



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

*Liberté
Égalité
Fraternité*

ONERA

THE FRENCH AEROSPACE LAB

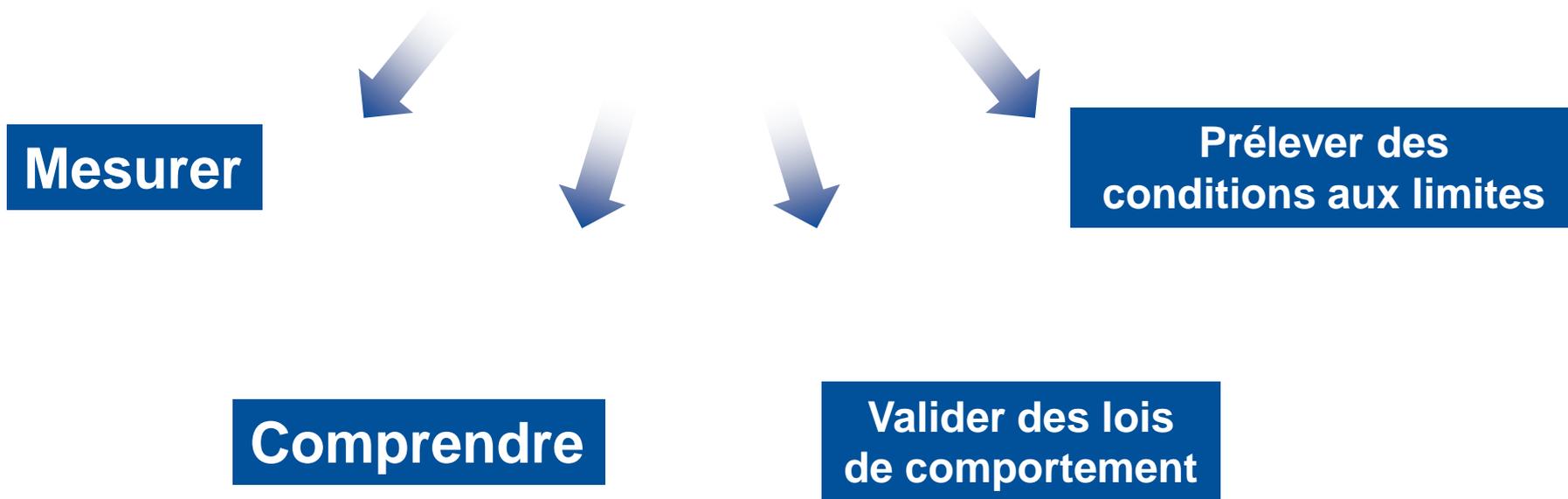
Vers le dialogue essai-calcul multi-échelle à travers la multi-instrumentation d'essais

Juan-Manuel García, François-Xavier Irisarri, Frédéric Laurin, Cédric Huchette

ONERA / DMAS / MC²

DMAS, ONERA, Université Paris-Saclay, F-94230, Châtillon, France

Pourquoi instrumenter ?

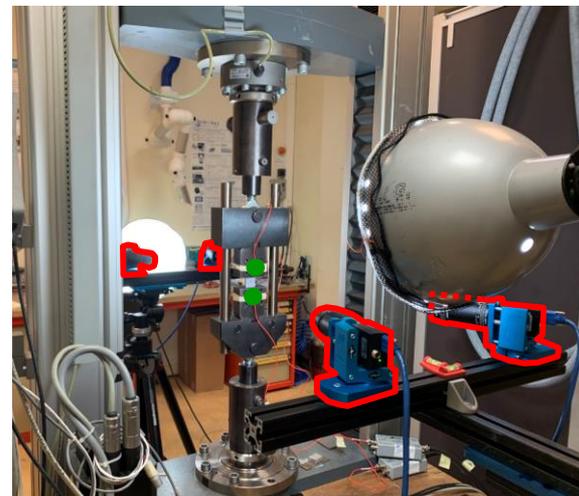
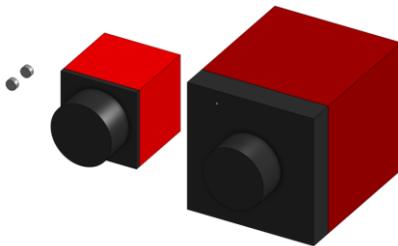


Mesures issues de l'instrumentation

Instrumentation d'essais sur structures mécaniques sur structures composites

Moyens d'instruments utilisés au sein de notre unité

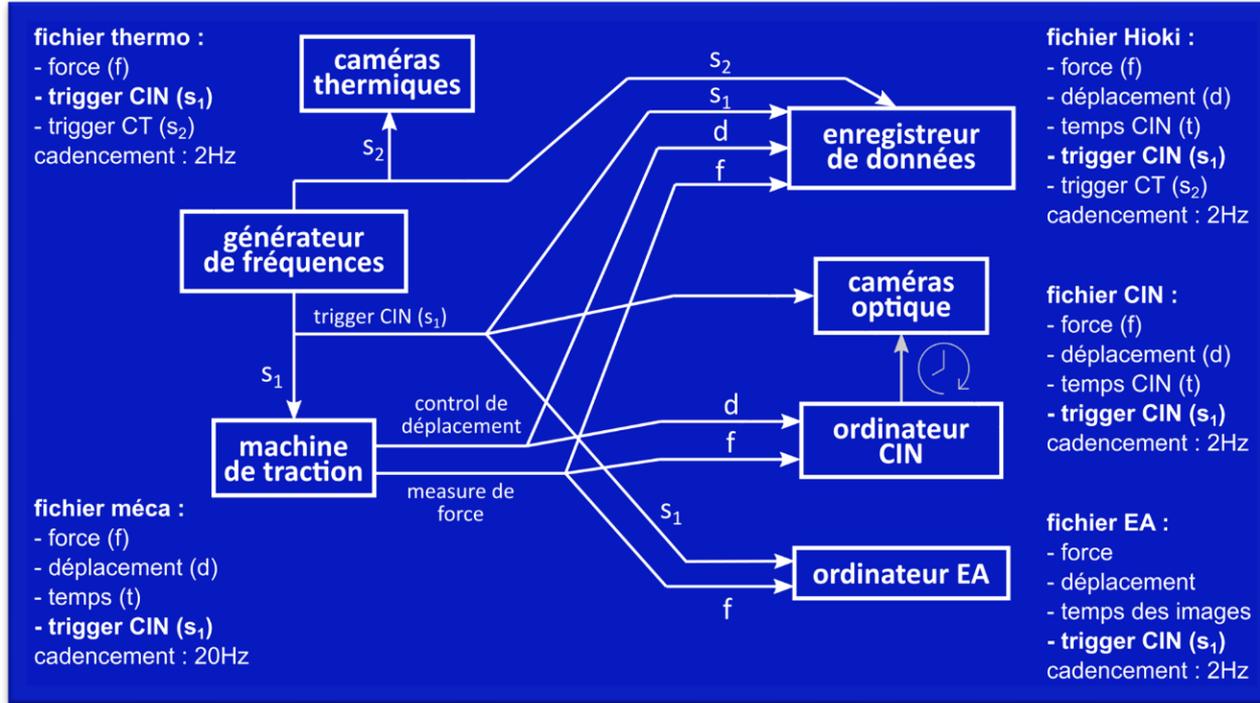
- Caméras optiques pour Corrélation d'Images Numériques
 - Vic 3D, EikoTwin, Escal, DeepFlow, ...
 - Output : **champs de déplacements 3D [mm] et de déformation 2D [%]**
- Capteurs d'émissions acoustiques
 - Output : **descripteurs des évènements acoustiques (fréquence [Hz], amplitude [dB], énergie [J], nb de coups [1])**
- Caméras thermiques
 - Output : **champs de température [C]**
- Capteurs de déplacement (LVDT)
 - Output : **déplacement ponctuel [mm]**
- Tomographie *ex-situ* et *in-situ*
 - Output : **niveaux de gris proportionnels à la densité de la matière observée**



Setup expérimentale pour essais de compression [Marquet *et al.*, 2025]

	CIN	EA	Tomo RX
Résolution spatiale	++	--	++++
Résolution temporelle	++ (surf)	++++ (vol)	- (vol)

Enregistrement synchronisé de données issues de l'instrumentation



Dépouillement et compréhension de données → Enregistrement synchronisé primordial

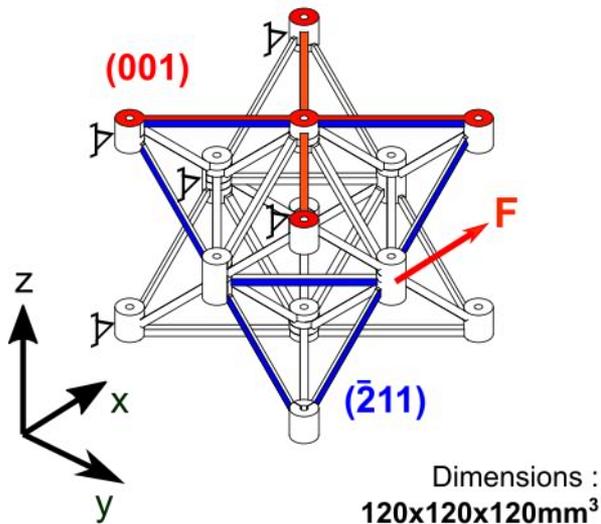
Setup expérimentaux complexes, besoin de espace de stockage, etc...

Compréhension de phénomènes

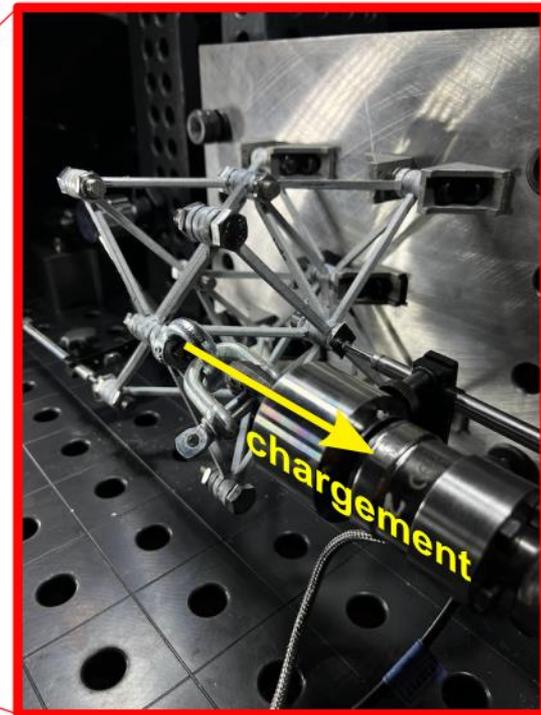
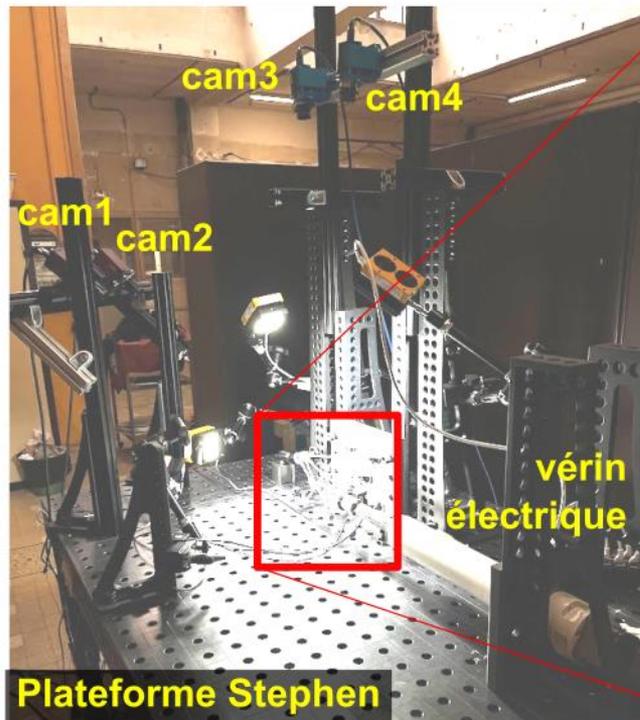
Instrumentation d'essais sur structures mécaniques sur structures composites

Comportement élastique et cinématique d'une structure architecturée

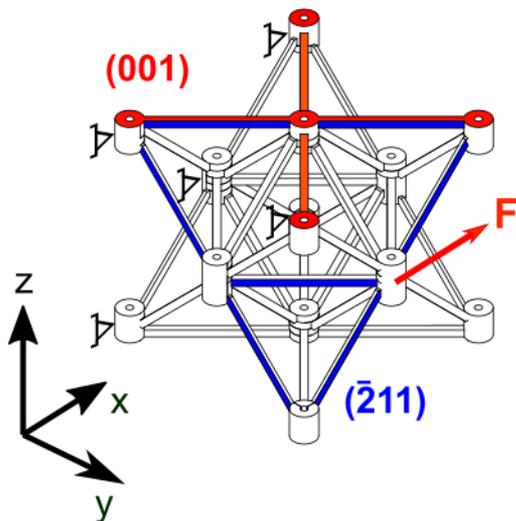
Projet interne ONERA/STARAC



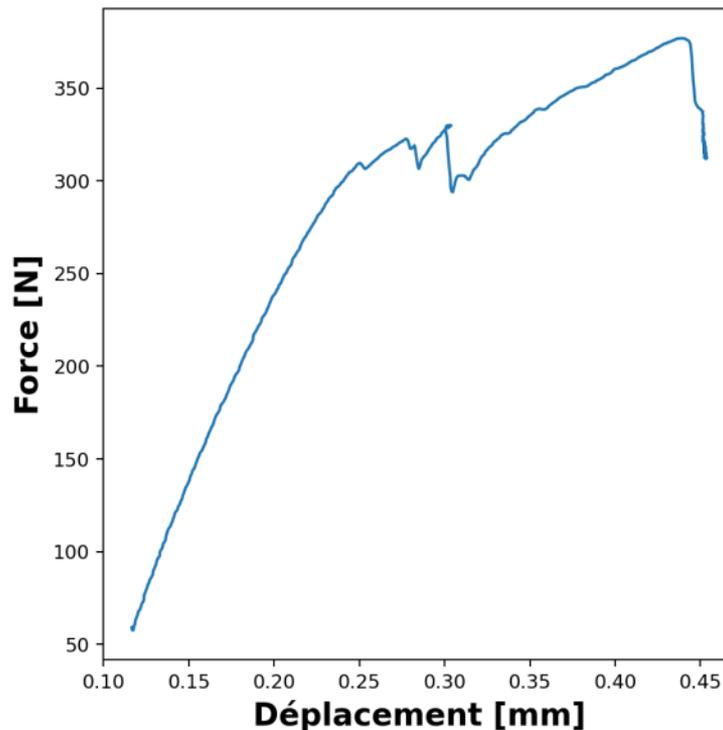
barres de matrice polymères
renforcées avec des fibres de carbone
assemblées avec des vis
Structure architecturée
ONERA/MC2) - PR STARAC



