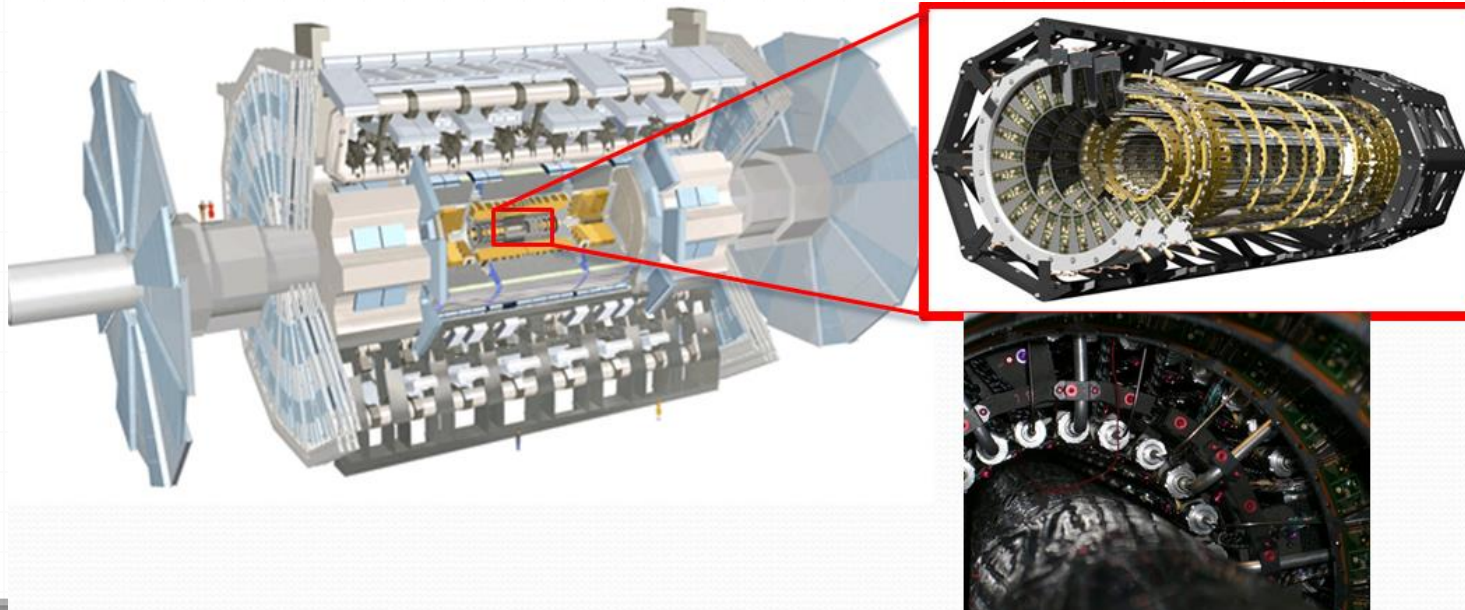
A bright yellow sticky note is partially visible on the left side of the slide, overlapping the white title box.

Utilisation des matériaux composites pour l'inner tracker du LHC Atlas

Eric Vigeolas CPPM, Ecole composite IN2P3
Septembre 2014

Détecteur A pixels Hybrides

- o Nous participons au CPPM à la conception la fabrication et l'installation des détecteurs de traces depuis une vingtaine d'année
- o Ces détecteurs mesurent au travers de couches imbriquées la trajectoire des particules dès leur formation lors de la collision des particules
- o Ce sont les premiers détecteurs que traversent les particules avant d'atteindre les calorimètres



Des contraintes de conception

- Depuis l'expérience ELEPH du LEP des capteurs a pixel hybrides sont utilisés pour discrétiser le volume autour de la collision et mesurer les trajectoires ces capteurs imposent de nombreuses contraintes
- Un trajectographe doit être stable géométriquement pour mesurer avec précision les points de passage des particules → stabilité géométrique
- Les pixels hybrides doivent être refroidis autour de -30°C voir plus pour compenser les effets des radiations → bonne conduction thermique
- Premier détecteur traversé par les particules, celui-ci doit être le plus transparent possible pour le pas faire d'ombre aux calorimètres → faibles épaisseurs et matériaux a faible longueur de radiation

**RÉDUIRE LA
MATIÈRE**



REFROIDIR

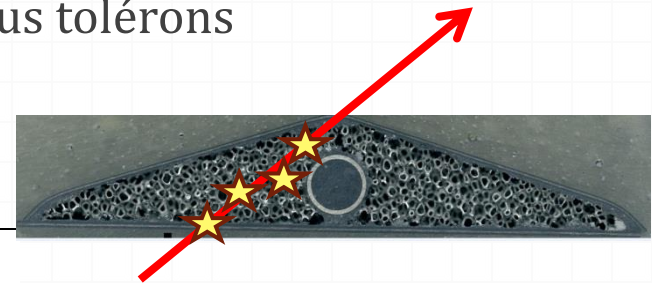
**ETRE STABLE
GÉOMÉTRIQUEMENT**

Pourquoi les matériaux composites

- o La première chose que nous regardons pour nos conceptions et quel type de matière utiliser pour réduire la longueur de radiation
- o La plus simple explication serait de dire que cette caractéristique détermine le parcours moyen d'une particule de haute énergie dans la matière en question
- o Dans nos conceptions un objectif en % nous est donné correspondant à la perte de particules que nous tolérons

$$X_0 = \frac{716.4 \cdot A}{Z(Z + 1) \ln \frac{287}{\sqrt{Z}}} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$$

Où Z est le numéro atomique et A est le nombre de masse.



