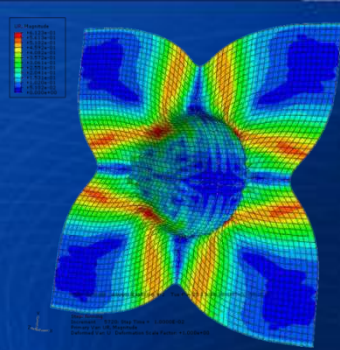


Source NLR – ONERA



Académie de l'Air et de l'Espace – Mercredi 20 mai 2015



retour sur innovation

Département Matériaux et Structures Composites



# LES MATÉRIAUX COMPOSITES

*Jean-François MAIRE – Directeur du Département DMSC*

Sommaire

Le Département Matériaux et Structures Composites de l'Onera

Introduction aux composites

Diversité des composites

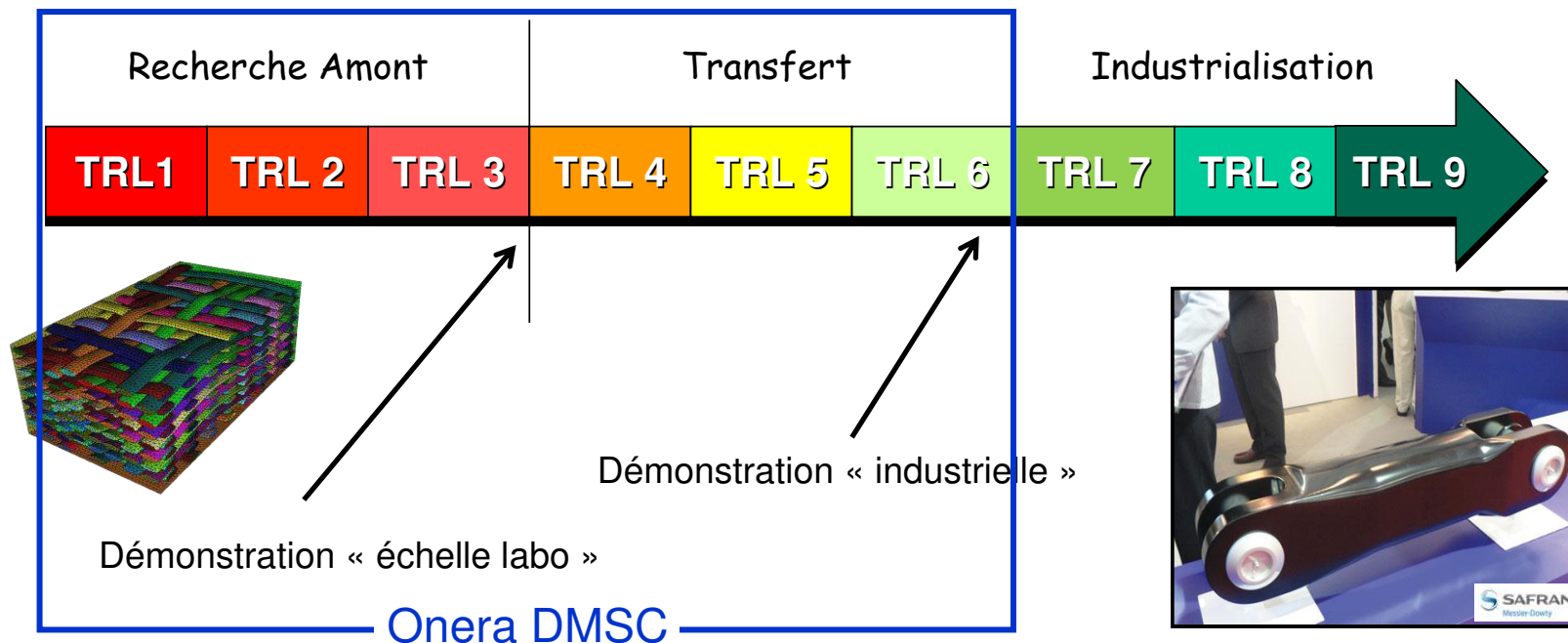
Tendances actuelles

Structuration de la filière « Composite » ?



## Les missions du département

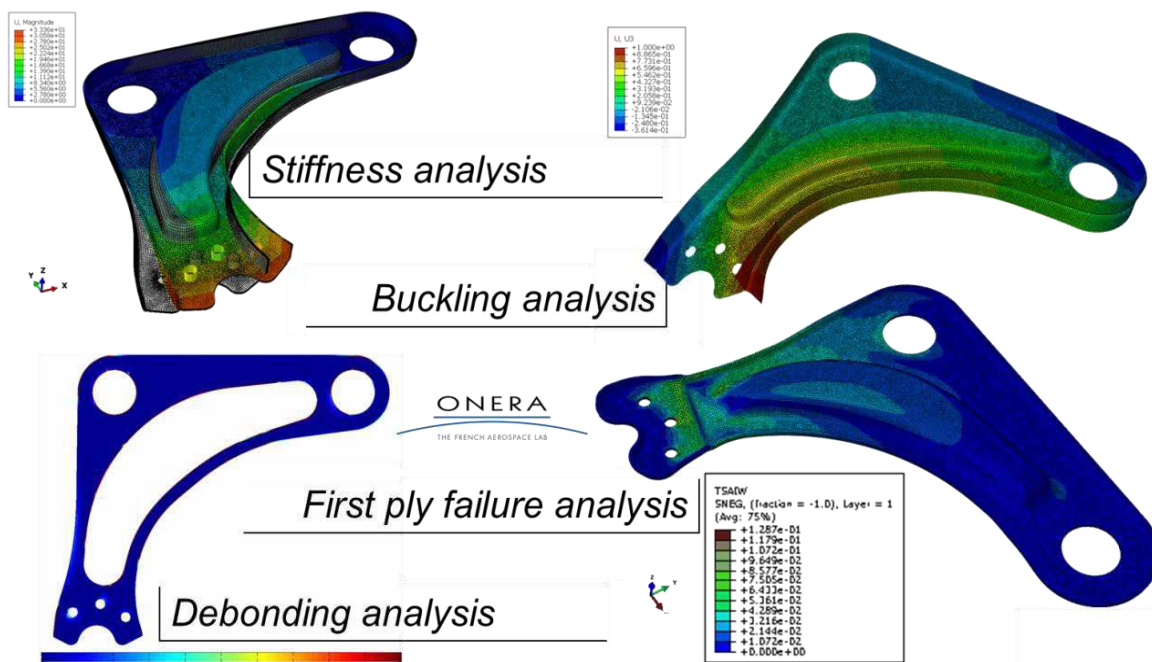
- Permettre l'émergence de solutions composites réellement innovantes et concurrentielles
- Accompagner nos partenaires industriels pour les passages aux TRL intermédiaires
- Le DMSC « intégrateur » de recherche





## « Une 1<sup>ère</sup> mondiale » : un triangle de suspension tout en composite

- Collaboration Onera-CETIM
- Composites hautes performances mais procédé bas coût / haute cadence
- Moins d'un an entre le début de l'étude et la réalisation du 1<sup>er</sup> proto.

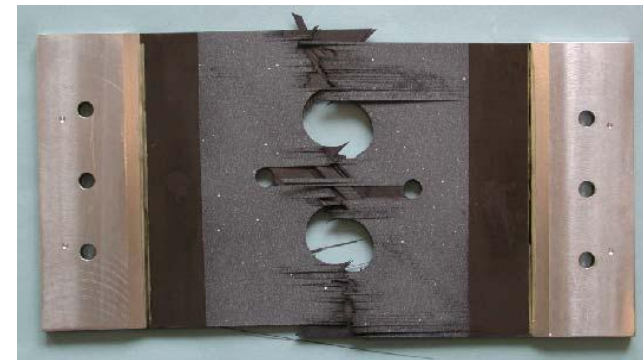
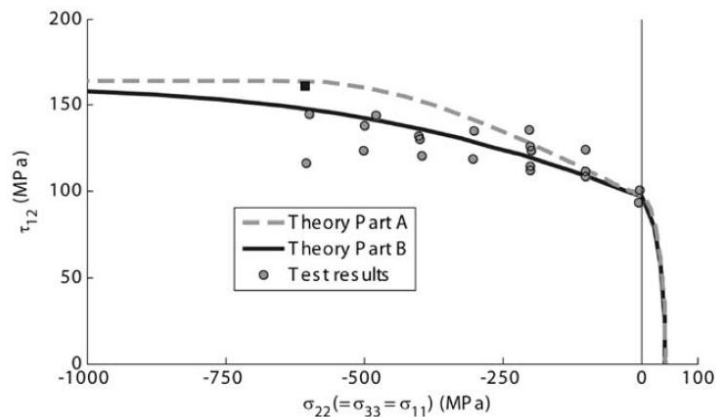




## L'Onera « champion du monde » de la prévision de la rupture de structures composites

L'Onera, à l'occasion du concours World Wide Failure Exercise II consacré à la prévision de la rupture de structures composites sous sollicitations 3D, a obtenu les meilleurs résultats, parmi les douze laboratoires internationaux invités.

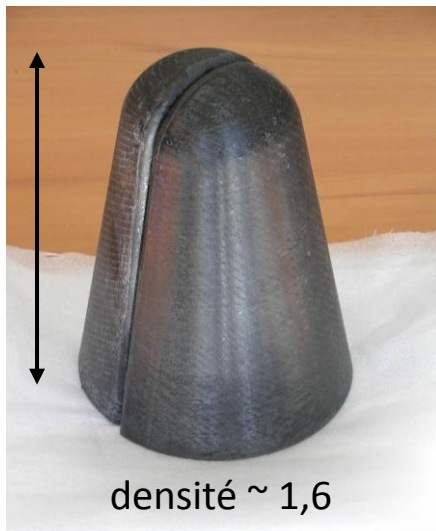
Les résultats de ce concours, publiés dans la revue *Journal of Composite Materials* en mars 2013, participent grandement à la notoriété du laboratoire qui en est le vainqueur, comme a pu le montrer l'édition précédente (WWFE I). Cette évaluation publique est très appréciée des industriels, qui en tiennent compte pour leurs choix en matière d'outils de simulation.



Rupture d'une plaque composite multi-perforée

## PRIX MCM ITP « Breakthrough Project »

- C/HVN : CMC bas coût pour structures hypersoniques
- Formulation de polymères précurseurs de céramique ( $\text{SiC}_x\text{O}_y\text{N}_z$ ) à partir de mélanges de silicones fonctionnalisés (HVN)
- Moyens d'élaboration (RTM + infusion en poche plastique) disponibles chez la plupart des fabricants de composites à matrice organique



*Coiffe largable (1100 ° C)*



**Ces travaux avaient déjà reçu le prix « Innovation Awards MBDA » en 2011**



# LES MATÉRIAUX COMPOSITES

Jean-François MAIRE – Directeur du Département DMSC

Sommaire

Le Département Matériaux et Structures Composites de l'Onera

**Introduction aux composites**

Diversité des composites

Tendances actuelles

Structuration de la filière « Composite » ?