Essai de flexion sur structure architecturée



barres de matrice polymères
renforcées avec des fibres de carbone
assemblées avec des vis
Structure architecturée
ONERA/MC2) - PR STARAC



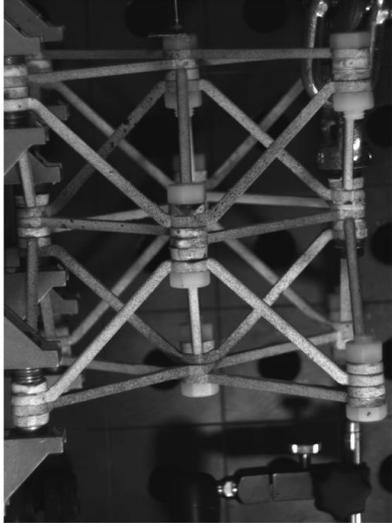
Structure assemblée avec
des vis en nylon
sans épaulement

Cinématique d'une structure architecturée sous un chargement de flexion

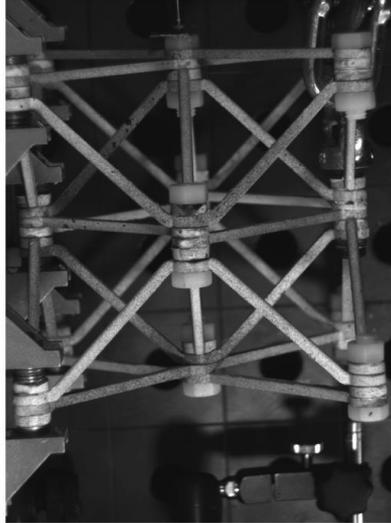
Post-traitement d'images obtenues lors de l'essai

Structure assemblée avec des vis en nylon (sans épaule)

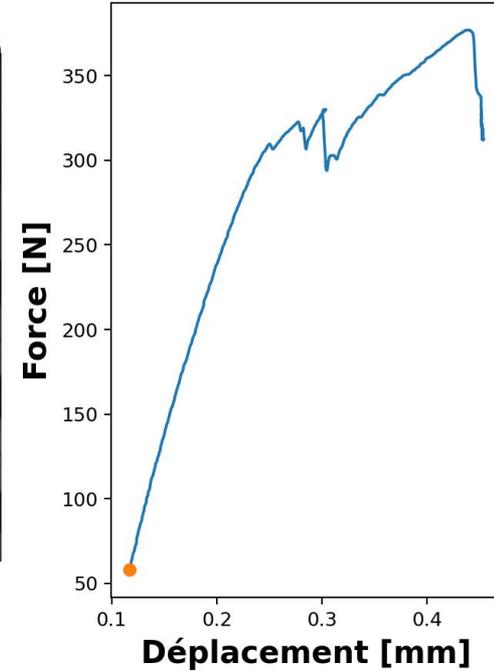
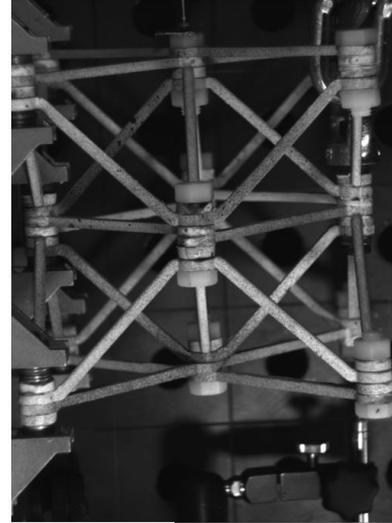
Image de référence



Déformée



Déformée (x20)



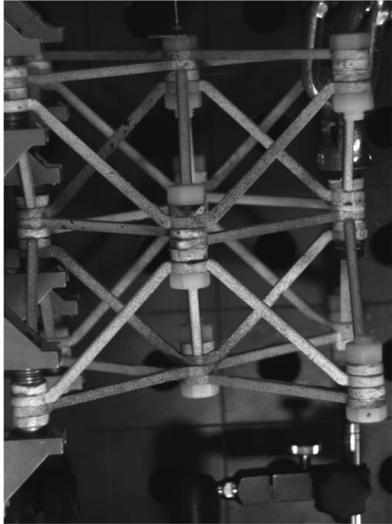
Partie linéaire de la courbe → Amplification de la déformée

Cinématique d'une structure architecturée sous un chargement de flexion

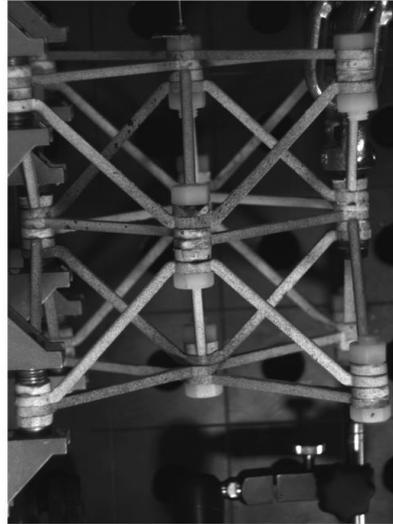
Post-traitement d'images obtenues lors de l'essai

Structure assemblée avec des vis en nylon (sans épaulement)

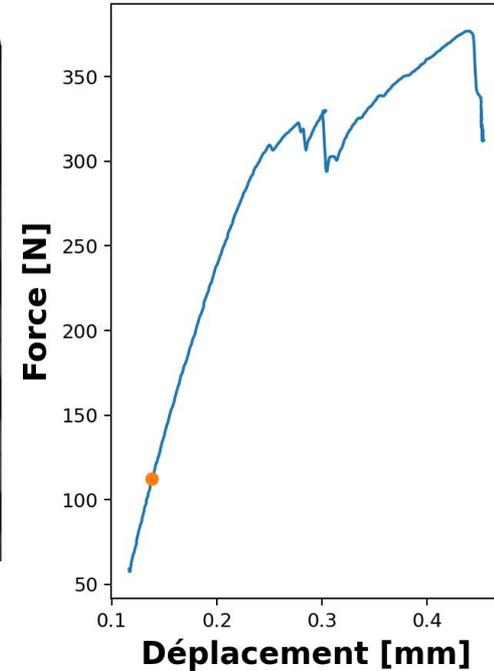
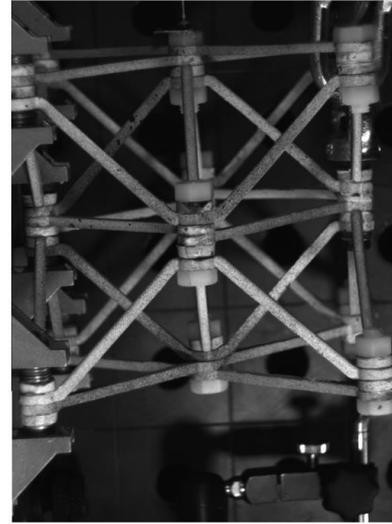
Image de référence



Déformée



Déformée (x20)



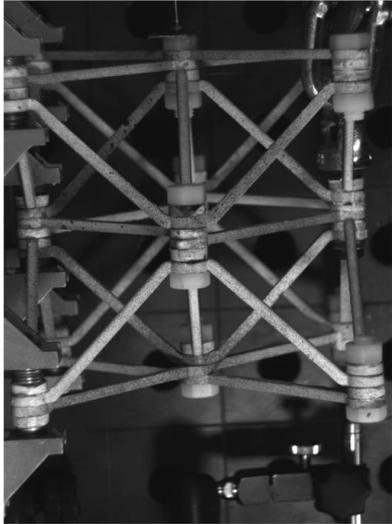
Partie linéaire de la courbe → Amplification de la déformée

Cinématique d'une structure architecturée sous un chargement de flexion

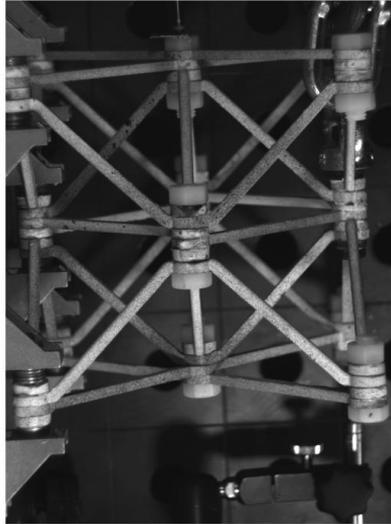
Post-traitement d'images obtenues lors de l'essai

Structure assemblée avec des vis en nylon (sans épaulement)

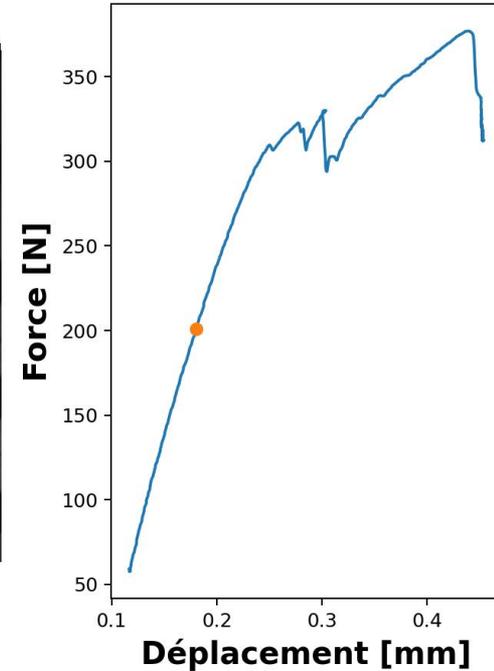
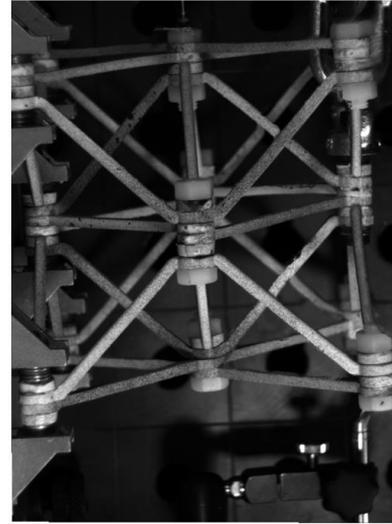
Image de référence



Déformée



Déformée (x20)



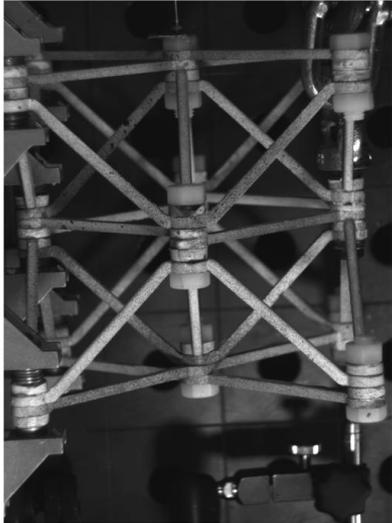
Partie linéaire de la courbe → Amplification de la déformée

Cinématique d'une structure architecturée sous un chargement de flexion

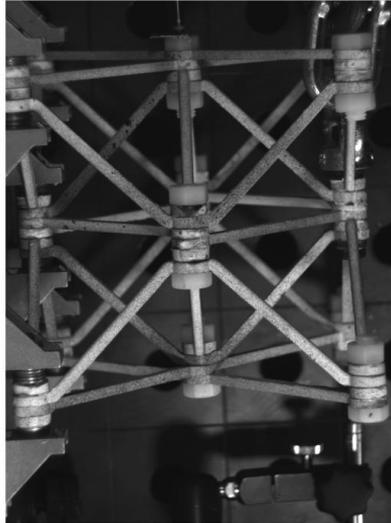
Post-traitement d'images obtenues lors de l'essai

Structure assemblée avec des vis en nylon (sans épaulement)

