

AIRCRAFT ENGINES

Overview & Challenges in Composite process simulations

J. SCHNEIDER
Aussois / 24-01-2024



Aussois 2024 Simulation et instrumentation des procédés de fabrication - 23-24 janvier 2024

Vue d'ensemble et challenges de la simulation des procédés composite à renforts 3D @Safran Aircraft Engines

J. SCHNEIDER¹, M. SANKARE¹, P.-A. POULET¹, J. NI¹, T. GODON¹

¹ : Safran Aircraft Engines
Rond-Point René Raynaud - 77550 Moissy-Cramayel
e-mail julien.schneider-die-gross@safran.com

Cette exposé aura pour but de présenter l'ensemble des simulations numériques de fabrication des pièces composites à renforts tridimensionnel. Un focus sera fait sur les pièces actuellement industrialisées, mais aussi sur celles en cours de développement.

Après une mise en contexte de l'industrialisation de ces structures composites à hautes performances obtenues par tissage de préforme et injection RTM, il sera présenté brièvement les gammes de fabrication des 2 principales pièces composites du module de soufflante (FAN) du moteur LEAP. Il sera aussi discuté de diverses thématiques numériques telles que la thermique moule, l'injection, la mise en forme et les contraintes internes induites par l'ensemble du processus. En parallèle, il sera abordé les besoins de chaînage d'outils numériques tout en considérant la simulation multi-échelles, impérative à la compréhension et la maîtrise de tels composites architecturés, hétérogènes et anisotropes.

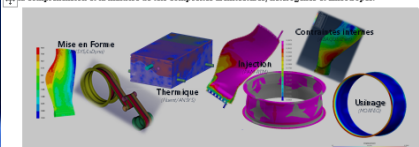


Figure 1 : Vue d'ensemble des simulations procédés des composites tissés 3D

Lors de la présentation de tous ces thèmes et méthodes numériques, un accent sera donné sur l'état de l'art à Safran Aircraft Engines sur les différents types de simulation mais aussi sur le besoin impératif du suivi, de l'instrumentation et de la caractérisation afin d'obtenir des modélisations réalistes, voire prédictives. Pour cela il sera aussi abordé les partenariats académiques existants et à construire permettant de relever les challenges envisagés par SAFRAN tant côté industrialisation que ~~Moteurs/Procédés~~.

Agenda

01

Contexte

02

Simulations de la mise en forme

03

Simulations thermique & injection

04

Simulations des contraintes internes

05

Chaine de calcul multi-échelles

06

Conclusions et futurs challenges !



Chapter 1

Contexte



Challenges moteurs :

- **LEAP en production !**

- Beaucoup de pièces et quelques chiffres...

- **>150k aubes et cales, ~10k carters**



- **3 usines :**

- Rochester (US), Queretaro (Mex), Commercy (Fr)
- Cadences élevées

- **RISE/OPEN FAN en développement !**

- Quelques pièces mais bcp de réactivité...

- **Hélice, OGV...**



- **Schéma industriel en cours de réflexion et construction**

- Profiter de l'expérience LEAP !
- Pousser au maximum les technologies composites innovantes !

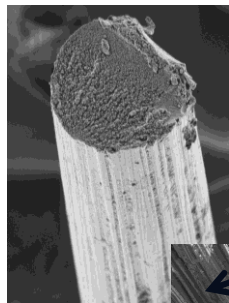
Certifications réalisées en 2014-15

Certification prévue en >2030

Rappel sur les composites Interlock « SAFRAN »

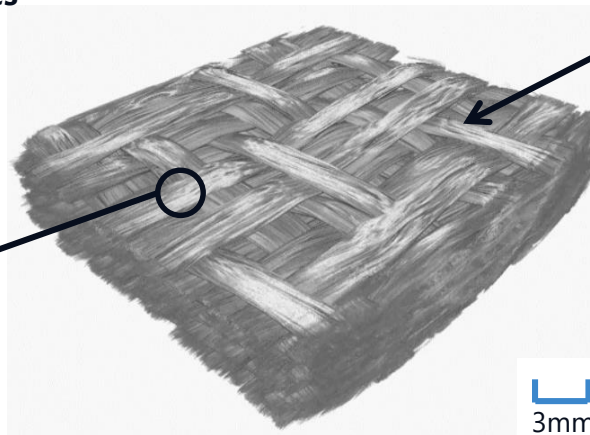
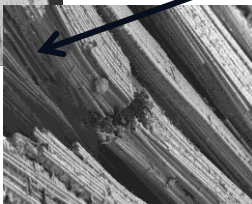
- 3 échelles à considérer dans un matériau composite tissé

