



**IN2P3**

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

**Marc Anduze**  
**LLR**

**- Ecole de Mécanique 2014 -**  
**Matériaux composites, de la conception**  
**à la mise en œuvre**  
**Aussois, 15-19 septembre 2014**

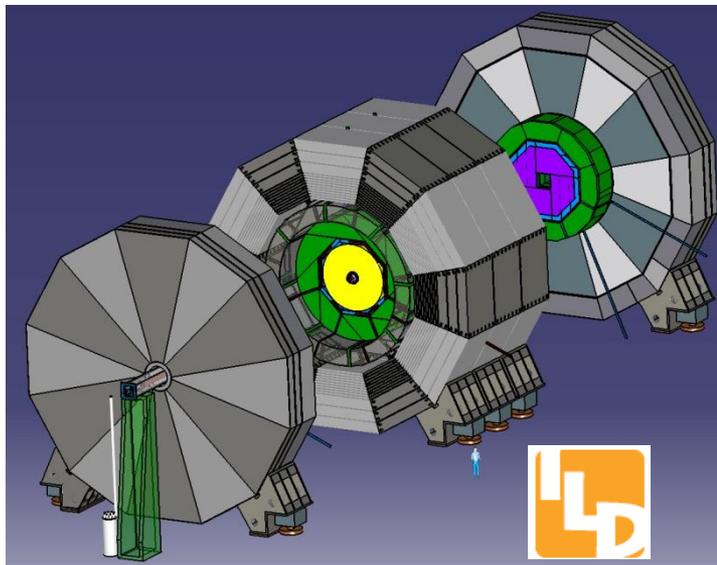
**Structure Alvéolaire C/W**  
**Problématiques de fabrication**

# Cadre de l'Etude (1/3)

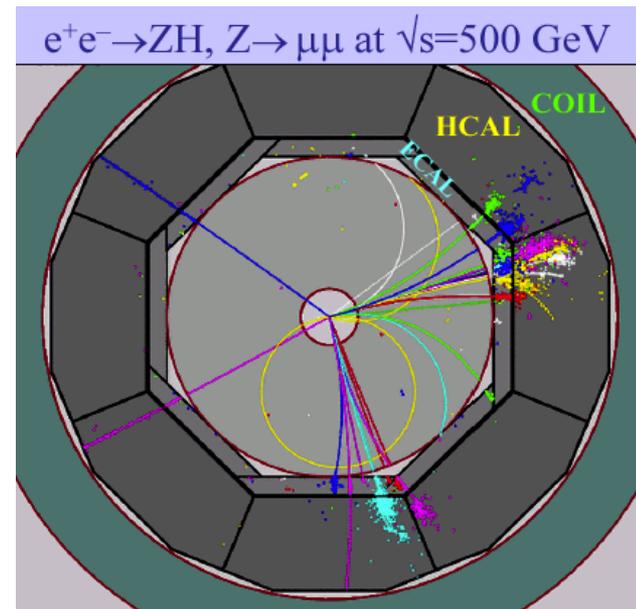
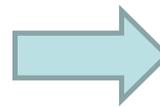
- Projet : Calorimètre Electromagnétique (ECAL) pour l'ILC**

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 événement (PFLOW) :

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



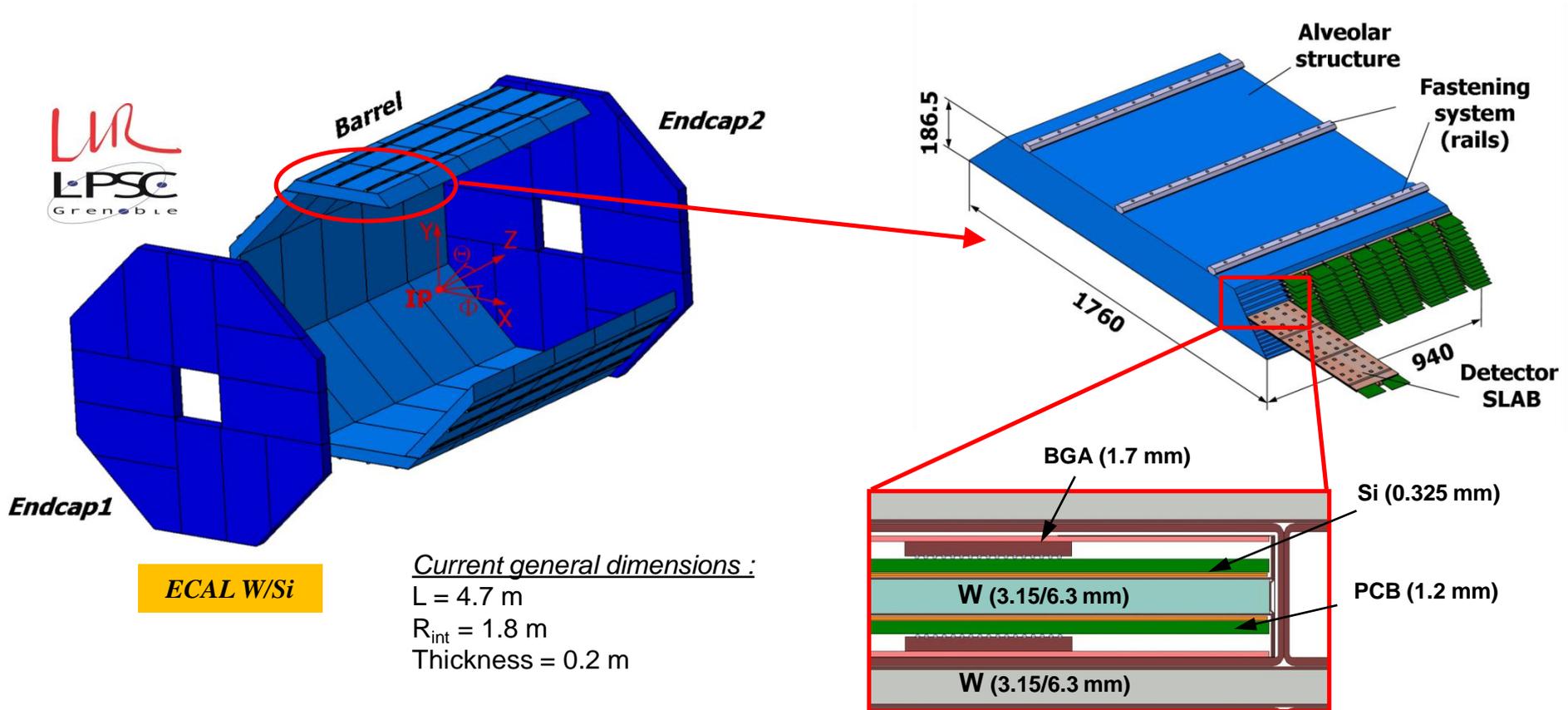
*Maquette CATIA du détecteur ILC*



*Exemple de simulation d'évènements*

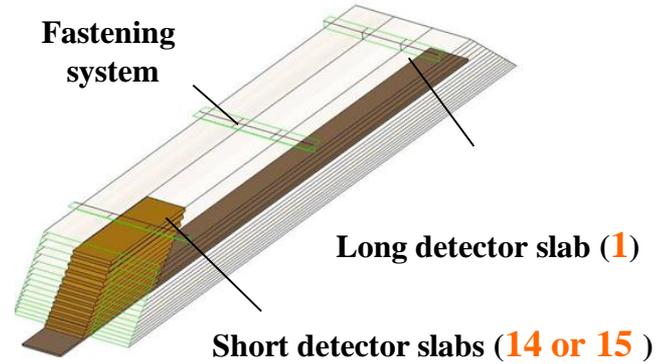
# Cadre de l'Etude (2/3)