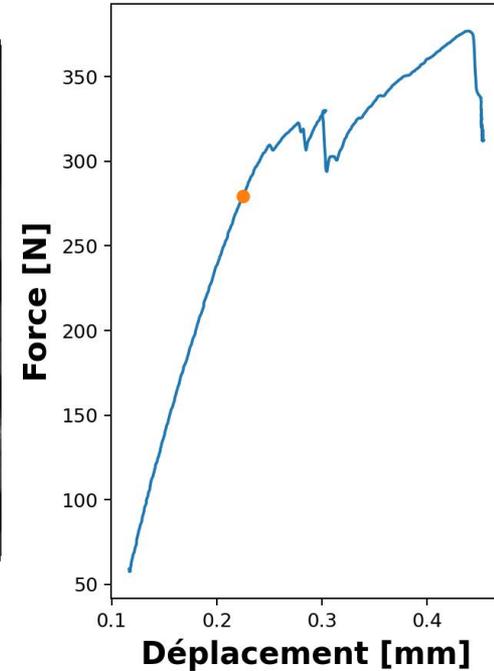
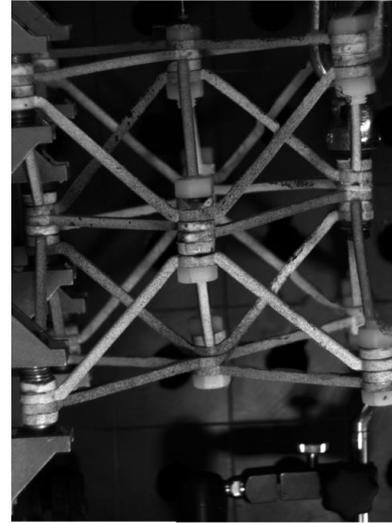
Image de référence



Déformée



Déformée (x20)



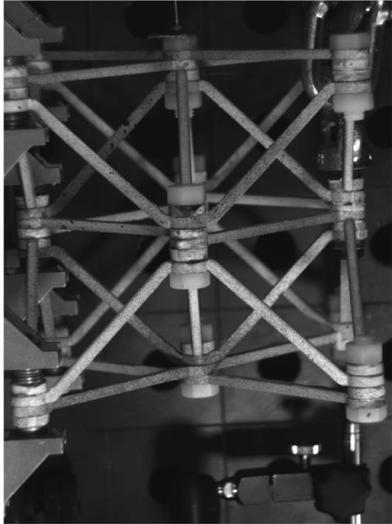
Partie linéaire de la courbe → Amplification de la déformée

Cinématique d'une structure architecturée sous un chargement de flexion

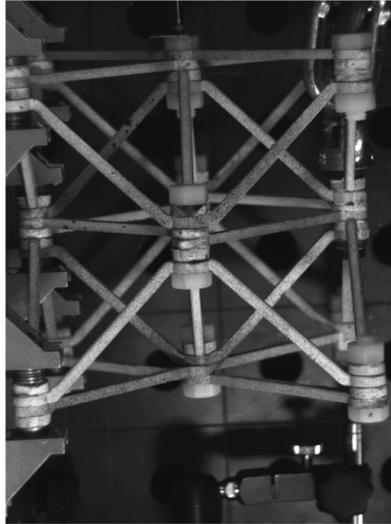
Post-traitement d'images obtenues lors de l'essai

Structure assemblée avec des vis en nylon (sans épaulement)

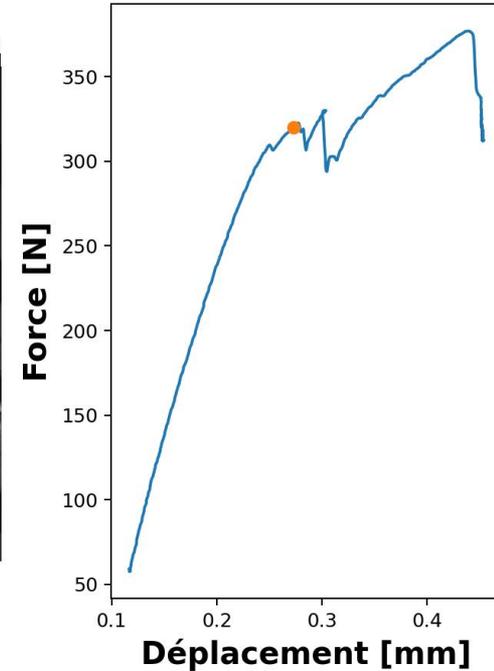
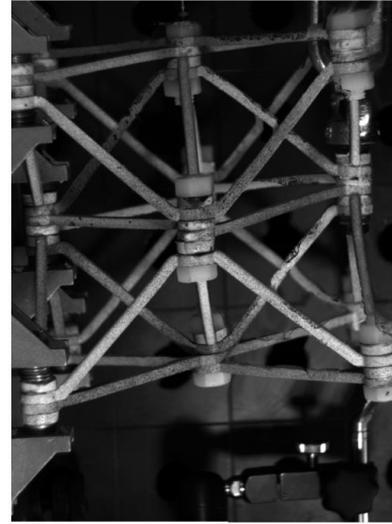
Image de référence



Déformée



Déformée (x20)



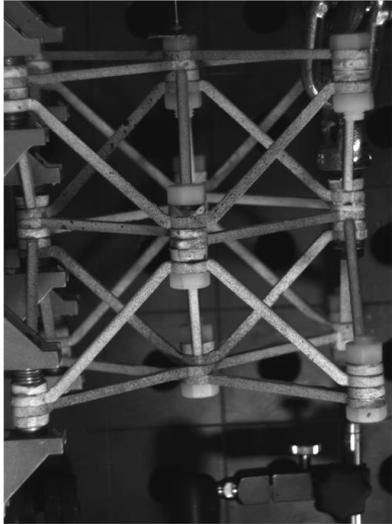
Première non linéarité → Cisaillement dans le nœud central

Cinématique d'une structure architecturée sous un chargement de flexion

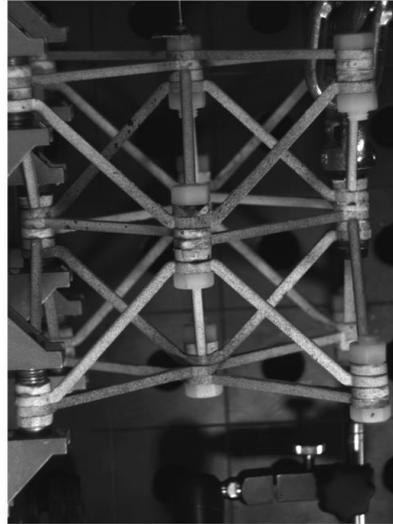
Post-traitement d'images obtenues lors de l'essai

Structure assemblée avec des vis en nylon (sans épaule)

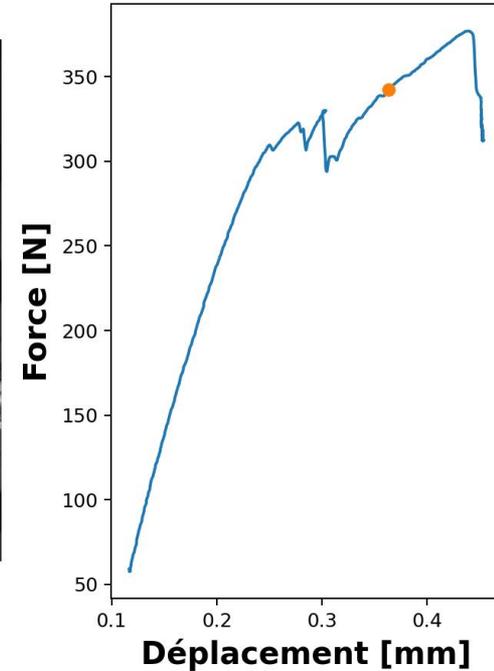
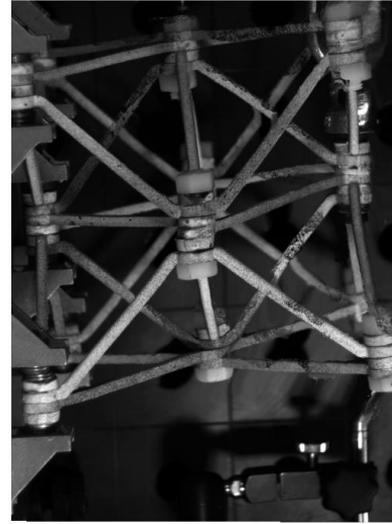
Image de référence



Déformée



Déformée (x20)



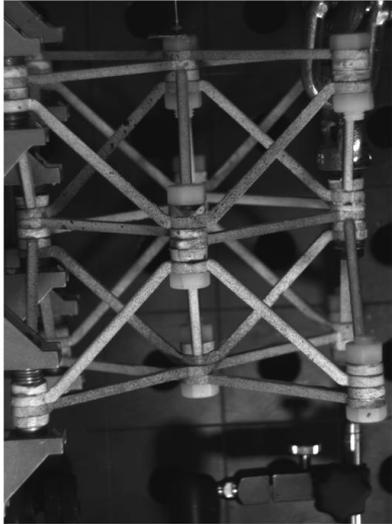
Première non linéarité → Cisaillement dans le nœud central

Cinématique d'une structure architecturée sous un chargement de flexion

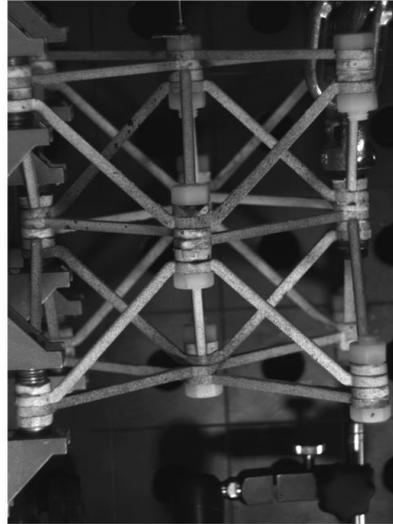
Post-traitement d'images obtenues lors de l'essai

Structure assemblée avec des vis en nylon (sans épaulement)

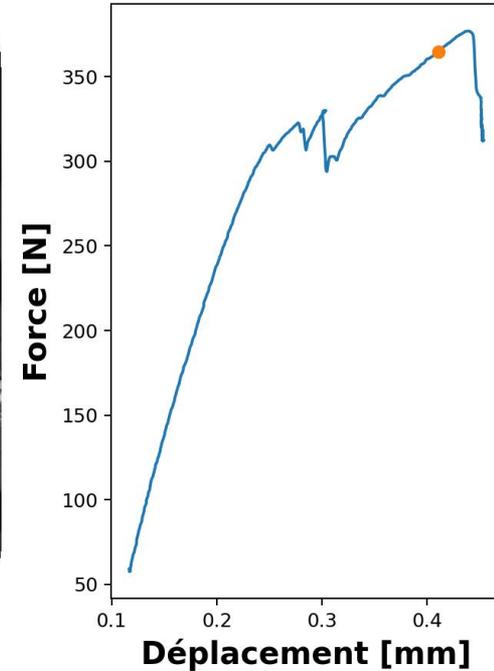
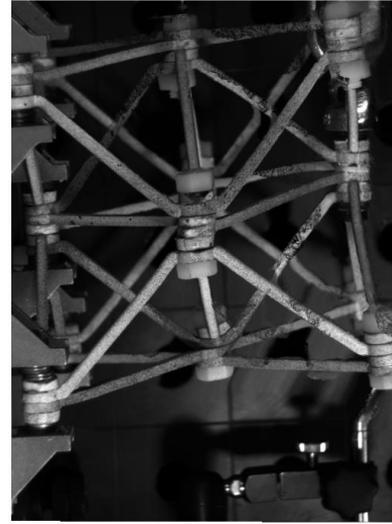
Image de référence



Déformée



Déformée (x20)



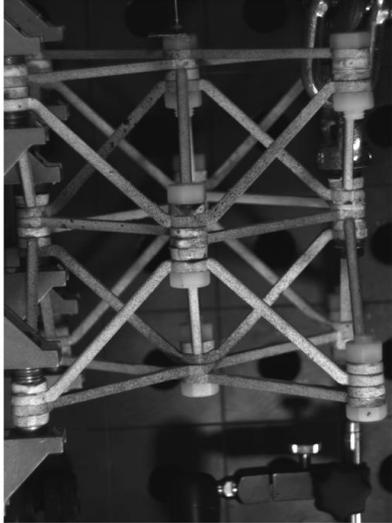
Deuxième réponse linéaire → Amplification d'une déformée

Cinématique d'une structure architecturée sous un chargement de flexion

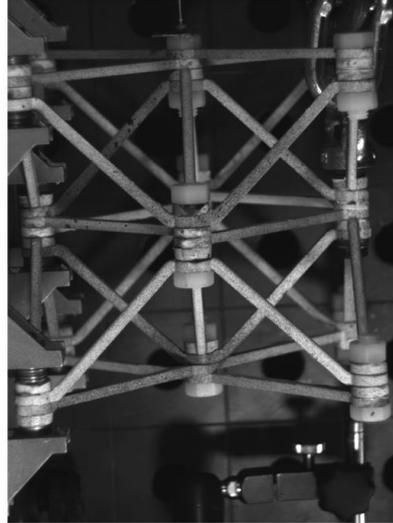
Post-traitement d'images obtenues lors de l'essai

Structure assemblée avec des vis en nylon (sans épaulement)

