



HAL
open science

Fabrication et caractérisation de nouvelles structures hexagonales en composite à matrice céramique pour application nucléaire

Christophe Lorrette, Cédric Sauder, R. Bertrand, Gérald Camus

► To cite this version:

Christophe Lorrette, Cédric Sauder, R. Bertrand, Gérald Camus. Fabrication et caractérisation de nouvelles structures hexagonales en composite à matrice céramique pour application nucléaire. Matériaux 2014 – Matériaux en conditions extrêmes, Nov 2014, Montpellier, France. cea-02869643

HAL Id: cea-02869643

<https://cea.hal.science/cea-02869643v1>

Submitted on 16 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE



www.cea.fr

MATÉRIAUX 2014
Montpellier **24-28 NOVEMBRE**

***FABRICATION ET CARACTÉRISATION
DE NOUVELLES STRUCTURES HEXAGONALES
EN COMPOSITE À MATRICE CÉRAMIQUE
POUR APPLICATION NUCLÉAIRE***

Christophe Lorrette, Cédric Sauder

CEA-Saclay, DEN, Gif-sur-Yvette, France

et

Rémi Bertrand, Gérald Camus

LCTS, UMR CNRS-UB-CEA-SAFRAN, Pessac, France

Colloque N°16 – Matériaux en conditions extrêmes

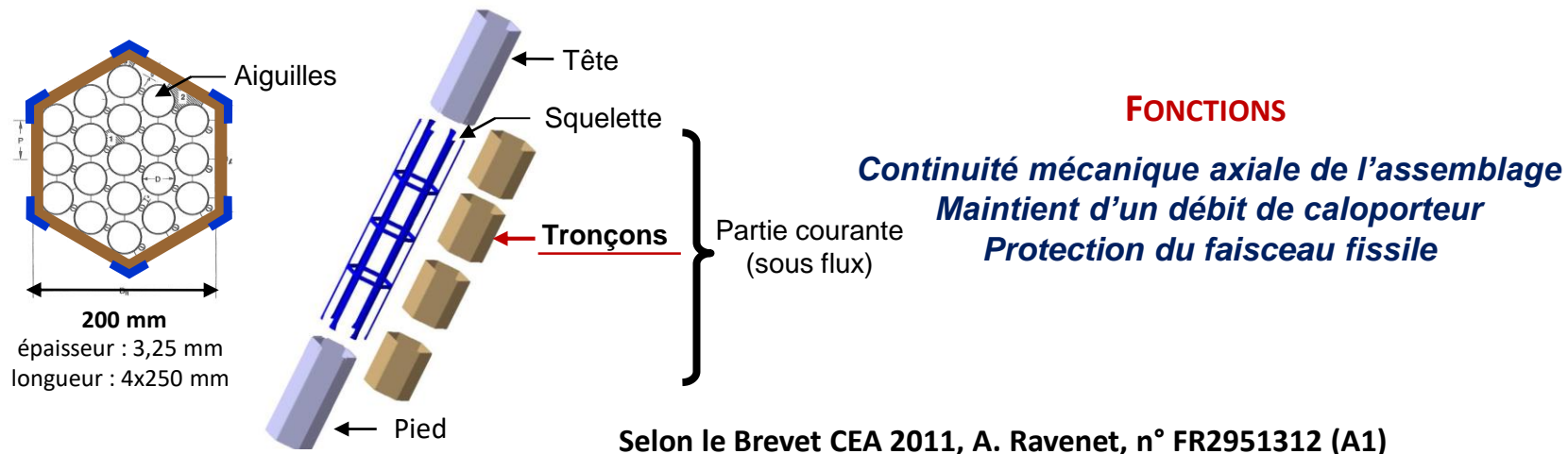
26 NOVEMBRE 2014

Objectif de la R&D – Démontrer la faisabilité de fabrication de tronçons hexagonaux en composites SiC/SiC pour application nucléaire

CONTEXTE

■ Tube hexagonal : le concept de « TH mixte »

- Motivations :
- ▶ Solution purement métallique écartée (pénalité neutronique, ex NbZrC ou V_4Cr_4Ti)
 - ▶ Transparence neutronique et réfractarité des composites SiC/SiC
 - ▶ Solution purement monobloc inenvisageable (liaisons métal/céramique « tête » et « pieds »)