- Concept de **structure alvéolaire** auto portante en matériau composite (Carbone/Epoxy), incluant la moitié de l'absorbeur (plaques de W) dans laquelle sont insérés les éléments de détection (Slabs)
- Concept repris à la fois pour le **barrel** (40 modules) et les 2 **Endcaps** :

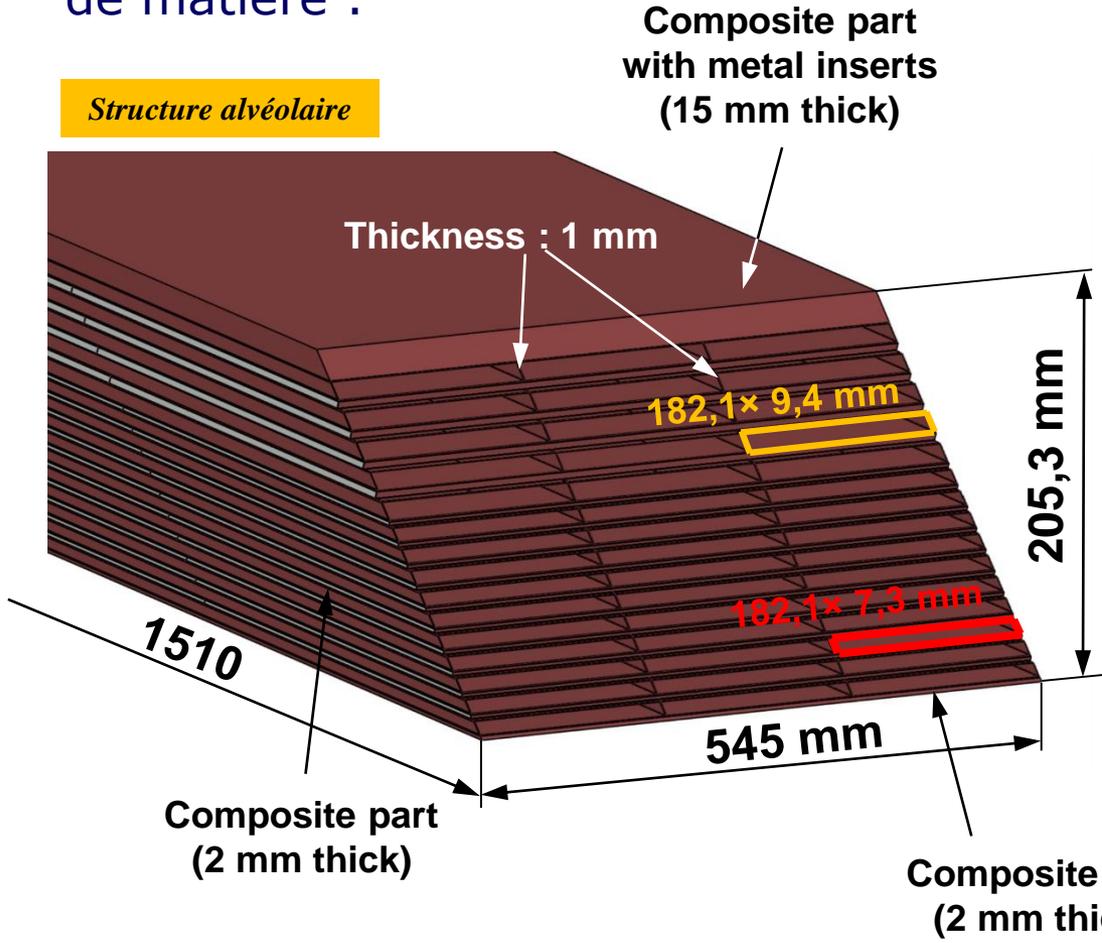


# Cadre de l'Etude (3/3)

- Définition d'un **prototype technologique**, représentatif de la structure finale en terme de dimensions, de formes et de traversée de matière :



**Structure alvéolaire**



## Principales caractéristiques

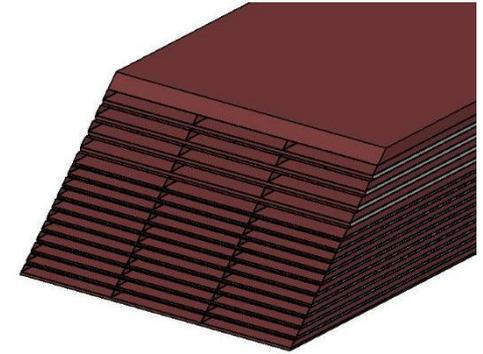
- 1 structure : ~ 23 X<sub>0</sub> (plaques de W : 20×2,1mm + 9×4,2mm)
- sizes : 1510×545×205,3 mm<sup>3</sup>
- Thickness of slabs : 6,8 mm (W=2,1mm)
- VFE inside detector
- Nb of channels : ~37890 (5.5×5.5 mm<sup>2</sup>)
- Weight : ~ 700 Kg

# Etude des procédés de fabrication

- Principe 1 - structure monobloc :**

obtention de la pièce finale en une **seule étape**

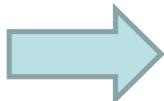
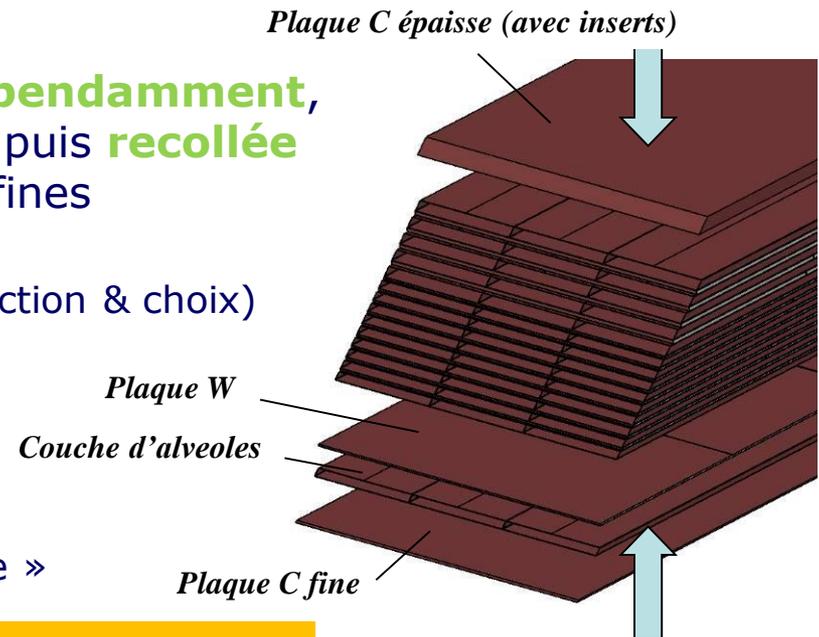
- ☺ Une seule cuisson autoclave
- ☺ Bon comportement mécanique lié à une polymérisation unique
- ☹ Moule métallique très complexe
- ☹ Contrôle très rigoureux du cycle de polymérisation (inertie thermique W+moule métallique, homogénéité ...)
- ☹ Risque important de rater la structure (récupération du W ?)



