



INSTITUT
Mines-Télécom

GT3 Composites et Matériaux avancés, Assemblages

S. Drapier / C.H. Park – Pr.,
Mines Saint-Etienne / Douai

Dir. Dépt Méca. & Procédés d'Elaboration directe
Dir. Fédération de Recherche CNRS CIMReV



Titulaire Chaire *Hexcel* pour la modélisation
avancée des procédés par infusion



Composites et Matériaux avancés, Assemblages

Enjeux de l'intégration des modèles multi-échelles pour l'émergence de solutions innovantes (bio)matériaux-procédés-produits

- **GT3 Composites, et généralités sur les composites (S. Drapier – Mines Saint-Etienne)**

- **Exemple, Chaire Hexcel-Mines Saint-Etienne**
Modélisation numérique avancée pour l'élaboration par infusion de composites structuraux de nouvelle génération (S. Drapier – Mines Saint-Etienne)

- **Focus : Composites issus des matériaux naturels pour les applications aéronautiques (C. H. Park – Mines Douai)**

GT3 (Groupe Miroir IMT Offre Techno)

/ Composites

■ Animateur : C.-H. Park (Mines Douai)

■ Contributeurs : **Mines**

- C.-H. Park, TPCIM-Douai
 - EXTREMOM (process, structure); Projet POPCOM
- L. Laiarinandrasana, CDM-Paris (+ Centre Morpho Maths)
 - Caractérisation matériaux; modélisation
- P. Navard, CEMEF-Paris
 - MiniProcessing (process); Calcul/modélisation
 - Projets composites bio-sourcés (renforts, bio-aérogels)
- A. Bergeret, Pôle MPA Alès
 - MOCABIO (process); caractérisation; Projet BIOCOMP
- S. Drapier, P.-J. Liotier, S. Saunier, SMS-St Etienne
 - MSM (process); EPI (structure); ISN (modélisation, calcul //)
 - Projets Chaire Hexcel, LEWETUWET, CERAMMET, SMILE
- G. Dusser, O. de Almeida, F. Schmidt, ICA Albi
 - MIMAUSA (process); Projets : Composites céramiques oxydes/oxydes

Force de nos activités

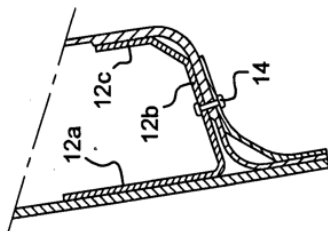
Couverture thématique *Matière – Procédés - Propriétés*

Composites et Matériaux avancés

- Recherche de propriétés spécifiques et/ou allègement
- Multi-matériaux architecturés - *Le bon matériau au bon endroit*

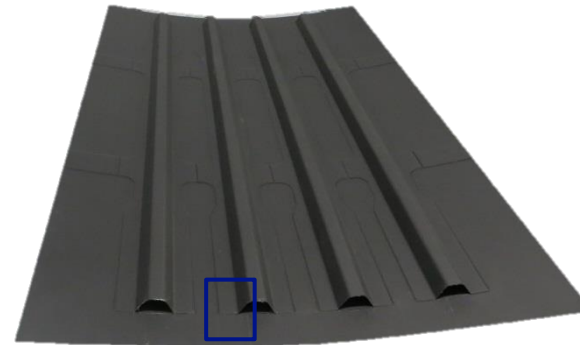
Allègement

- moyens de fabrication spécifiques (températures, pressions, ...)
- taillés 'sur-mesure' (orientations, tailles, propriétés, ...) « *Tailored materials* »
- intégration de fonctions (connexions intégrées $\Rightarrow$ réduction du nombre de sous-ensembles, et donc des **assemblages**)



Design métallique

Par raidisseur : 3 tôles pliées, 2x rivets



Design composite - Panneau auto-raidi monolithique « One shot » (Hexcel-Stelia)

Composites

■ Notion de « composite »

- Mélange de constituants en vue d'obtenir des propriétés 'sur mesure' plus intéressantes que les propriétés individuelles des constituants

CLASSIFICATION PERIODIQUE DES ELEMENTS

Légende

- nombre de masses de l'isotope le plus abondant
- nombre de neutrons
- nombre atomique = nombre de protons
- masse molaire atomique en g.mol⁻¹
- symbole
- nom

Classification périodique des éléments (Mendeleïev-Coul, 02/12/2007)

Potentiellement, toutes les combinaisons de matériaux

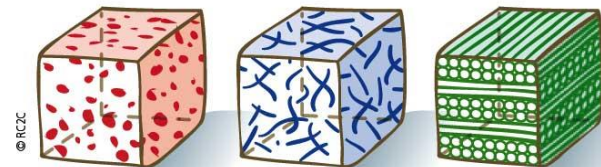


Formats des renforts

Composites à particules

Composites à fibres courtes

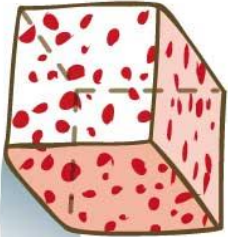
Composites stratifiés



Composites

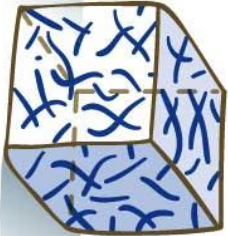
■ « Multi-Architecture » du composite

© RC2C



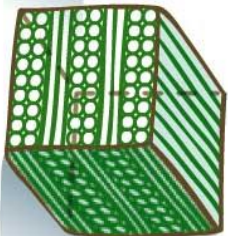
Composites à particules

- **Matière** = Matrice métallique / céramique / polymère + particules céramiques / charges creuses
- **Mise en œuvre** = injection / coulage (+ frittage); fab. additive
- **Réalisations** = Sous-ensemble résistant aux températures et au frotte
- **Secteurs** = transport, énergie, santé; Forte valeur ajoutée



