



HAL
open science

Approches expérimentales pour la mesure des propriétés de cisaillement hors plan de l'âme d'un composite C/C 3D à architecture sandwich

Valentin Iallonardi, Emmanuel Baranger, Hortense Laeuffer, Christophe Cluzel

► To cite this version:

Valentin Iallonardi, Emmanuel Baranger, Hortense Laeuffer, Christophe Cluzel. Approches expérimentales pour la mesure des propriétés de cisaillement hors plan de l'âme d'un composite C/C 3D à architecture sandwich. JNC23: Journées Nationales sur les Composites 2023, AMAC, UFC, Supmicrotech-ENSMM, CNRS, Jul 2023, Besançon, France. hal-04606757

HAL Id: hal-04606757

<https://hal.science/hal-04606757>

Submitted on 10 Jun 2024

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.

Approches expérimentales pour la mesure de propriétés de cisaillement hors plan de l'âme d'un composite C/C 3D à architecture sandwich

Experimental approaches for the measurement of the core out-of-plane shear properties of a 3D C/C sandwich architecture

Iallonardi Valentin¹, Baranger Emmanuel¹, Laeuffer Hortense¹ et Cluzel Christophe¹⁻²

1 : Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, ENS Paris-Saclay, CNRS, Laboratoire de Mécanique Paris-Saclay
91190, Gif-sur-Yvette, France

e-mail : valentin.iallonardi@ens-paris-saclay.fr, emmanuel.baranger@ens-paris-saclay.fr,
hortense.laeuffer@ens-paris-saclay.fr et christophe.cluzel@ens-paris-saclay.fr

2 : IUT d'Evry Val d'Essonne
Université d'Evry - Université Paris-Saclay
91000, Evry-Courcouronnes, France

Résumé

Dans cet article, nous présentons deux différentes approches pour caractériser les propriétés en cisaillement de l'âme d'un matériau composite C/C à architecture sandwich. L'âme du sandwich est évidée et uniquement composée de faisceaux de fibres densifiées reliant les deux peaux.

Ces propriétés sont classiquement mesurées par des essais de flexion trois ou quatre points ou par des essais de type *single block shear* (SBS) tels que présentés par O'Connor (ASTM C273 ou BS 4370-1).

Nous avons développé deux montages de type SBS isostatiques afin de se défaire des moments de flexion et torsion parasites d'un montage hyperstatique. Le premier est basé sur une cinématique de compression et le second est auto-alignant et chargé en traction. Nous présentons les avantages et inconvénients de telles méthodes, ainsi que des pistes et perspectives pour les améliorer.

Abstract

In this paper, we will introduce two different approaches to the measurement of the out-of-plane core shear properties of a C/C sandwich architected material. The core of the sandwich is hollow and crossed by densified fibres beams which link both skins together.

The core shear properties are usually measured by three or four points bending tests or by *single block shear* (SBS) type tests, as presented by O'Connor (ASTM C273 or BS 4370-1).

We have designed two isostatic SBS type fixtures, to get rid of parasitic flexure and torsion momenta that are encountered with hyperstatic fixtures. The first is based on a compressive kinematic while the second one is based on a tensile kinematic. We will present the advantages and drawbacks of such methods, but also leads and perspectives for improvement.

Mots Clés : caractérisation expérimentale - composites carbone / carbone - matériaux sandwich - cisaillement de l'âme

Keywords : experimental characterization - carbon / carbon composites - sandwich materials - core shear

1. Introduction

Le développement de modèles comportementaux d'architectures sandwichs nécessite de caractériser le comportement mécanique de l'âme, en particulier les propriétés en cisaillement. Classiquement, ces dernières sont obtenues par des essais quasi-statiques de flexion 3 ou 4 points, ou par des essais de type *Single Block Shear (SBS)*, par exemple similaires au montage de la norme ASTM C273 [1]. Les essais de flexion sont simples à mettre en place mais ne permettent pas toujours d'obtenir une rupture de l'âme en cisaillement, et il est difficile d'extraire des propriétés de cisaillement pur de l'âme dans un essai sous sollicitations mixtes [2].