- Principe 2 - structure assemblée :**

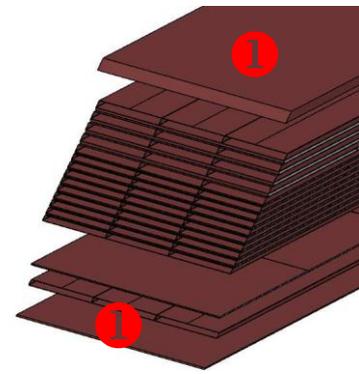
Chaque couche d'alvéole est **obtenue indépendamment**, **coupée** à la bonne longueur (biseau à 45°) puis **recollée** avec les plaques de W, plaques épaisses et fines lors d'une dernière cuisson autoclave

- ☺ Industrialisation des couches d'alvéoles (inspection & choix)
- ☺ Réduction de la complexité des moules
- ☺ Risque modéré de rater la structure
- ☹ Plusieurs moules sont nécessaires
- ☹ Plusieurs cuissons autoclave
- ☹ Comportement mécanique d'une « pièce collée »



**Principe 2** choisi pour le prototype

# Etape ① : plaques composites



- **Fabrication plaque épaisse (LPSC, Denis Grondin) :**

- Préimprégnés :

**HexPly®M10** (HEXCEL)  
carbone Haute résistance, 12000 fils  
grammage 600 g/m<sup>2</sup>, SERGE 2x2,  
Résine M10 à 42 %

Product Designation		<b>M10R/42%/ 600T2/CHS-12K</b>
Fibre	-	HS Carbon 12K
Weave	-	Twill 2x2
Mass	g/m <sup>2</sup>	600
Nominal Cured Ply Thickness	mm	0.70

- Stratifié 15 mm :

20 couches HexPly®M10  
+ 2 couches de recouvrement des inserts  
(film **Redux 609** - 300g/m<sup>2</sup>)

- Cuisson autoclave :

2 paliers @3bars :  
1h30@80°C & 1h30@120 °C  
(montée 1,5°C/min)

- inserts métalliques :

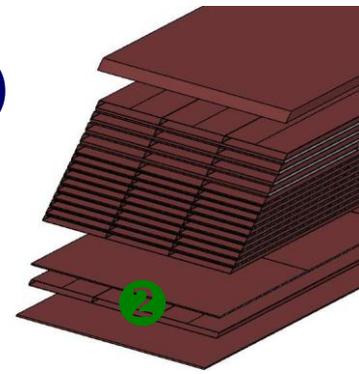
collés avec **Araldite 420/A-B** après  
usinage des poches puis fermeture

- usinage par découpe au jet d'eau

Cuisson :  
**Savoie  
Composite**

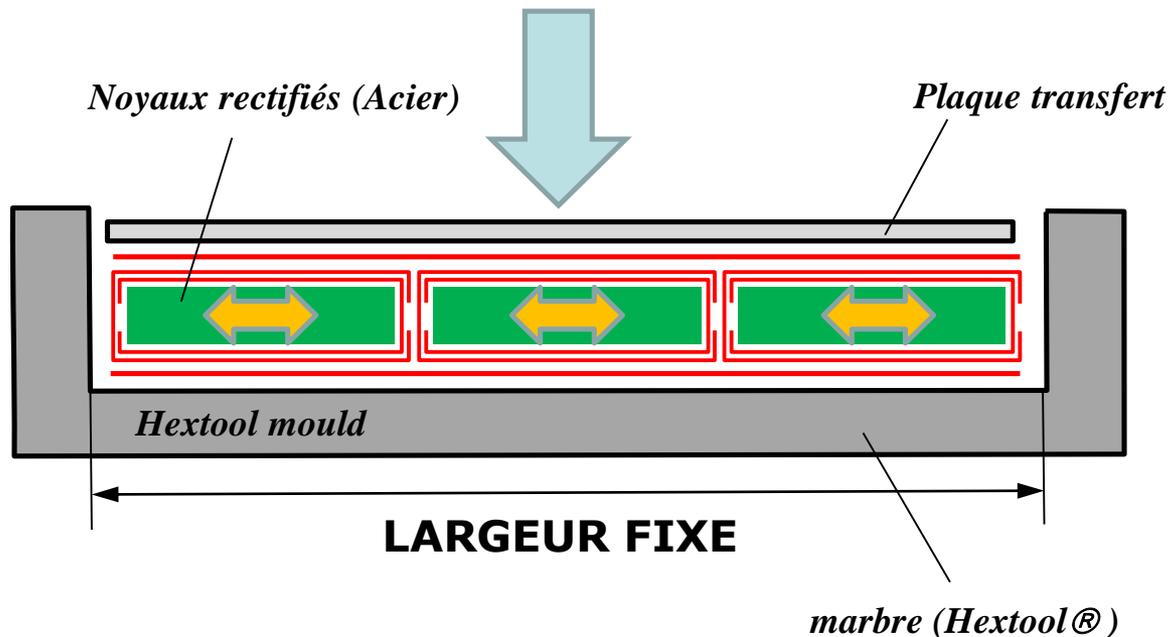


## Etape ② : couche d'alvéoles (1/4)



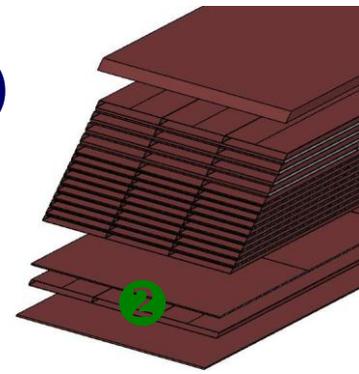
### • Principe du moule :

- Drapage de plis de préreg autour de **noyaux**
- Compactage vertical à l'aide de la **pression autoclave**
- Compactage horizontal à l'aide de la **dilatation différentielle** entre les noyaux (acier) et le marbre (**Hextool®** de chez HEXCEL ; prix<sub>2008</sub> : 280 € /Kg)



- Cuisson marbre : **Savoie Composites**
- Usinage du marbre : **Modelage Mécanique du Dauphiné**
- Usinage/rectification noyaux acier **Rectitec**

# Etape ② : couche d'alvéoles (2/4)



- Choix du tissu/prépreg :

- Compatible avec **un procédé de collage** (résine époxy)
- Capable de réaliser des alvéoles avec **un faible rayon de courbure**

➔ Tests de validation avec 2 types de prépregs :

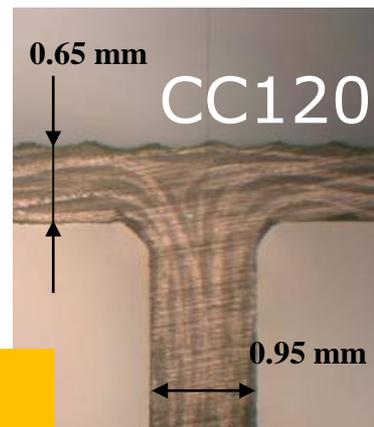
- **CC120ET443** (SAATI)

carbone HR, 1000 fils  
grammage 122 g/m<sup>2</sup>, taffetas,  
Résine ET443 à 43 %  
prix<sub>2010</sub> : 96,5 €/m<sup>2</sup>

- **CC202ET443** (SAATI)

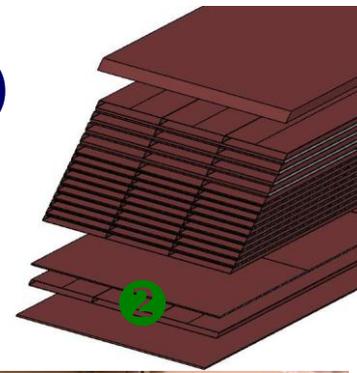
carbone HR, 3000 fils  
grammage 204 g/m<sup>2</sup>, taffetas,  
Résine ET443 à 43 %  
prix<sub>2010</sub> : 53,6 €/m<sup>2</sup>

