

MÉTHODE D'INVESTIGATION DES DOMMAGES POST-IMPACT SUR DES COMPOSITES - TP C

Hermine Malaquin (hermine.malaquin@epfl.ch)

MED 3 1523

1 Introduction et théorie

1.1 Généralités sur les fibres et composites

Les matériaux composites font désormais partie intégrante de l'ingénierie moderne grâce à leur combinaison unique de résistance, de légèreté et de flexibilité dans la conception. Ces matériaux sont largement utilisés dans divers secteurs tels que l'aérospatiale, l'automobile, les équipements sportifs et les énergies renouvelables, où les performances sous des charges dynamiques et statiques sont essentielles. L'un des principaux domaines d'intérêt est la **résistance aux chocs** des composites, en particulier le comportement de ces matériaux lorsqu'ils sont soumis à des charges soudaines, qui peuvent provoquer des dommages visibles et cachés.

L'objectif de ce travail pratique est d'étudier les **dommages post-impact** à l'aide de la machine **Impetus4a** de trois matériaux composites distincts :

- un prepreg à base de **fibres de lin tissé en twill** $[0/90]_6$;
- un composite à base de **fibre de verre tissé en twill 2x2** ;
- un composite à base de **fibre de verre tissé en matte**.

Les matériaux composites sont composés de deux ou plusieurs phases distinctes, généralement des fibres (renfort) intégrées dans une matrice (résine), qui agissent en **synergie** pour offrir des propriétés mécaniques améliorées. Dans le cas étudié, la matrice, un polymère époxy thermodurcissable, lie les fibres entre elles et **répartie les contraintes**. Les fibres, qu'elles soient naturelles comme le lin ou synthétiques comme la fibre de verre, apportent principalement résistance et rigidité.

Au cours de ce TP, nous explorerons deux types de fibres :

1. **Les fibres de lin** : En tant que ressource naturelle et renouvelable, les fibres de lin gagnent en popularité dans les applications composites en raison de leur durabilité et de leur respect de l'environnement. Les fibres de lin possèdent de bonnes propriétés mécaniques, bien que généralement inférieures à celles des fibres synthétiques traditionnelles.
2. **Fibres de verre** : La fibre de verre est une fibre synthétique largement utilisée dans les matériaux composites, offrant d'excellentes propriétés mécaniques à un coût relativement faible. Cependant, la production de fibre de verre vierge est très énergivore mais son recyclage suscite un intérêt croissant notamment pour ses avantages environnementaux et économiques.



Figure 1 – Fibres de Lin et fibres de Verre.

Les tests d'impact désignent l'application soudaine d'une force pendant une courte durée, qui peut induire des mécanismes de dommages complexes dans les matériaux composites. Contrairement aux métaux, où les dommages dus à un impact se traduisent souvent par des bosses ou des fissures visibles, les dommages causés aux composites sont fréquemment internes, les modes de dommages prédominants étant le délaminage (séparation entre les couches), la rupture des fibres et la fissuration de la matrice. Ces dommages internes peuvent réduire considérablement la capacité de charge du matériau, même si ces derniers ne sont pas immédiatement visibles à la surface. Généralement, un traitement de surface dit « **sizing** » des fibres permet d'assurer une bonne cohésion entre la fibre et la résine lors de la mise en œuvre.

Les dommages dus aux chocs dans les composites peuvent être influencés par plusieurs facteurs, notamment :

- **Le type et l'architecture des fibres** (tissées, unidirectionnelles ou aléatoires)