Les deux principales méthodes d'essais de type *SBS* ont fait l'objet d'études par O'Connor [3] : l'âme (seule ou au sein des peaux) est collée à deux plaques métalliques rigides qui sont soumises à une cinématique relative qui permet un état de cisaillement dans l'âme. Dans la configuration américaine (ASTM C273), l'axe des efforts imposés aux plaques (traction ou compression) n'est pas aligné avec la ligne moyenne de l'âme, contrairement à ce qui est proposé par la méthode britannique (BS 4370-1). Ceci change les moyens de mesure du déplacement relatif entre les plaques (à utiliser dans les calculs de modules de cisaillement) : dans la norme britannique, la mesure se fait directement par la machine (déplacement de traverse), tandis que pour la norme américaine, le déplacement relatif des deux plaques est à mesurer avec un moyen supplémentaire (par exemple un LVDT).

1.1. Démarche

Dans le cadre du développement d'un modèle mécanique d'un matériau composite Carbone / Carbone à architecture sandwich conçu par un partenaire industriel, nous nous retrouvons confrontés à la caractérisation des propriétés mécaniques de l'âme, notamment en cisaillement.

Nous nous proposons de comparer deux approches de type *SBS* pour la mesure de ces propriétés. Les deux montages sont isostatiques (doublement rotulés) afin de protéger les éprouvettes de contraintes parasites de flexion ou torsion qui peuvent être induites sur des matériaux anisotropes par des montages hyperstatiques.

La conception des deux montages *SBS* est inspirée de ceux proposés par les normes ASTM C273 et NF T54-605 : les éprouvettes sandwichs sont collées sur deux plaques métalliques dont la cinématique relative (mouvement de corps rigide dans la direction de l'éprouvette) entraîne des efforts de cisaillement dans l'âme du matériau.

Un premier montage simple active cette cinématique grâce à des efforts de compression appliqués sur les plaques. Un tel montage en compression et doublement rotulé a l'avantage d'être plus facile à réaliser qu'en traction (il s'agit juste de faire reposer les plaques sur des billes qui assurent la liaison rotulée avec les plateaux de compression). Cependant, nous observons des instabilités cinématiques globales pendant l'essai (rotation croissante autour de la normale des plaques supports), ce qui nous pousse à adapter le montage pour une sollicitation en traction afin d'éliminer ces dernières.

Le montage en traction est conçu en gardant un maximum des pièces développées pour le montage en compression, et la double rotule est assurée par des roulements qui font la liaison entre les plaques et la machine d'essai. Ce montage a également l'avantage d'être auto-alignant.

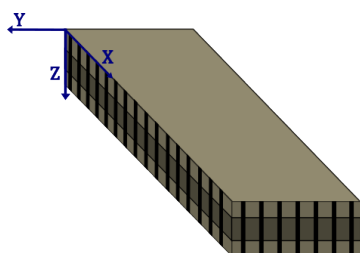
Dans les deux cas, des cycles de charge / décharge sont possible afin d'observer l'évolution de l'endommagement (associé à une perte de raideur) dans le matériau.

1.2. Architectures composites C/C

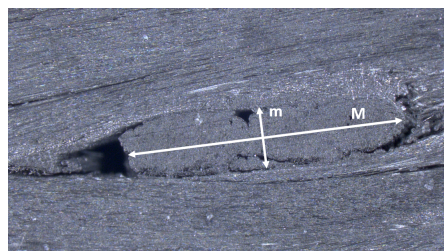
L'objet de notre étude est un composite C/C à architecture sandwich, dont les deux peaux sont composées de fibres de Carbone et d'une matrice de Pyro-Carbone obtenue par densification par voie gazeuse (CVI). La partie centrale du sandwich, l'âme, est évidée et traversée par des faisceaux de

fibres densifiées qui servent de renforts dans la 3^e direction (Z sur la Figure 1a) et qui assurent la stabilité relative des deux peaux.