ARTICLE		threads x cm		fibre		thickness
		warp	weft	warp	weft	
		(UNI EN 1049-2)		(tex)		(mm) ± 15%
						(UNI EN ISO 5084)
CC	120	9,0	9,0	HS 1K	HS 1K	0,14
CC	202	5,1	5,1	HS 3K	HS 3K	0,25



- Composite :  
**Structil**

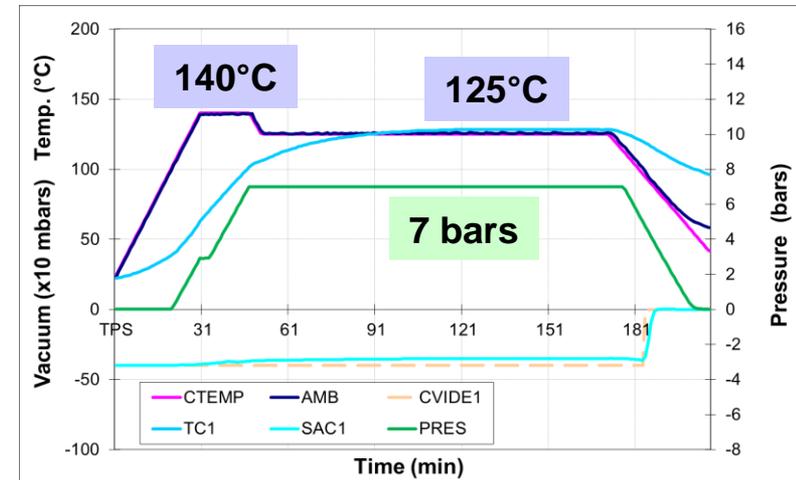
# Etape ② : couche d'alvéoles (3/4)



1- préparation du moule (**Alex 22**)    2- drapage des noyaux et construction de la pièce



3- finition (tissu d'arrachage)    4- cuisson en autoclave

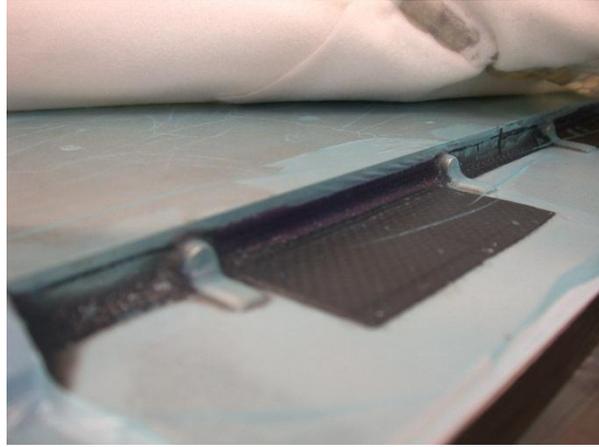


# Etape ② : couche d'alvéoles (4/4)

5- après cuisson



6- démoulage



2

- Découpe alvéoles :  
**DedienneComposites**

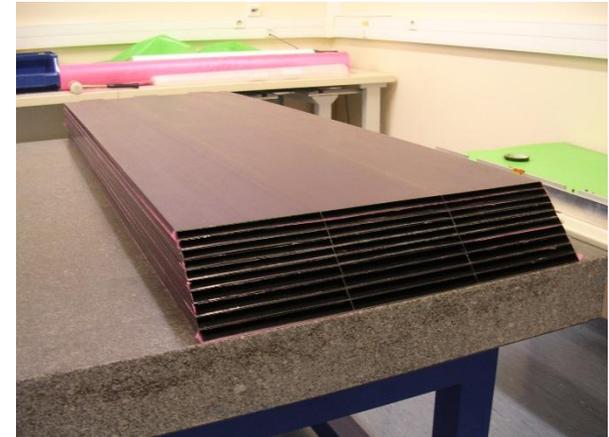
7- extraction des noyaux



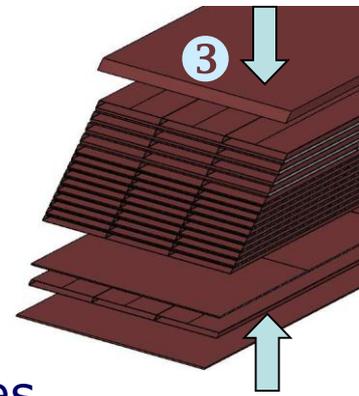
8- Mise à longueur



9- couches stockées

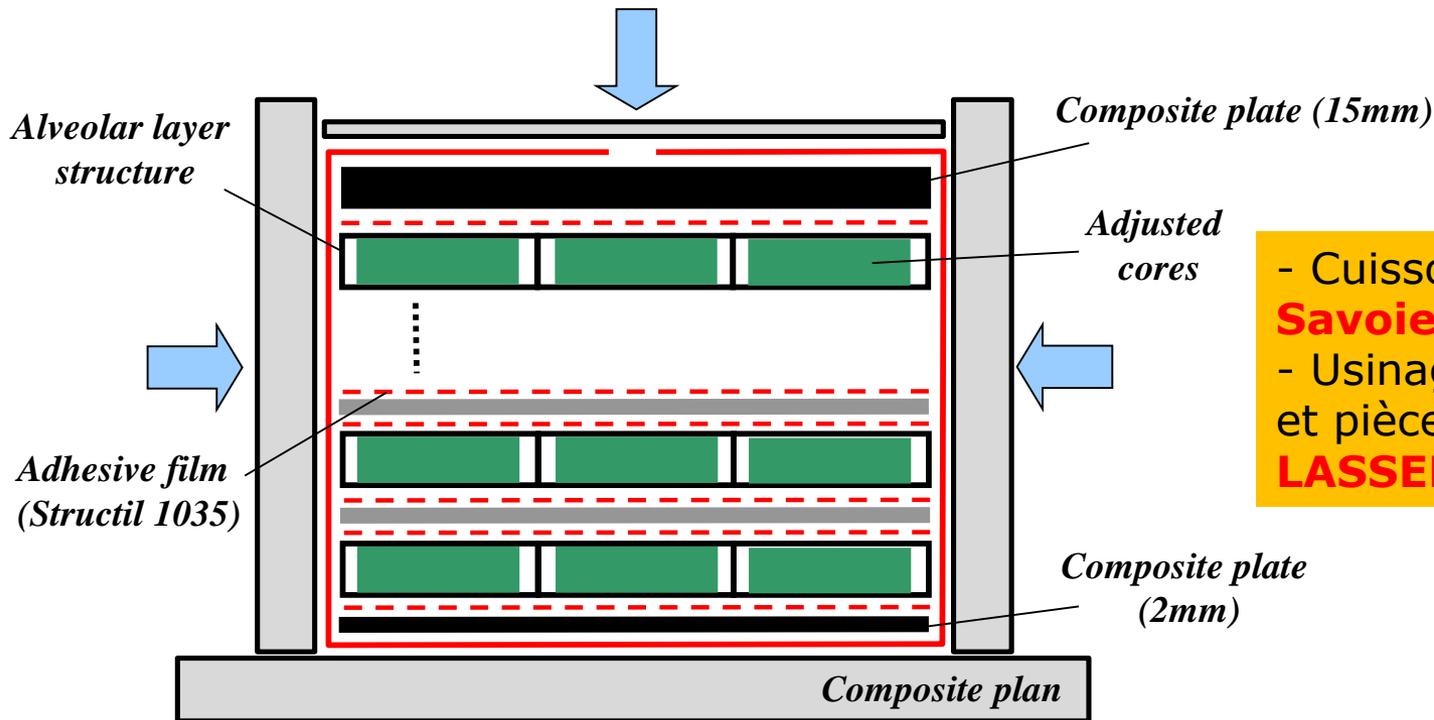


# Etape ③ : Assemblage (1/7)



## • Principe du moule :

- Moule fermé et nécessité de **noyaux ajustés** pour transmettre l'effort de pression et éviter la rupture des alvéoles
- Utilisation d'un **film adhésif structurel (ST 1035, 200g/m<sup>2</sup>)** pour assembler les différents couches déjà polymérisées et les plaques de W