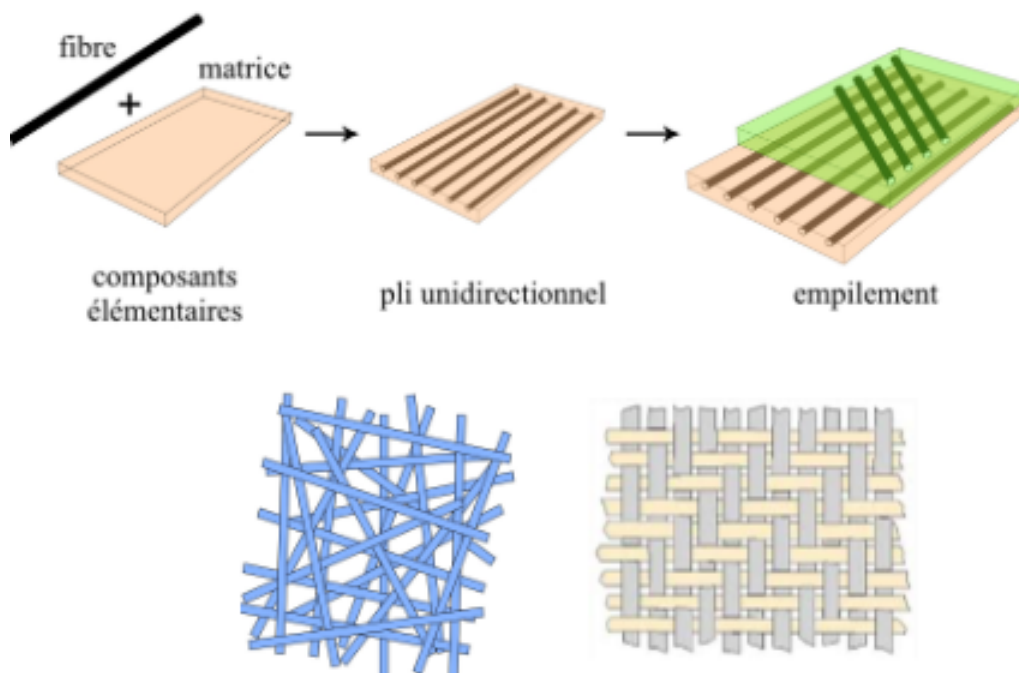


Figure 2 – Tissu unidirectionnel et stratifié schéma - Tissu Matte - Tissu Twill 2x2.

- **Le type de matrice** et ses propriétés mécaniques
- **L'interface fibre-matrice** (adhérence entre les fibres et la matrice)
- **La qualité de fabrication**, notamment la présence de vides ou de zones très riches en résine

1.2 Test d'impact

Afin de simuler des scénarios d'impact réels et d'évaluer la résistance aux dommages des matériaux composites, cette session utilisera la machine d'essai de d'impact Impetus4a. Le test d'impact est une méthode contrôlée qui consiste à appliquer une force à un échantillon composite, simulant ainsi une charge d'impact concentrée. La machine mesure des paramètres tels que :

- **Force maximale** : charge maximale que le matériau peut supporter avant rupture.
- **Déplacement** : distance parcourue par l'outil de perforation dans l'échantillon.
- **Absorption d'énergie** : quantité d'énergie absorbée par le matériau lors d'un impact, qui est indicative de sa résistance et de sa tolérance aux impacts.

Rappel :

$$E_i = E_{el} + E_{ab}$$

où :

$$E_i = \text{énergie de l'impact}, \quad E_{el} = \text{énergie élastique}, \quad E_{ab} = \text{énergie absorbée}.$$

Les résultats de ces essais fournissent des informations cruciales sur la capacité du matériau à résister aux chocs sans subir de défaillance catastrophique. Pour cette expérience, quatre niveaux d'énergie seront utilisés afin de comparer les performances des 3 composites.

1.3 Modes de ruptures

Les modes de rupture qui peuvent apparaître sont multiples lors d'un impact. Ils sont brièvement décrits ci-dessous.

- Dent/depression (Bosse/dépression)
- Splits/cracks (Fissures/fractures)
- Combined splits and delamination (Fissures combinées et délamination)
- Combined large cracks, fiber breakage and puncture (Combinaison de grandes fissures, rupture de fibres et perforation)

La figure 3 montre l'influence de l'énergie d'impact sur les défauts créés dans un matériau composite.

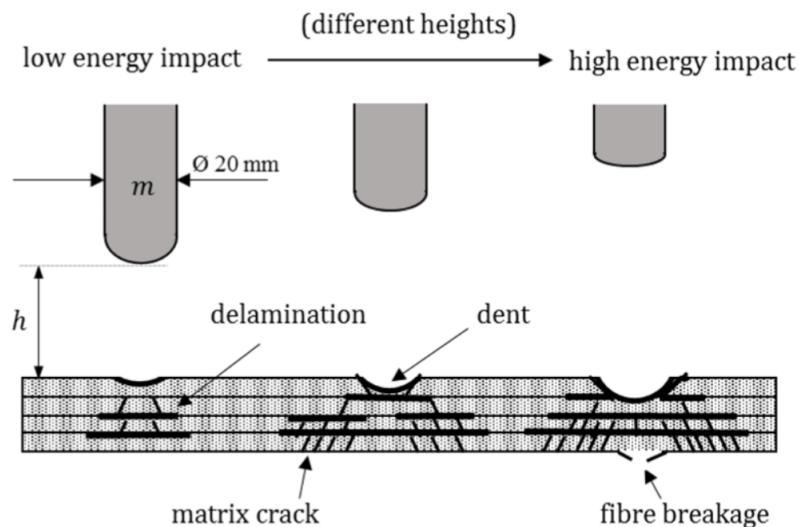


Figure 3 – Dommages causés à un matériau composite à différents niveaux d'énergie.

2 Objectifs du TP

L'objectif principal de ce TP est de comparer la résistance aux chocs et les dommages post-impact des composites en fibre de lin et des composites en fibre de verre avec différents tissages.