Bare stave radiation length

Component	Material	Volume/stave (cc)	Eq. Thickness (cm)	X0 (cm)	X/X0 (%)
Omega	K13C/RS3	2.018	0.0144	21.1	0.068
Glue layers	Stycast 2850FT	3.29	0.0234	8.97	0.2608
Foam	K9	21.598	0.1536	213	0.0721
Ti pipe	Titanium T40	0.411	0.0029	3.56	0.0821
Face plate	K13C/RS3	1.903	0.0135	21.1	0.0641
End of Stave fixation part x2	PEEK CA 40	2.51	0.0178	25	0.0714
Central fixation part	PEEK CA 40	0.075	0.0005	25	0.0021
Total:					0.6206

En fonction de l'épaisseur d'un matériau et de son X0 on détermine un pourcentage de perte

Pourquoi les matériaux composites

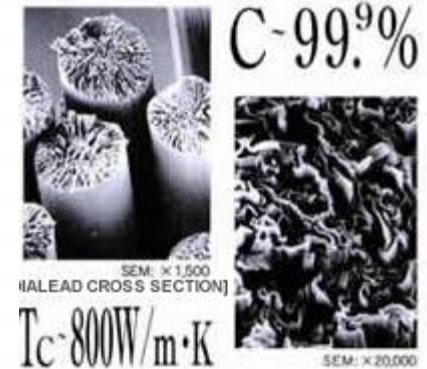
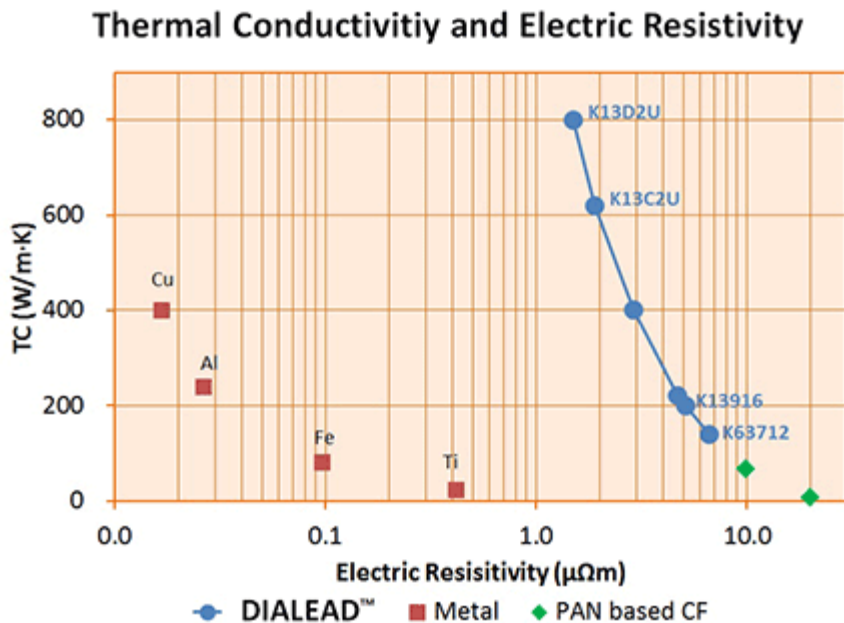
- o La longueur de radiation dépend du numero atomique et du nombre de masse des atomes composant la matière étudiée
- o On s'intéresse principalement aux éléments se trouvant en haut de la table de Mendeleïev
- o Le Béryllium est la matière solide la plus intéressante pour les développements que nous faisons:
 - o Tubes a vide des accélérateurs
 - o Trajectographe de Fermilab
 - o Fenêtre de chambre a vide
- o Cette Matière est couteuse, dangereuse et peu de fournisseurs sont disponibles. En suivant le tableau périodique on tombe sur le carbone qui se trouve sous beaucoup de variantes (graphite, fibres, mousses....)

1 H 1.0																	2 He 4.0
3 Li 6.9	4 Be 9.0											5 B 10.8	6 C 12.0	7 N 14.0	8 O 16.0	9 F 18.9	10 Ne 20.2
11 Na 22.9	12 Mg 24.3											13 Al 26.9	14 Si 28.1	15 P 30.9	16 S 32.1	17 Cl 35.5	18 Ar 39.9
19 K 39.1	20 Ca 40.1	21 Sc 44.9	22 Ti 47.9	23 V 50.9	24 Cr 52.0	25 Mn 54.9	26 Fe 55.8	27 Co 58.9	28 Ni 58.7	29 Cu 63.5	30 Zn 65.4	31 Ga 69.7	32 Ge 72.6	33 As 74.9	34 Se 78.9	35 Br 79.9	36 Kr 83.8
37 Rb 85.5	38 Sr 87.6	39 Y 88.9	40 Zr 91.2	41 Nb 92.9	42 Mo 95.9	43 Tc 98.9	44 Ru 101.1	45 Rh 102.9	46 Pd 106.4	47 Ag 107.9	48 Cd 112.4	49 In 114.8	50 Sn 118.7	51 Sb 121.7	52 Te 127.6	53 I 126.9	54 Xe 131.3
55 Cs 132.9	56 Ba 137.3	57 La 138.9	58 Ce 140.1	59 Pr 140.9	60 Nd 144.2	61 Pm 144.9	62 Sm 150.4	63 Eu 151.9	64 Gd 157.3	65 Tb 158.9	66 Dy 162.5	67 Ho 164.9	68 Er 167.3	69 Tm 168.9	70 Yb 173.0	71 Lu 174.9	
87 Fr 223	88 Ra 226	89 Ac 227	101 Unq 288	102 Unp 288	103 Unh 288	104 Uns 288	105 Uue										