Composites à fibres courtes

- **Matière** = Matrice polymère avec fibres courtes de verre, de bois, ...
- **Mise en œuvre** = injection / compression
- **Réalisations** = Sous-ensemble peu travaillant;
- **Secteurs** = tous secteurs avec grandes séries; bon marché



Composites à fibres longues – stratifiés / tissés / tricotés

- **Matière** = Matrice polymère avec fibres longues hautes performances
- **Mise en œuvre** = injection / infusion
- **Réalisations** = Sous-ensemble fortement sollicités;
- **Secteurs** = transport, énergie, santé;
- **Forte valeur ajoutée**



NASA-space vehicle X-38



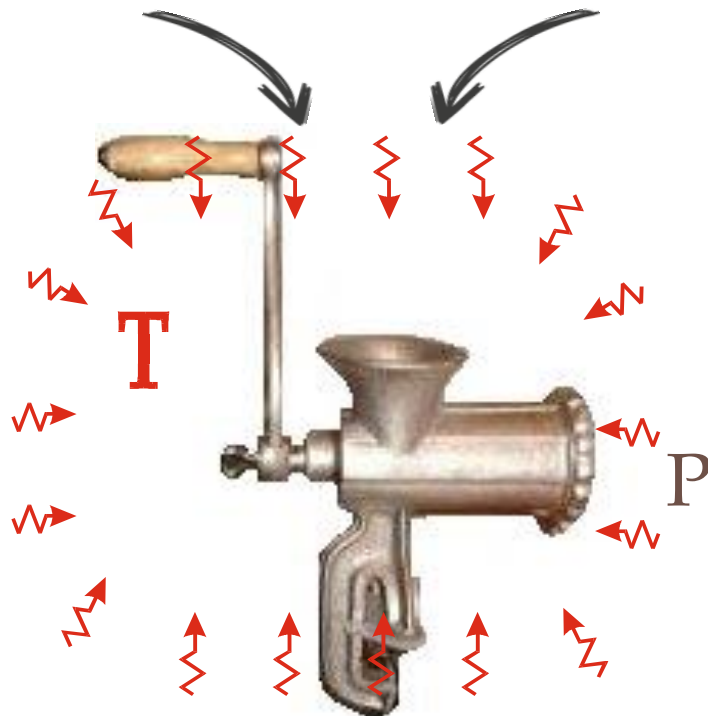
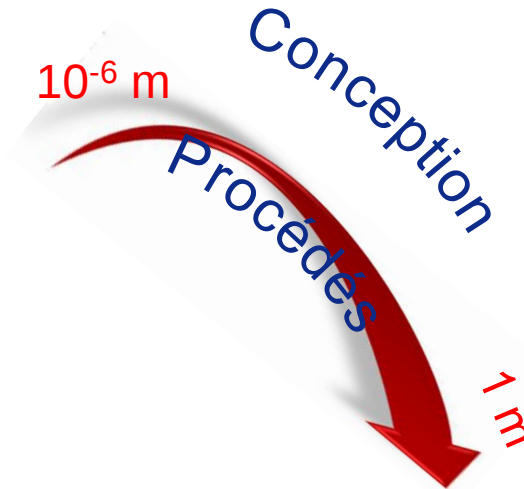
Composites = une *histoire d'échelle*



Liant



Renforts



Vers l'intégration des matériaux *bio-sourcés*

■ Matrices bio-sourcées

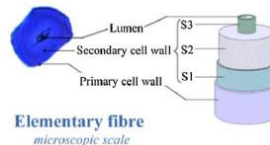
- Issues de matières biologiques – bois, amidons, algues, ...
- Extraction mécanique ou chimiques (**bilan écologique ?**)

■ Renforts bio-sourcés

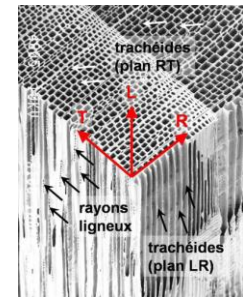
- Chanvre, bambou, coco, bois, basalte (**bilan écologique ?**)
- Filière *lin* Normandie-Bretagne, Nord-Belgique



Lin



Bois – fibres de lignine
dans matrice de cellulose

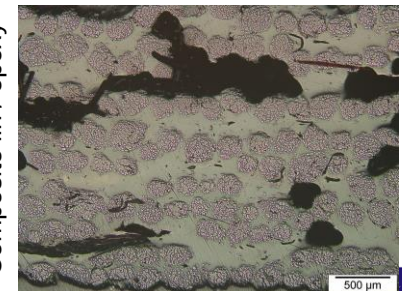


Bois réifié

■ Verrous actuels

- Assurer un approvisionnement sûr – qualité – et prévisible
- Travailler sur l'affinité entre renforts et matrice

Composite lin / epoxy



L'Aéronautique-Astronautique comme vitrine

■ Impact dans / sur la société

- Dynamique forte du secteur **+5 %/an**; 60 avions/mois en 2020 (x3)
- Industrie de pointe - retours en termes d'emplois, PIB, ...
- Défis écologiques et économiques

