

# **Annexe :**

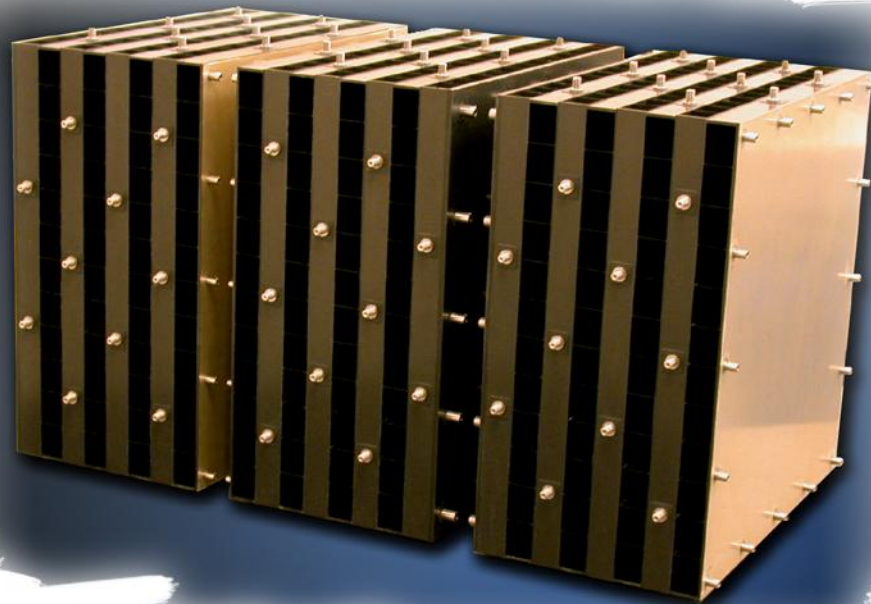
## **Réalisation de pièces structurelles en matériau composite**

**Quelques procédés de mise en forme des composites**

Ressource publiée sur EDUSCOL-STI :  
<http://eduscol.education.fr/sti/si-ens-cachan/>