58 Ce 140.1	59 Pr 140.9	60 Nd 144.2	61 Pm 144.9	62 Sm 150.4	63 Eu 151.9	64 Gd 157.3	65 Tb 158.9	66 Dy 162.5	67 Ho 164.9	68 Er 167.3	69 Tm 168.9	70 Yb 173.0	71 Lu 174.9
90 Th 232.0	91 Pa 231.0	92 U 238.0	93 Np 237.0	94 Pu 244.0	95 Am 243.0	96 Cm 247.0	97 Bk 247.0	98 Cf 251.0	99 Es 252.0	100 Fm 257.0	101 Md 258.0	102 No 259.0	103 Lr 260.0

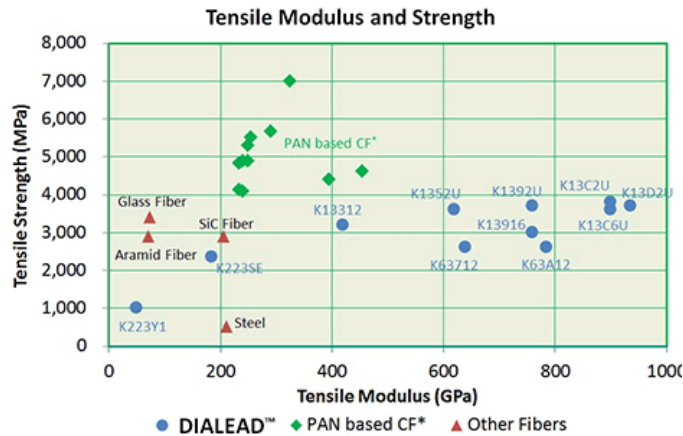
Trouver un bon conducteur de température

- Le meilleur conducteur que nous connaissons est le diamant il est essentiellement composé de carbone, ça tombe bien le carbone est aussi un bon candidat pour la longueur de radiation !!!
- Les fibres, la mousse de carbone ou le graphite que nous trouvons ont des conductivité s'approchant de plus en plus de celle du diamant



Recherche de stabilité

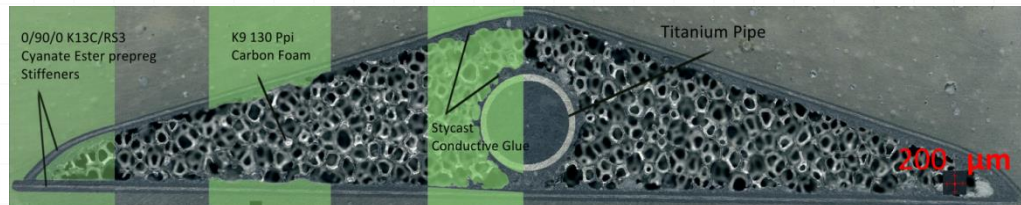
- Toutes les géométries que nous réalisons sont faites avec des épaisseurs de matière les plus fines possible → longueur de radiation
- La matière que nous sélectionnons doit avoir de bonnes caractéristiques mécaniques ainsi qu'une faible dilatation thermique pour résister aux variations de températures, aux vibrations ainsi qu'à la déformation sous poids propre



[Laminate properties] (2K)