La Figure 1a est un schéma d'un échantillon du matériau. On y voit représentée la structure globale du matériau, composé des deux peaux épaisses par rapport à l'âme (partie centrale plus foncée) évidée et traversée uniquement par les faisceaux (représentés par des traits noirs dans la direction Z).



(a) Schéma d'un échantillon de matériau sandwich



(b) Vue du dessus au microscope optique d'un faisceau dans une peau d'un échantillon de la première version du matériau

FIG. 1. – Elements structurels du matériau composite étudié

Deux versions de matériau ont été étudiées. Dans la **première**, les faisceaux de renforcement dans l'épaisseur présentent une section ellipsoïdale qu'on peut caractériser par un petit axe m et un grand axe M , comme représenté sur la Figure 1b. Dans la **seconde**, les faisceaux présentent une section circulaire qui peut être décrite par un rayon r .

2. Etude expérimentale

2.1. Description des montages

Les deux montages conçus partent du même principe : les peaux des éprouvettes sont collées sur deux plaques (supports d'éprouvette) en acier qui sont chacune reliées à un des plateaux de la machine d'essai, par des liaisons rotulées qui sont assurée grâce à des pièces intermédiaires encastrées aux supports d'éprouvette (goupille de positionnement + vis). Des cales aux dimensions adéquates permettent d'aligner l'axe des efforts - qui est imposé par les centres des deux rotules - avec le plan moyen de l'âme du matériau testé.

Dans le cas du montage en compression, la liaison rotulée est assurée par un contact cône / sphère : une bille en acier est en contact dans un trou conique sur le plateau de compression et sur la pièce intermédiaire encastrée au support d'éprouvette.

Dans le cas du montage en traction, la liaison rotulée est réalisée grâce à une rotule radiale SKF GEH 15 C, dont le grand diamètre est positionné dans un alésage ajusté sur la pièce intermédiaire encastrée au support d'éprouvette. La partie centrale de la rotule est traversée par une goupille qui permet de la relier à la machine.

Les deux photographies en Figure 2 montrent les moitiés supérieures des montages en traction (à gauche) et compression (à droite). On y retrouve les éléments mentionnés ci-dessus.

A noter que dans la photographie (a) en Figure 2, les deux supports d'éprouvette ne sont pas en contact avec la pièce intermédiaire : seule la plaque de droite est encastrée à la pièce intermédiaire, et un jeu faible mais visible à l'oeil nu existe entre la plaque de gauche et la pièce intermédiaire. Un contact entre les deux pièces entraînerait du frottement qui perturberait les mesures d'effort pendant l'essai.

2.2. Mesure du déplacement

Pour les deux configurations, un capteur LVDT permet de mesurer le déplacement relatif dans l'axe de la plaque inférieur des deux plaques supports. Aussi, une caméra est installée derrière le montage et prend une photographie toutes les cinq secondes. L'exploitation de ces photographies par CIN