■ Pré-dimensionnement des tronçons :

Contrainte principale → Flexion des faces induite par la surpression du caloporteur

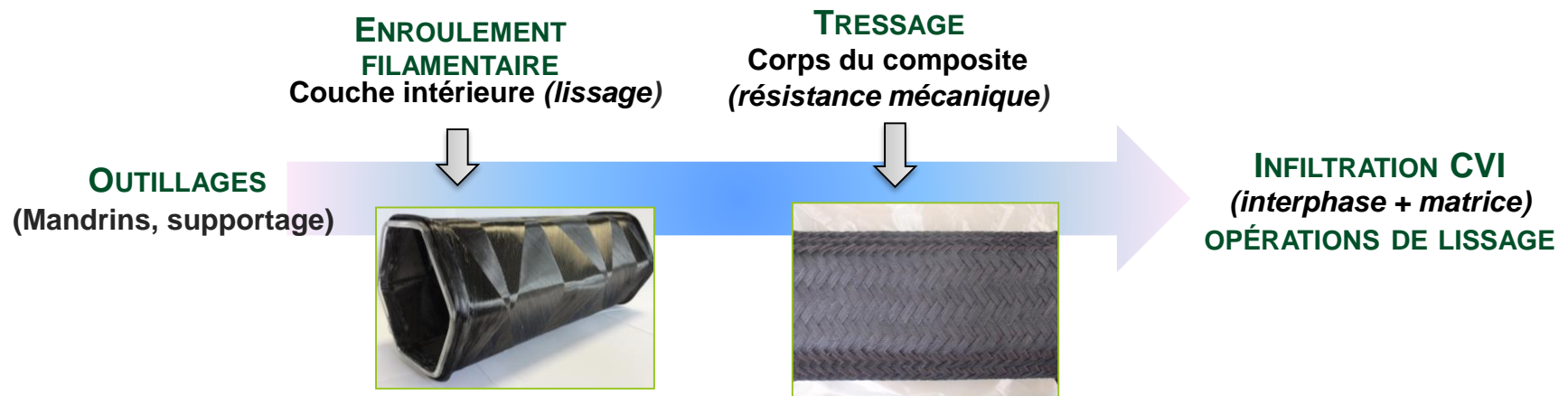
Bénéficiaire de l'expérience acquise dans la fabrication des gaines de combustible en SiC/SiC (*fibre SiC dernière génération et CVI*)

- Difficulté à surmonter : liée au choix et à la fabrication de la préforme fibreuse

CE QUI CHANGE POUR LE TH :



- Schéma évalué



COUCHE EXTERNE TRESSÉE

DIAMÈTRE

FORME

Tressage d'une structure « TH » impossible à partir du fil unitaire
Machine de grande capacité d'emport de fils (>800 fuseaux) non accessible



Nécessité d'une étape supplémentaire de reconditionnement du fil
Solution étudiée dans ce travail : tressage de fils assemblés

« + large » / Homogène / Stabilité dimensionnelle / Taux de fibre élevé

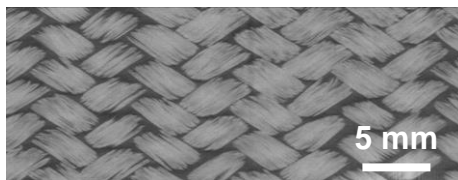


« Tresses plates » HNS 33 brins
(voie également explorée)

■ PROCÉDÉ DE MISE EN FORME RETENUE:

Tressage interlock de fils plats assemblés « multibrins »

Travaux menés avec fibres de
Carbone à l'échelle 1/2



	SiC Hi-NS	Carbone M40J
Module fibre (GPa)	375	377
Fibre par fil	500	3K
Diamètre (µm)	13	5
Titre (g/1000m)	191	113

