MONARQUE

Génération de délaminages contrôlés dans les structures composites

Hadrien POSTORINO

Doctorant PIMM/ENSAM

Sommaire

1. Le délaminage
2. Principe du choc LASER
3. Résultats expérimentaux
4. Applications du procédé

Arts et Métiers Sciences et Technologies

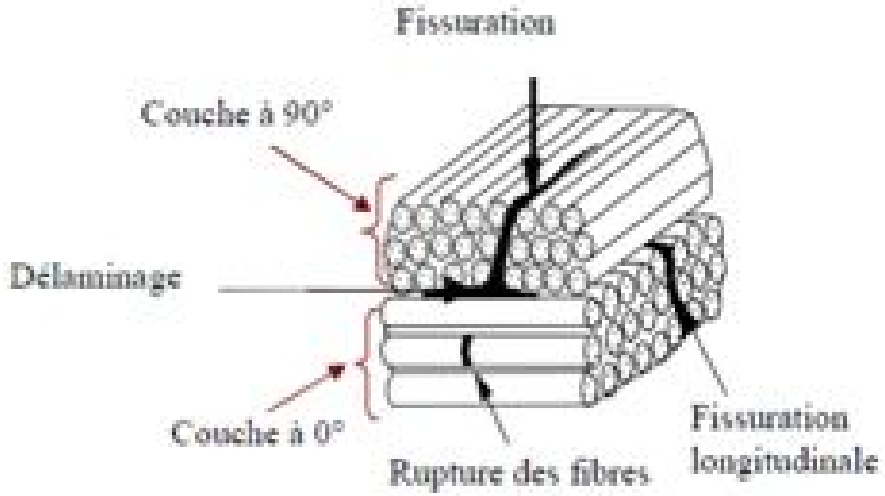
Le délaminage dans les matériaux composites : un dommage majeur

Causes : - défaut de fabrication ou
- fatigue du matériau

En **fatigue**, apparition en **quatre étapes** :

1. Fissuration de la matrice entre les fibres
2. Propagation jusqu'à l'inter-plis
3. Rupture de l'interface entre deux plis
4. Décollement des plis

➢ Détection par CND ultrason

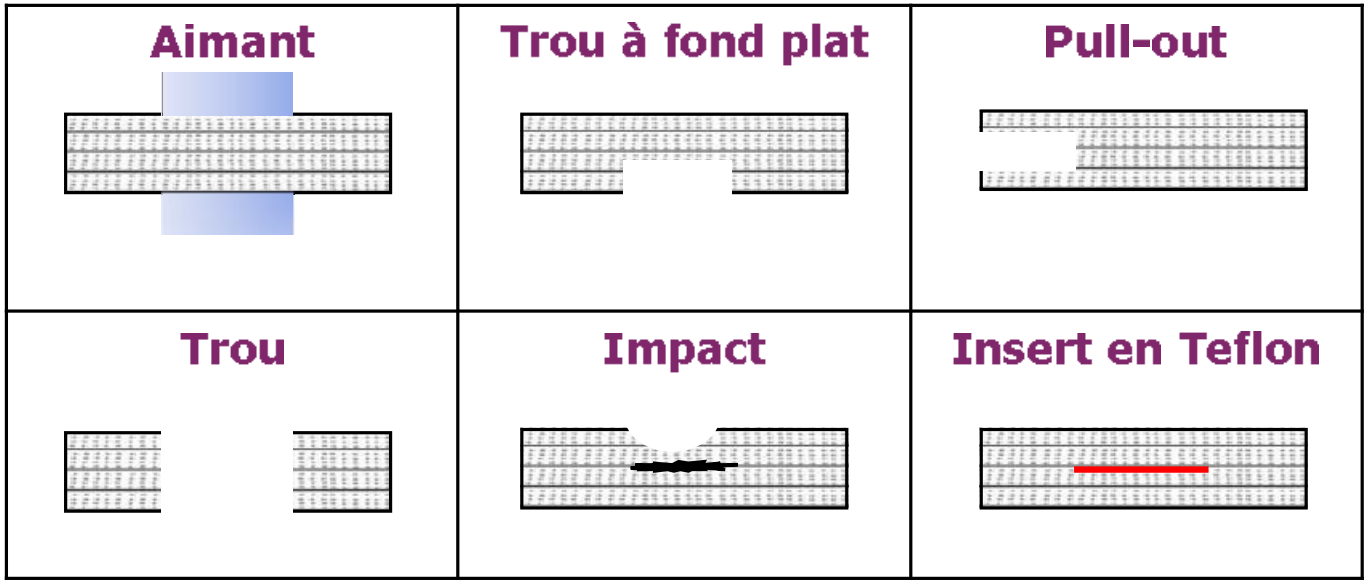


Modes d'endommagement dans un CFRP, Vu 2010

Arts et Métiers Sciences et Technologies

Des mesures sur dommages réels : un verrou important du SHM

Les procédures SHM sont testées sur des dommages artificiels :



⇒ Ces dommages irréalistes et/ou couteux

⇒ limite le déploiement industriel du SHM

Choc Laser

Arts et Métiers Sciences et Technologies

Le choc LASER : principe et fondamentaux

Le choc LASER se décompose en trois phases :

1. La génération d'un rayonnement LASER et cheminement jusqu'à la cible

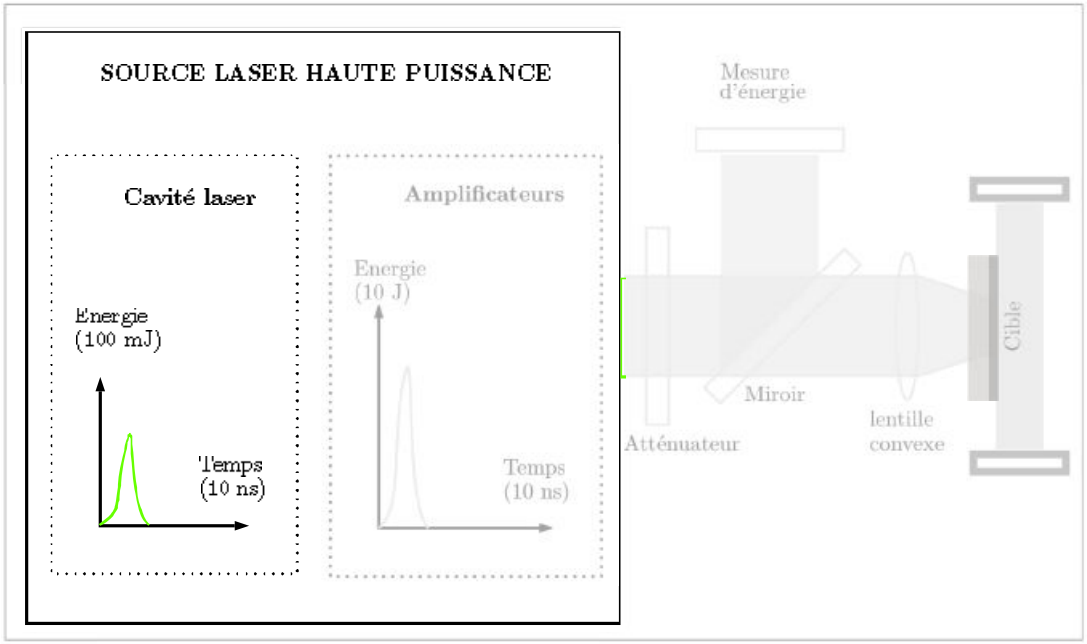
- Irradiation brève (Quelques ns) et intense (plusieurs GW/cm2) définie par la cavité
- Amplification
- Concentration de l'énergie LASER à l'aide d'une lentille convergente sur la cible

2. L'interaction Laser-Matière et génération de l'onde de choc

- Sublimation en plasma du milieu sacrificiel (dépôt d'aluminium)
- Dilatation du plasma
- Augmentation de la pression à l'aide du confinement
- Création d'un choc puis d'une détente

3. La propagation de l'onde de choc et génération du délaminage

- L'onde de choc et l'onde de détente se propage dans l'épaisseur
- Réflexion sur les parois
- Concentration des contraintes à l'intersection des ondes de détentes
- Apparition d'un délaminage



