

Marc Anduze
RT - LLR



IN2P3

Institut national de **physique nucléaire**
et de **physique des particules**

Réseau Instrumentation
R&D MECANIQUE

- **Merci à Daniel Vincent pour son accueil**
- **Programme de la journée :**

Journée du réseau R&D mécanique

mercredi 18 septembre 2013 de **08:00** à **18:00** (Europe/Paris)

mercredi 18 septembre 2013

- | | |
|---------------|--|
| 10:00 - 10:10 | introduction 10'
Intervenant: Mr. marc anduze (LLR-Ecole Polytechnique CNRS/IN2P3) |
| 10:10 - 10:40 | Utilisation de capteurs à réseau de Bragg dans les matériaux composites 30'
Intervenant: Mr. marc anduze (LLR-Ecole Polytechnique CNRS/IN2P3) |
| 10:40 - 11:10 | Le cooling dans ILD 30'
Intervenant: Mr. Julien GIRAUD (CNRS LPSC) |
| 11:10 - 11:40 | Assemblage multicouches pour cornets millimétriques et interrupteurs cryogéniques 30'
Intervenant: Nathan Bleurvacq (APC) |
| 11:40 - 12:10 | Découverte et utilisation de techniques de fabrication directe 30'
Intervenant: Mr. Marc KRAUTH (IPHC) |
| 14:00 - 16:00 | Discussions autour du réseau 2h0'
Intervenant: Mr. marc anduze (LLR-Ecole Polytechnique CNRS/IN2P3) |

Marc Anduze
RT - LLR



IN2P3

Institut national de **physique nucléaire**
et de **physique des particules**

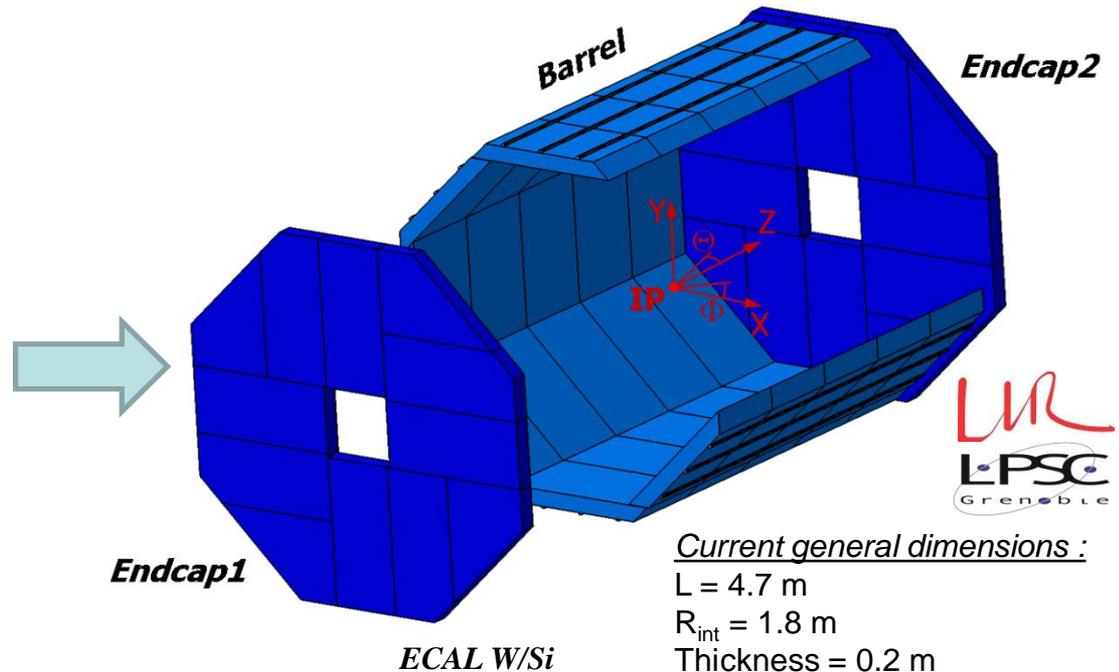
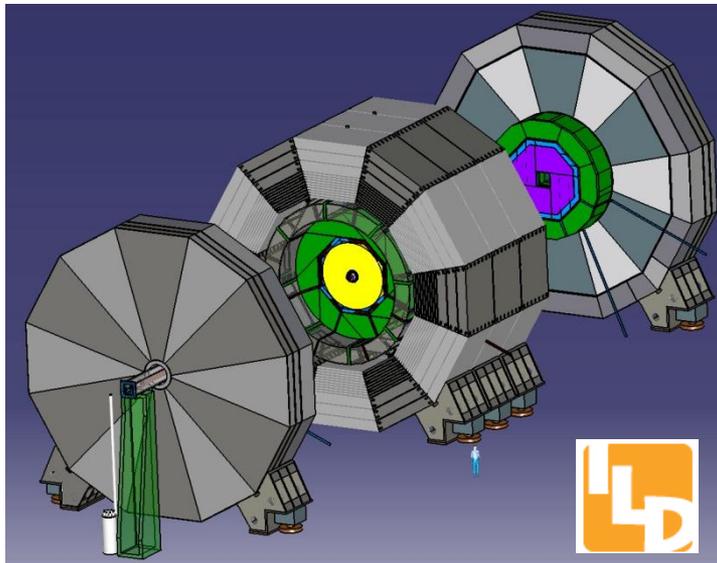
**Utilisation de capteurs à réseaux de bragg
dans les matériaux composite
- Démonstrateur LLR -**

Cadre de l'Etude (1/2)

- Projet : Calorimètre Electromagnétique (ECAL) pour ILC**

Concevoir un calorimètre adapté à la physique du collisionneur linéaire International. La meilleure approche à l'analyse de la physique attendue consiste à être capable de **reconnaître individuellement chaque particule** d'un évènement (PFLOW) :