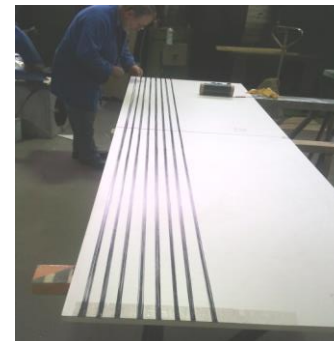
■ PRÉPARATION DES FILS MULTIBRINS

Etape effectuée directement à partir du fil brut de réception

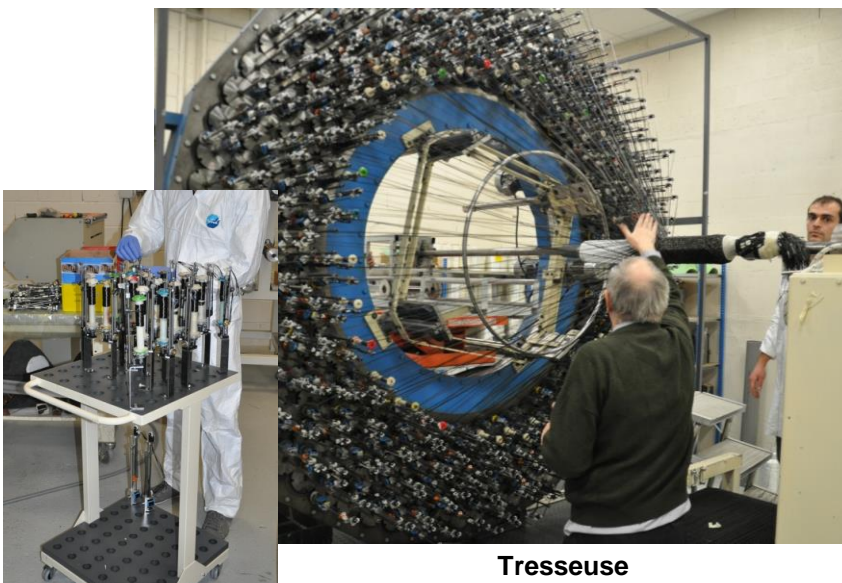
Paramètres retenus :

- Assemblage 10 fils unitaires
(maximum possible, défini par les fuseaux existants)
- Retordage à 10 tr/m
(compromis maintien du fils / comportements)

Largeur cible : > 4 mm



■ TRESSAGE MULTICOUCHE INTERLOCK



Tresseuse

Adaptation des fuseaux

- ▶ Pleine occupation machine (320 fuseaux)
- ▶ Angle moyen fixé à 45°

2 pièces tressées

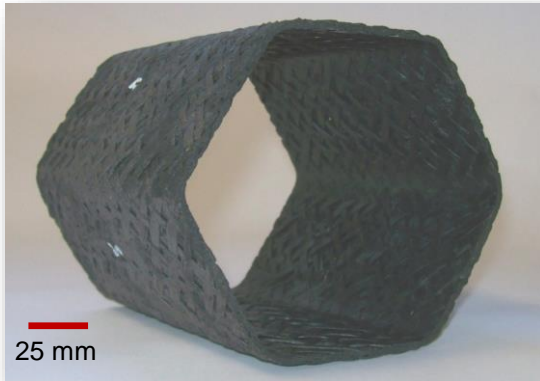


Matériau
« académique »

« Proto complet »

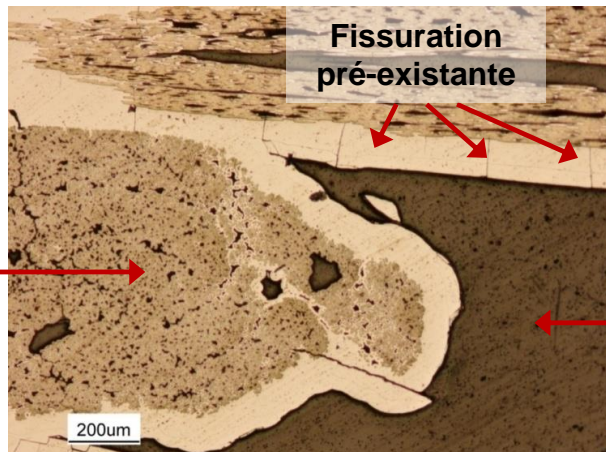
STRUCTURALES ET MICROSTRUCTURALES

■ PIÈCES DENSIFIÉES (INSTALLATION CEA)