Matériaux architecturés, multi-échelles, hétérogènes et anisotropiques



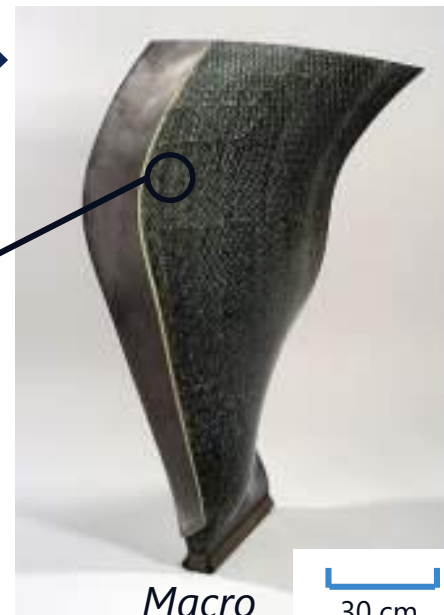
3µm

Micro



3mm

Meso

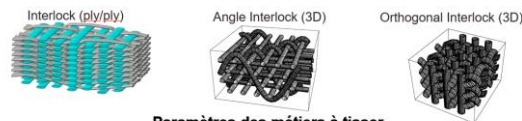
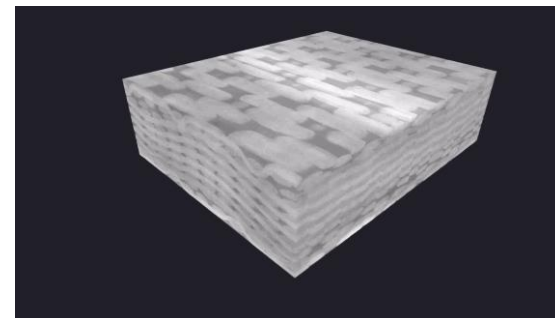
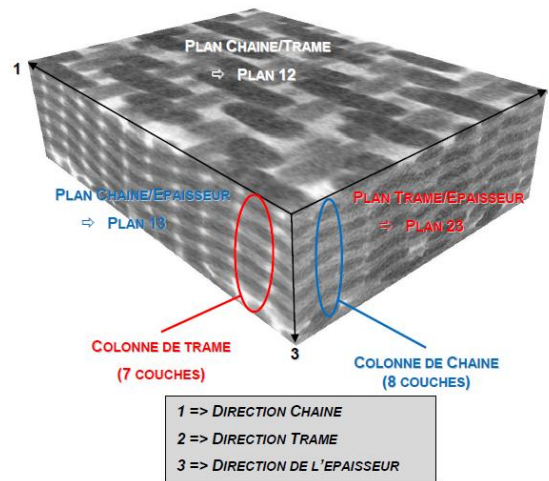


30 cm

Macro
(part/structure)

**Propriétés dépendantes des constituants (fibre/matrice)
et de leur organisation au sein du VER**

Rappel sur les composites Interlock « SAFRAN »



Paramètres des métiers à tisser
+
choix de l'armures
+
Taille des torons

Définition quasi-illimitée de Cellules Élémentaires (VER) !

Gammes Aubes & Carter FAN

▪ AUBE FAN :

Montage Métier

Tissage

Mise en Forme

Chauffe + Inj (RTM)

Usinage

CND+Dim
{ μ CT-US-MMT}

Collage
{BA-PU-WS}

▪ CARTER FAN :

**Finitions et contrôle
géométrique final
avant livraison !**

Montage Métier

Tissage

+ Enroulement

Positionnement
+ dé/ré-
enroulement

Etuve + Inj (RTM)