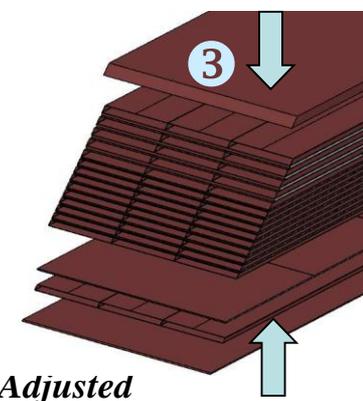


- Cuisson marbre :  
**Savoie Composites**  
 - Usinage des noyaux Alu et pièces du moule :  
**LASSERRE**

# Etape ③ : Assemblage (2/7)

## • conception du moule :

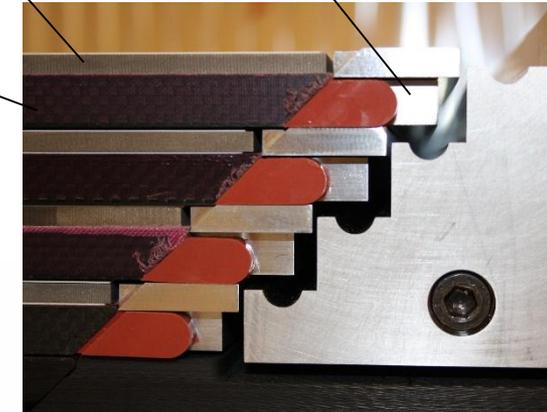
- 45 **noyaux ajustés 0/-0,03** (aluminium)
- 180 **joints d'étanchéité** (silicone)
- 1 **marbre** en carbone/Epoxy  
(dilatation longitudinale proche de la pièce)
- Contrôle de la position de chaque couche
- Masse totale : ~500 Kg



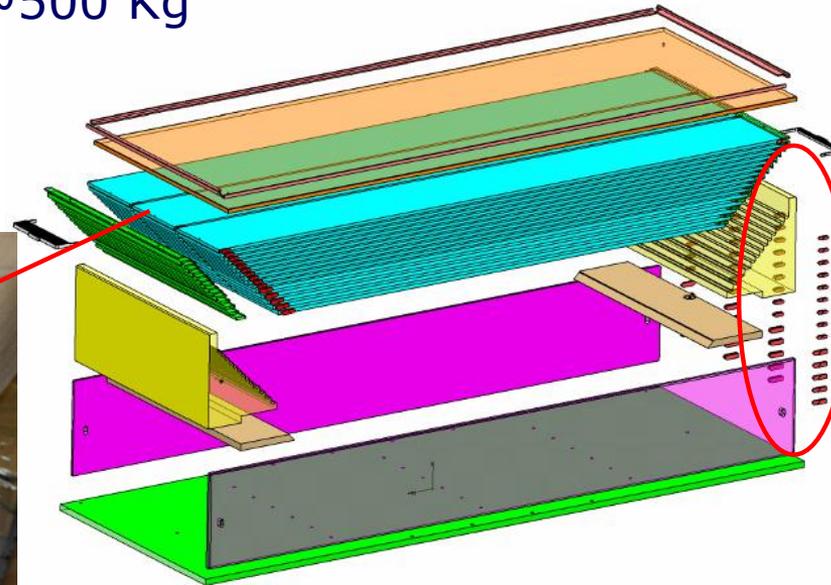
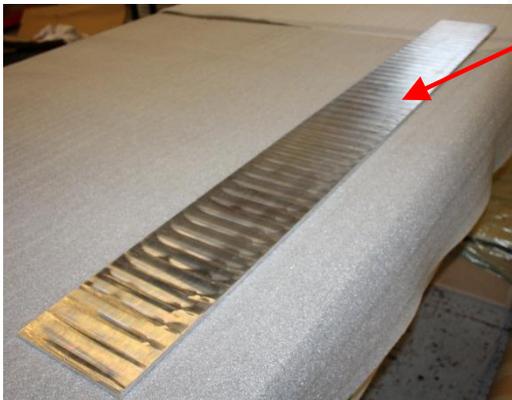
W plate

Adjusted cores

Alveolar layer structure

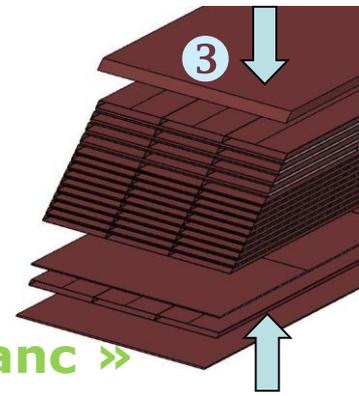


Noyaux de réassemblage



Joints d'étanchéité  
sur mesure

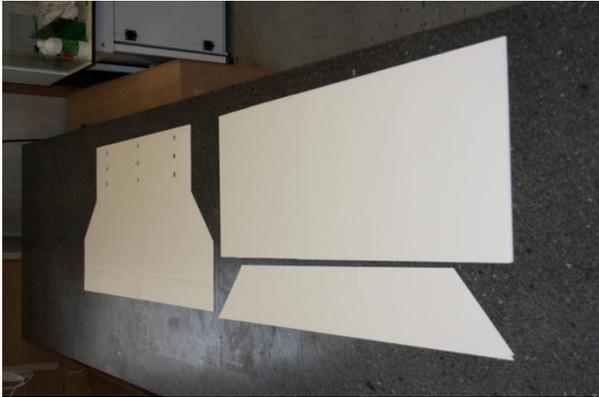
# Etape ③ : Assemblage (3/7)



## • Tests thermiques :

Nécessité d'étudier **l'inertie thermique** du moule pour adapter le cycle de cuisson (homogénéité) : **montage « à blanc »** de l'ensemble des pièces puis réalisation d'un cycle de cuisson