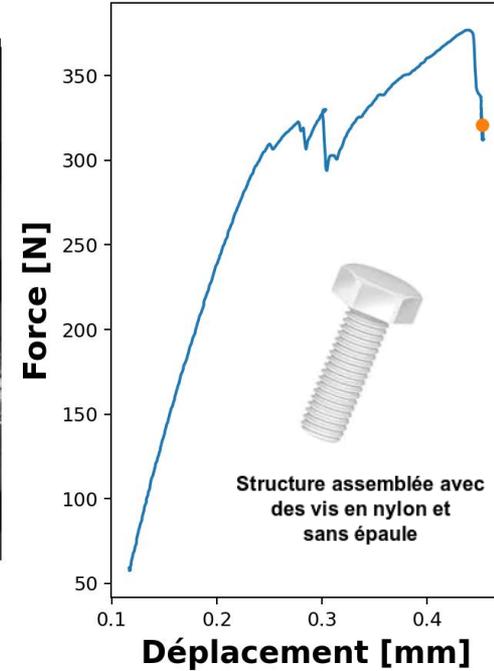
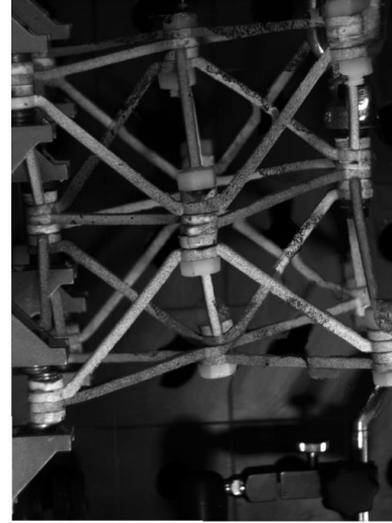
Image de référence



Déformée



Déformée (x20)

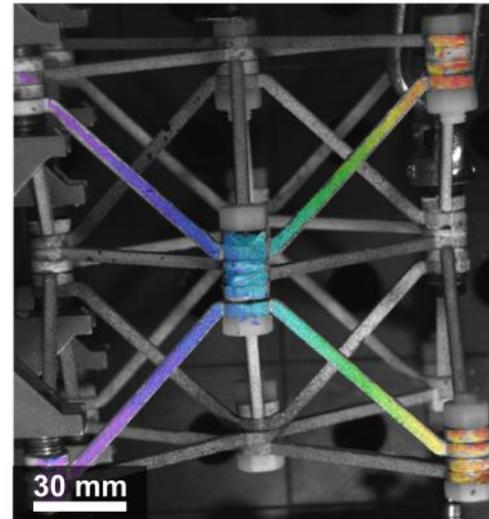
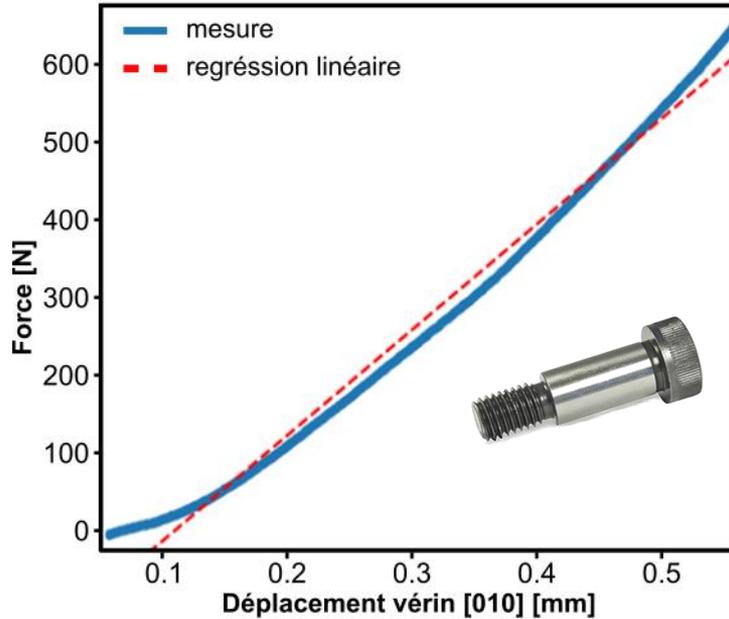


Deuxième réponse linéaire → Amplification d'une déformée

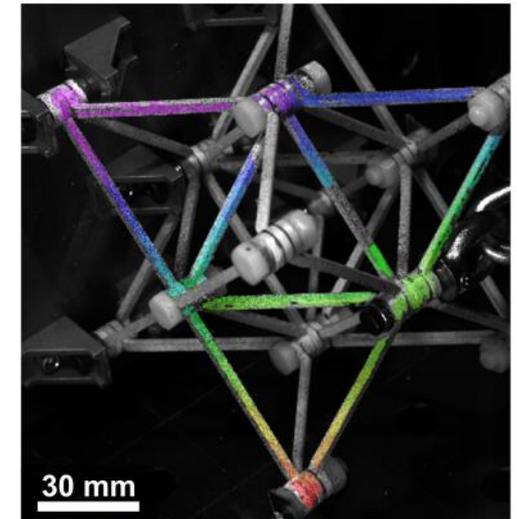
Jeux mécaniques au niveau des assemblages associés à une vis non adaptée

Cinématique d'une structure architecturée sous un chargement de flexion

Post-traitement d'images obtenues lors de l'essai



plan (001) déplacement [010] [mm]
0.00 0.87

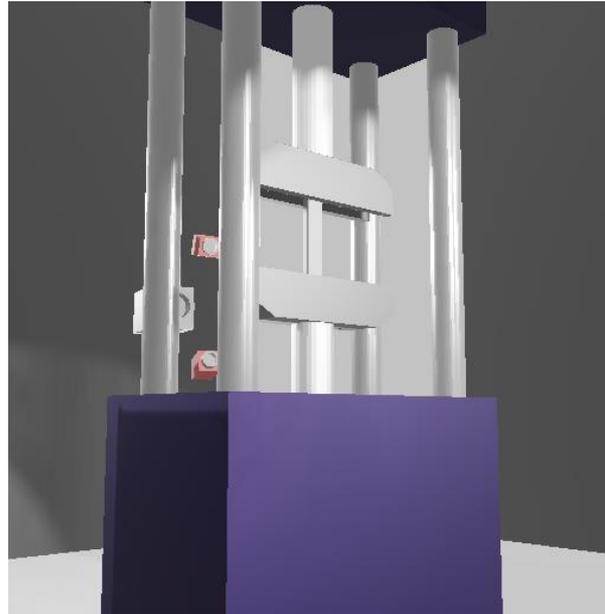
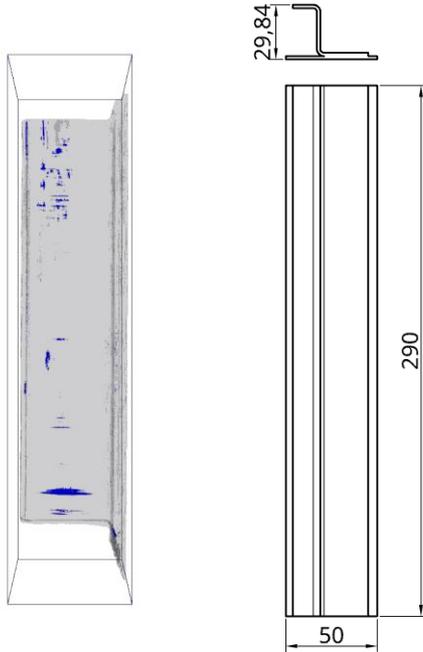


plan ($\bar{2}11$) déplacement [010] [mm]
0.00 0.93

Courbe force-déplacement et champs de déplacements sur deux plans de la structure

Essais de compression sur raidisseurs composites contenant de défauts

Convention PhyDefect

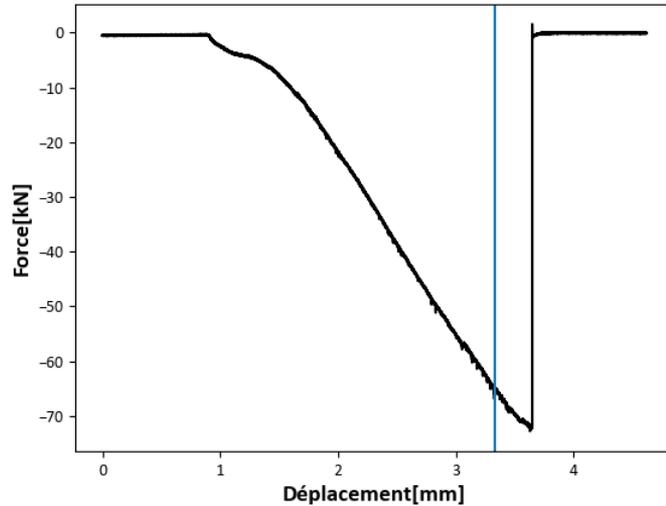


Visualisation 3D du mono-délaminage au sein de l'âme d'un raidisseur et géométrie

Essais de compression instrumentés avec 4 caméras optiques, 1 caméra optique et des capteurs d'émissions acoustiques

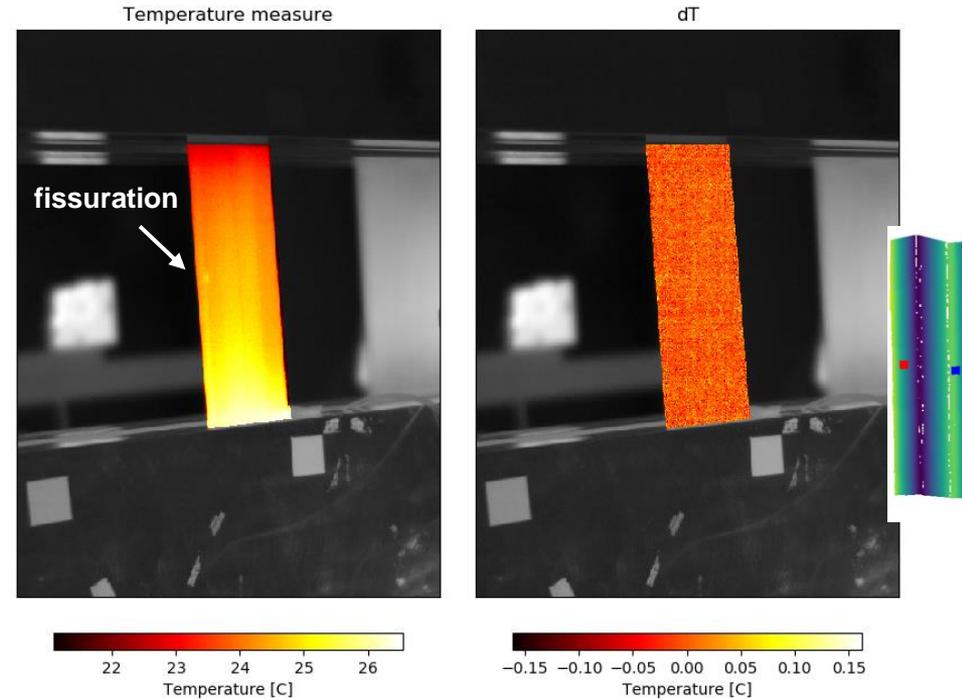
Essais de compression sur raidisseurs composites contenant de défauts

Convention PhyDefect



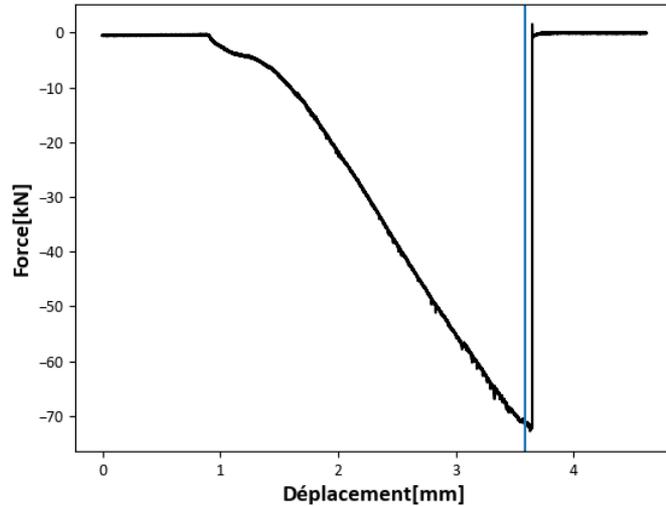
Détection de la fissuration sur un pli à 45

Stringer: GT011-S7



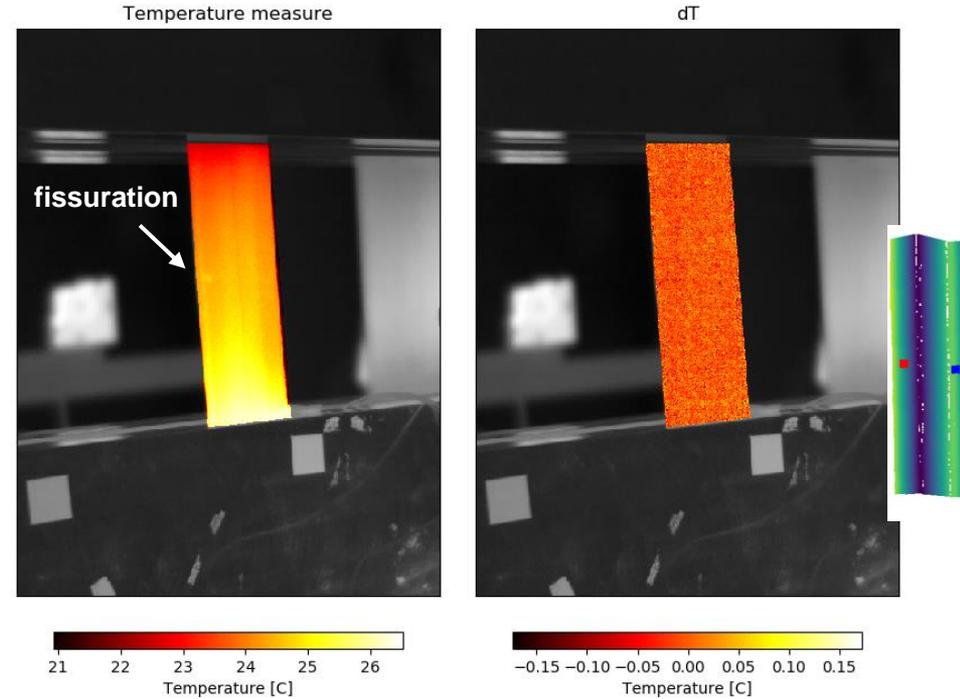
Essais de compression sur raidisseurs composites contenant de défauts