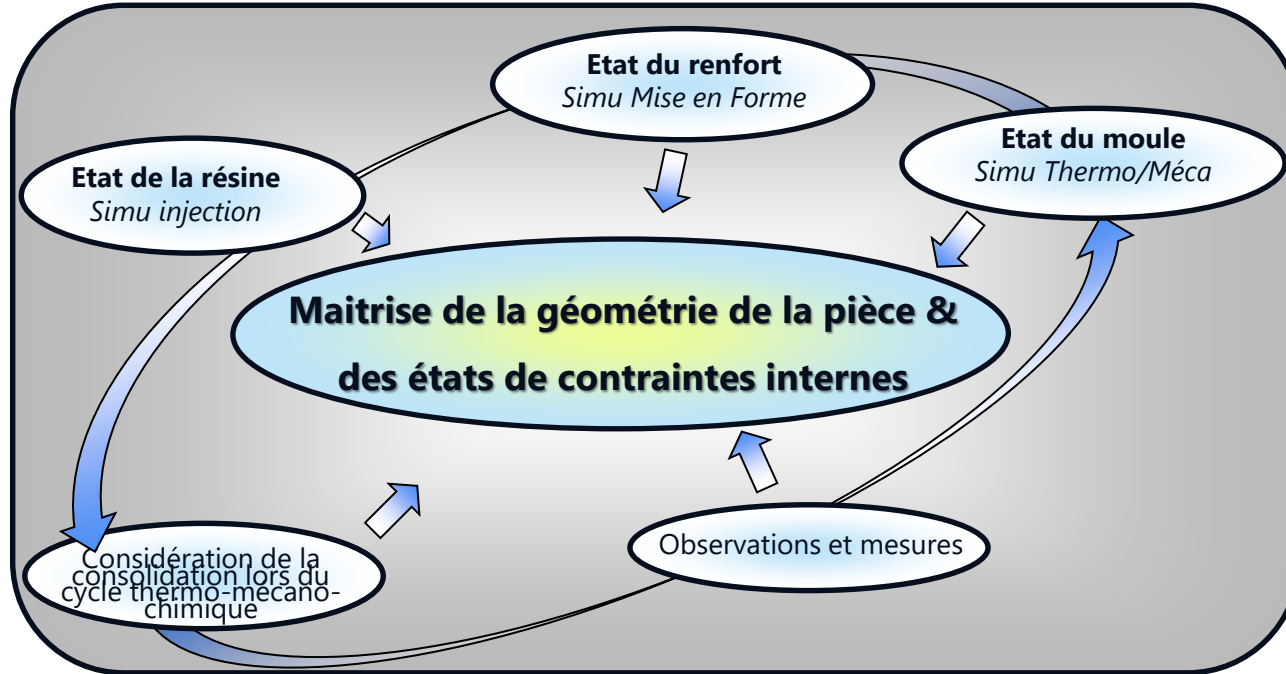
Usinage

CND+Dim
{US-MMT}

Collage
{ply+panneaux}

Simulations multi-domaines

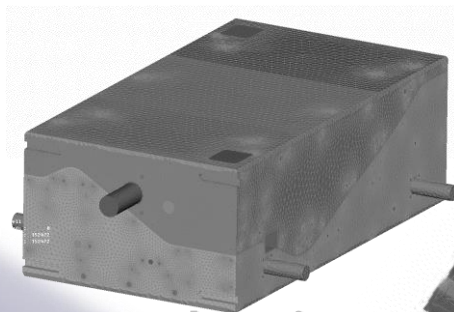
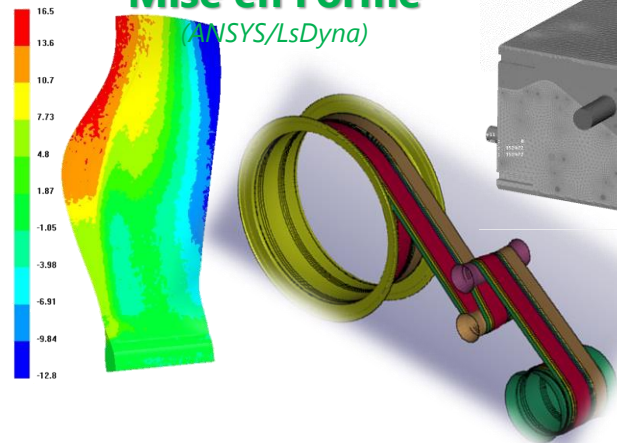
- Gamme de fabrication complexe → Le matériau est conçu en même temps que la pièce !



→ Permet d'obtenir une simulation multi-fidélité et de comprendre les différents phénomènes en jeu, leurs effets, de les classer, les découpler...