► Conditions recherchées pour obtenir un comportement endommageable – Interphase PyC

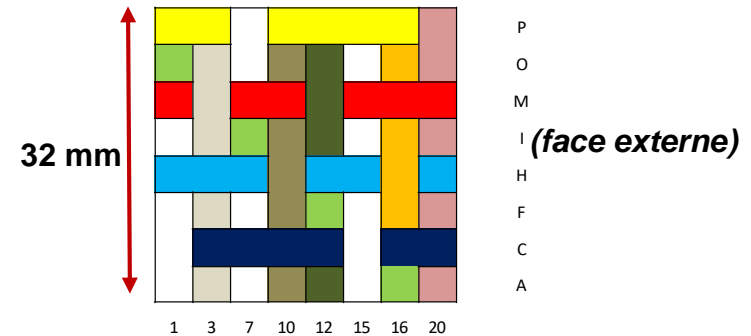
Couche tressée uniquement



Confirmation de l'endommagement initial caractéristique des C/SiC

Maille élémentaire

► Du même ordre de grandeur que la largeur des plats
Construit sur 8x8 fils (surface de 32x32 mm²)

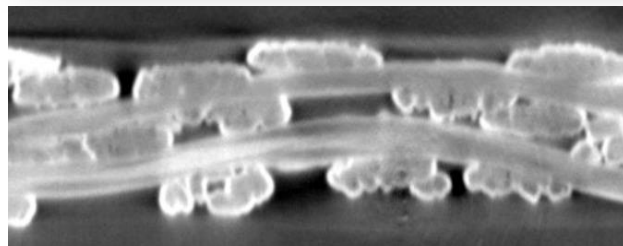
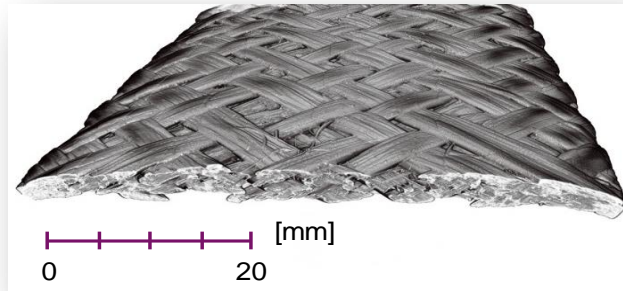


STRUCTURALES ET MICROSTRUCTURALES

■ Analyses en Tomographie X

1^{er} résultat

– Bonne couverture –
mais obtenue par la présence des fils sous-jacents

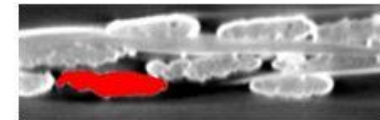


Macroporosité inhérent au tressage interlock

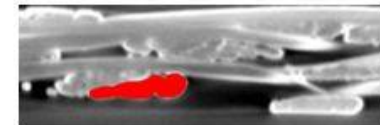
2nd résultat

Mise en évidence de l'inhomogénéité
des fils qui se « désolidarisent »

