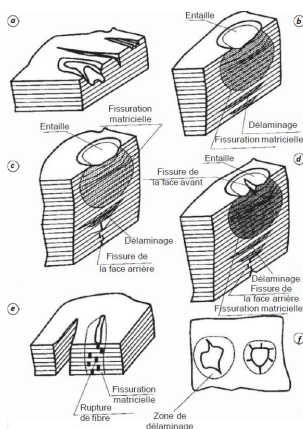


Figure 8 : Différents types d'endommagement d'impact sur les plaques composites [3]

Pour un composite unidirectionnel les endommagements se présentent sous la forme de rupture des fibres, de la matrice et de l'interface fibre-matrice.

Dans le cas des composites stratifiés, les mêmes endommagements sont observés, auxquels s'ajoute le phénomène de délaminage (rupture entre les couches - voir Figure 7).

3.2.2. Essai d'impact pour quantifier la tolérance aux dommages des structures composites aéronautiques

Utilisant des matériaux aux propriétés mécaniques particulières comme le carbone, liés à des matériaux moins fragiles tels que la résine, les matériaux composites attirent de plus en plus les industriels et notamment ceux du secteur aéronautique. La structure complexe des matériaux composites implique une grande importance du dimensionnement de ces constructions notamment en prenant en compte la résistance aux impacts.

3.2.2.1. Indentation permanente

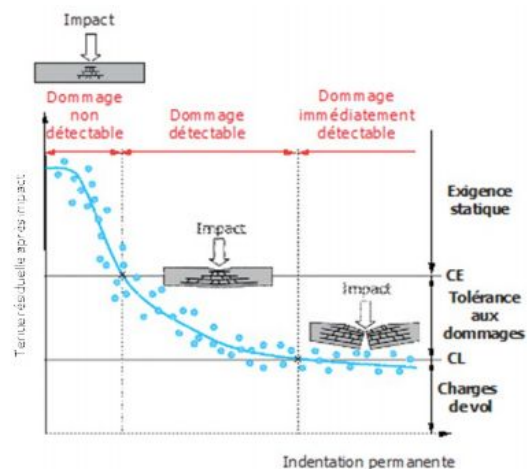
Une indentation est un recul par rapport à une position de départ. Ainsi pour ce qui est de la science des matériaux, l'indentation est la technique mise en oeuvre pour mesurer la dureté d'un matériau. Au cours de leur utilisation ou de leur fabrication, les matériaux composites peuvent subir des impacts qui vont réduire leurs propriétés résiduelles sans pour autant que ces impacts soient visibles sur la structure. Cet endommagement, laissé par l'impact, est nommé indentation permanente. Cette dernière va permettre de définir un seuil minimum de détection de l'endommagement. Tant que l'on ne dépasse pas ce seuil, la structure doit être capable de supporter la charge qu'on lui impose, sans se rompre soudainement, afin de permettre la détection de l'endommagement et sa réparation.

3.2.2.2. Compression après impact ou CAI

L'utilité de construire un modèle de compression après impact est de pouvoir prédire la résistance résiduelle. Ces essais vont servir à caractériser les dommages et peuvent se séparer en deux parties : le pré-endommagement ciblé et l'essai de compression. En effet l'impact va causer plusieurs dommages dans le matériau composite et peut nuire à son unité en décollant les différentes couches stratifiées les unes des autres. Le matériau sera donc moins résistant qu'avant l'impact et aura du mal à résister à la compression. Dans l'aéronautique cette étape va être primordiale pour tester la résistance aux dommages des matériaux.

3.2.2.3. Tenue résiduelle en fonction de l'indentation permanente pour quantifier la tolérance aux dommages

Figure 9 : Tenue résiduelle après impact en fonction de l'indentation permanente [4]



4. Partie expérimentale

4.1. Mise en place de l'essai d'impact

Pour l'essai d'impact nous utilisons la machine présentée sur la figure 6 (1.2.1.2) : le mouton pendule de Charpy que nous possédons à l'INSA Rouen Normandie. Ce mouton pendule de Charpy est adapté, (voir figure 10) voici les données de celui-ci :

- Longueur du bras au centre de l'impact : $l_0 = 0,8$ m
- Longueur du bras à la partie plus basse de l'impacteur : $l = 0,965$ m
- Longueur du bras : $l_1 = 0,59$ m
- Poids corrigé de l'impacteur : $m_{\text{impacteur}} = 10,94$ kg
- Poids corrigé du bras : $m_{\text{bras}} = 5$ kg