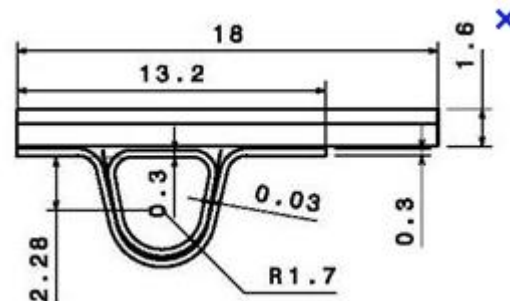
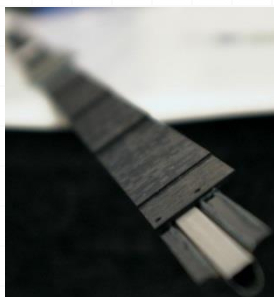
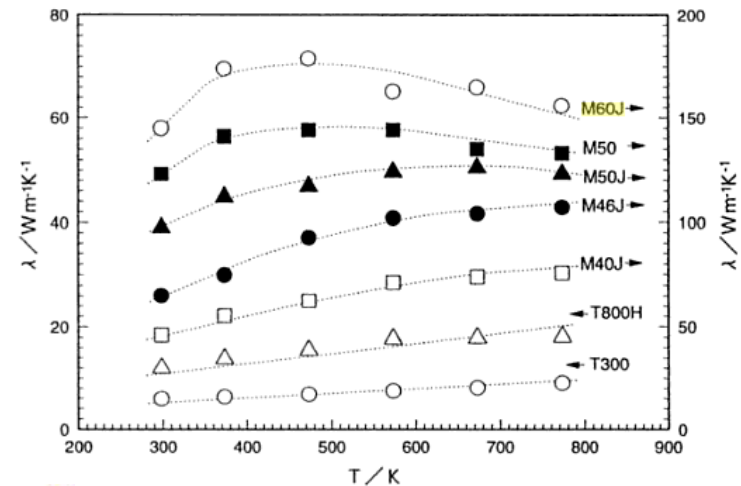
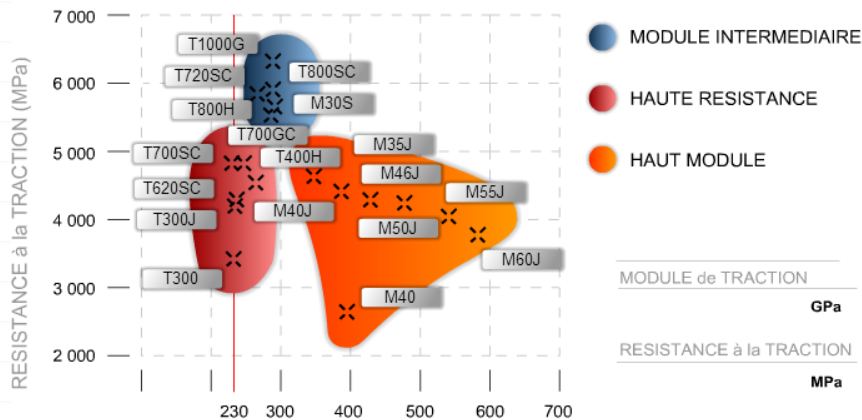
Style: Uni-directional [0] t
Resin: Mitsubishi Plastics 934 (350°F cure epoxy)

				K1352U	K1392U	K13C2U	K13D2U
Longitudinal	Tensile	Strength	[MPa]	2,000	2,100	2,200	1,800
		Modulus	[GPa]	380	460	560	560
	Compressive	Strength	[MPa]	450	400	380	340
		Modulus	[GPa]	250	420	560	560
	ILSS		[MPa]	75	70	50	40
	CTE (Temp. 50 - 125°C)		[x10 ⁻⁶ /K]	-1.1	-1.2	-1.2	-1.2
Transverse	Tensile	Strength	[MPa]	40	35	30	25
		Modulus	[GPa]	6.2	6.0	5.4	5.1



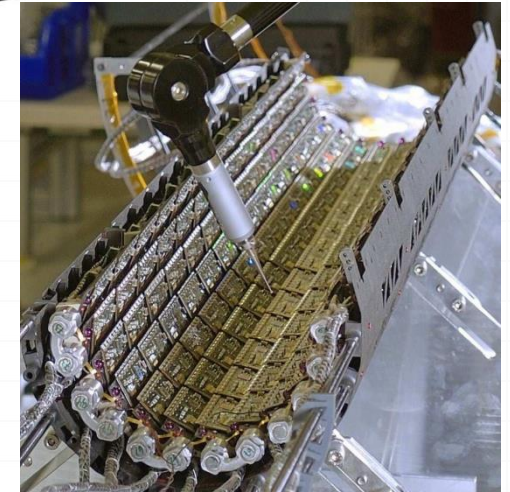
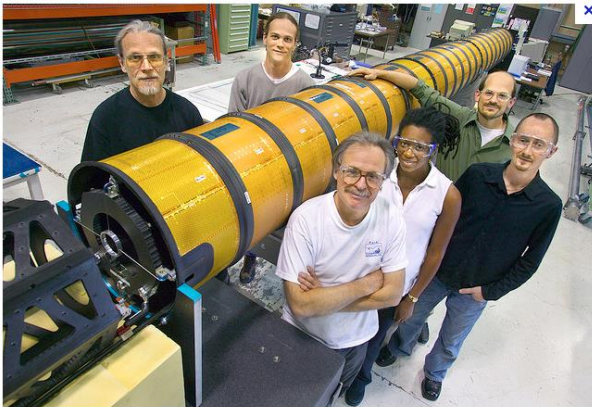
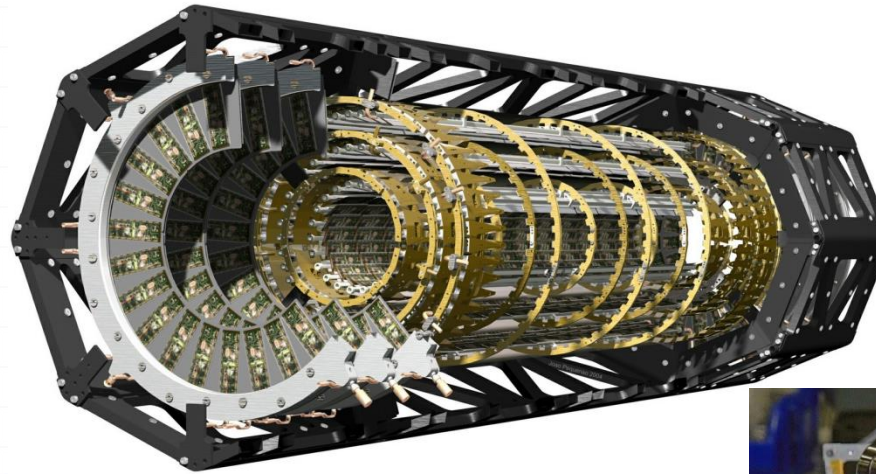
Recherche de stabilité