Plan 1



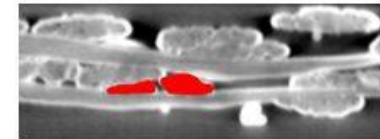
Plan 2



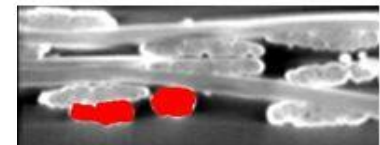
Plan 3



Plan 4



Plan 5



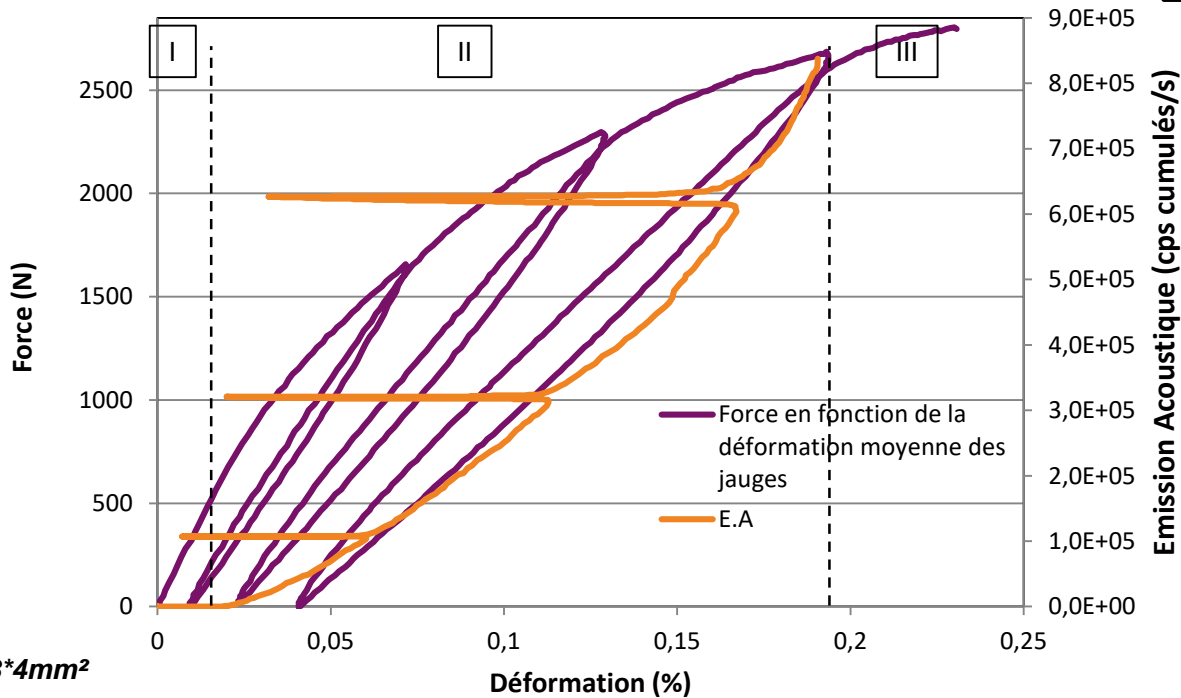
COMPORTEMENT MÉCANIQUE

Validation du comportement « endommageable »

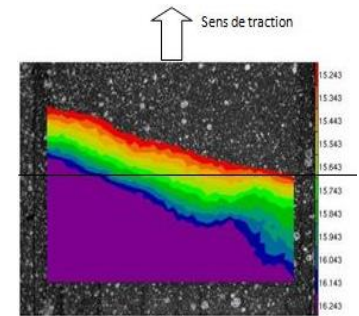
TRACTION CYCLÉE UNIAXIALE – PRÉLÈVEMENT À 0°