■ En termes de R&D

- Temps caractéristiques de développement de **10-15 ans**
- **A maturité**, déclinaison dans d'autres secteurs du transport - énergie
 - Automobile = qualité moindre, mais **cadences** bcp plus élevées
 - Eolien = masse transportée – pales **monolithiques** de **80-90 tonnes**
- Haute technologie – certifications, études poussées, **qualité**, ...
- **Forte valeur ajoutée** – structures aéro. carbone/époxy **100 \$/kg** !
- Retours d'expérience forts; > **50 ans** d'utilisation des composites

■ Prochaines échéances = 2019-2020 pour la nouvelle génération d'aéronefs (sortie 2025)

Exemple : le moteur LEAP - X

- **Leading Edge Aviation Propulsion; > 9.000 commandes**
- **Projet lancé en 2005** (avec 20 ans de développements antérieurs)
- **Equipe les C919 Comac (Chine), A320neo, et B737max**
- **Consommation de 16 % inférieure** à celle du CFM56; diminution des émissions de CO₂ de 16 %, de NO_x de 50 %; diminution du niveau sonore du moteur de 15 dB
- **Réacteur double flux double-corps**
 - Aubes de turbine basse pression et anneaux de turbine haute pression en **composite à matrice céramique**
 - Aubes de soufflante en matériaux **composites carbone/epoxy tissés 3D** - gain de masse = 500 kg
- **Cas des aubes fan**
 - 18 aubes / moteur et 2 moteurs / avion
 - **60-65 monocouloirs Airbus / mois en 2020 ≈ 25.000 aubes / an**
 - 30.000 aubes/an prévues en 2020 -> **2 usines de production dédiées** (Commercy-Meuse, Rochester USA), ≈ 1.000 emplois



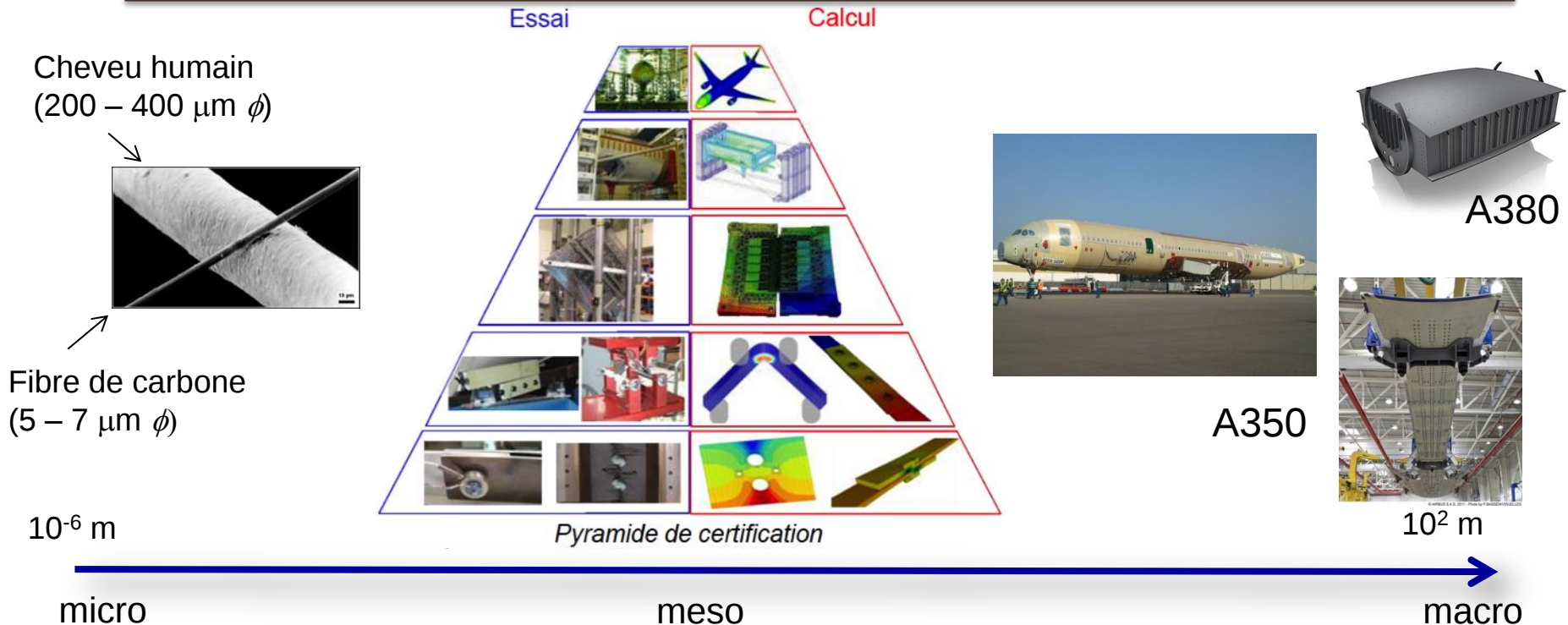
LEAP - CFM Int. (50/50 Safran / GE)



Composites = une *histoire d'échelle*

- La matière là où il faut « *the right material at the right place* »

Force de nos activités = **Matière – Procédés – Propriétés**
Modélisation & Caractérisation à toutes les échelles



Composites et Matériaux avancés, Assemblages

■ GT3 Composites, et généralités sur les composites (S. Drapier – Mines Saint-Etienne)

■ Exemple, Chaire Hexcel-Mines Saint-Etienne

Modélisation numérique avancée pour l'élaboration par infusion de composites structuraux de nouvelle génération (S. Drapier – Mines Saint-Etienne)

■ Focus : Composites issus des matériaux naturels pour les applications aéronautiques (C H Park – Mines Douai)



Chaire industrielle Hexcel – Mines Saint-Etienne

Exemple du contrôle des propriétés *via* le
procédé

S. Drapier



Fondation

Chaire Industrielle Hexcel

*Modélisation numérique
Avancée pour l'élaboration par
Infusion de composites structuraux de
nouvelle génération*

S. Drapier

Sous le parrainage de



AIRBUS



SAFRAN
AEROSPACE · DEFENCE · SECURITY

Evolution des Composites en Aéronautique

Pénétration des composites



Message de l'ensemble des clients Hexcel pour les nouveaux programmes

"Technology selection will be done with the cost balance"

Evolution des Technologies Composites



Procédé Autoclave

\$\$\$



Procédés hors autoclave ?
Dont l'infusion sous vide ?