1- découpe des faux plis



2- mise en place thermocouples



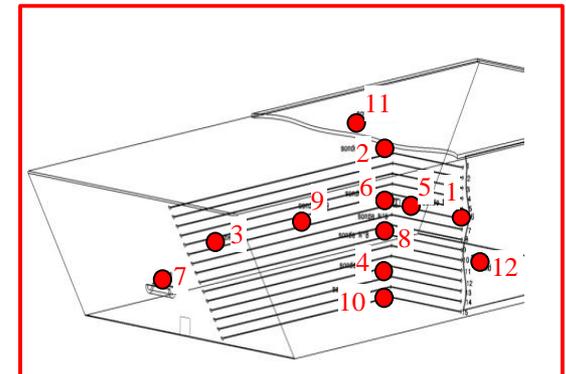
3- montage d'une couche



4- plaque de W

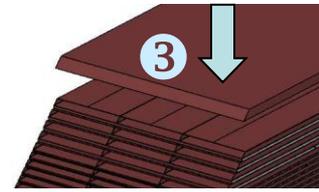


5- assemblage en cours



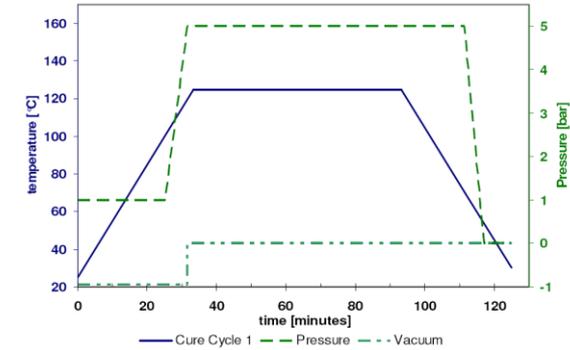
*Disposition des thermocouples*

# Etape ③ : Assemblage (4/7)

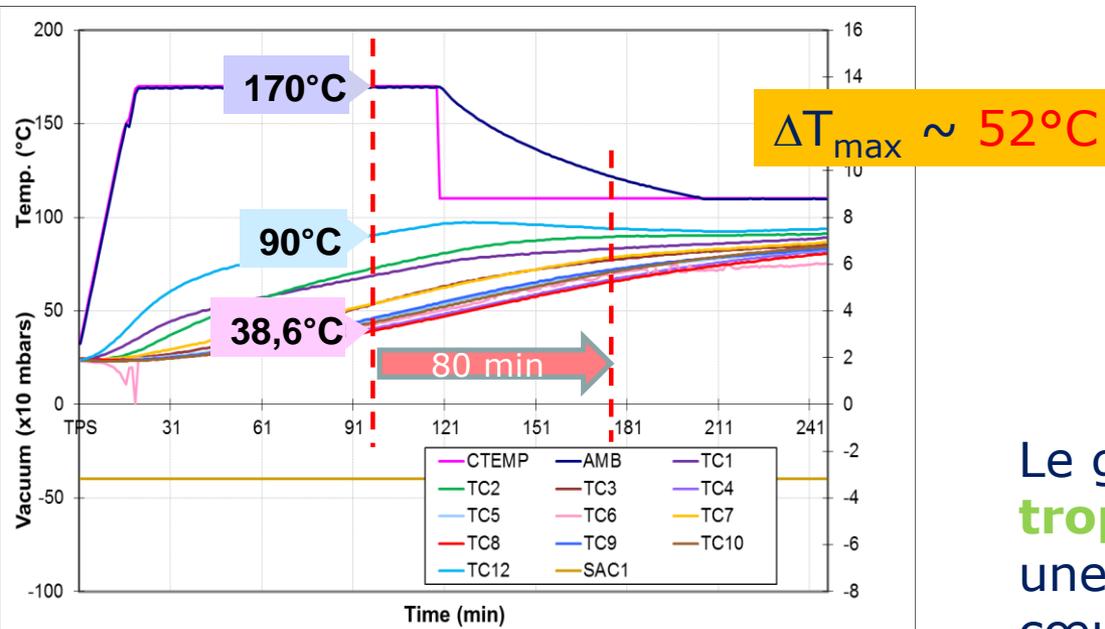
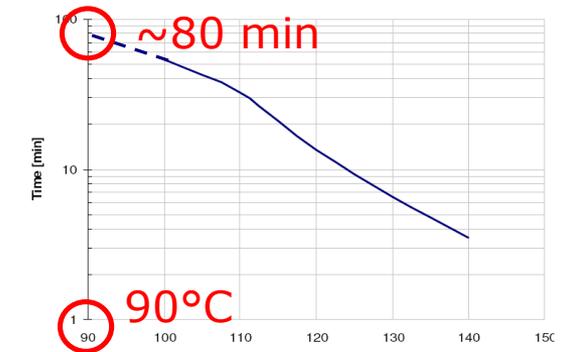


## • Tests thermiques :

**Premier cycle** afin d'analyser les gradients de température entre l'intérieur et l'extérieur du moule (montée rapide jusqu'au palier à 170°C afin de reproduire le cycle constructeur au niveau de la pièce)



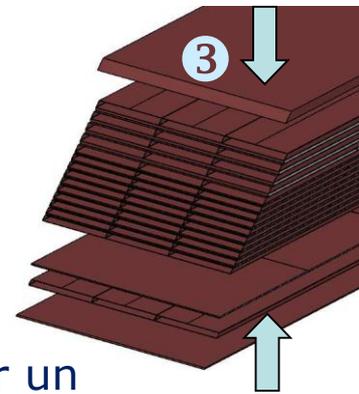
GEL TIME *ET443 (cycle & T\*gel)*



*Suivi de cuisson*

Le gradient  $\Delta T$  atteint des valeurs **trop importantes** pour garantir une polymérisation correcte à cœur avec un cycle de cuisson dit 'standard'

# Etape ③ : Assemblage (5/7)



## • Définition du cycle de cuisson :

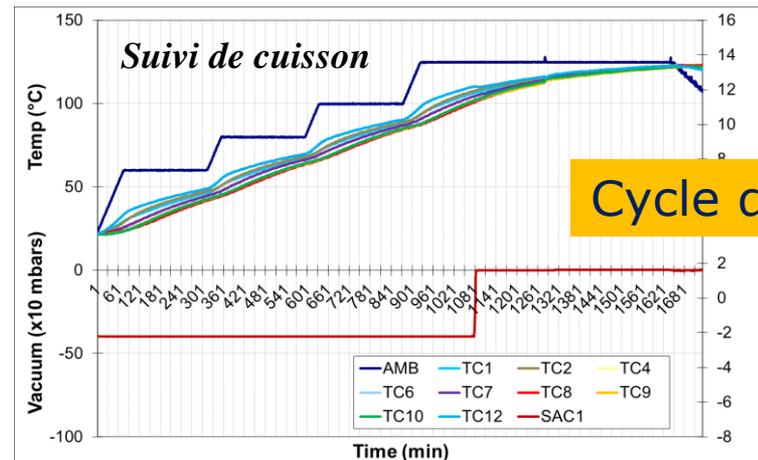
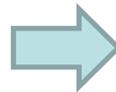
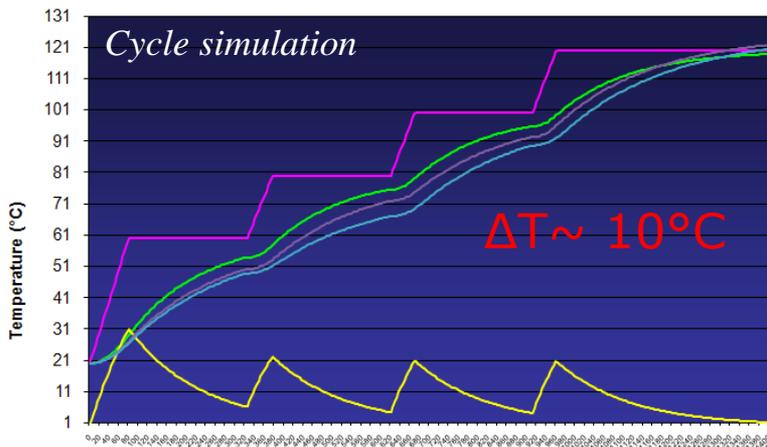
**Simulation** du cycle de cuisson, en résolvant l'équation différentielle du 1er ordre qui relie la quantité de chaleur absorbée par un volume par unité de temps à l'échange convectif sur les faces :

$$M \cdot C_p \frac{\partial T}{\partial t} = h \cdot S(T - T_a)$$

Avec  $M = \rho V$  : masse,  $C_p$  : capacité calorifique,  
 $h$  : coefficient d'échange par convection,  
 $S$  : surface d'échange,  $T_a$  :  $T^\circ$  ambiante