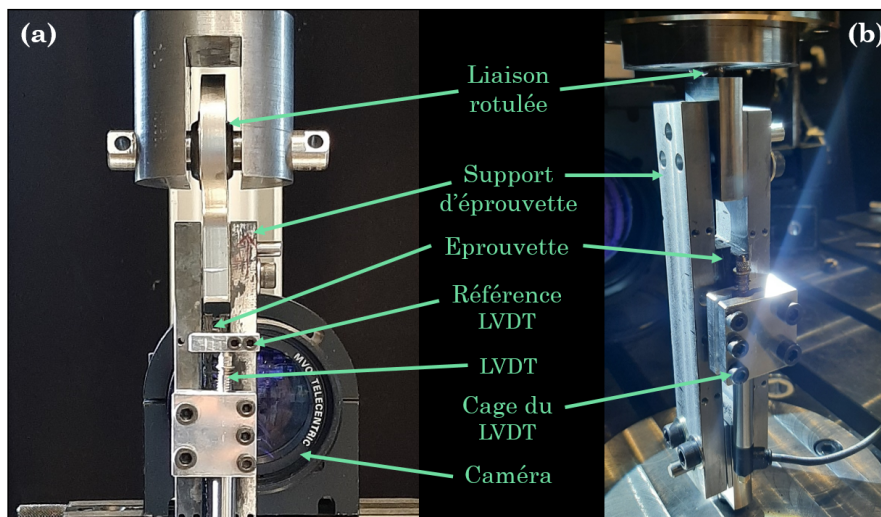
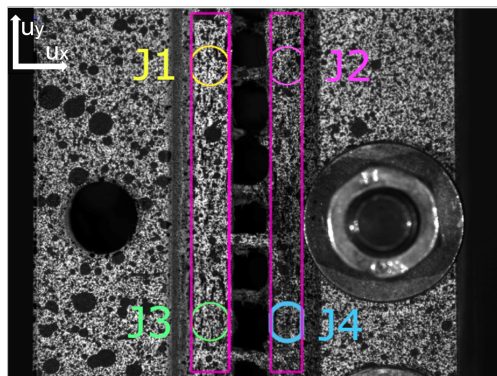


FIG. 2. – A gauche : montage en traction. A droite : montage en compression. Les parties supérieures et inférieures des montages sont symétriques (liaisons rotulées).

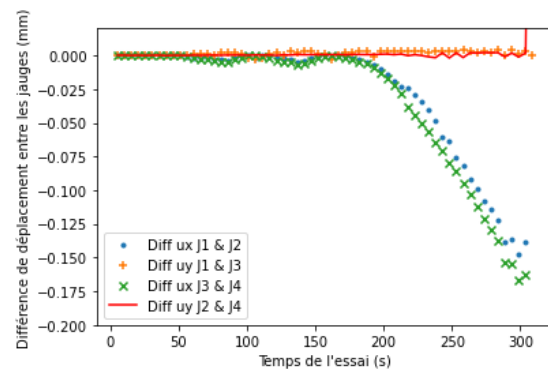
(Corrélation d’Images Numérique) permet de relever les déplacements plans de chaque support, et donc par différence les déplacements plan relatifs des deux supports.

Nous faisons l’hypothèse que les peaux sont infiniment plus rigides que l’âme et, collées aux supports d’éprouvette, ont une cinématique de mouvement de solide rigide qui suit celui des plaques d’acier, ce qui permet un état de cisaillement pur au sein de l’âme.

Les mesures de CIN sont effectuées sous Correli GUI 0.97. L’ordre de grandeur de l’incertitude sur le déplacement est de 0.01 pixel, ce qui, ramené à des millimètres, est de l’ordre de deux dixièmes de microns.



(a) Positionnement des jauges de calcul de déplacement sur Correli GUI 0.97.



(b) Comparaison des différences de déplacements entre les jauges situées sur les peaux

FIG. 3. – CIN pour le calcul de déplacement relatif des peaux (configuration en traction)

Pour déterminer le déplacement relatif entre les deux plaques, nous positionnons des jauges virtuelles, et calculons la différence de déplacement entre les différentes jauges. Le déplacement calculé sur une jauge est une moyenne du déplacement de tous les noeuds considérés dans cette dernière. La Figure 3a montre les différentes jauges virtuelles sur le maillage d’un échantillon, et la Figure 3b illustre la validité de l’hypothèse de déplacement de solide rigide dans les peaux.