Arts et Métiers Sciences et Technologies

Le choc LASER : principe et fondamentaux

Le choc LASER se décompose en trois phases :

1. La génération d'un rayonnement LASER et cheminement jusqu'à la cible

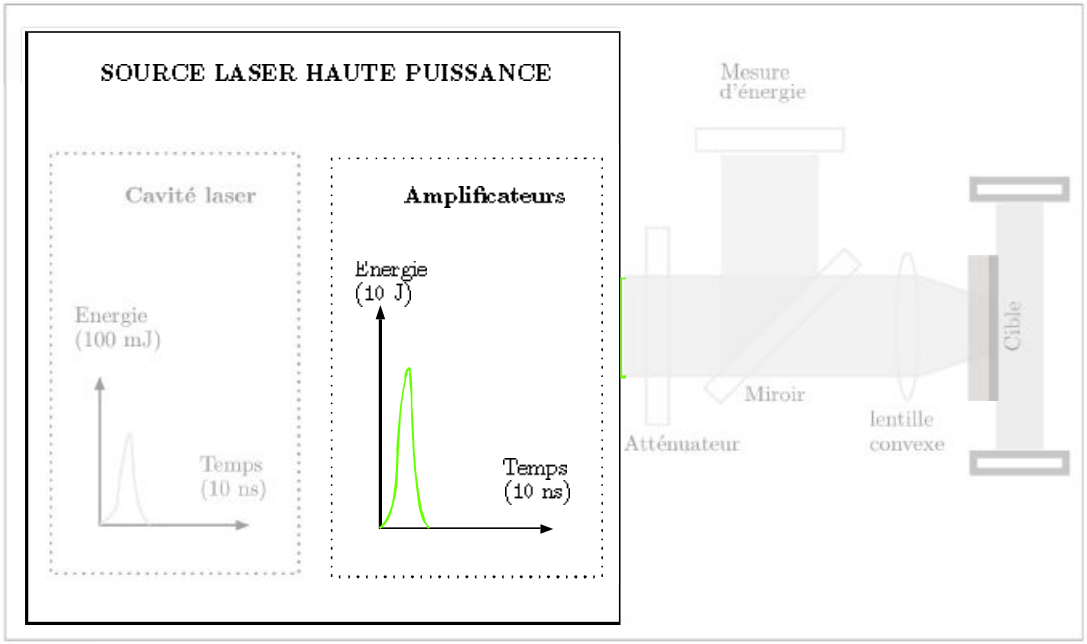
- Irradiation brève (Quelques ns) et intense (plusieurs GW/cm2) définie par la cavité
- Amplification
- Concentration de l'énergie LASER à l'aide d'une lentille convergente sur la cible

2. L'interaction Laser-Matière et génération de l'onde de choc

- Sublimation en plasma du milieu sacrificiel (dépôt d'aluminium)
- Dilatation du plasma
- Augmentation de la pression à l'aide du confinement
- Création d'un choc puis d'une détente

3. La propagation de l'onde de choc et génération du délaminage

- L'onde de choc et l'onde de détente se propage dans l'épaisseur
- Réflexion sur les parois
- Concentration des contraintes à l'intersection des ondes de détentes
- Apparition d'un délaminage



Arts et Métiers Sciences et Technologies

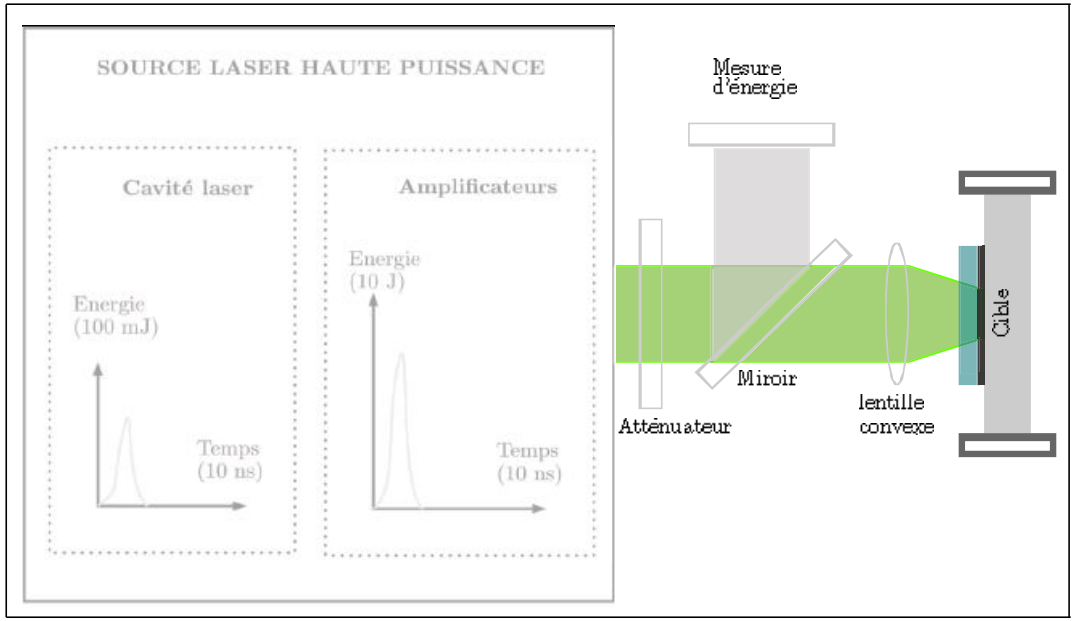
Le choc LASER : principe et fondamentaux

Le choc LASER se décompose en trois phases :

1. **La génération d'un rayonnement LASER et cheminement jusqu'à la cible**
   - Irradiation brève (Quelques ns) et intense (plusieurs GW/cm2) définie par la cavité
   - Amplification
   - Concentration de l'énergie LASER à l'aide d'une lentille convergente sur la cible

2. **L'interaction Laser-Matière et génération de l'onde de choc**
   - Sublimation en plasma du milieu sacrificiel (dépôt d'aluminium)
   - Dilatation du plasma
   - Augmentation de la pression à l'aide du confinement
   - Création d'un choc puis d'une détente

3. **La propagation de l'onde de choc et génération du délaminage**
   - L'onde de choc et l'onde de détente se propage dans l'épaisseur
   - Réflexion sur les parois
   - Concentration des contraintes à l'intersection des ondes de détentes
   - Apparition d'un délaminage



Arts et Métiers Sciences et Technologies

Le choc LASER : principe

Le choc LASER se décompose en trois phases :

1. La génération d'un rayonnement LASER et cheminement jusqu'à la cible

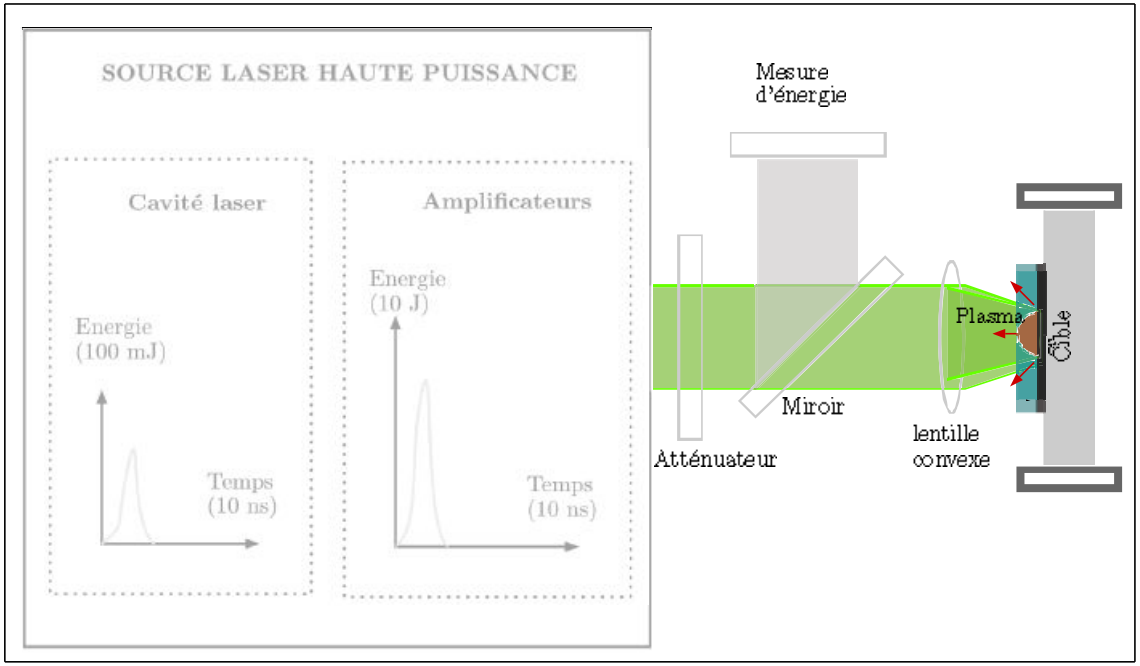
- Irradiation brève (Quelques ns) et intense (plusieurs GW/cm2) définie par la cavité
- Amplification
- Concentration de l'énergie LASER à l'aide d'une lentille convergente sur la cible