Convention PhyDefect



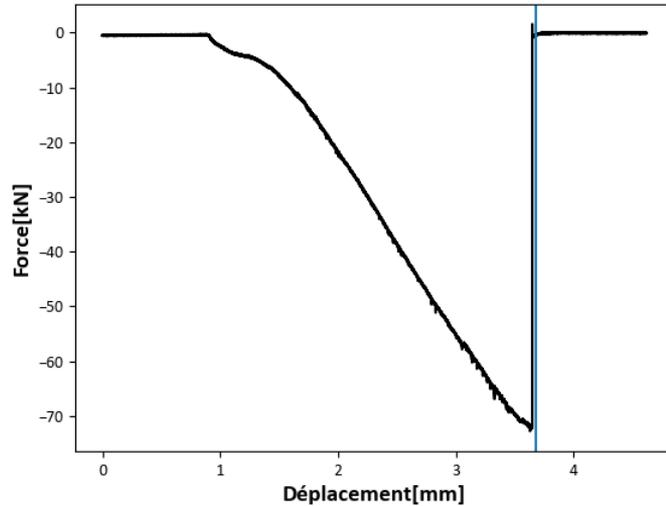
Détection de la fissuration sur un pli à 45

Stringer: GT011-S7



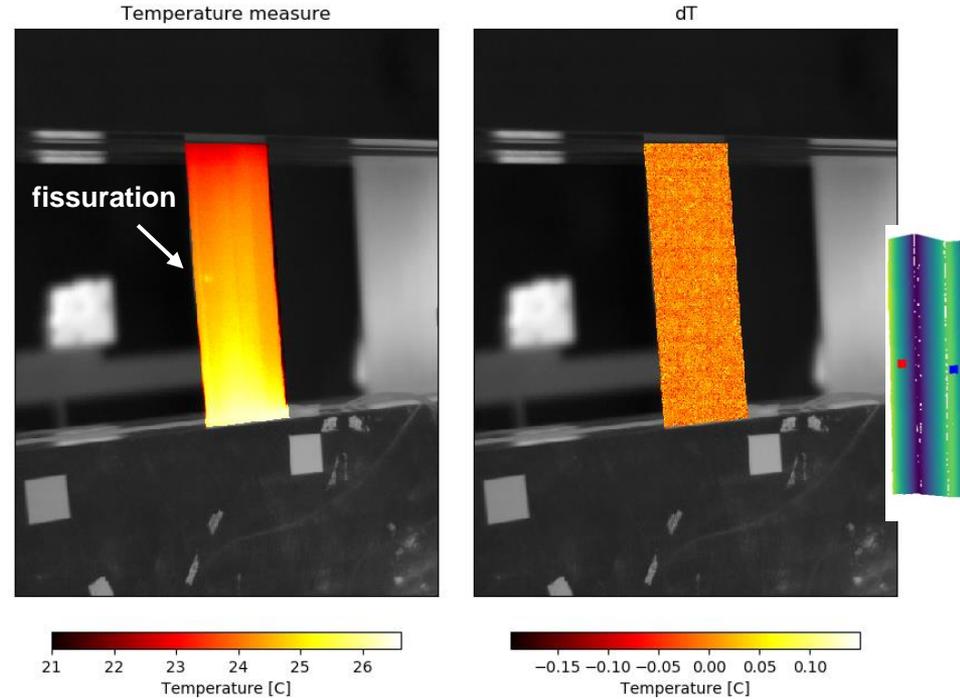
Essais de compression sur raidisseurs composites contenant de défauts

Convention PhyDefect



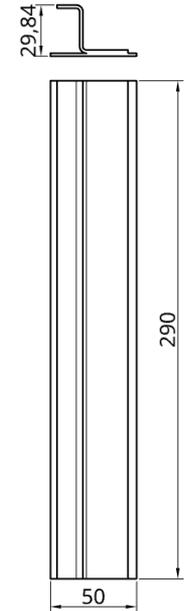
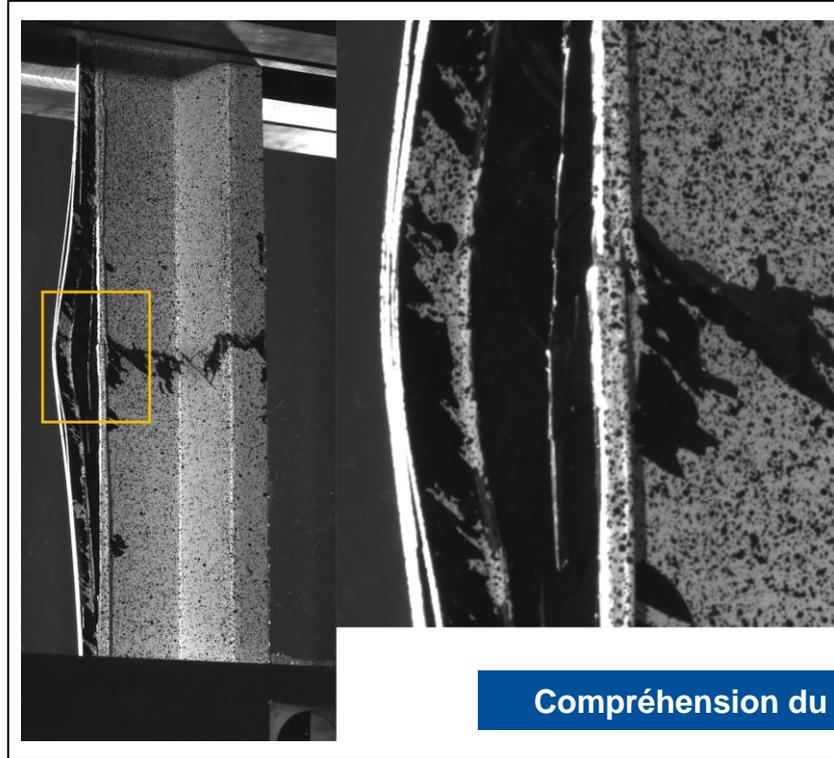
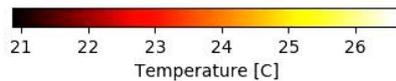
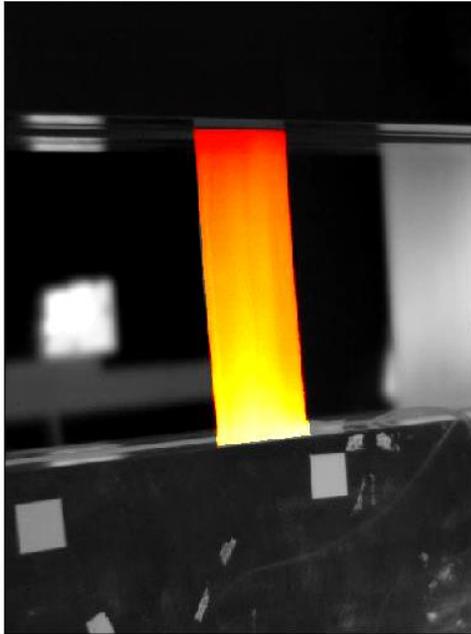
Détection de la fissuration sur un pli à 45

Stringer: GT011-S7



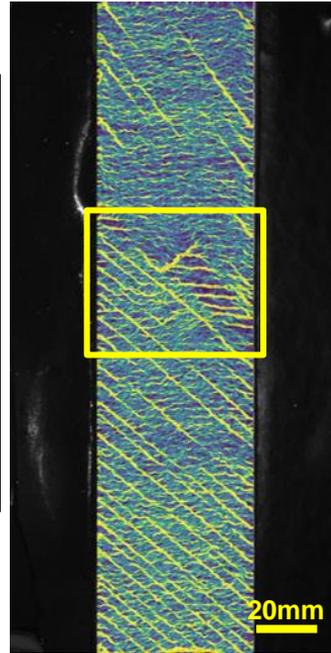
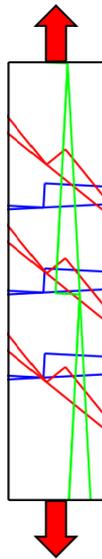
Essais de compression sur raidisseurs composites contenant de défauts

Convention PhyDefect

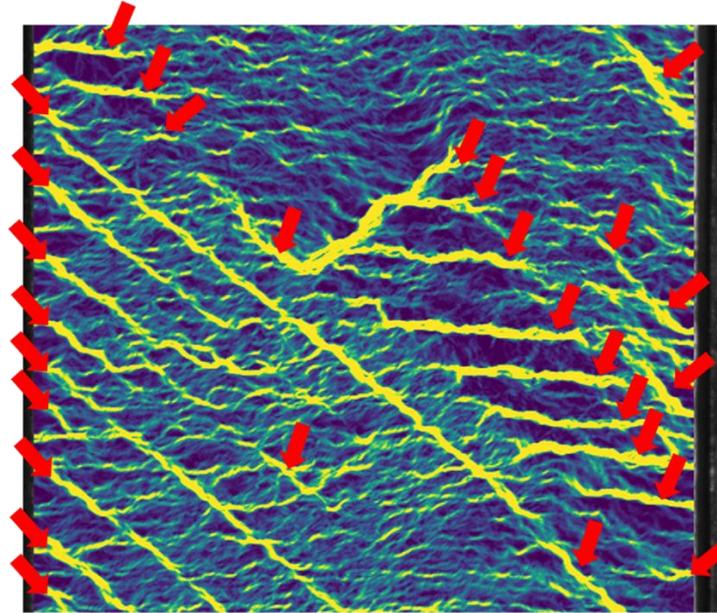


Détection de la fissuration par divers moyens

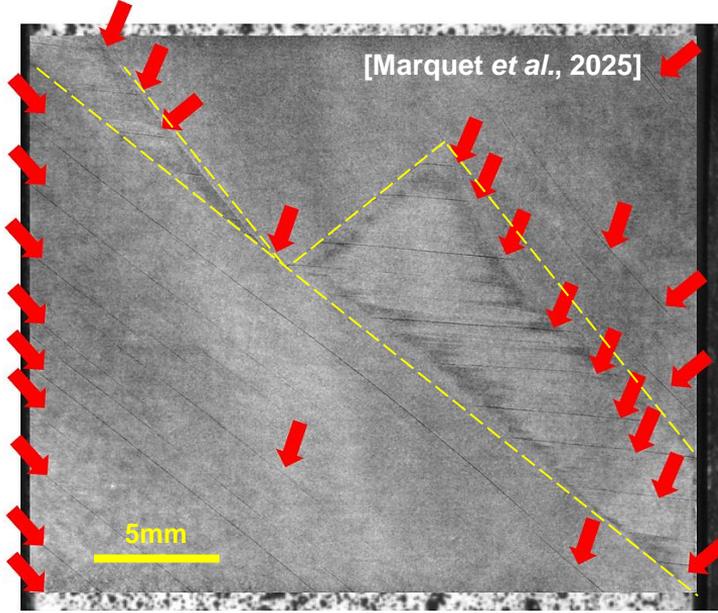
Essai de traction sur un coupon fabriqué par AFP contenant des singularités triangulaires



Post-processing of the DIC
obtained kinematic fields (DeepFlow)



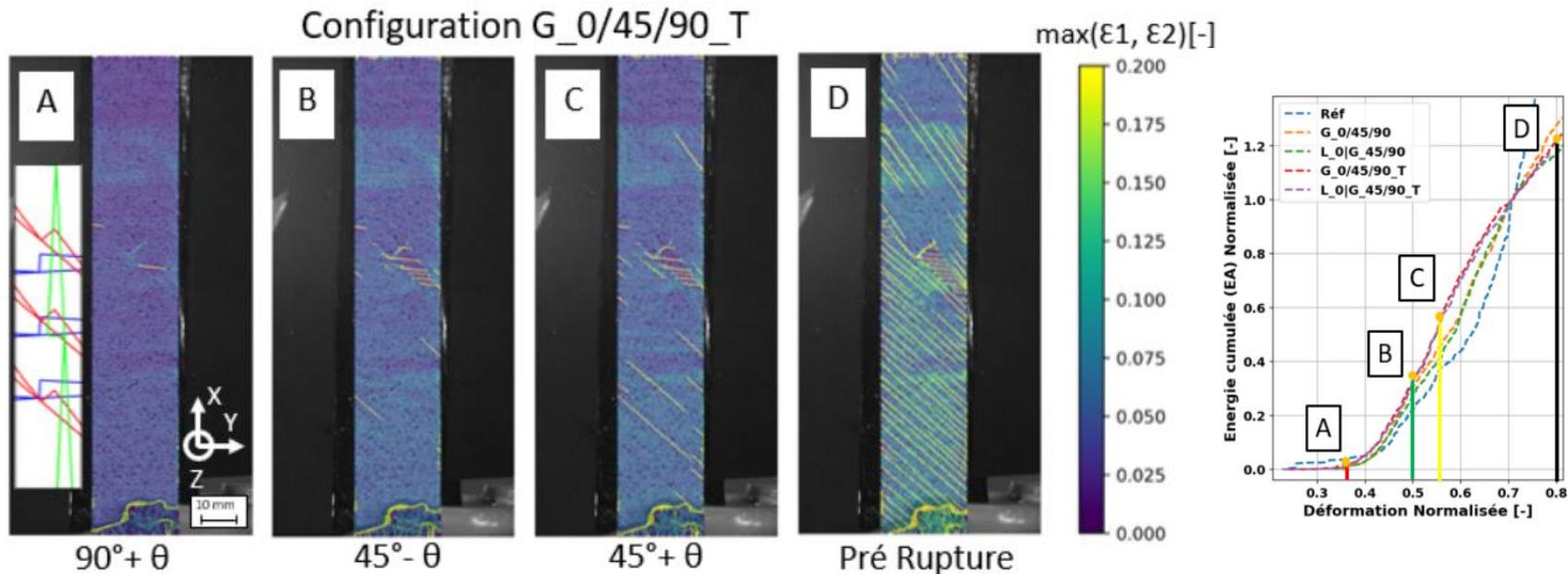
Analysis of tomographic observations



Détection de la fissuration par post-traitement des champs de déplacements en accord avec les observations RX