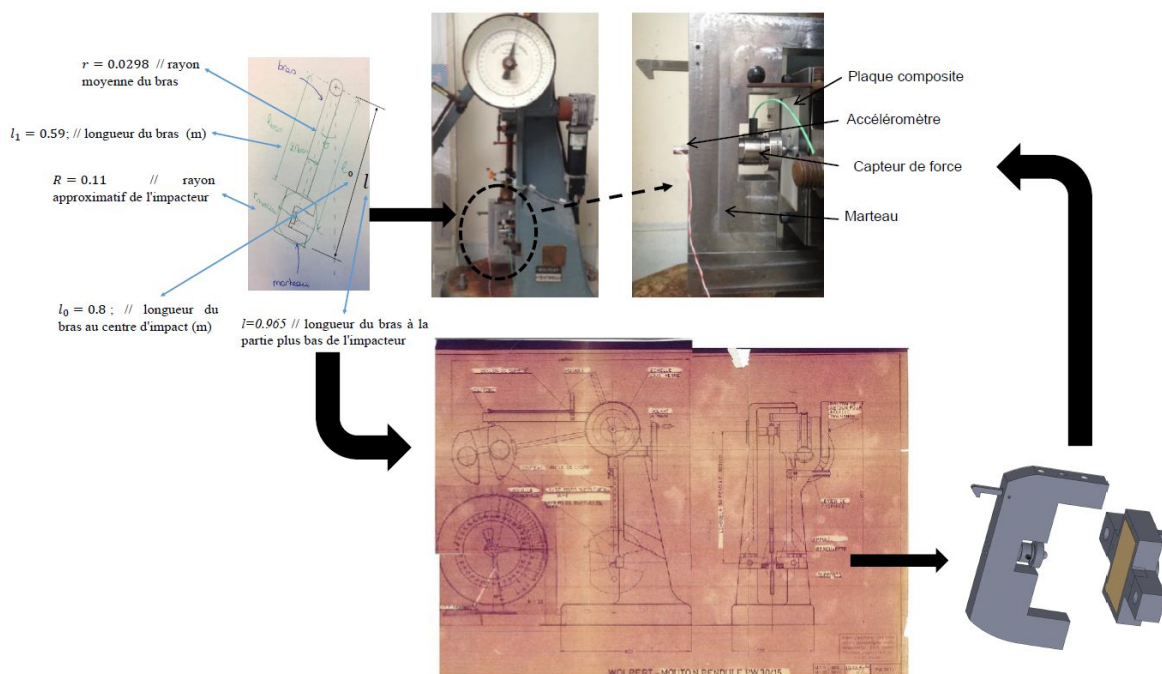


Figure 10 : Pendule de Charpy adapté pour essai d'impact sur des plaques composites

4.2. Éprouvettes utilisées pour faire les essais d'impact

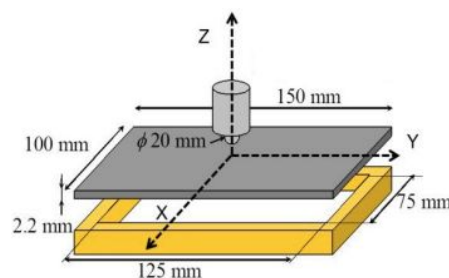


Figure 10 : Dimension des échantillons à tester (Standard AITM 1-0010)

4.3. Stratifiés testés

La plaque stratifiée utilisée dans cette étude est constituée d'une matrice thermoplastique PEEK renforcée par un tissu de fibres de carbone continues (Tenax®-E HTA40 3K), architecturée en motif satin de 5 (Figure 11). L'épaisseur moyenne du pli est 0.31 mm.

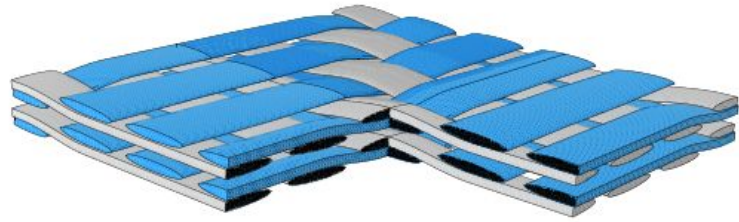


Figure 11 : Schéma de l'architecture en motif satin de 5 [5]

Le stratifié étudié a la même proportion de plis à $0^\circ/90^\circ$ et $\pm 45^\circ$, [(0/90)V,(0/90),(± 45),($0/90$),(± 45),($0/90$),(± 45),($0/90$)]S possédant deux plis externes de tissu de verre (satin de 5) et matrice PEEK (4.5 mm d'épaisseur, noté CV/PEEK), selon la distribution du dragage il est qualifié comme quasi-isotropes.

4.4. Formulation appliquée

4.4.1. Calcul de la vitesse initiale pendant l'impact de la plaque

Dynamique des particules : cinématique

$$a = dv/dt \text{ et } v = dx/dt \text{ donc } dt = dx/v$$

$$\text{Ainsi on obtient } a = v \cdot (dv/dx)$$

$$\text{Donc : } a \cdot dx = v \cdot dv$$

Ce qui donne par intégration entre le lancement et l'impact : $a \cdot (x_2 - x_1) = (\frac{1}{2}) \cdot (v_0^2 - v_1^2)$
où x_1 est la position de lancement de la masse de vitesse initiale v_1 et x_2 la position d'impact de la plaque par la masse à la vitesse v_0 .

Or $x_2 = 0$ car le déplacement est nulle au moment de l'impact

$v_1 = 0$ car la vitesse initiale est nulle au moment de lancer l'impacteur

$$x_1 = h - h_1 = h - h \cos\theta = h(1 - \cos\theta)$$

$$a = -g \quad (\text{constante}) \quad f$$

On a alors : $v_0 = 2gh(1 - \cos\theta)$ (vitesse initiale au moment d'impact sur la plaque)

4.4.2. Calcul de l'énergie d'impact initiale

Dans le cas d'un pendule idéal, la masse est concentrée au niveau de l'impacteur.