2015

Années

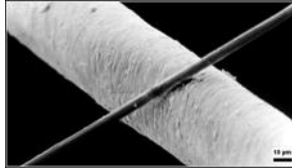
Pour les pièces de structures, les procédés dits *hors autoclave* sont une rupture matériaux et technologies

Les procédés par voie humide - LCM



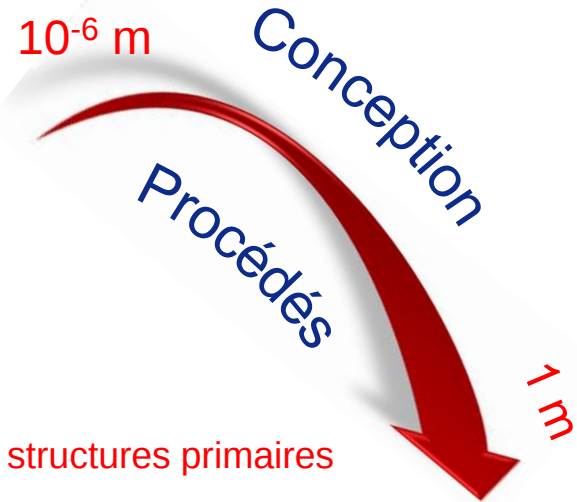
Résine
Thermodur.
/Thermoplastique

Cheveu humain
(200 – 400 μm ϕ)



Fibre de carbone
(5 – 7 μm ϕ)

- **Dimensions/Géom**
- **Fractions de fibres**
- **Vides** - <1% pour les structures primaires



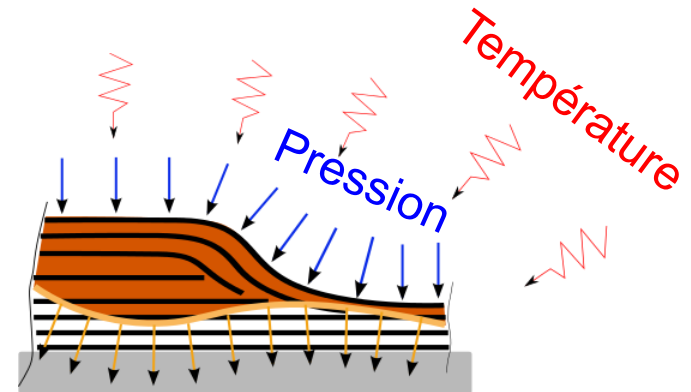
Chaire Hexcel-
Mines St-Étienne



Réponses scientifiques – approche multi-physique et multi-échelle

■ Les physiques à considérer

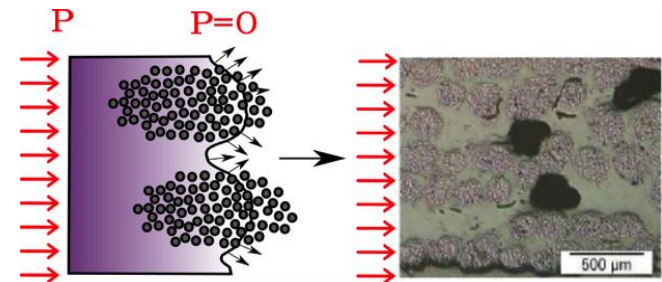
Infiltration d'une résine thermo-réactive depuis un lit fluide vers/dans un réseau fibreux (TRES) déformable orthotrope non-linéaire



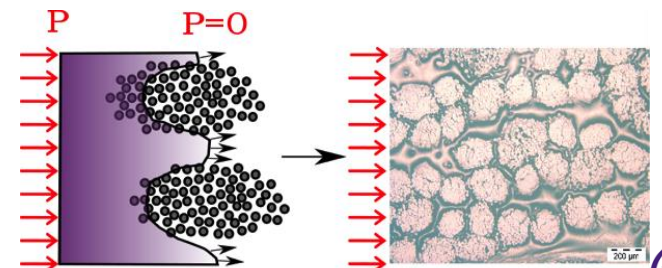
■ Les échelles à considérer – du micron (10^{-6} m) au (déca)mètre



$$F_{\text{visco}} < F_{\text{cap}}$$



$$F_{\text{visco}} > F_{\text{cap}}$$



Relations Hexcel – Mines Saint-Étienne -

> 2005 → Chaire Hexcel - modélisation échelle macro

■ Investissement collectif – SMS-Mines, 2007-2012



J. Bruchon
MA Maths Applis
2008



N. Moulin
MA Modélisation Numérique
2010



P.-J. Liotier
MA Physico-Chimie
2012

■ Hexcel-Mines = collaboration pérenne

- 8 thèses, ~ 800 k€ de financement, > 30 articles cités > 350 fois
- 2 projets majeurs : FP7 INFUCOMP, FUI LCM-Smart