- Toutes les géométries que nous réalisons sont faites avec des épaisseurs de matière les plus fines possible → longueur de radiation
- La matière que nous sélectionnons doit avoir de bonnes caractéristiques mécaniques ainsi qu'une faible dilatation thermique pour résister aux variations de températures, aux vibrations ainsi qu'à la déformation sous poids propre



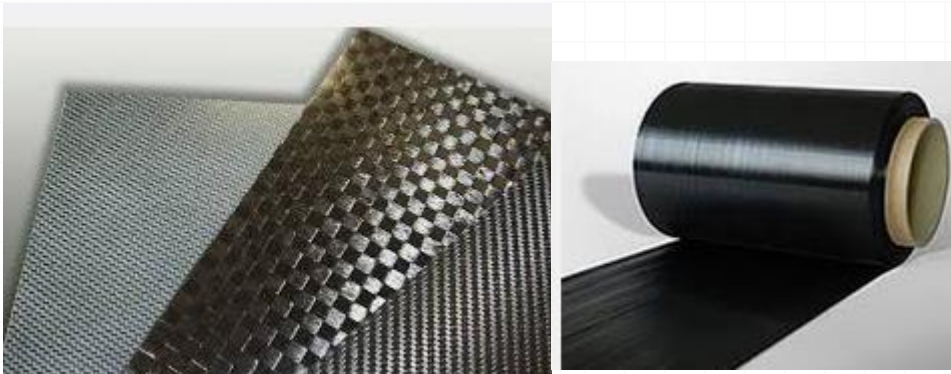
Utilisation du composite

- Avec toutes les données que nous venons de voir les composites a base de carbone semble naturellement le meilleur candidat
- Les expériences du LHC sont devenues des structures presque exclusivement composées de composite



Première difficulté

- o Le marché du composite est essentiellement développé pour l'aéronautique, l'automobile ...
- o Les fournisseurs de fibres ne sont pas si nombreux que nous pourrions le croire
- o Les catalogues sont très étoffés large choix de fibre et donc choix difficile a faire
- o Il faut également sélectionner le type de matrice composant les prepreg utilisés ainsi que le ratio fibre résine, et les températures de mise en œuvre → dans notre cas nous utilisons beaucoup de résines cyanate ester pour leur faible reprise d'humidité afin de réduire les risques de déformations
- o Enfin le type de prepreg utilisé (UD, tissus)



RS-3

TYPICAL APPLICATIONS

- Satellite Structures
- Airframe/Missile Structures
- Electromagnetic/Dielectric Structures

PRODUCT FORMS

- Unitape to 24 Inches Wide
- Fabric Prepreg to 50 Inches Wide
- Prepreg Tow

TYPICAL CURE PARAMETERS

- Apply vacuum, pressurize to 45 to 100 psi.
- Heat to 350°F (+10°F/-0°F) @ 5°F ± 3°F/min.
- Hold at 350°F for 120 minutes (+15 min/-0 min). Cool.
- May be postcured at 450°F for 2 hours if higher temperature service is required.

RS-3: 350°F SERVICE, TOUGHENED POLYCYANATE RESIN

RS-3 is a modified polycyanate resin developed to provide a good balance between toughness and high temperature/wet performance. RS-3 has been evaluated and qualified in the areas of satellite, airframe/missile, and dielectric structures. RS-3 is also available in several modified formulations including: RS-3BH, an electrostatic dissipation version; RS-3C, a controlled flow vacuum bag/oven cure version; and RS-3M, an extremely low flow autoclave version.

FEATURES / ADVANTAGES

- True 350°F Service
- Large Base of Qualified Products
- Very Low Outgassing
- Simple 350°F "Epoxylike" Processing
- Low Shrinkage During Cure
- Autoclave and Compression Moldable
- Excellent Balance of Mechanical Performance and Toughness
- Low Moisture Absorption
- Low Microcracking from -350°F to +350°F
- Good Hot/Wet Performance
- Low Modulus Loss After Radiation
- Low Dielectric Constant and Loss Tangent Exposure Over Wide Thermal and Electrical Regions

RS-3 NEAT RESIN PHYSICAL PROPERTIES

Property	Value
Density	1.193 g/cm ³
T _g (dry*, wet**)	490°F, 480°F
Coefficient of Thermal Expansion	24 ppm/°F
Outgassing (TML, CVMC)	0.22 %, 0.01 %
Equilibrium Moisture Absorption**	0.69 %
Viscosity @ 149°F	21,400 cps
@ 167°F	4,300 cps
@ 185°F	1,450 cps
@ 203°F	595 cps
@ 221°F	270 cps

* Casting cured 2 hours at 350°F and postcured 2 hours at 450°F.

