



Innover
en mécanique



Les essais mécaniques sur composites

Philippe CASTAING

Ingénierie Polymères Composites

CETIM

philippe.castaing@cetim.fr



JEC 2010

14 avril 2010 – Paris

Les matériaux composites de structure

Les matériaux composites par ex dans l'aéronautique

CFRP (TD matrice époxy): stratifiés en général équilibrés parfois avec protection pli de verre (corrosion galvanique) - aéronautique

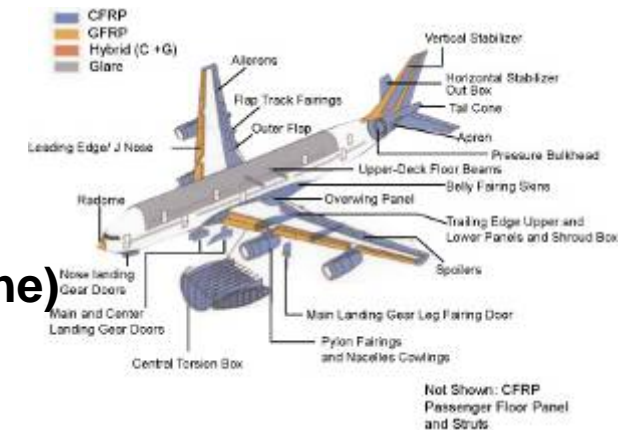
CTP pour applications moins « structurantes » et la plupart du temps encore à l'état de R&D (orientation future pour tenue à l'impact, à la fatigue, au feu)



GFRP (TD Fibre de verre matrice polyester ou epoxy)

Sandwiches Nida avec diverses peaux (Aluminium, Carbone)

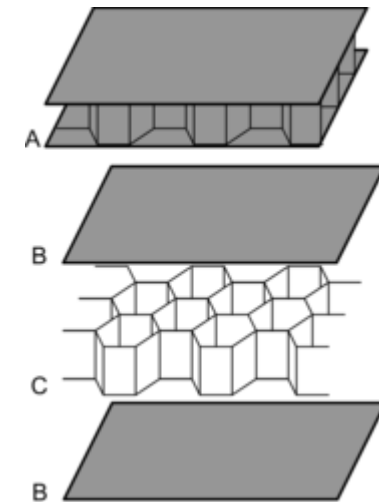
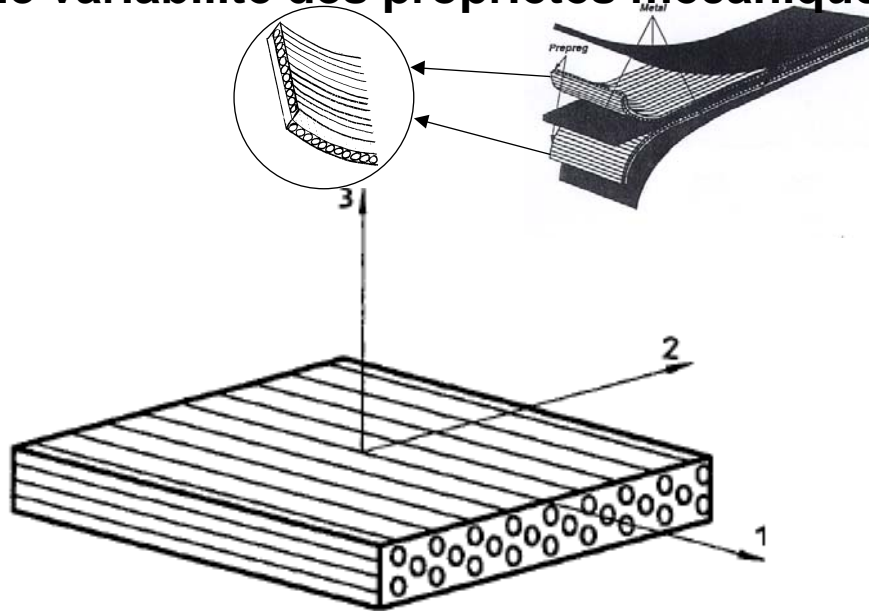
Des pièces de plus en plus structurantes



Les matériaux composites de structure

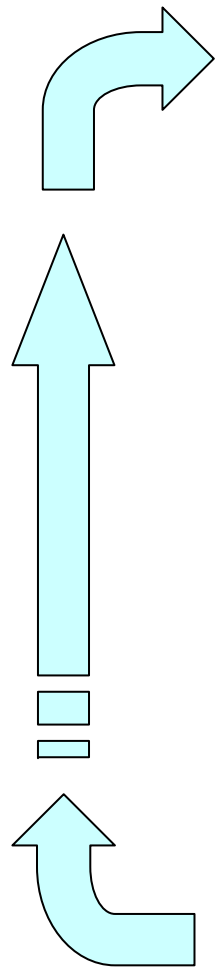
Fort module spécifique, gain de masse de 25/30 %, résistance au vieillissement, à la fatigue

Hétérogénéité de structure (fabrication, défauts, ...) induisant une variabilité des propriétés mécaniques



Des matériaux « composites » au premier sens du terme... (fibres, résine, colles, assemblages...)

Matériaux orientés, fortement anisotropes (drapage)



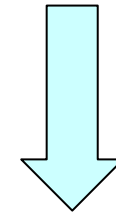
Qualité: contre réception fournisseurs sur matériau déjà qualifiés (adhésifs, résines, mèches...):

Suivi des caractéristiques de pièces structurantes à partir d'éprouvettes coupons issue d'ébauches: contrôle qualité de la fabrication et suivi statistique (MSP)

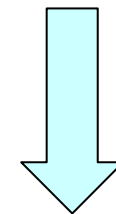
Ingénierie d'essais (mise au point avec les B.E, corrélation essais /calculs ...)