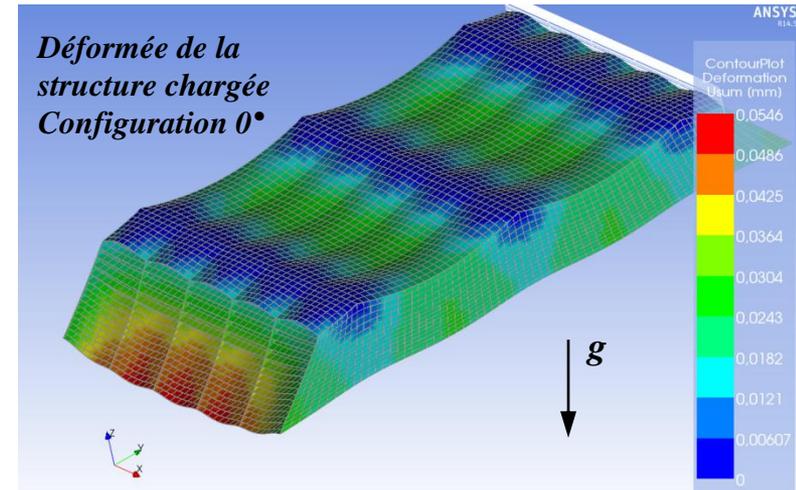
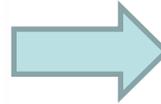
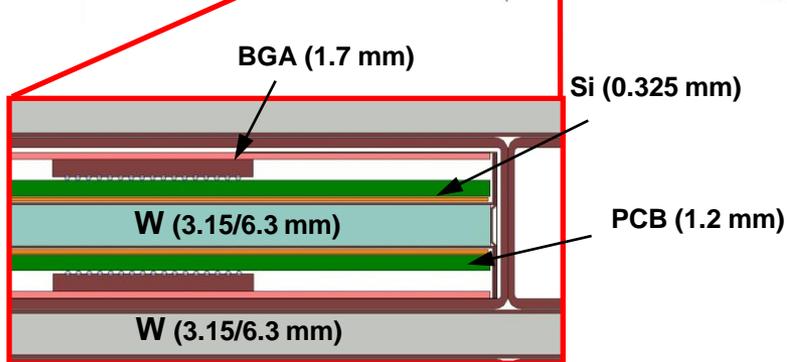
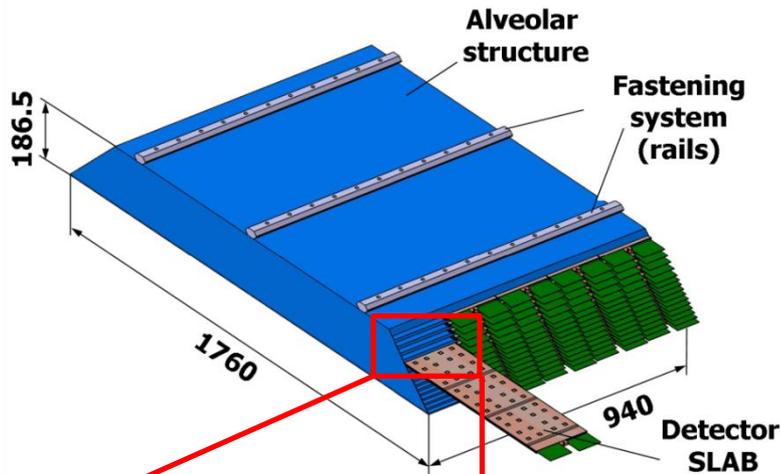
Densité, compacité et **granularité** du calorimètre très élevées avec un minimum de **zones mortes** : **ECAL W/Si**



Cadre de l'Etude (2/2)

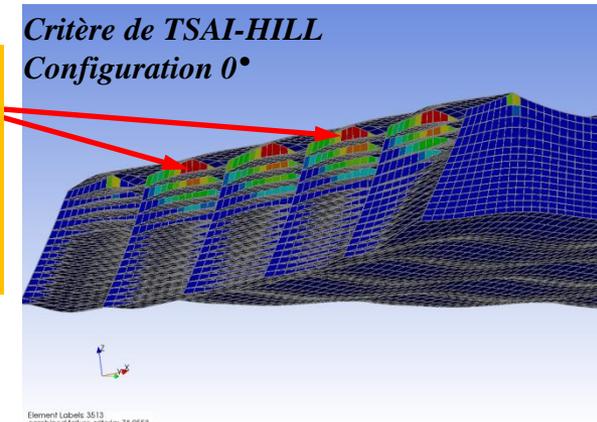
- Concept de **structure alvéolaire** auto portante en matériau composite (C/E), incluant la moitié de l'absorbeur (W) dans laquelle sont insérés les éléments de détection (Si)

Exemple : module du barrel (~2 tonnes)



Localisation des Contraintes maxi :

Nécessité d'équiper un prototype de capteurs dans ces zones pour vérifier et valider les simulations



Choix du capteur

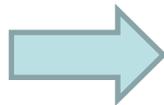
- **Cahier des charges :**

1- Connaitre l'état de **contraintes** et de **déformations** dans les toiles inter-alvéoles : extensométrie (*mesure de l'allongement relatif*)

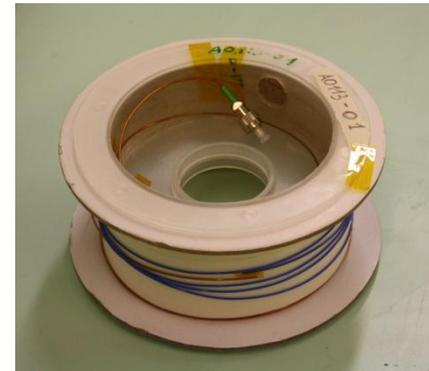
2- Capteurs placés au niveau des rails de fixation : **faibles dimensions** avec la difficulté de les placer au centre de la structure (~1,5 m)

3- Préférence de capteurs directement implantés lors de la phase de fabrication : **capteurs non-intrusifs** (*ne perturbent pas le comportement mécanique du stratifié*) et supportant les **conditions de cuisson** (*température : 120°C ; pression : 7 bars*)

4- **Nombre important** de capteurs le long de chaque toile



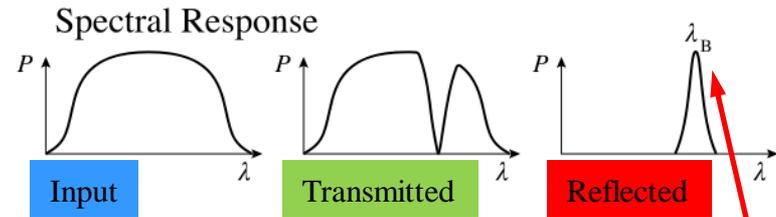
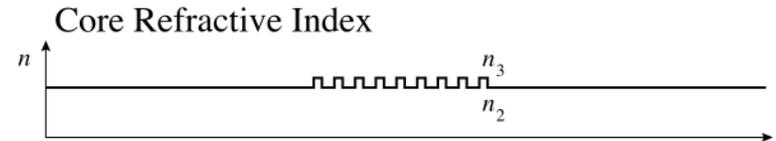
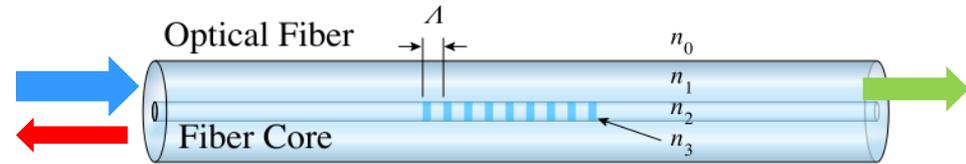
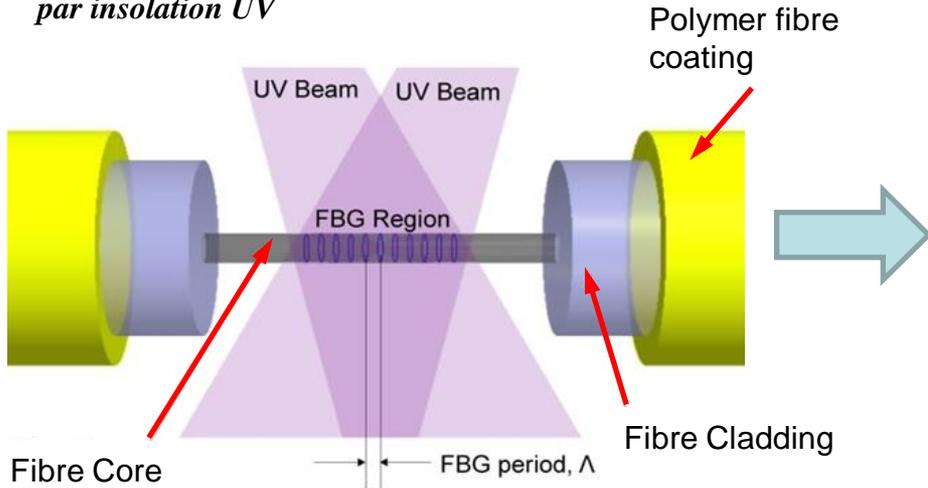
Utilisation de Fibres optiques à **réseaux de bragg**



Principe du réseau de Bragg (1/3)

- Définition :** Perturbation périodique de **l'indice de réfraction** le long d'une fibre optique par procédé d'inscription (insolation UV liée aux propriétés de photosensibilité de la silice dopée) permettant d'obtenir une figure d'interférence (succession de franges sombres et brillantes)

Procédé de gravure du réseau par insolation UV



longueur d'onde caractéristique dite de Bragg :

$$\lambda_B = 2\Lambda n_{\text{eff}}$$

avec Λ : période des franges
 n_{eff} : indice de réfraction effectif.