# Réalisation de pièces structurelles En matériau composite





# Objet

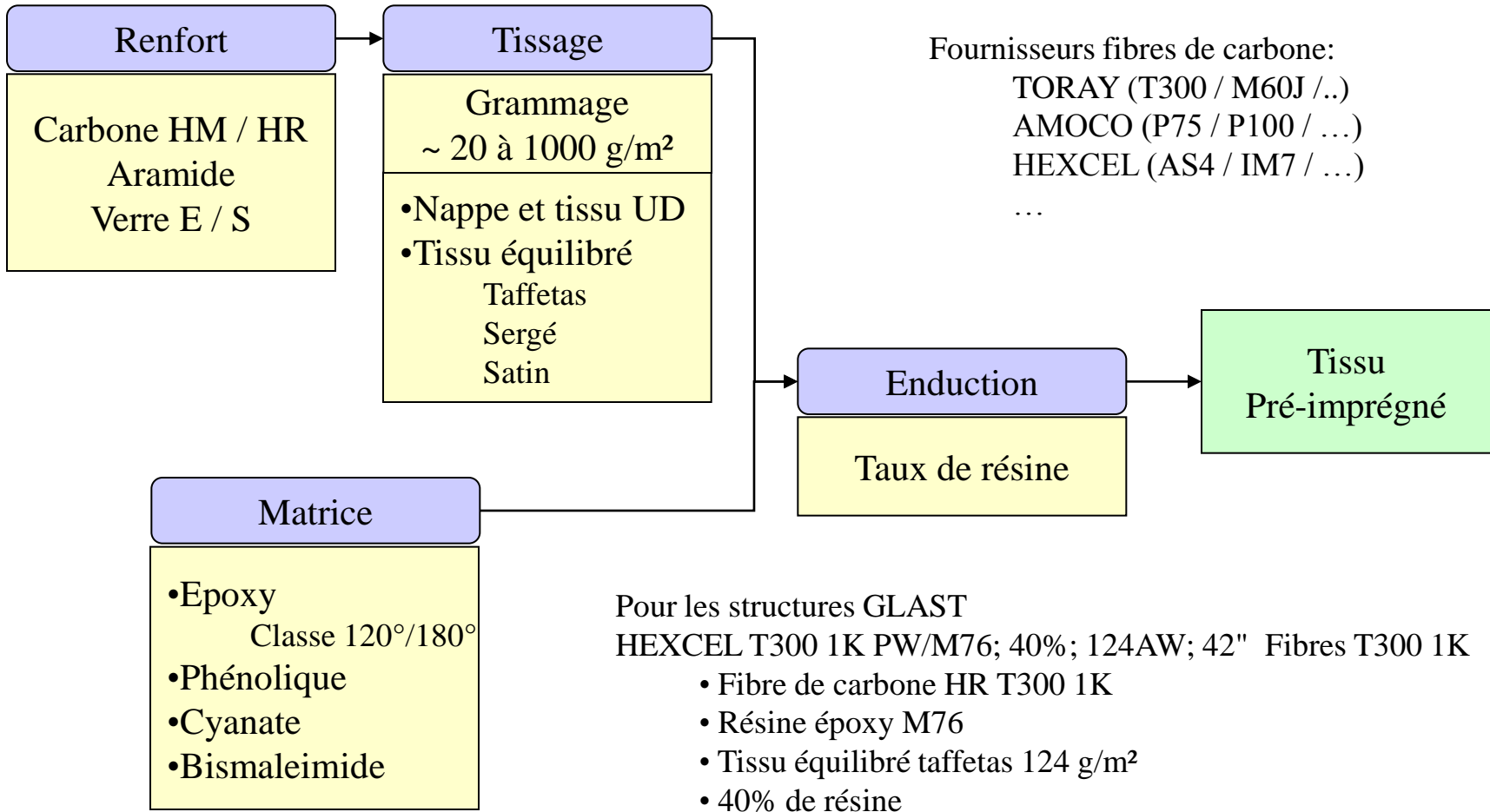
---

- **Présenter les étapes pour la réalisation en interne de pièces structurelles en matériau composite**
  - **Présentation axée sur les pièces réalisées à partir de tissu pré-imprégné**
  - **Illustrations et exemples tirés du travail réalisé sur les structures du calorimètre de GLAST, instrument embarqué sur satellite**
- **Thèmes abordés**
  - **Critères de choix – Spécifications**
  - **Approvisionnement et stockage du pré-imprégné**
  - **Outillage de réalisation**
  - **Découpes du pré-imprégné et drapage**
  - **Polymérisation**



# Choix des pré-imprégnés

- Vaste gamme de produits selon type de fibres, résine ou tissage





# Choix des pré-imprégnés

---

- **Difficile de choisir le produit le mieux adapté aux besoins comme tenu de la large gamme de produits disponibles**
  - Propriétés mécaniques, thermiques des fibres...
  - Epaisseur de fibre et type de tissages disponibles...
  - Température de polymérisation de la résine, compatibilité avec les fibres choisies ou le processus de fabrication, viscosité, flot, dégazage...
  - Pégosité, drapabilité, durée de vie à l'ambient du pré-imprégné
  - Prix et facilité d'approvisionnement
- **Quelques principes de base**
  - Les fibres de carbone sont conductrices électriques et peuvent être bonnes conductrices thermiques contrairement au verre ou Kevlar
  - Si la résistance mécanique est le facteur prédominant ( $\sigma/\rho$ ): choix de fibres de carbone HR (T300 / IM7/...)
  - Si la rigidité est privilégiée: fibres de carbone haut module (P100 / M60J/...)
  - Si on cherche une conductivité thermique élevée: fibres HM (P100S / K1100)
  - Pour des toiles minces ou bon aspect de surface: tissu faible grammage (fibres 500 ou 1000 filaments)
  - Le type de fibre ou tissu doit être adapté à la géométrie des pièces: si courbures importantes, éviter les fibres HM et préférer un tissage satin plutôt que taffetas
  - Un drapage avec plis UD conduit à des meilleures performances mécaniques mais 2 fois plus de plis qu'avec un tissu équilibré