Qualification nouveau matériau (coupons, assemblages en structure)

Production

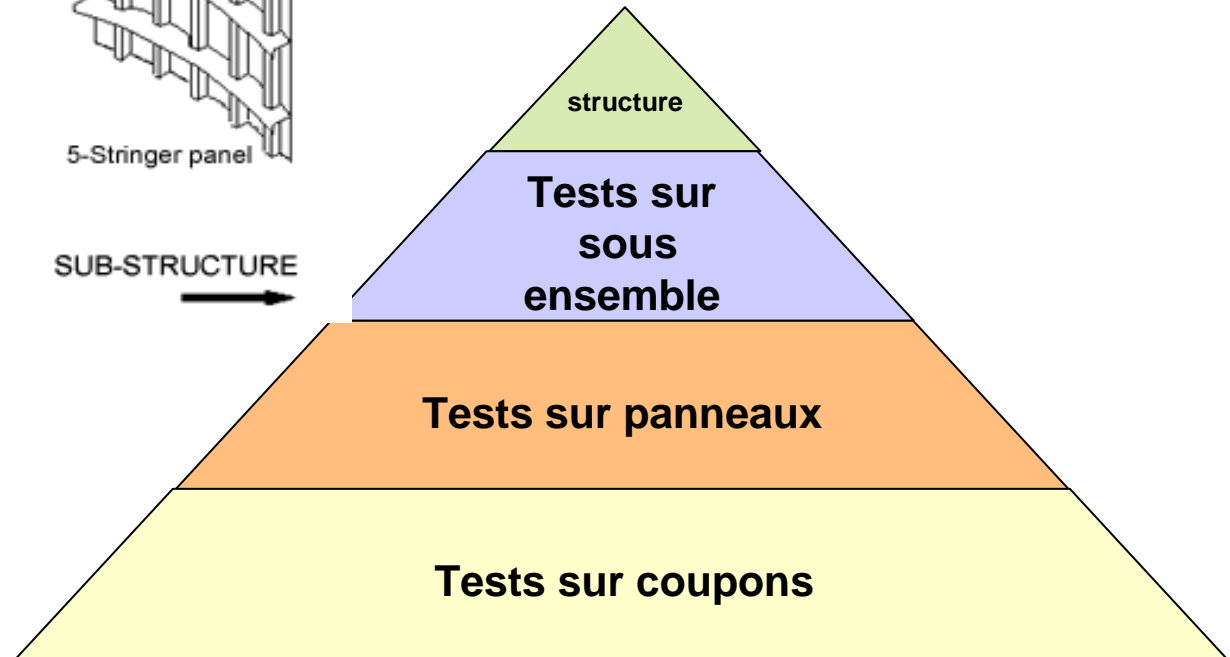
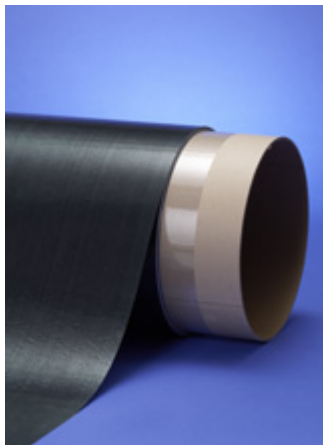
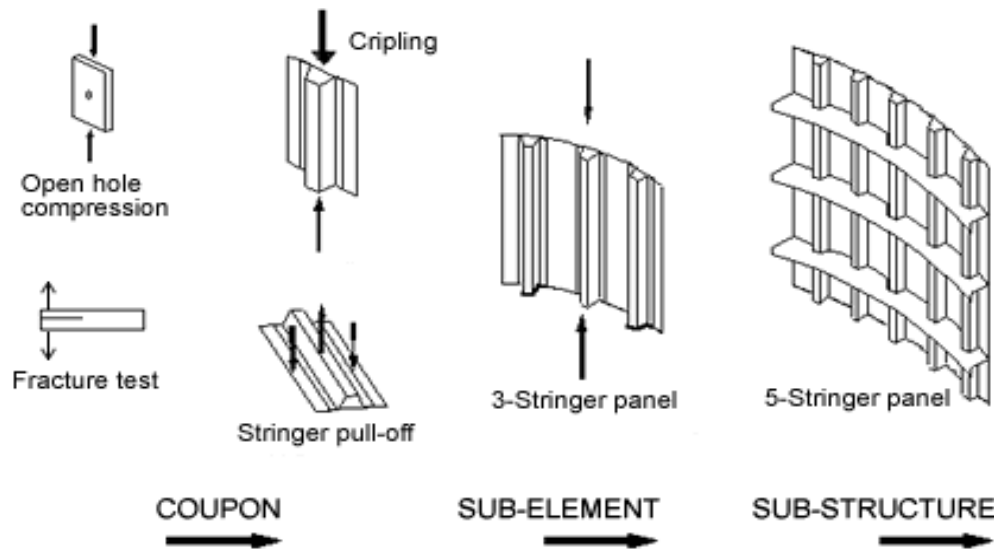


R&T



R&D

Plan de qualification « en pyramide »