Complémentarité d'instruments de mesure

Essai de traction sur un coupon fabriqué par AFP contenant des singularités triangulaires

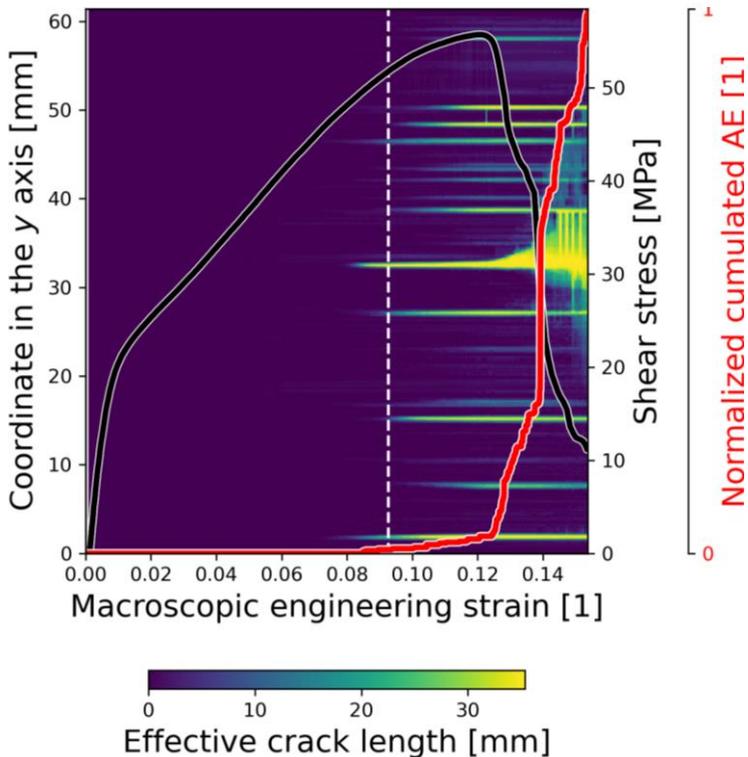


Premier endommagement observé sur le deuxième pli (90°) dévoilé par la singularité triangulaire en surface

Suivi de la fissuration en surface lors d'un essai de traction

Essai de traction sur un coupon fabriqué par AFP contenant des singularités triangulaires

$T = 165^{\circ}\text{C}$
 $T \cong 0,91T_g$



Validation de loi de comportement

Instrumentation d'essais sur structures mécaniques sur structures composites

Validation d'une loi d'endommagement progressive

Validation de la loi dans un cas d'étude industriel:

- Séquence d'empilement non triviale
- Éprouvettes d'épaisseur importante
- Éprouvettes avec de singularités géométriques

Objet d'étude : scénario d'étude d'une matrice thermodure renforcée avec des fibres de carbone sous traction monotone

- Fissuration transverse
- Délaminage
- Rupture de fibre

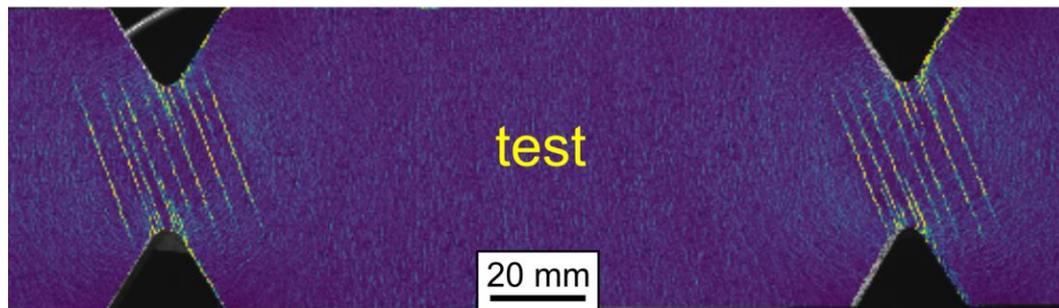


Transverse cracking

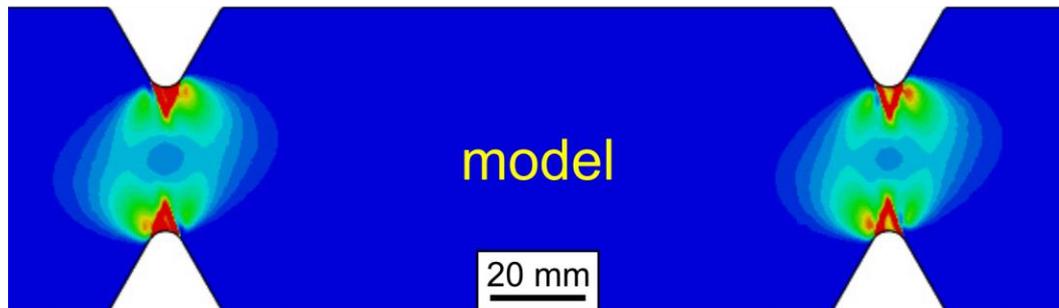
Laurin F, Carrere N, Huchette C, Maire J-F. A multiscale hybrid approach for damage and final failure predictions of composite structures. *Journal of Composite Materials*. 2013;47(20-21):2713-2747. doi: [10.1177/0021998312470151](https://doi.org/10.1177/0021998312470151)

$$\bar{\rho} = h \frac{n}{L}$$

observation expérimentale de la fissuration transverse



taux de fissuration obtenu par simulation numérique



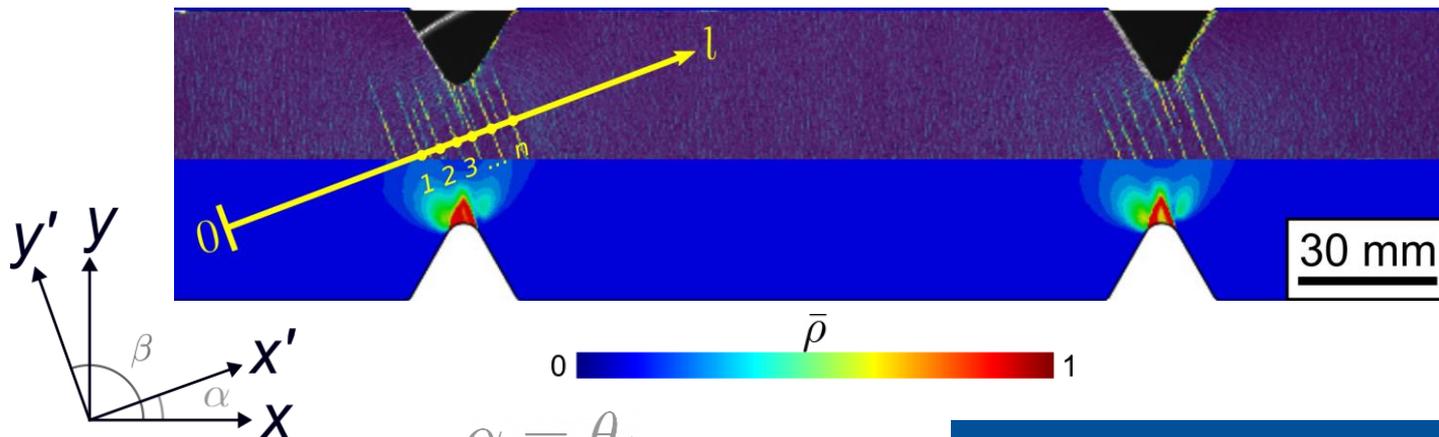
Validation d'une loi d'endommagement progressive

$$\begin{cases} \rho = \frac{n}{L} \\ \bar{\rho} = \rho h \end{cases}$$

~~$$n = \bar{\rho} \frac{L}{h}$$~~

$\bar{\rho}$
champs scalaire

$$n(x) = \frac{1}{h} \int_0^x \bar{\rho}(x) dx$$

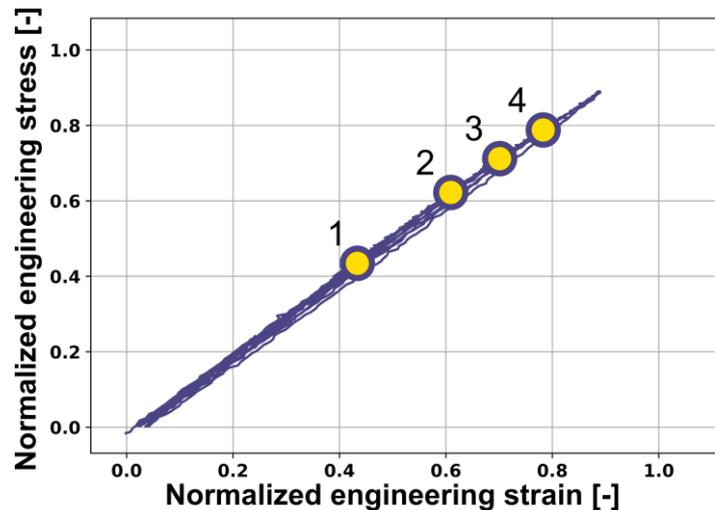
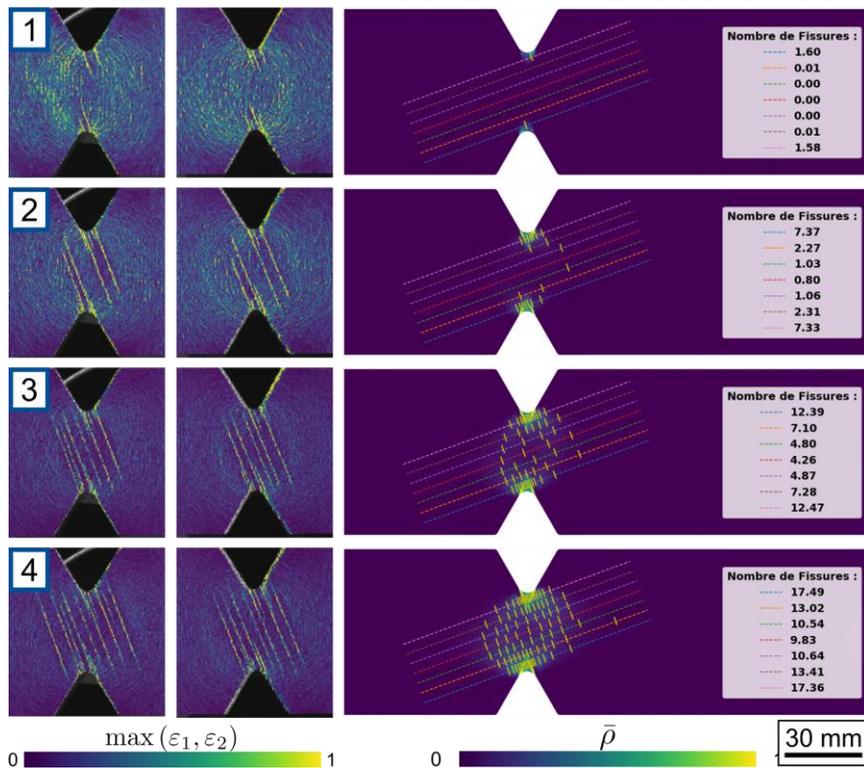


$$\alpha = \theta_1$$

$$\beta = \alpha + 90^\circ$$

Estimation of the crack initiation sites through equation 1

Validation d'une loi d'endommagement progressive



Bon accord entre les observations expérimentales et les simulations numériques

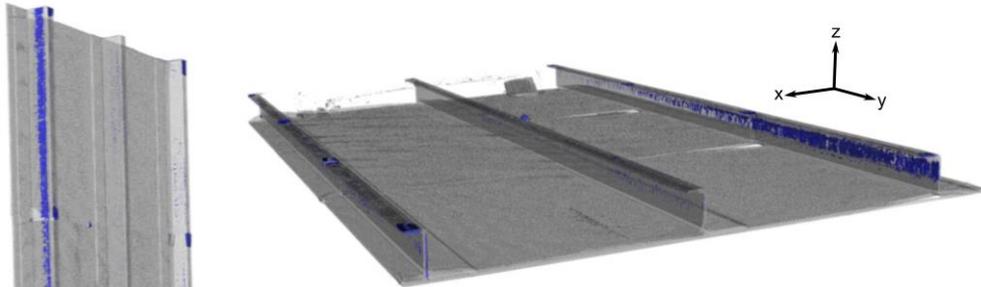
Conditions aux limites

Instrumentation d'essais sur structures mécaniques sur structures composites

Essai de compression sur des panneaux raidis contenant de défauts

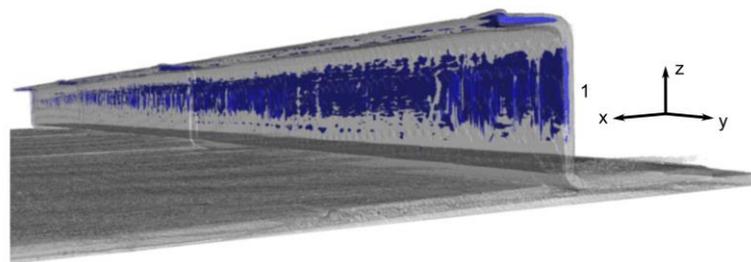
Convention PhyDefect

a)