Mais ce n'est pas le cas sur notre pendule où la masse du bras ne peut pas être négligée. La formule permettant de calculer l'énergie potentielle est alors :

$$E_p = m \cdot g \cdot h \cdot (1 - \cos\theta) \quad m \text{ correspondant à la masse de l'impacteur.}$$

L'impacteur est le marteau, mais nous devons également ajouter un facteur correctif à sa masse mesurée correspondant à l'influence de la masse du bras.

$$m = (m_{\text{marteau}} - m_{\text{bras}}) / (m_{\text{pendule}} - m_{\text{marteau}}) \text{ Or } m_{\text{pendule}} = m_{\text{marteau}} + m_{\text{bras}}$$

$$m = (m_{\text{marteau}} - m_{\text{bras}}) / (m_{\text{marteau}} + m_{\text{bras}} - m_{\text{bras}})$$

Donc $m = (m_{\text{marteau}} - m_{\text{bras}}) / m_{\text{marteau}}$ et $m_{\text{impacteur}} = m_{\text{marteau}} \times m$

4.4.3. Calcul du déplacement pendant l'impact de la plaque

$$F(t) = m * a(t) \rightarrow F(t) = m * (dv(t)/dt)$$

$$\text{Par intégration on a : } v(t) = v_0 - (1/m) * \int_{t_0}^t (F(t) * dt)$$

$$\text{Et } v(t) = ds(t)/dt$$

$$\text{Donc } s(t) = \int_{t_0}^t (v(t) * dt)$$

4.4.4. Calcul de l'énergie dissipée pendant l'impact de la plaque

Soit E l'énergie dissipée :

$$dE = F * ds$$

$$E(s) = \int_{s_0}^s F * ds$$

or $v = ds/dt \rightarrow ds = v * dt$

$$\text{Donc } E(t) = \int_{t_0}^t F * v * dt$$

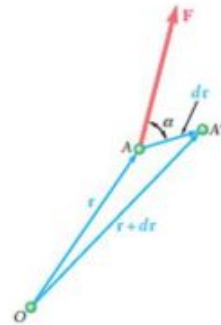


Figure 11 : Variation du vecteur position en fonction du temps

On peut faire ces deux intégrales numériques par la méthode des trapézoïdales.

4.5. Acquisition et traitement des données

- Deux capteurs sont utilisés pour enregistrer les données d'impact : un capteur de force et un accéléromètre.
- L'acquisition des données se fait grâce au boîtier Kistler.



Figure 12 : Configuration du logiciel du boîtier Kistler

4.6. Exploitation des essais expérimentaux

4.6.1. Courbe : force - déplacement et énergie dissipée - temps

On utilise le script « Impact_Mouton_Charpy.sce » pour tracer les courbes force-déplacement et énergie-temps des essais d'impact sur le stratifié CV/PEEK.

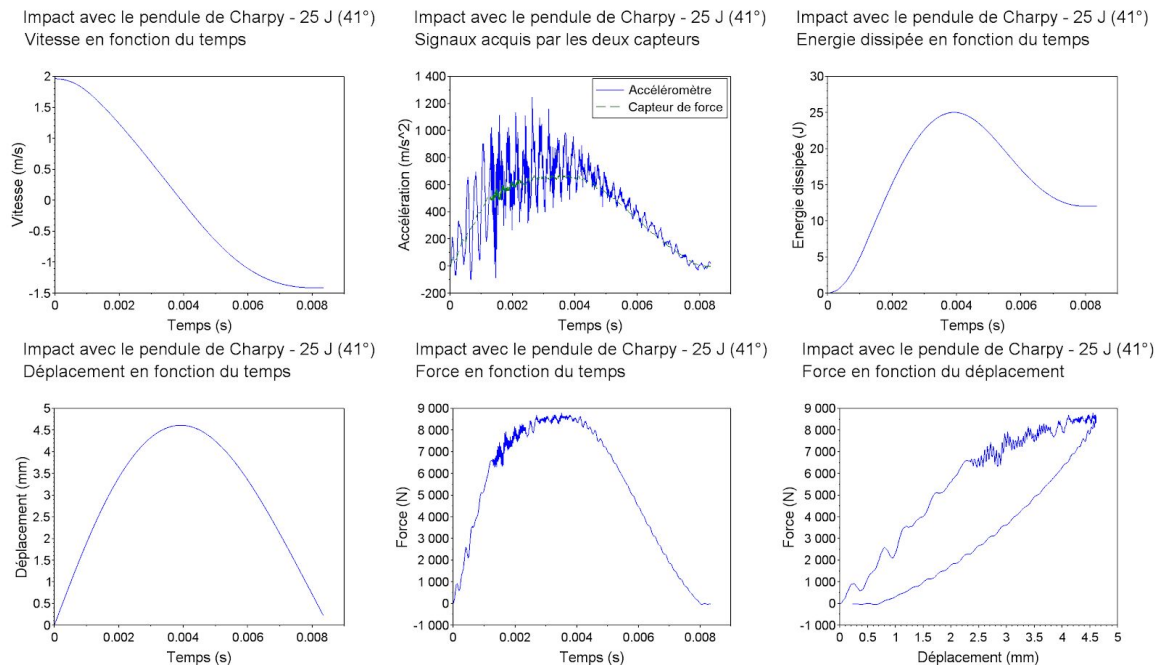


Figure 13 - Essai d'impact sur le mouton de Charpy a une niveau d'énergie de 25 J