En effet, dans la Figure 3b, on constate que les deux peaux translatent ensemble selon l’axe u_x (tel que défini sur la Figure 3a) : la différence des déplacement des deux jauges supérieures et celle des deux jauges inférieures sont identiques (courbes bleue et verte) malgré un écart à partir du début de la

rupture des picots. Ce déplacement commun est lié au réaligement pendant l'essai de traction. Concernant les déplacements verticaux (u_y), on constate que les différences des déplacements des jauges sur une même peau (courbes jaune et rouge) sont inférieurs à l'ordre de grandeur des incertitudes de la corrélation d'image (0.01 pixel). Cela signifie que la cinématique de la peau de gauche (qui est reliée à la traverse) est bien celle d'un solide rigide en translation selon l'axe u_y (uniformément par rapport à la peau de droite).

Enfin, les calculs des déformations (γ) et contraintes (τ) de cisaillement se font à partir des formules de la norme (ASTM C273 ou NF T54-605) : u est le déplacement relatif entre les deux plaques, t_c est l'épaisseur de l'âme, F l'effort mesuré, L la longueur de l'âme et w sa largeur.

$$\gamma = \frac{u}{t_c} \quad (\text{Eq. 1a})$$

$$\tau = \frac{F}{L.w} \quad (\text{Eq. 1b})$$

2.3. Mise en place des essais

Le référencement des éprouvettes se fait comme suit : **Isostatic Core Shear Compression / Traction**, suivi d'un numéro d'éprouvette ou d'une référence liée aux directions d'orthotropie des éprouvettes testées (**Longitudinale** ou **Transverse**).

La première campagne d'essais, en compression, a été réalisée sur des éprouvettes issues de barreaux sandwichs pré-endommagés de la **première version du matériau**. Chacune des deux éprouvettes a été découpée dans une des directions L et T d'orthotropie du matériau.

Les dimensions des éprouvettes (longueur L , largeur w , épaisseur totale t_{tot} , épaisseur d'âme t_c et densité de picots d) sont les suivantes (mesures au pied à coulisse de précision 0.05mm) :

Eprouvette	L (mm)	w (mm)	t_{tot} (mm)	t_c (mm)
ICSC-L	50.05	26.1	13.6	2.4
ICSC-T	50.8	24.5	13.45	2.15

La campagne d'essais en traction a été réalisée sur les quatre éprouvettes de la deuxième version du matériau. Elles sont référencées ICST- i avec $i \in [1, 4]$.

Les dimensions des éprouvettes sont les suivantes :

Eprouvette	L (mm)	w (mm)	t_{tot} (mm)	t_c (mm)
ICST-1	84.45	19.94	10.65	2.4
ICST-2	85.2	20	10.56	2.47
ICST-3	86	20	9.36	2.3
ICST-4	85.95	19.98	10.19	2.5

3. Résultats et discussions

3.1. Essais en compression

Les essais en compression présentent de fortes rotations dans le plan et hors plan des supports des peaux (*cf.* Figure 2 (b) où le support d'éprouvette à gauche n'est plus aligné avec la liaison rotulée du haut). Le déplacement engendré est accru de manière instable par le chargement en compression. Les courbes de comportement sont représentées en Figure 4, et les résultats de mesure sont inscrits dans le Tableau 1. Les raideurs sont calculées par la méthode des moindres carrés sur chaque cycle de décharge / recharge. La pente du premier cycle est qualifiée de "raideur initiale" et correspond à l'état du matériau au début de l'essai mais sans présumer de son historique.

Ref	Effort max (N)	Raideur initiale (N/mm)
ICSC-L	1686.67	10130
ICSC-T	809.28	7390

TAB. 1. – Résultats des essais de la configuration en compression

Si le mécanisme de rupture activé par l'essai était du cisaillement pur de l'âme, on s'attendrait a priori à avoir des raideurs similaires peu-importe la direction de sollicitation (transverse ou longi). Cependant, la présence de flexion dans le mécanisme pourrait être à l'origine de différences entre les raideurs.