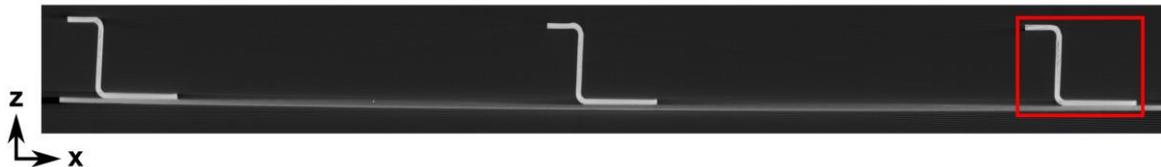
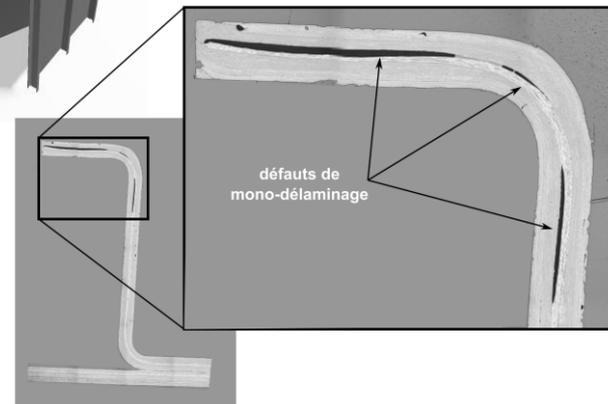
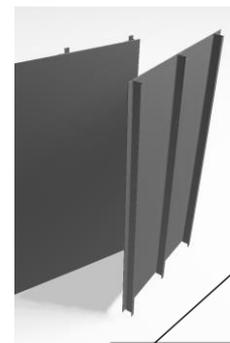
Panneaux raidis fabriqués par le DLR
Raidisseurs en forme de Z et en ayant de défauts

b)



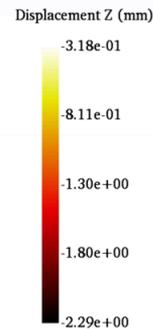
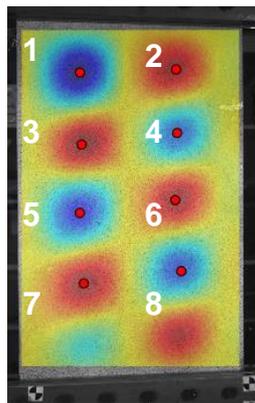
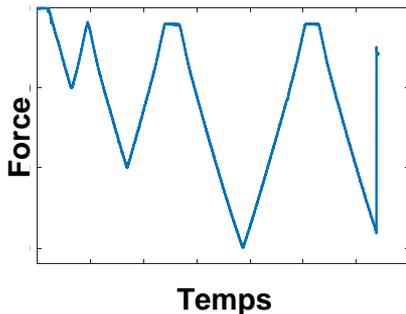
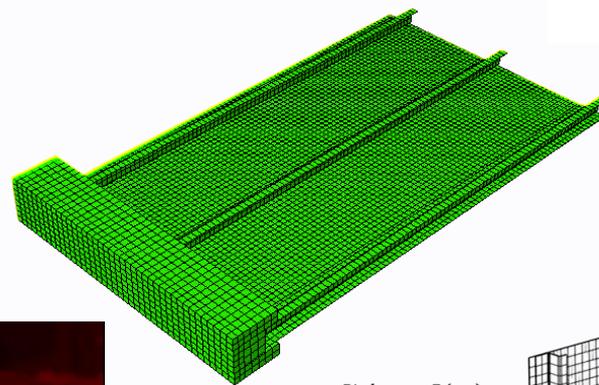
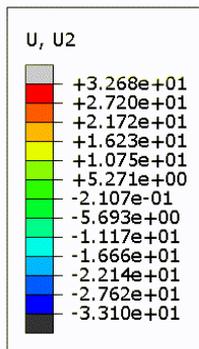
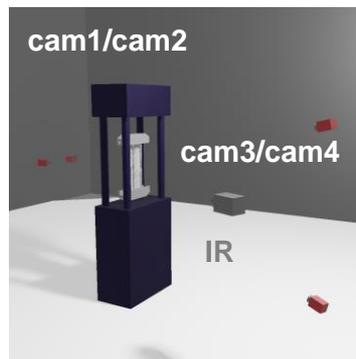
1 2 3

Visualisation 3D des défauts de mono-délamination sur les raidisseurs

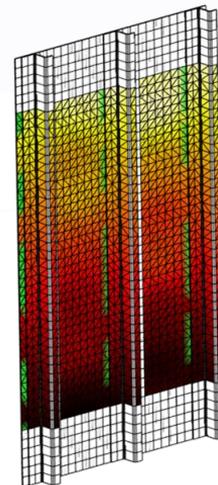


Essai de compression sur des panneaux raidis contenant de défauts

Convention PhyDefect

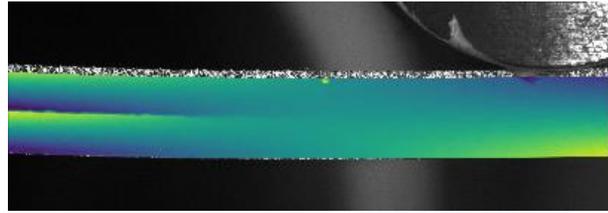


EikoSim



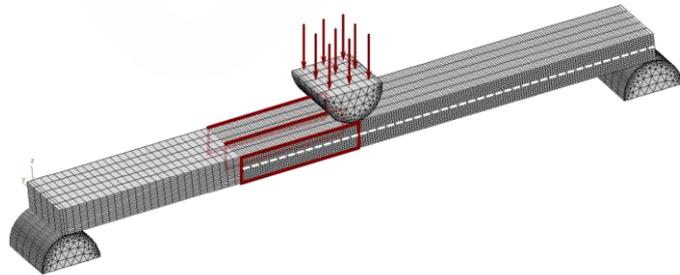
Identification d'une loi de zone cohésive (CZM)

Essai *End Notched Flexure* sur coupon composite TD à haute température



Identification d'une loi de comportement de zones cohésives (mode II)

FEMU



Force

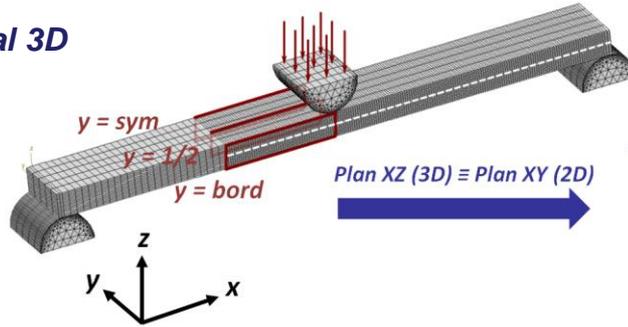


Champs de déplacement

[Márquez-Costa *et al.*, 2021]

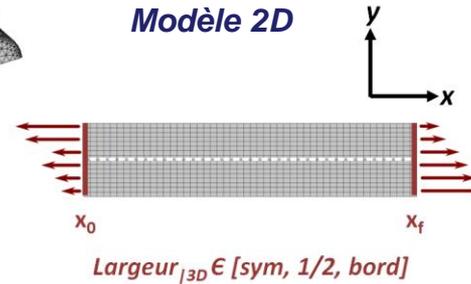
Validation de la méthode d'application de conditions aux limites

Modèle global 3D



Plan XZ (3D) \equiv Plan XY (2D)

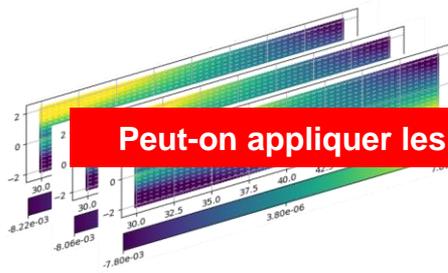
Modèle 2D



Largeur $L_{3D} \in [\text{sym}, 1/2, \text{bord}]$

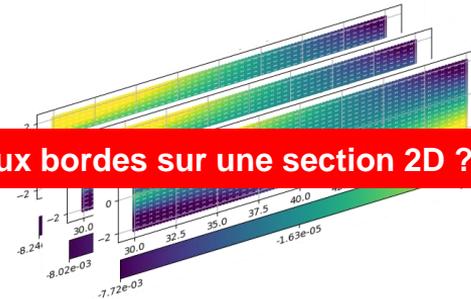
[Márquez-Costa et al., 2021]

Champ de déplacements calculés avec Modèle 3D



Peut-on appliquer les conditions aux bords sur une section 2D ?

Champ de déplacements calculés avec Modèle 2D



Bon accord avec la solution de référence

Analyse locale de la process zone et identification d'une loi de zone cohésive (CZM)

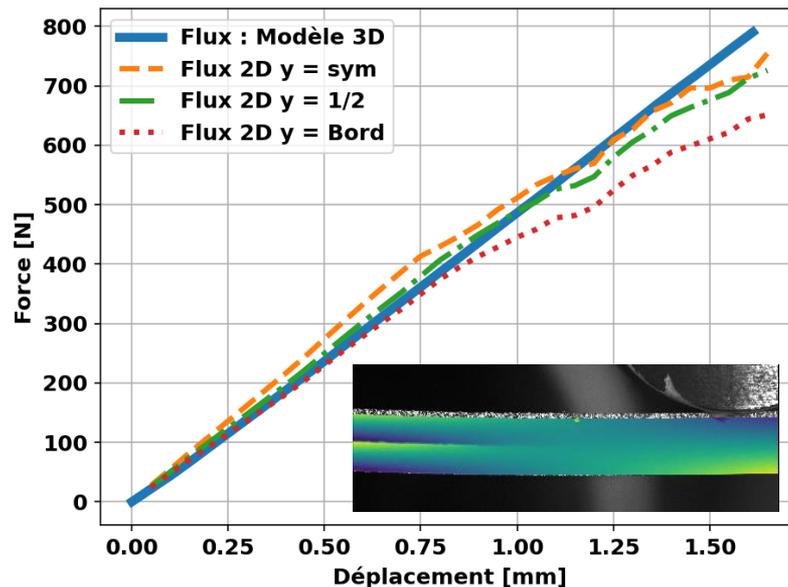
Quel modèle mettre en place pour permettre un dialogue essai/calcul ?

- Modèle global – 3D
 - Temps de résolution important
 - Comparaison sur les données de flux plus simple
 - Conditions aux limites difficile à modéliser
- Modèle local – 2D
 - Temps de résolution rapide
 - Conditions aux limites simple « a priori »
 - Difficile de remonter aux flux

Quels critères de comparaison doit être mis en place ?

- Analyse en flux
- Analyse en déplacement

[Márquez-Costa *et al.*, 2021]



La force n'est pas peut être utilisée dans une FEMU connaissant juste le champs de déplacement sur la face de l'éprouvette

Jéricho – plateforme d’essais sur structures

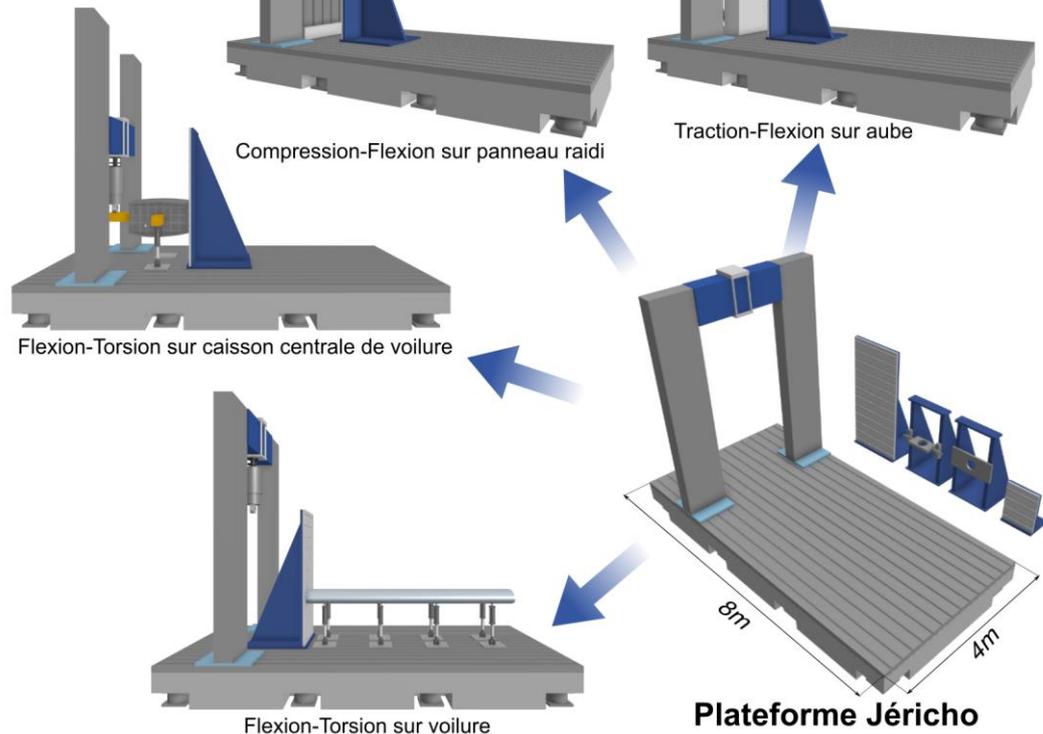
Instrumentation d’essais sur structures mécaniques sur structures composites