Mise en Forme

(ANSYS/LsDyna)



Thermique
(Fluent/ANSYS)



Injection
(PAM-RTM)

Contraintes internes
(ABAQUS/Zset)



Usinage
(MORFEO)



Displacement
0.176

Chapter 2

Simulations de la Mise en Forme



Mise en forme des tissés 3D :

Plusieurs approches de simulations en fonction des besoins @SAE :

MACRO Analytique : Algo « fishnet » (QF) [Borouchaki H, 2003]

- Rapide et efficace !
- Limité à des mises en forme simple et 2D
- Limité à des comportements textile "simple"

→ Méthode utilisée pour avoir une représentation globale de l'orientation

- Intérêt pour les simulations Meca et Process MACRO → Orientation des éléments



MACRO Numérique : LdC NL

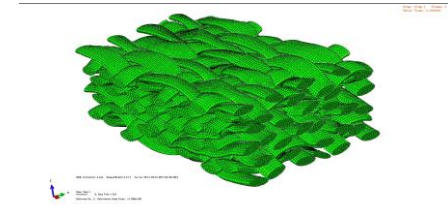
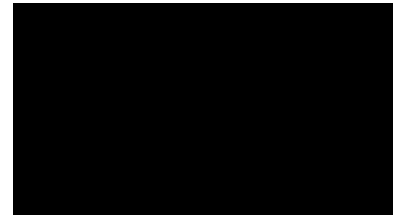
- Résolution complexe : grandes transformations → Explicite
- Permet de considérer des comportements textile 3D

→ Méthode utilisée dans des cas de mise en forme complexe de grande dimensions

MESO Numérique : LdC

- Résolution complexe + contacts → Explicite et HPC
- Avoir une bonne géométrie meso et gérer les maillages
- Permet de considérer des comportements textile 3D complexes à l'échelle pertinente (anomalies, bifurcations...)

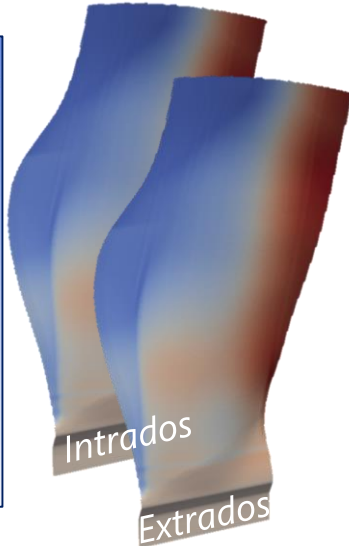
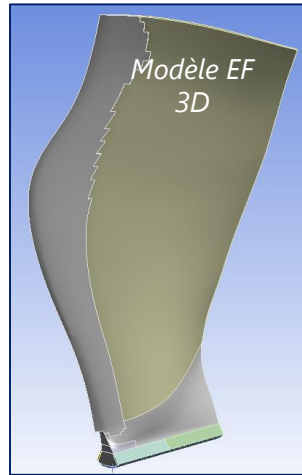
→ Méthode utilisée dans des cas de mise en forme complexe et de dimensions limitées



→ Pas de considération de l'organisation textile (except phénoménologie) !

Mise en forme de l'aube FAN

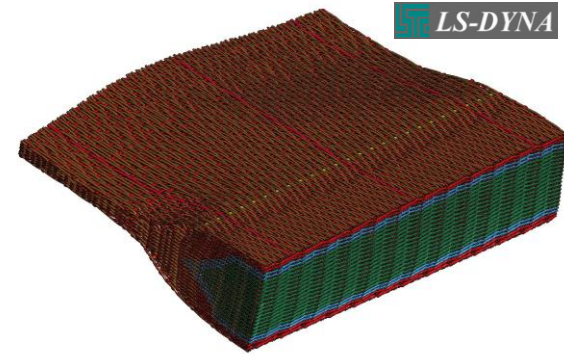
- Une aube est tissée avec ~6000 torons
 - → la distance terre-lune en fibre de Carbone !
- 2 approches de simulations :
- Rapide & efficace : Basée sur l'algorithme du filet :



Qq secondes de calcul

- Complexe & précis : Approche mesoscopique :

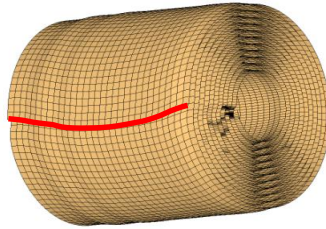
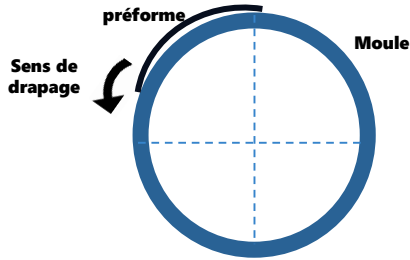
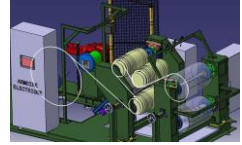
Preform inflation model
Time = 0



