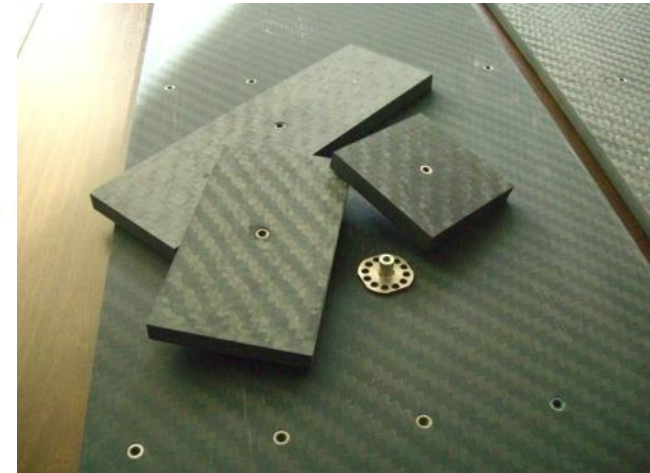


COMPOSITE

- Thermo compression
rails en carbone pré imprégné
- Inserts
assemblage par inclusion dans plaques de préimprégné
- Structures composites
du futur détecteur PIXEL d'ALICE (ITS)
- Co-Cuisson: Mousse de carbone-graphite-composite
du futur détecteur PIXEL d'ATLAS (ITK)





Le projet ILC / CALICE

Thermo compression

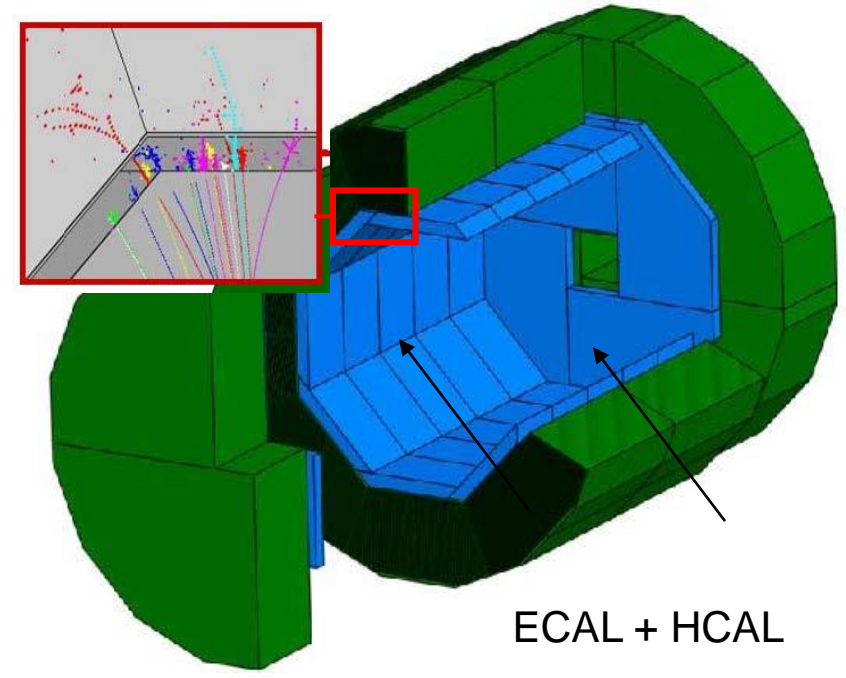
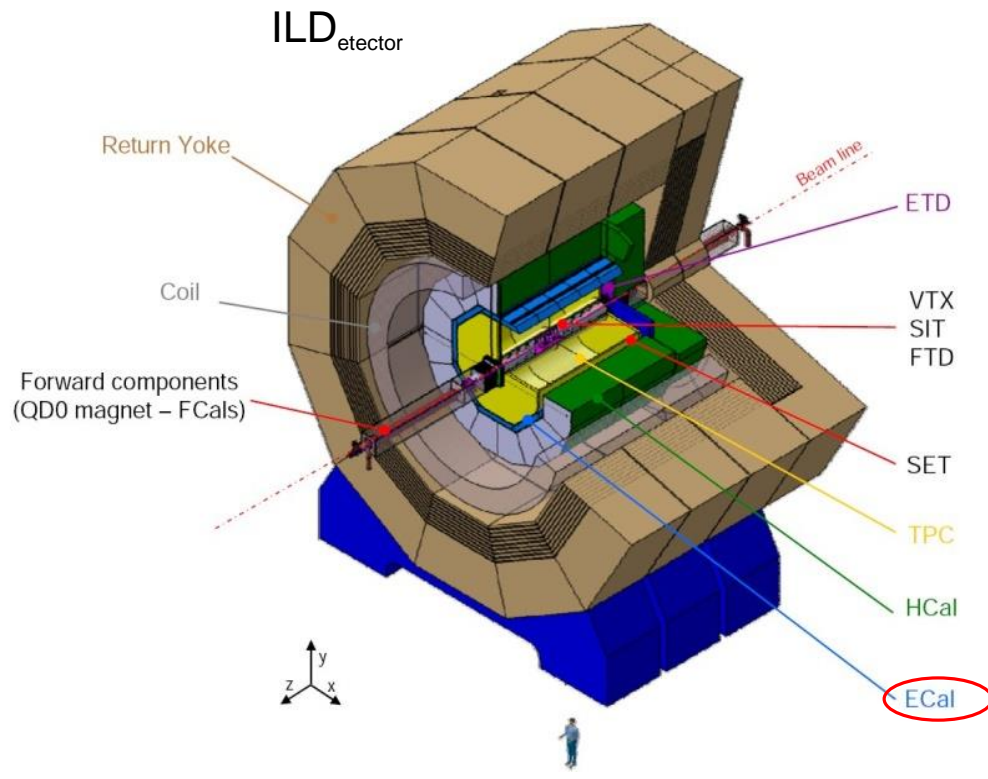
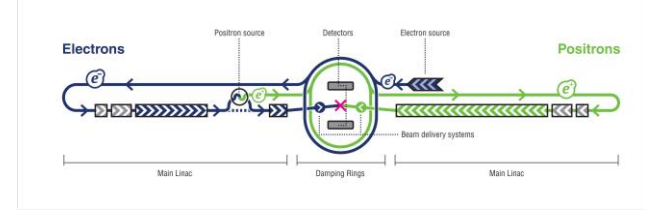
rails en carbone pré imprégné
moule de compression et presse chauffante



Le projet ILC



ILC (International Linear Collider), est un projet de collisionneur linéaire e^+e^- de 30 Km de long avec une énergie de 90 à 500 GeV. Il permettra des mesures de très haute précision



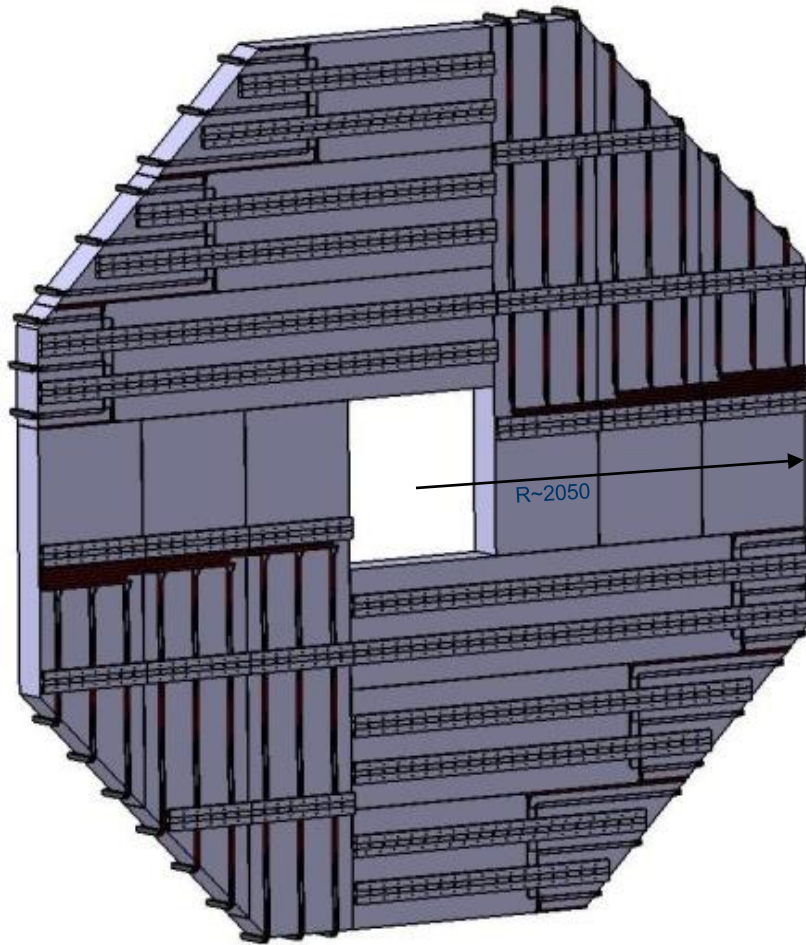
ECAL: calorimètre électromagnétique Silicium-Tungstène (SiW).

ILD - Architecture des bouchons EM

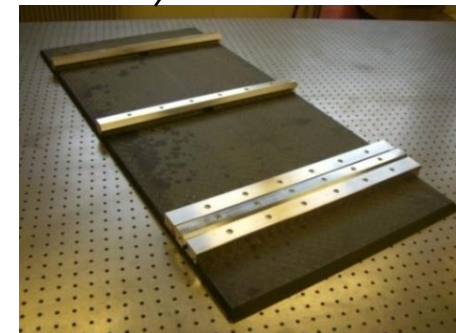
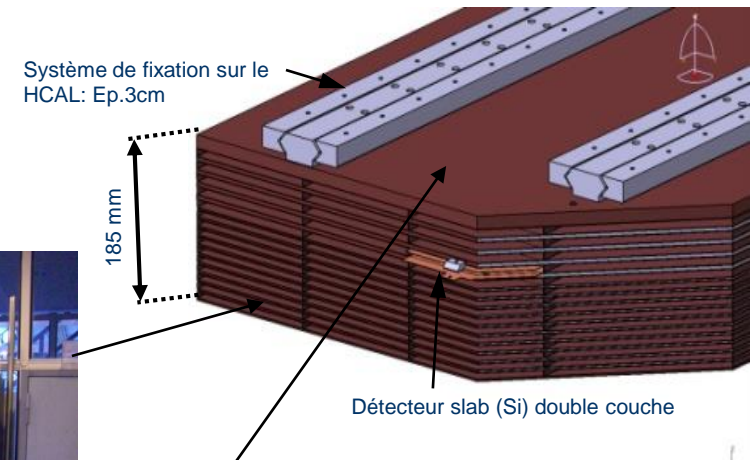


2 x structure modulaire alvéolaire W / Carbone HR – 25,5 t

12 modules indépendants - 2 x 540 alvéoles
+ système de guidage/supportage
+ système de refroidissement



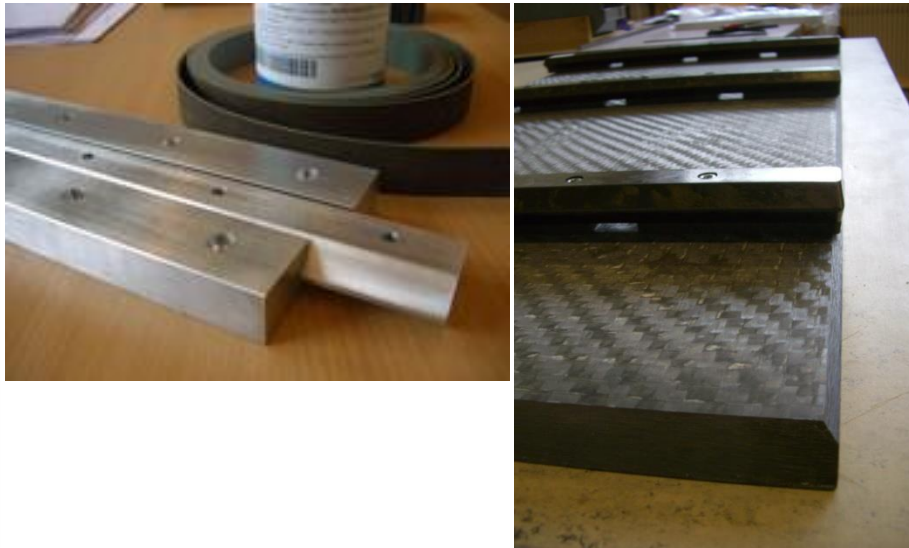
Moulage d'un layer 3 alvéoles
L = 2.490 m Ep.paroi = 0.5mm



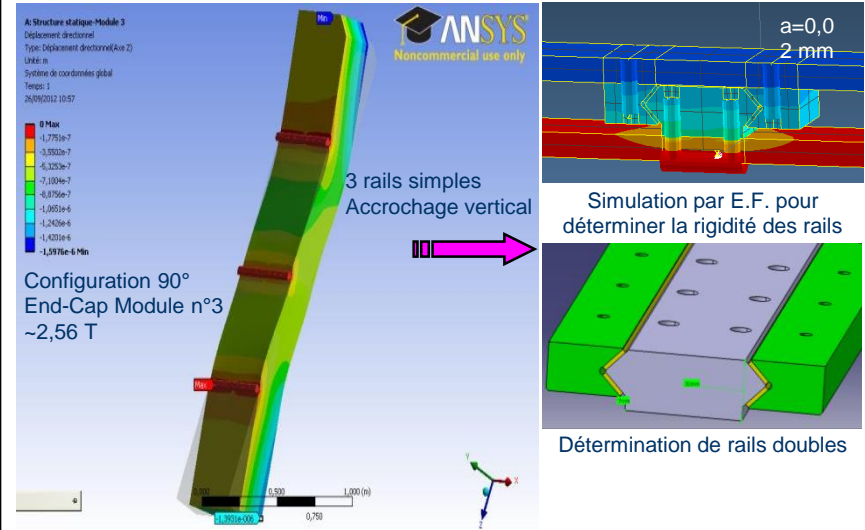
Plaque épaisse Carbone HR
Ep. 13 mm , avec inserts et rails

Interface par rails et fixation sur l'hadronique

Les rails permettent d'assurer la fixation et le guidage de la structure du barrel et des deux End-Caps du ECAL avec le HCAL qui représente la structure portante de l'instrument .



