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

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

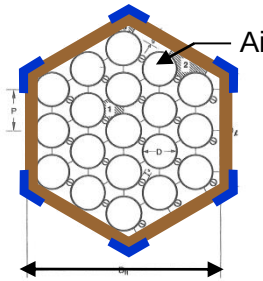
26 NOVEMBRE 2014

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

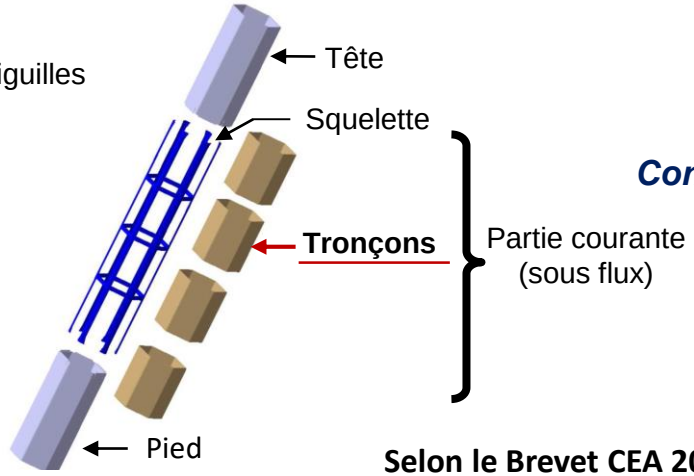
CONTEXTE

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 »)**



200 mm
épaisseur : 3,25 mm
longueur : 4x250 mm



FONCTIONS

Continuité mécanique axiale de l'assemblage
Maintient d'un débit de caloporteur
Protection du faisceau fissile

Selon le Brevet CEA 2011, A. Ravenet, n° FR2951312 (A1)

Pré-dimensionnement des tronçons :

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

FABRICATION

Bénéficier 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**

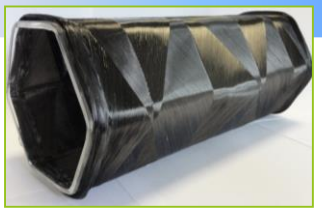
CE QUI CHANGE POUR LE TH :

EPAISSEUR	DIAMÈTRE	FORME
1 mm → 3,25 mm	10 mm → 200 mm	Cylindrique → Hexagonal

- **Schéma évalué**

OUTILLAGES
(Mandrins, supportage)

ENROULEMENT FILAMENTAIRE
Couche intérieure *(lissage)*



TRESSAGE
Corps du composite
(résistance mécanique)

INFILTRATION CVI
(interphase + matrice)
OPÉRATIONS DE LISSAGE

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

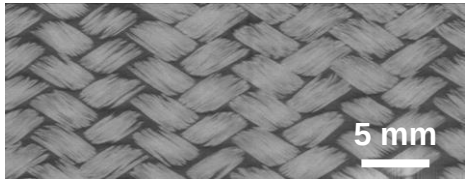
« + large » / Homogène / Stabilité dimensionnelle / Taux de fibre élevé