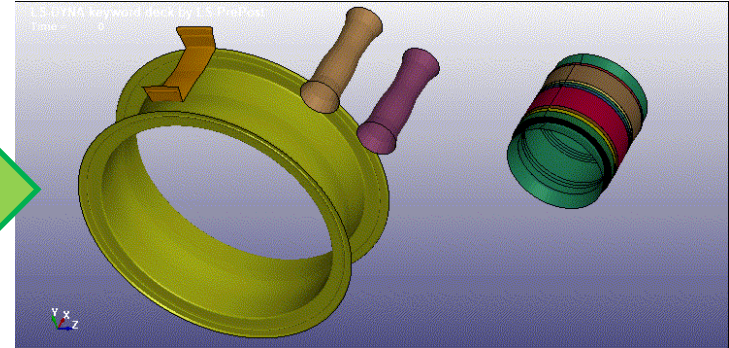
2J de calcul
(12 CPU & 52GO RAM/Proc)

Mise en forme du Carter FAN

- Un carter tissé LEAP est un « long tapis » enroulé sur un diamètre de ~2m
 - → le tapis fait 25m de long et 1m de large !
- 2 approches de simulations :
- Rapide & efficace : Fishnet (coord. Cylindrique)



- Complexe & précis : Approche macro :



*MAT249 : Shell, orthotrope, hyperélastique → Explicite 



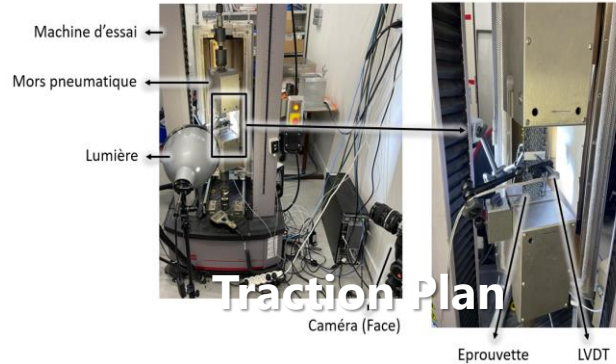
1 Jours de calcul !!!
(16 CPU & 32GO RAM)





Essai sur préformes carter :

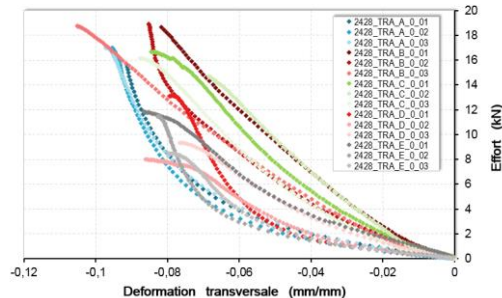
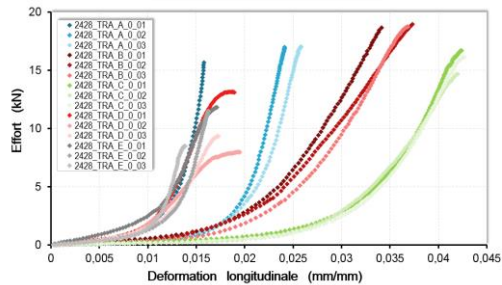
- **Essais de Traction plan, Compression HP, Cisaillement plan et HP et Flexion**
 - Instrumentations avancées pour mesure des déformations dans toutes les directions !!!



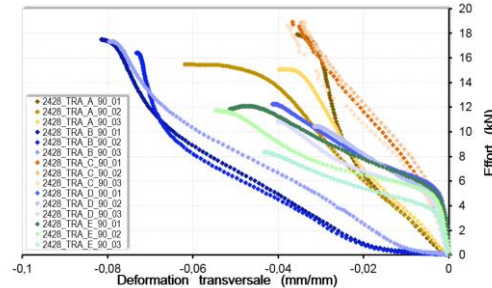
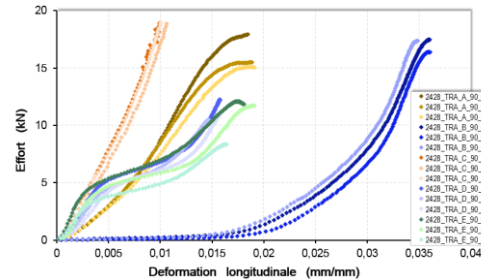
Essai de traction sur les différents tissages du Carter :

Qu'est-ce qui se passe dans toutes les directions ?