Equipement d'un laboratoire d'essais mécaniques

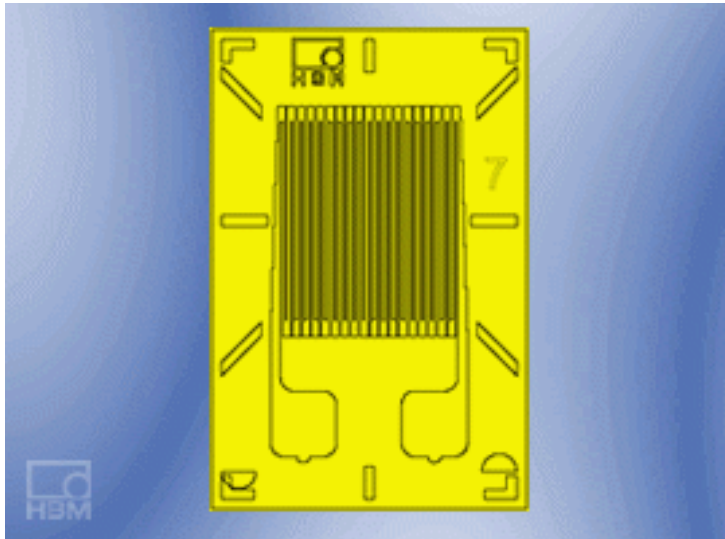
- Machine d'essai « universelle » ou particulière
- Machine d'essai « mobile » (vérin hydraulique) pour de l'ingénierie d'essai sur structure
- Montages d'essai et éprouvettes
- Instrumentation et moyen de contrôle
- Enceinte de conditionnement et d'essai





Extensomètre :

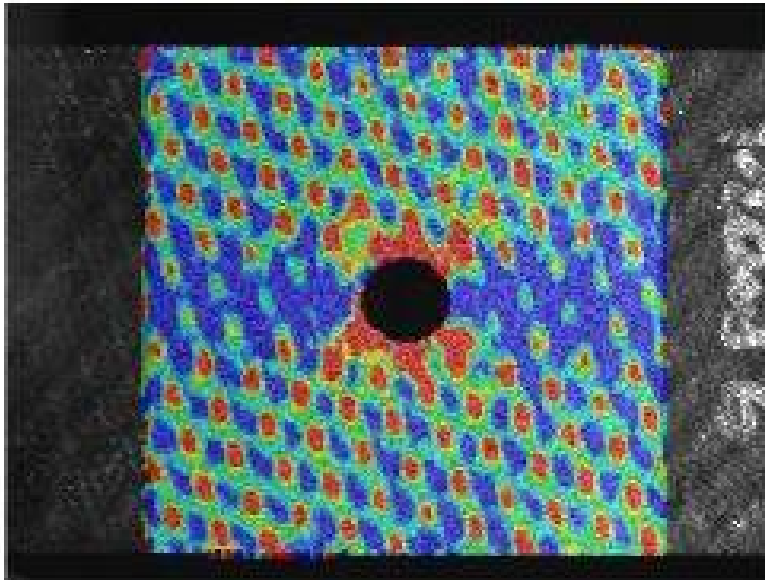
- Rapidité et simplicité d'utilisation
- Mesure macroscopique moyenné
- Contact parfois non négligeable sur l'éprouvette



Jauges d'extensométrie :

- Coût, temps et complexité d'utilisation
- Mesure localisé, à l'échelle de la grille
- Nécessité d'adaptation au matériau et à l'essai (température d'essai; nombre, taille et orientation des grilles etc..)





Mesure optique :

- méthode sans contact, possibilité d'automatiser
- Précision dépendant de la méthode
- Possibilité d'analyse poussée (champs de déformation, stéréoscopie pour déformation 3D)



Caractérisation à l'échelle du matériau

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{1111} & C_{1122} & C_{1133} & C_{1123} & C_{1131} & C_{1112} \\ C_{2211} & C_{2222} & C_{2233} & C_{2223} & C_{2231} & C_{2212} \\ C_{3311} & C_{3322} & C_{3333} & C_{3323} & C_{3331} & C_{3312} \\ C_{2311} & C_{2322} & C_{2333} & C_{2323} & C_{2331} & C_{2312} \\ C_{3111} & C_{3122} & C_{3133} & C_{3123} & C_{3131} & C_{3112} \\ C_{1211} & C_{1222} & C_{1233} & C_{1223} & C_{1231} & C_{1212} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ 2\varepsilon_{23} \\ 2\varepsilon_{31} \\ 2\varepsilon_{12} \end{Bmatrix}$$

Loi élastique : de 36 coefficients à 9 coefficients (composite « orthotrope »), puis à 4 (si structure fine), contre 2 coefficients pour les matériaux isotropes

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_1 & -\nu_{21}/E_2 & -\nu_{31}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{12}/E_1 & 1/E_2 & -\nu_{32}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{13}/E_1 & -\nu_{23}/E_2 & 1/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{12} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix}$$

Caractérisation à l'échelle du matériau

Matériaux non linéaire, critère de rupture : des grandeurs mécaniques supplémentaires à caractériser

$$\frac{\sigma_{11}^2}{X^T X^C} + \frac{(\sigma_{22}^2 + \sigma_{33}^2)}{Y^T Y^C} + \frac{(\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2 + \sigma_{23}^2)}{S_C^2} - \frac{(\sigma_{11}\sigma_{22} + \sigma_{11}\sigma_{33})}{\sqrt{X^T X^C Y^T Y^C}} - \frac{\sigma_{22}\sigma_{33}}{Y^T Y^C} + \sigma_{11} \left(\frac{1}{X^T} - \frac{1}{X^C} \right) + (\sigma_{22} + \sigma_{33}) \left(\frac{1}{Y^T} - \frac{1}{Y^C} \right) \geq 1$$