# 40 ans de composites aéronautiques

**1970** : *Mésaventure de Rolls Royce*

(aubes FAN composite du RB211)



Tristar L1011

Une "innovation matériaux majeure" ne peut pas être introduite dans un programme sans faire les frais d'une démonstration préalable suffisamment complète et qui en maîtrise tous les aspects

**1974** : Disponibilité fibres carbone : Maîtrise des structures secondaires

- 
- Empennage de l'  $\alpha$ Jet
  - Caisson de dérive du Mirage 2000
  - Porte de soute du Transall



**1985** : Hélice du Transall

A compter de **1988** : Cabine hélicoptère composite (carbone, verre, kevlar, collage)

**Fin des années 80**

- Gain de masse  $\sim$  25 - 30%, plus dans certains cas
- Coût structure légèrement supérieur aux métalliques (mais potentiel de réduction de coût important)
- Pas d'abaissement de la tenue mécanique avec le temps (fatigue, oxydation >30 ans)
- Chocs accidentels non visibles, à prendre en compte dans le dimensionnement





# 40 ans de composites aéronautiques

**1990-2000** : Réduction de coût et extension de l'utilisation des composites aux fuselages, moteurs et équipements

*(Fibres de Carbone IM - Résines 2ème Génération)*

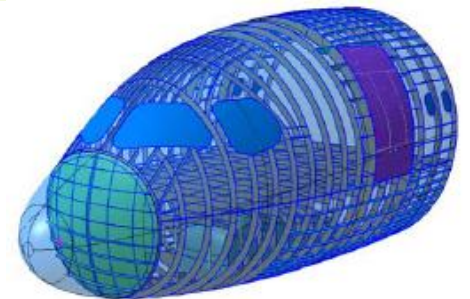
- 
- Poutre A340-600
  - Carter et canal flux froid M88 (PMR15 > 250°C)
  - A380 (Centre Wing Box, Wing Ribs, Floor beams,...)



Bilan très positif, les compagnies aériennes apprécient et demandent un "avion encore plus composite"

**2000-2010** : Avion « tout composite » (B787, A350)

**Objectifs** : Optimiser, généraliser, simplifier, réduire coûts & cycles de conception et de fabrication



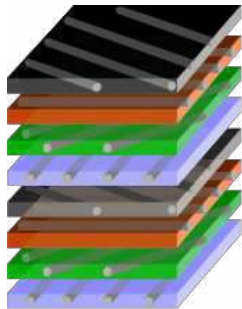
**40 ans de composites → 40 ans que les composites sont considérés comme des matériaux nouveaux**



# Pourquoi les matériaux composites?

Utilisation des matériaux composites principalement pour réduire la masse des structures due à leur excellent rapport: masse / rigidité / résistance

## Matériau au "juste" besoin



### Rigidité:

- Pourcentage de fibres
- Choix des constituants

### Anisotropie:

- Orientation des fibres

## Obtention de propriétés spécifiques

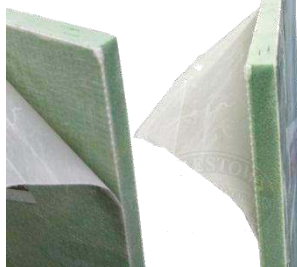
### Propriétés spécifiques:

- Matériau à coefficient de dilatation nul



## Matériau multifonctionnel

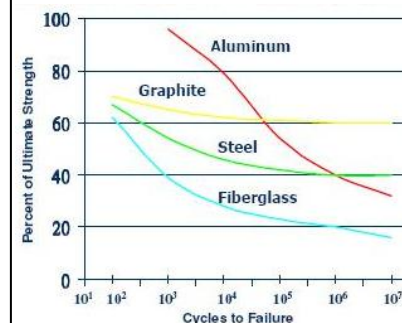
Matériaux sandwichs



### Fonctionnalités:

- Acoustique
- Conductivité
- Résistance au feu
- Instrumentation

## Faible sensibilité à la fatigue



### Fatigue:


Faible sensibilité à la fatigue pour les matériaux Carbone/Epoxy



## Avantages / limitations des matériaux composites

### Avantages



- Hautes rigidités spécifiques ( $E/\rho$ )  
*Choix de matériau IM/Epoxy*
- Hautes résistances spécifiques ( $\sigma/\rho$ )  
*Choix de matériau HS/Epoxy*
- Faible sensibilité à la fatigue  
*Moins sensible que matériaux métalliques*
- Dimensionnement au « juste » besoin  
*Optimisation empilement / géométrie*
- Faible sensibilité à la corrosion
- Formes complexes « one shot »  
*Réduction des coûts assemblages*


### Limitations



- Coût matériau important  
*Coût matériau + coût procédé*

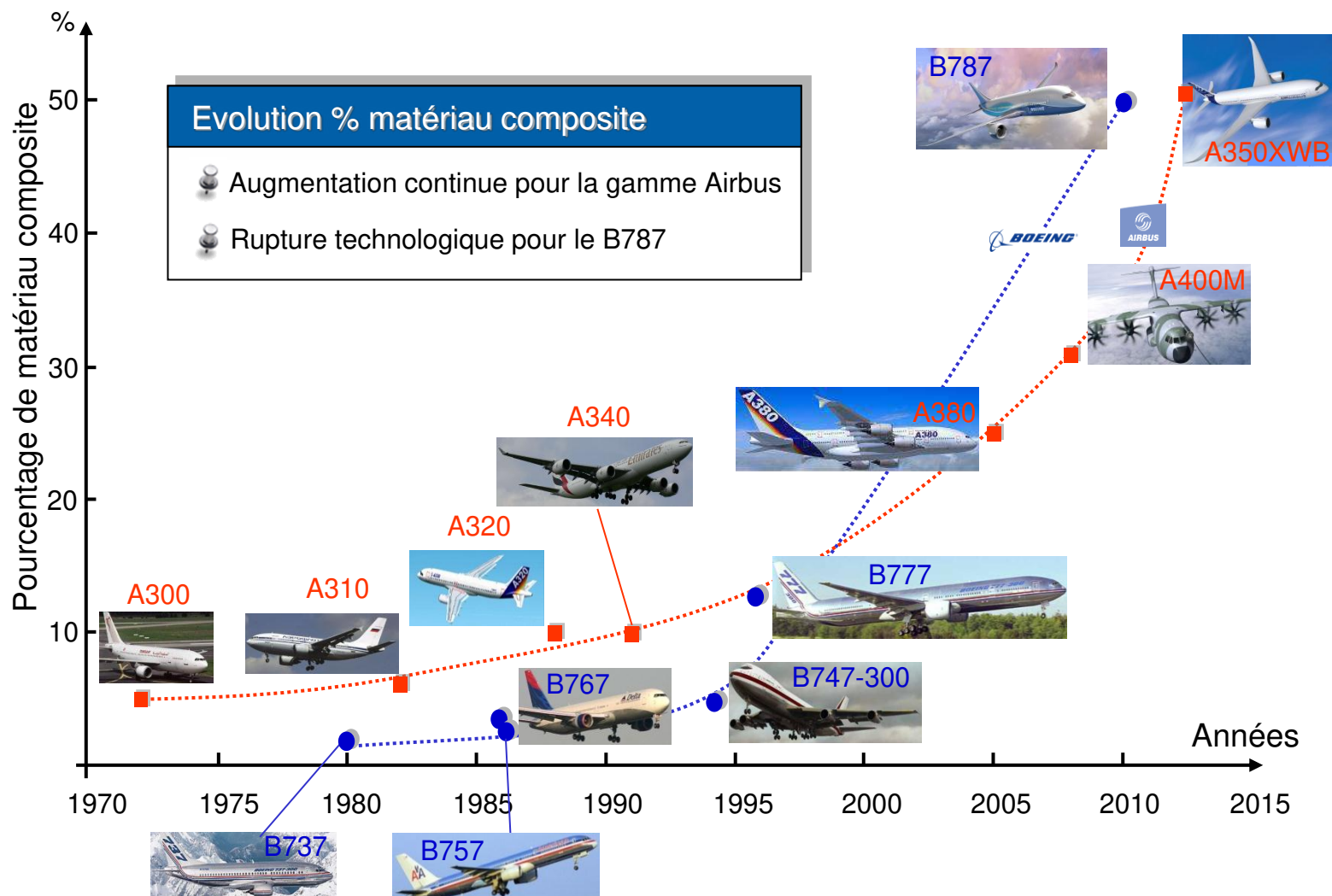
- Dispersion matériau importante
- Forte sensibilité aux trous  
*Zones à fort gradient*

- Faible conductivité électrique  
*Isolation, foudre, EMC ...*

- Sensibilité à l'environnement  
*Vieillessement thermique, humide ...*
- Dimensionnement non optimisé  
*Manque de confiance dans la modélisation*



# Matériaux composites dans l'aviation





# LES MATÉRIAUX COMPOSITES

Jean-François MAIRE – Directeur du Département DMSC

Sommaire

Le Département Matériaux et Structures Composites de l'Onera

Introduction aux composites

**Diversité des composites**

Tendances actuelles

Structuration de la filière « Composite » ?



## Les différentes matrices

### Matrices thermodurcissables

- Bonnes propriétés mécaniques
- Les plus utilisées dans l'industrie



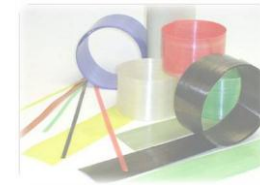
*Polyester insaturé  
(Faible coût, plus utilisé)*

*Matrice Epoxy  
(hautes propriétés mécaniques)*



### Matrices thermoplastiques

- Bonne tenue à l'impact
- Pauvres propriétés thermomécaniques



### Matrices thermostables

- Plus hautes propriétés thermiques des matrices organiques



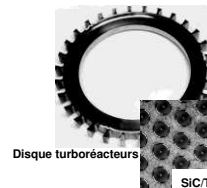
*Bismaleimide  
Kerimid (180°C-200°C)*

*Polyimide  
C/PMR15 (250°C-300°C)*

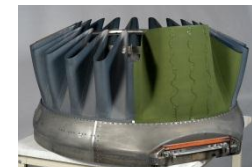


### Autres matrices

- Matrices métalliques (Titane)
- Matrices céramiques (Sic) ...



*Application  
haute  
Température  
(>1000°C)*





## Les différentes fibres

### Fibres de Carbone



Hautes performances



Coût de fabrication élevé

### Fibres de Verre



Résistance en traction modérée



Faible module de traction

### Fibres d'Aramidés



Excellentes propriétés en traction  
Excellente ténacité



Faible résistance en compression  
Faible adhésion avec les polymères

### Fibres Céramiques



Stabilité des propriétés en température  
(de 500°C à 1600°C)



Coût de fabrication élevé

### Fibres naturelles



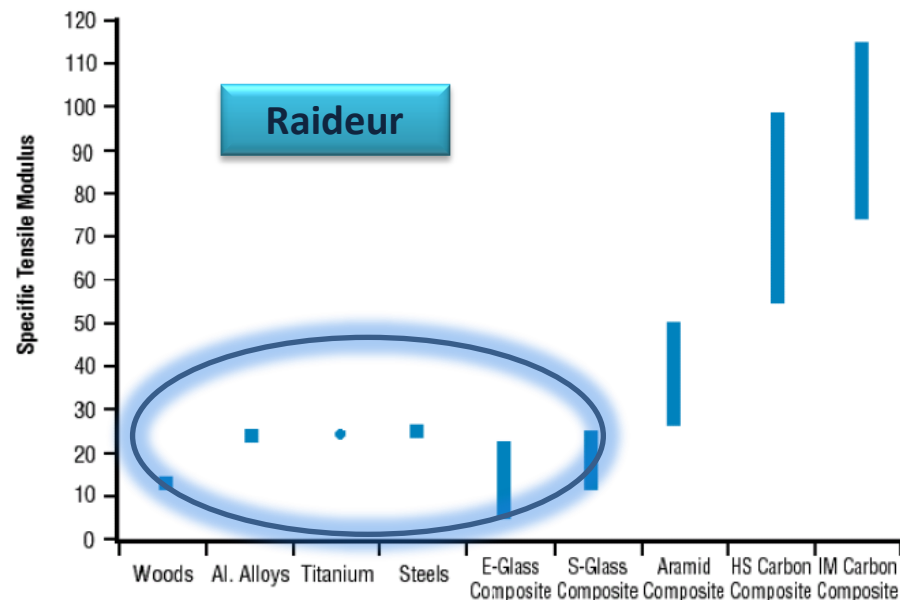
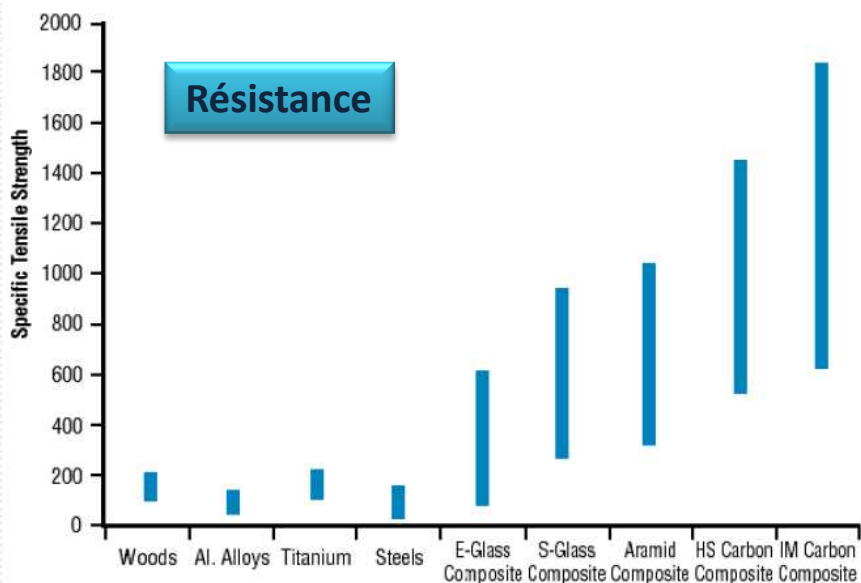
Aspect écologique  
Faible coût