Plateforme Jéricho

Présentation générale

JERICHO

- **Plateforme de taille conséquente**
Possibilité de tester des **pièces de 1 m à 6 m**
- **Vérins de forte capacité**
1 vérin de 1500 kN et 2 vérins 250kN
- **Superposition de chargements complexes**
Chargements combinés multiaxiaux multi-vérin
(8 vérins 25kN – différentes courses, jusqu'à 1,8 m)
- **Multi-instrumentation avancée des essais**
Mesure de champs (CIN, IR, EA)
Pilotage par mesure de champs 
- **Hybridation des essais**
Dialogue essais / simulations haute fidélité
Pilotage des essais par simulations avancées



Plateforme Jéricho

Essais mécaniques multi-instrumentés sur structures aéronautiques

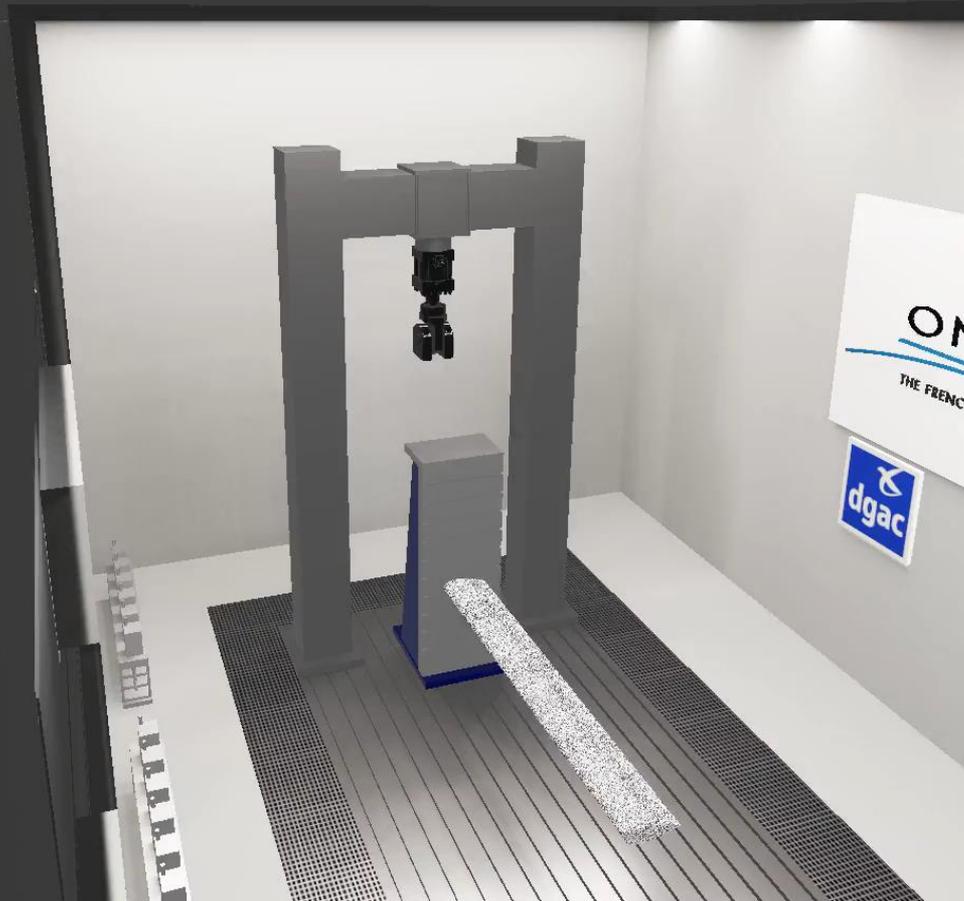
ONERA

THE FRENCH AEROSPACE LAB



Site de Palaiseau
Bâtiment, financement ONERA
Plateforme, financement DGAC
Décembre 2024







RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

*Liberté
Égalité
Fraternité*

ONERA

THE FRENCH AEROSPACE LAB

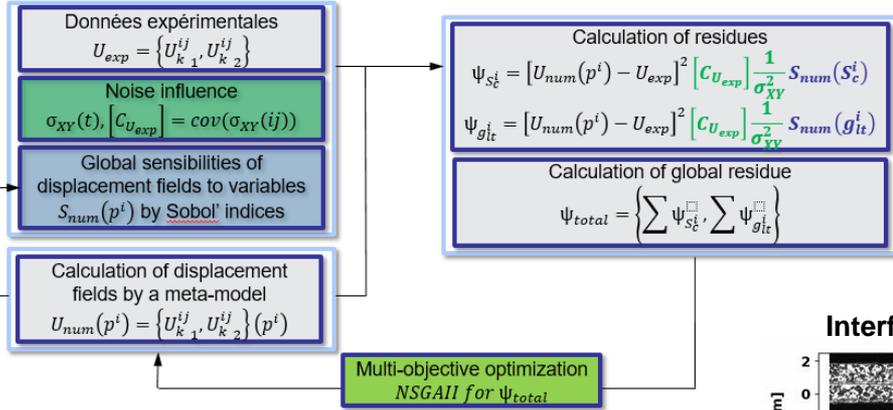
Merci pour votre attention

www.onera.fr

S_C and G_{It} identification by FEMU for Mode II crack propagation

3 points End-Notched-Flexure results on $[0]_8$ coupons at different temperatures

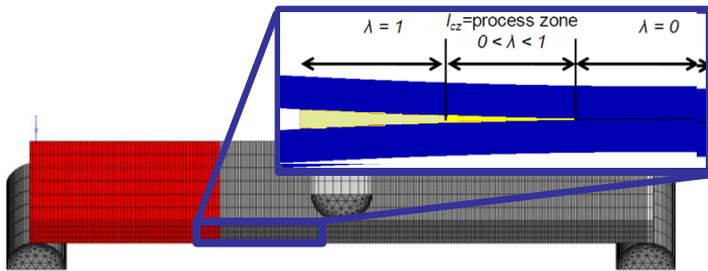
Initial population $i = 0$ Evaluated population $i = i + 1$



• Global sensibilities of displacement fields U, V to variables $\{S_C, G_{It}\}$ computed by Sobol' indices

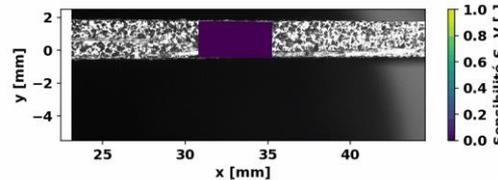
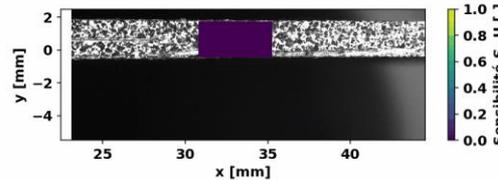
• Taking into account for **uncertainties of modelling and data**

• Uncertainties associated with experimental data -> **Measurement noise** [Roux *et al.*, 2018, Herb *et al.*, 2019]



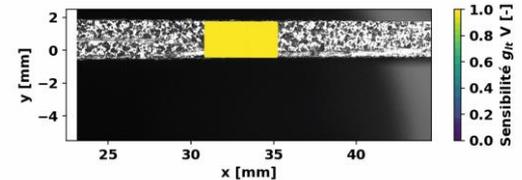
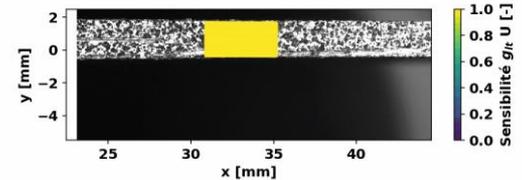
S_C

Interface strength sensibility



G_{It}

Ply shear modulus sensibility



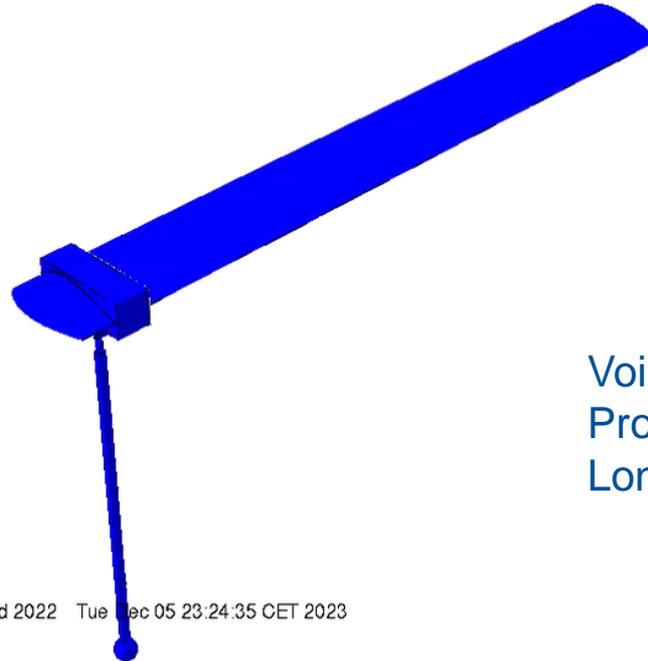
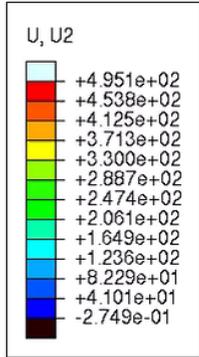
Numerical Finite Element Method Updated (FEMU) methods for temperature characterisation of CFRP interface behaviour law using current insertion tests

Conference: European Conference on Composite Materials - ECCM19. [Marquez Costa *et al.*, 2019]

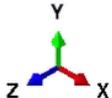
Essais de flexion sur voilure avec un seul vérin

Simulation préliminaire

Step: Step-1 Frame: 0
Total Time: 0.000000



Voilure
Profile NACA2430
Longueur : 4500mm



ODB: wing-actuator.odb Abaqus/Standard 2022 Tue Dec 05 23:24:35 CET 2023

Step: Step-1
Increment: 0; Step Time = 0.000
Primary Var: U, U2
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

Instrumentation d'essais

Contexte

- Pour quoi multi-instrumenter les essais ? Biblio ?
- Enjeux : synchronisation d'enregistrement, post-traitement, résolution temporelle, setup expérimental

Compréhension de phénomènes :

- Essais Starac – Amplification de mouvement pour comprendre la cinématique (2)
- Essais de compression sur raidisseurs (PhyDefect) – Scénario de rupture par thermographie (1)
- Thèse AFP TD (Loïc Marquet) – Détection de fissures et complémentarité des instruments (3)
- Essais de traction sur coupons $[(\pm 45)2]_s$ – Mesure de longueurs de fissures effective en mode II (1)

Validation de lois de comportement :

- Travaux Ariane

Abstraction de conditions d'essais :

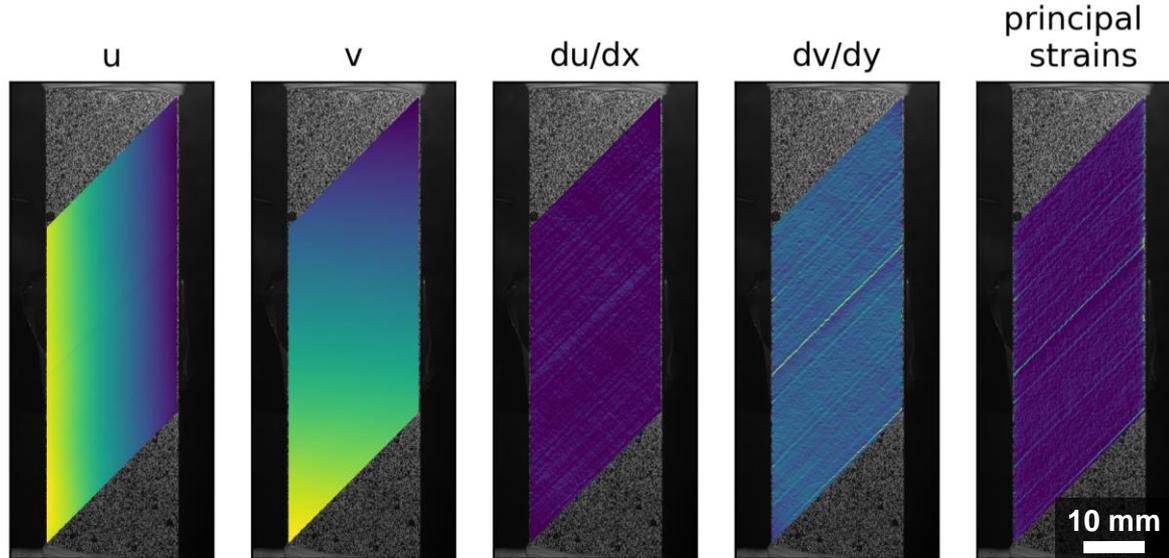
- Essais de compression sur panneaux raidis (PhyDefect) – Torsion du à la dissymétrie et calcul en cours
- Essais de flexion 3 points (thèse Juan Pablo Márquez Costa) – Identification de lois de zones cohésives

Essais sur structure

- Essai de compression sur panneaux raidis (thèse Eva Borakiewicz) – Préparation d'un essai sur structure
- Essai de flexion sur voilure - Jéricho

Damage mechanisms assessed by DeepFlow

Tensile tests results on $[(\pm 45_2)]_s$ coupons at different temperatures



1. DeepFlow displacement fields : u, v
2. Strain computation per px

$$\varepsilon = \begin{pmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & \frac{\partial v}{\partial y} \end{pmatrix}$$

3. Principal strains computation per px
4. Maximum Computation

[Weinzaepfel *et al.*, 2013]

Post-processing of DeepFlow displacements fields reveal the presence of in-plane cracks