Exemple : Critère de rupture de Tsai-WU : 5 coefficients

XT : résistance à la traction dans la direction 1

XC : résistance à la compression dans la direction 1

YT: résistance à la traction dans la direction 2

YC: résistance à la compression dans la direction 2

Sc : résistance au cisaillement

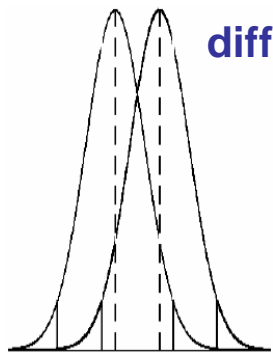
Caractérisation à l'échelle du matériau

Importance de la normalisation des essais :

- « Aucun essai n'est parfait » donc la valeur caractérisée dépend de la méthode utilisée
- L'utilisateur final de la valeur n'a pas d'échange avec le laboratoire d'essai
- Définir les responsabilités de chacun

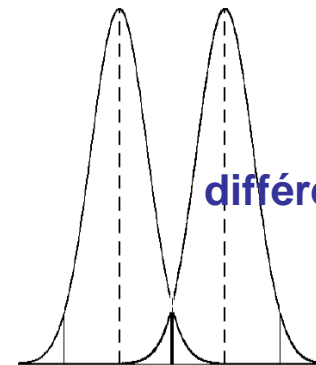
Importance de l'exploitation statistique des résultats

- A partir de la moyenne et de l'écart-type des résultats d'essais, on détermine un « intervalle de confiance » du résultats, qu'il faut prendre en compte pour juger si une différence mesurée est significative



différence non significative

**Répartition
gaussienne des
résultats autour de
la valeur moyenne**



différence significative

Cisaillement plan : introduction de flexion parasite

Compression : besoin d'un montage stabilisateur

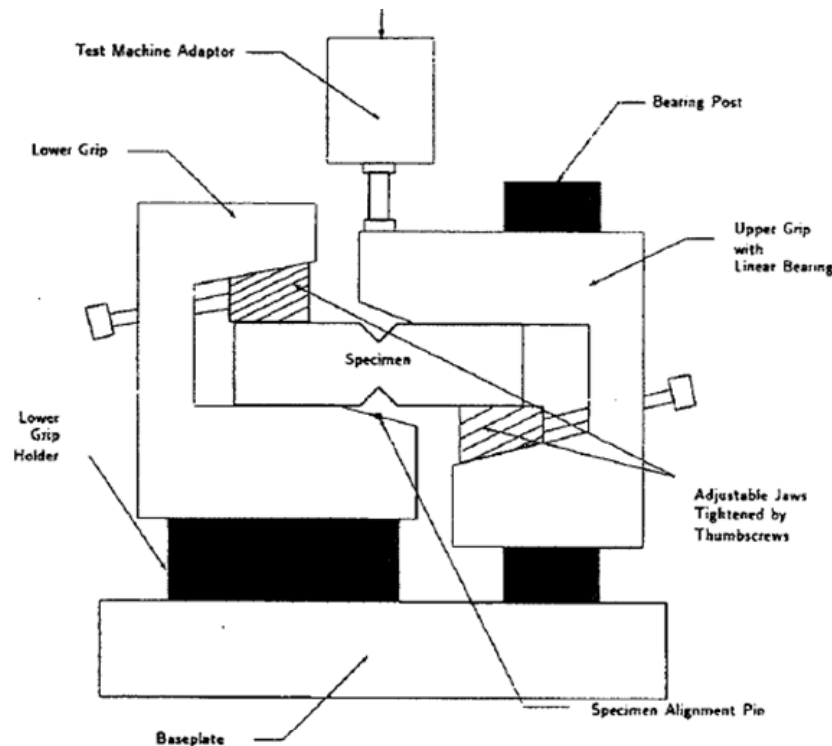
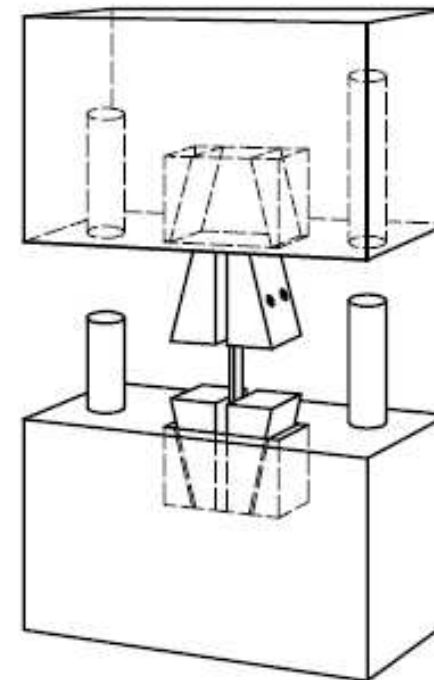