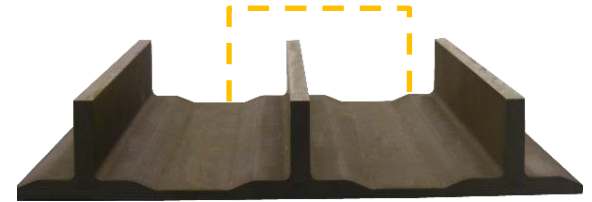
Cluster Intel Xeon; 224 cœurs, 500 Go RAM



Installation semi-industrielle d'élaboration

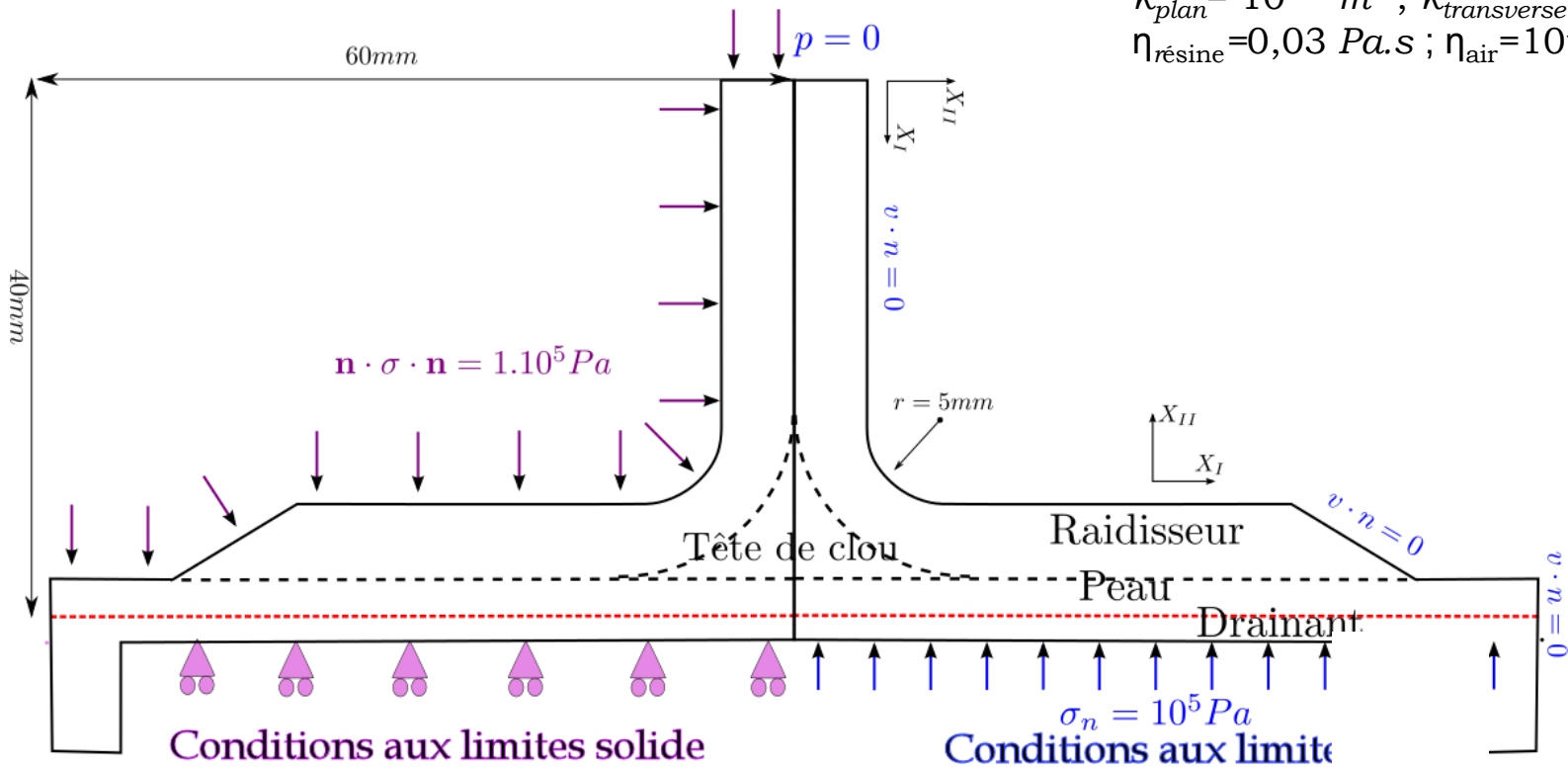
Simulation de géométries industrielles – échelle des procédés

■ Infusion d'un raidisseur en "T" (avec déformation mécanique)