Observation sommaire des résultats d'impact à faible vitesse sur le mouton de Charpy pour niveau d'énergie de 25 J

Plusieurs graphiques (Figure 13) :

-Vitesse en fonction du temps

Au début l'impacteur touche la plaque à une vitesse maximale, laquelle est donnée pour l'énergie potentielle qui dépend de l'hauteur. Pendant la pénétration de l'impacteur dans la plaque, la vitesse commence à diminuer jusqu'à arriver à zéro, comme l'impacteur n'ai pas l'énergie suffisant pour continuer à endommager la plaque, il commence à dissiper l'énergie restant en repartant au point initial avec un vitesse négative.

On voit que la vitesse chute très rapidement après impact, elle est proche de 0 à environ 0.0045 secondes après l'impact, elle chute avec une tendance linéaire. Après 0.004 secondes le pendule repart dans l'autre sens et atteint une vitesse de -1.3 m/s à 0.008 secondes.

-Accélération et force en fonction du temps

On peut constater que la signal donné par l'accéléromètre a beaucoup de bruit, mais la même réponse est obtenu avec les deux capteurs (capteur de force et accéléromètre), ca valide l'utilisation du capteur de force qui donne une mesure plus lissée.

La force déployée par le pendule de Charpy, à la forme d'une parabole, croissante puis décroissante, elle atteint 9000 N à $t= 0.0035$ s, on peut observer que la tendance de la variable accélération suit la courbe de force en fonction du temps.

-Energie dissipée en fonction du temps

L'énergie absorbée croît jusqu'à atteindre 25 J à $t=0.0045$ puis décroît jusqu'à 12 J à $t= 0.008$ s, puis tend à se stabiliser. L'énergie absorbée par la plaque se traduit dans un indentation permanente qui provoque différents mécanisme d'endommagement au sein de la zone d'impact. L'énergie dissipée est associé à la déformation élastique et aux contraintes internes qui sont libérées tout suit à l'impact.

-Déplacement en fonction du temps

Forme d'une parabole de maximum 6 mm à $t=0.0045$ et partant de 0 à $t=0$. Le déplacement maximale indique quand la plaque arrive à absorber tout l'énergie potentielle initiale et le retour à zéro indique que l'impacteur a laisser de touche la plaque.

-Force en fonction du déplacement

Ce graphique suit une courbe à dérivée négative, elle part de 0 N à $s=0$ puis arrive à 9000 N à $s=6$, ensuite le déplacement et la force diminue jusqu'à atteindre 0.

Ce graphique donne plusieurs information qui nous permettent de mieux comprendre le comportement à l'impact du matériau composite stratifiés à plis tissé dans ce projet. La courbe force-déplacement montre un comportement lissée, lequel on peut le décrit comme le domaine élastique où le matériau n'est pas endommagé. Après on peut distinguer que la courbe force-déplacement commence a avoir beaucoup de pics, lesquels indiquent le début de l'endommagement traduit par rupture de fibre, délaminage et fissuration matricielle en même temps.

4.6.2. Répétabilité des essais d'impact

On peut tout d'abord noter qu'une différence d'énergie de départ n'induit pas de plus grandes différences entre l'essai 1 et 2 (Figure 14). Ensuite on remarque que pour différents niveaux d'énergie de départ, les différentes courbes (essai 1 et 2) ont des valeurs légèrement supérieures ou inférieures, il semble raisonnable de faire l'hypothèse que ces variations sont dues aux incertitudes de mesures, et au fait que les plaques testées ne sont parfaitement identiques. Pour un même niveau d'énergie les courbes d'essai 1 et deux se superposent. On en conclut que l'état du matériau n'est pas du tout ou alors très peu impacté par la répétabilité des impacts.