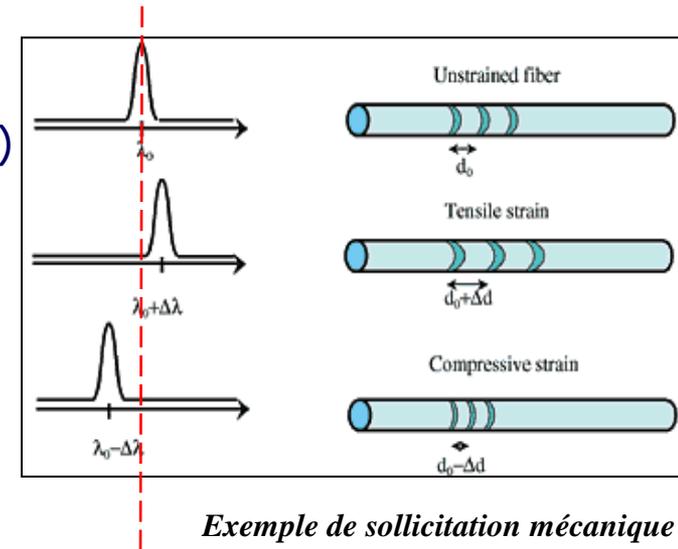
Principe du réseau de Bragg (2/3)

• Sollicitations

Le réseau de Bragg peut jouer un rôle de capteur (FBG) car sous une sollicitation extérieure (allongement ε , Température T), Λ et n_{eff} varie et décale le spectre de réponse du réseau suivant la relation :

$$\frac{\Delta\lambda_b}{\lambda_b} = a\Delta T + b\varepsilon$$

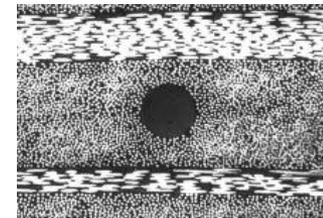
avec : $a \sim 7 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$; $b \sim 0,78 \cdot 10^{-6} / \mu\text{m}/\text{m}$ (pour fibre mono-mode standard SMF 28)



Exemple de sollicitation mécanique

• Avantages inhérents à la fibre optique :

- Résistance à haute température (-70° à 400°C)
- Signal optique : Immunité aux interférences électromagnétiques, hautes tensions, vibrations ...
- Faible encombrement et poids favorise leur intégration au cœur du matériau
- Signature spectrale étroite et absolue : mise en série possible de capteurs sur une même fibre optique (mesures simultanées en plusieurs points d'une structure) et pas de calibration nécessaire

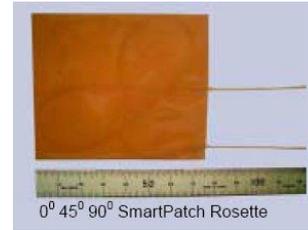


Capteur non-intrusif

Principe du réseau de Bragg (3/3)

• Verrous technologiques

- Fragilité
- Connectivités des capteurs
- Manipulation des pièces instrumentées
- Usinabilité & réparabilité
- Qualité de l'interface matière/fibre
- Champs de contraintes résiduels liés à la fabrication de la pièce instrumentée (effets tridimensionnels d'une cuisson composite)
- Coût des capteurs et des systèmes de mesures



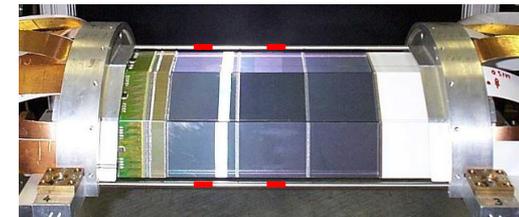
*Exemple de système d'interrogation
(<125 capteurs / voie ; <16 voies)*

• Domaines d'application des fibres optiques à réseaux de Bragg

- Télécommunication : composants passif filtrant
- Génie Civil : Suivi de déformations des ponts,
- Capteurs intégrés dans les pales d'éolienne :
 - Structure et Matériaux intelligents
 - Contrôle Santé Structure
 - Détection de dommage (microfissures, impacts, délaminages ...)

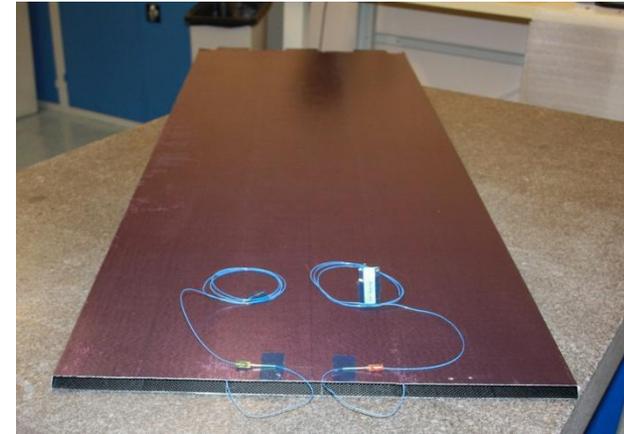


Surveillance des pales



Mesure de la déformation de la structure d'un détecteur de vertex (INFN-Frascati collaboration)

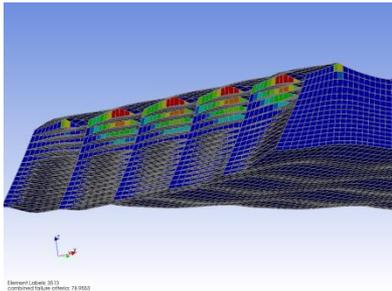
Démonstrateur LLR



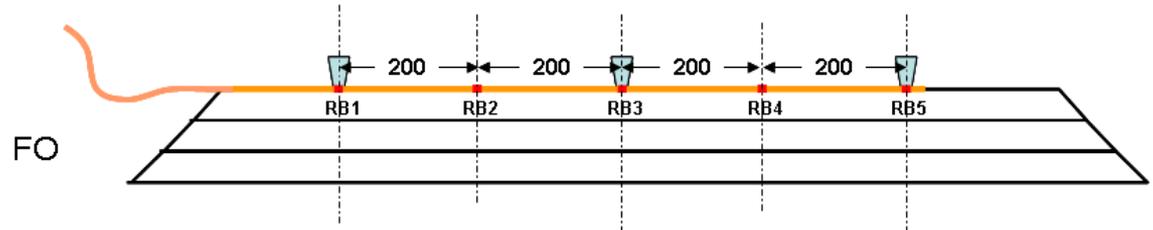
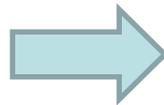
- **Tests de flexion 3 et 4 points sur un démonstrateur équipé de FBGs**

- **Choix du démonstrateur**

- 1) une couche d'alvéole comportant **3 alvéoles** et **représentative** de la structure finale.
- 2) mise en place des fibres optiques dans les zones les **plus sollicitées** (directement sous les rails : FBG1/FBG3/FBG5) + zone à **allongement important** (FBG2/FBG4).