« 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

FABRICATION

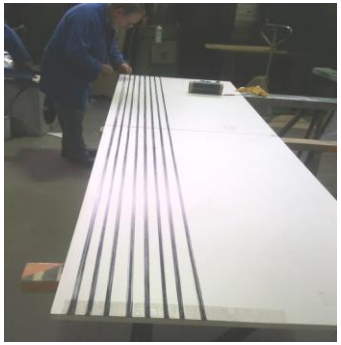
PRÉPARATION DES FILS MULTIBRINS

Etape effectuée directement à partir du fil brut de réception

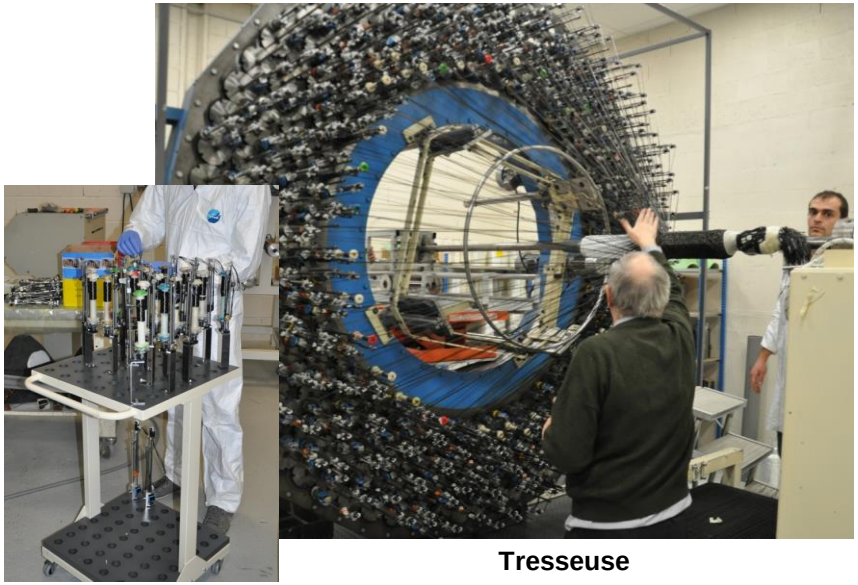
Largeur cible : > 4 mm

Paramètres retenus :

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



TRESSAGE MULTICOUCHE INTERLOCK



Tresseuse

Adaptation des fuseaux

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

2 pièces tressées

Matériau « académique »

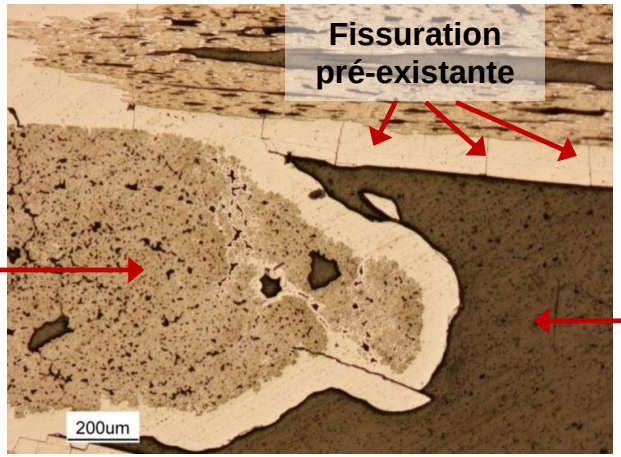
« Proto complet »

STRUCTURALES ET MICROSTRUCTURALES

PIÈCES DENSIFIÉES (INSTALLATION CEA)

- **Conditions recherchées pour obtenir un comportement endommageable – Interphase PyC**

Couche tressée uniquement



Bonne infiltration des fils

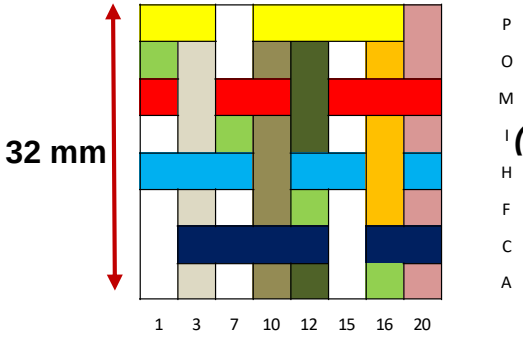
Macroporosité impossible à combler par CVI

Confirmation de l'endommagement initial caractéristique des C_f/SiC

Maille élémentaire

- **Du même ordre de grandeur que la largeur des plats**

Construit sur 8x8 fils (surface de 32x32 mm²)



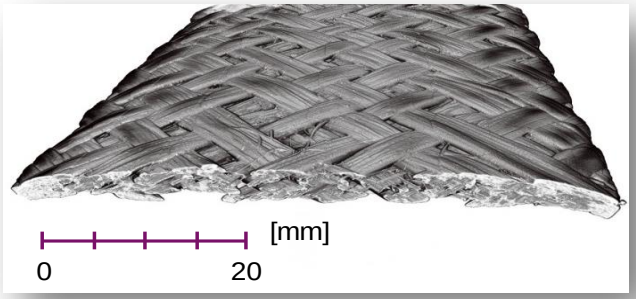
(face externe)