2. L'interaction Laser-Matière et génération de l'onde de choc

- Sublimation en plasma du milieu sacrificiel (dépôt d'aluminium)
- Dilatation du plasma
- Augmentation de la pression à l'aide du confinement
- Création d'un choc puis d'une détente

3. La propagation de l'onde de choc et génération du délaminage

- L'onde de choc et l'onde de détente se propage dans l'épaisseur
- Réflexion sur les parois
- Concentration des contraintes à l'intersection des ondes de détentes
- Apparition d'un délaminage



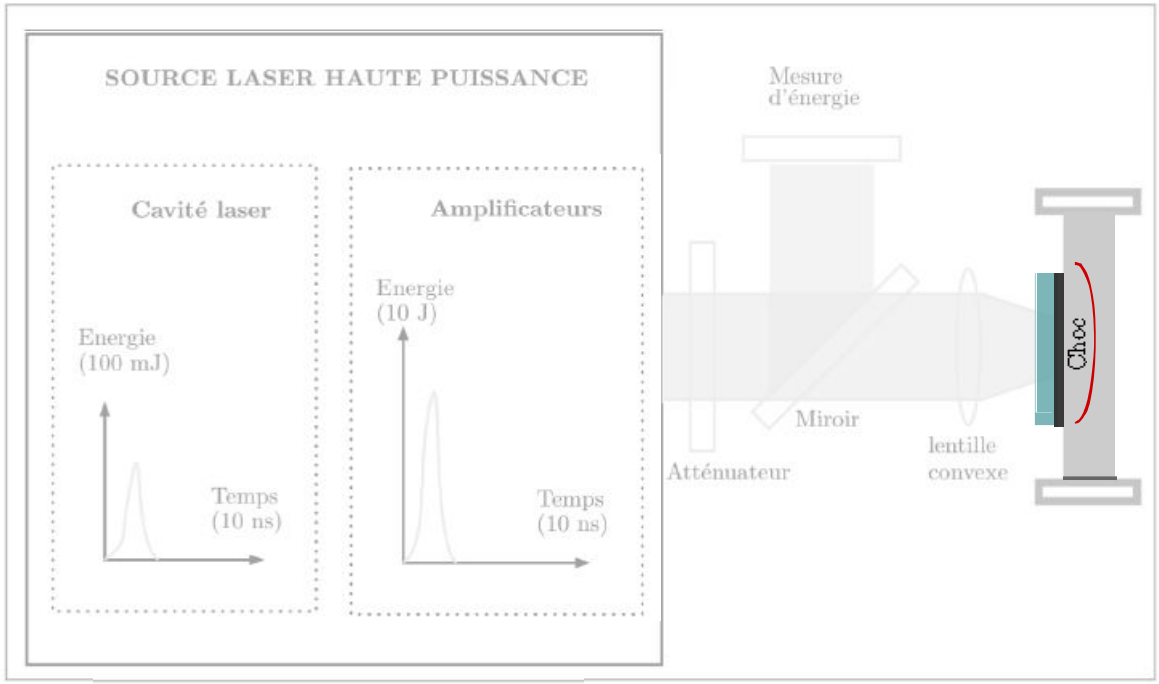
Arts et Métiers Sciences et Technologies

Le choc LASER : principe

Le choc LASER se décompose en trois phases :

1. **La génération d'un rayonnement LASER et cheminement jusqu'à la cible**
   - Irradiation brève (Quelques ns) et intense (plusieurs GW/cm2) définie par la cavité
   - Amplification
   - Concentration de l'énergie LASER à l'aide d'une lentille convergente sur la cible

2. **L'interaction Laser-Matière et génération de l'onde de choc**
   - Sublimation en plasma du milieu sacrificiel (dépôt d'aluminium)
   - Dilatation du plasma
   - Augmentation de la pression à l'aide du confinement
   - Création d'un choc puis d'une détente



3. **La propagation de l'onde de choc et génération du délaminage**
   - L'onde de choc et l'onde de détente se propage dans l'épaisseur
   - Réflexion sur les parois
   - Concentration des contraintes à l'intersection des ondes de détentes
   - Apparition d'un délaminage

Arts et Métiers Sciences et Technologies

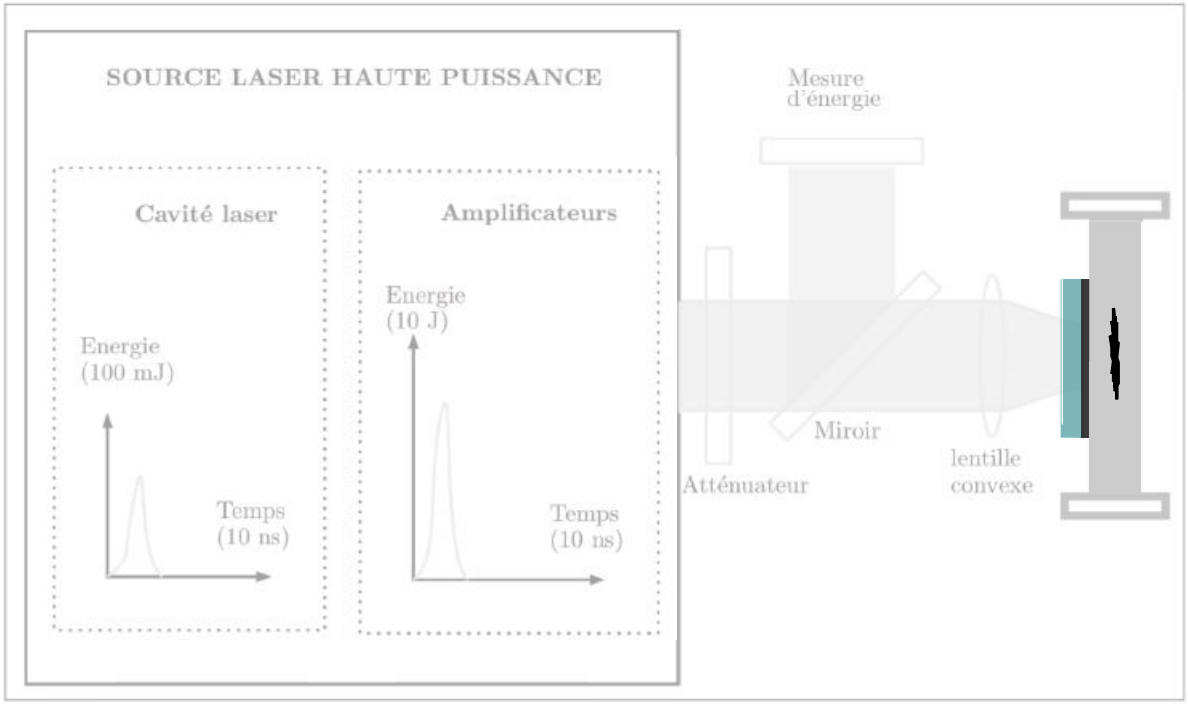
Le choc LASER : principe

Le choc LASER se décompose en trois phases :