La température  $T$  évolue donc exponentiellement vers l'équilibre en un temps qui est défini expérimentalement (**constante de temps**)

Le cycle est par la suite défini par une succession de paliers qui permettent de garder un  $\Delta T$  inférieur à  $10^\circ\text{C}$ , tout en prenant en compte le Tgel

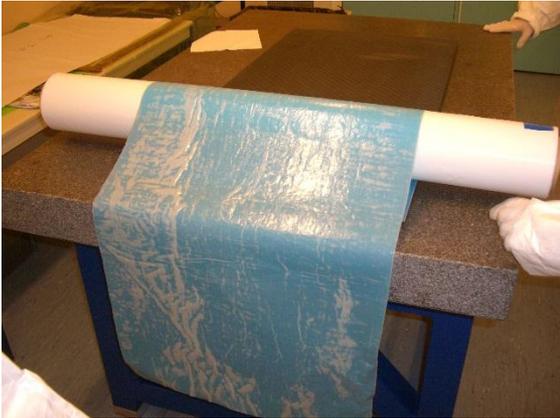


# Etape ③ : Assemblage (6/7)



## • Principales étapes :

1- dépose couche structil



2- couche de recouvrement



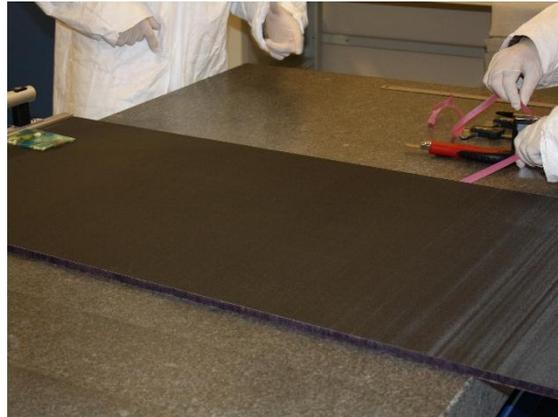
3- positionnement sur le marbre



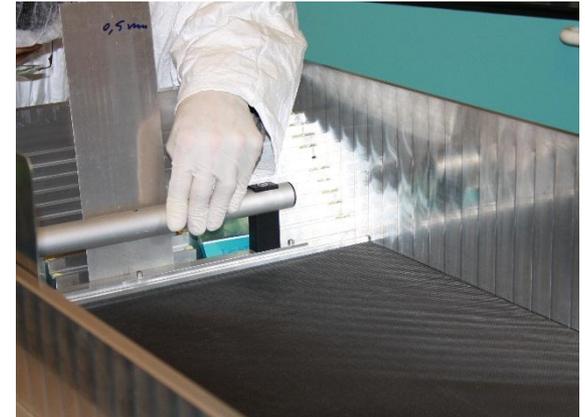
4- réglage butées



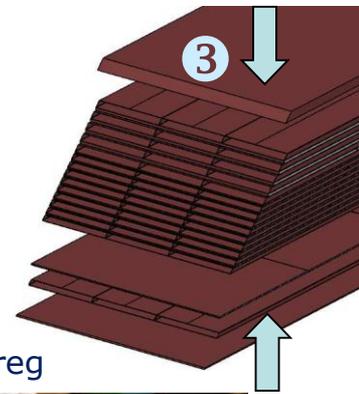
5- préparation couche d'alvéoles



6- mise en place couche



# Etape ③ : Assemblage (7/7)



## • Principales étapes :

7- structil + préreg



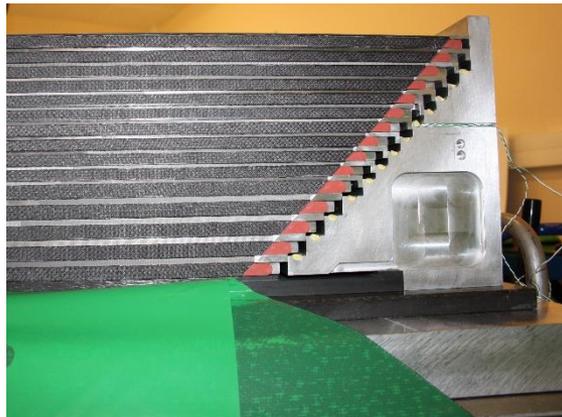
8- plaques de W



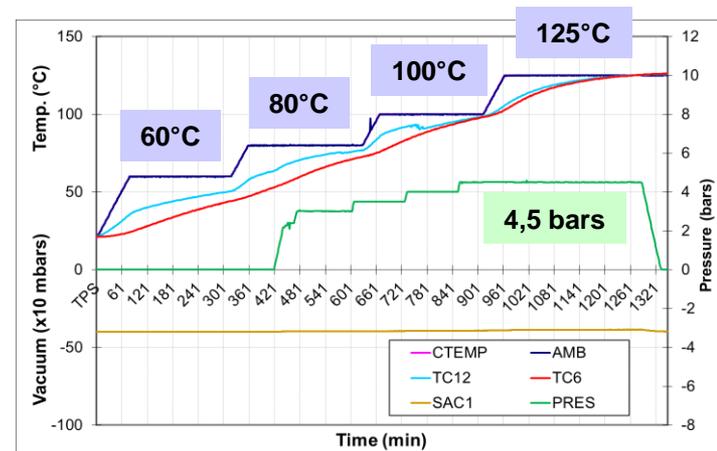
9- structil + préreg



10- assemblage réalisé

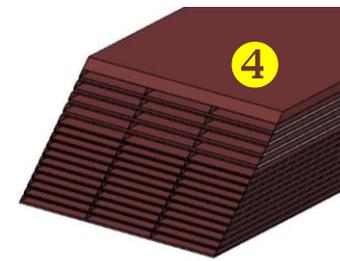


11- cuisson autoclave



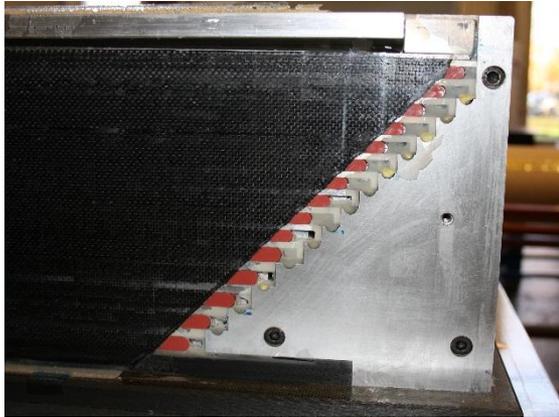
*Suivi de cuisson*

# Etape ④ : démoulage



## • Principales étapes :

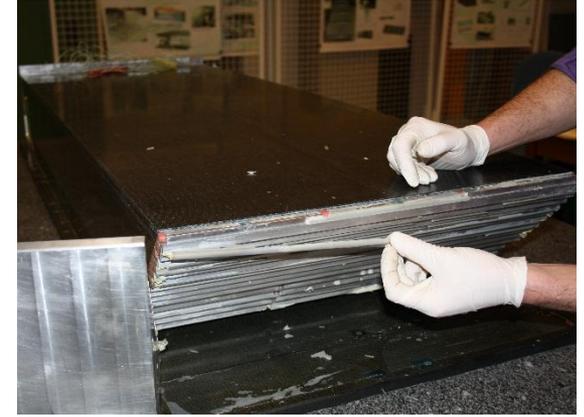
1- barreaux presseurs



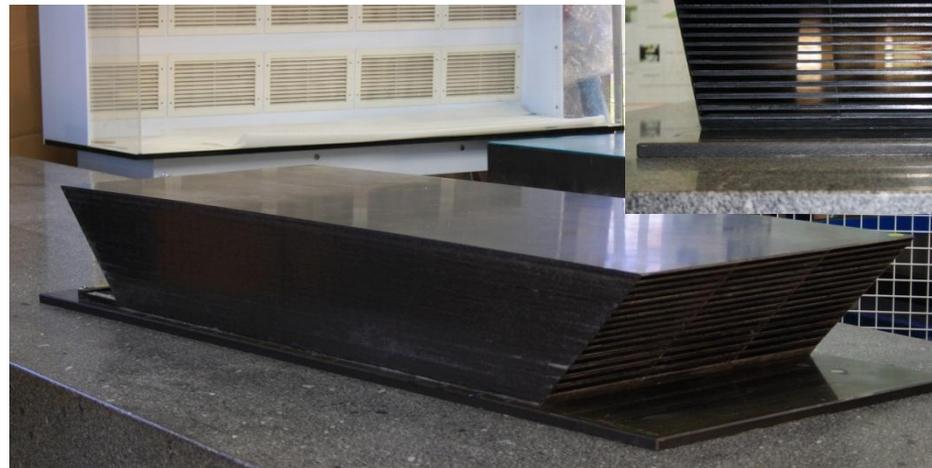
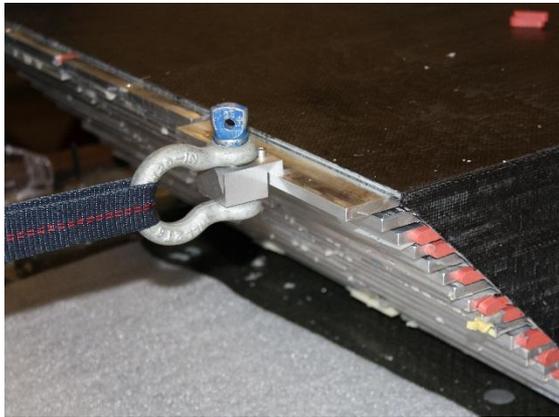
2- butée longitudinale



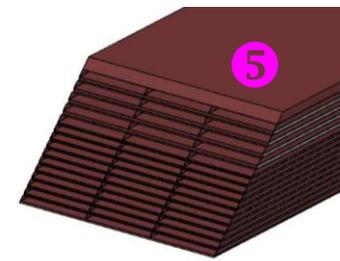
3- Nettoyage



4- extraction des noyaux



# Etape ⑤ : métrologie



- Utilisation d'un bras FARO pour réaliser la métrologie complète de la structure :

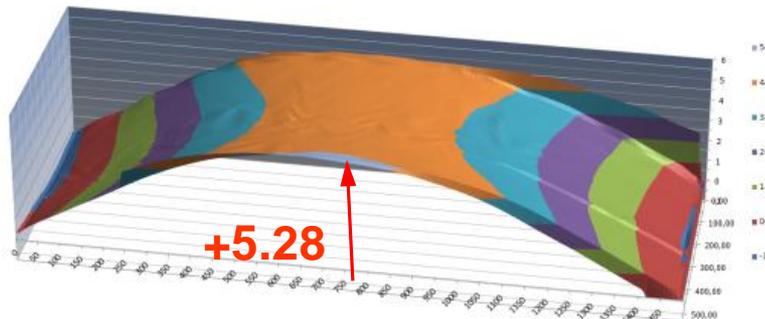


- Global length:  
**1491 mm** vs **1491.15 mm +/- 0.15**

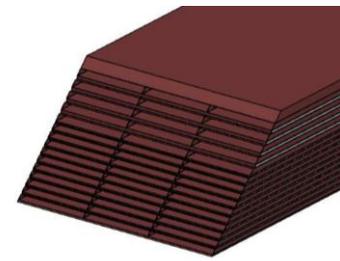
- Global width:  
**552.3 mm** vs **552.65 mm +/- 0.05**

- Global tickness:  
**205.3 mm** vs **205 mm** **0/+5.28 !!!**

*Expected (structure dim.) vs Measured*



Ce résultat semble être lié à un **manque d'évacuation** du surplus de résine de chaque couche, au centre de la structure (*à confirmer*)



- **Règles suite aux problématiques de fabrication :**

- **Tissus pré imprégné :**