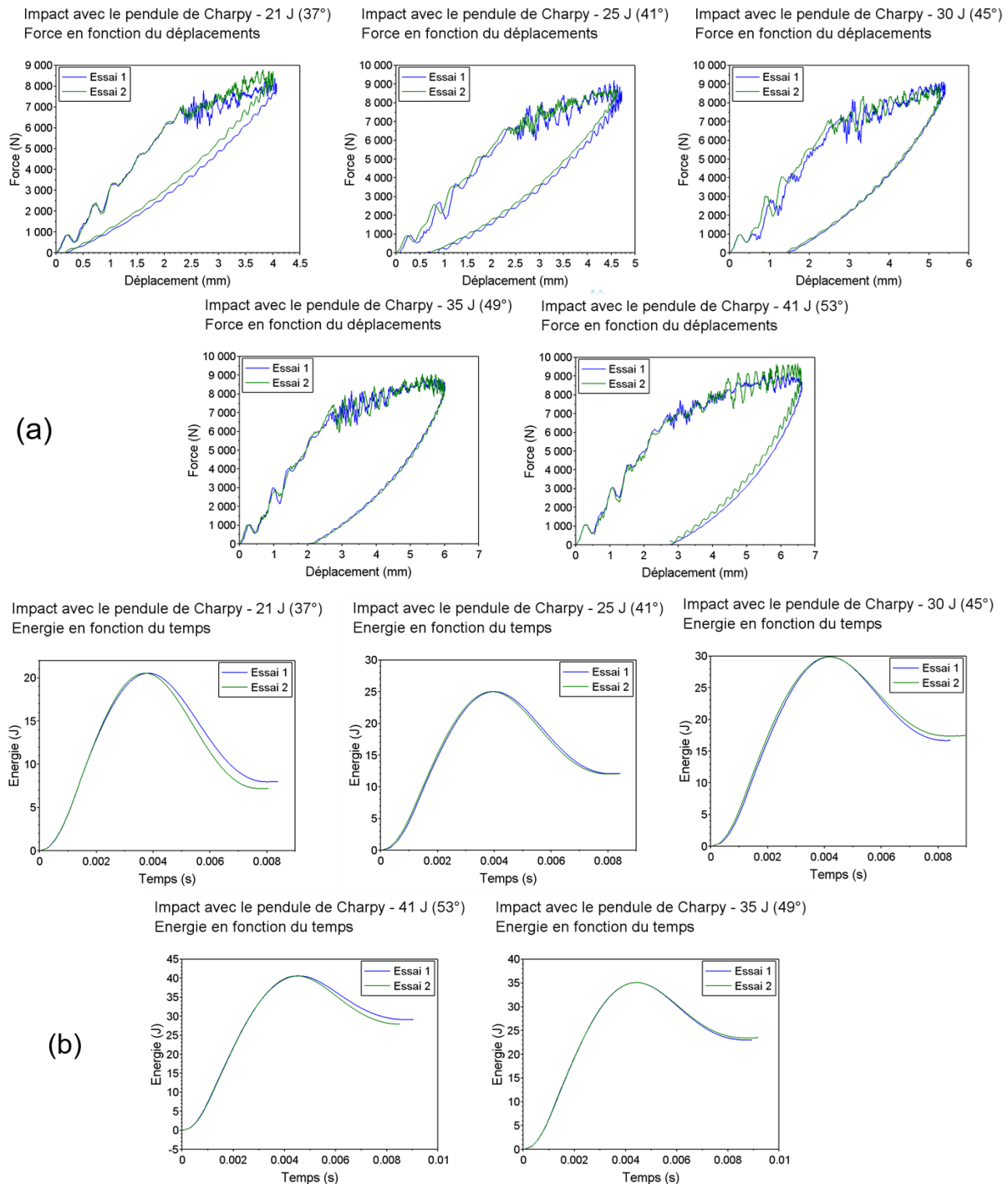


Figure 14 : Répétabilité des essais d'impact pour les différents niveaux d'énergie : (a) Courbe force-déplacement - (b) Courbe énergie-temps

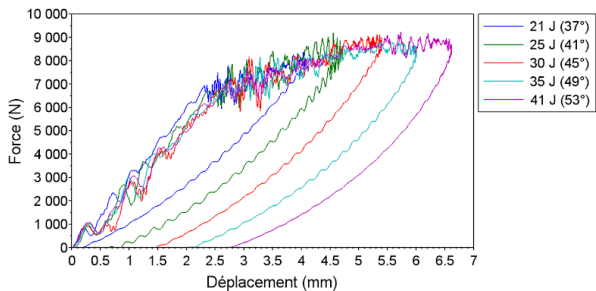
4.6.3. Différents niveaux d'énergie

Nous réalisons maintenant le même test avec plusieurs pièces identiques, en faisant varier le niveau d'énergie et donc l'angle d'inclinaison (Figure 15).

Pour le déplacement en fonction du temps, les courbes sont toutes des paraboles avec pour origine 0, et une augmentation du niveau d'énergie induit une plus grande amplitude et un maximum plus élevé. Il en est de même pour la force en fonction du temps.

Pour le graphique de la force en fonction du déplacement plus la force est grande, plus le déplacement est élevée. Et le retour à $F=0\text{N}$ se fait pour un déplacement plus fort.

Impact avec le pendule de Charpy - différents niveaux d'énergie
Force en fonction du déplacement



Impact avec le pendule de Charpy - différents niveaux d'énergie
Energie en fonction du temps

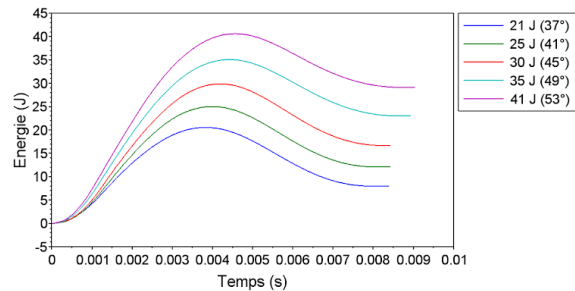


Figure 15 : Comparaison des essais d'impact avec des différents niveaux d'énergie

Comparaison selon les différents degrés d'inclinaison

Lorsque l'inclinaison de départ diminue (le pendule part de plus bas), la vitesse de l'impact diminue. On observe de même que le maximum de déplacement diminue, ainsi que la force maximum. Cependant le pendule revient plus vite en position angle = 0° .