Design 3D de différents systèmes d'accrochage **Ep. 30 mm** & double rangée



Evolution

Alternative à des rails aluminium : rails composites

Avantages:

- masse (passer de 1.5 kg à 850 gr)
- a-magnétisme (ECAL plongé dans un champ magnétique de 4 Teslas)
- résistance (pouvant supporter la charge et reprendre les efforts)

SMC (Sheet Moulding Compound)



Quel procédé et quelle matière première

- Des formes 3D complexes limitent l'utilisation de matrices à base de fibres continues stratifiées renforcées classiques
- Pièces avec brusque variation d'épaisseur de la section
- Pièces avec copolymérisation d'éléments (inserts métalliques, etc...)
- Utilisation dans un processus de production automatisé
- Production de pièces sans aucune chute de matière.



Plaque composite End-Cap 13mm difficile à réaliser en 1 pièce avec rails intégrés

Moulage par compression de mat préimprégné SMC Fibre de Carbone/Résine Epoxy

- Mélange d'imprégnation : polyesters, agents compensateurs de retrait, charges, catalyseurs, inhibiteurs, agents de mûrissement, agents de démoulage, pigments
- Renfort carbone HR
(taux de renfort 25 à 50 % pondéral) → 57% ($T_{x_{vol}}$) ici

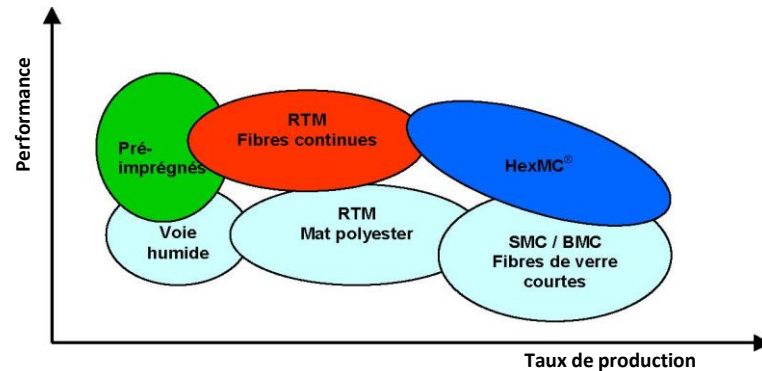
Composites testés pour la réalisation de 8 rails:

- HexMC® (Hexcel) - **HexMC® / C / 2000 / R1A**
- SMC LONZA carbone HUP CF 24/50 RB-1090/34175 (Polynt)



Rail composite / thermo-compression

Le HexMC® comparé aux autres technologies



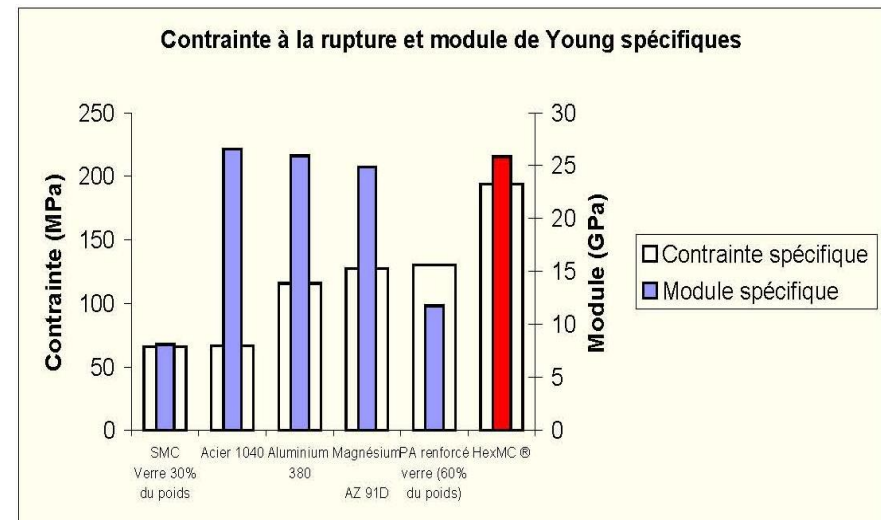
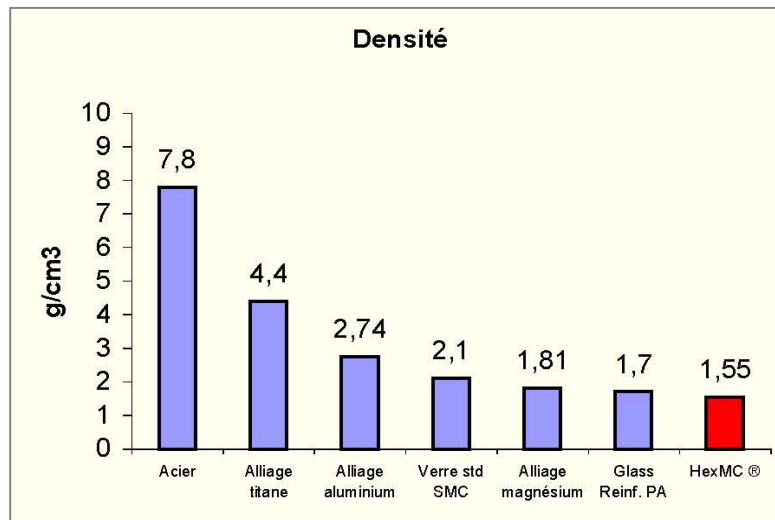
Rouleau d'HexMC®

SMC époxyde:

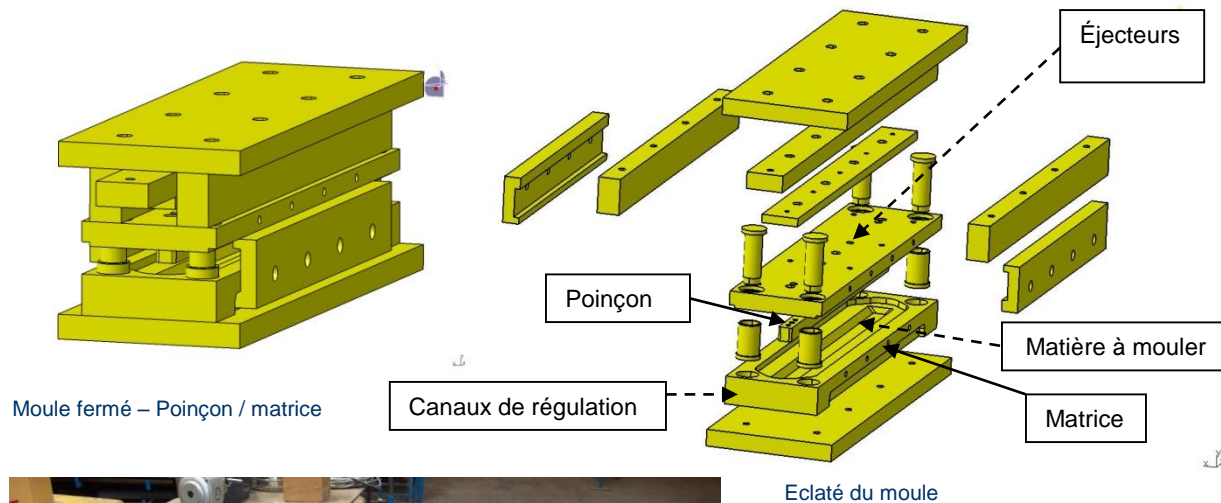
- Carbone à fort nombre de filaments
- Faisceaux de 50 x 8 mm
- Taux volumique de fibres de 57 %
- Système époxyde à polymérisation rapide
- Mat préimprégné fourni en rouleaux suffisamment malléable et collant pour être coupé, empilé afin de former une « charge »

Propriétés mécaniques

Comparaisons des propriétés du HexMC® aux métaux à couler, au plastique renforcé à mouler et à l'acier



- Moulage à chaud (120 à 160 °C) par compression entre un moule et un contre-moule en acier
- Le moule est placé entre les 2 plateaux chauffants d'une presse 80T, mais on peut aussi envisager un moule à cartouche chauffante



Critères de choix de la presse

- Presse force (t)
- Dimension des plateaux
- Ouverture
- Course
- Descente rapide (mm / s)
- Travail (mm / s)
- Chauffage moules thermo fluide

Procédure de mise en œuvre SMC



Opération	HexMC (Hexcel)	SMC Lonza (Polynt)
Conservation et sortie du matériau préimprégné du congélateur		
Reprise de la température ambiante dans son emballage		
Nettoyage du moule avec un solvant		
Application d'un agent de démoulage (Freekote 700 NC)		
Préchauffage du moule - Température de moulage	120°C – 150°C	120°C
Enlèvement du film protecteur		
Détermination de la masse de la pièce finie, et coupe des formats du mat préimprégné pour former une charge de masse supérieure de 2 à 5 %	Entre 922gr et 914gr	Entre 900gr et 800gr
Caractéristique de la pré-cuisson si nécessaire (exemple : Pré-cuisson : 13 minutes à 100° C puis Cuisson : 10 minutes à 120° C)		
Mise en place de la charge dans le moule de compression (couverture d'environ 80% de la surface du moule)		
Fermeture du moule et application de la pression (entre 50 et 150 bars) pour entraîner le fluage de la matière et le remplissage de l'empreinte	120 bar	120 bar
Temps de cuisson	2,5 min/mm Ep soit 75min	60 sec/mm Ep soit 30min
Temps de compression	30 sec/mm	2,5 min/mm
Caractéristique de la post-cuisson si nécessaire		
Démoulage à chaud - Le temps de durcissement très court (en fonction de l'épaisseur) permet un démoulage rapide		

Objectifs	Conséquences
<ul style="list-style-type: none"> -Taux de fibres maximal -Taux de porosités minimal -Positionnement du renfort durant la polymérisation -Respecter les paramètres de polymérisation (cycle T°/P) 	<ul style="list-style-type: none"> - Taux de fibres: fonction de la pression et de la viscosité de la résine - Viscosité de la résine: fonction de T° (attention à l'essorage) - Porosités: forte pression et vide (attention / cisaillement de la matrice) - Position du renfort: patrons ou gabarits de dépose



Moule HP pour rails Carbone HR



Découpe et pesage de la matière



Remplissage de l'empreinte



Poinçon monté sur la traverse de la presse



Matrice et poinçon montés sur presse chauffante 80T



Barreau sorti de moulage, non ébarbé (démoulage à chaud)

Marquage défaut d'aspect

- Traitement de la surface du barreau après usinage (nickelage...)
- 3 éjecteurs à régler à ras de la surface du poinçon (hauteur des extracteurs)

Retrait - Dispersion / épaisseur

Dispersions sur les cotes d'épaisseur ($30 \pm 0,1$) importantes:

- SMC: 0.4 à 0.75 mm
- HexMC: 0.15 à 0.4 mm

(habituellement de l'ordre de 0,05 à 0,1 mm /pièces structurales faible Ep.)