Eprouvette : 18*4mm²



- I Elastique
- II Fissuration matricielle
- III Reprise filamentaire



Corrélation d'image



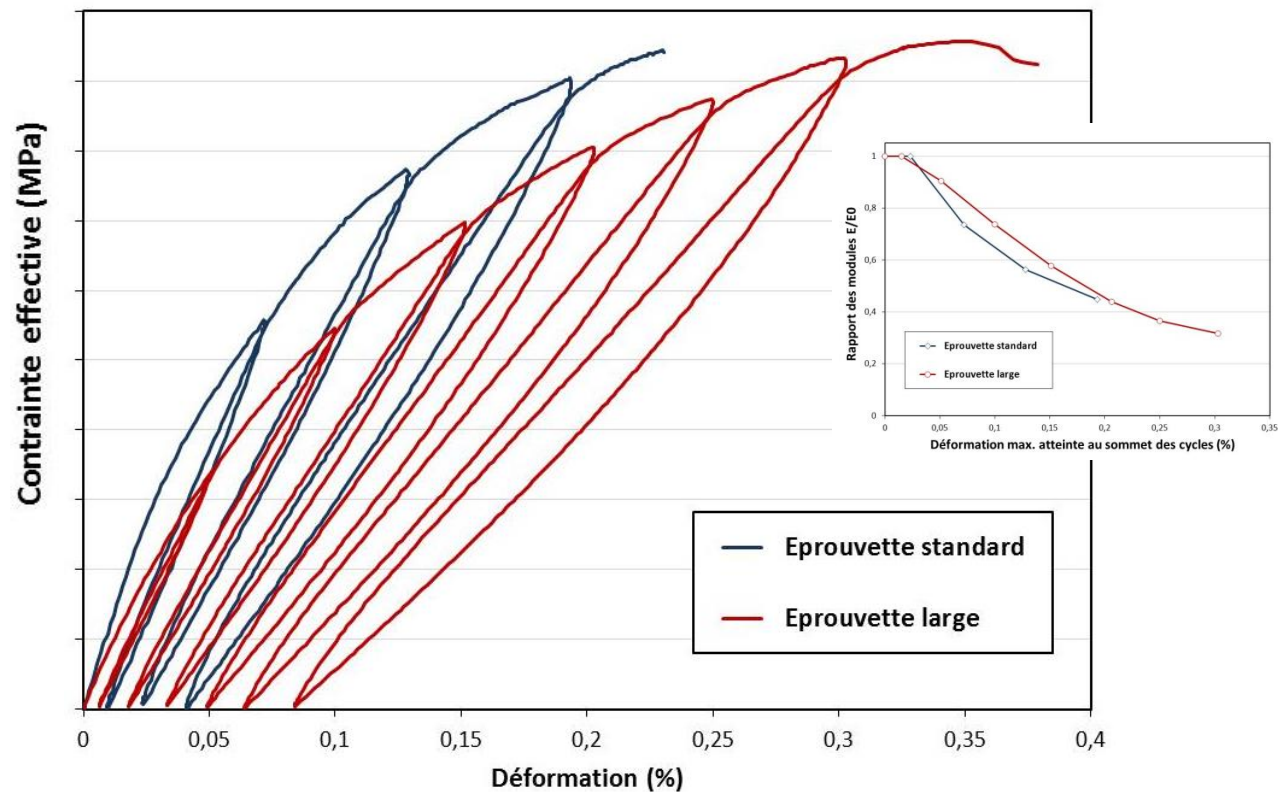
Eprouvette rompue

Pertinence de cette voie pour concevoir un matériau « défragilisé »

COMPORTEMENT MÉCANIQUE

■ Validation du comportement « endommageable »

TRACTION CYCLÉE UNIAXIALE – PRÉLÈVEMENT À 0° - EPROUVETTE LARGE (37MM)



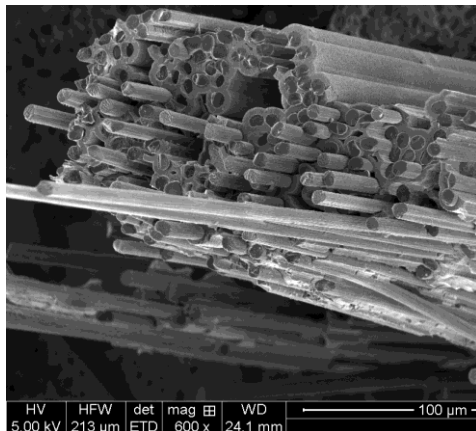
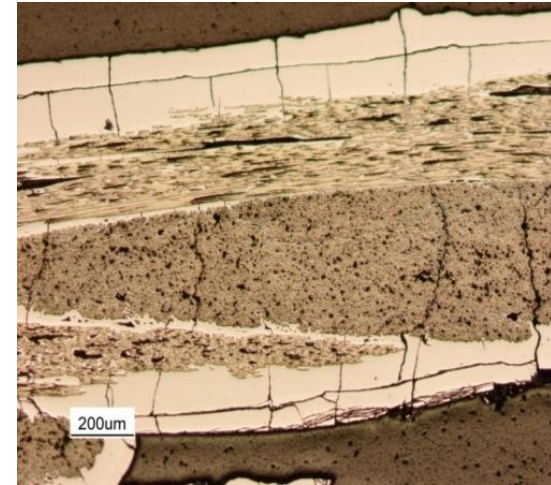
Eprouvette rompue

Effet d'échelle démontré, résultats à corrélérer avec la taille du motif élémentaire