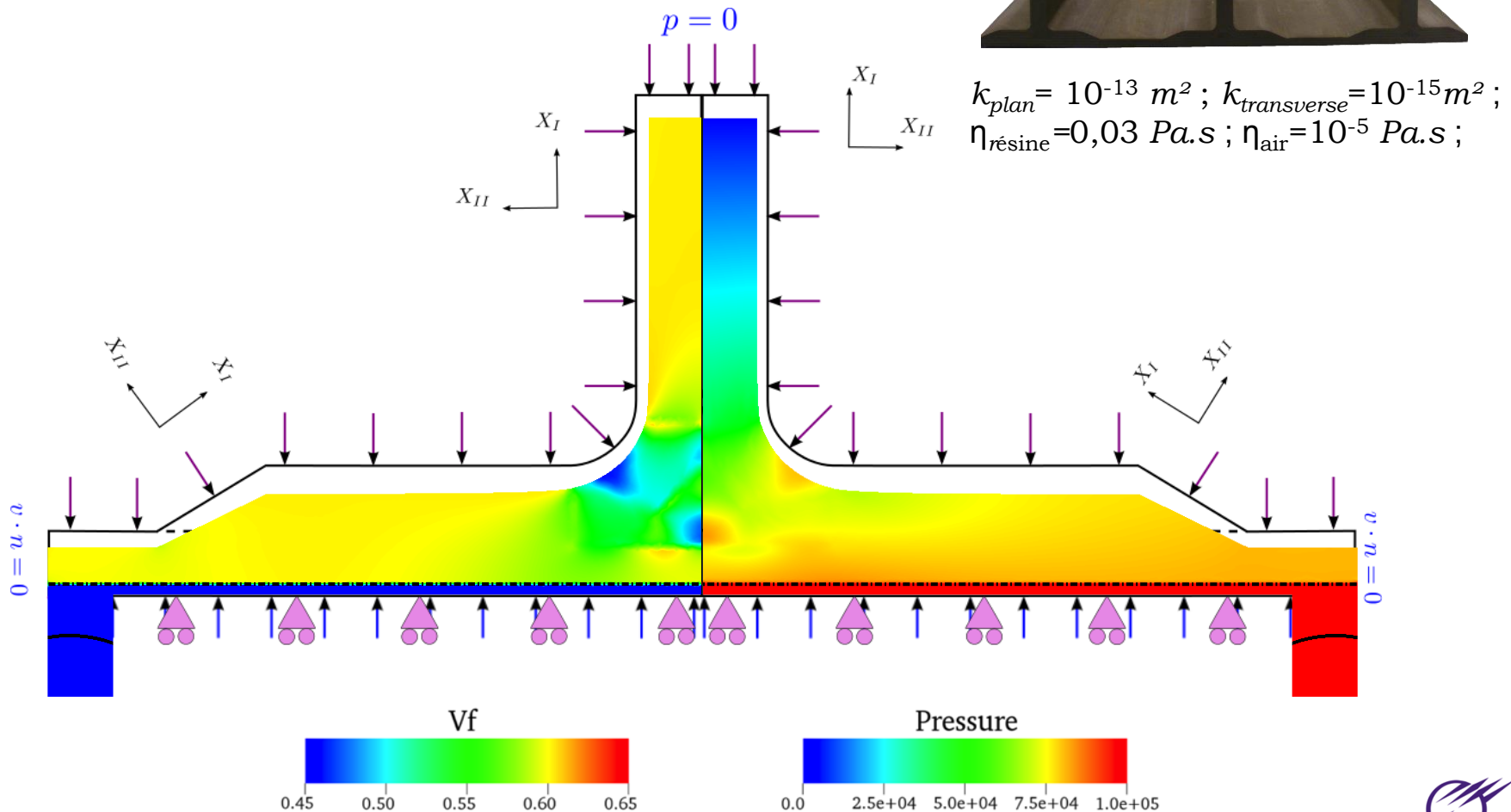
$$k_{plan} = 10^{-13} \text{ m}^2 ; k_{transverse} = 10^{-15} \text{ m}^2 ;$$

$$\eta_{résine} = 0,03 \text{ Pa.s} ; \eta_{air} = 10^{-5} \text{ Pa.s} ;$$



Simulation de géométries industrielles – échelle des procédés

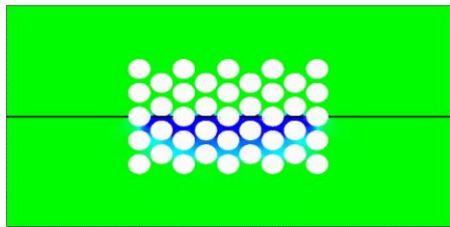
■ Infusion d'un raidisseur en "T" (avec déformation mécanique)



Vers des simulations réalistes

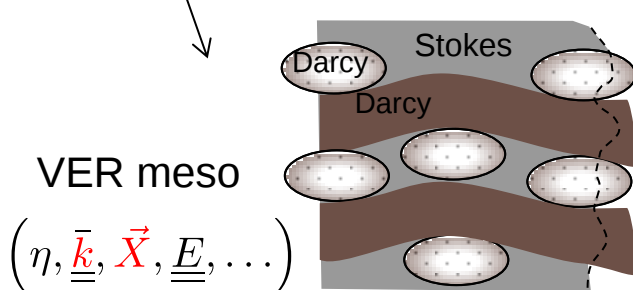
■ Simulations plus riches et robustes (et caractérisation associée) – Temps de calcul ↗↗↗

- Physique plus riche
- Plus de détails géométriques, plus de fibres dans les micro-structures, ...