- L'HexMC est un matériau qui flue peu lors du compactage
⇒ irrégularité de répartition de la matière dans le moule
- Probable retrait de matière après réticulation
- Cote de fermeture du moule
- Coefficient de correction pour moules acier

Arrachements lors du démoulage

Bavures importantes (de l'ordre de 0,5 à 1 mm)

- Masse à ajuster en fonction des pertes de résine dans le plan de joint
- Ajustement jeu de l'assemblage barreau/corps principal du poinçon (0,3mm=accrochage fibres)

Mise en œuvre: HexMC (+) SMC LONZA (-)

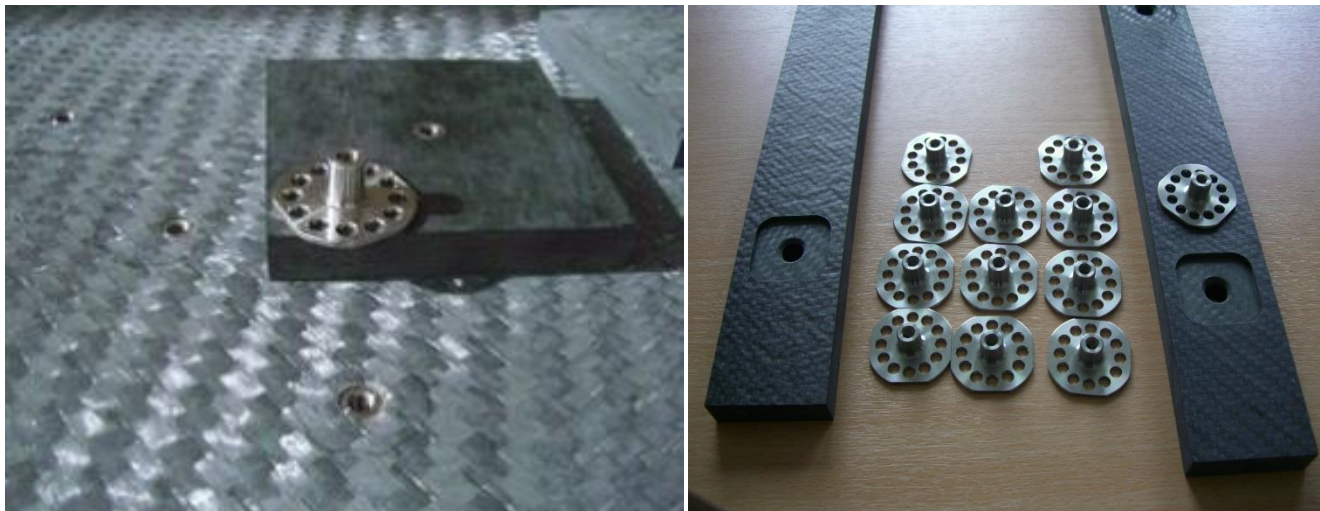




Le projet ILC / CALICE

Inserts

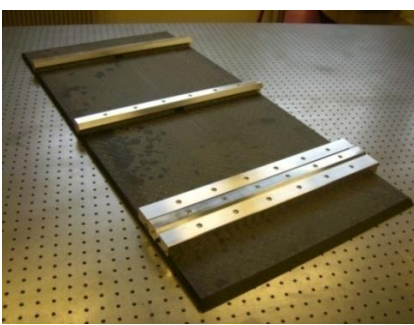
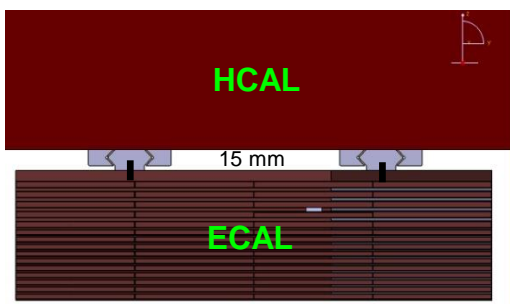
assemblage par inclusion dans plaques de préimprégné



Principe de fixation par inserts métalliques

Des inserts métalliques sont noyés dans la plaque composite épaisse, « colonne vertébrale » de chaque module, permettant la fixation des rails de guidage

Les inserts métalliques servent à introduire des efforts sur une pièce composite structurale, c'est-à-dire qu'ils permettent la transmission des sollicitations de la pièce vers la structure métallique de l'ensemble



Des inserts métalliques sont noyés dans la plaque permettant la fixation des rails de guidage

Différentes techniques d'assemblages

- Collage*
- Sertissage*
- Expansion*
- Fusion (pour les thermoplastiques)*
- Emmanchement*
- Inclusion***





Inserts métalliques



Insert « Beaghead » F2_B_S_38 soudé – acier doux galvanisé



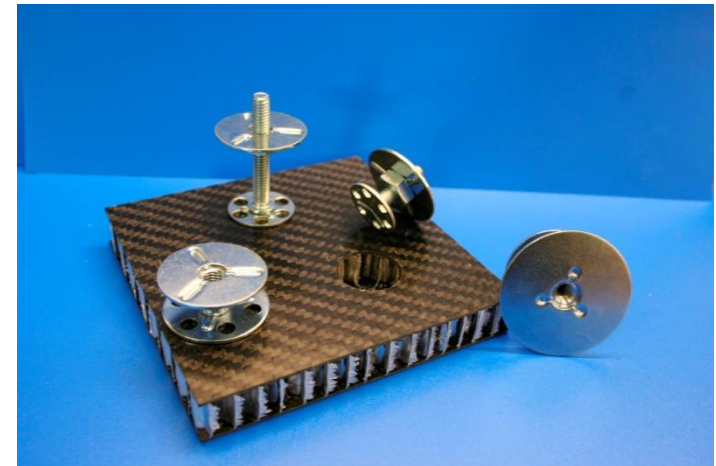
© 2014 Tappex Thread Inserts Ltd



©2013 MARKETING MASTERS, INC.



Inserts usinés LPSC – Inox amagnétique
(Rp0.2 ≈ 400Mpa et Rm ≈ 680 Mpa)



Inserts « Beaghead »

Pour des problèmes:

- de réactions chimiques avec certaines résines (résines phénoliques): traitements de surfaces (décadmiation et nickelage).
- de corrosion galvanique par le carbone (sur renforts secs avant imprégnation): isoler le métal en contact avec le carbone (Intercaler un pli de tissu de verre ou traiter le métal par anodisation)

Mise en place des inserts métalliques

Embase circulaire ou carrée à noyer dans le composite :

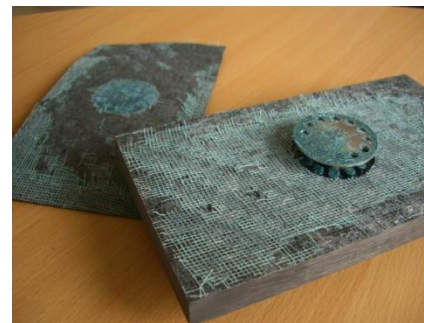
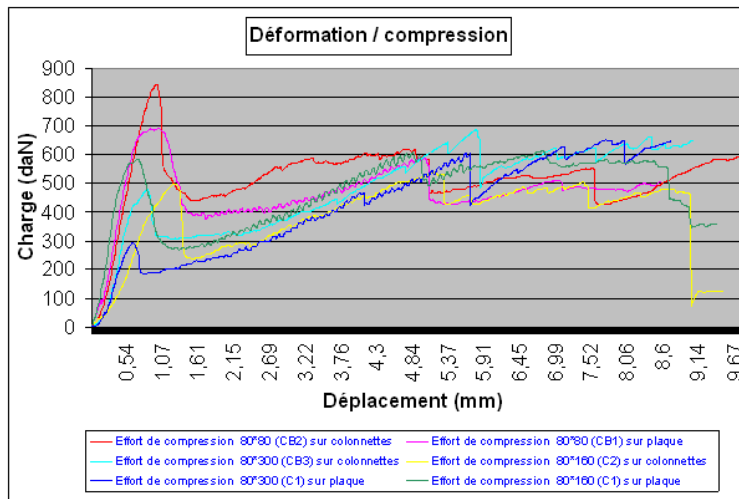
- Trouer les plis du préimprégné lors du drapage pour laisser passer les tiges des inserts
- Percer les fibres une fois polymérisées = usinage post cuisson + plis extérieurs



Plaque de fond et éprouvettes en fabrication (inserts collés avant drapage final – plaques finies)

- Araldite (classe 120°C) type Redux 420 A/B
- 3M Scotch-Weld™ 7271 Hybrid structural adhesive

Rupture des plaques épaisses au niveau des inserts Essais de traction, compression, flexion et cisaillement



Délamination des plis extérieurs / compression



Rupture vis « fusible » / cisaillement

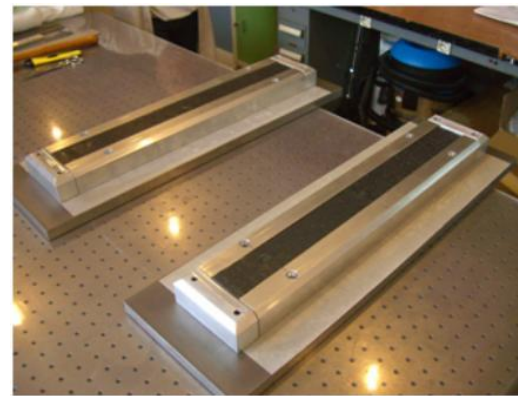
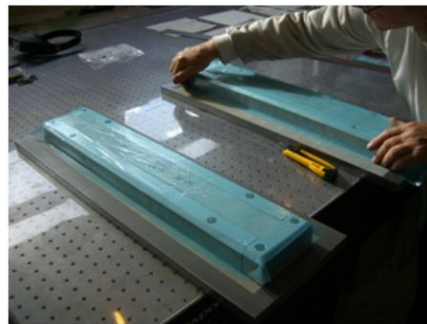
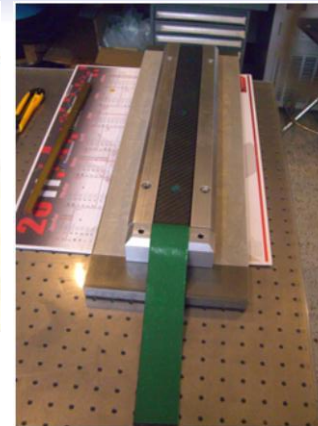
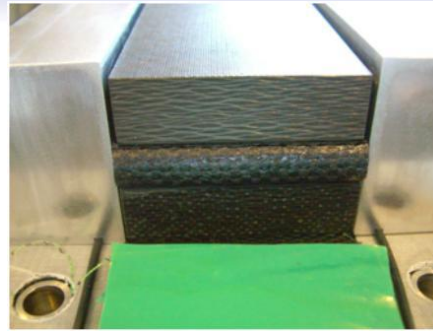
But: valider la charge minimale admissible par ce système d'inserts noyés : 500 daN par insert.

Plaques composite épaisses ILC



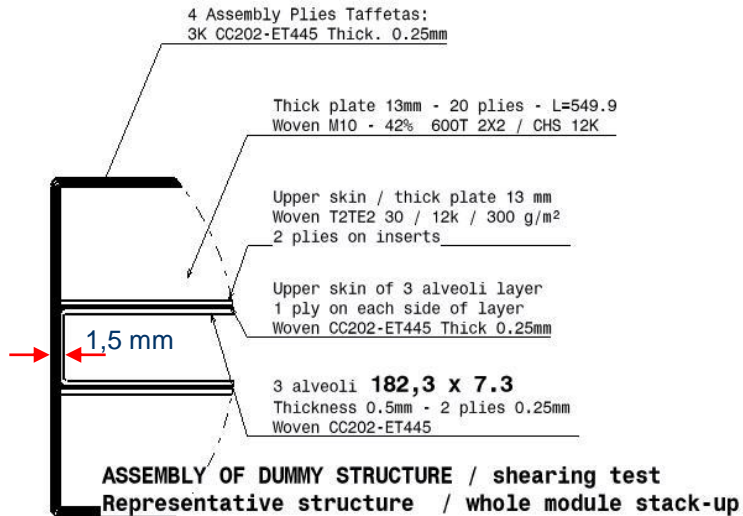
	EUDET 15mm	EUDET 2mm	End-Cap 13 mm
Dimensions	1152×549×15 mm	1495×549×2 mm	2493.2×564.4×13 mm (45 kg)
Fournisseur	SRUCTIL (Groupe SNPE)	"	HEXCEL + SGL groupe (2 plis revêtement)
Ref Prepreg	T2TE230	"	M10 + CE 8254
Ref Fibre / Tissu	TC230-01 12k Sergé 2x2 (Twill)	"	600T 2X2 / CHS 12K + sergé (SGL)
Masse fibre tissu	300 g/m ² ± 15	"	600 g/m ² + 282 g/m ²
Taux de résine	40 % ± 3	"	42 %
Type de résine	R367-2	"	/
Prix ~	8 K€	0,8 K€	9,4 K€
Nbr plis	40 (48 pour le démonstrateur) + 2	6	20 + 2
Nbr compactages	7 plis - 5 compactages 5 plis - 1 compactage 2 plis - couverture inserts	6 plis – 1 compactage	6 plis - 1 compactage 7 plis - 2 compactages 2 plis - couverture inserts
Cuisson autoclave (3m)	3 bar 20 – 85° C / 2° C/min + 1h30 / 85° C 85 – 120° C / 0,5° C/min + 1h30 / 120° C	3 bar 0 – 80° C / 2° C/min 1h30 / 120° C	3 bar 20 – 80° C / 1,5° C/min + 1h30 / 80° C 80 – 120° C / 1,5° C/min + 1h30 / 120° C
Film de colle	Redux 609 300g/m ²	/	Redux 609 300g/m ²
Nbr inserts / colle	18 M6 / Araldite 420/A-B	/	30 M6 / Araldite 420/A-B
Usinage	Découpe jet d'eau (plaque ep.=17.6 mm) Usinage formes inserts, Ep. et chanfreins	Découpe jet d'eau (plaque)	Découpe jet d'eau (plaque ep.=13.3 mm) Usinage formes inserts et chanfreins