1. **La génération d'un rayonnement LASER et cheminement jusqu'à la cible**
   - Irradiation brève (Quelques ns) et intense (plusieurs GW/cm2) définie par la cavité
   - Amplification
   - Concentration de l'énergie LASER à l'aide d'une lentille convergente sur la cible

2. **L'interaction Laser-Matière et génération de l'onde de choc**
   - Sublimation en plasma du milieu sacrificiel (dépôt d'aluminium)
   - Dilatation du plasma
   - Augmentation de la pression à l'aide du confinement
   - Création d'un choc puis d'une détente

3. **La propagation de l'onde de choc et génération du délaminage**
   - L'onde de choc et l'onde de détente se propage dans l'épaisseur
   - Réflexion sur les parois
   - Concentration des contraintes à l'intersection des ondes de détentes
   - Apparition d'un délaminage



Arts et Métiers Sciences et Technologies

Le choc LASER : principe

Le choc LASER se décompose en trois phases :

1. La génération d'un rayonnement LASER et cheminement jusqu'à la cible

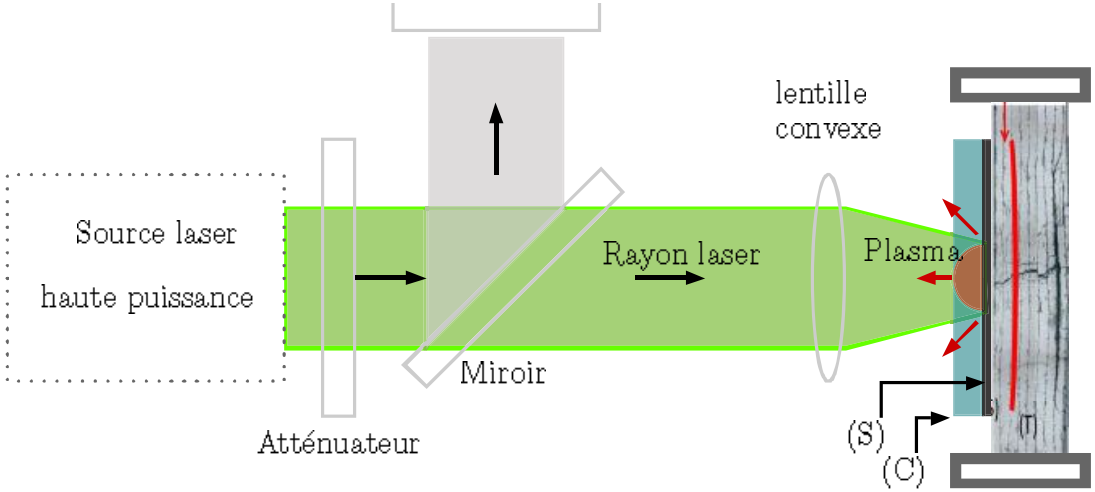
- Irradiation brève (Quelques ns) et intense (plusieurs GW/cm2) définie par la cavité
- Amplification
- Concentration de l'énergie LASER à l'aide d'une lentille convergente sur la cible

2. L'interaction Laser-Matière et génération de l'onde de choc

- Sublimation en plasma du milieu sacrificiel (dépôt d'aluminium)
- Dilatation du plasma
- Augmentation de la pression à l'aide du confinement
- Création d'un choc puis d'une détente

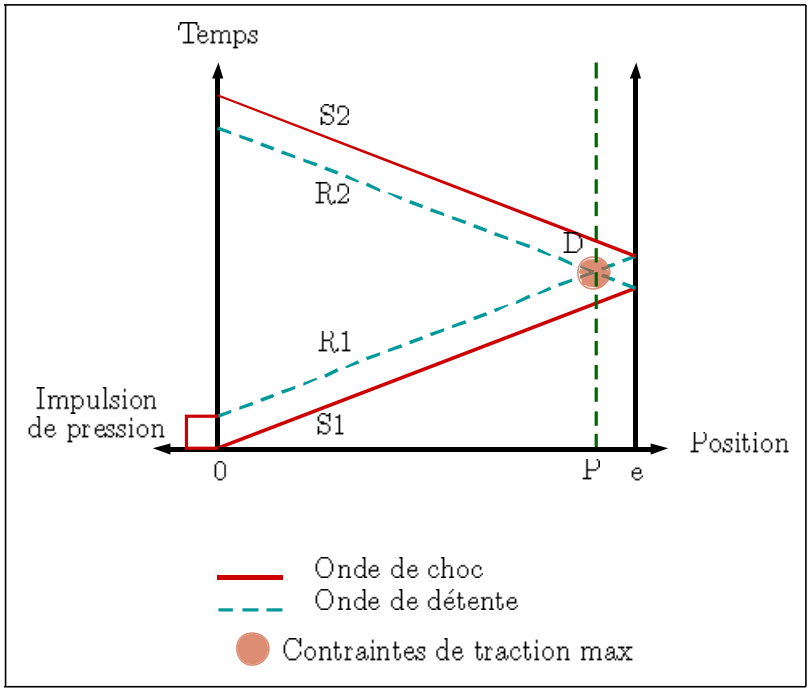
3. La propagation de l'onde de choc et génération du délaminage

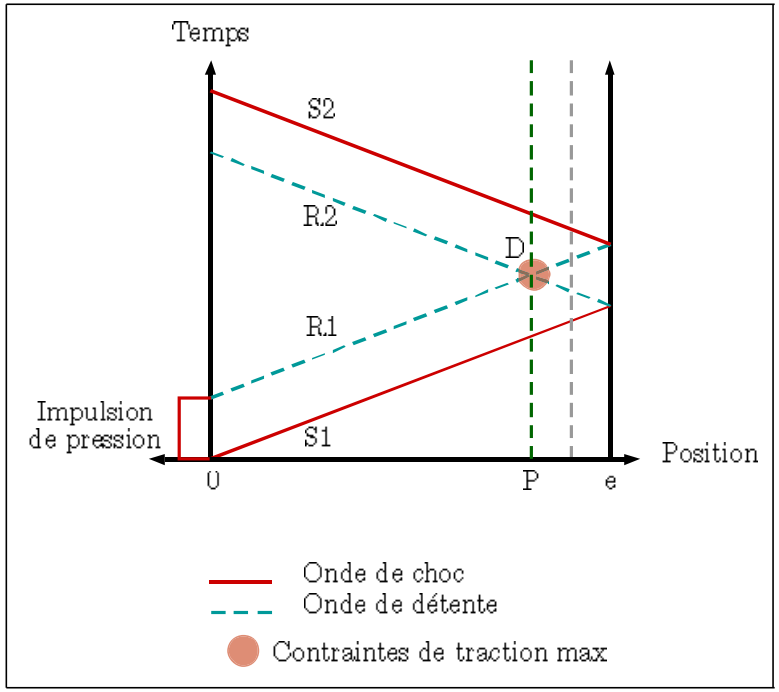
- L'onde de choc et l'onde de détente se propage dans l'épaisseur
- Réflexion sur les parois
- Concentration des contraintes à l'intersection des ondes de détentes
- Apparition d'un délaminage