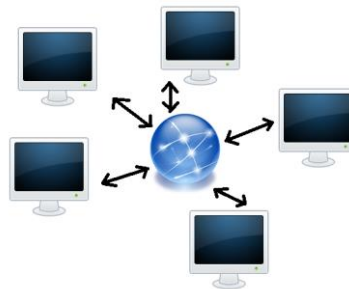


VER micro
 $(\eta, \gamma_{SL}, \vec{X}, \dots)$

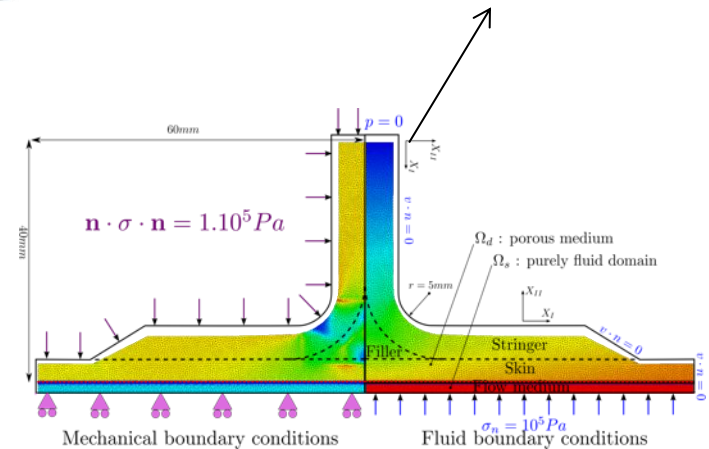
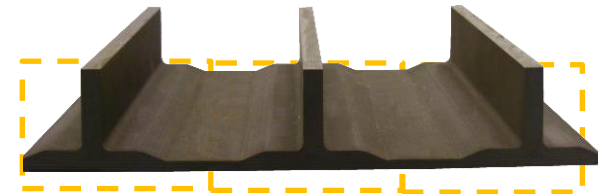
$$\bar{k}(\vec{X}, s) = \left\langle \frac{\nabla P}{\eta v} \left(\vec{X}, \gamma_{sl} \right) \right\rangle$$



Clustering



Point de Gauss,
FE2, Arlequin, ...

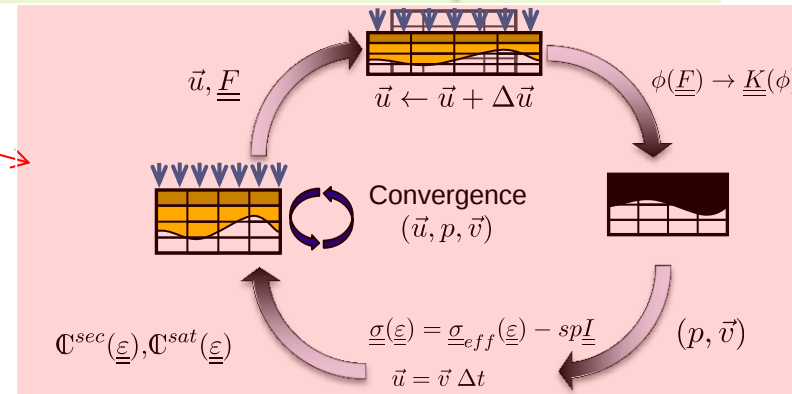
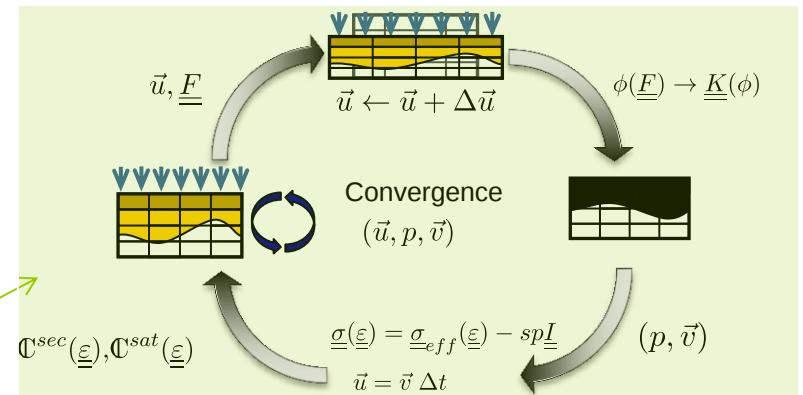
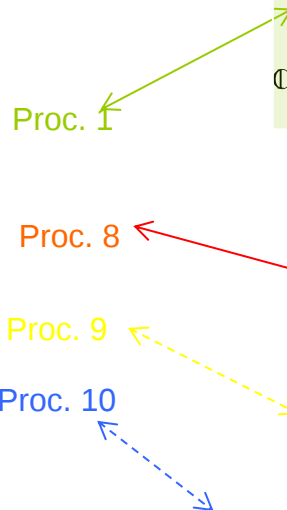
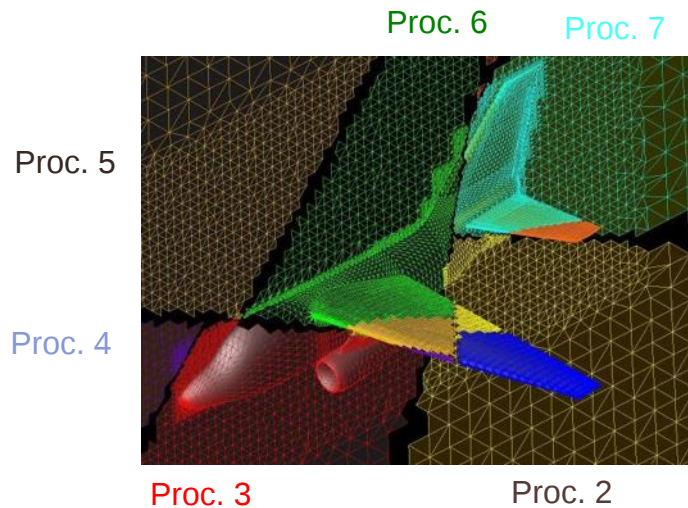