Sinon la forme des courbes ne varie pas selon l'angle de départ.

Résultat puis observation du tableau d'impact

On a ensuite réalisé différents essais, avec différents degrés d'inclinaisons, et donc différents niveaux d'énergie, et avons regroupé ces résultats dans la Tableau 1 et dans la Tableau 2 (à voir en annexe), nous obtenons alors 4 graphiques.

	Référence	Energie (J)	Effort max (kN)	Déplacement max (mm)	Energie dissipée (J)	Energie dissipée normalisée (% de l'énergie d'impact)	Vitesse d'impact (m/s)	Indent permanent (mm)
Mouton de Charpy sans cadre	37°-20J	20,53	8,60	4,07	7,6	36,9%	1,76	
	41°-25J	25	8,90	4,66	12,1	48,2%	1,96	
	45°-30J	29,9	9,00	5,35	17,1	57,0%	2,14	
	49°-35J	35	8,82	6,00	23,2	66,3%	2,32	
	53°-40J	40,96	9,44	6,60	28,5	71,2%	2,5	

Tableau 1 : Comparaison des impacts

Observations

Force maximale en fonction de l'énergie d'impact

On obtient pour courbe, une droite d'équation $ax+b$ avec un a positif. Donc plus l'énergie d'impact est grande et plus l'effort maximal est grand.

Déplacement maximal en fonction de l'énergie d'impact

On obtient ici encore pour courbe, une droite d'équation $ax+b$ avec un a positif. Donc le déplacement est plus grand quand l'énergie d'impact augmente.

Energie dissipée en fonction de l'énergie d'impact

On remarque que plus l'énergie d'impact augmente, plus l'énergie dissipée normalisée est grande (36,9% à 20J et 71,2% à 40J). On peut donc dire que plus l'énergie d'impact est grande et plus le matériau dissipe une grande part de l'énergie, c'est-à-dire qu'il s'endommage plus.

5. Conclusion et perspectives

Lors de ce projet nous avons pu en apprendre beaucoup plus sur les matériaux composites, des matériaux très utilisés que nous aurons sûrement à utiliser/étudier durant notre futur métier d'ingénieur. Les essais, à l'aide du mouton pendule de charpy, nous ont montré que la répétabilité des impacts est très bien respectée, puisque nous arrivons presque à obtenir la même réponse mécanique (courbe force-déplacement) pour tous les essais du même niveau d'énergie. Cela nous a permis de faire une étude performante sur l'influence des différents niveaux d'énergie sur le mécanisme d'endommagement et la tolérance à l'impact du matériau. Dès lors, il est intéressant d'utiliser des matériaux composites stratifiés tissés à matrice thermoplastique dans des domaines nécessitant de la fiabilité telle que l'aéronautique.

Ce projet nous a appris à travailler en équipe et à communiquer (à distance dans les conditions actuelles) pour mener à terme notre étude. Nous avons aussi appris certaines bases sur le logiciel scilab.

Afin d'aller plus loin, nous aurions pu réaliser les même tests sur des matériaux composites différents (renfort ou matrice) ou alors non stratifiés tissés. Des tests d'étirement, de torsion ou de flexion nous donneraient plus d'informations sur la tolérance de ce matériau.

L'observation des fibres au microscope après un impact nous aurait permis de voir plus en détails les conséquences d'un impact sur le matériau.

6. Bibliographie

- [1] Airbus, S. A. S. (2005). Aircraft characteristics airport and maintenance planning.
- [2] Berthelot, J. M. (2010). Mécanique des matériaux et structures composites. Institut Supérieur des Matériaux et Mécaniques Avancés.
- [3] Zagainov, G. I., & Lozino-Lozinski, G. E. (Eds.). (1996). Composite Materials in Aerospace Design (Vol. 6). Springer Science & Business Media.
- [4] Bouvet, C. (2016). Tolérance aux dommages d'impact des structures composites aéronautiques.
- [5] Pujols González, J. D., Vieille, B., & Bouvet, C. (2020). High temperature translaminal fracture in tension and in compression of woven-ply thermoplastic laminates. Under review.
- [6] Daniel Gay, "Matériaux composites", *Lavoisier*, 2005 (5^e édition).
- [7] Jean-Marie Berthelot, "Matériaux composites, comportement mécanique et analyse des structures", *Lavoisier*, 2012 (5^e édition).
- [8] <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/chimie-thermoplastique-2016/> (valide à la date du 14/05/2020)
- [9] <https://cel.archives-ouvertes.fr/cel-00470296v1/document> (valide à la date du 14/05/2020)
- [10] <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/materiaux-th11/ceramiques-42578210/materiaux-composites-a-matrice-ceramique-et-a-renfort-par-fibres-longues-n4803/> (valide à la date du 14/05/2020)