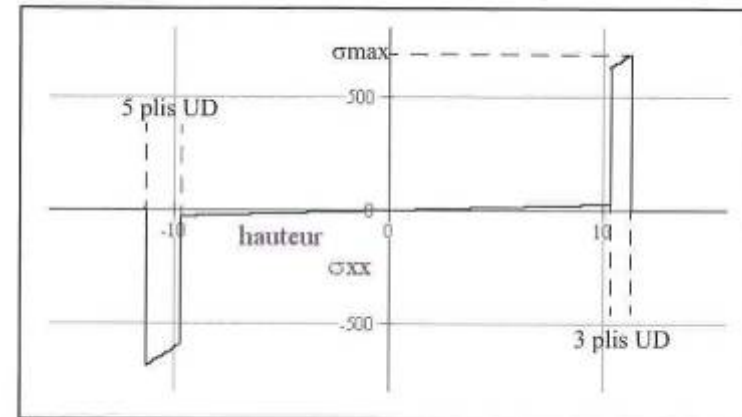
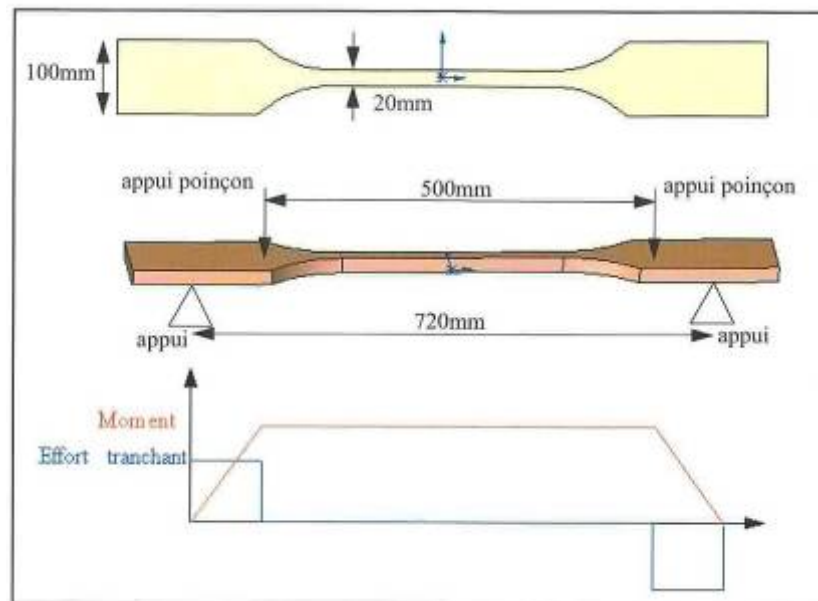
FIG. 3 V-Notched Beam Test Fixture Schematic



D'où la nécessité de développer des éprouvettes
« intelligentes » en fonction des besoins

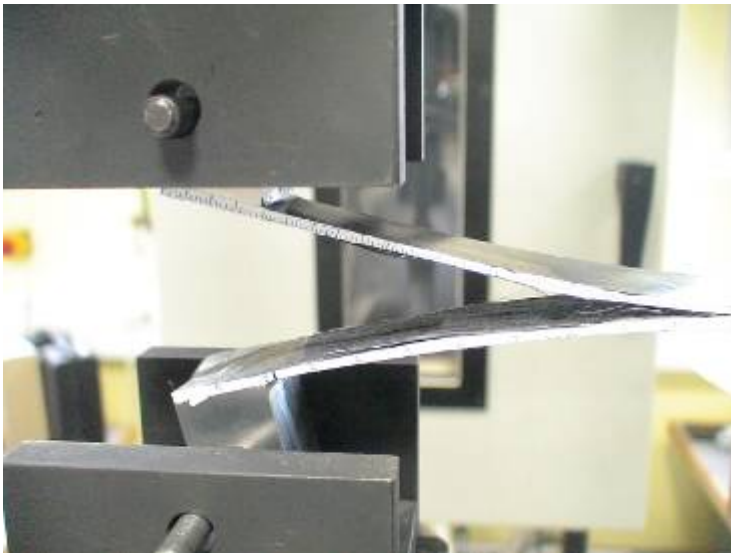
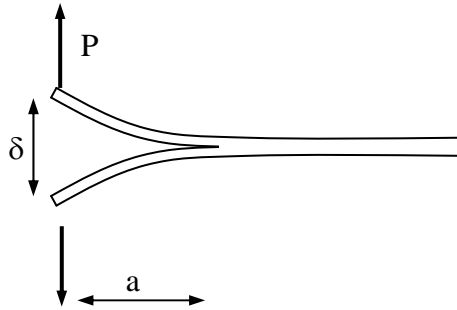
Caractérisation en compression d'un composite par essai de flexion quatre points d'une structure sandwich :

- Possibilité de tester des éprouvettes de grandes tailles sans risque de flambage (prise en compte des effets d'échelles)
- Minimisation et mesure des effets parasites (effort homogène, pas de cisaillement transverse en surface...)



Essais avancés de caractérisation d'une loi matériau : quelques exemples

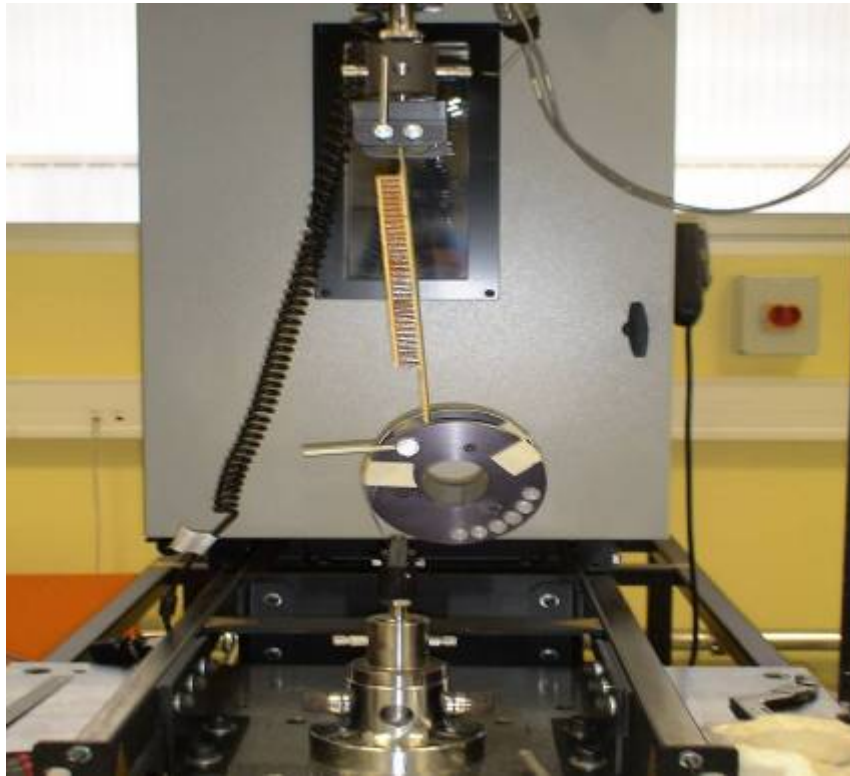
Détermination de l'énergie
nécessaire au délaminage : G1C



Compression trouée (étude de la
concentration de contrainte) ou
après impact



Caractérisation des structures sandwichs



Essai « tambour grim pant » pour caractérisation du pelage (décollement en traction de la colle)



Essai « carré Fokker » pour caractérisation de la traction sens 3 (épaisseur)

Essais sur liaisons boulonnées, collées...