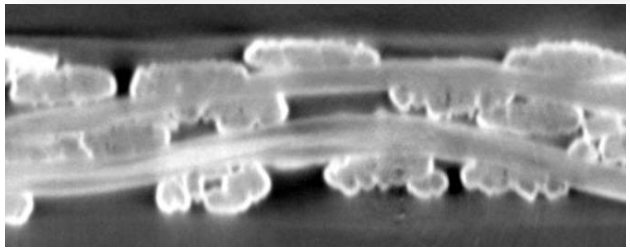
STRUCTURALES ET MICROSTRUCTURALES

- **Analyses en Tomographie X**

1er résultat

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

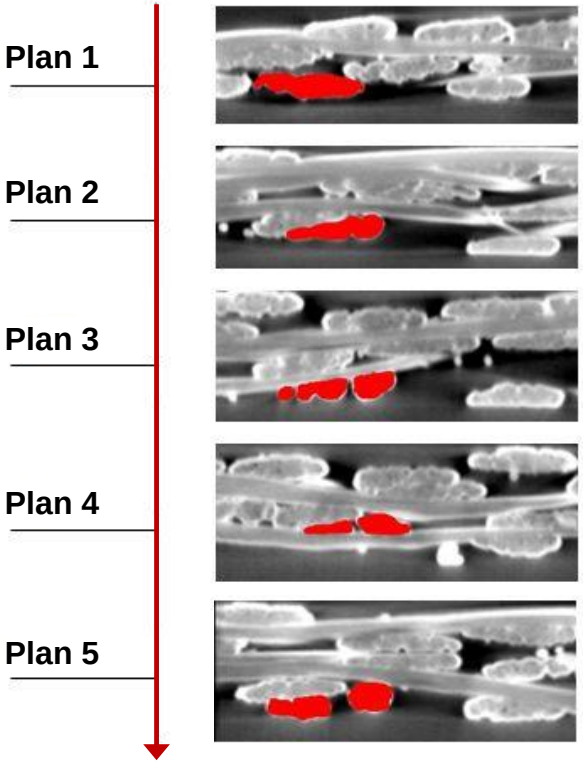




Macroporosité inhérent au tressage interlock

2nd résultat

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



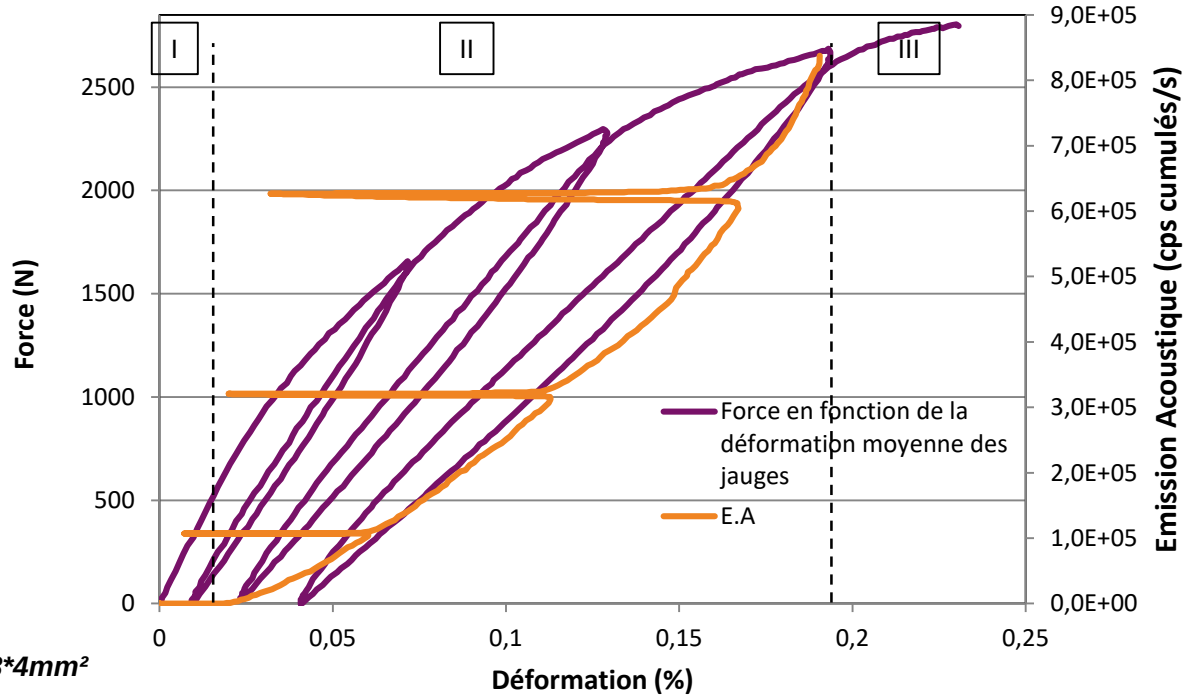
Comportement Mécanique

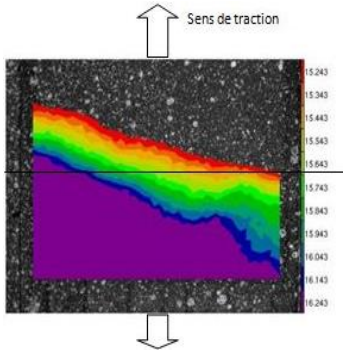
- **Validation du comportement « endommageable »**