7. Annexes

Référence de plaque	Angle (°)	Température d'impact	Energie d'impact pré-calculé	Energie d'impact obtenue (J)	Effort max (kN)	Déplacement max (mm)	Energie dissipée (J)	Energie dissipée normalisée (% de l'énergie d'impact)	Vitesse
lm_cvpeek37d_4rt lm_cvpeek37d_5rt	37	TA	21	20,53	8,80	4,07	8,0	38,77 %	1,78
		TA	21	20,53	8,4	4	7,2	34,92 %	1,78
			21	20,53	8,6	4,035	7,565	36,85 %	1,78
lm_cvpeek41d_4rt lm_cvpeek41d_5rt	41	TA	25	25	9,10	4,71	12,1	48,40 %	1,96
		TA	25	25	8,7	4,61	12,0	48,00 %	1,96
			25	25	8,9	4,66	12,05	48,20 %	1,96
lm_cvpeek45d_4rt lm_cvpeek45d_5rt	45	TA	30	29,8	9,10	5,4	16,7	56,04 %	2,14
		TA	30	30	8,9	5,3	17,4	58,00 %	2,14
			30	29,9	9	5,35	17,05	57,02 %	2,14
lm_cvpeek49d_4rt lm_cvpeek49d_5rt	49	TA	35	35	8,77	6,01	23,0	65,71 %	2,32
		TA	35	35	9,07	5,99	23,4	66,86 %	2,32
			35	35	8,92	6	23,2	66,29 %	2,32
lm_cvpeek53d_4rt lm_cvpeek53d_5rt	53	TA	41	40,06	9,23	6,59	29,2	72,79 %	2,5
		TA	41	40,06	9,64	6,61	27,9	69,65 %	2,5
			41	40,06	9,435	6,6	28,53	71,22 %	2,5

Tableau - Récapitulatif des résultats d'impacts

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

//// Ce script a pour but tracer les courbes force-déplacement des essais d'impact sur le pendule de Charpy////

// Variables d'initialisation
l0 = 0.8; // longueur du bras au centre d'impact (m)
l1 = 0.965 // longueur du bras à la partie plus bas de l'impacteur
l2 = 0.59; // longueur du bras (m)
m_impacteur = 10.94; // poids corrigé de l'impacteur (kg) ; 10.94 kg mesure avec la balance
m_bras = 5; // poids corrigé du bras (kg)
m_pend = m_impacteur + m_bras; // poids corrigé du pendule (kg)
m = (m_impacteur * m_bras) / (m_bras); // facteur de correction du poids de l'impacteur
m_impacteur = m_impacteur * m;
teta0_deg = evstr(x_dialog("Spécifiez l'angle initial :", '')) // angle initial (°)
teta0_rad = teta0_deg * pi / 180; // angle initial (rad)
g = 9.80665; // accélération terrestre
R = 0.11 // rayon approximatif de l'impacteur
r = 0.0298 // rayon moyenne du bras
energ_imp = m_impacteur * l0 * g * (1 - cos(teta0_rad)); // énergie appliquée au début de l'impact
v0 = sqrt(2 * g * l0 * (1 - cos(teta0_rad)));
energ_angle = string(round(energ_imp) * 10^3) + string(teta0_deg) + '°';

// Sélection de fichier .mat contenant les données de l'essai //
PathName = uigetdir('', 'Sélectionner le repertoire des fichiers .mat')
cd(PathName)
[FileName, PathName] = uigetfile(['*.mat'], 'PathName', 'Sélectionner le fichier .mat'); // Première colonne temps, deuxième accéléromètre, troisième capteur de force
loadmatfile(FileName, 'donnees_imp') // 1ere colonne temps, 2eme colonne acceleration et 3eme colonne force

temps = donnees_imp(:, 1);
accel = donnees_imp(:, 2); // Accélération est dans le sens negative
force = donnees_imp(:, 3);
accel_impact = force / m_impacteur;

// Pour faire le graphique
scf(1)
gcf().figure_size = [900 900]
plot(temps, force, 'LineWidth', 2)
titre = ['Impact avec le pendule de Charpy - ' + energ_angle; 'Force en fonction du temps;'];
xlabel('Temps (s)');
ylabel('Force (N)');
xtitle(titre);
gcf(gcf());
gcf().figure_size = [900 900]

// Pour faire le graphique
scf(2)
gcf().figure_size = [900 900]
plot(temps, accel, temps, accel_impact, '--', 'LineWidth', 2)
titre = ['Impact avec le pendule de Charpy - ' + energ_angle; 'Signaux acquis par les deux capteurs;'];
xtitle(titre);
gcf(gcf());
gcf().figure_size = [900 900]
gcf().figure_size = 5.5
gcf().thickness = 1.7
gcf().title.font_size = 6.5
xlabel('Temps (s)', 'fontsize', 6)
ylabel('Accélération (m/s^2)', 'fontsize', 6)
legend('Accéléromètre', 'Capteur de force')