Propagation du choc : diagrammes XT

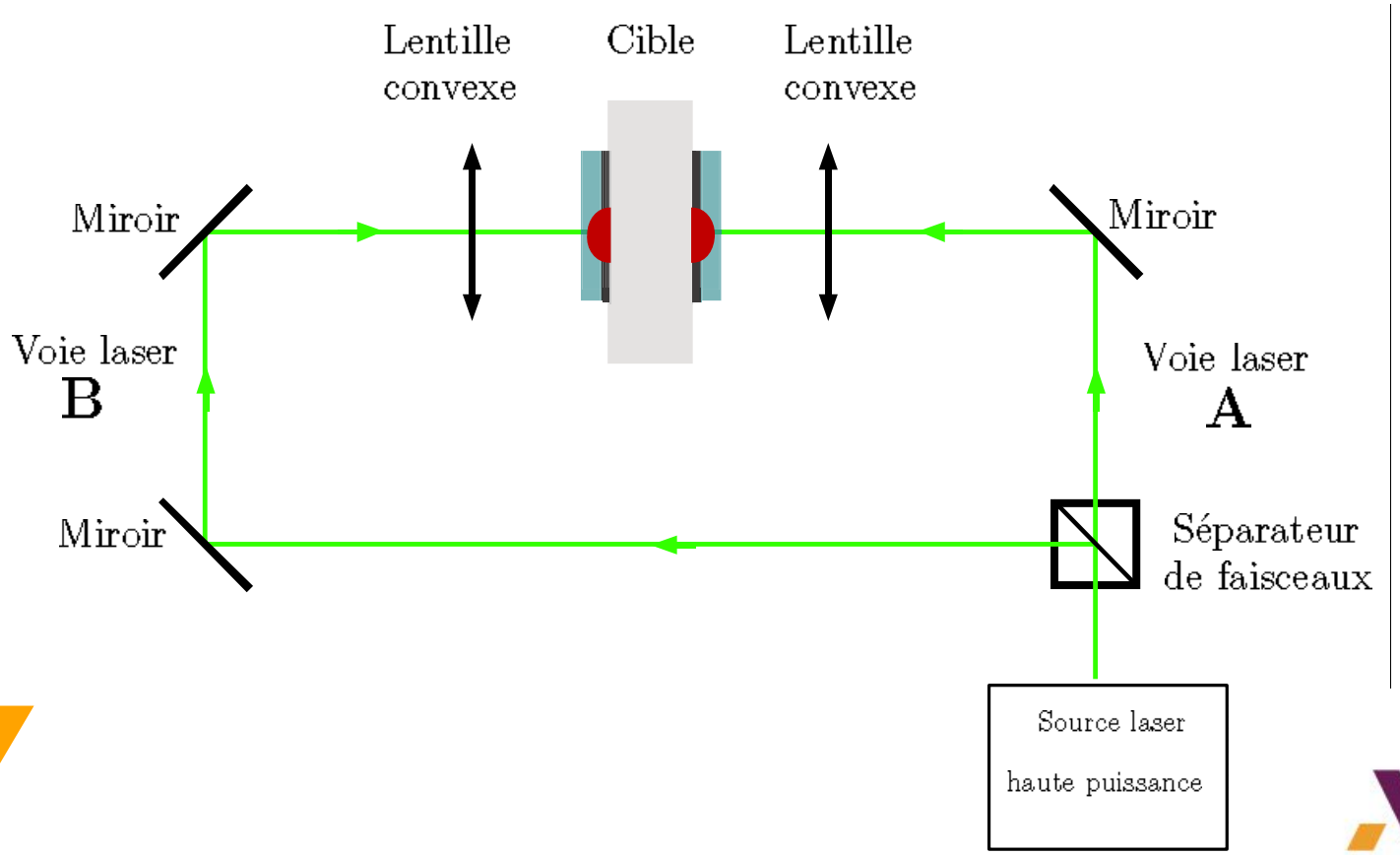
- Concentration des contraintes à l'intersection
- Apparition du dommage à parti d'un seuil d'énergie
- La position du dommage dépend de la durée d'impulsion
- Dommage réalisable à l'arrière uniquement





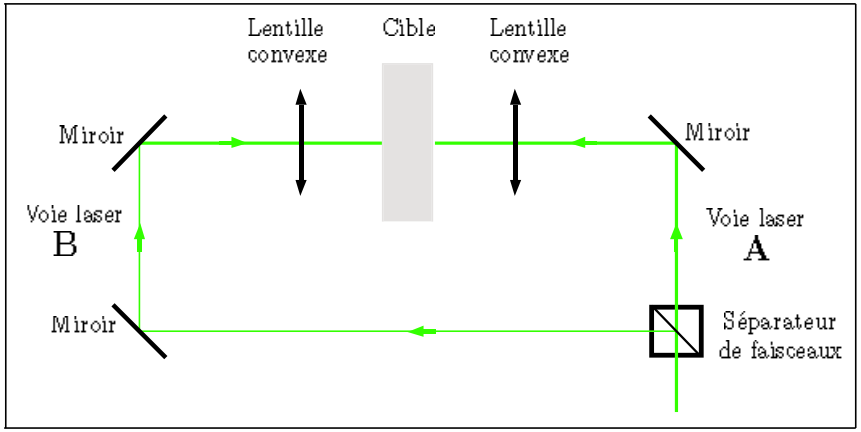
Amélioration : le choc symétrique

- 2 voies indépendantes
- 2 tirs : un par face
- Un délai possible entre chaque voie

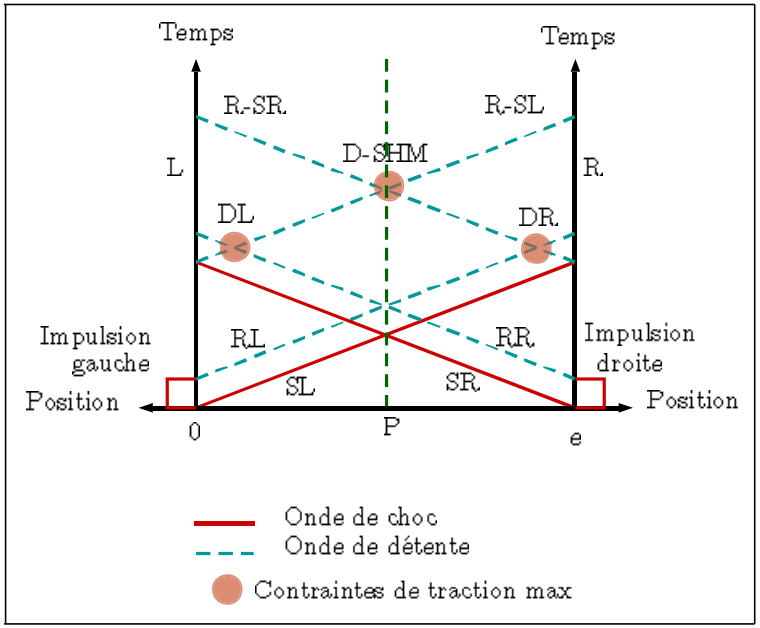


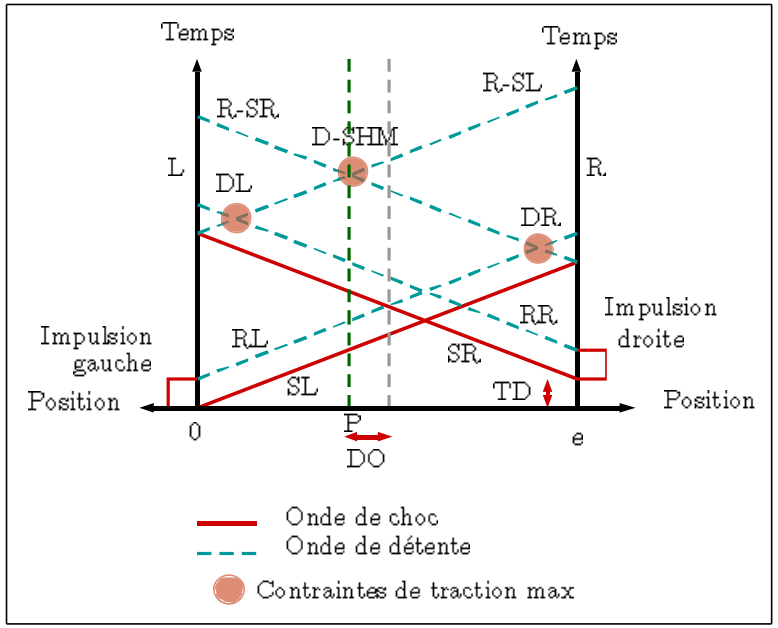
Arts et Métiers Sciences et Technologies