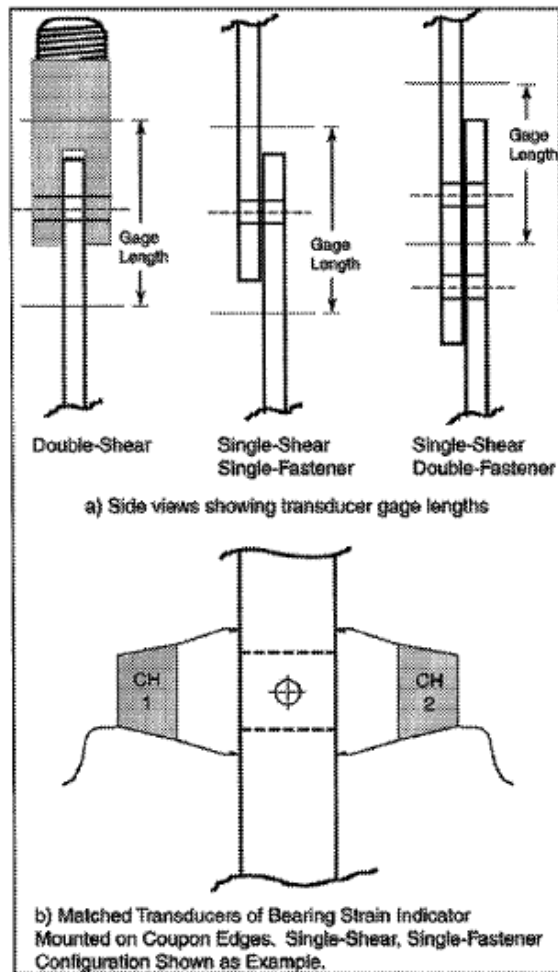
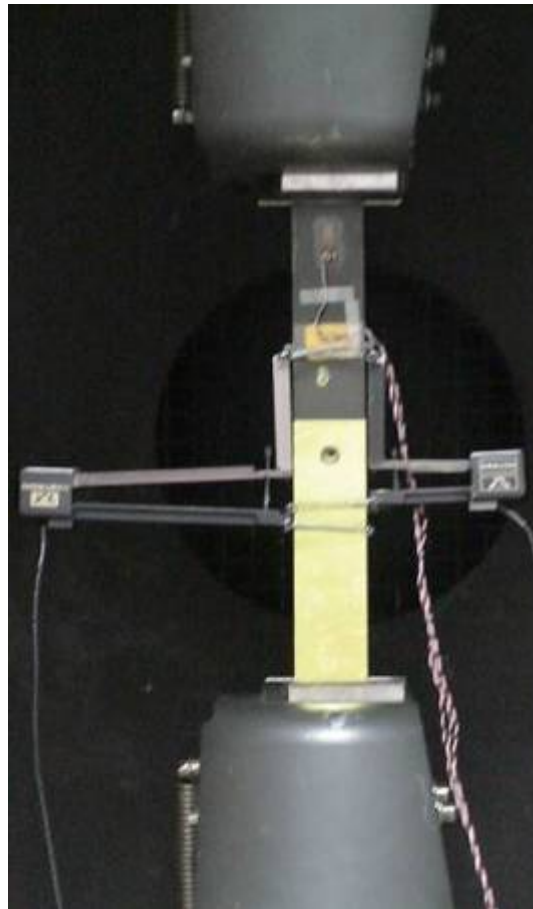
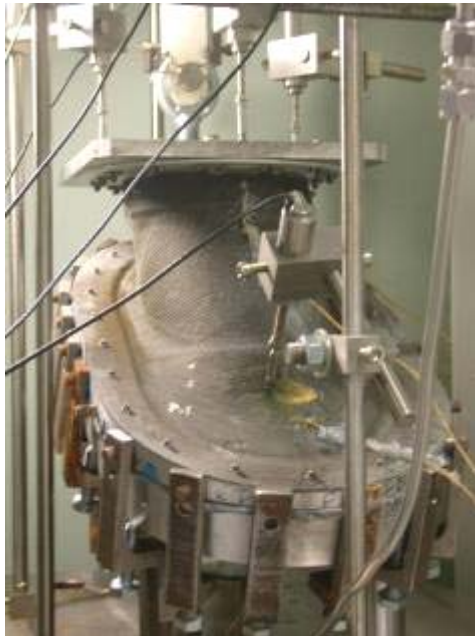