I	Elastique
II	Fissuration matricielle
III	Reprise filamentaire

Traction cyclée uniaxiale – Prélèvement à 0°

*Eprouvette : 18*4mm²*





Corrélation d'image

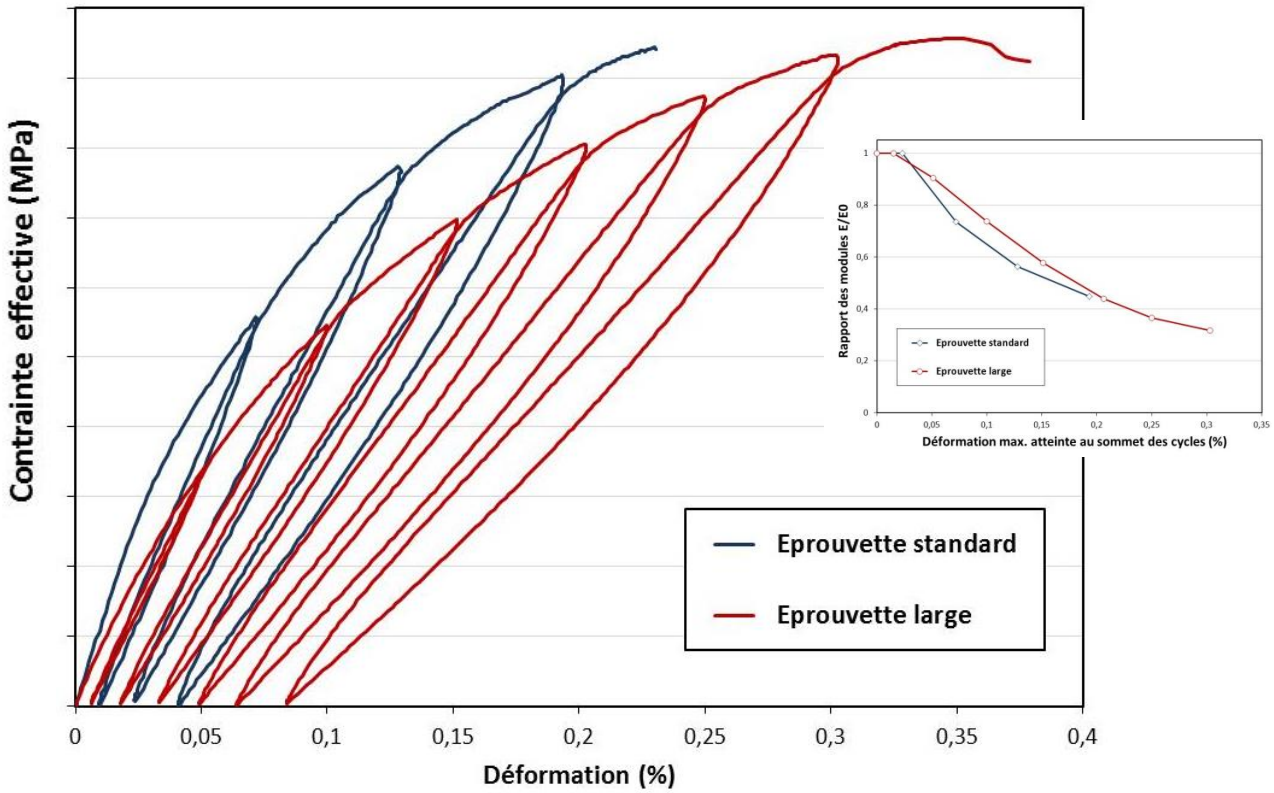
Eprouvette rompue

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

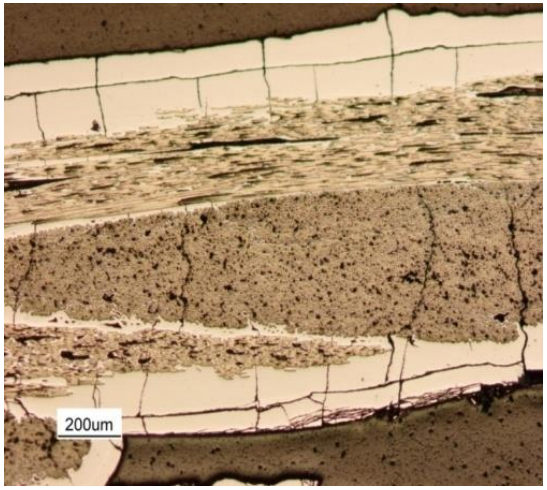
Effet d'échelle démontré, résultats à corréler avec la taille du motif élémentaire