# Approvisionnement - stockage

---

- Le produit livré sous forme de rouleaux, le pré-imprégné est protégé par un film polyéthylène ou un papier siliconé
- Rouleaux sous emballage hermétique pour éviter toute reprise d'humidité (film métallisé de préférence)
- Le pré-imprégné est un produit dont la durée de vie est limitée
  - Stockage au congélateur ou chambre froide à  $-18^{\circ}\text{C}$ : durée de vie typiquement de 12 mois (éventuellement 6 ou 18 mois)
  - A température ambiante, durée de vie très variable en fonction du type de résine: quelques jours à 2 mois
  - Toujours protéger le produit sous emballage hermétique et bien s'assurer de sa totale décongélation avant ouverture pour éviter les reprises d'humidité
- Assurer la traçabilité du produit depuis la fabrication jusqu'à son utilisation:
  - S'assurer que le transport et la livraison se font dans de bonnes conditions
    - Prévoir un enregistreur de température
    - Savoir quand le produit quitte les locaux du fournisseur et quand il arrive
  - Prévoir des fiches de suivi pour chacun des rouleaux de pré-imprégné
    - Spécifier les références du produit et date de fabrication
    - Reporter chaque sortie et rentrée du produit du congélateur, recalculer la durée de vie restante



# Approvisionnement

---

- **Temps d'approvisionnement généralement longs: pas de stocks**  
**Campagne d'enduction spécifique à intégrer dans le planning de fabrication du fournisseur (4 à 6 semaines)**
- **Difficile de se procurer de faibles quantités de produits (50m<sup>2</sup> souvent 100m<sup>2</sup> minimum): problème en phase de développement pour la réalisation de pièces prototypes**
  - **Partage de connaissances et d'expériences entre les laboratoires de l'In2p3**
  - **Base de données matériaux**



# Mise en oeuvre

---

- **Phase de conception de la pièce: étude, dimensionnement, essais...**
  - Définition de la géométrie de la pièce: dimensions, épaisseurs de matériau
  - Choix du matériau
  - Nombre de plis de tissu, formats et orientations des découpes
- **Conception et réalisation de l'outillage de fabrication**
- **Fabrication**
  - Réalisation des découpes à partir des rouleaux de tissu pré-imprégné
  - Réalisation des empilages, drapage sur l'outillage de fabrication
  - Polymérisation
  - Démoulage
  - Finition: ébavurage, nettoyage
  - Usinage si nécessaire
- **Inspection**
  - Métrologie
  - Contrôle non destructif