L'analyse portera sur :

- **L'effet du type de tissage** sur le comportement mécanique de la fibre de verre.
- **Le compromis entre durabilité et performance** lors de l'utilisation de fibres naturelles.
- **La compréhension des mécanismes de dommages** dans chaque type de matériau.

Cette étude est particulièrement pertinente pour les applications dans des secteurs tels que l'automobile, l'aérospatiale et les équipements sportifs, où la légèreté des matériaux et la résistance aux chocs sont essentielles. Comprendre comment les fibres naturelles et synthétiques se comportent sous l'effet d'un choc peut aider à développer des solutions d'ingénierie plus durables et plus rentables.

3 Matériaux

Échantillons de composites préparés lors du TP A - Mise en œuvre des composites

- **Résine** : Epoxy L-235 (SuterKunststoffe AG). Rapport résine-durcisseur en poids : 100 : 35 ; $\rho_{\text{résine}} = 1.2 \text{ g/cm}^3$.
- **Composite en fibre de lin** : Fabriqué à partir de tissu en fibre de lin préimprégné, mis sous vide et durci à 80 °C pendant 2 heures.
 - **Material** : Twill weave flax fibers, $\rho_{\text{lin}} = 1.54 \text{ g/cm}^3$, $\rho_{\text{résine}} = 1.2 \text{ g/cm}^3$.
 - **Fiber volume fraction** : $\sim 31.8\%$.
- **Composite à fibres de verre** : Fabriqué à l'aide d'un procédé de stratification manuelle suivi d'un emballage sous vide pendant 24 heures à température ambiante. $\rho_{\text{verre}} = 2.55 \text{ g/cm}^3$.
 - **Matte** : Fiber volume fraction : $\sim 25 \%$.
 - **Twill** : Fiber volume fraction : $\sim 45 \%$.

4 Méthode

La machine Impetus4a simule une charge d'impact en appliquant une force de perforation contrôlée sur les échantillons composites. Elle mesure des paramètres tels que la force-déplacement, le temps d'impact et l'énergie absorbée et élastique, fournissant ainsi des informations détaillées sur la réponse du matériau sous l'effet d'un impact.

Cette méthode d'essai complète les essais d'impact traditionnels à poids tombant en permettant des conditions plus contrôlées et des mesures plus détaillées.

Une masse de géométrie définie (20 mm), maintenue sur le bras mobile, est lâchée sur un stratifié composite et le frappe avec une énergie définie par sa hauteur, son angle et sa vitesse initiaux. La tête d'impact est généralement équipée d'instruments permettant de suivre les caractéristiques force/déplacement en fonction du temps. Cette méthode d'essai définit la résistance aux dommages des plaques stratifiées composites à matrice polymère multidirectionnelle soumises à un impact de poids.

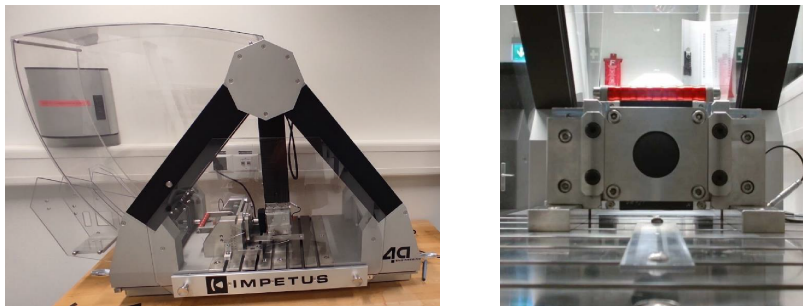


Figure 4 – Impetus4a pour les essais d'impact - l'échantillon est fixé dans la mâchoire de la machine.

4.1 Préparation des échantillons

- Mesurez et enregistrez l'épaisseur, la largeur et la longueur de chaque échantillon à l'aide d'un pied à coulisse électronique.
- Pesez chaque échantillon à l'aide d'une balance de précision.

4.2 Inspection - pré-test

- Inspection visuelle : documentez l'état de surface de chaque échantillon. Recherchez les zones riches en résine ou les bulles d'air.

4.3 Essais de perforation à l'aide de l'Impetus4a

- Configurez la machine Impetus4a pour les essais de perforation, en veillant à ce que chaque échantillon soit correctement aligné et serré (utilisez une pince circulaire de 20 mm de diamètre).

Effectuez les tests d'impact à quatre niveaux de vitesse d'impact :

- ★ 1 m/s (impact à faible énergie)
- ★ 1.25 m/s (impact à moyenne énergie)
- ★ 1.75 m/s (impact à haute énergie)
- ★ 2.25 m/s (impact à très haute énergie)

Enregistrez les données de force-déplacement et de force-temps pour chaque essai d'impact.

Pour chaque échantillon, notez la force d'impact maximale, l'énergie absorbée et le déplacement à la charge maximale.