Moulage échantillons Prepreg HR



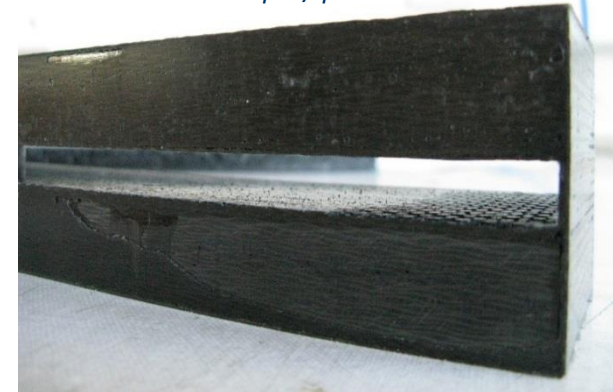
Eprouvettes et tests

Influence / modification de l'épaisseur des plis extérieurs

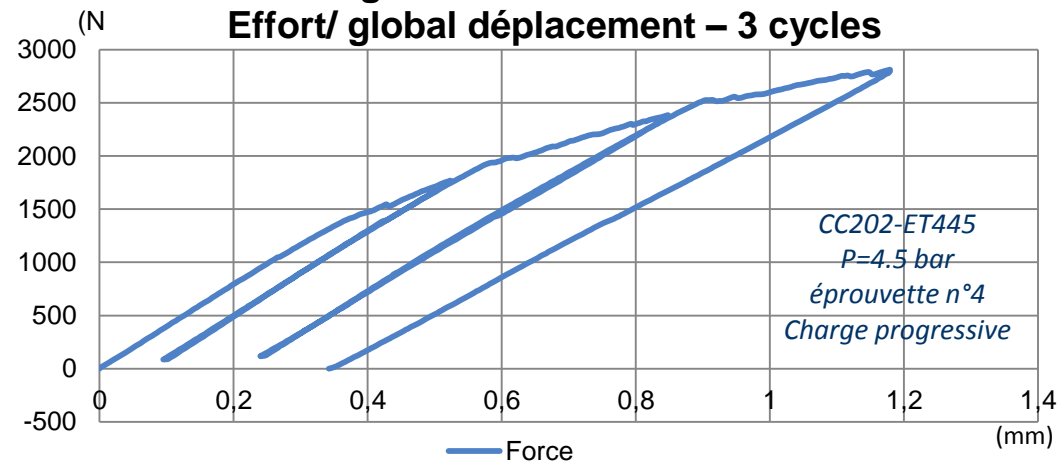


Tests de cisaillement / contraintes dans la structure

Eprouvette drapée avec 2 plaques épaisses dans 4 plis externes – cycle de polymérisation résine identique / process réel



Dégradation de la structure Effort/ global déplacement – 3 cycles

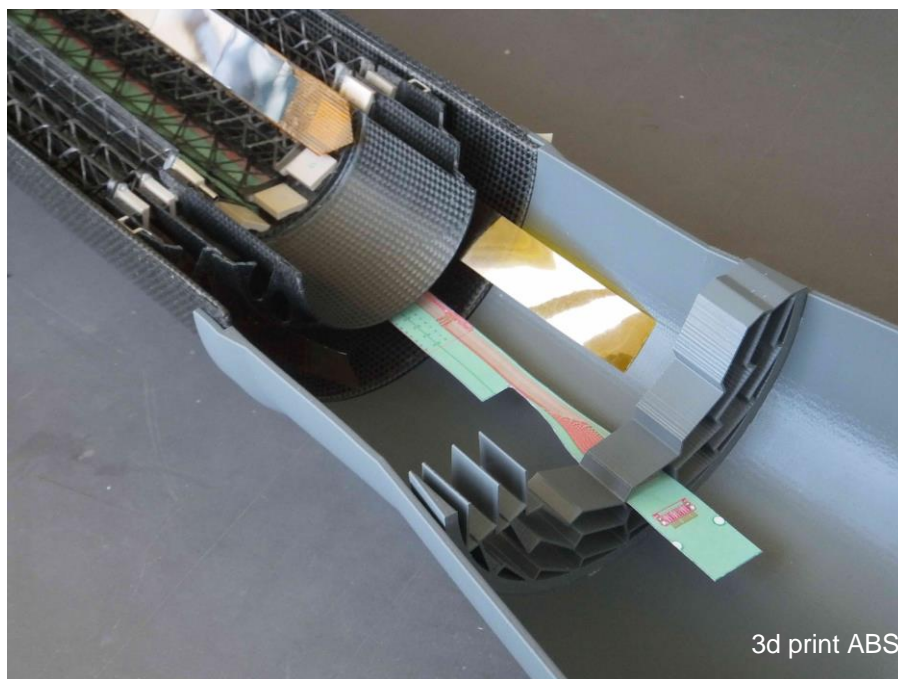


Charge & décharge: baisse progressive effort / déplacement avec destruction progressive de la résine

Le projet ALICE ITS (Inner Tracker System- LS2 - 2018/19)

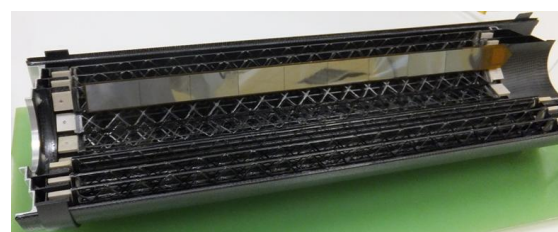
Structures composites

du futur détecteur PIXEL d'ALICE



3d print ABS

/ Corrado Gargiulo (WP9 ITS Mechanics and Cooling)

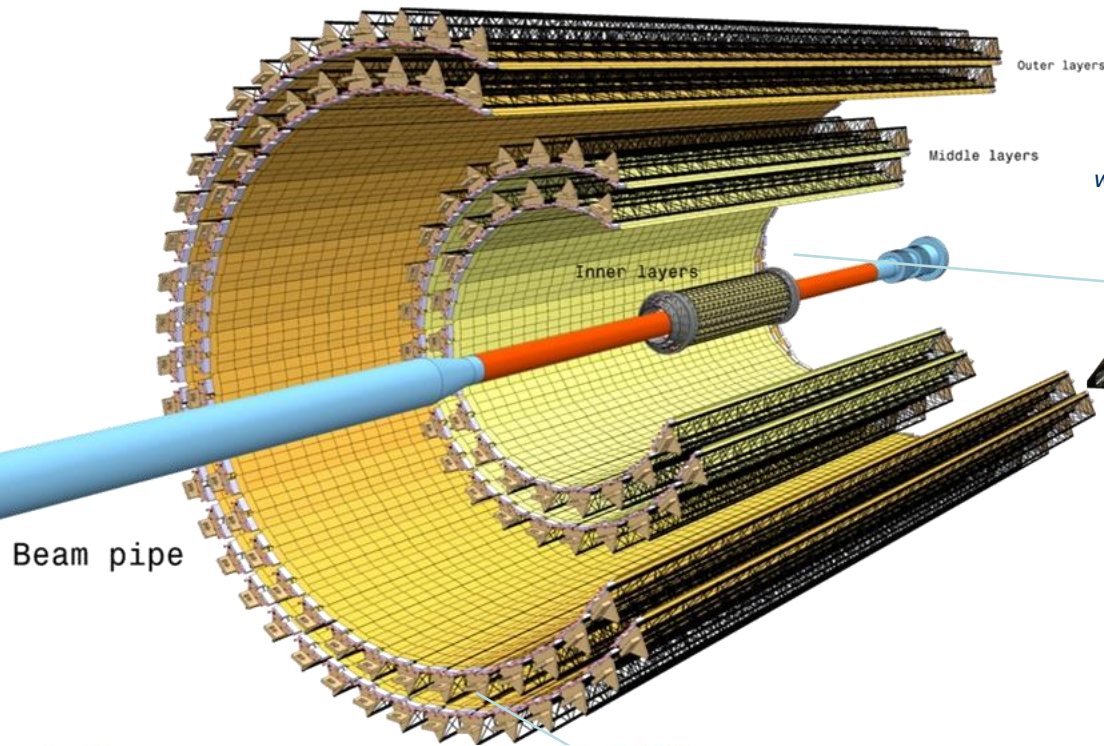


Ultra-light tracking detectors

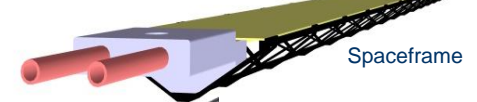
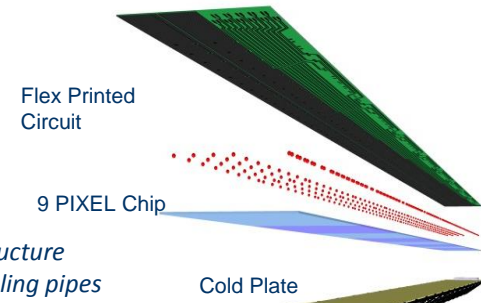


ALICE

Barrels and staves



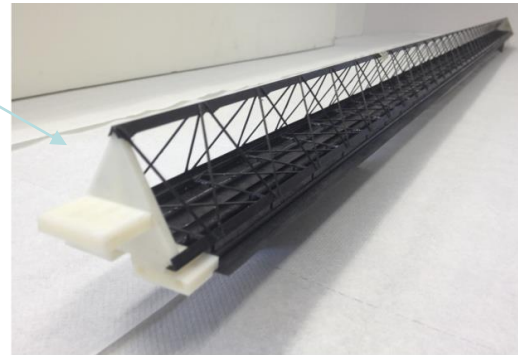
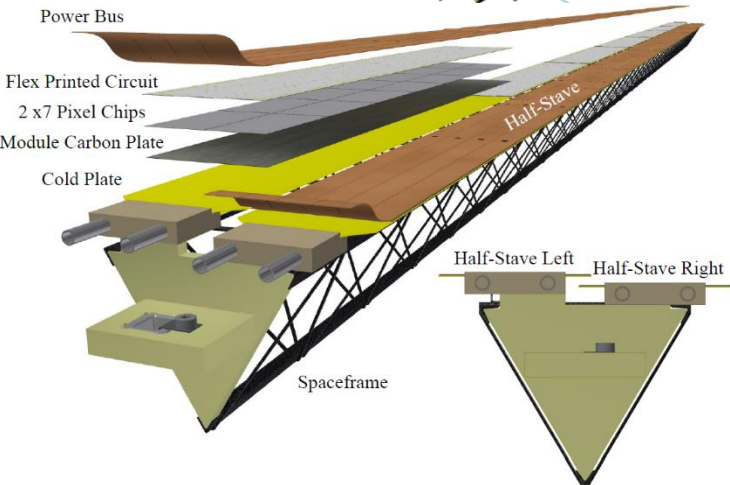
Carbon Fibre reinforced structure with embedded polyimide cooling pipes



Inner layer stave
300mm length,
1.6 gram weight

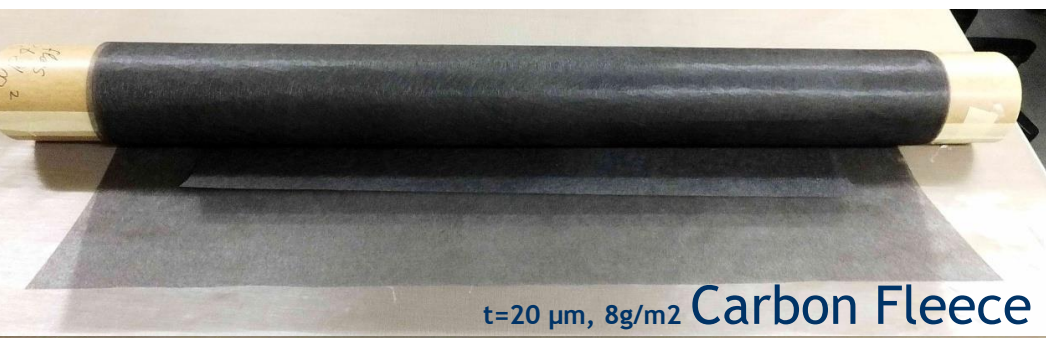
INNER BARREL

- Inner Barrel (IB): 3 layers pixels
- Radial position (mm): 22,31,39
- Length in z (mm): 270
- Nr. of staves: 12, 16, 20

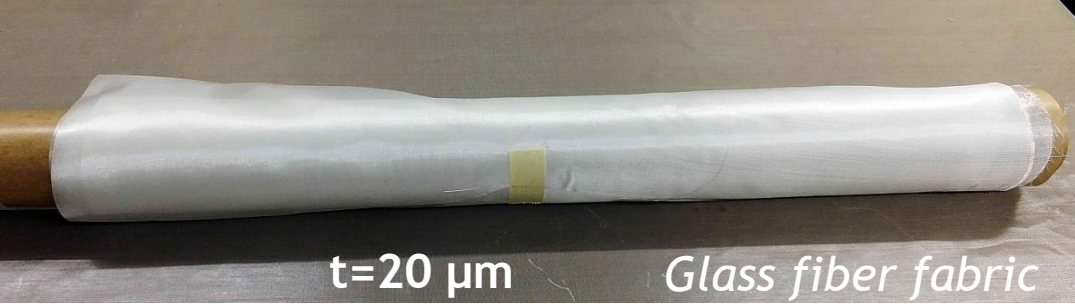


- Outer Barrel (OB): 4 layers pixels
- Radial position (mm): 194, 247, 353, 405
- Length in z (mm): 843, 1475
- Nr. of staves: 22, 28, 40, 46