# Outillage de fabrication

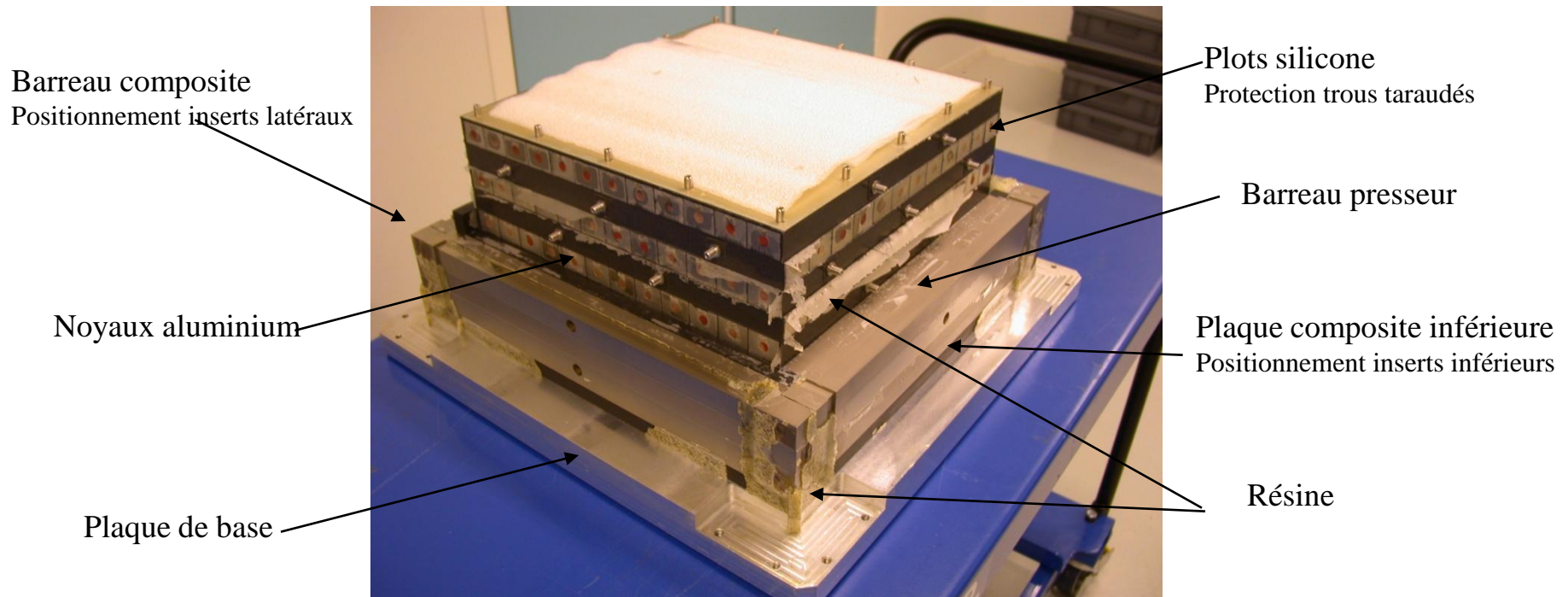
---

- **Complexité et taille très variable en fonction du type de pièce à réaliser, néanmoins quelques points généraux à prendre en considération**
- **Matériaux: acier, aluminium, composite en fonction du nombre de pièces à réaliser**
- **Soigner l'état de surface des pièces: favorise le démoulage mais aussi le nettoyage des pièces (résine)**
- **Prendre en compte dans l'étude la différence entre les coefficients de dilation du moule et celui de la pièce**
  - **La géométrie de la pièce est définie à la température de polymérisation de la résine**
  - **Attention aux contraintes mécaniques dans les pièces du dues à différence de dilation avec l'outillage**
  - **Une différence importante peut néanmoins être utile: noyaux**
- **Tenir compte de l'inertie thermique du moule (fonction du matériau) pour définir le cycle de polymérisation de la résine**
  - **Parfois plusieurs heures nécessaire pour mettre le moule en température, s'assurer que le plateau de polymérisation est respecté**
  - **S'assurer que la température du moule reste uniforme lors de la montée en température**
- **Prendre soin des pièces du moule: les défauts (chocs, rayures...) se retrouvent sur chacune des pièces**
- **Prévoir les étanchéités nécessaires pour éviter que les perçages, taraudages ou autres se retrouvent remplis de résine**



# Outillage structures GLAST

- **Moule aluminium, pièces en composite carbone pour le positionnement des inserts de la structure**
- **Traitement de surface: Nickel pour protéger les pièces aluminium**



*Structure GLAST en cours de démoulage*



# Découpes et drapage

- **Environnement de travail:**
  - Local et plan de travail impérativement propres: tout se colle sur le pré-imprégné
  - Température et taux d'humidité de préférence régulés: influence sur la pégeosité du pré-imprégné (trop collant ou pas assez)
    - Température 20°C, HR < 60%
  - Salle propre classe 100000 pour application spatiale
- **Découpe manuelle du tissu pré-imprégné**
  - Découpe aisée
  - Bonne précision de découpe
  - Matériel simple
    - Plans de travail avec tapis de découpe uréthane ou tout simplement plaques de PVC, à remplacer régulièrement
    - Dévidoir pour rouleau
    - Cutter (changer régulièrement les lames), emporte pièce
    - Gabarits de découpe, règles et équerre



*Découpe pour structure GLAST  
Salle propre du LLR*



# Découpes et drapage

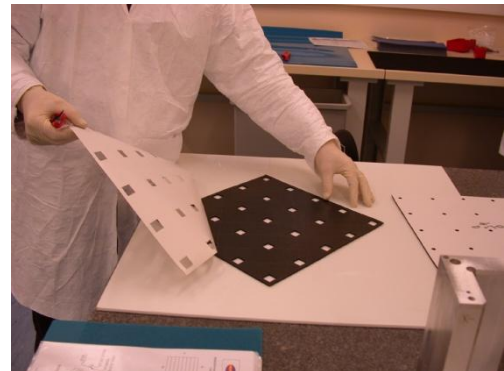
---

- **Découpes sur machine à commande numérique**
  - Intéressant si nombre de découpes important
  - Travail rapide, inclus marquage des plis
  - Pas de difficulté pour l'orientation des plis
  - Optimisation de la surface de tissu: chutes réduites
  - Qualité et précision des découpes peuvent être médiocre en fonction type de pré-imprégné (problème de déformation du tissu)
- **Marquage des découpes indispensable**
  - Désignation ou format des découpes
  - Orientation de la découpe par rapport à la chaîne ou trame du tissu
  - Numéro pour séquence d'empilage si nécessaire
- **Pour les structures de GLAST**
  - Environ 600 plis par structure et une vingtaine de type de formats
  - Toute la partie découpe sous-traitée, réalisée sur machine de découpe par la société Bretagne Composite
    - Réception au LLR de kits prêts pour drapage
  - Précision des découpes parfois limite: formats légèrement plus grand et ajustement au drapage