Faibles propriétés mécaniques  
Variabilité



## ➔ Avantage à la fibre de carbone

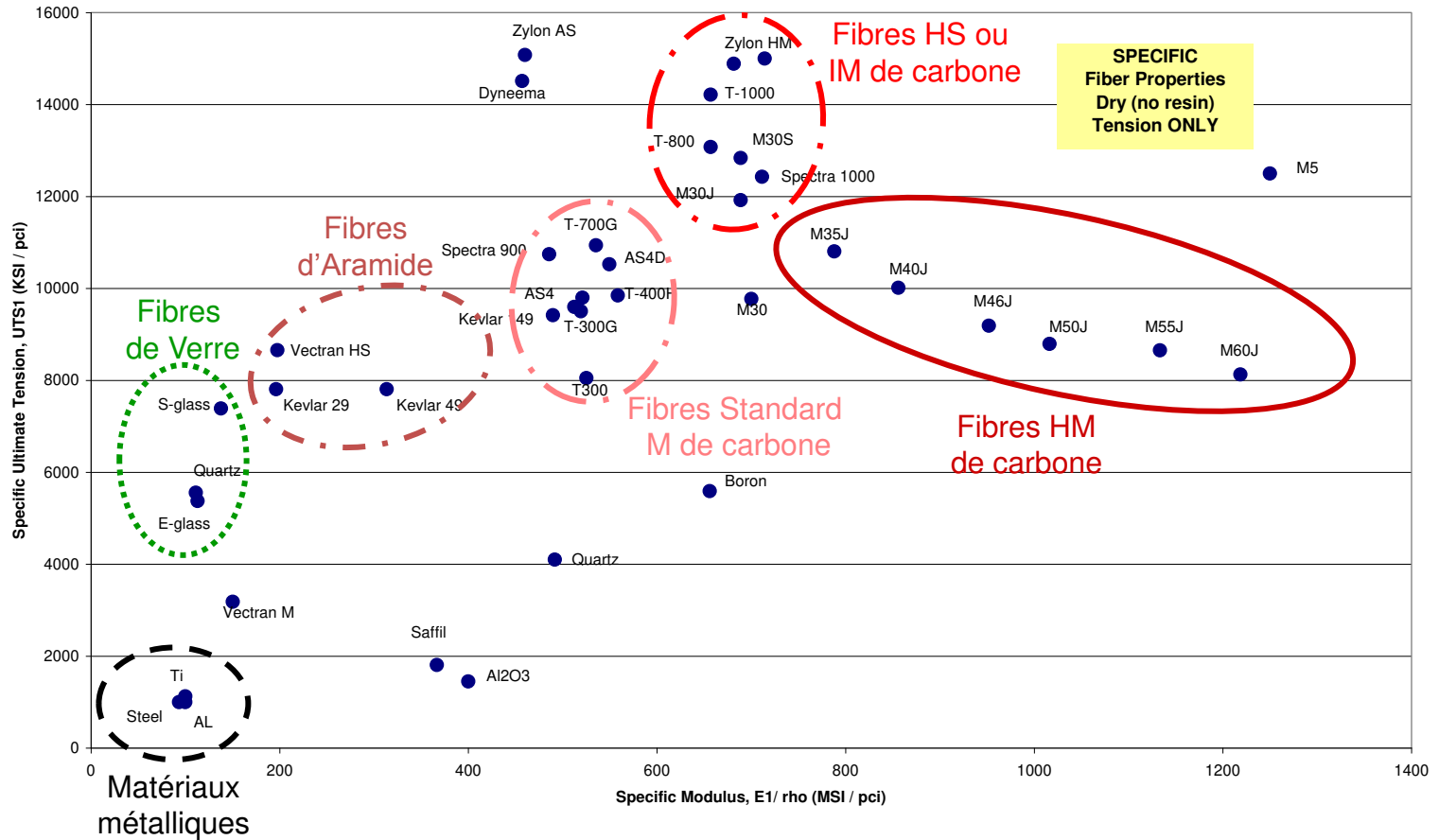


D'après Rui Pedro Carreira, 2005



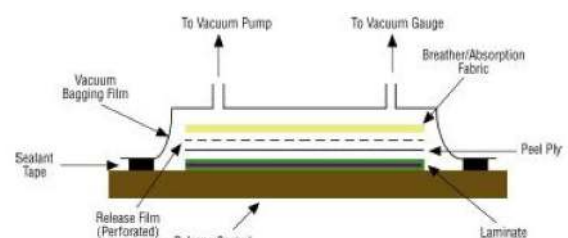
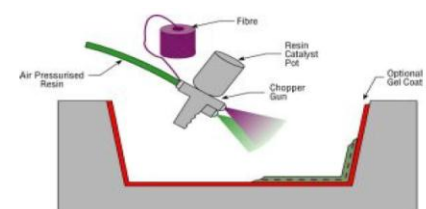
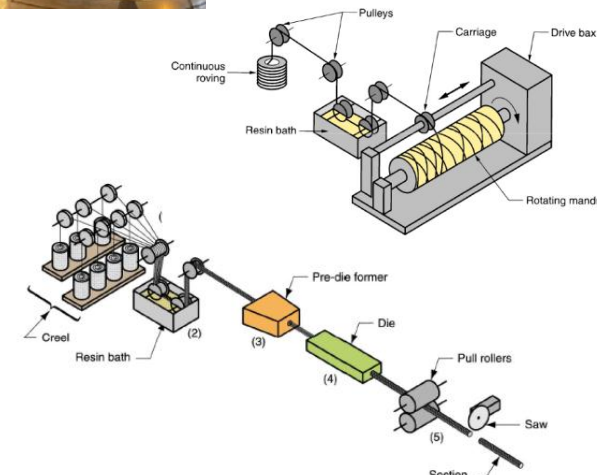
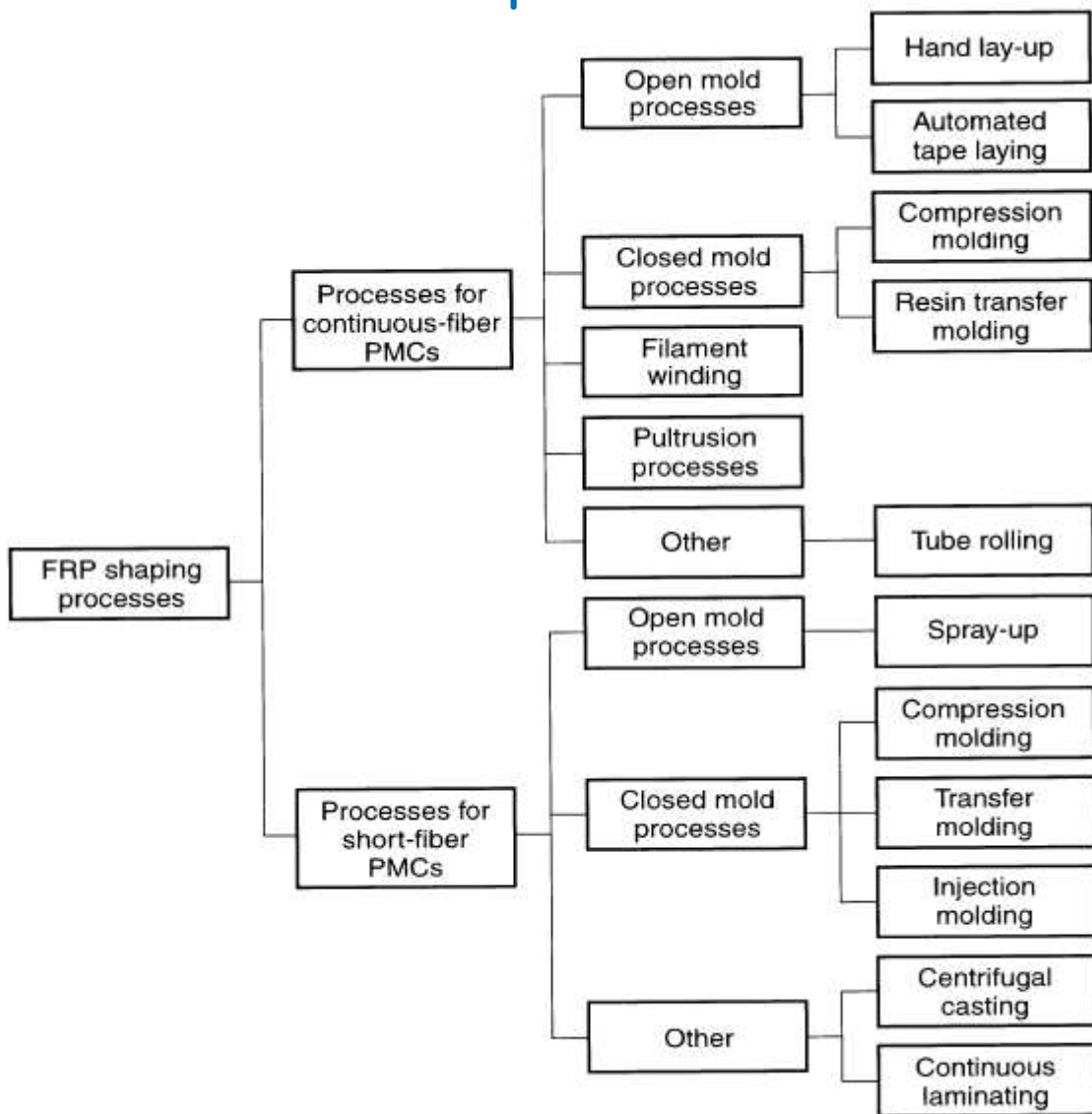
# Comparaison des différentes fibres