Simulation du comportement mécanique

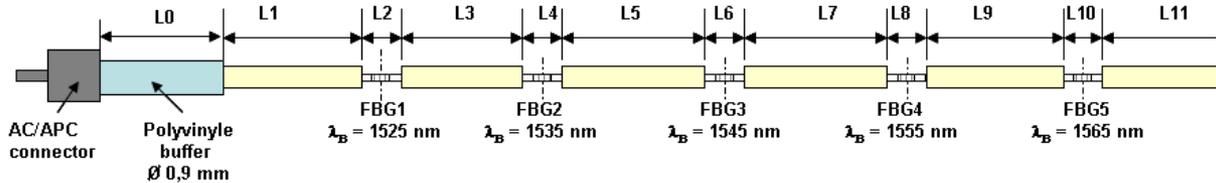


Définition de la fibre optique utilisée avec 5 FBG en série

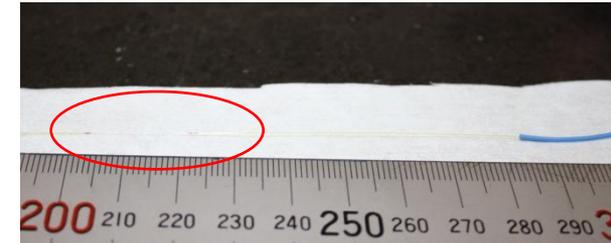
- 3) Intégration des fibres dans les toiles inter-alvéolaires, lors de la **fabrication** du démonstrateur

Tests de réception (1/2)

- **Définition des FBGs** : fibre mono-mode standart SFM 28E comportant 5 FBGs



	<i>L0</i>	<i>L1</i>	<i>L2</i>	<i>L3</i>	<i>L4</i>	<i>L5</i>	<i>L6</i>	<i>L7</i>	<i>L8</i>	<i>L9</i>	<i>L10</i>	<i>L11</i>
Type CALICE (mm)	3000		20		20		20		20		20	
	Polyvinyle buffer		FBG1 No recoating		FBG2 No recoating		FBG3 No recoating		FBG4 No recoating		FBG5 No recoating	
		200		180		180		180		180		600



- **Vérification des longueurs d'onde de bragg de chaque fibre**

Utilisation d'un analyseur de spectres optique :
si720 (Micron Optics)

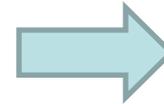
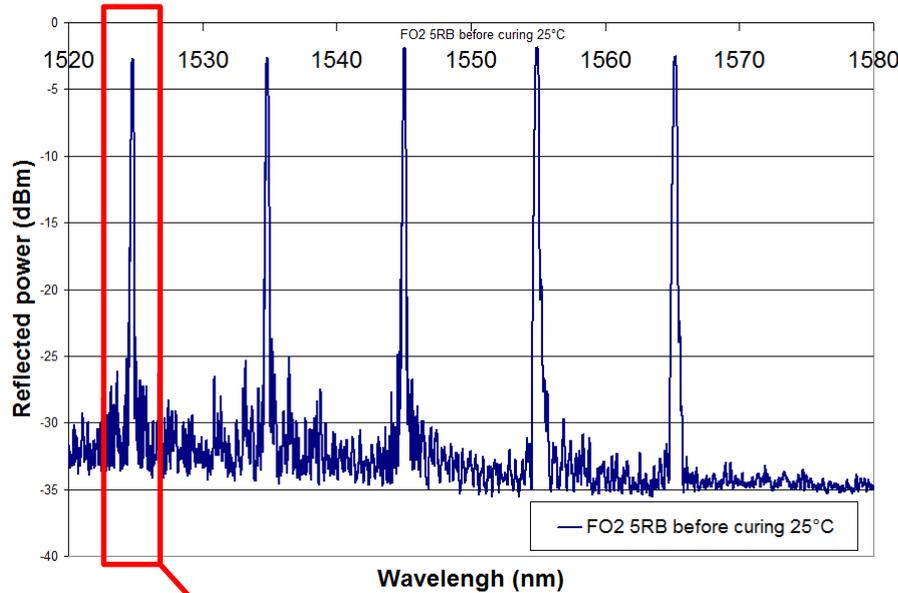
Principales caractéristiques :

- plage de longueurs d'onde comprise entre 1510 et 1590 nm, avec un intervalle de 2.5 pm.
- balayage à 5Hz de cette plage,

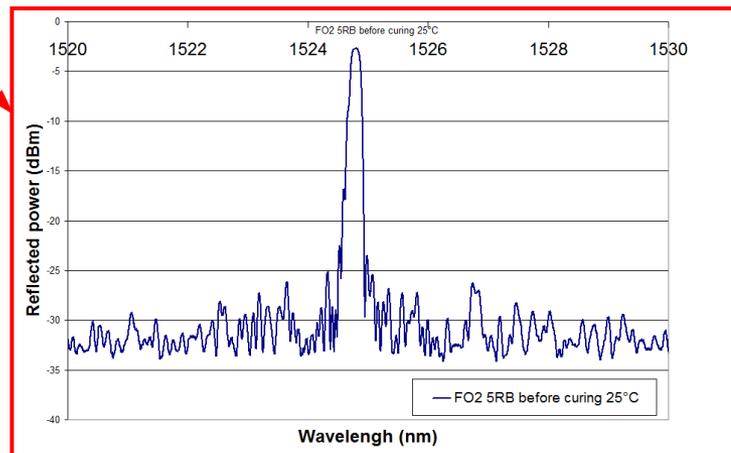


Tests de réception (2/2)

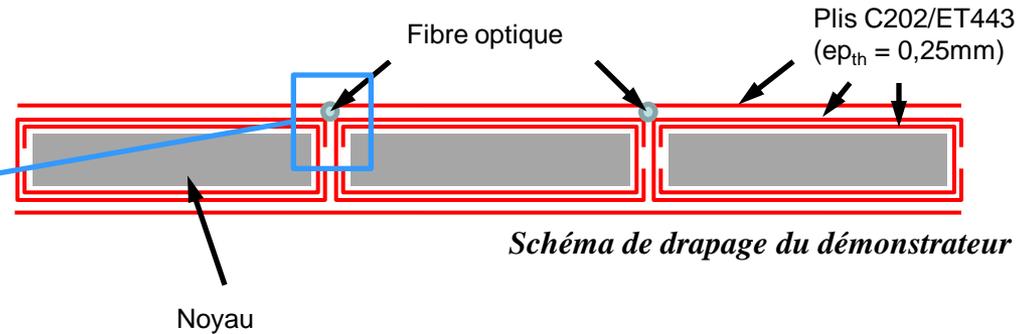
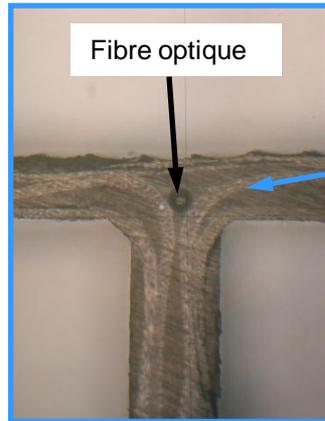
- Exemple de spectre d'une fibre optique (à 25°C) :