# Drapage

- Mise en place des découpes de tissu pré-imprégné sur le moule
  - Opération plus ou moins délicate en fonction de la géométrie de la pièce à réaliser
  - Le plus difficile est souvent la définition de la géométrie des découpes pour réaliser la séquence d'empilage
- Indiquer les orientations des fibres sur le film de protection
- Préparer la séquence d'empilage en numérotant les plis
- Penser à respecter la symétrie miroir sur chaque empilage
- Compacter sous vide les empilages afin de chasser l'air emprisonné entre les plis
  - 15 min sous bâche à vide
  - Idéalement tous les 4 à 5 plis





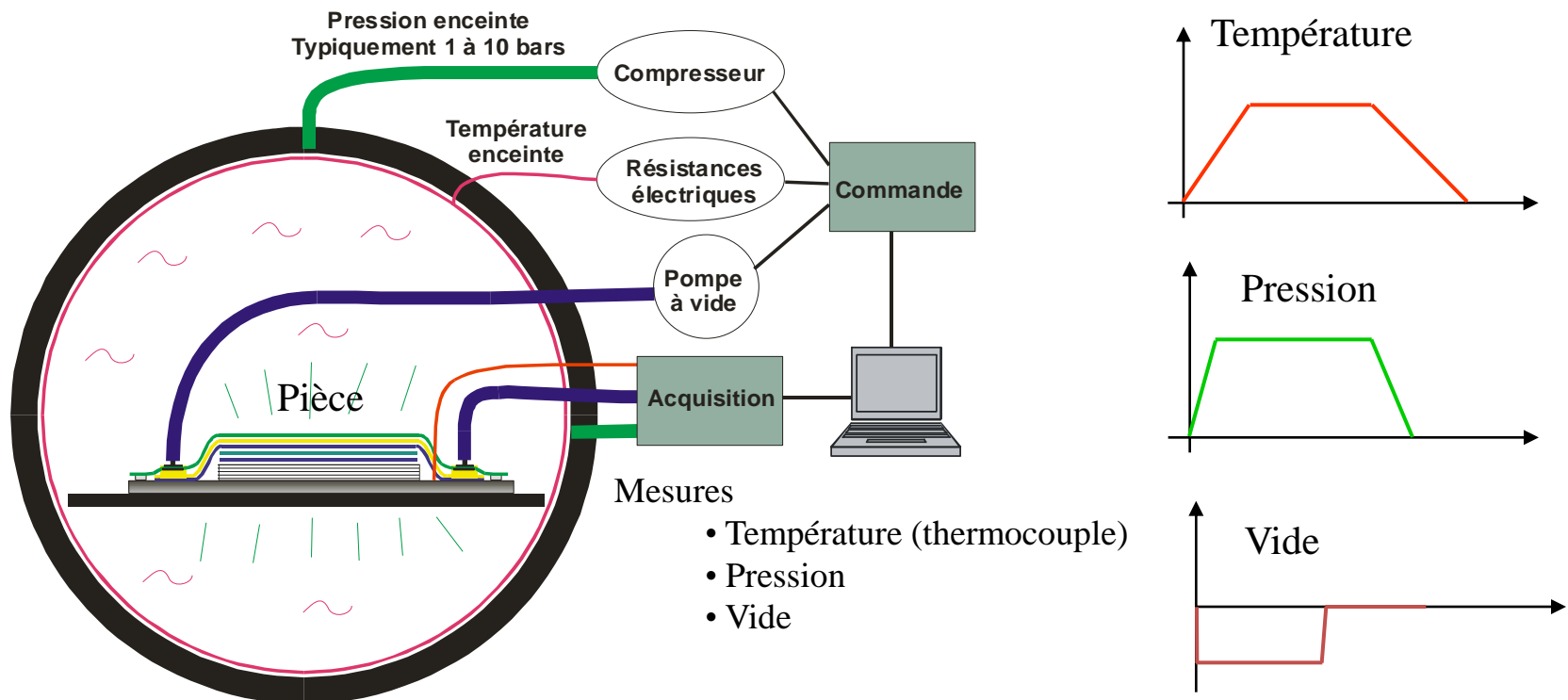
# Transformation des pré-imprégnés

---

- **Fonctions à assurer:**
  - Polymérisation de la résine par apport de chaleur
  - Compactage des plis de pré-imprégné afin d'éliminer les porosités entre couches, répartir la résine et faire fluer l'excès