 **Choix de la fibres en fonction de l'application industrielle considérée**





# Une multitude de procédés





# Des investissements conséquents



Enroulement filamentaire

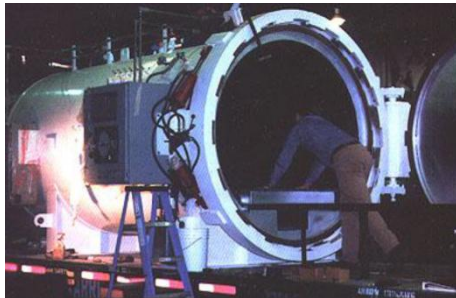


Placement de fibre

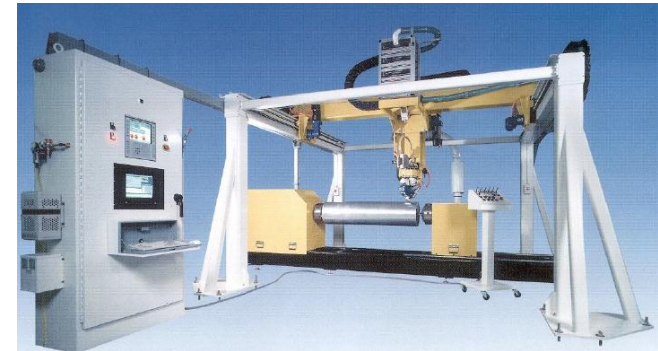
Drapage automatisé

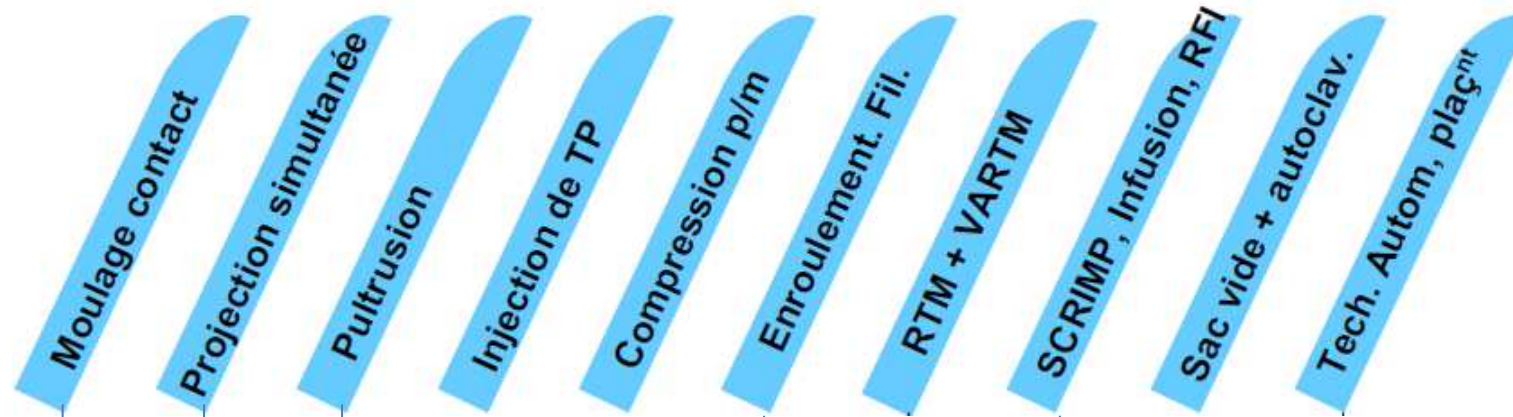


Autoclave



Tissage, tressage, ....

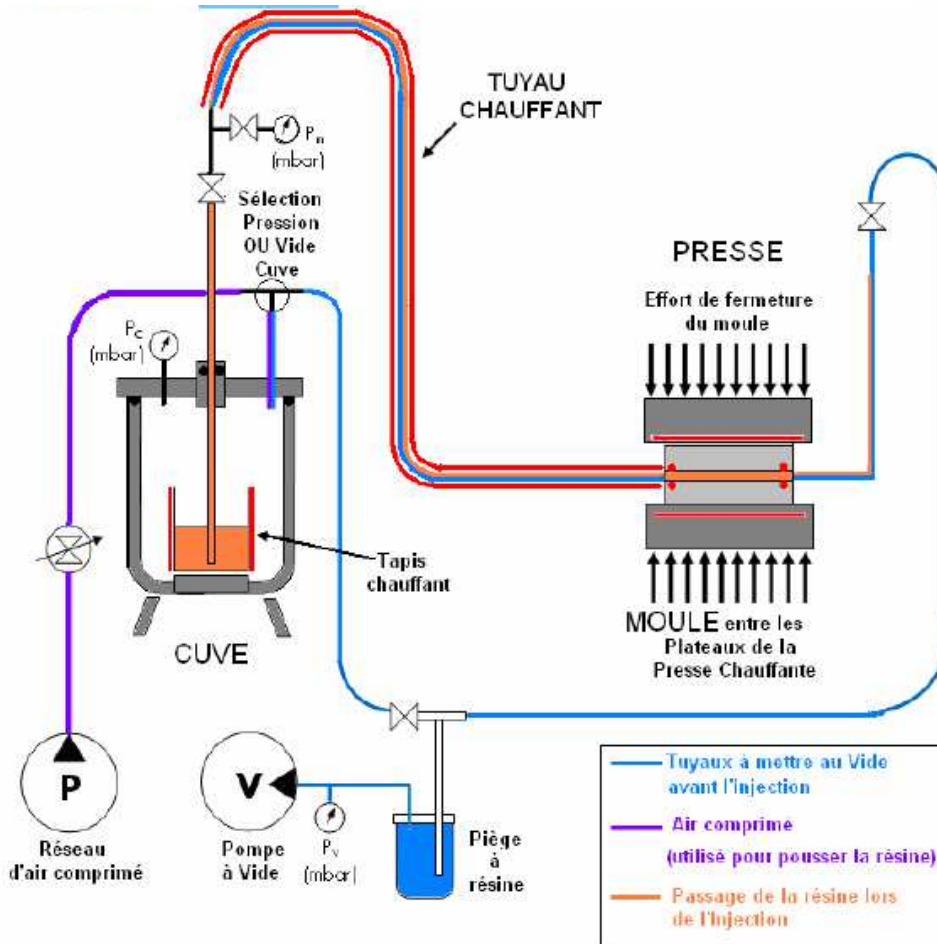




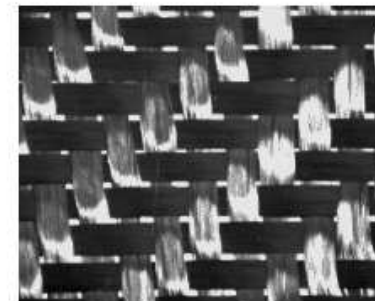
D'après P. Olivier – Colloque Mecamat – Aussois 2011



## Exemple du RTM (Resin Transfert Molding)



- $T^\circ$  injection
- Pression injection ou débit d'injection
- Niveau de vide cuve
- $T^\circ$  moule ou plateaux presse
- Niveau de vide (si VARTM)
- Moule / injection (points, canaux)
- Masse matrice injectée



### Paramètres matériaux :

- Viscosité résine,  $\mu$
- Perméabilité renforts,  $K_{ij}$
- Mouillabilité des fibres



# LES MATÉRIAUX COMPOSITES

Jean-François MAIRE – Directeur du Département DMSC

Sommaire

Le Département Matériaux et Structures Composites de l'Onera

Introduction aux composites

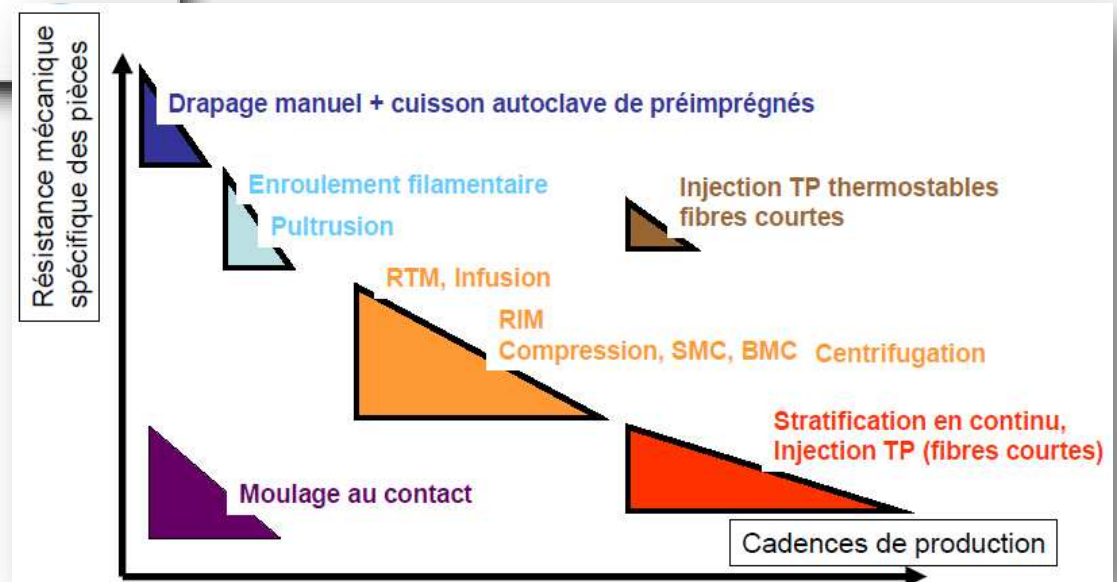
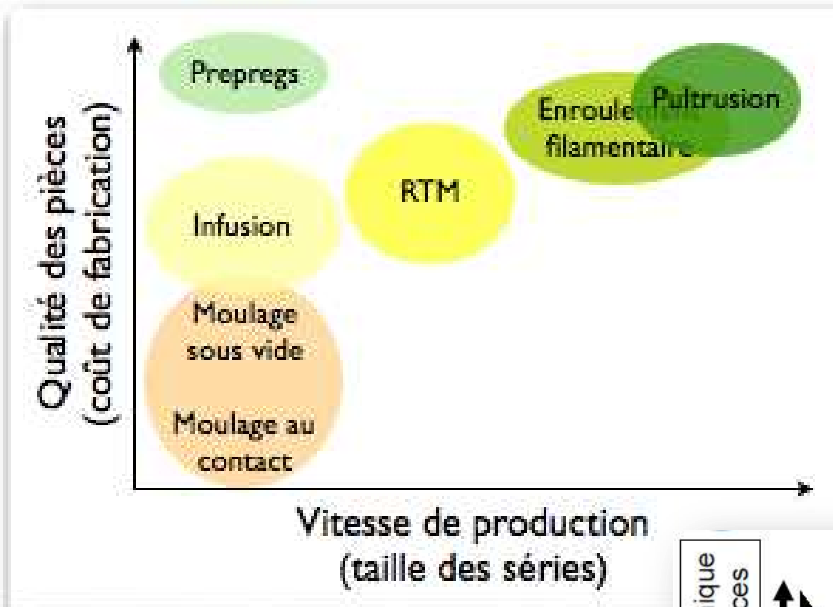
Diversité des composites