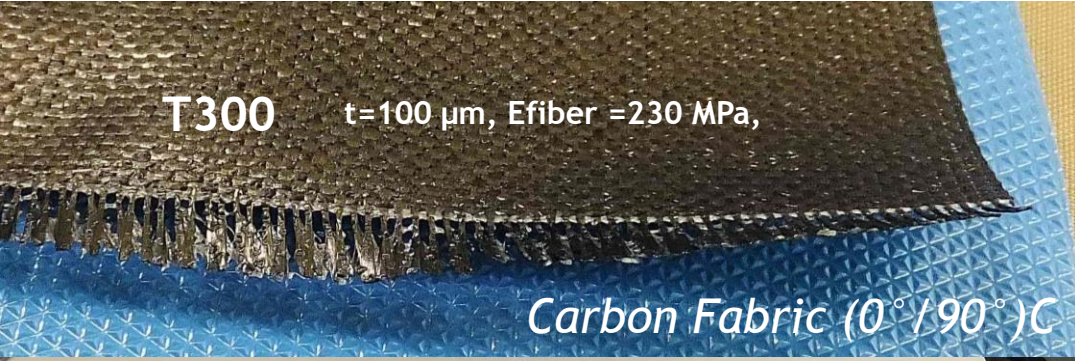
OUTER BARREL



$t=20\ \mu\text{m}$, $8\text{g}/\text{m}^2$ Carbon Fleece



$t=20\ \mu\text{m}$ Glass fiber fabric



T300 $t=100\ \mu\text{m}$, $E_{\text{fiber}}=230\ \text{MPa}$,

Carbon Fabric ($0^\circ/90^\circ$)C



K13D2U-2k RS3
 $E=560\ \text{MPa}$, $X_T=2.2\ \text{GPa}$, $K\sim 450\ \text{W}/\text{Mk}$ $t=70\ \mu\text{m}$



Carbon Unidirectional Prepreg

Materials

Carbon Roving



Filament diameter= $5\ \mu\text{m}$

M60j- 3k
 $E=588\ \text{GPa}$, $X_T=3,9\ \text{GPa}$, $K= 140\ \text{W}/\text{mK}$, $0,10\text{g}/\text{m}$; $\text{CTE}=-1,1\ \times 10^{-6}/\text{K}$
M55j- 6k
 $E=540\ \text{GPa}$, $X_T=4,2\ \text{GPa}$, $K= 150\ \text{W}/\text{mK}$, $0,32\text{g}/\text{m}$; $\text{CTE}=-1,1\ \times 10^{-6}/\text{K}$

1,5mmx32 μm (ODxwt)



Part #: ISWPT-067-30-10
Desc: Polyimide Micro Tubing 0571" ID x 0590" OD
x 00129" Wall , USP Class VI 30" Length

Polyimide tubes

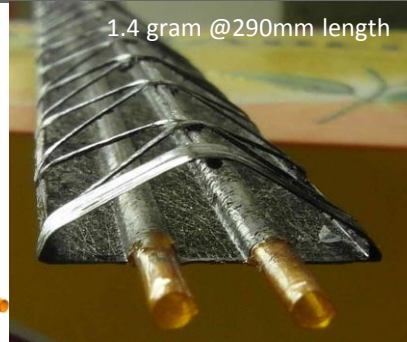
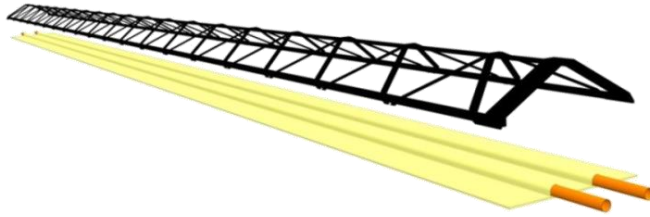
$t=30\ \mu\text{m}$, $w=50\text{g}/\text{m}^2$
 $K\sim 1500\ \text{W}/\text{mK}$



Carbon Paper

IB Carbon spaceframe - Filament winding

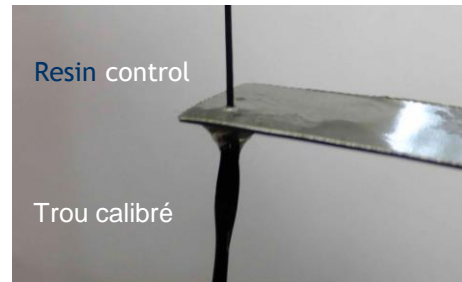
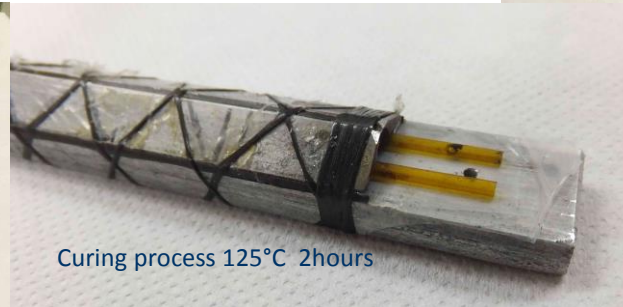
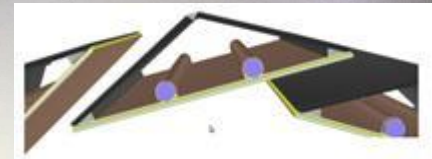
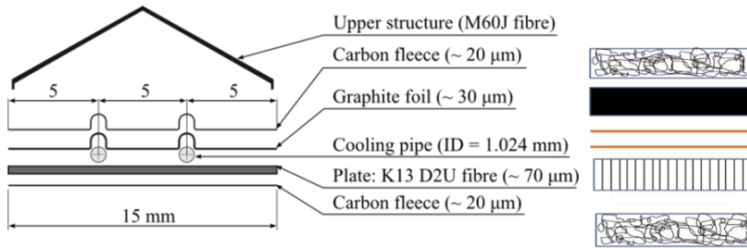
Inner Barrel stave



Manual Lay-Up & Filament winding



Transversal section:



Winding angle <math><23^\circ</math> to avoid fiber break during winding due to fiber High Modulus



1. CFthread dry M55JB-6k (6000) 220tex (0,22g/m)
2. CFthread drv M60-3k (3000) 100tex (0,103g/m)

Production Process: **Curing**

Cyanate ester resin EX1515, RS3

- ✓ High radiation resistance,
- ✓ low moisture absorption
- ✓ low outgassing
- ✓ unparalleled toughness.
- ✓ excellent resistance to microcracking, even when subjected to thermal cycling and high levels of radiation exposure

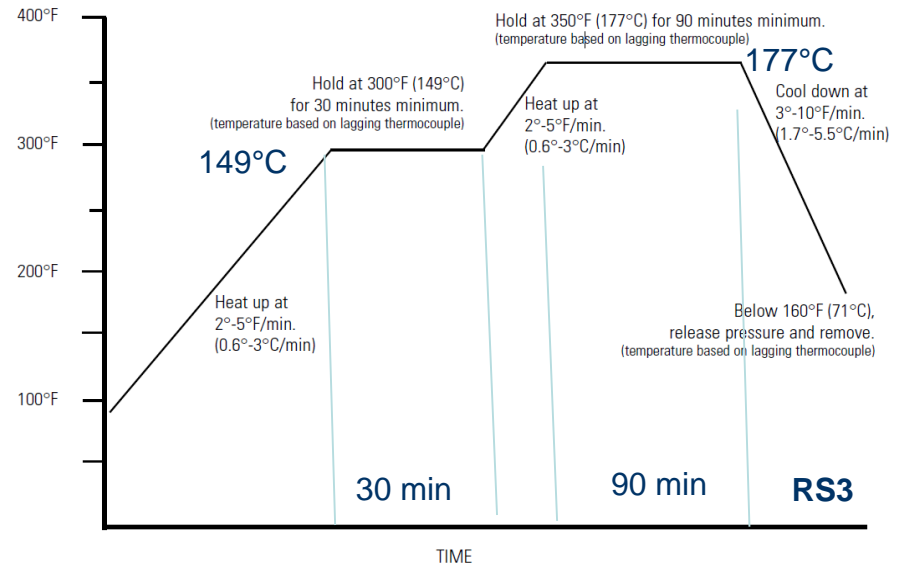
RS-3 NEAT RESIN MECHANICAL PROPERTIES

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_{1c}	2.10 in-lb/in ²

4581 AQ III / EX-1515

8 HS FAW 300 gsm

Tensile Strength	109.8 Ksi (757 MPa)
Tensile Modulus	3.45 Msi (23.8 GPa)
Compression Strength	78.8 Ksi (543.3 MPa)
Compression Modulus	4.06 Msi (28.0 GPa)
Flexural Strength	107.0 Ksi (737.7 MPa)
Flexural Modulus	3.16 Msi (21.8 GPa)
ILSS	9.86 Ksi (68.0 MPa)

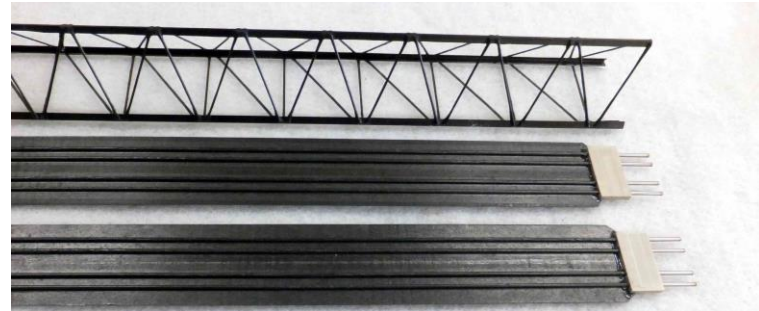
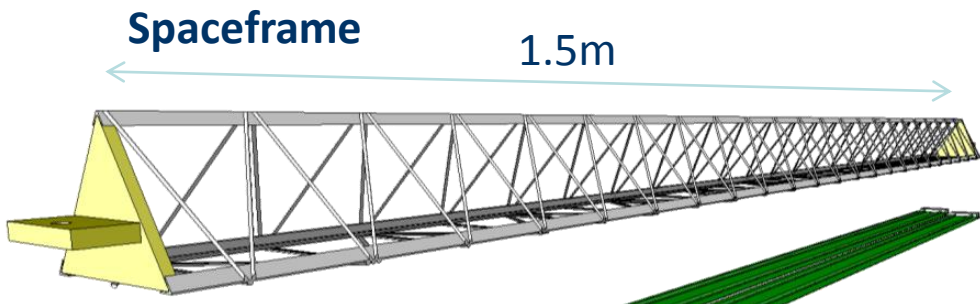
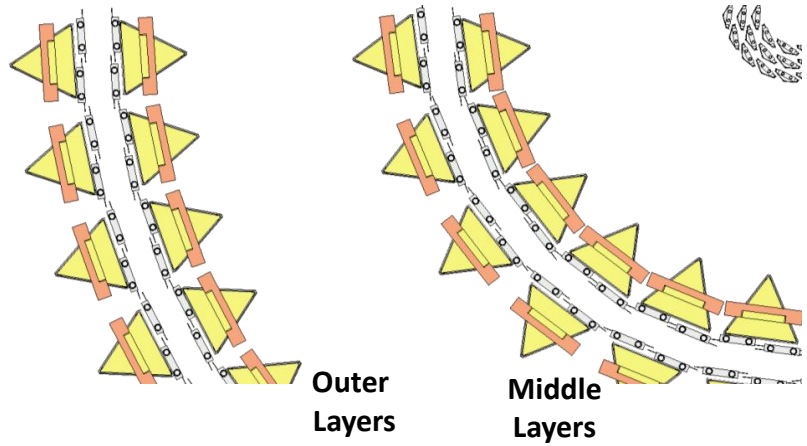


- Apply 30 - 85 psig pressure

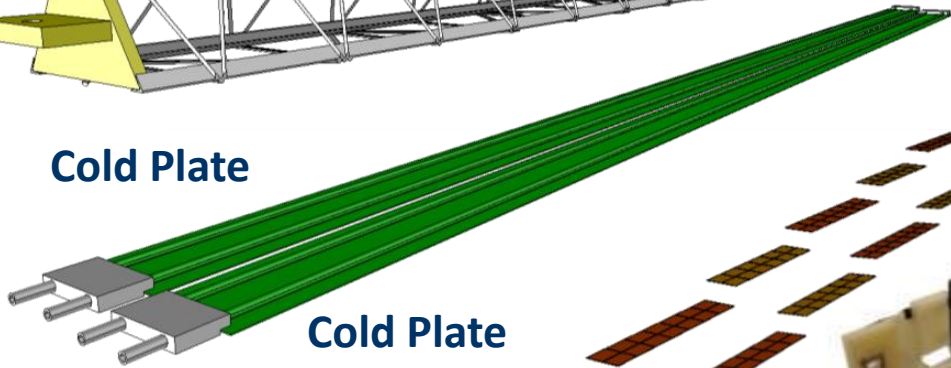
Outer barrel (OB)