** Wet properties determined after specimens exposed to 95% R.H. at 160° F for 20 days.

RS-3 NEAT RESIN MECHANICAL PROPERTIES

Property	Value
Tensile Strength	11.6 ksi
Tensile Modulus	430 ksi
Tensile Strain	4.9 %
Flexural Strength	18.4 ksi
Flexural Modulus	481 ksi
Fracture Toughness, G _{IC}	2.10 in-lb/in ²

RS-3 NEAT RESIN ELECTRICAL PROPERTIES

Property	Value
Dielectric Constant @ 2-18 GHz	2.67
Loss Tangent	0.005



DIALEAD

High Performance
Coal Tar Pitch based carbon Fiber

Mitsubishi Plastics, Inc. has developed a high performance pitch based carbon fiber DIALEAD[®], which is available in a large range of product formats, from low modulus to ultra high modulus grades. DIALEAD[®] is recognised worldwide as a composite material which gives big advantages for numerous applications.

PERFORMANCE

- High Purity
- High and Ultra High Modulus
- High Thermal Conductivity
- Excellent Handling Characteristics
- Proven Cost advantage



GRADE

[DIALEAD[®] STANDARD GRADE]

	GRADE	Tensile Modulus	Tensile Strength	Elongation	Density	Yield	Thermal Conductivity
	Unit	GPa	MPa	%	g/cm ³	g/1000m	W/m · K
Continuous Fiber (2K Type)	K1352U	620	3600	0.6	2.12	270	140
	K1392U	760	3700	0.5	2.15	270	210
	K13C2U	900	3800	0.4	2.20	270	620
	K13D2U	935	3700	0.4	2.20	365	800
Continuous Fiber (10K, 12K Type)	K63712	640	2600	0.4	2.12	2000	140
	K13A10	790	2600	0.3	2.15	1400	220
	K63A12	790	2600	0.3	2.15	1950	220
Chopped Fiber	K223Y1	50	1000	1.8	1.5	—	—
	K223SE	185	2350	1.1	2.0	—	—
	K223QG	590	3230	0.6	2.1	—	140
	K223HG	900	3800	0.3	2.2	—	540
	K6371T	640	2600	0.4	2.1	—	140
Milled Fiber	K223QM	590	3230	—	2.1	—	140
	K6371M	640	2600	—	2.1	—	140

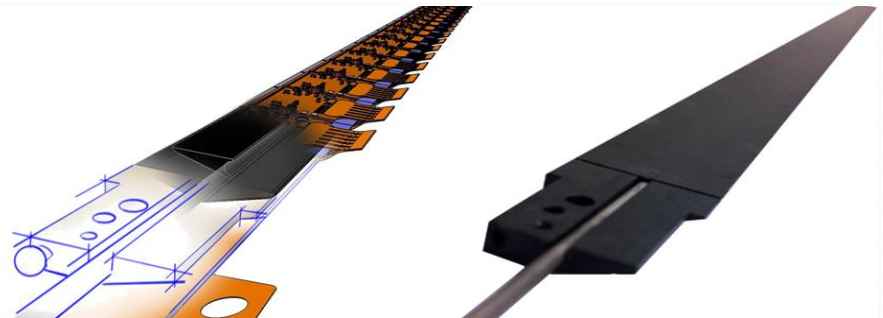
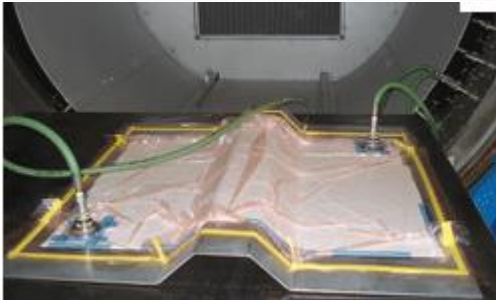
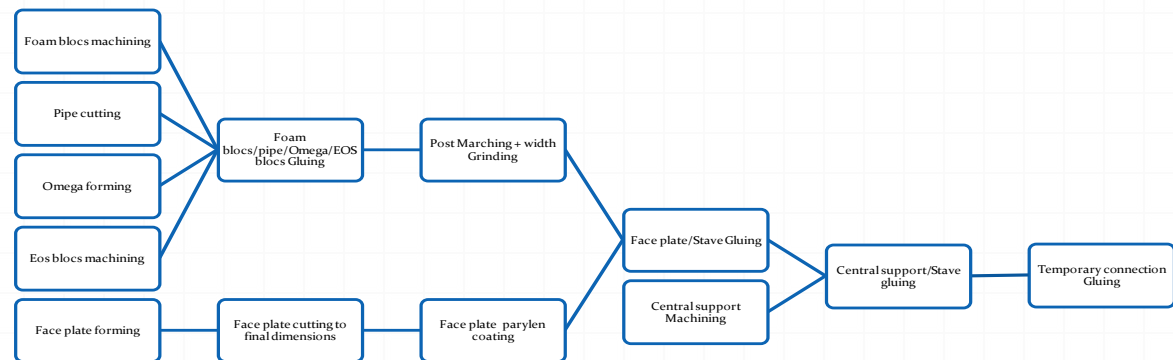
This information can be used for material selection only.