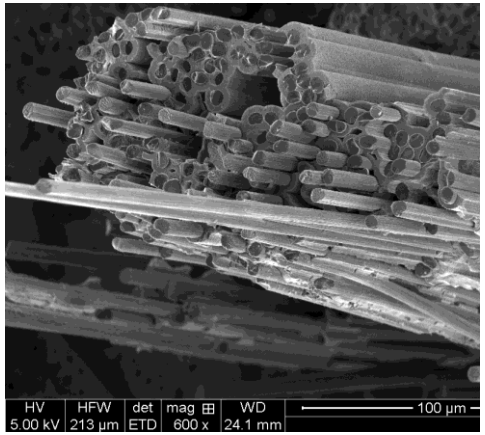
CARACTERISATIONS

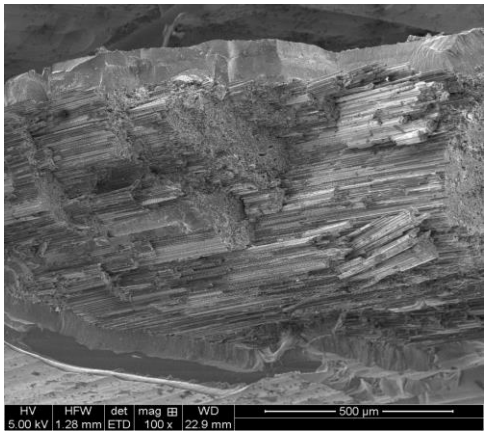
COMPORTEMENT MÉCANIQUE

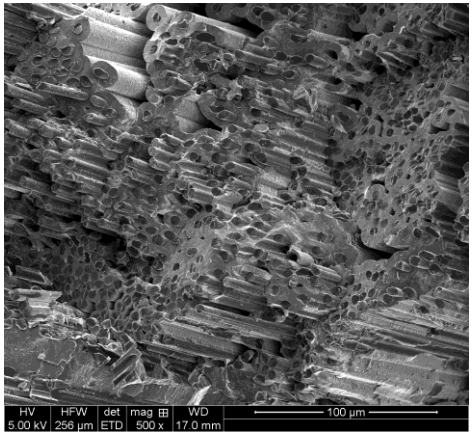
- **Examen post-mortem**

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









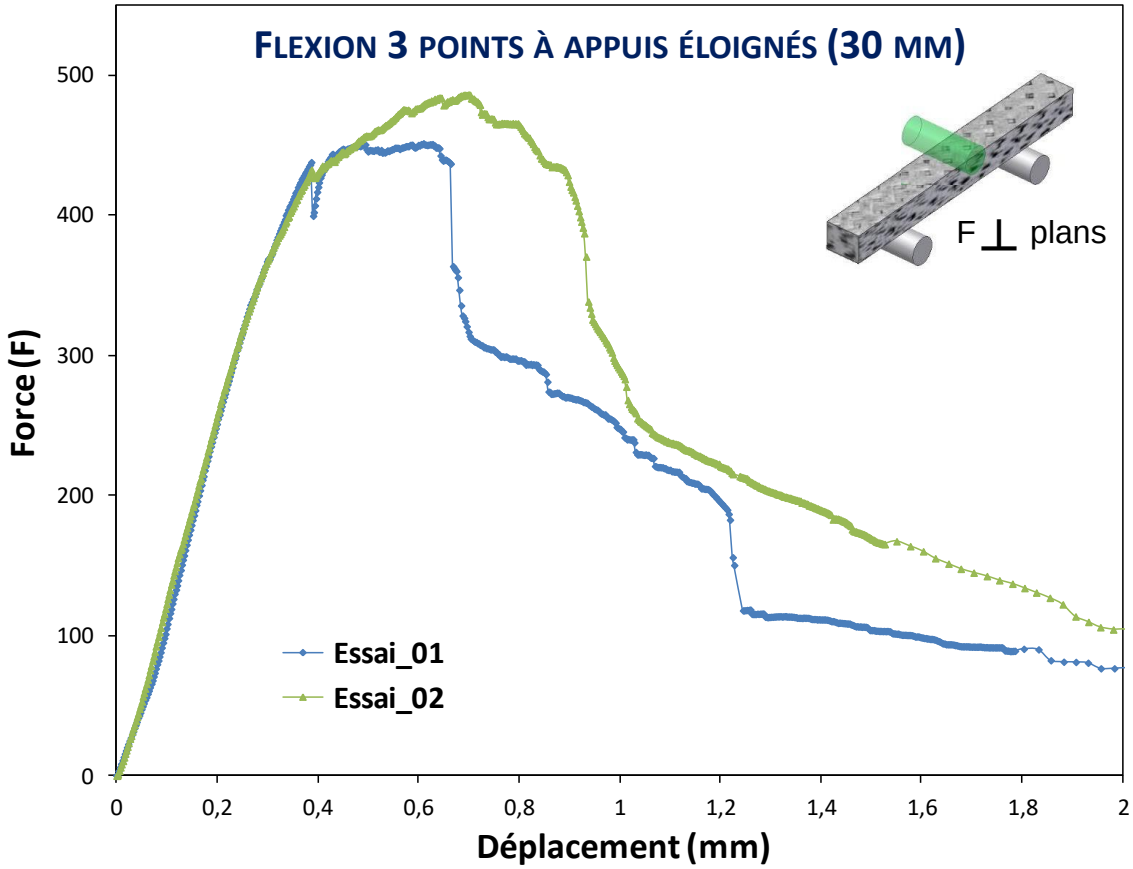
- **Longueur extraction de fibres modestes**

- **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

CONCLUSION

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**
  - Elimination de la macroporosité
  - Nécessité toutefois de garder une pureté élevée (grade nucléaire)

MATÉRIAUX 2014
Montpellier 24-28 NOVEMBRE

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

BACK-UP

Les Acquis