λ_B demandé (nm)	λ_B mesuré (nm)
1525	1524,81
1535	1534,86
1545	1545,1
1555	1554,96
1565	1565,25



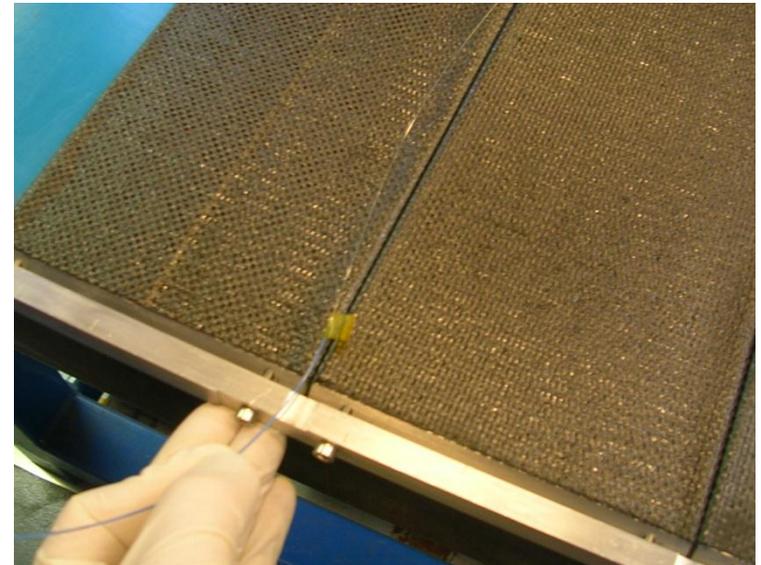
• Intégration des fibres lors de la phase de drapage des plis du stratifié :



Opération délicate :

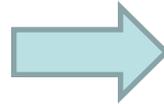
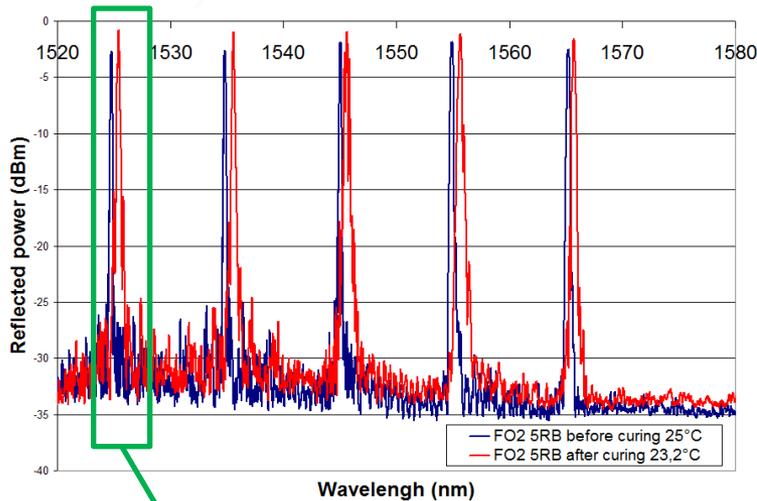
- 1) manipulation d'une fibre optique avec des points fragiles : les zones des FBG sont exemptes de gaine de protection pour assurer une meilleure **interface** fibre/matière
- 2) risques de **pincement** de la fibre lors du drapage
- 3) Risques de **rupture** lors de la cuisson liées aux contraintes internes imposés par une cuisson en autoclave (compactage)
- 4) Mise en place manuelle des fibres : erreur de **positionnement** des FBGs estimées à $\pm 1 \text{ mm}$.

Mise en place d'une fibre

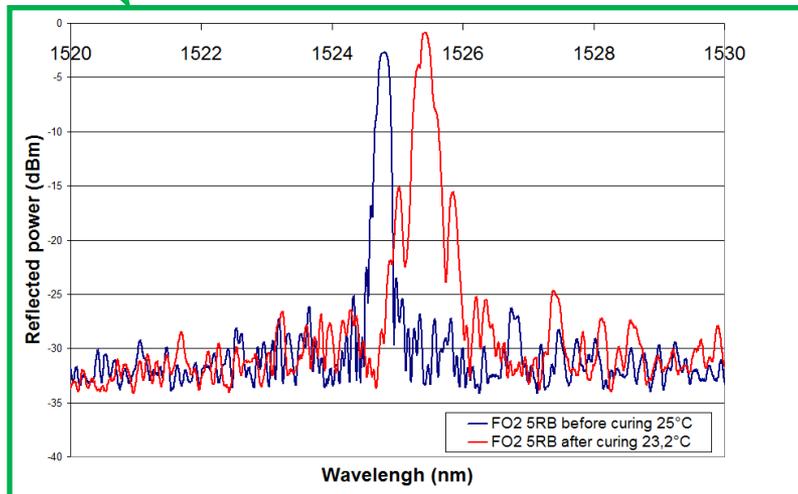


Contrôle après cuisson (1/2)

- 1^{er} exemple de spectre d'une fibre optique (à 23°C) :



λ_B demandé (nm)	λ_B mesuré avant (nm)	λ_B mesuré après (nm)	$\Delta\lambda_B$ (nm)
1525	1524,81	1525,45	+0,64
1535	1534,86	1535,61	+0,75
1545	1545,1	1545,67	+0,57
1555	1554,96	1555,72	+0,76
1565	1565,25	1665,75	+0,5



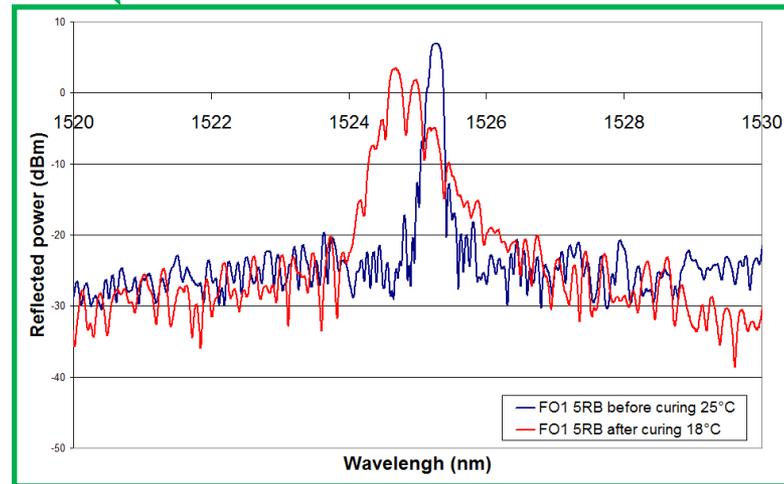
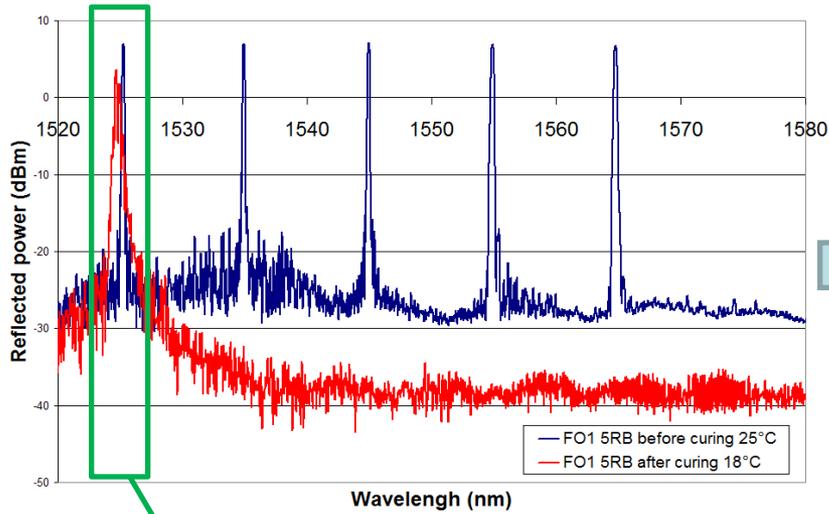
Fibre optique utilisable après cuisson mais :