Optimisation du procédé par tirs symétriques



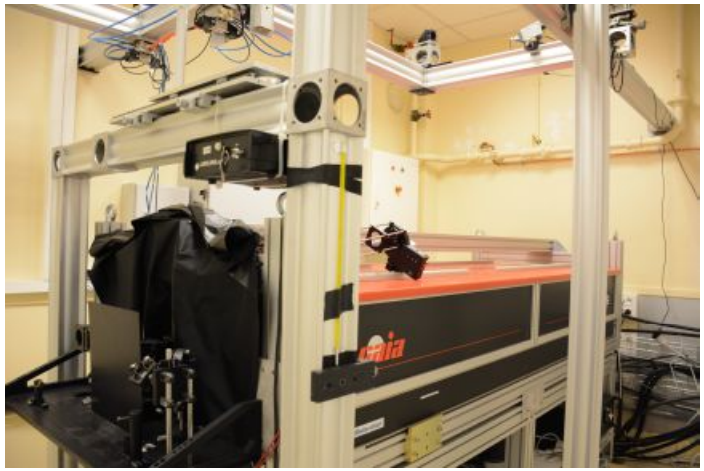
- Profondeur modifiée par le délai
- Seuils à respecter





Arts et Métiers Sciences et Technologies

La Plateforme Héphaïstos du PIMM



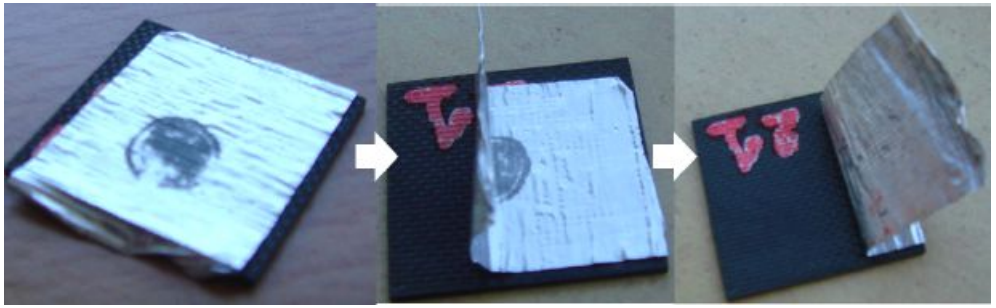
LASER GAIA THALES :

- $\lambda = 532\,nm$
- 2 voies indépendantes
- Jusqu'à 14J

Poste 1 : tir symétrique

Arts et Métiers Sciences et Technologies

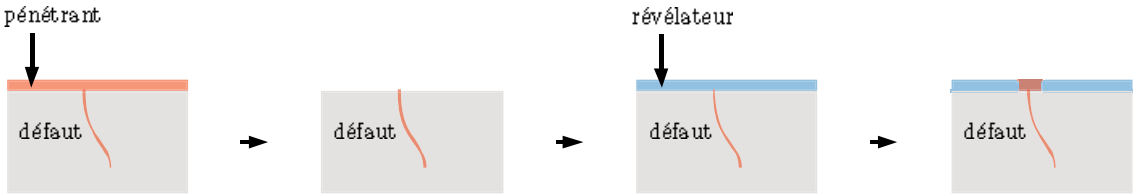
Résultat : Un endommagement maitrisé



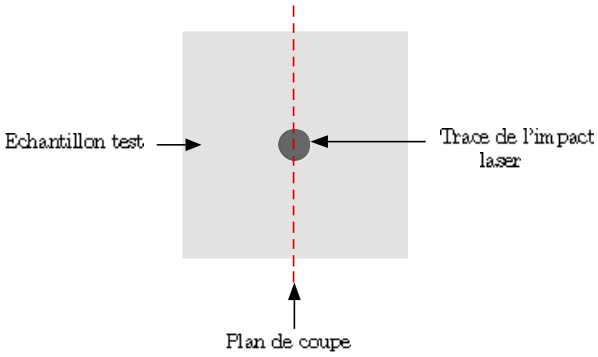
Échantillon après impact avec dépôt d'aluminium

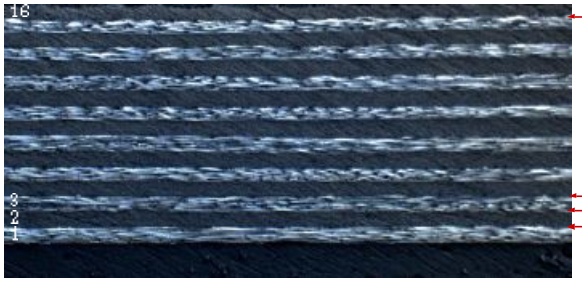
La caractérisation du dommage se fait par :

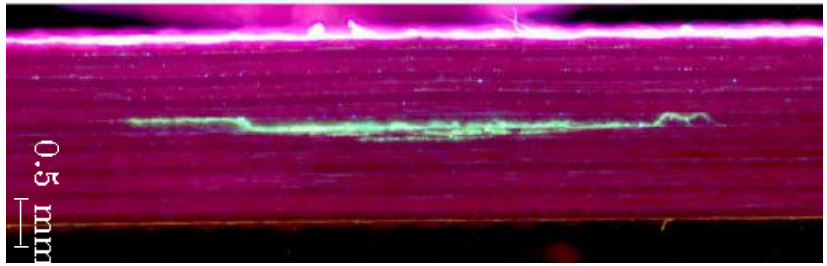
- CND ultrason
- Ressuage sur les coupes micro



Procédé de ressuage





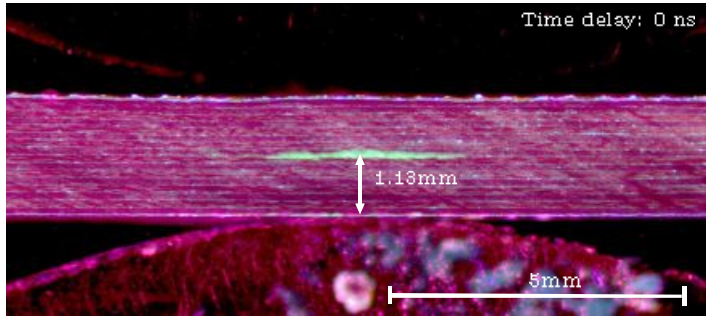


Coupe microscopique avant impact et après impact avec ressuage

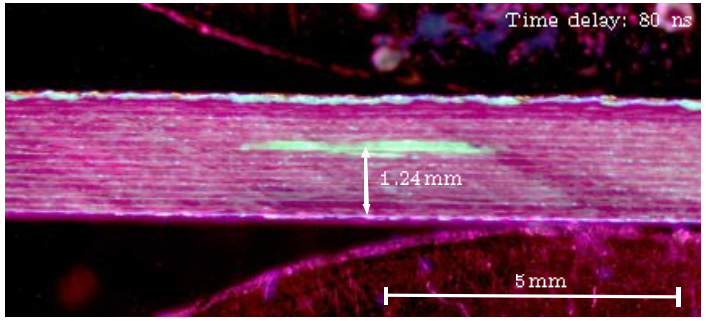
Arts et Métiers Sciences et Technologies