Le choix du type de tissu (grammage, 1K, 3K ou 12K, taffetas ou sergé ...) se fait en fonction de l'épaisseur du stratifié ou encore des formes à obtenir ;

- **Poids** et **taille** de la pièce et du moule (1,2 tonnes) :

Nécessité de prendre en comptes les phénomènes d'inertie thermique pour garantir une polymérisation uniforme du composite, même à cœur ;

Possibilité d'incorporer des éléments chauffants dans le moule ;

Le refroidissement doit être le plus lent possible pour éviter des contraintes fortes liées aux phénomènes de dilatation des matériaux ;

- **Rhéologie** de la résine :

Modification du cycle théorique de cuisson en tenant compte des variations de la viscosité en fonction de la température et des temps de gel ;

- **Surplus de résine :**

Il est fondamental d'anticiper les écoulements de surplus de résine afin d'éviter des blocages et prévoir des joints d'étanchéité ;

Prévoir aussi des zones de stockages/évacuations dans les moules fermés ;

- **Démoulage :**

Il est possible de jouer sur la dilatation différentielle (ex: carbone/aluminium) pour faciliter le démoulage

- **SAVOIE COMPOSITES**

818, route d'Aix Les Bains, 74540 SAINT FELIX

Tel : 04 50 60 96 38, Fax : 04 50 60 95 93, Email : [contact@savoie-composites.com](mailto:contact@savoie-composites.com)

- **RECTITEC**

20 rue Anatole France, 42240 UNIEUX

Tel : 04.77.56.68.30, Fax : 04.77.61.62.51, Email : [rectitec@wanadoo.fr](mailto:rectitec@wanadoo.fr)

- **MMD**

15, rue de la Paix - 38130 Echirolles

tel : 33 (0) 4 76 09 08 54, fax : 33 (0) 4 76 09 86 23, Email : [mmd@mmd.fr](mailto:mmd@mmd.fr)

- **LASSERRE**

ZAC de la Garenne- 4, av. Georges Saint Saveur, 18120 MEREAU

Tél. : 02 48 83 13 13, Fax : 02 48 83 13 19, Email : [lasserre.ramillon@wanadoo.fr](mailto:lasserre.ramillon@wanadoo.fr)

- **DEDIENNECOMPOSITES**

ZAC de la Marguerite, 27700 LES ANDELYS France

Tél : +33 (0) 232 218 210, Fax : +33 (0) 232 218 215, Email :

- **STRUCTIL - Denis PIDOU**

Tél : +331 69 90 89 93, GSM: +33 6 77 53 56 78, Email : [d.pidou@snpe.com](mailto:d.pidou@snpe.com)