FIG. 10 Transducer Gage Length and Location

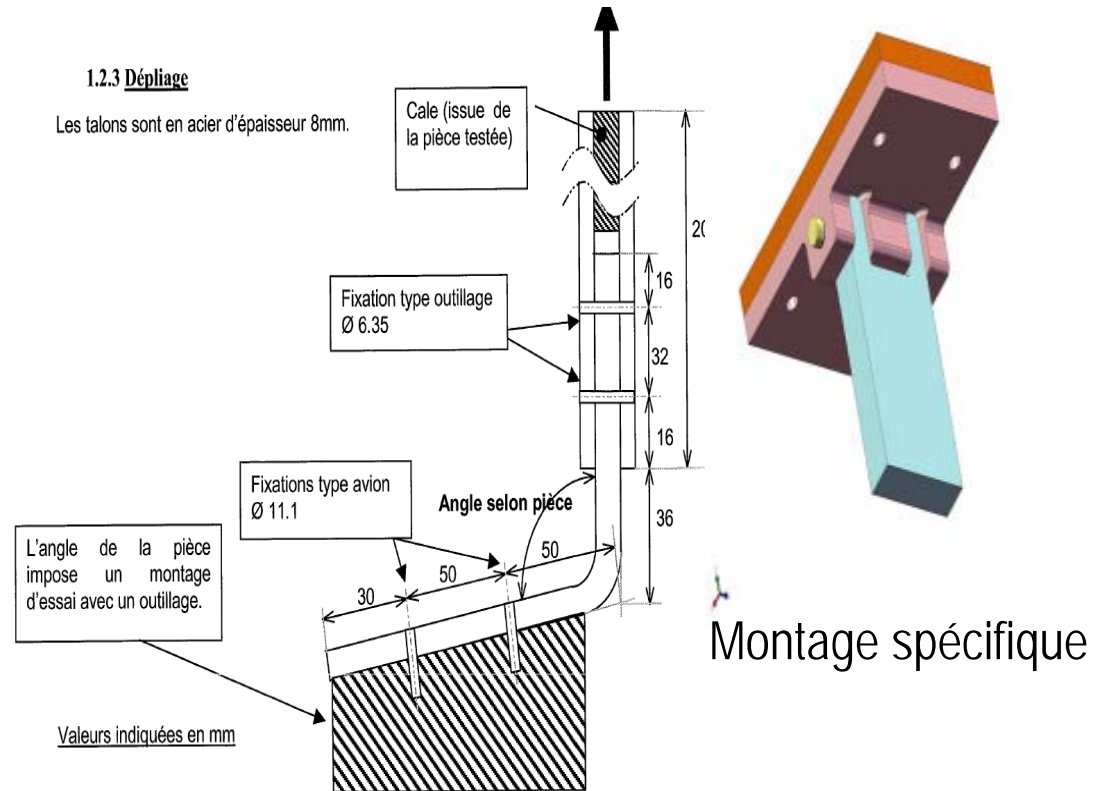
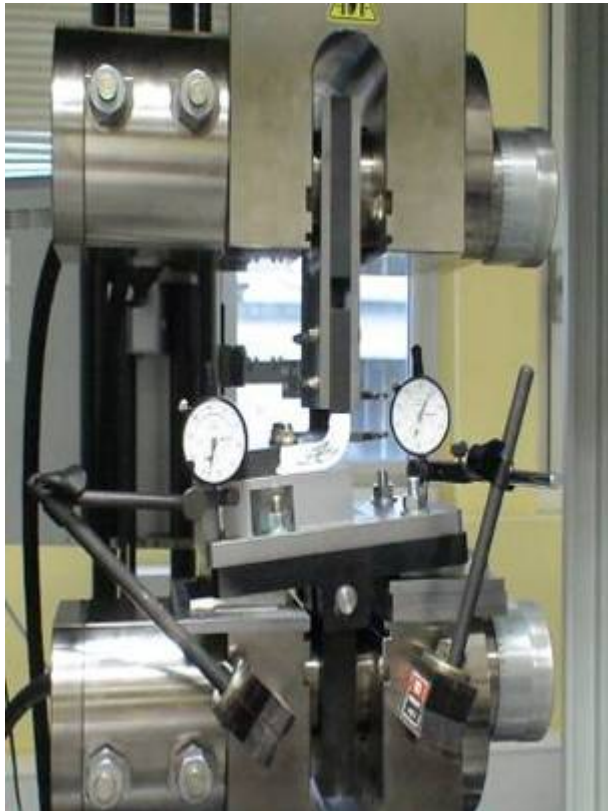


Obtention de ruptures complexes mêlant matage du matériaux et endommagement de la fixation.

Essais instrumentés sur structures : écope en pression



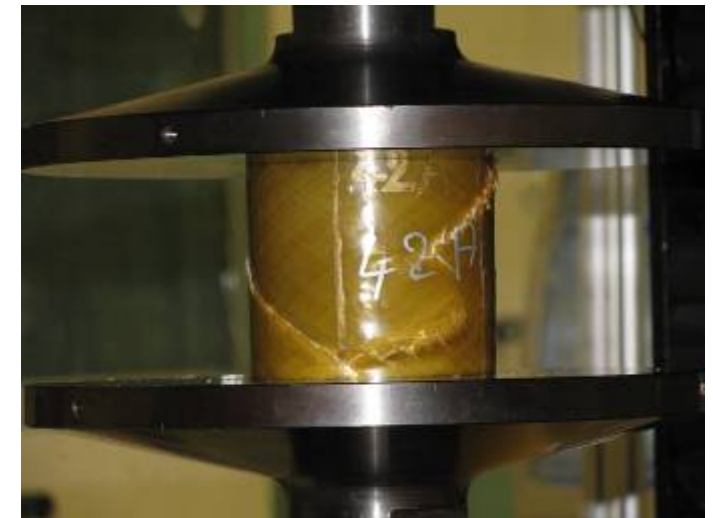
Écope composite
carbone/epoxy.
Pilotage simultané en
pression/force le tout en
température