Résultat : un endommagement maitrisé

Modification de la profondeur

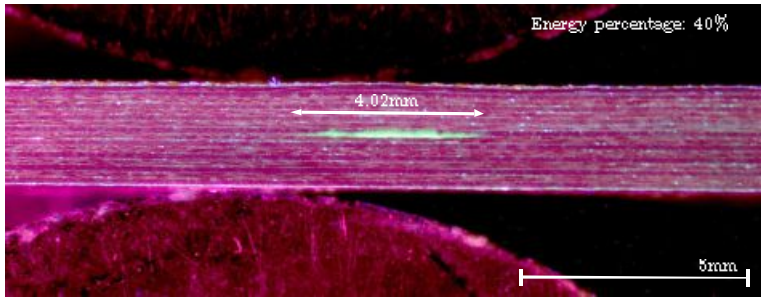


Délai 0 ns

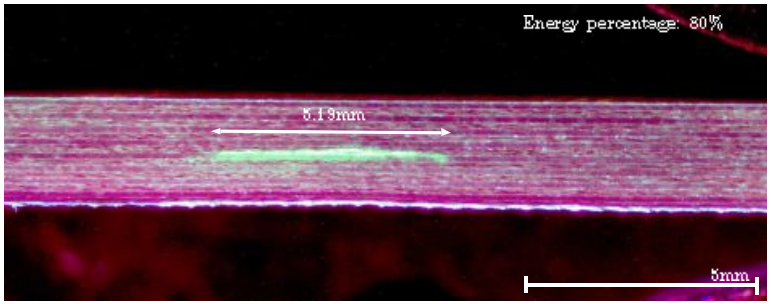


Délai de 80 ns

Modification de la taille



40% de l'énergie nominale

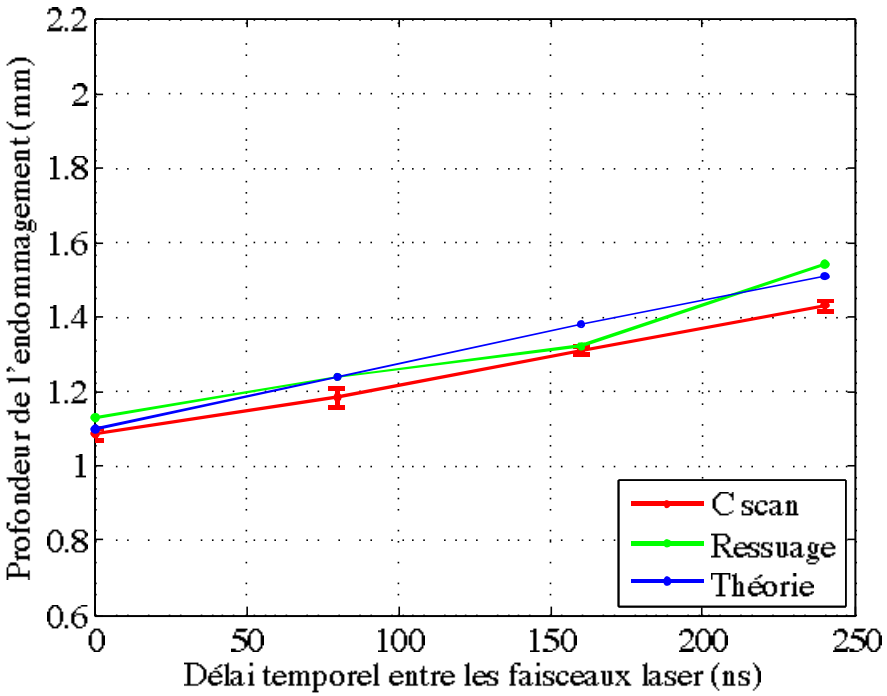


80% de l'énergie nominale

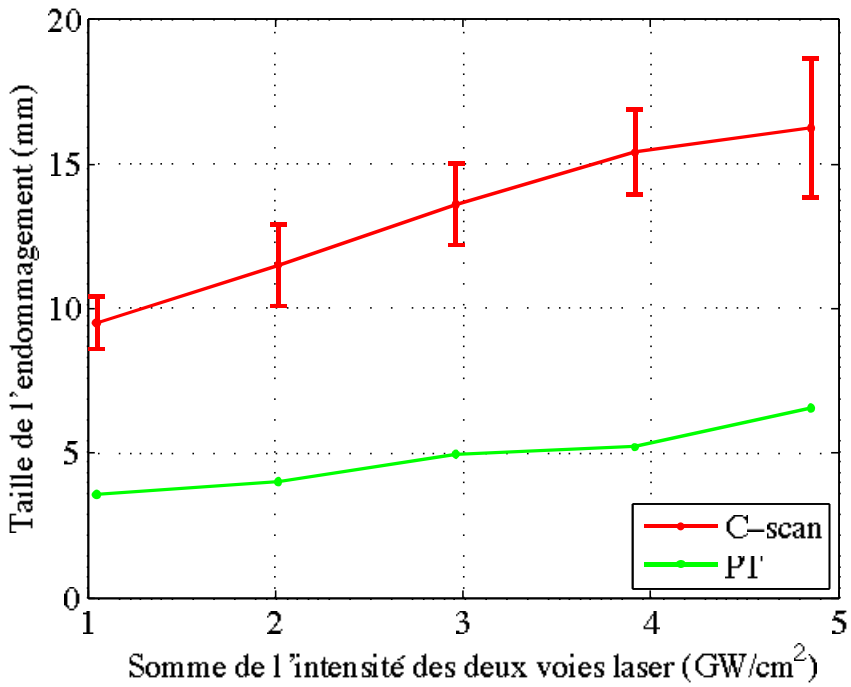
Arts et Métiers Sciences et Technologies

Un endommagement maitrisé

Profondeur de l'endommagement
en fonction du délai temporel

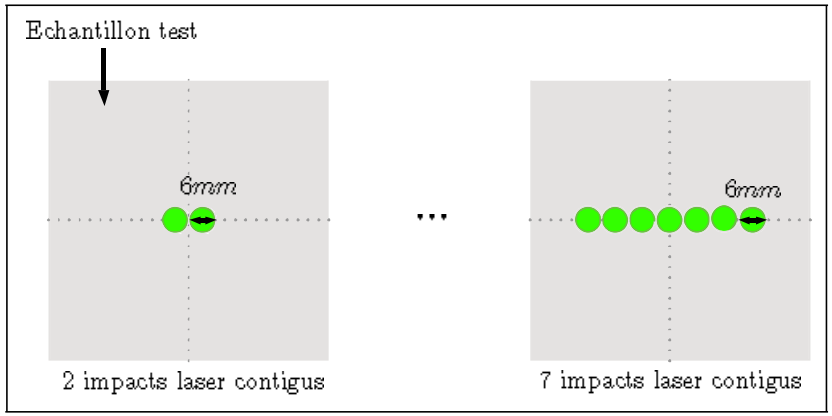


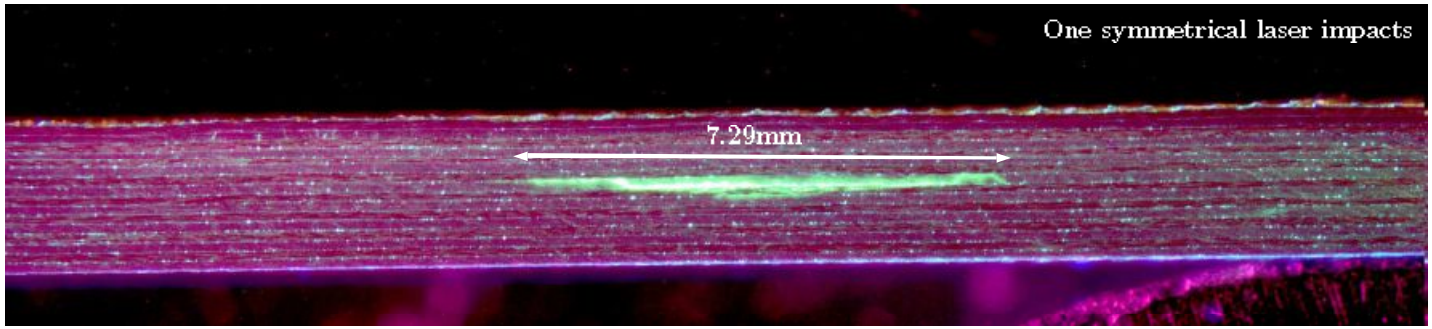
Taille de l'endommagement en
fonction de l'intensité