// Pour l'integration numérique
[r, c] = size(donnees_imp);
AireFtot = zeros(1);
AireFtot = zeros(1);
AireEnerg = zeros(1);
vitesse = v0;
deplac = 0;
Energ_dis = 0;
Energ_Angle = energ_angle;
Aireatot = zeros(1);

for i = 2:r
// Intégration numérique de F(t)(méthode des trapèzes) - capteur de force
AireFtot(i, 1) = AireFtot(i-1) + (temps(i) - temps(i-1)) * (force(i) + force(i-1)) / 2;
vitesse(i, 1) = v0 - AireFtot(i) / m_impacteur; // vitesse
// Intégration numérique de v(t)(méthode des trapèzes) - capteur de force
Airevtot(i, 1) = Airevtot(i-1) + (temps(i) - temps(i-1)) * (vitesse(i) + vitesse(i-1)) / 2;
deplac(i, 1) = Airevtot(i) * 1000; // deflection en mm
// énergie dissipée lors de l'endommagement en impact
// Intégration numérique de F(t)(méthode des trapèzes)
AireEnerg(i, 1) = AireEnerg(i-1) + (deplac(i) - deplac(i-1)) * (force(i) + force(i-1)) / 2;
Energ_dis(i, 1) = AireEnerg(i) / 1000;
end

deplac_totale = max(deplac);
ener_obt = max(Energ_dis);
Fmax = max(force);
ener_disp_fin = Energ_dis(length(force));
ener_norm = ener_disp_fin * 100 / ener_obt;

// Pour faire le graphique
scf(3)
gcf().figure_size = [900 900]
```

```

gcf().figure_size = [900 900]
plot(temps,vitesse,'LineWidth',2)
titre=['Impact avec le pendule de Charpy - '+energ_angle;'Vitesse en fonction du
temps;']
xtitle(titre)
graf=gca();
graf.labels_font_size = 5.5
graf.thickness = 1.7
graf.title_font_size = 6.5
xlabel('Temps (s)','fontsize',6)
ylabel('Vitesse (m/s)','fontsize',6)

// Pour faire le graphique
scf(4)
gcf().figure_size = [900 900]
plot(temps,deplac,'LineWidth',2)
graf=gca();
graf.labels_font_size = 5.5
graf.thickness = 1.7
graf.title_font_size = 6.5
titre=['Impact avec le pendule de Charpy - '+energ_angle;'Déplacement en fonction
du temps;']
xtitle(titre)
xlabel('Temps (s)','fontsize',6)
ylabel('Déplacement (mm)','fontsize',6)

// Pour faire le graphique
scf(5)
gcf().figure_size = [900 900]
plot(deplac,force,'LineWidth',2)
titre=['Impact avec le pendule de Charpy - '+energ_angle;'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
xlabel('Déplacement (mm)','fontsize',6)
ylabel('Force (N)','fontsize',6)

// Pour faire le graphique
scf(6)
gcf().figure_size = [900 900]
plot(temps,Energ_dis,'LineWidth',2)
titre=['Impact avec le pendule de Charpy - '+energ_angle;'Energie dissipée en
fonction du temps;']
xtitle(titre)
graf=gca();
graf.labels_font_size = 5.5
graf.thickness = 1.7
graf.title_font_size = 6.5
xlabel('Temps (s)','fontsize',6)
ylabel('Energie dissipée (J)','fontsize',6)

Calcul_Imp=[temps accel force accel_impact vitesse deplac Energ_dis];

// Pour faire le graphique
scf(4)
gcf().figure_size = [900 900]
plot(temps,deplac,'LineWidth',2)
graf=gca();
graf.labels_font_size = 5.5
graf.thickness = 1.7
graf.title_font_size = 6.5
titre=['Impact avec le pendule de Charpy - '+energ_angle;'Déplacement en fonction
du temps;']
xtitle(titre)
xlabel('Temps (s)','fontsize',6)
ylabel('Déplacement (mm)','fontsize',6)

// Pour faire le graphique
scf(5)
gcf().figure_size = [900 900]
plot(deplac,force,'LineWidth',2)
titre=['Impact avec le pendule de Charpy - '+energ_angle;'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
xlabel('Déplacement (mm)','fontsize',6)
ylabel('Force (N)','fontsize',6)

// Pour faire le graphique
scf(6)
gcf().figure_size = [900 900]
plot(temps,Energ_dis,'LineWidth',2)
titre=['Impact avec le pendule de Charpy - '+energ_angle;'Energie dissipée en
fonction du temps;']
xtitle(titre)
graf=gca();
graf.labels_font_size = 5.5
graf.thickness = 1.7
graf.title_font_size = 6.5
xlabel('Temps (s)','fontsize',6)
ylabel('Energie dissipée (J)','fontsize',6)

Calcul_Imp=[temps accel force accel_impact vitesse deplac Energ_dis];
savematfile(fileName,'donnees_imp','Calcul_imp','-v7')

Name=part(fileName,1:length(fileName)-4)
//xs2png(1,'Force_'+Name)
//xs2png(2,'Signaux acquis par les deux capteurs_'+Name)
//xs2png(3,'Vitesse_'+Name)
//xs2png(4,'Déplacement_'+Name)
//xs2png(5,'Force en fonction du déplacement_'+Name)
//xs2png(6,'Energie_'+Name)

```

Script pour tracer les courbes des essais d'impact sur le stratifié