L'âme des éprouvettes de la **première version** du matériau est composée de faisceaux de section ellipsoïdale. Cette anisotropie est possiblement à l'origine des rotations, notamment car les grands ou petits axes des faisceaux ne sont pas parfaitement alignés avec les directions de fibres des peaux (qui correspondent aux directions de découpe des éprouvettes).

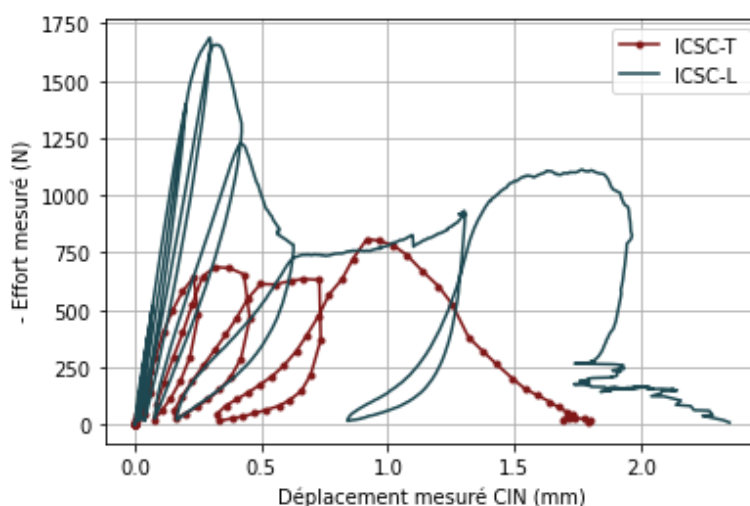


FIG. 4. – Courbes - Effort / Déplacement des deux essais de la campagne en compression

3.2. Essais en traction

Les essais en traction ne présentent pas de rotations hors plan telles que celles observées dans la configuration en compression : il y a donc une amélioration de la qualité des mesures pendant l'essai. Malgré cela, on observe une différence de raideur entre les acquisitions de déplacement obtenues par corrélation d'images numériques et les déplacements mesurés par le LVDT : les déplacements du LVDT sont plus faibles que ceux obtenus par CIN pour un même effort, ce qu'on peut observer en Figure 5b. Les résultats des mesures ainsi que les écarts de raideur sont représentés dans le Tableau 2. Les raideurs sont arrondies à la dizaine de N/mm près et sont calculées avec la méthode des moindres carrés sur le premier cycle de charge / décharge (en retirant le pied de courbe et les parties non linéaires).

La mesure de LVDT de l'éprouvette ICST-2 n'a pas été disponible à cause de mauvaises manipulations, et pour l'éprouvette ICST-1, la mesure de déplacement était extrêmement bruitée et donc des réserves quant à la raideur calculée sont à émettre.

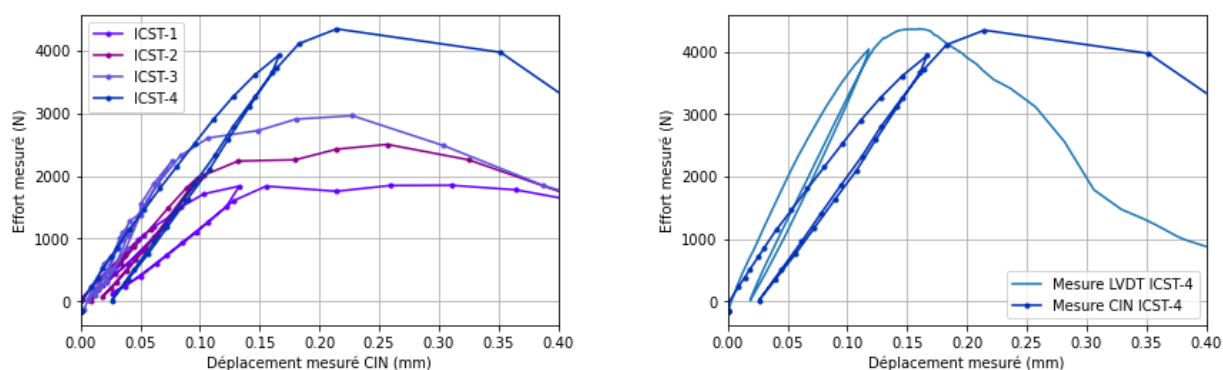
En fonction de la méthode de mesure de déplacement, deux groupes d'éprouvettes semblent se distinguer : avec la mesure de LVDT, les éprouvettes ICST-3 et ICST-4 ont des raideurs similaires (12% d'écart). Au contraire, avec la mesure de CIN, l'écart entre les raideurs des deux éprouvettes