Données de sortie: contrainte ultime au dépliage, modes de fissuration

- Compression longitudinale

	Charge à rupture (kN)	Contrainte à rupture (MPa)	Module (Corde 0,3 % - 0,6 %) (MPa)
1	90,1	84,82	8 087,8
2	151,9	143,00	-----
3	96,9	89,12	8 525,0
4	143,3	131,85	-----
5	90,9	85,28	7 670,2
6	81,3	76,27	7 963,9
7	148,9	139,71	-----
Moyenne	114,7	107,15	8 061,7
Ecart-type	31,57	29,47	355,04



ESSAI DE COMPRESSION

Note 1

COMPRESSION sur tube composite (enroulement filamentaire), inspirée de la norme ASTM D695 "détermination de la résistance à la compression, du module"

Référence des cylindres : 42A, 42B et 42C

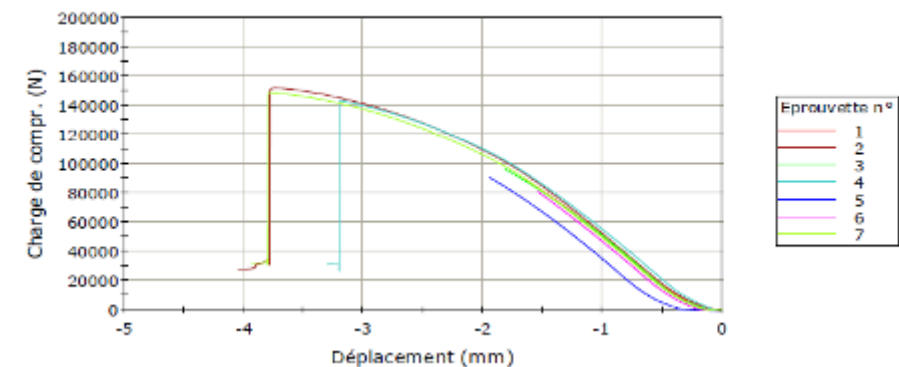
Note 2

Machine de traction INSTRON 1196 pilotée en acquisition de données

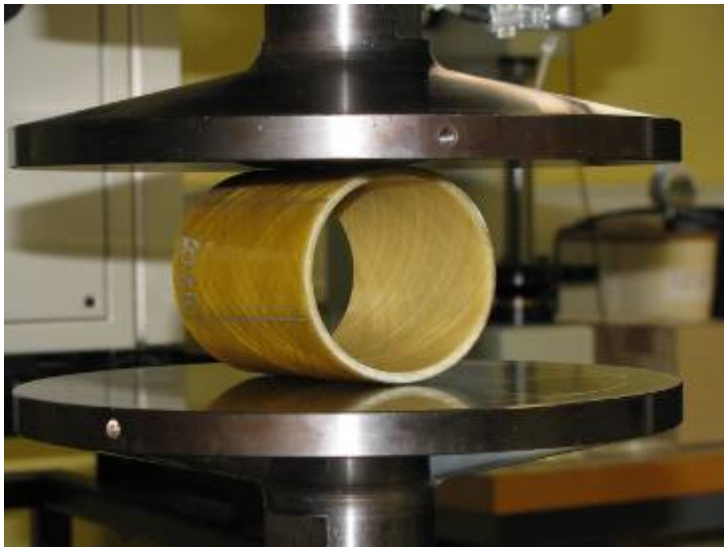
Cellule de force INSTRON 250 kN de classe 0,5

Plateaux de compression non rotulés,

Extenso +/-12.5 vec L0 = 50mm

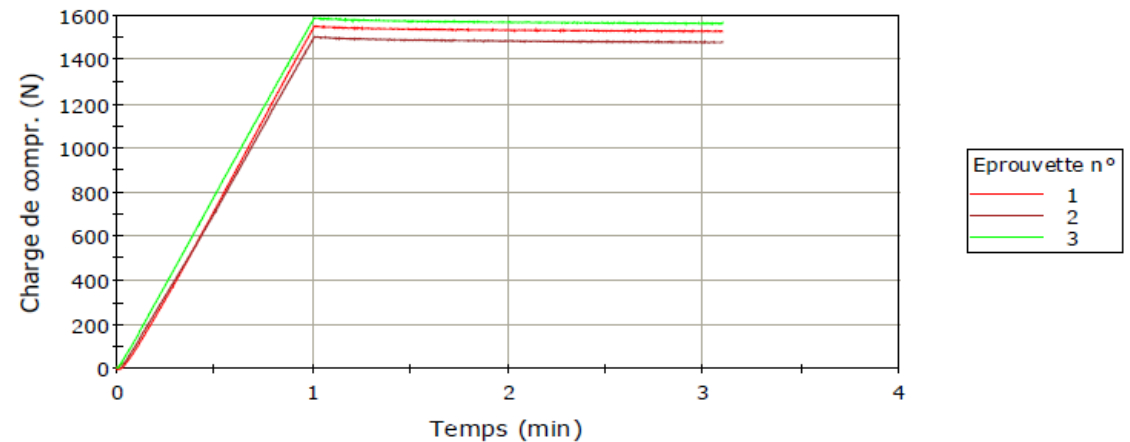


- Flexion/compression



	Etiquette d'éprouvette	Diamètre moyen tube (mm)	Charge après 2 minutes de deflexion 3% (N)
1	42E1	84,15	-1 531
2	42E2	84,15	-1 481
3	42E3	84,15	-1 565

Eprouvette 1 à 3



Essais sur Tube composite verre (enroulement filamentaire)
Norme EN 1228

Machine 1196, cellule 250KN, Plateaux de compression 100KN

Methode : Compression EN 1228
Fichier : Compression Tube 42

Caractérisation de structures (tubes)

- Flexion 4 points sur structure





Innover
en mécanique