- **Mandrin et outillage support (brevet CEA 2011, C. Sauder et C. Lorrette, n°FR 2972448)**

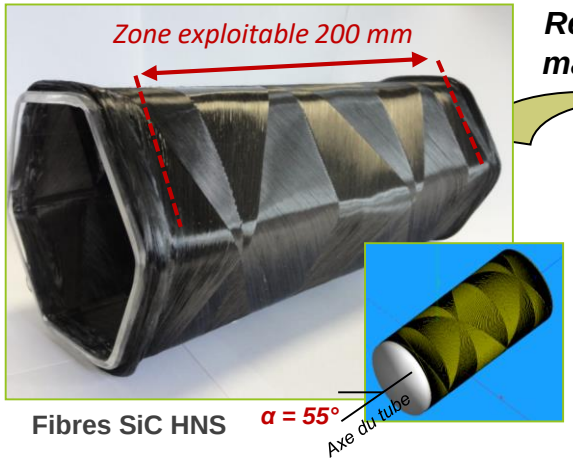
Mandrin en verre de silice
- Géométries définies / respects des côtes (courbure et plat)
- Finition sablée (positionnement des fils amélioré, glissement limité)

Réalisation d'outillages support
- Serrage ajustable
- Emport de deux pièces – ici à l'échelle 1/2

Opération d'extraction des mandrins après consolidation validée

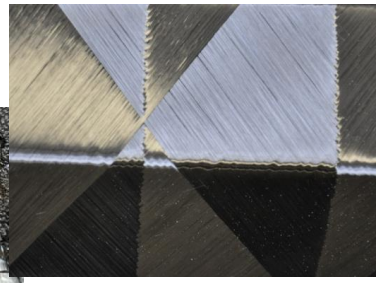
- **Couche interne du composite :**

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



Fibres SiC HNS

Reproduit avec fibre C sans difficulté, mais recouvrement encore perfectible



Fibres C - M40J

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