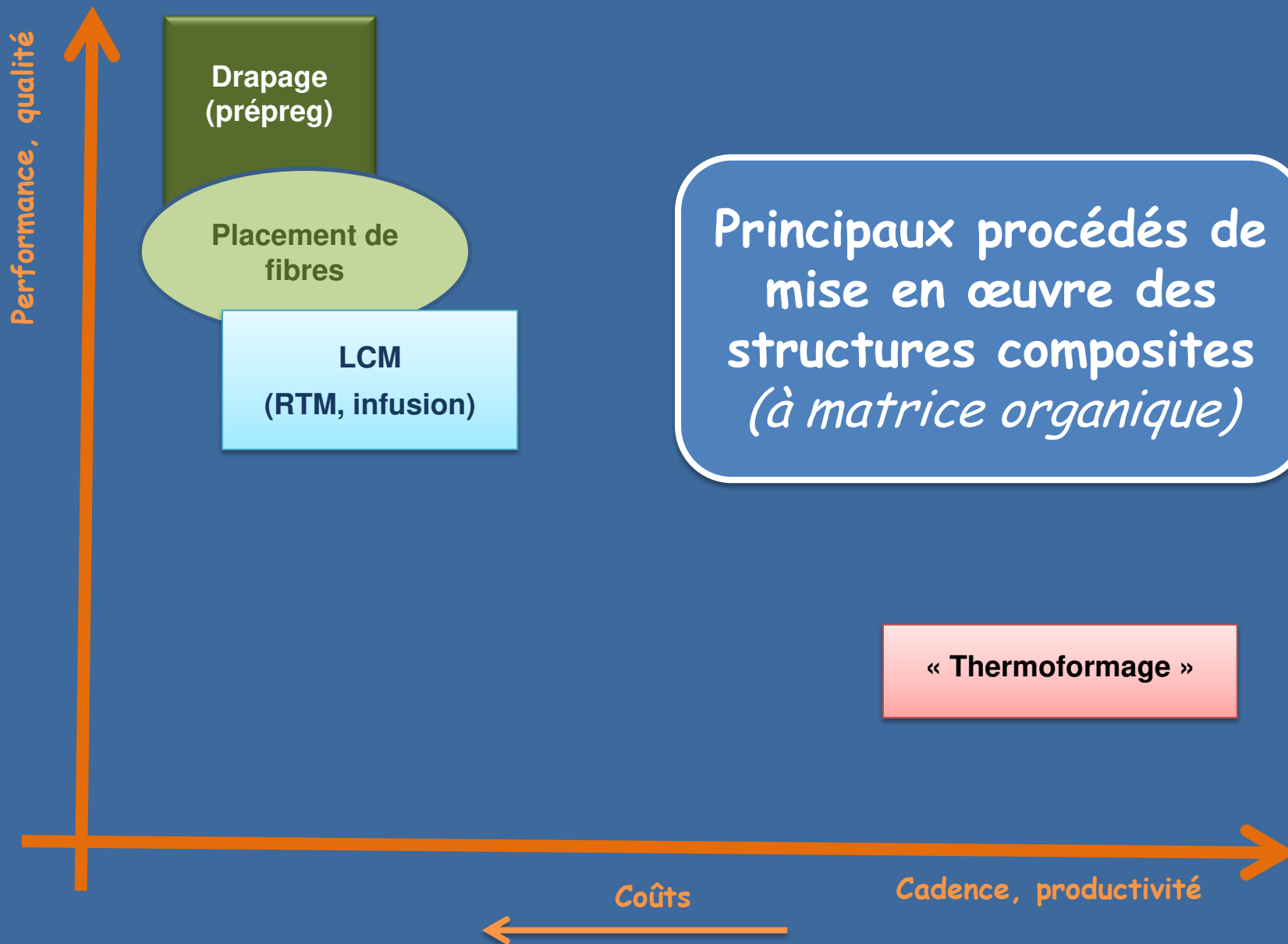
**Tendances actuelles**

Structuration de la filière « Composite » ?

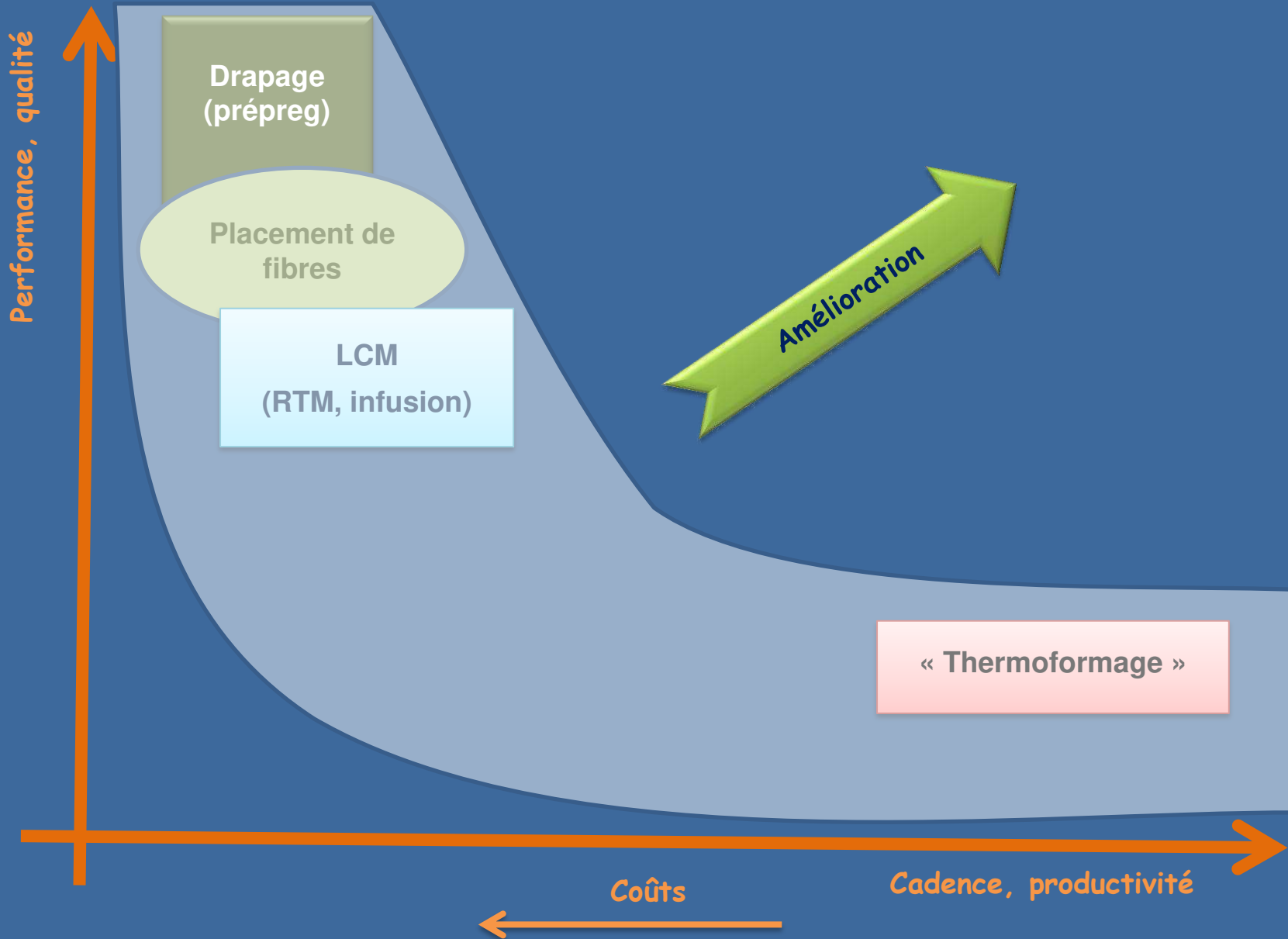


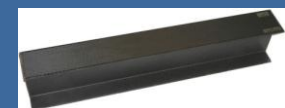
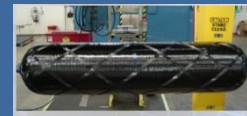
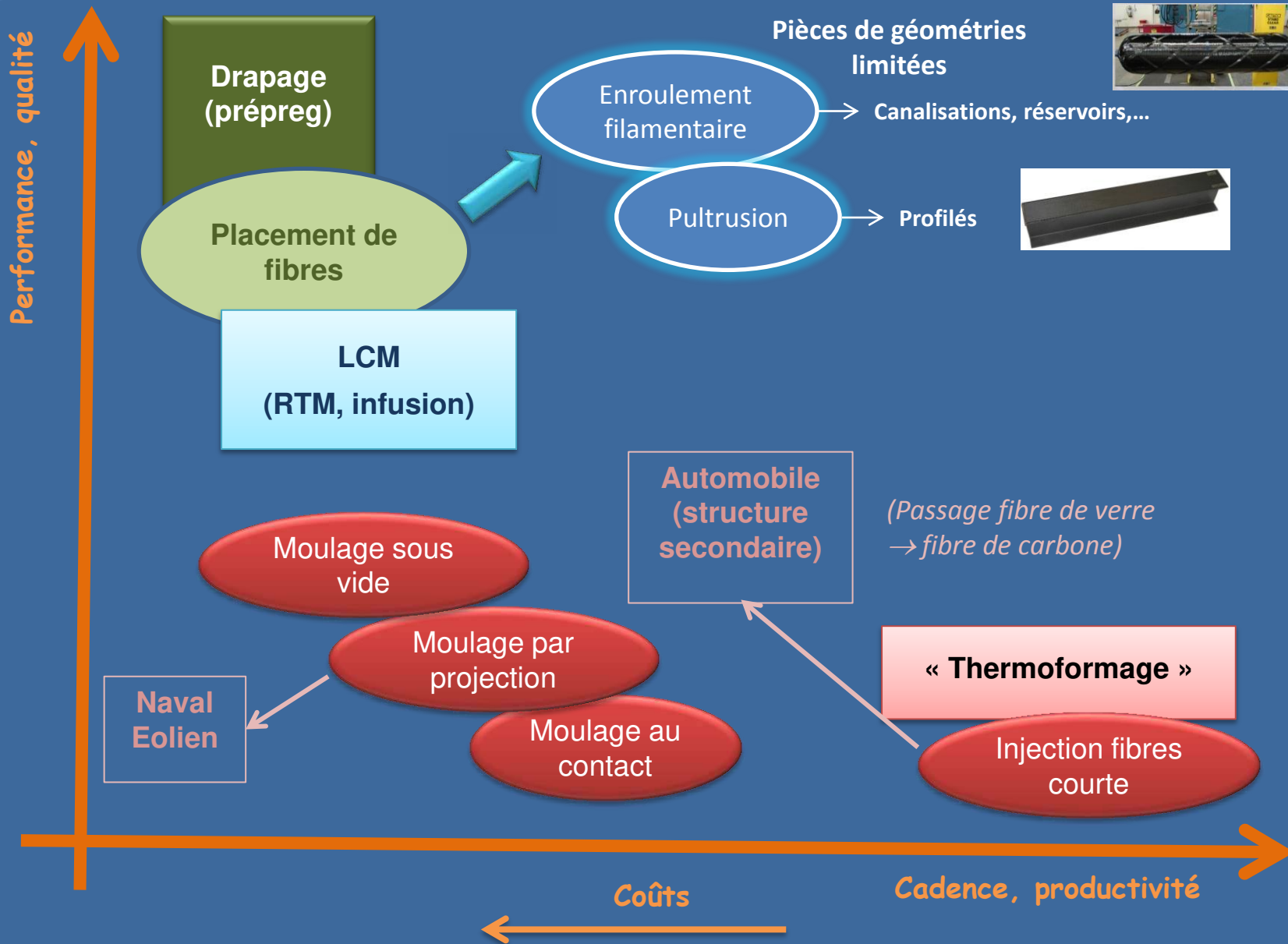
# Classification des procédés Composites













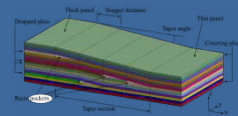
Performance, qualité

Drapage  
(prépreg)

Placement de  
fibres

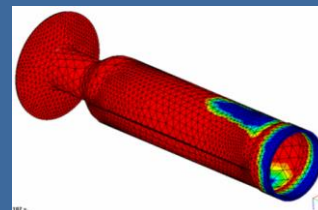
LCM  
(RTM, infusion)

ATL (Automated Tape Laying)  
Stratifiés ultra-minces



AFL (Automated Fiber Placement)

Projet Européen  
CANAL



Tissés 3D  
RTM thermoplastique

PRC-Composite (Safan)  
FUI - Companis 3D



Pièces primaires  
aéronautiques  
(spatiales ?)