  - Evacuation de l'air emprisonné entre les couches et des volatiles
- **Plusieurs procédés:**
  - Sac à vide et étuve (pression de compactage 1 bar)
  - Cuisson sous presse (presse à plateau chauffant ou presse+étuve)
  - Vessie gonflable ou gaine thermo rétractable
  - Autoclave: procédé privilégié pour pièces structurales
    - Enceinte programmable: cycles de température, pression et vide
      - Composite avec taux de fibre élevé et faible porosité

# Procédé autoclave

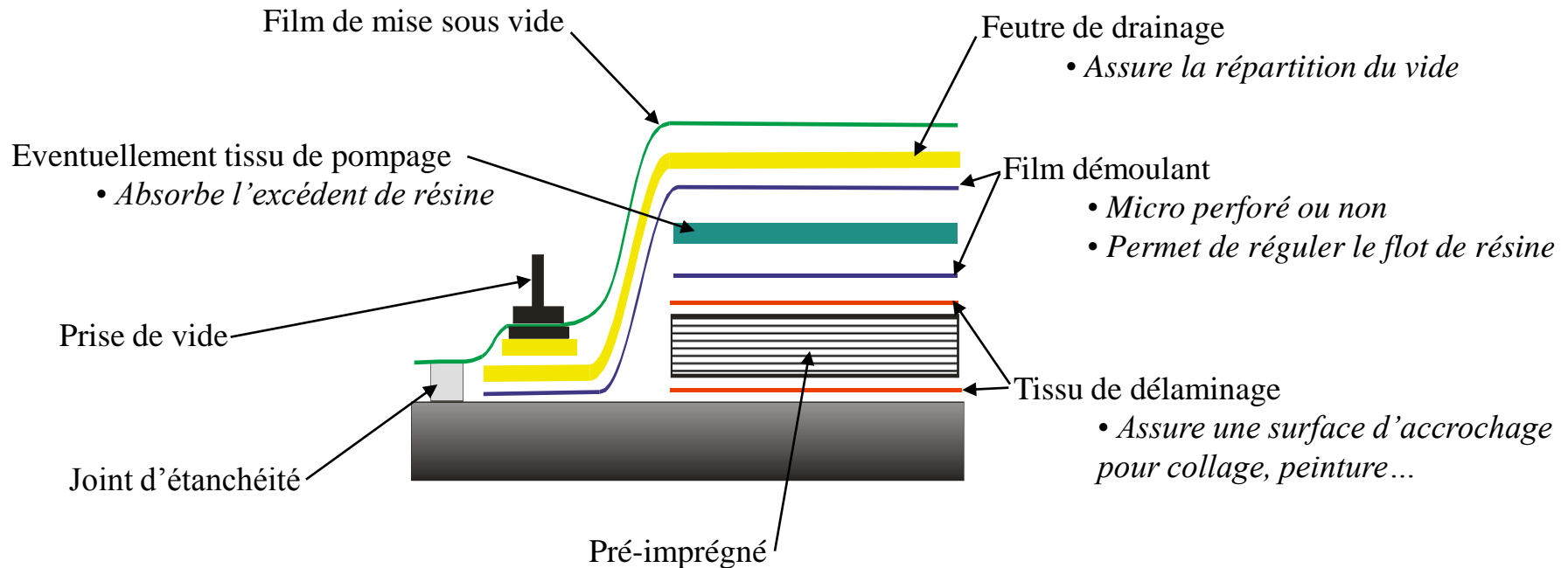
- Pièce sous sac à vide; pression de compactage dans l'enceinte
- Cycle de polymérisation asservie sur la température de la pièce (mesurée par des thermocouples fixés sur l'outillage)
- Pompage pour évacuer l'air emprisonné entre les couches et les volatiles