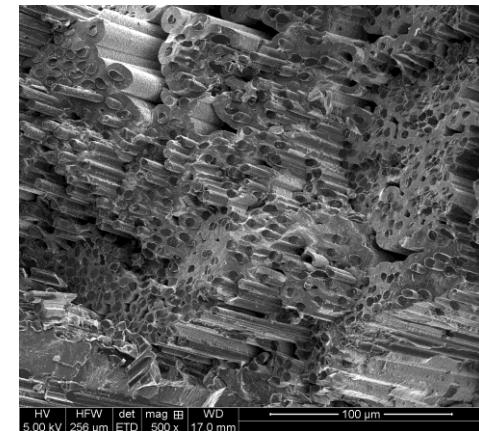
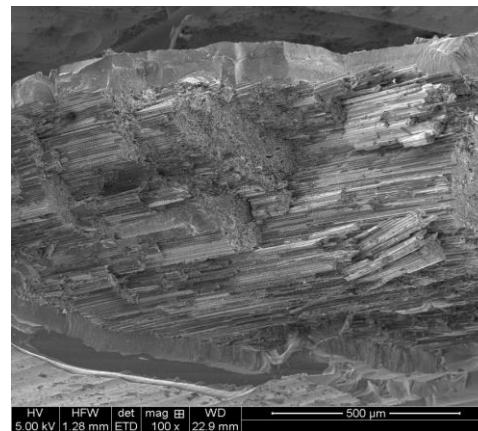
COMPORTEMENT MÉCANIQUE

■ Examen post-mortem

- ▶ Net augmentation de l'endommagement
 - Fissuration intra-fil perpendiculaire à la direction de sollicitation
 - Fissuration matricielle en surface



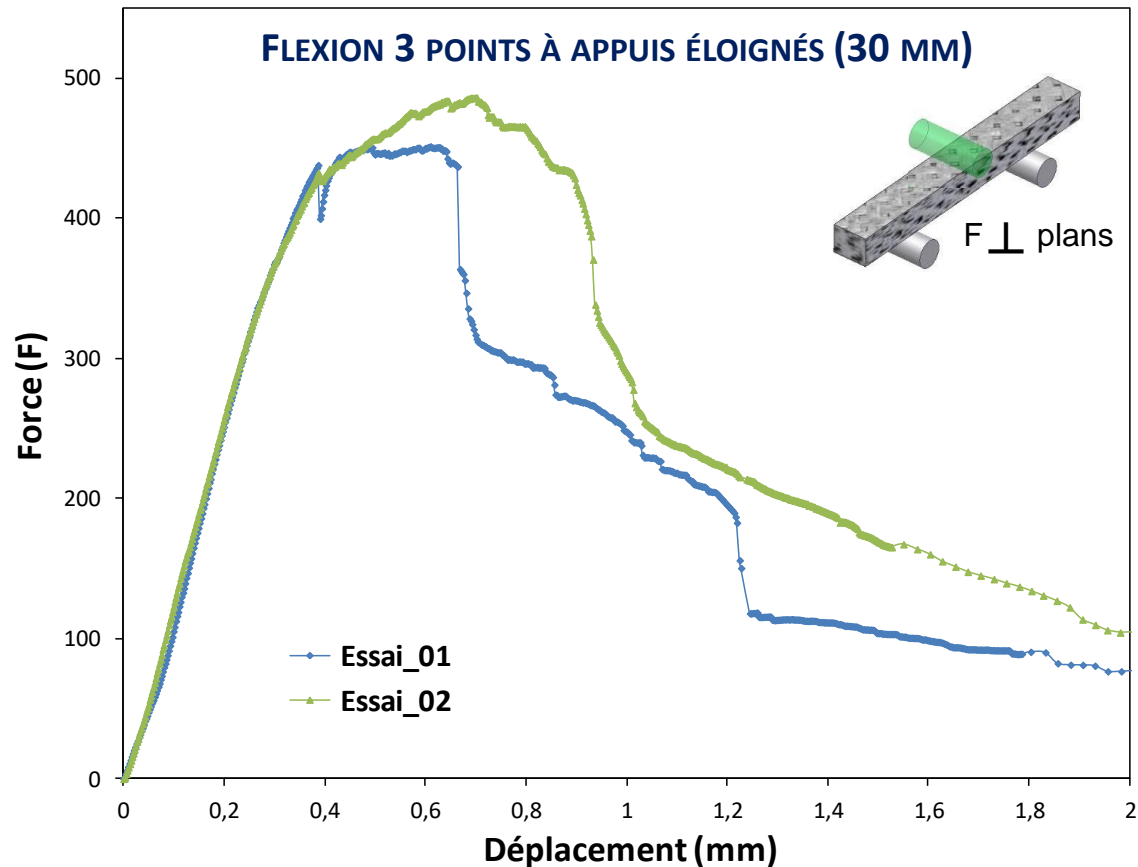
- ▶ Longue extraction de fibres modestes