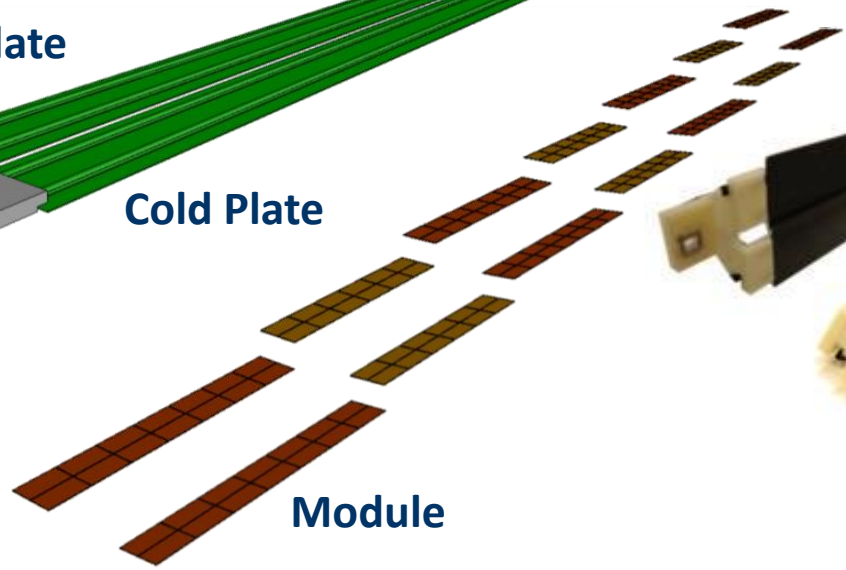
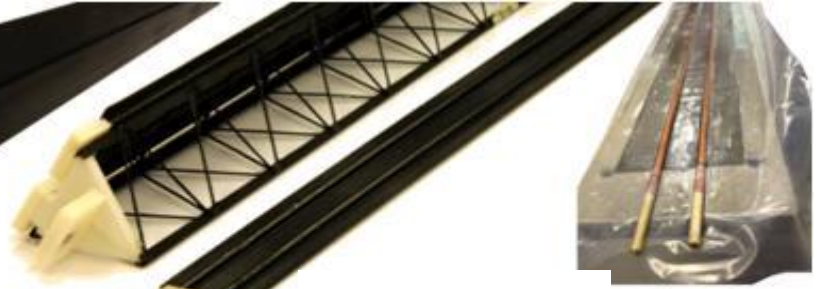
Stave (from 30 cm to 1,5 m)
LAYER 5,6 length 1526mm. Weight 33,6g
LAYER 3,4 length 900mm. Weight 18g



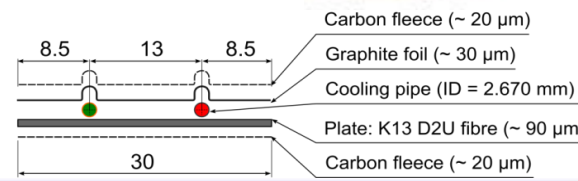
Cold Plate

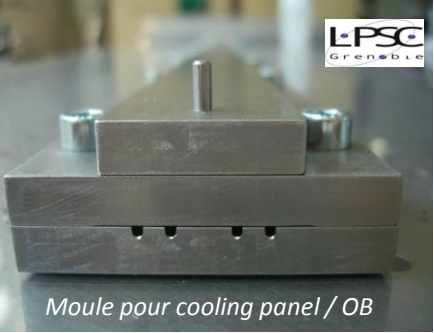


Cold Plate



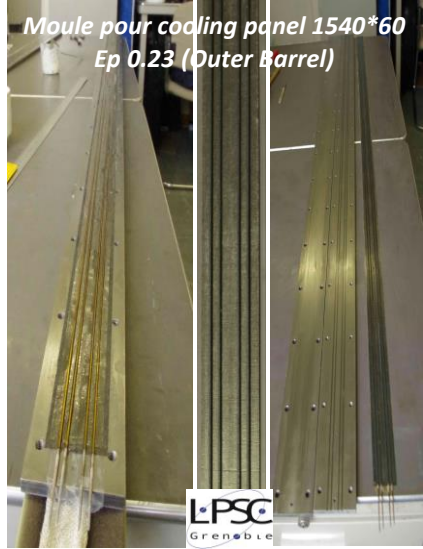
Module





LPSC Grenoble

Moule pour cooling panel / OB



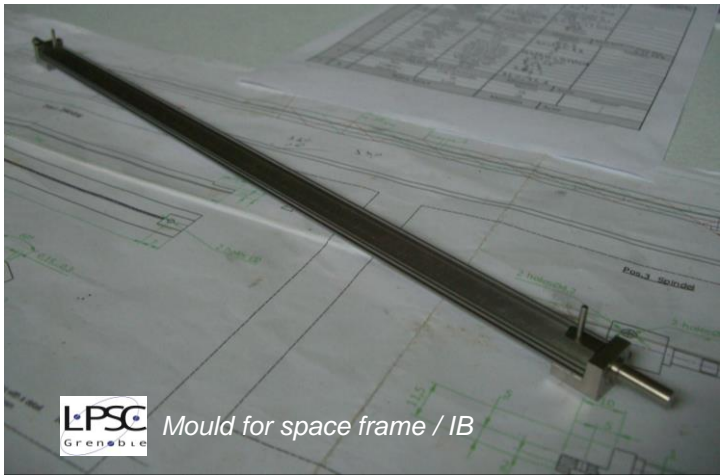
Moule pour cooling panel 1540*60 Ep 0,23 (Outer Barrel)

LPSC Grenoble



moulds & mandrels

CERN

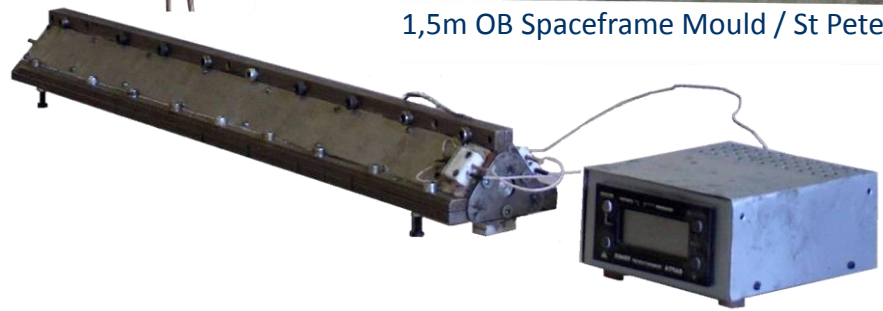


LPSC Grenoble

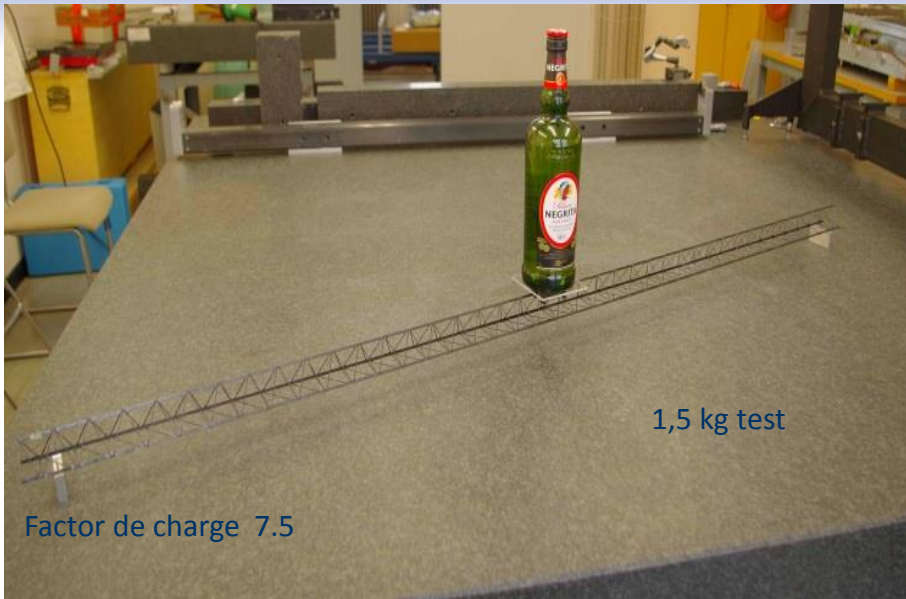
Mould for space frame / IB



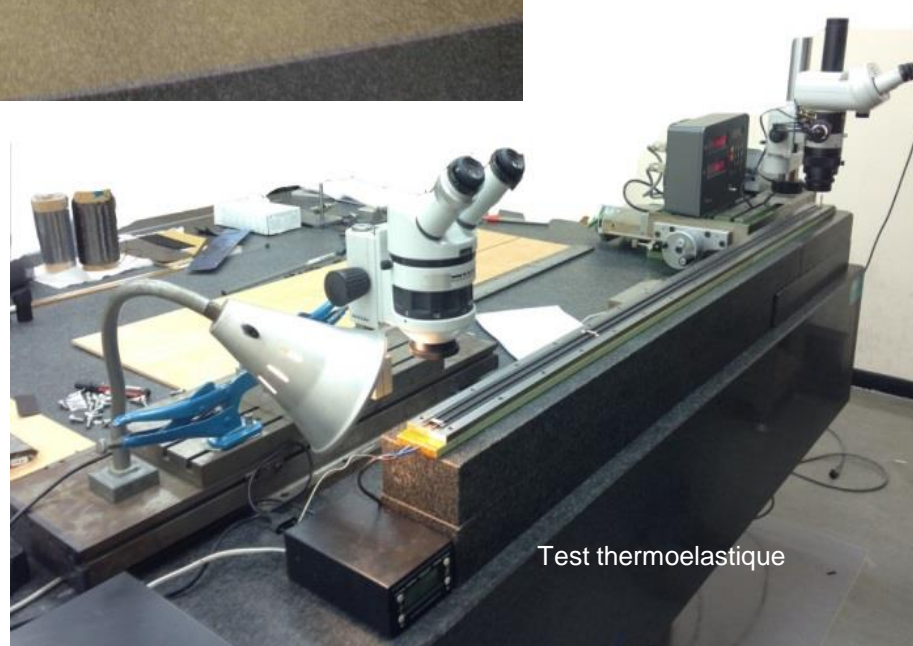
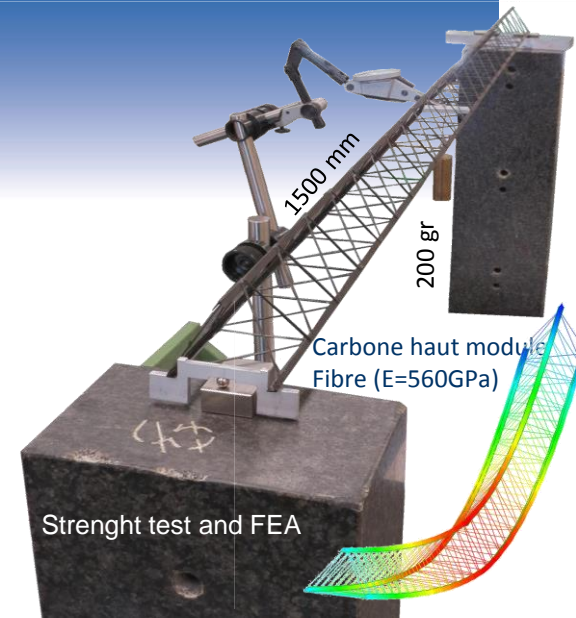
1,5m OB Spaceframe Mould / St Petersburg