Vers des simulations réalistes- *HPC*

■ Spécificité de nos couplages en calculs intensifs - itérations

- Non-linéarités matériaux et géom.
- Couplage solide-fluide

Σ sous-problèmes + RACCORDS



■ Mines Saint-Etienne investit dans le HPC en ingénierie

- Cluster de 400 cœurs (en *Infiniband*)
- Compétences

Pour résumer – Chaire Hexcel-Mines Saint-Étienne

⇔ Simuler l'infusion de pièces complexes 3D

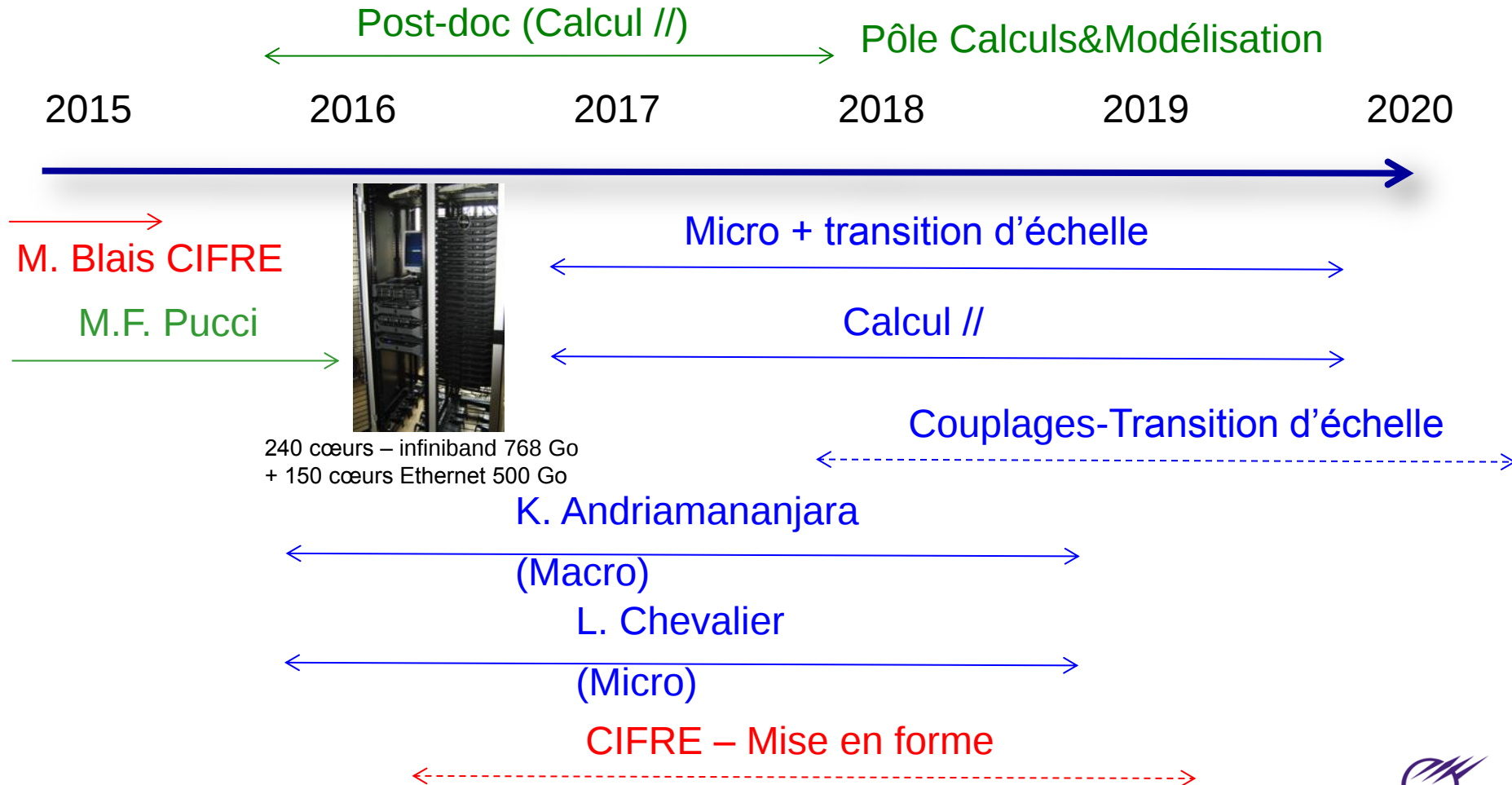
- **Connaissances au niveau macro bien établies** mais pas encore adaptées aux exigences de l'aéro
- **A l'échelle locale – quasiment tout à faire**
 - **Interactions hydro-mécaniques locales** essentielles mais *verrous*
 - Modélisation – faibles tensions de surface, interfaces dynamiques
 - Caractérisation de la micro-structure – traitement et extraction d'images
 - **Remontée d'échelle** ⇔ intégration calcul haute performance

Chaire Hexcel-Mines Saint-Étienne
Budget consolidé > 2,2 M€; ≈ 20 homme.an

Pour résumer – Chaire Hexcel-Mines Saint-Étienne

⇔ Simuler l'infusion de pièces 3D

Ingénieur de Recherche Hexcel détaché à temps partiel sur la Chaire
et Equipe de développement technologique





Fondation

Chaire Industrielle Hexcel

*Modélisation numérique
Avancée pour l'élaboration par
Infusion de composites structuraux de
nouvelle génération*

S. Drapier



Sous le parrainage de



AIRBUS



SAFRAN
AEROSPACE · DEFENCE · SECURITY

Composites et Matériaux avancés, Assemblages

- **GT3 Composites - généralités sur les composites (S. Drapier – Mines Saint-Etienne)**

- **Exemple, Chaire Hexcel-Mines Saint-Etienne**

Modélisation numérique avancée pour l'élaboration par infusion de composites structuraux de nouvelle génération (S. Drapier – Mines Saint-Etienne)

- **Focus : Composites issus des matériaux naturels pour les applications aéronautiques (C H Park – Mines Douai)**