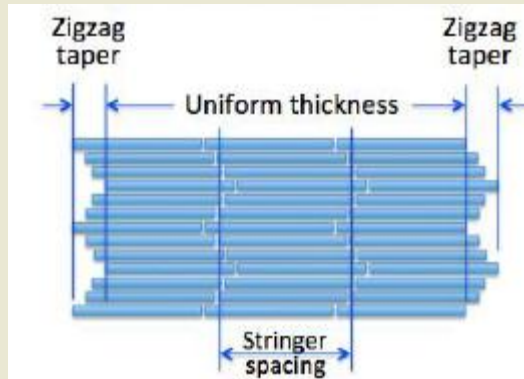
Coûts

Cadence, productivité



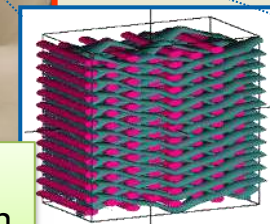
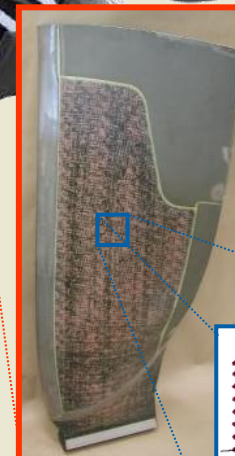
## Procédés « plus performants »

### Plis « ultra fins »



Limitation du délaminage  
Diminution des chutes et des rebus

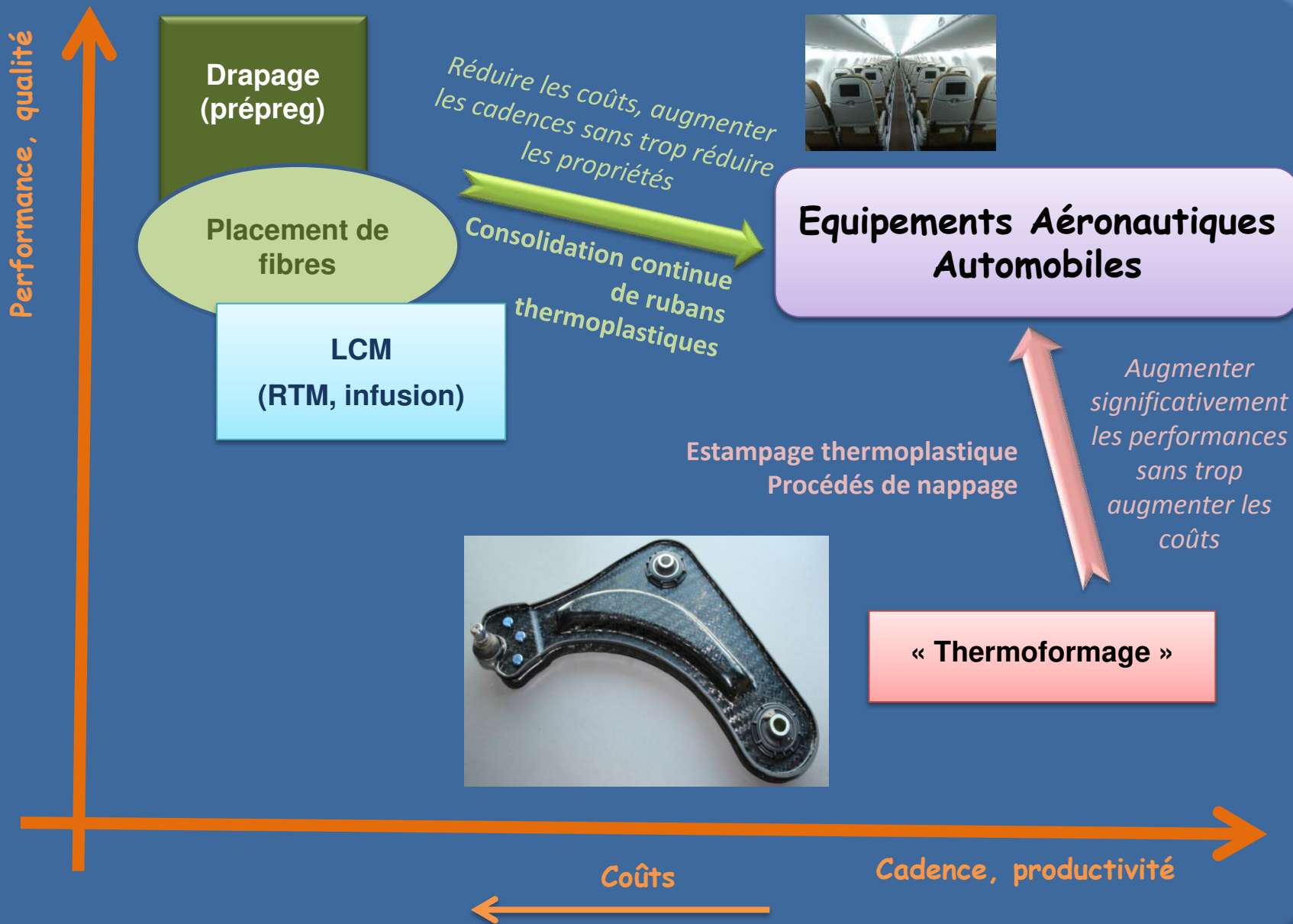
### Composites tissés 3D



- Aubes Fan
- Carter de rétention



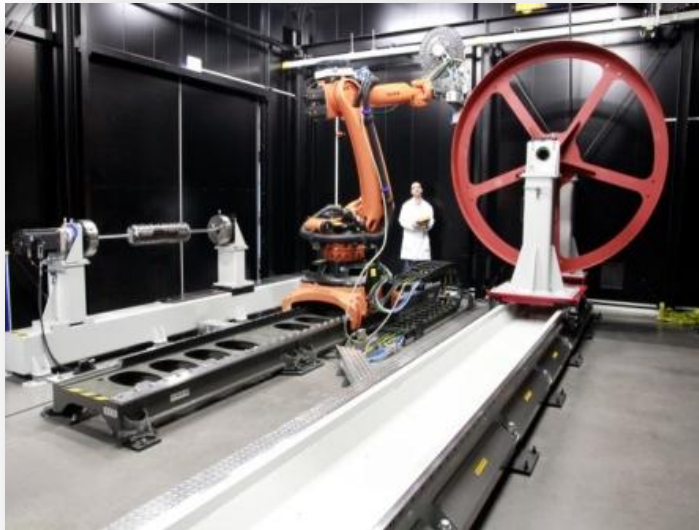
très bonne tenue à l'impact



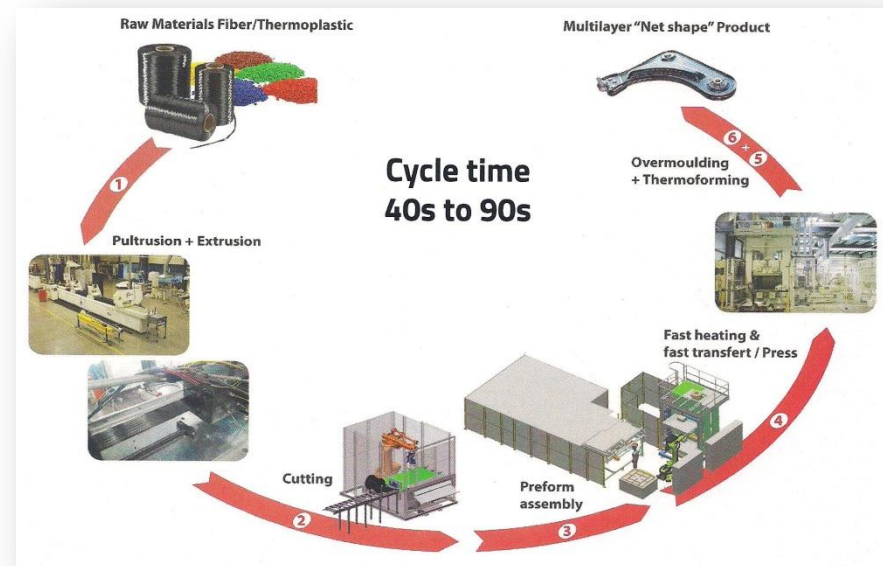


## Procédés « hautes cadences »

*Placement de fibres avec  
consolidation continue*



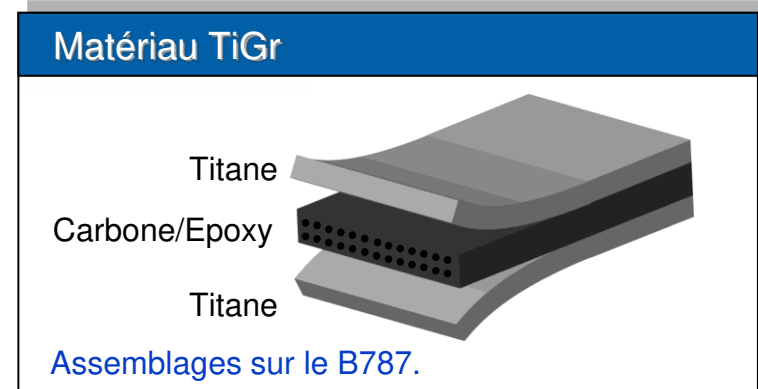
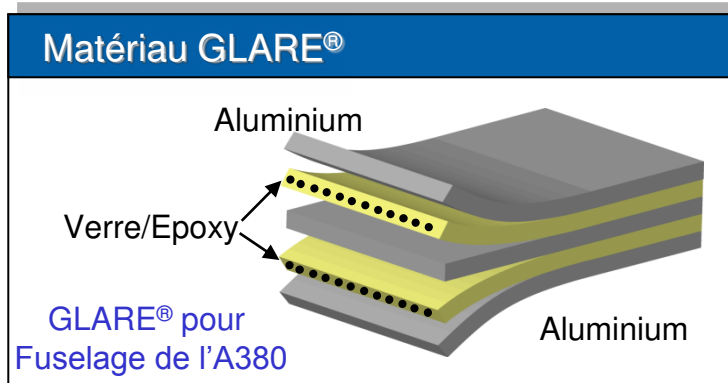
*Quilted Stratum Process (QSP)*



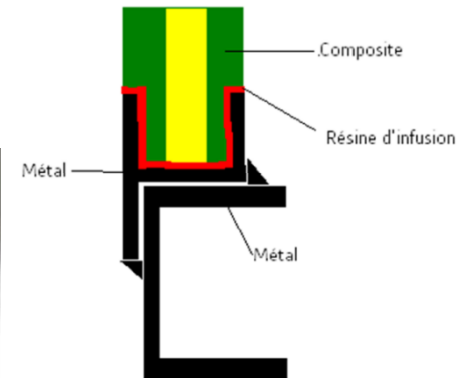
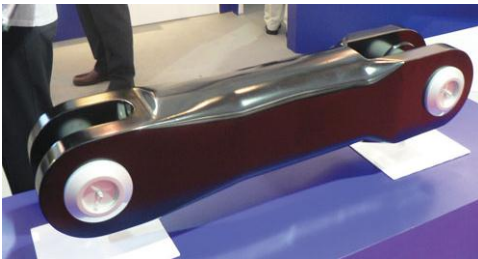
➔ Développer des procédés hautes cadences (bas coût) / hautes performances

## → Structures hybrides

Structures Hybrides plus que matériaux hybrides  
(Glare, Tigr,...)