Caractérisations



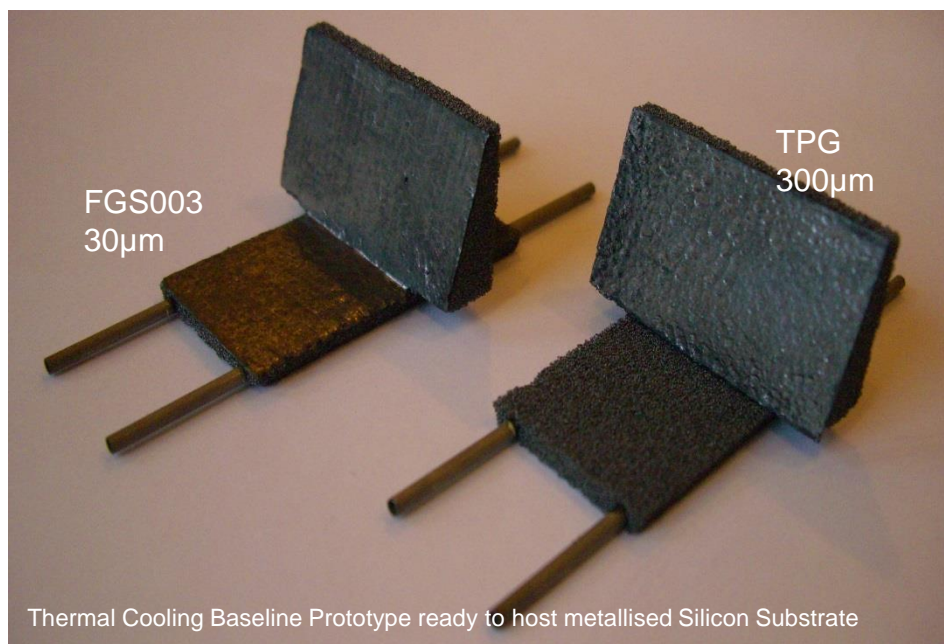
Factor de charge 7.5



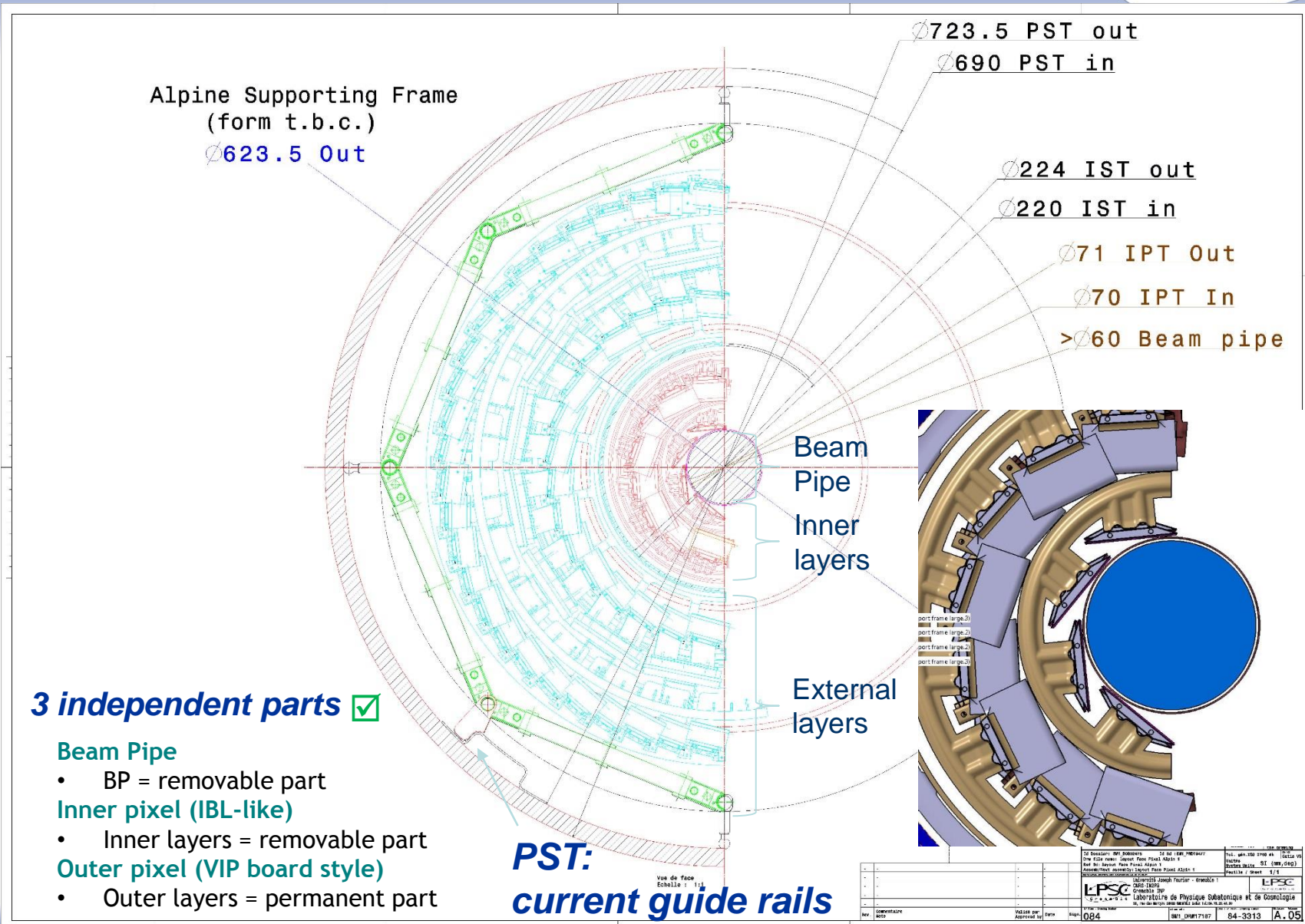


Co Cuisson: Mousse de carbone-graphite-composite du futur détecteur *PIXEL* d'ATLAS (ITK)

Fabrication prototypes thermiques “Alpins”



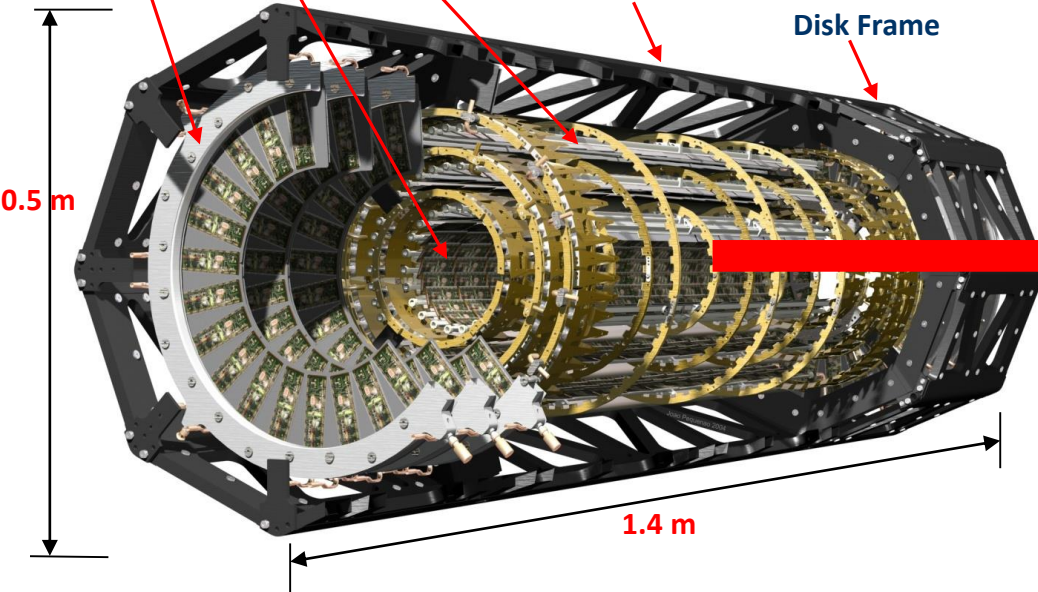
Alpine Pixel – Supporting Frames



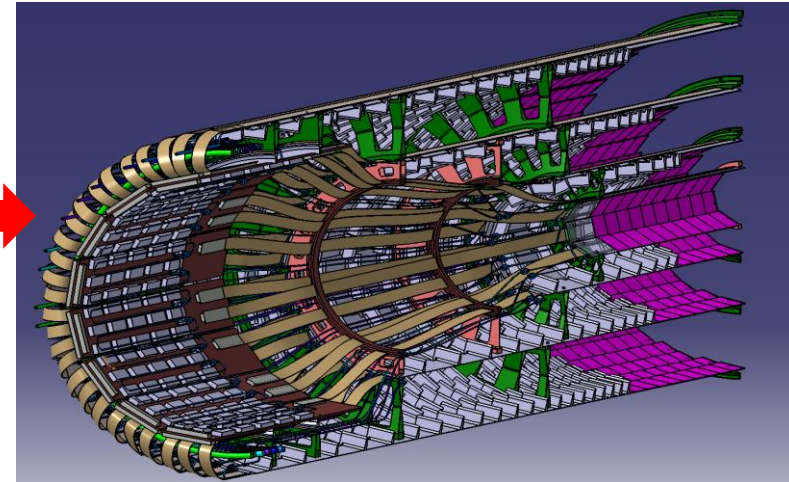
Mechanical support structures

Current pixel detector

Disk Rings
Staves
Barrel Shells
Barrel Frame
Disk Frame

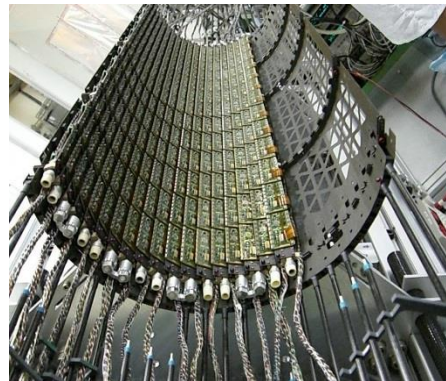


Alpine pixel detector

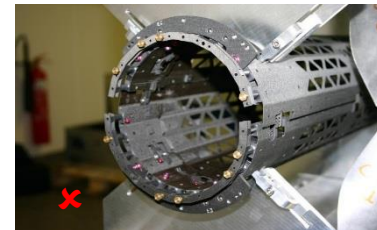


Pixel detector support frame

carbon composite structure + aluminum pieces supporting current barrel & end cap detectors



Current stave integration halfshell



- No carbon composite layer shells
- Only IST & IPT thin carbon interfaces and supporting flanges for layers (material minimization)

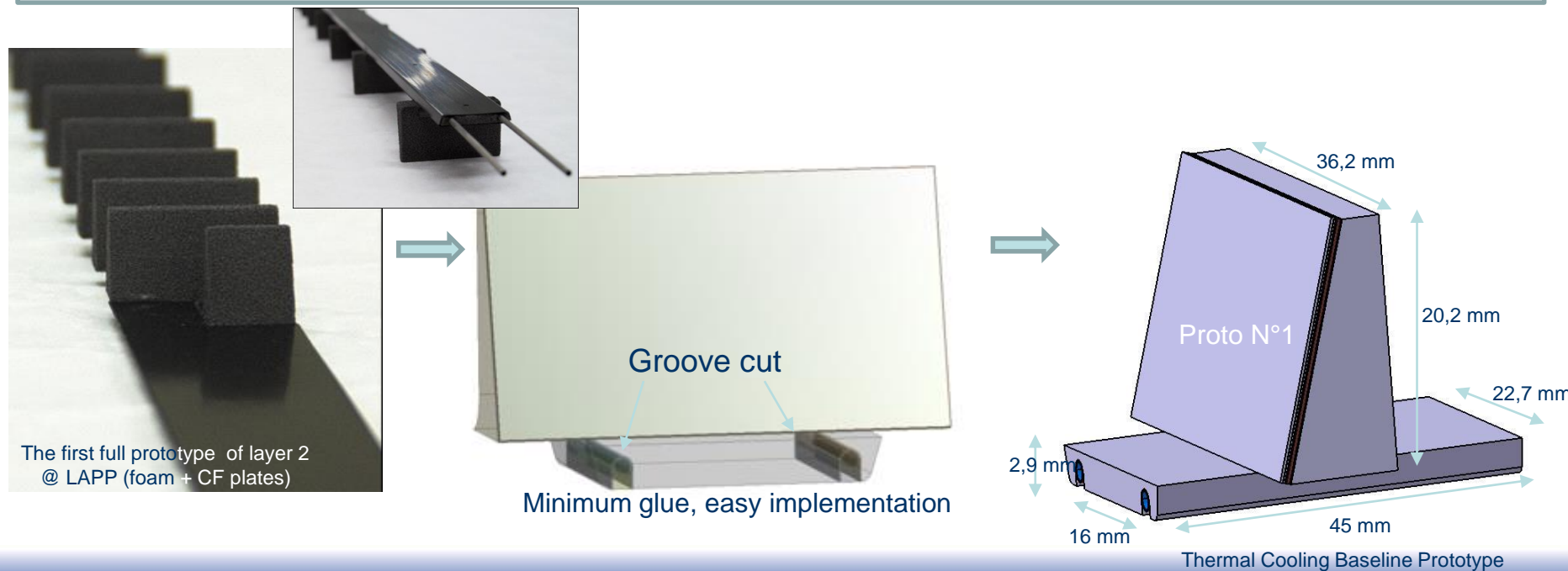


Alpine layer won't have shells



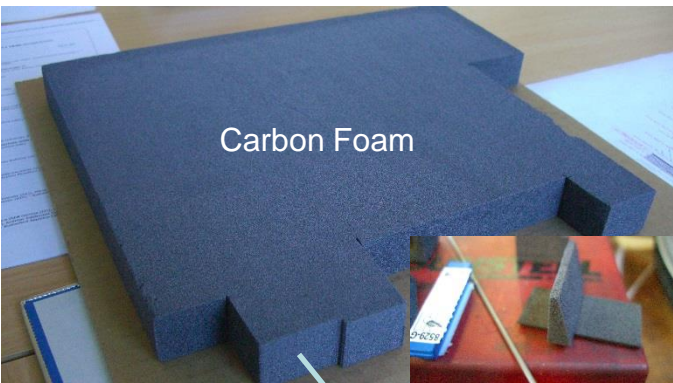
I.1 – Alpine thermal prototypes

- ~ Prototypes thermiques semblables au design IBL
 - Afin de vérifier le comportement thermique de la structure de l'end-cap et la technique d'usinage
 - Même mousse carbone que pour IBL mais design différent
- 2 tubes Ti de refroidissement sont intégrés
 - Optimisation des couches thermiques: performances réelles des “sandwiches” à tester
 - Flux thermique: du détecteur aux tubes de refroidissement CO²
 - Performances des feuilles Graphite TPG ou FGS003 ou PGS
 - Design et assemblage des la mousse carbone



I.2 – Alpine prototypes - Concept 1

- Montagne et base: 1 seul élément en mousse
- Graphite conducteur thermique: TPG ou FGS003 ou PGS
- 2 tubes Ti encastrés avec de la colle thermique