- léger **décalage systématique** des λ_B
- variation quasi **identique** pour tous les FBGs
- spectre **moins propre**

→ certainement le résultat des contraintes thermomécaniques qu'à subit la fibre lors de la cuisson (pression, dilatation, changement d'indice lié à la température ...)

Contrôle après cuisson (2/2)

- 2^{ème} exemple de spectre d'une fibre optique (à 23°C) :



λ_B demandé (nm)	λ_B mesuré avant (nm)	λ_B mesuré après (nm)	$\Delta\lambda_B$ (nm)
1525	1525,31	1524,71	-0,6
1535	1534,66	-	-
1545	1545	-	-
1555	1554,94	-	-
1565	1564,8	-	-

Fibre optique **non utilisable** après cuisson :

- λ_B sur seulement le FBG1

→ certainement **rupture** de la fibre optique entre FBG1 et FBG2

• Description :

- Flexion 3 et 4 points
- Tests non destructifs
- Sollicitations limitées pour une flèche ≤ 5 mm (grands déplacements)
- Conception d'un banc spécifique (dimensions non adaptées d'une machine de traction)

• Procédure :

Mesure de 3 flèches (comparateurs) et 5 allongements ϵ (FBG) en fonction de la masse M_i imposée.

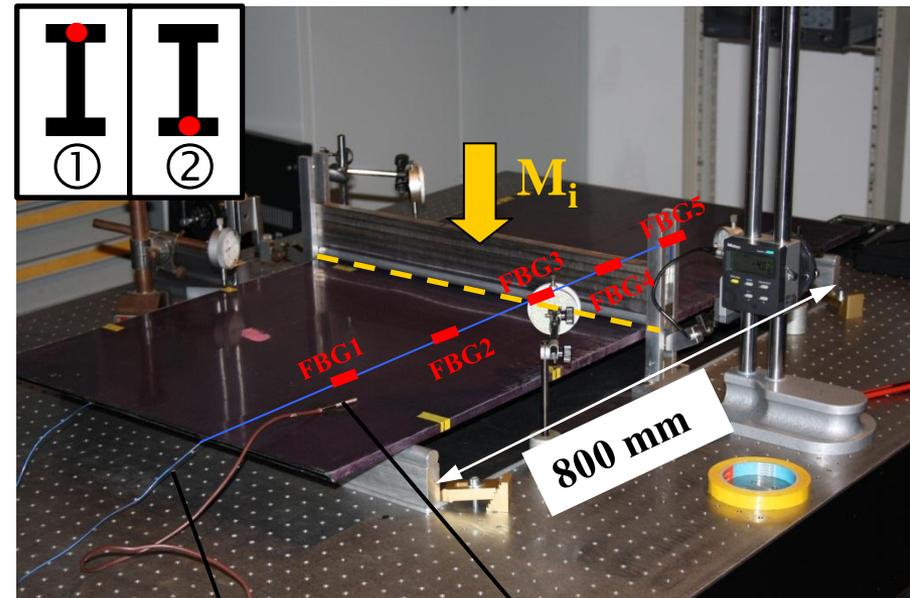
2 cas d'études : FBG en haut ① ou en bas ②

• Système de mesure

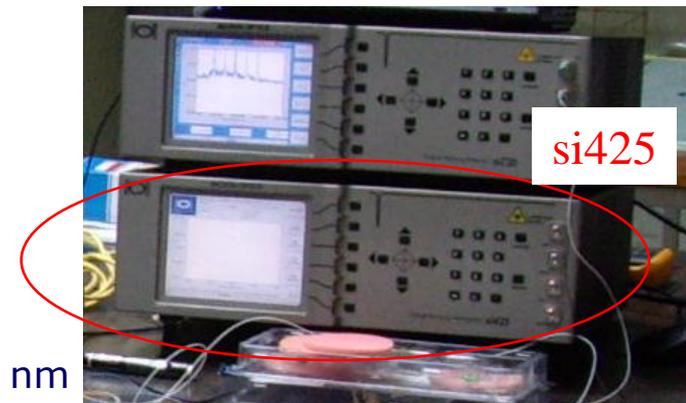
si425 : interrogateur en longueurs d'onde de Bragg à balayage laser (mesure statique & dynamique).

Principales caractéristiques :

- acquisition à 250 Hz
- 4 voies d'acquisition
- bande passante : 1520 - 1570 nm avec une résolution de 1 pm



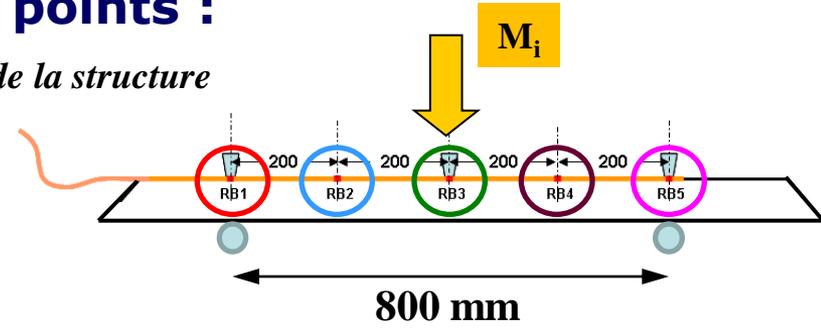
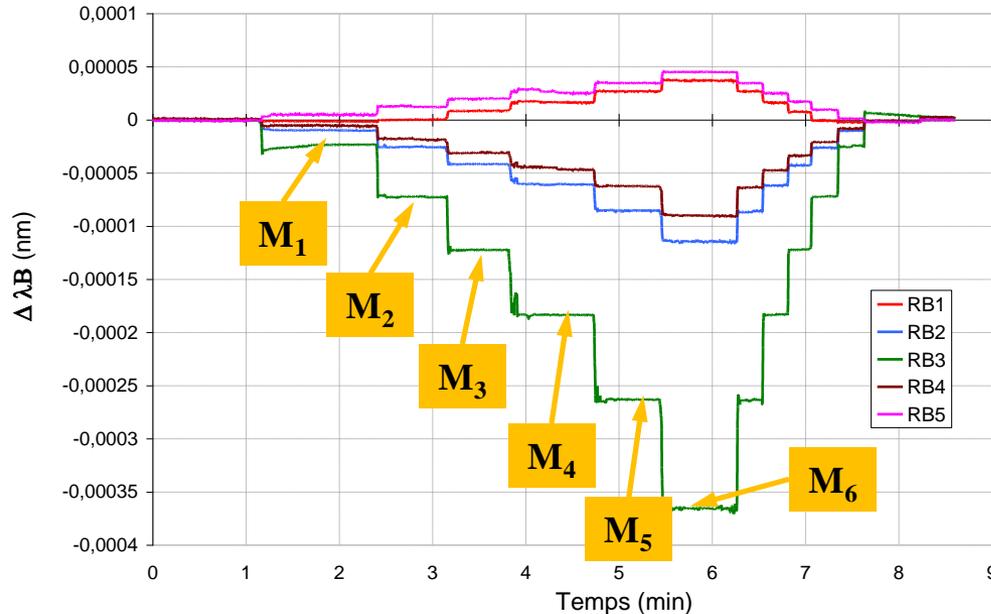
Optical fibers Thermal sensor