se creuse (24%), mais les éprouvettes ICST-1 et ICST-2 ont une raideur quasiment égale. Il n'est malheureusement pas possible de comparer ces deux éprouvettes grâce à la mesure de LVDT. Pour l'instant, nous ne pouvons pas affirmer que l'origine de ces écarts est lié à l'essai ou simplement à de la dispersion due au matériau. Une campagne approfondie et une comparaison avec les mêmes essais sur d'autres matériaux permettront de statuer sur ces écarts.

Ref	Effort max (N)	Raideur LVDT (N/mm)	Raideur CIN (N/mm)	Ratio CIN/LVDT
ICST-1	1868.11	24660	19270	0.78
ICST-2	2508.28	N/A	19350	N/A
ICST-3	2971.34	45950	32900	0.72
ICST-4	4370.72	40500	25050	0.62

TAB. 2. – Résultats des essais de la configuration en traction

Nous n'imaginons pas pour l'instant que l'écart de raideur entre CIN et LVDT soit lié à des rotations hors plan (notamment selon l'axe des éprouvettes, l'axe vertical de la Figure 3a) que nous n'avons pas pu observer avec les moyens de mesure présentement mis en place. En effet, l'ordre de grandeur des déplacements induits n'engendrerait a priori pas un écart aussi important entre les deux moyens de mesure (par exemple celui qu'on observe en Figure 5b). Une rotation du montage à 45° permettrait d'installer des caméras sur le côté pour observer plus précisément et quantifier ces potentielles rotations, afin de valider ou d'invalider notre hypothèse.



(a) Courbes Effort / Déplacement CIN des quatre essais de la campagne en traction (b) Illustration de l'écart de raideur observé entre les mesures de déplacement LVDT et CIN

FIG. 5. – Courbes de comportement obtenues pendant la campagne en traction

3.3. Interprétations

La configuration en compression est à l'origine de l'accroissement de rotations modérées notamment hors plan, qui parasitent les mesures de déplacement pendant l'essai. Ces mécanismes semblent éliminés ou au moins grandement réduits en passant sur la configuration en traction.

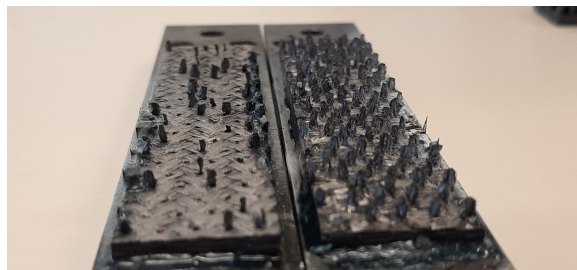
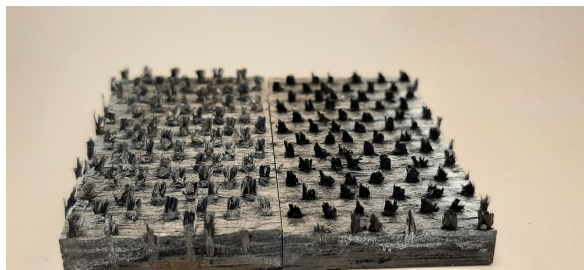
Cependant, nous sommes confrontés à des différences de mesures de déplacement entre les LVDT et la corrélation d'images. Ces différences sont peu probablement liées à des déplacements hors plan significativement plus faibles, mais nous allons les quantifier lors de prochaines campagnes d'essais pour valider ou invalider cette hypothèse. Le pourcentage d'erreur entre les raideurs calculées à partir de déplacement de CIN ou de LVDT est de l'ordre de la trentaine de pourcent.