Traction CHAÎNE

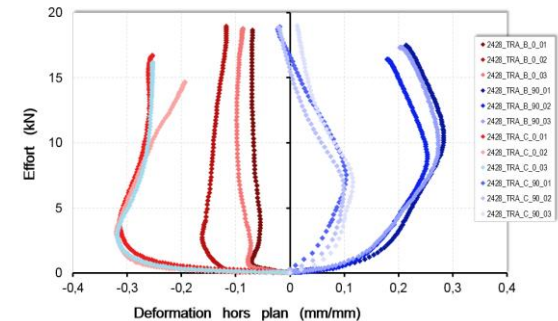


Traction TRAME



CHAÎNE

TRAME



→ Dépendance forte du textile et de la direction de sollicitation sur le comportement!

→ Coefficient de poisson nu23 négatif (matériaux auxétiques) !

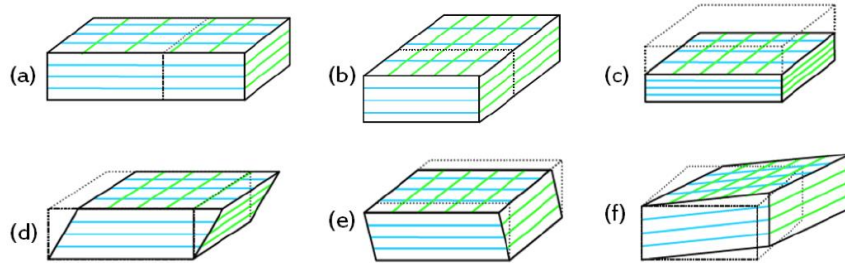
LdC Hyperélastique adaptée au Carter ?



A. Charmetant, E. Vidal-Sallé, and P. Boisse. Hyperelastic modelling for mesoscopic analyses of composite reinforcements. Composites Science and Technology, 71(14):1623–1631, September 2011.

Sylvain Mathieu. Modélisation Du Comportement Mécanique Lors Du Procédé de Mise En Forme et Pyrolyse Des Interlocks CMC. PhD thesis, INSA de Lyon, December 2014.

■ Schéma des différents mode de déformation : [Charmetan A. 2011]



Mode de déformation	Invariant
Élongation sens chaîne	$I_{elong1} = \ln(\sqrt{I_{41}}) = \ln(\lambda_1)$
Élongation sens trame	$I_{elong2} = \ln(\sqrt{I_{42}}) = \ln(\lambda_2)$
Cisaillement dans le plan	$I_{cp} = \frac{I_{412}}{\sqrt{I_{41}I_{42}}} = \sin(\gamma)$
Compression transverse	$I_{comp} = \frac{1}{2} \ln\left(\frac{I_3}{I_{41}I_{42}}\right) = \ln(\lambda_3)$
Cisaillement transverse sens chaîne	$I_{ct1} = \frac{I_{413}}{\sqrt{I_{41}I_{43}}} = \sin(\alpha_{13})$
Cisaillement transverse sens trame	$I_{ct2} = \frac{I_{423}}{\sqrt{I_{42}I_{43}}} = \sin(\alpha_{23})$

Pour préformes interlock:

- l_1 : direction de chaîne
- l_2 : direction de trame
- l_3 : direction hors-plan

$$L_{ij} = l_i \otimes l_j$$

$$I_{4i} = l_i \cdot C l_i = C : L_{ii}$$

$$I_{4ij} = l_i \cdot C l_j = C : L_{ij}$$

$$I_{5i} = l_i \cdot C^2 l_i = C^2 : L_{ii}$$

Couplage Invariants : [Mathieu S. 2014]

$$I_{comp}^* = \frac{1}{2} \ln\left(\frac{I_3}{I_{41}I_{42}(1 - I_{cp}^2)}\right) = \ln(\lambda_3)$$

Cf. Présentation E. VIDAL SALLÉ
le 24/01 @17h40

LdC Hyperélastique Orthotrope Couplée



Yuan Yao, Xiongqi Peng, and Youkun Gong. Influence of tension-shear coupling on draping of plain weave fabrics. Journal of Materials Science, 54(8):6310–6322, April 2019.