**Co-fabrication plutôt qu'assemblages multimatériaux**



→ **Incompatibilité des matériaux : contrainte/déformation thermiques résiduelles, tenue des interfaces, corrosion galvanique,...**



# LES MATÉRIAUX COMPOSITES

Jean-François MAIRE – Directeur du Département DMSC

Sommaire

Le Département Matériaux et Structures Composites de l'Onera

Introduction aux composites

Diversité des composites

Tendances actuelles

**Structuration de la filière « Composite » ?**





# Un nouveau moteur pour la recherche sur les composites : « la réduction des coûts »

## Réduction des coûts :

- Réduire le coût des matières premières (**fibres**, résine,...)
  - Réduire les pertes matières
  - Réduire les rebus (augmenter la tolérance aux défauts initiaux)
- Réduire les coûts (et les durées) de développement
- Réduire les coûts des moyens techniques (investissement)
  - Réduire le temps de cycle (occupation des moyens)
- Réduire les coûts de certification (nouveaux produits, nouvelles technologies)
- Réduire les coûts de possession (consommation, maintenance,...)
- Coût de fin de vie (recyclage, démantèlement, ... )



## Réduction des coûts directs

### Coût fibres de carbone

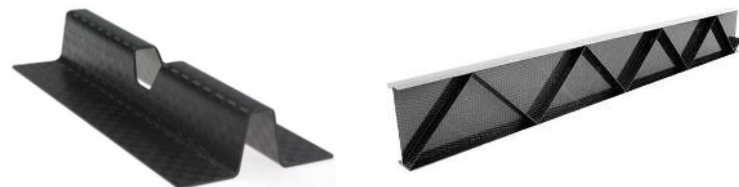
Coûts procédés

- Peu ou pas de finition
- Moins de « copeaux » et de perte matière première
- Intégration de fonction

Coûts matière première  
(Diminution des coûts de la fibre)

- Meilleure adaptation au besoin (variabilité vs performance)
- Augmentation de la concurrence

## Savoir-faire: « Penser composite »



Performances

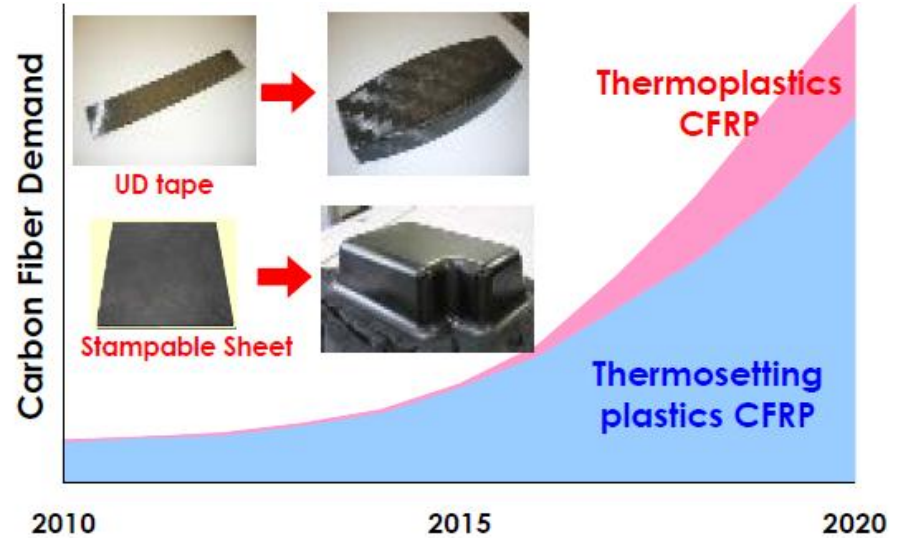
- Meilleure connaissance/caractérisation des matériaux
- Amélioration des méthodes de conception (optimisation)

### Solutions composites réellement concurrentielles

Maitrise des coûts

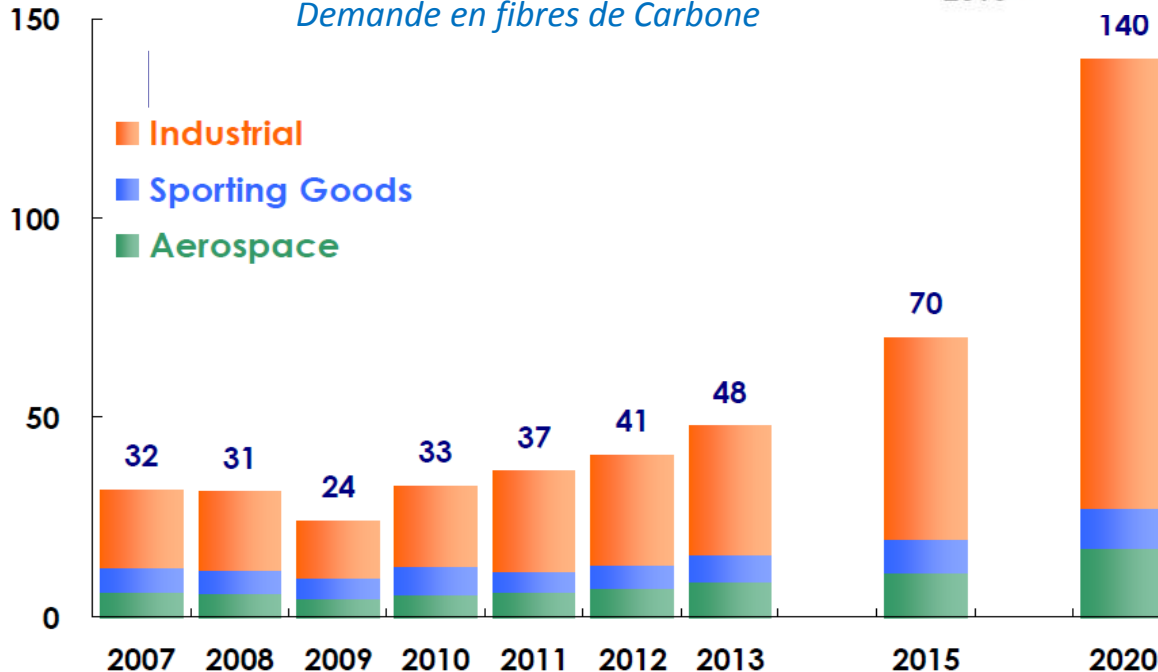
- Tolérance aux défauts (de fabrication)
- Cadences
- Certification (Maitrise procédés, Contrôle, procédure,...)

# Marché de la fibre de Carbone



(Ktons/year)

*Demande en fibres de Carbone*



*Ratio Thermodur/thermoplastique*

D'après Toray (2013)



## Métalliques vs Composites

Fabrication « soustractive »  
(par enlèvement de matière)



Fabrication additive

 **Nécessité de revoir la manière de concevoir les pièces ....**

« Penser composite » souvent proche de la fabrication additive :

- Limitation (voir suppression des usinages),
- optimisation(s) spécifique(s)
  - *Optimisation de forme (on joue sur les frontières)*
  - *Optimisation topologique (on joue sur la répartition optimale de la matière)*
  - *Optimisation topo/composite : on joue en plus sur l'orientation du matériaux*
  - *Optimisation multifonctionnelle : on joue en plus en choisissant locale le matériau*
- Réduction des coûts

## Au-delà du choix des constituants et du procédé, il subsiste un certain nombre de verrous ...

### Problèmes « industriels »

### Réponses proposées par les centres de recherche

Adapter, mettre au point, optimiser les  
procédés



Simulation des procédés  
(Ex : contraintes/déformées résiduelles)

Concevoir une pièce composite



Méthode de conception optimisée intégrant les  
contraintes procédés

Caractérisation



Développer des essais spécifiques  
(ex : tissage 3D)

Contrôle santé.



Progrès dans la (multi) instrumentation

Tolérance aux défauts  
(initiaux, en service,...)



Prévision de la nocivité des défauts  
Structural Health Monitoring

Durabilité

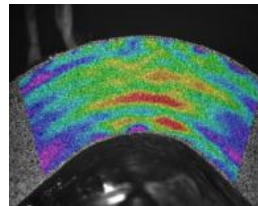
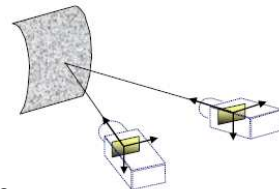


Prévision de la durée de vie (fatigue, vieillissement,..)  
Approches multiphysiques (tenue à la foudre, au feu,...)

Certificabilité



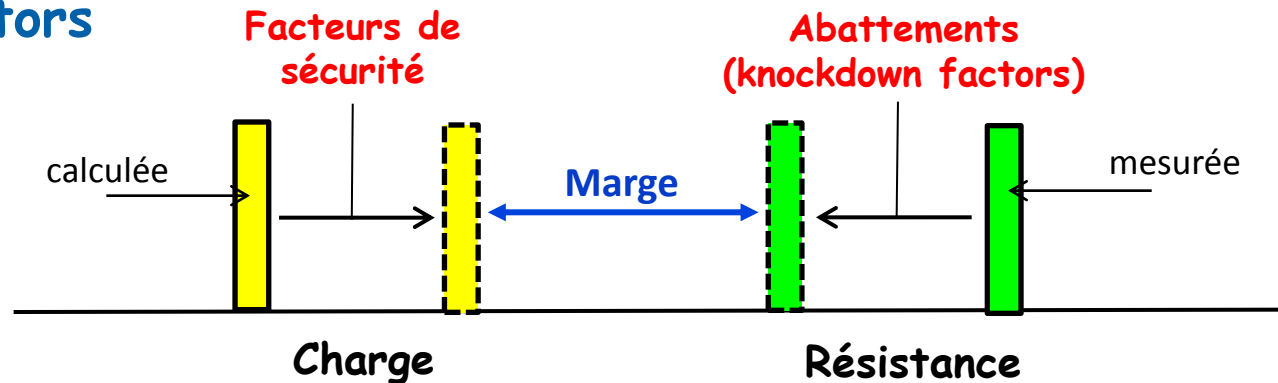
Certification numérique (aide à la certification par des  
outils numériques « certifiés »)





# Méthodes de dimensionnement des structures composites :

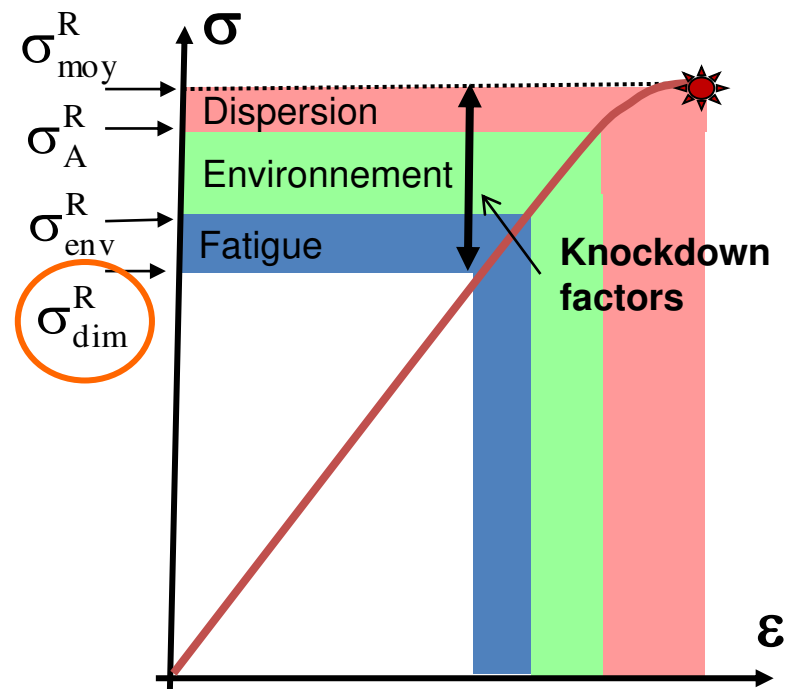
## Knockdown factors



**Chargement limite** : environ 1,5 fois la charge maximale vue par un avion durant toute sa durée de service

**Chargement extrême** : 1,5 fois la charge limite

(Chargement de fatigue souvent 50 % de la charge limite)