# Sac à vide

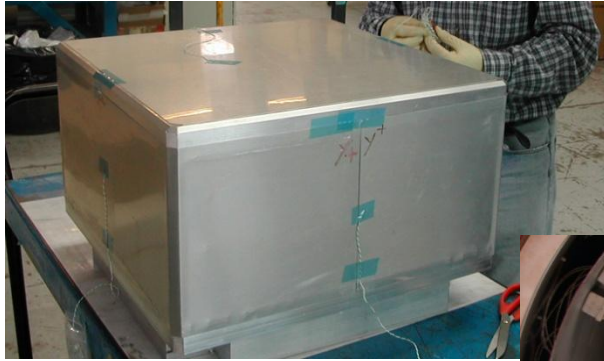
- La réalisation du sac à vide est opération essentielle pour l'obtention d'un composite de qualité
- Divers films et feutres techniques sont utilisés pour sa réalisation
- Certains sont optionnels en fonction du type de pré-imprégné utilisé
- Ils permettent de contrôler le flot de résine et le fini de surface de la pièce



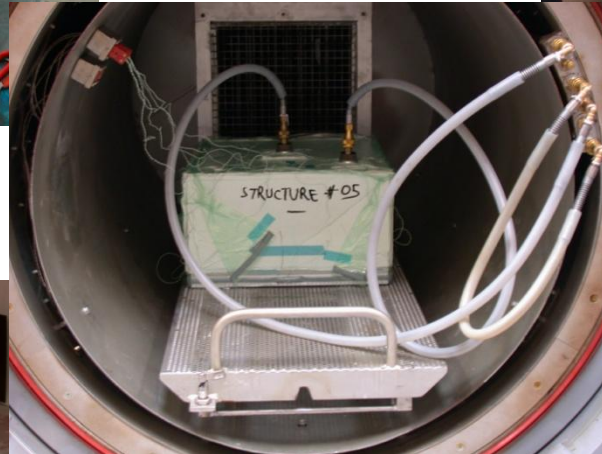




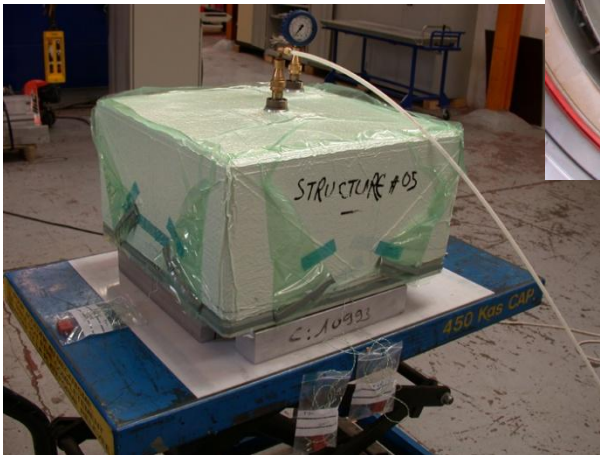
# Structures GLAST



*Mise en place des thermocouples*



*Mise en place du feutre de drainage*



*Pièce dans l'autoclave avec connexion des voies de vide et thermocouples*



*Mise sous vide*

*Transfert dans l'autoclave*



# Conclusion

---

- **Compte tenu des contraintes mécaniques auxquelles il faut faire face lors du développement des instruments: rigidité importante, faible traversée de matière...les matériaux composite présentent une alternative intéressante**
  - **La fabrication en interne de pièces structurelles demande un apprentissage certain mais ne présente pas de difficulté majeure**
  - **Des étapes de la réalisation peuvent, si nécessaire, être sous-traitées: découpe, polymérisation en autoclave.**
  - **Le choix des matériaux et l'approvisionnement pour des évaluations sont deux problèmes délicats. Des échanges entre labo pourraient aider à y faire face.**
  - **Un autoclave est un investissement lourd sachant que son taux d'occupation dans un labo restera faible. Un équipement de ce type existe au LLR. Il est possible de sous-traiter la polymérisation en autoclave dans l'industrie.**



# Documents utiles

---

- **MIL-HDBK-17-2E: Polymer Matrix Composites (disponible sur web)**
- **ESA PSS-03-207: Guidelines for Carbon and Other Advanced Fiber Prepreg Procurements**
- **ESA PSS-03-203: Polymer Composites**
  
- **Divers documents ou informations intéressants sur les sites web des fournisseurs (ex HEXCEL)**
- **NASA Work instructions / Preferred Reliability Practices: diverses notes succinctes mais utiles sur les composite (disponible sur web)**
  
- **Documentation structures GLAST disponible au LLR**
  - **Spécifications, procédures, fiches de suivie...**