Seconde étape

- Les hautes caractéristiques ont un coût qui n'est pas négligeable souvent pondéré par une quantité minimum à la commande et une durée de vie limité → Pour le projet ATLAS IBL nous avons du commander 150 m² de prepreg UD pour n'utiliser que 10m² et ceci pour un coût de 30kEuros
- Les délais de fourniture et de production sont longs, si la matière n'est pas dispo en stock (autour de 4 mois)
- Les choix seront donc souvent restreints aux matière dispo en stock (ne pas hésiter a prévoir la matière pour les prototype ainsi que celle nécessaire a la production, **pas de garantie de retrouver la même matière après qualification**)

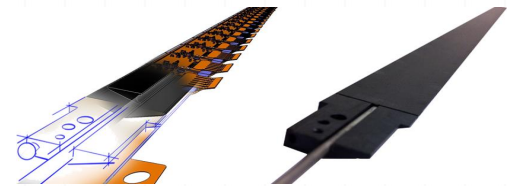
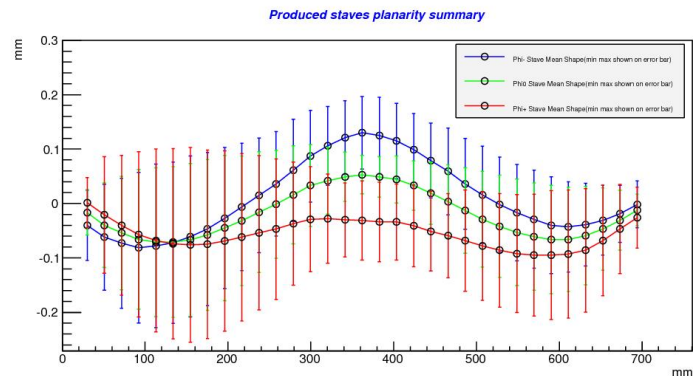
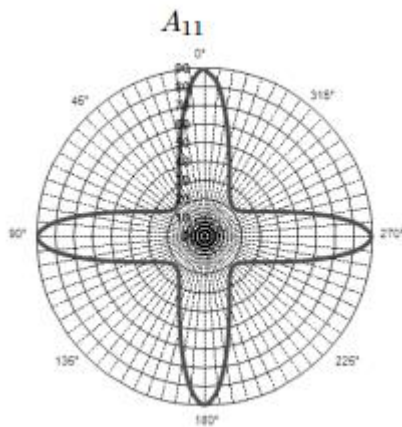
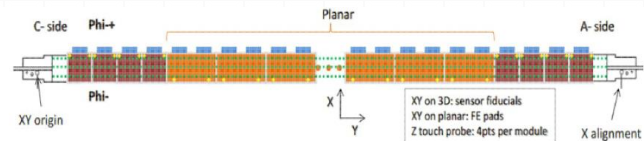
La fabrication

- o Identifier un laboratoire ou un sous traitant pouvant assurer la fabrication et l'assemblage des pièces
- o L'usinage est parfois nécessaire et requière un compétence et des machines spécifiques
- o Le processus de wrapage ainsi que le cycle de cuisson (température pression) sont d'une grande importance pour garantir l'uniformité
- o Des cycles de développement des outils et des process sont nécessaires pour optimiser les structures
- o La caractérisation et le control ne sont pas simples
- o Un soin particulier doit être porté sur les méthodes d'assemblage, en particulier sur nos expériences ou les inserts métalliques et les fortes radiations rendent les choix limités



Contrôler l'uniformité de la production

- o L'une des difficultés que nous rencontrons est la nécessité de fabriquer des structures fine (qq dixièmes de mm) et précises ($\pm 0.1\text{mm}$ sur 800 mm)
- o Dans l'empilement des couches UD la maîtrise de l'orientation des fibres est importante car elle conditionne les caractéristiques globales du matériaux
- o Les outils doivent être judicieusement conçu pour ne pas ajouter des déformation pendant la cuisson
- o Les processus de cuisson et de recuit sont également important pour assurer de la stabilité

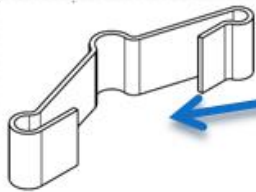


Quelques exemples de défauts que nous avons eu

Flex delamination



IBL Stave



Carbon Clip will be added at the Stave ends to clamp the flex on the stave. Glue deposition has been improved for better contact surface

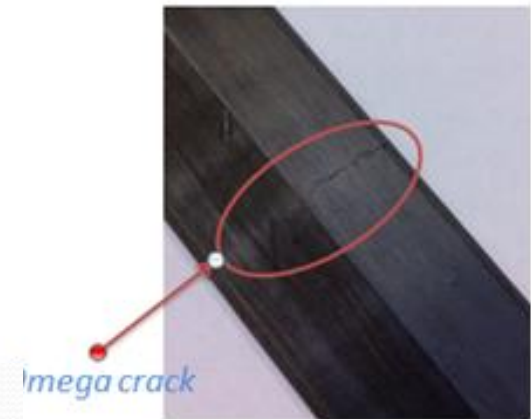


Pixel Omega delamination @ EOS
Peek reinforcement bloc have been added which solved the problem