4.4 Analyse Post-Impact

4.4.1 Analyse de Surface

- Inspectez chaque échantillon afin de détecter toute fissure visible, délamination ou rupture de fibre. Il est important de noter les **mécanismes de détérioration** observés pour chaque échantillon et de prendre une photo des deux côtés avant et après chaque étape.
- **Mesurez la zone endommagée** : utilisez un pied à coulisse pour mesurer le diamètre du trou et notez la taille et la forme de la zone endommagée.

4.4.2 Analyse des dommages internes

- Comparez les dommages internes subis par les trois types d'échantillons.

4.5 Données et Analyse

- Complétez le tableau avec les données nécessaires.

Table 1 – Exemple de relevé des données

Matériau	Dimensions de l'échantillon (l,w,t) (mm)	Masse (g)	Énergie d'im- pact (J)	Temps d'im- pact (ms)	Force max (N)	Énergie absor- bée (J)	Diamètre du défaut (mm)	Énergie élastique (rebond) (J)
Lin $V_f =$								
Verre Matte $V_f =$								
Verre Twill $V_f =$								

- Tracez les courbes **force-déplacement**, **force-temps** et **énergie-temps** pour chaque essai et analysez les différences dans le comportement des matériaux.

- **Résistance aux chocs** : comparez la force maximale supportée par chaque matériau composite à différents niveaux d'énergie/vélocités.
- **N'oubliez pas de normaliser les données**. En effet, comparer les résultats "bruts" directement favoriserait un matériau contenant plus de fibres, et non celui à l'architecture intrinsèquement plus performante. Pour rendre la comparaison équitable, les valeurs doivent être ramenées à la même fraction volumique de référence.

La formule à utiliser est la suivante :

$$X_{\text{normalisé}} = \frac{V_{f,\text{référence}}}{V_{f,\text{matériau}}} \times X_{\text{mesuré}}$$

- ★ $X_{\text{normalisé}}$: valeur normalisée ;
 - ★ $V_{f,\text{référence}}$: fraction volumique de référence ;
 - ★ $V_{f,\text{matériau}}$: fraction volumique du matériau ;
 - ★ $X_{\text{mesuré}}$: valeur mesurée.
- **Mécanismes d'endommagement** : identifiez les types de dommages observés dans chaque échantillon, tels que la rupture des fibres, la fissuration de la matrice et la délamination. Pensez au mécanisme de répartition/**dissipation des contraintes**.
 - **Effet du tissage** : évaluez l'impact du tissage pour les échantillons de fibre de verre sur l'absorption d'énergie et la résistance aux dommages et donc leur mécanisme d'endommagement.
 - Comparaison avec la fibre de lin : discutez des performances des fibres de lin par rapport aux échantillons de fibre de verre, en mettant l'accent sur les avantages en termes de **durabilité** et les compromis mécaniques.

5 Discussions et Questions

- Influence du tissage des fibres : analyse de la différence de performance entre le twill et le matte fibre de verre.
- Calculez l'énergie élastique, absorbée, ...
- Durabilité VS performances : comparez les avantages environnementaux des fibres de lin à leurs performances mécaniques. Les fibres de lin sont plus durables, mais comment se comparent-elles en termes de résistance aux chocs ?
- Forme et types de défauts : discutez des explications possibles.
- Vous pouvez baser votre discussion sur les questions abordées pendant les travaux pratiques. Certaines références peuvent vous aider dans ce domaine.

6 Rapports

- **Page de garde** : Logo, dates, noms, titre du TP, nom du cours.
- **Introduction** : présentation rapide des objectifs du TP.
- **Théorie** : résumé de ce que vous avez compris du test d'impact, des types de tissage et des défauts, etc.
- **Partie expérimentale** : équipement et matériel nécessaires. Description des différentes étapes du TP en précisant au besoin les choses à ne pas oublier, à ne pas faire, les spécificités de certains tissus, méthodes, etc.
- **Résultats et discussion** : discussion des résultats, leur exactitude, les sources d'erreur potentielles pendant le TP, l'impact du type de tissu, l'impact du type de fibre et les compromis liés à la sustainability et aux fibres de lin, etc.

- **Réponses aux questions** : intégrées dans la discussion.
- **Conclusion du TP** : résultats de votre discussion, résumé final et lien avec les objectifs.

Références

1. *Impact Studies of Composite Materials*, edited by Mohamed Thariq Hameed Sultan, Ain Umaira Md Shah, Naheed Saba - 2021.
2. *Impact behaviour of fibre-reinforced composite materials and structures*, edited by S. R. Reid and G. Zhou, 1st Edition - October 12, 2000.
3. ASTM D7137/D7137M-17. *Standard Test Method for Compressive Residual Strength Properties of Damaged Polymer Matrix Composite Plates*.
4. ASTM D7136/D7136M-15. *Standard Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite to a Drop-Weight Impact Event*.