On observe différents mécanismes de rupture pour les deux configurations, qui sont probablement associables aux différences entre les matériaux des deux campagnes d'essais.

Pour les éprouvettes de la **première version** du matériau, les faisceaux ont tendance à être séparés en deux parties et à rester encastrés dans les peaux, comme on peut le voir sur la Figure 6a. Sur les deux peaux du même échantillon, on retrouve bien les faisceaux coupés.

Au contraire, pour les éprouvettes de la **seconde version**, les faisceaux sont coupés au niveau de l'interface avec une des peaux (pli tissé à ± 45) et sont donc restés attachés à l'autre peau après la rupture (*cf.* Figure 6b.)

Ces différents mécanismes de rupture sont peut-être liés à la géométrie des faisceaux (de section ellipsoïdale pour la première version et de section circulaire pour la seconde) ainsi qu'à la structure des peaux (qui diffère également entre les deux versions). Nous pourrions confirmer cette hypothèse lorsque nous disposerons de nouvelles éprouvettes que nous testerons avec la configuration d'essais en traction.



(a) Faciès de rupture d'un échantillon de cisaillement d'âme en compression

(b) Faciès de rupture d'un échantillon de cisaillement d'âme en traction

FIG. 6. – Différences entre les faciès de rupture des picots

4. Conclusion et perspectives

Nous avons donc comparé deux approches différentes de mesure des raideurs (et par extension modules) de cisaillement de l'âme de matériaux sandwichs. Les montages développés sont isostatiques et permettent une mesure d'efforts plus fine en se défaisant des contraintes parasites de flexion ou de torsion. Cependant, ces méthodes d'essais rendent la mesure de déplacement plus délicate et des déplacements hors plan sont clairement induits dans la configuration en compression. Pour les essais avec cinématique de traction, nous devons quantifier les possibles rotations hors plan et leur potentiel impact sur les mesures de déplacement (LVDT et CIN).

Aussi, nous voudrions étudier les possibles différences entre les directions d'orthotropie des peaux (et donc des éprouvettes en général) et celles de l'âme de la **première version** du matériau. En effet, les directions privilégiées des faisceaux ne sont pas nécessairement parfaitement alignées avec les fibres, ce qui pourrait être à l'origine des cinématiques de rotation observées dans la première campagne d'essais, et qui auraient été exacerbées par le chargement en compression. Pour ce faire, nous développons une approche vibratoire simple, inspirée par les travaux de Cluzel *et alii* [4], afin d'identifier les directions d'orthotropie de l'âme ainsi que ses modules de cisaillement hors plan.

Références

- [1] M. Grédiac, L. Dufort « Experimental evidence of parasitic effects in the shear test on sandwich beams », *Experimental Mechanics* Vol. 42 n° 2, pp. 186–193, 2002.
- [2] K. Lingaiah, B. Suryanarayana « Strength and stiffness of sandwich beams in bending », *Experimental Mechanics* Vol. 31 n° 1, pp. 1–7, 1991.
- [3] D. O'Connor « An evaluation of test methods for shear modulus of sandwich cores », *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete* Vol. 6 n° 1, pp. 3–12, 1984.
- [4] C. Cluzel, E. Baranger, O. Dorival, F. Razzouck « Modélisation et identification expérimentale multi-échelle du comportement non linéaire d'une âme d'un matériau sandwich plié », in : 17e Journées Nationales sur les Composites (JNC17), , pp. 1, 2011.