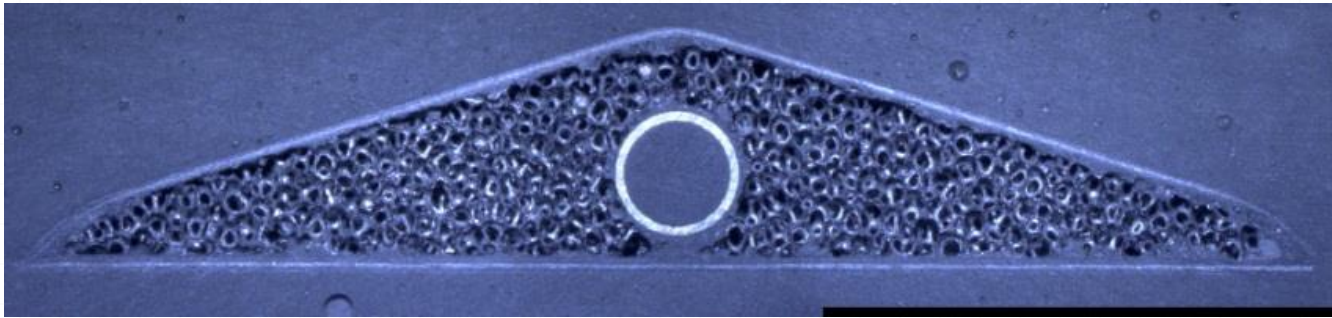
Quelques exemples de défauts que nous avons eu

- Matière peu ductile nous avons rejeter beaucoup de structures pour rupture d'une ou plusieurs couches de fibres
- Nous avons du effectuer des recuits pour stabiliser les structures qui se déformées lors des cycles thermiques

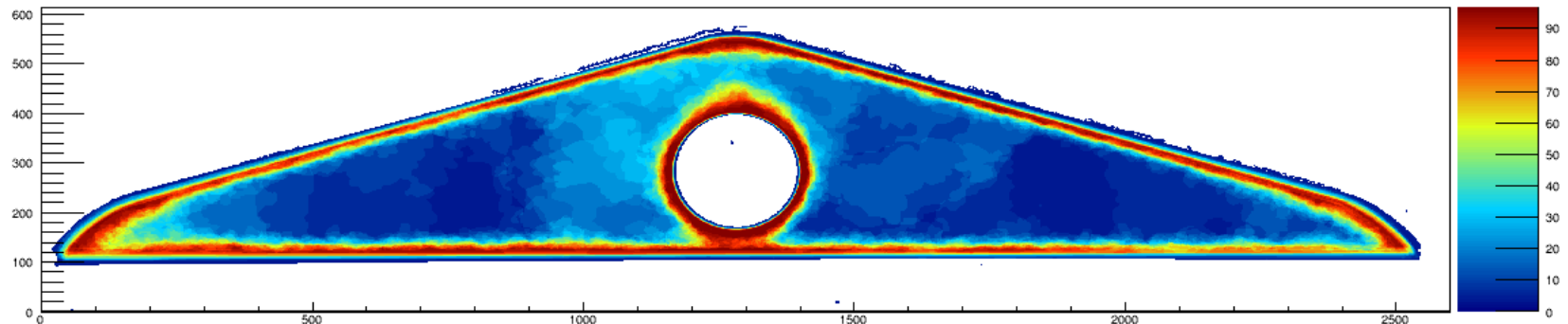


Pour l'avenir

- Nous devons améliorer les techniques de collage pour réduire la matière

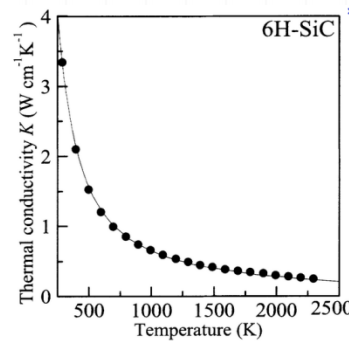
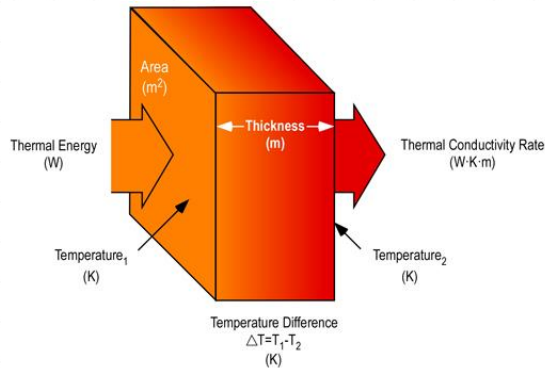


Glue dispersion inside the K9 Foam(%)



Pour l'avenir

- Favoriser la sélection de matière moins couteuse en acceptant des caractéristiques plus faibles
- Travailler sur la géométrie pour compenser la perte de rigidité
- Étudier et qualifier plus attentivement d'autres alternatives d'assemblage



$$R_A = \frac{qL}{2} \quad R_A = R_B$$

Charge uniformément répartie

Flèche

$$f = \frac{5}{384} \cdot \frac{qL^4}{EI}$$

On peut travailler sur I pour compenser E

Merci pour votre attention