Résultats expérimentaux

• Résultats pour le cas ① en flexion 3 points :

Données brutes des FBG (si425) : chargement et déchargement de la structure



- bonne sensibilité des FBGs
- comportement relativement symétrique, (erreurs de mise en place des FBG ?)
- Comportements différents des extrêmes :
 - $\Delta \lambda_B > 0 \rightarrow$ traction (FBG1 et FBG5)
 - $\Delta \lambda_B < 0 \rightarrow$ compression (FBG2, FBG3 et FBG4)

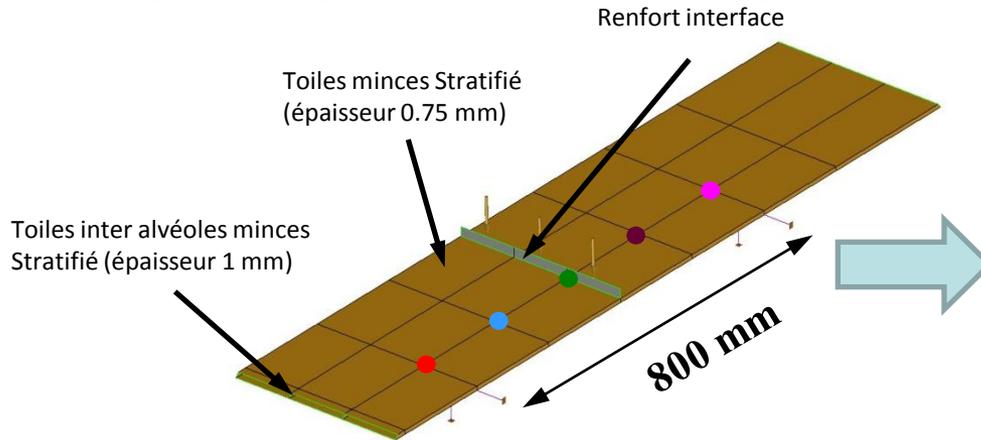
Mesures des flèches au maximum de déformation (FBG3)

	Poids (N)	Flèche FBG3 expérimentale (mm) (écart type)
M1	9,38	0,47 (0,02)
M2	26,35	1,22 (0,02)
M3	43,32	1,94 (0,03)
M4	61,64	2,76 (0,05)
M5	82,08	3,80 (0,08)
M6	102,53	5,05 (0,12)

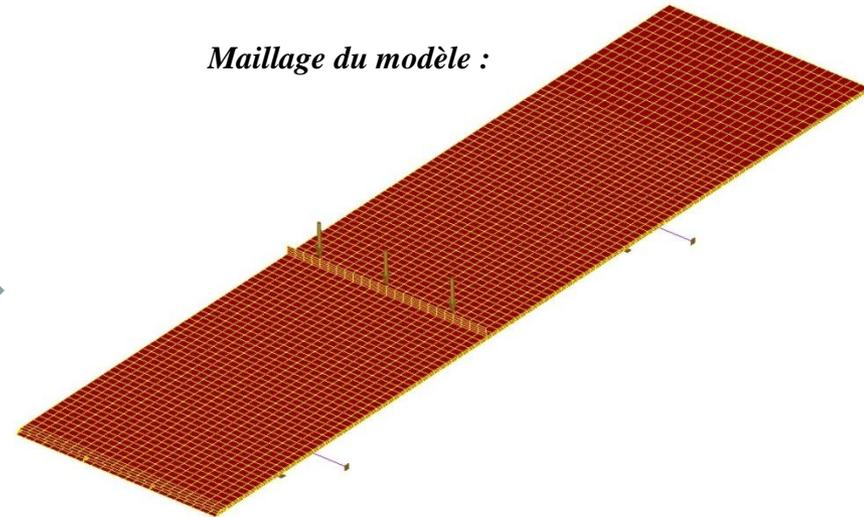
Modélisation du cas ①

• Mise en place du modèle :

- 1) Modèle coques minces stratifiée (SAMCEF)
- 2) Maillage homogène (méthode mapping)



Maillage du modèle :



- 3) Matériau : CC202/ET443 (composite à 60%) :

Tests destructifs d'échantillons de composite pour obtenir les principales caractéristiques mécaniques

Module de traction (GPa)			Coefficient de Poisson			Module de cisaillement (GPa)		
E_x	E_y	E_z	ν_{xy}	ν_{yz}	ν_{xz}	G_{xy}	G_{yz}	G_{xz}
55	55	12	0.18	0.18	0.45	4.8	4	4

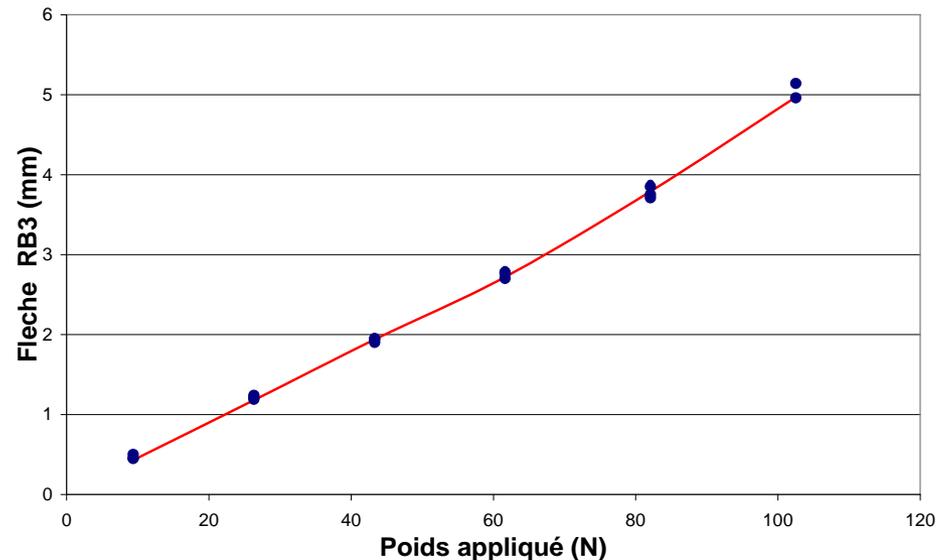
Résultats de simulation (1/2)

- Corrélation avec les données expérimentales (flèche) :

Vérification de l'ensemble des paramètres du modèle en comparant la flèche mesurée et simulée au centre des appuis (FBG3) pour les 6 cas de chargement.