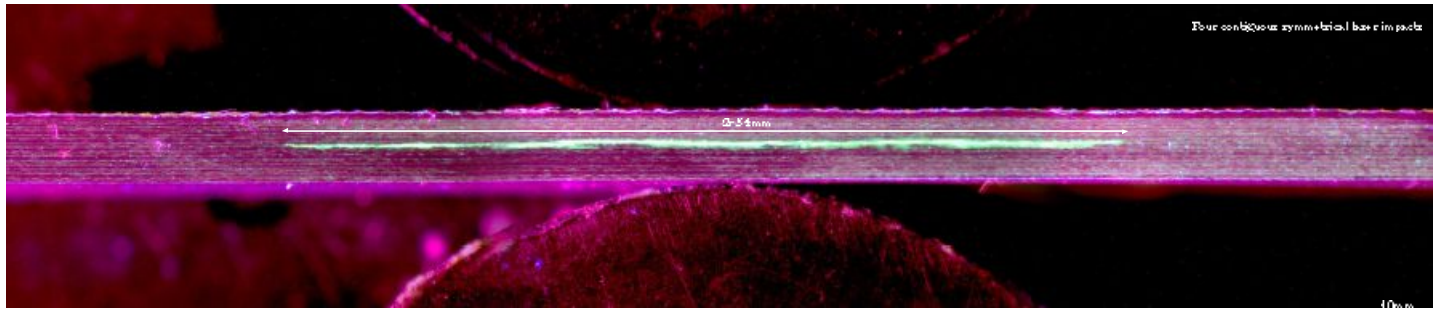
Arts et Métiers Sciences et Technologies

Un endommagement maitrisé





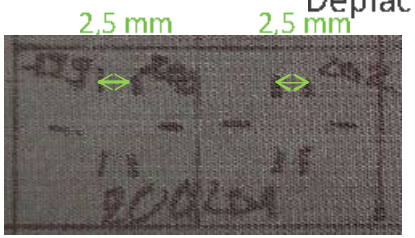
taille de l'endommagement pour un impact



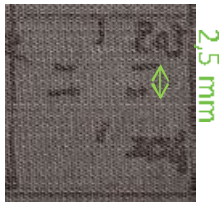
taille de l'endommagement pour quatre impacts contigus

Un endommagement maitrisé

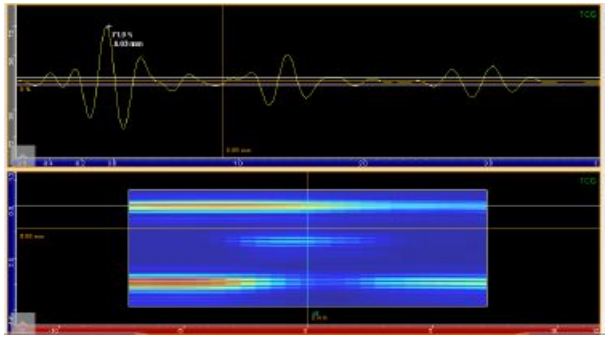
Déplacement d'une demie tache focale (5/2 = 2,5 mm)



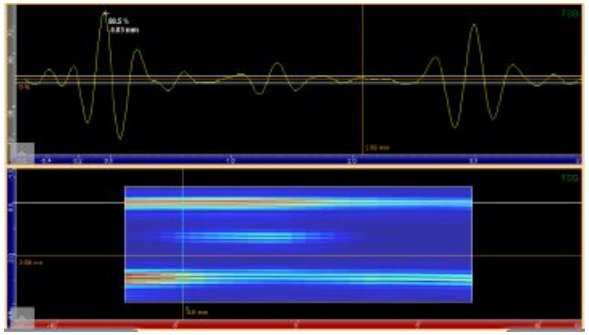
Décalage vers la droite : endommagements de 7,2 mm (199-200) et 7,8 mm (201-202)



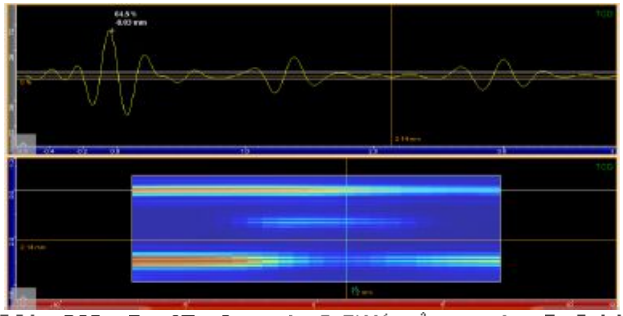
Décalage vers le bas : endommagements de 8,4 mm (203-204) et 9 mm (209-210)



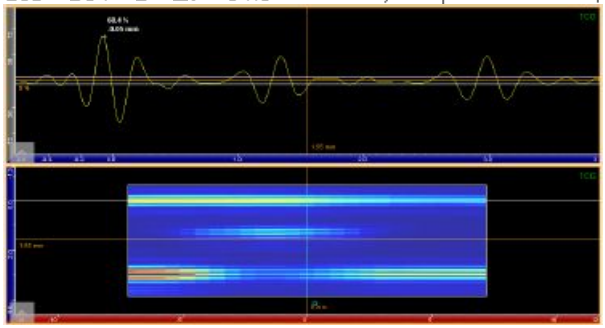
Tirs 199 – 200 – B – ΔT = 0 ns – I = 2 GW/cm² par voie – E= 2,4 J par voie



Tirs 203 – 204 – B – ΔT = 0 ns – I = 2 GW/cm² par voie – E= 2,4 J par voie



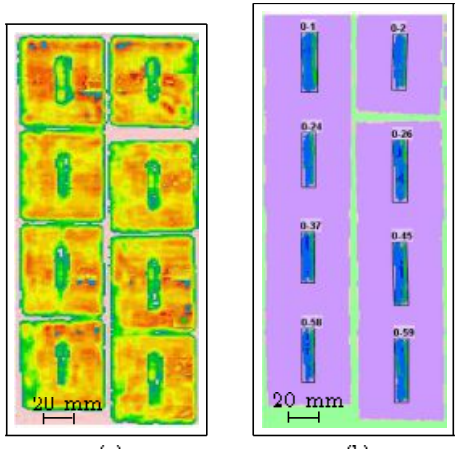
Tirs 201 – 202 – B – ΔT = 0 ns – I = 2 GW/cm² par voie – E= 2,4 J par voie



Tirs 209 - 210 – B – ΔT = 0 ns – I = 2 GW/cm² par voie – E= 2,4 J par voie

Des applications multiples

Ce procédé peut connaitre des applications industrielles diverses :

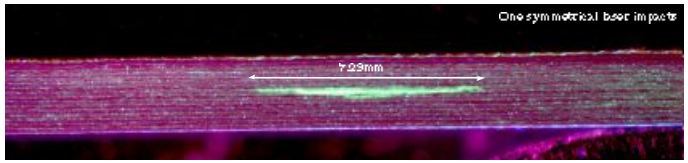


1. Fabrication de cales étalons pour les CND

- les cales étalons actuelles avec des défauts artificiels
- défauts plus réalistes
- Application directe du procédé

2. Création de dommage maitrisé pour le SHM

- Toutes les formes de dommages
- Toutes les positions de dommages
- Augmentation progressivement de la taille d'un dommage
- Possible de rajouter des dommages entre chaque mesure



3. Désassemblage des pièces aéronautiques

- Assemblages collés composite/métal

Arts et Métiers Sciences et Technologies

Conclusion

- Le choc Laser symétrique offre la possibilité de créer des vrais délaminages

- L'endommagement maitrisé :
  - ✓ Taille
  - ✓ Position
  - ✓ Profondeur
  - ✓ Forme

- Les applications multiples :
  - Désassemblage
  - CND
  - SHM

- Possibilité de tester et valider nos procédés SHM

Références

Simon Bardy, *Contrôle et optimisation du test d'adhérence par choc laser sur assemblages collés*. Ecole nationale supérieure d'arts et métiers - ENSAM, 2017

Romain Ecault. *Etude expérimentale et numérique du comportement dynamique de composites aéronautiques sous choc laser. Optimisation du test d'adhérence par ondes de choc sur les assemblages composites collés*. ISAE-ENSMA Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et d'Aérotechique - Poitiers, 2013.

Meriem Ghrib, *Contrôle santé des structures composites : génération de délaminages par choc laser et quantification par apprentissage machine »,* Ecole nationale supérieure d'arts et métiers - ENSAM, 2017

Maxime Sagnard, Laurent Berthe, Romain Ecault, Fabienne Touchard, Michel Boustie. *Etude des effets d'un choc laser symétrique sur des assemblages collés de composites dans le cas d'un joint faible*. Journées Nationales sur les Composites 2017, École des Ponts ParisTech (ENPC), Jun 2017