## Méthodes de dimensionnement des structures composites :

1) général, simple avec empilement de marge ou de facteur de sécurité

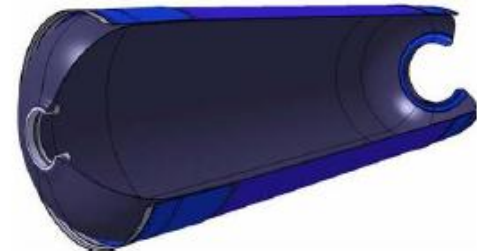
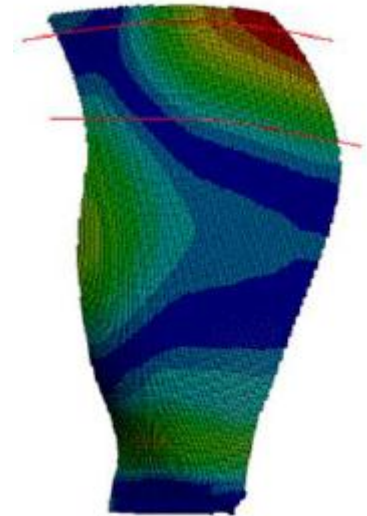
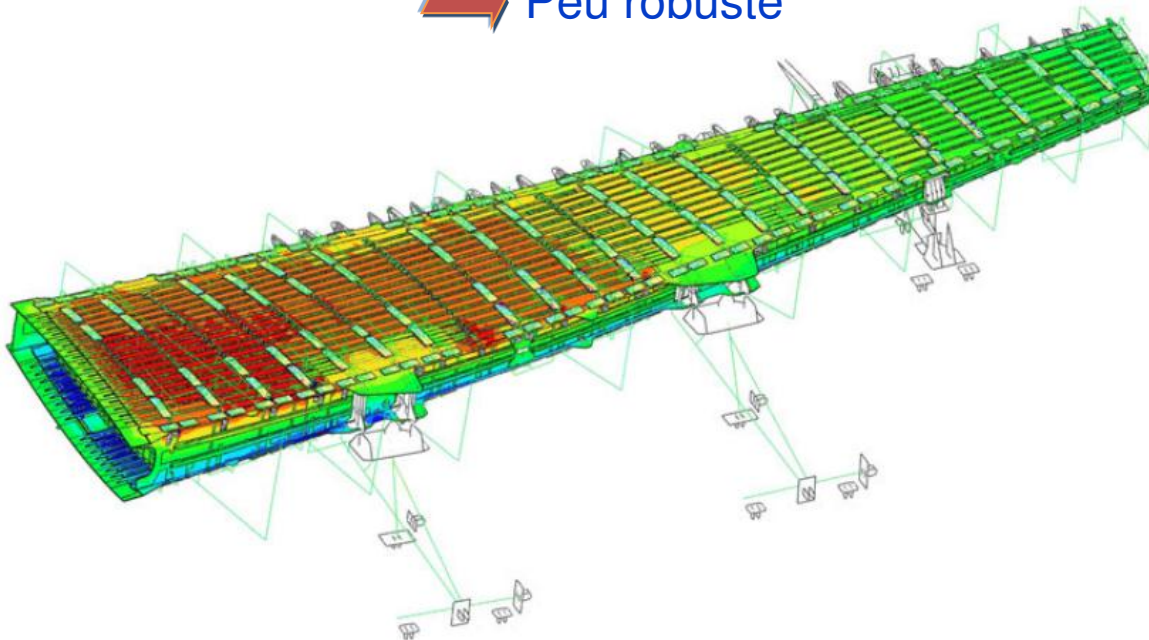
➔ Fort surdimensionnement

2) plus complexe et dédié massivement recalé

➔ Coûts expérimentaux, optimisation limitée

3) méthodes avancées

➔ Peu robuste





## Structuration de la filière composite

**JEC 2015 (10-12 mars)**



Perte de vitesse des entreprises françaises ?

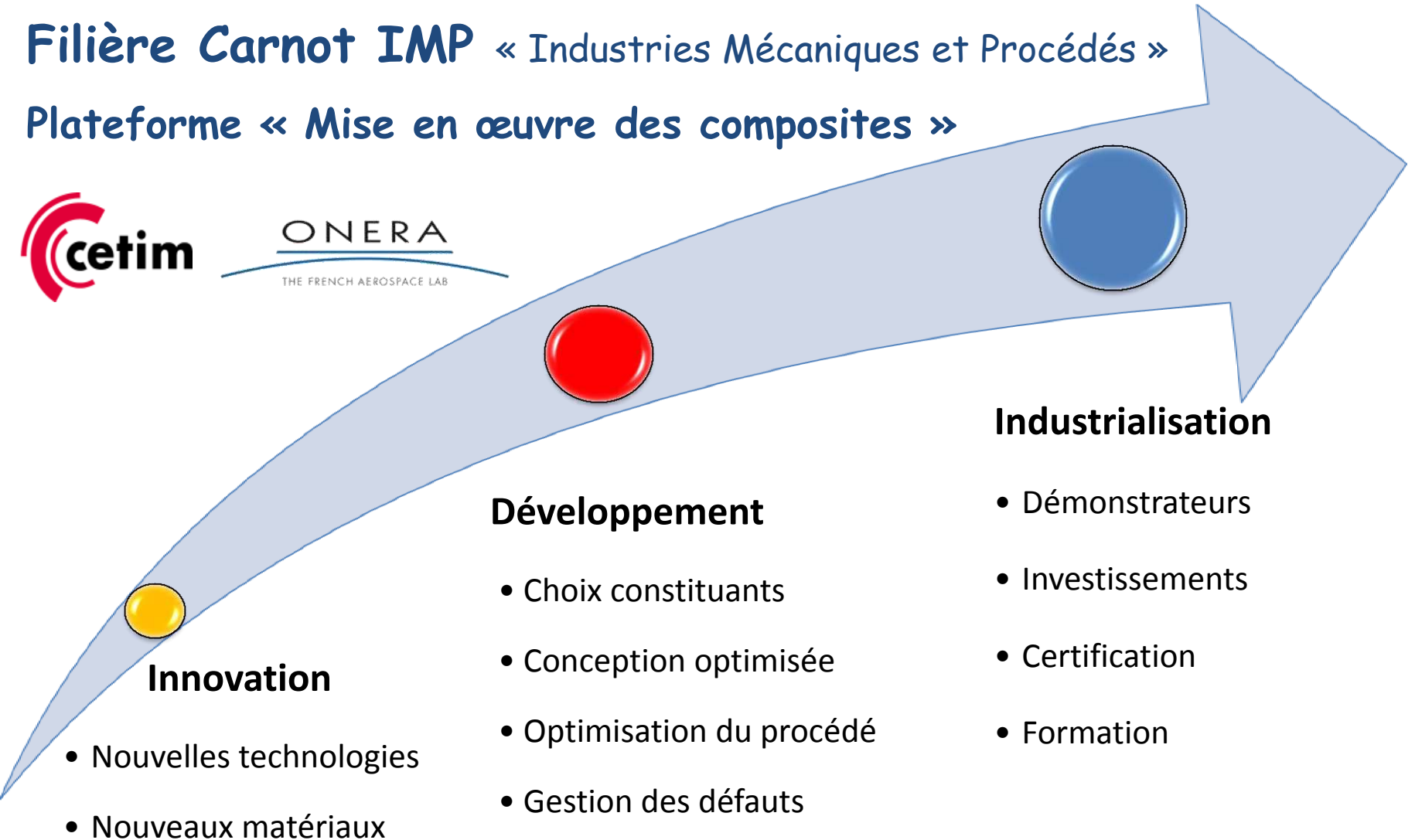
- Cohérence des activités de développement (multisectoriel)
- Rôle de IRT (positif ou négatif ?)
- Les instituts Carnot → filières économiques





# Filière Carnot IMP « Industries Mécaniques et Procédés »

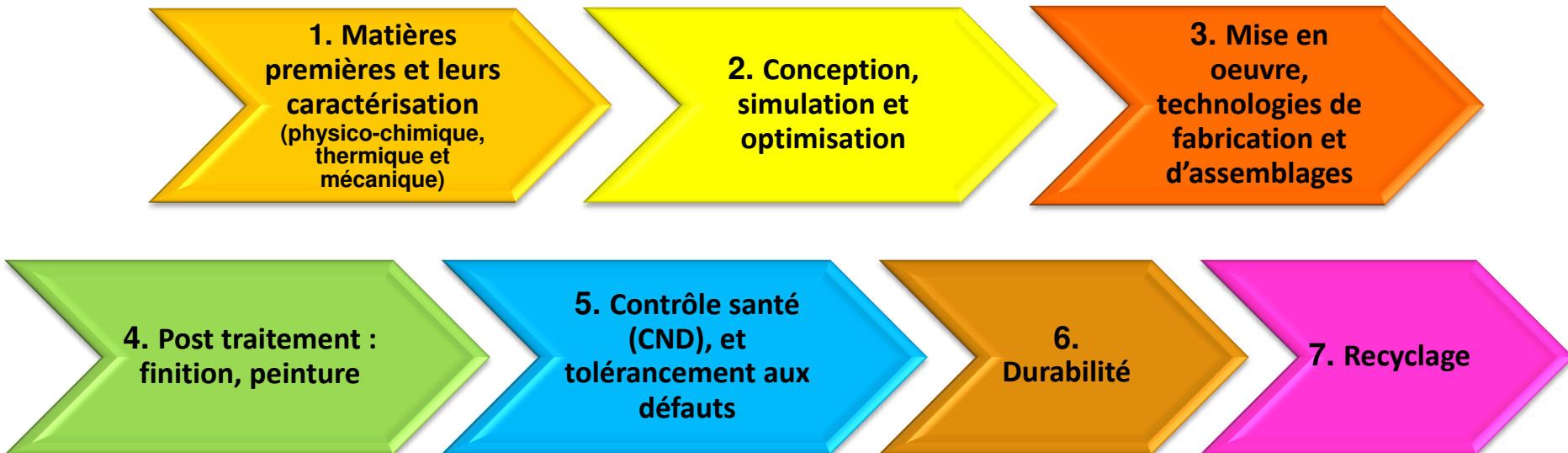
## Plateforme « Mise en œuvre des composites »



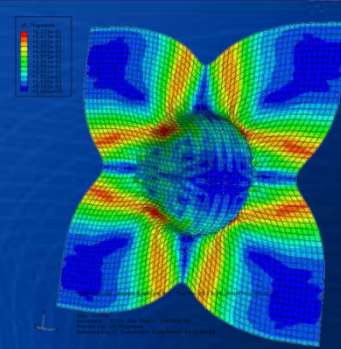
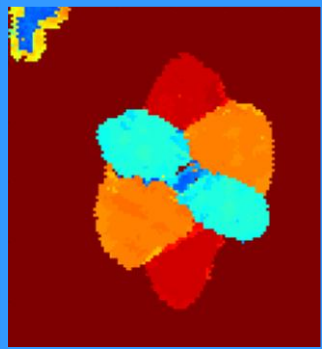
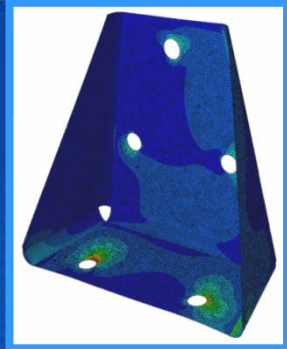


- Carnot impliqués : Cetim, ONERA, ARTS, MICA, I@L, CEA List, PPE, INSA
- Autres partenaires : IRT Jules Vernes, Comp'Innov (ECN, ENSC, CNRS),
- Connexion européenne au travers de : ICT, IPT (Allemagne), TPRC (Pays Bas), ...

Une couverture sur toute la chaîne de valeur : de la conception au recyclage



20 mai 2015



Jean-François MAIRE

Département Matériaux et Structures Composites

ONERA

THE FRENCH AEROSPACE LAB

retour sur innovation