	Poids (N)	Flèche FBG3 expérimentale (mm) (écart type)	Flèche FBG3 simulée (mm)	Ecart (%)
M1	9,38	0,47 (0,02)	0,43	8,5
M2	26,35	1,22 (0,02)	1,18	3,3
M3	43,32	1,94 (0,03)	1,94	0
M4	61,64	2,76 (0,05)	2,78	0,7
M5	82,08	3,80 (0,08)	3,79	1
M6	102,53	5,05 (0,12)	4,97	1,5

Résultats simulés sont obtenus à partir d'un calcul non-linéaire (module MECANO) afin de prendre en compte les derniers cas de chargement où les déformations ne sont plus petites devant les longueurs caractéristiques du modèle.



Résultats de simulation (2/2)

- Corrélation avec les données expérimentales (FBGs) :

	poids (N)	ε_{yy} FBG1 ($\mu\text{m}/\text{m}$)		ε_{yy} FBG2 ($\mu\text{m}/\text{m}$)		ε_{yy} FBG3 ($\mu\text{m}/\text{m}$)		ε_{yy} FBG4 ($\mu\text{m}/\text{m}$)		ε_{yy} FBG5 ($\mu\text{m}/\text{m}$)	
		Exp.	Simu.	Exp.	Simu.	Exp.	Simu.	Exp.	Simu.	Exp.	Simu.
M1	9,38	-2,52	14	-12,6	-12,2	-29,86	-36,8	-7,41	-8,1	4,91	29
M2	26,35	0,84	27,8	-32,77	-30,6	-92,9	-100,7	-24,72	-26,5	15,55	42,51
M3	43,32	10,92	41,1	-53,78	-49,1	-156,77	-165,6	-39,55	-44,9	26,2	55,8
M4	61,64	21,01	55,4	-78,16	-69	-235,57	-237	-59,33	-64,8	31,11	70
M5	82,08	33,61	71,5	-109,26	-91,4	-336,77	-319,6	-79,93	-87,1	44,21	86,2
M6	102,53	48,74	87,4	-145,4	-117,7	-468,66	-413,7	-115,37	-112,8	58,13	102,2

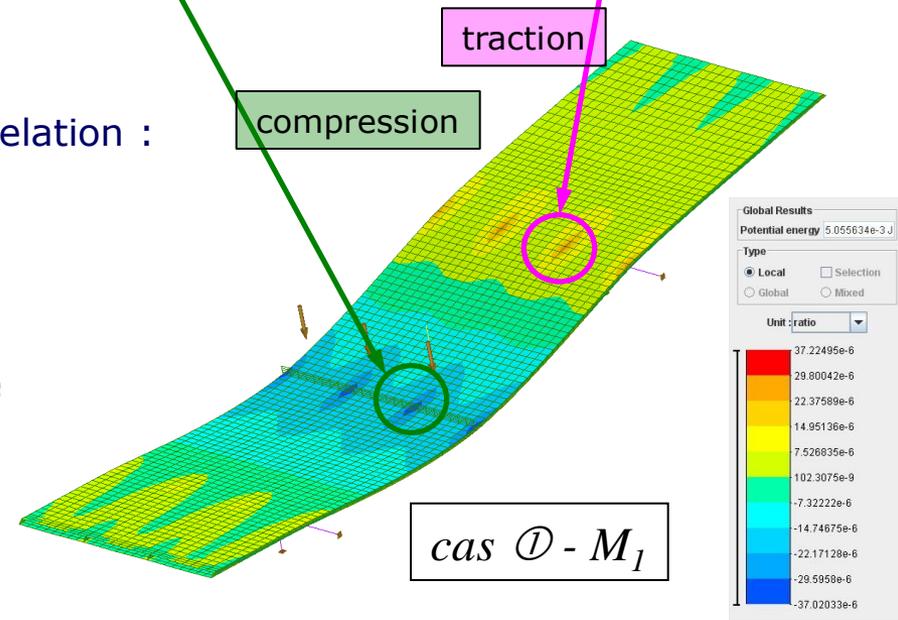
Etat de déformation à cœur du matériau :

Les tests étant réalisés à température constante, les valeurs exp. obtenues sont calculées suivant la relation :

$$\varepsilon_{yy} = b \frac{\Delta\lambda_b}{\lambda_b} \quad b \sim 0,78 \cdot 10^{-6} / \mu\text{m}/\text{m}$$

Hypothèse : FBG donne la déformation longitudinale dans la fibre ε_{yy} dans le repère du modèle.

Cela correspond à la valeur scalaire de la seconde composante du tenseur des déformations [code 11421 : strain tensor composite]

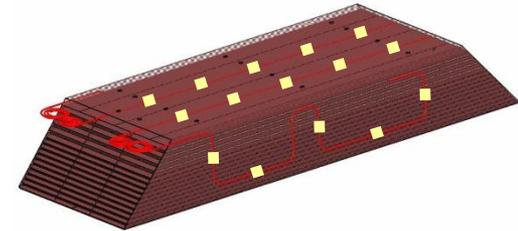


Conclusion : analyse de faisabilité

• Utilisation des FBGs adaptée aux matériaux composites

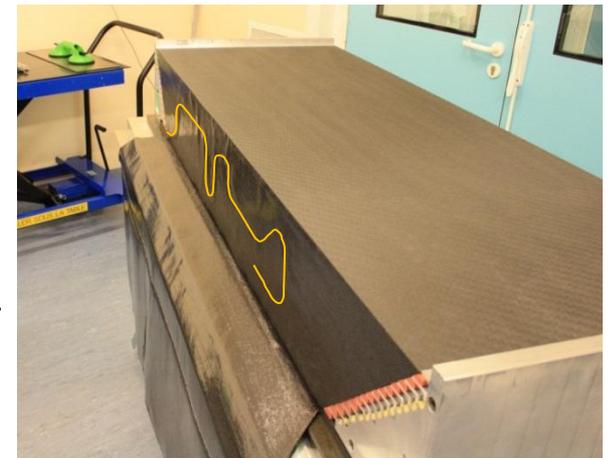
1) Avantages :

- Instrumentation à cœur
- Résistance aux conditions sévères de l'élaboration
- Faculté à s'intégrer entre les plis sans modifier notablement les propriétés mécaniques du stratifié (notion : non-intrusif)
- Sensibilité suffisante pour notre application et bonne corrélation avec nos simulations
- Santé matière : suivi dans le temps du composite (fissures, délaminages au niveau des toiles ...)



2) Inconvénients :

- Fragilité de la zone du FBG avec possible rupture
- Mise en place délicate et erreurs de positionnement
- Contraintes résiduelles liées aux conditions de cuisson du composite
- Coût important de la fibre (~ 1k€ pour FO à 5 bragg) des systèmes d'analyse (~40k€ chaque)



*Integration of
4 Optical fibers for
correlation :
Tests / Simulations*

3) Etape suivante : prototype technologique

Instrumentation de la structure à l'aide de 4 fibres optiques à réseaux de Bragg.