- ▶ Rupture en « Cascade »
sous entendu par paquets de fibres au sein d'un fil multibrin (différents niveaux)

COMPORTEMENT MÉCANIQUE

■ Essais de dimensionnement – flexion 3 points



Comportement reproductible

Rupture non brutale
(*sous les appuis*)



Validation de la structure à accommoder une déformation par endommagement

ENSEIGNEMENTS ET SUITES À DONNER

- ▶ **Fabrication d'un composite C/SiC de géométrie compatible avec l'application TH démontrée**
- ▶ **Pertinence de la voie explorée pour concevoir un matériau défragilisé :**
 - Comportement *non linéaire élastique endommageable*, capable de supporter une contrainte localisée, et de se déformer,
 - Endommagement prédominant :
Fissuration intra-fil transverse, désolidarisation des brins au sein des fils

Le procédé reste cependant perfectible

- ▶ **Nécessité d'un procédé robuste pour la préparation des fils**
 - Suppression de la désolidarisation au sein des fils
 - Etude des fils multi-brins seuls en SiC, mini-composite
- ▶ **Tressage 2D préconisé au Tressage interlock**
 - Structure serrée, taux de fibre élevé, élimination de la macroporosité
- ▶ **Envisager de combler les macroporosités par une matrice SiC en voie liquide**
 - Élimination de la macroporosité
 - Nécessité toutefois de garder une pureté élevée (grade nucléaire)



MERCI DE VOTRE ATTENTION

Christophe Lorrette, Cédric Sauder

CEA-Saclay, DEN, Gif-sur-Yvette, France

et

Rémi Bertrand, Gérald Camus

LCTS, UMR CNRS-UB-CEA-SAFRAN, Pessac, France

LES ACQUIS

- **MANDRIN ET OUTILLAGE SUPPORT** (brevet CEA 2011, C. Sauder et C. Lorrette, n°FR 2972448)

**Mandrin en verre de silice**

- ▶ Géométries définies / respects des côtes (courbure et plat)
- ▶ Finition sablée (positionnement des fils amélioré, glissement limité)

Réalisation d'outillages support

- ▶ Serrage ajustable
- ▶ Emport de deux pièces – ici à l'échelle 1/2

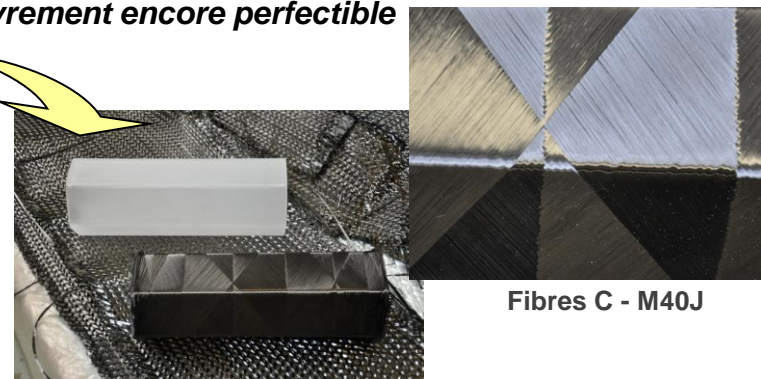
Opération d'extraction des mandrins après consolidation validée

- **COUCHE INTERNE DU COMPOSITE :**

Enroulement filamentaire réalisé à partir du fil unitaire (Angle 55°, patron 1/2)



Reproduit avec fibre C sans difficulté, mais recouvrement encore perfectible



Réalisation sur les moyens propres CEA (DMN/SRMA/LTMEX)