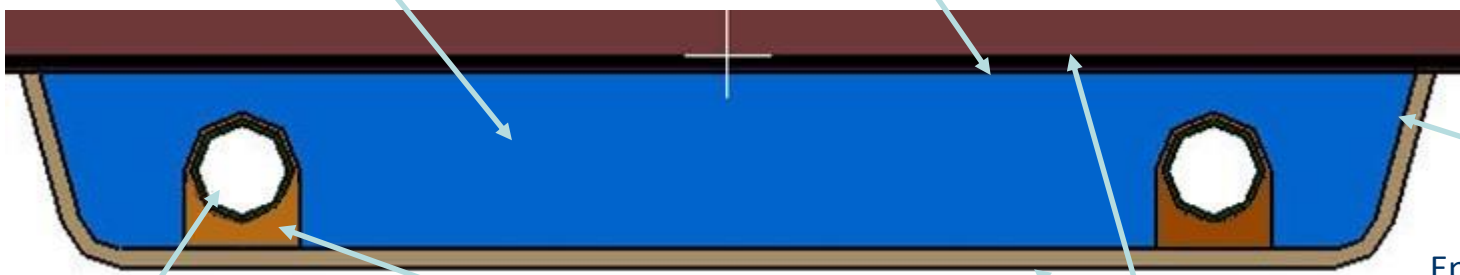
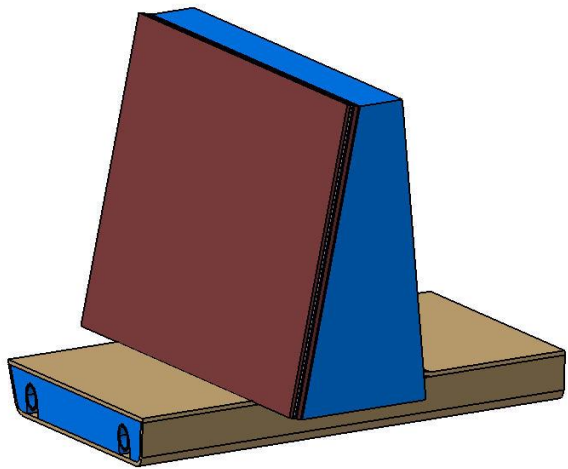
Carbon Foam

Thickness = 3,2 mm



Graphite Foil
FGS003

Thickness = 30 μm



Ti Pipe
Φ = 2 mm;
Wall Thickness = 100μm

Glue Wall Th=0,1mm
Stycast or with
nanotube additives

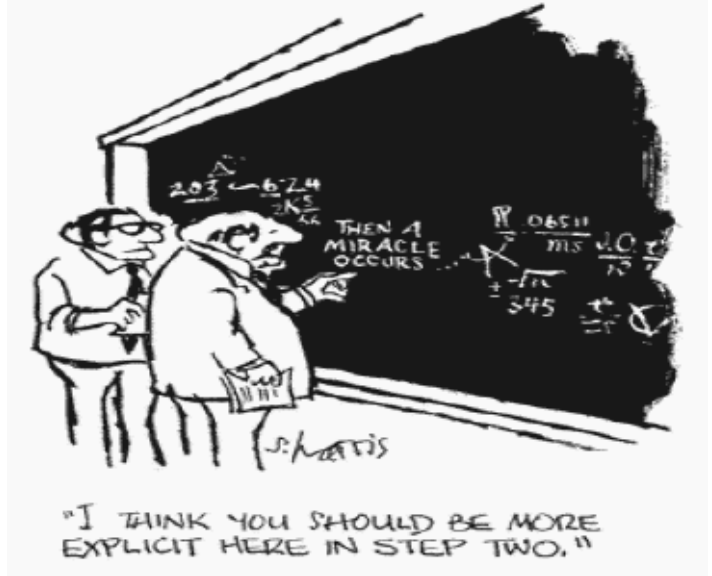
Composite (ex.K13C-RS3)
Thickness = 0,3 mm

Glue
Araldite 2011
Epoxy bi-components

I.3 – Alpine thermal prototypes

Baseline model – geometry and materials

Material	TC [W/mK]	Thickness [mm]
Carbon K foam	40	-
Titanium tube 1,8 mm	16,5	0,10
Stycast glue 2850FT+Catalyst9	1,1	0,10
Graphite Foil (TPG)	1500/1500/10	0,30
Graphite Foil (Thermasol-FGS003)	1500/1500/15	0,030
Graphite Foil (PGS) t.b.d.	1500/1500/15	0,025



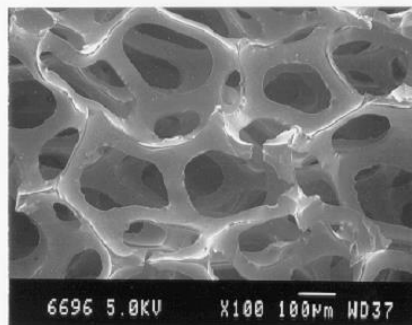
Gluing of components

Description	Catalyst 24	Catalyst 9
Viscosity(Pa*s)	0.03-0.04	0.08-0.105
Density(g/cm3)	1-1.05	0.95-1.05

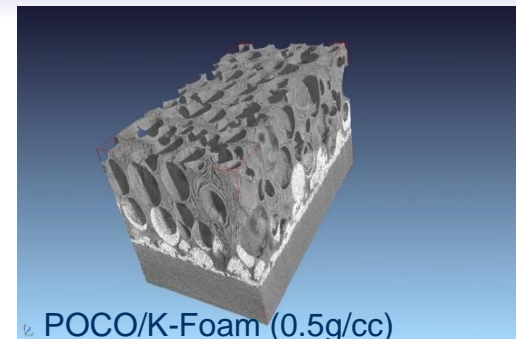
Stycast 2850 FT +catalyst N°9

- Quite high viscosity
- Less Easily penetrate into foam / N°24
 - Optimum viscosity to find out

Graphitic Foam



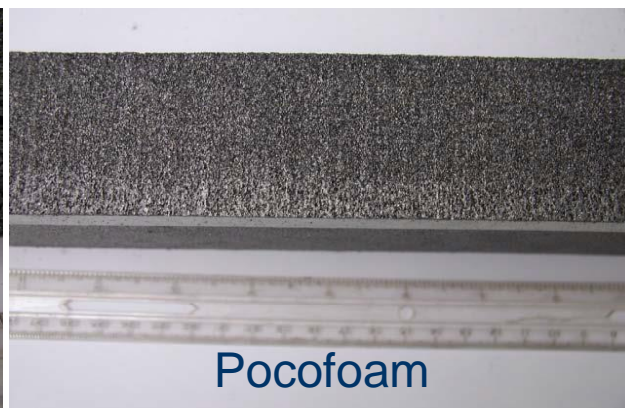
Allcomp 0.2g/cc



POCO/K-Foam (0.5g/cc)

CF Foam

- Koppers: pores fermés et a une très forte non-uniformité / taille des pores
- Poco: varie en densité selon l'épaisseur
- Allcomp: pores ouverts, a une assez bonne uniformité / taille des pores
La plus facile à usiner – peut être fabriquée dans plusieurs densités.
- Toutes sont \pm comparables en prix



Bill Cooper Vertex 2013, 15-20 September 2013

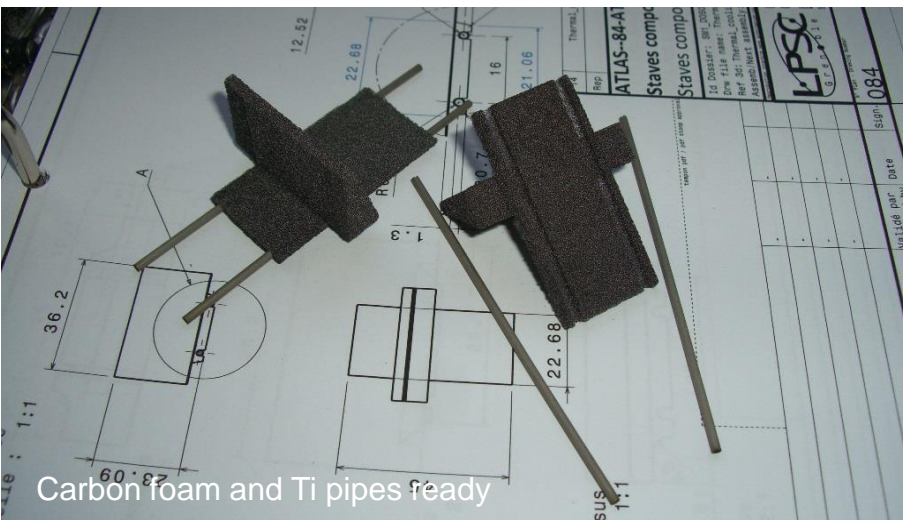
I.4 – Alpine thermal prototypes



EDM Machining



Lathe machining for pipe



Carbon foam and Ti pipes ready

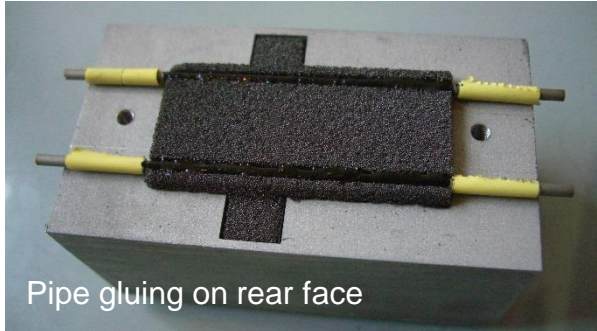


Step 1: Fabrication

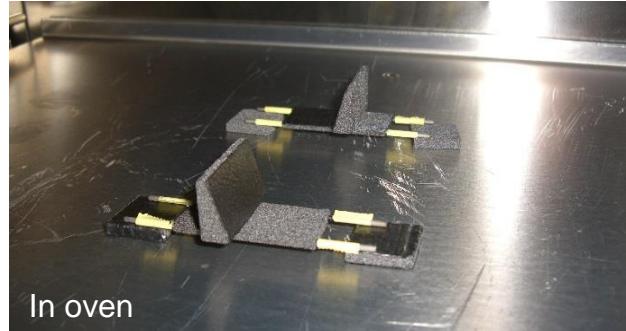
I.5 – Alpine thermal prototypes



Stycast 2850+Catalyst 9



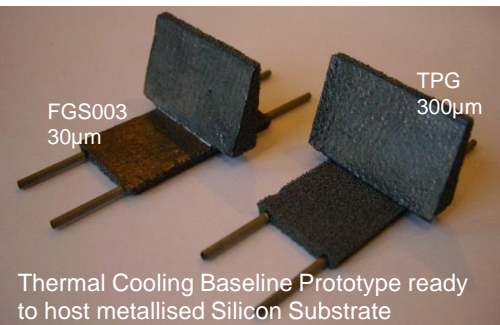
Pipe gluing on rear face



In oven



Curing 65°C-2h



Thermal Cooling Baseline Prototype ready to host metallised Silicon Substrate

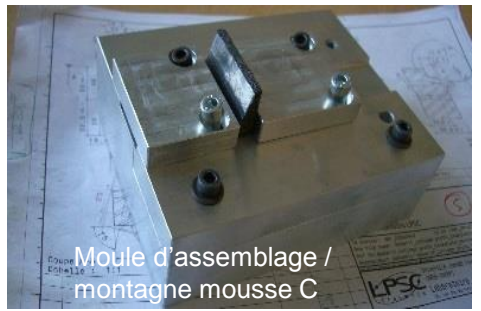
Step 2: Curing

Step 3: Coques composites



Moule de cuisson coque composite

Step 4: Co-Curing

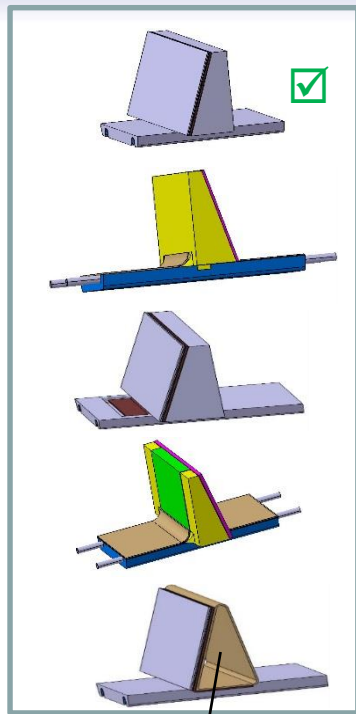


Moule d'assemblage / montage mousse C

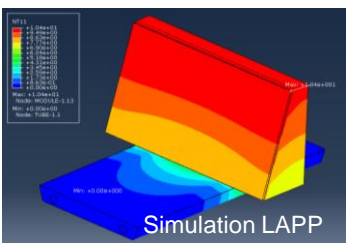
I.6 – Alpine thermal prototypes

Mécanique et Thermique

- Techniques d'assemblage et d'usinage
 - Mousse, graphite, composite, Tubes Ti, Colle
- Qualification des matériaux et interfaces
 - Carbone K13C2U & D2U + EX-1515 & RS-3, woven fabrics CC202-ET445...
 - Performances des feuilles de Graphite: TPG / FGS003 / PGS
- Coccuisson multi-matériaux
- Optimisation thermique (meilleure conductivité de l'assemblage)
 - Refroidissement substrat silicium métallisé / boucle CO² (LAPP)

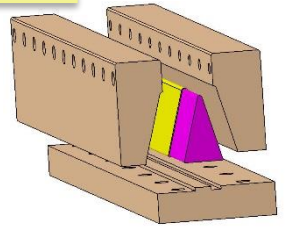


Step 5: Test thermique



Rapport d'essai / caractéristiques mécaniques du composite utilisé

Step 7: Comparaison des prototypes



Moule pour montage composite

Step 6: Comparaison / simulations