Florian Schäfer, Henrik O. Werner, Frank Henning, and Luise Kärger. A hyperelastic material model considering biaxial coupling of tension-compression and shear for the forming simulation of woven fabrics. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 165:107323, February 2023.

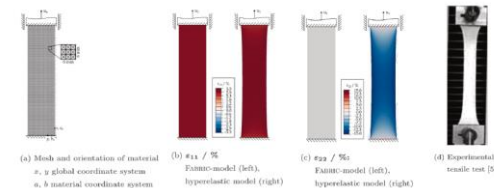
- En cours de développement pour l'application en simulation d'enroulement
- Approche proposée:
 - Les invariants restent inchangés
 - On modifie le potentiel de déformation
- Introduction du couplage entre la tension sens chaîne, trame et la compression hors-plan:

$$W_{\text{interlock}} = W_{\text{coupled}}(I_{\text{elong1}}, I_{\text{elong2}}, I_{\text{comp}}) + W_{\text{cp}}(I_{\text{cp}}) + W_{\text{ct1}}(I_{\text{ct1}}) + W_{\text{ct2}}(I_{\text{ct2}})$$

$$w_{\text{coupled}} = \begin{cases} w_t^{I_{\text{elong1}}} + w_t^{I_{\text{elong2}}} + w_c^{I_{\text{comp}}} & \text{si } I_{\text{elong1}} > 0, I_{\text{elong2}} > 0, I_{\text{comp}} \leq 0 \\ w_t^{I_{\text{elong1}}} + w_c^{I_{\text{elong2}}} + w_c^{I_{\text{comp}}} & \text{si } I_{\text{elong1}} > 0, I_{\text{elong2}} \leq 0, I_{\text{comp}} \leq 0 \\ w_c^{I_{\text{elong1}}} + w_t^{I_{\text{elong2}}} + w_c^{I_{\text{comp}}} & \text{si } I_{\text{elong1}} \leq 0, I_{\text{elong2}} > 0, I_{\text{comp}} \leq 0 \\ w_{\text{elong1}} + w_{\text{elong2}} + w_{\text{comp}} & \text{si non} \end{cases}$$

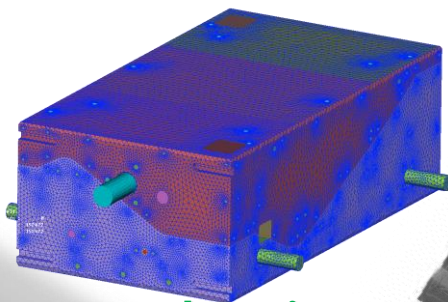


Guzman-Maldonado ☺



Mise en Forme

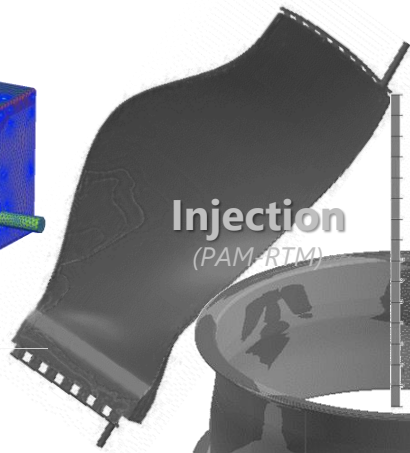
(ANSYS/LsDyna)



Thermique
(Fluent/ANSYS)

Injection

(PAM-RTM)



Contraintes internes

(ABAQUS/Zset)



Usinage
(MORFEO)

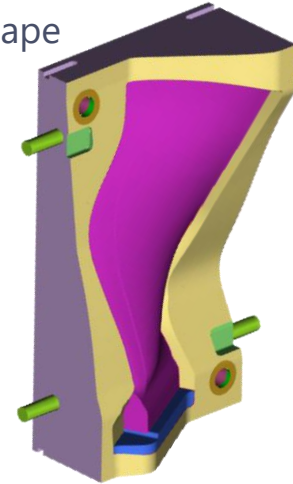


Chapter 3.1

Simulations **Thermique & Injection**

Moules RTM :

- **Les moules pour les pièces composites du module FAN doivent permettre :**
 - Des définitions et tolérances géométriques précises/fines : Aéro + zones critiques netshape
 - Des formes 3D complexes : contrainte aérodynamique
 - Des cadences de production élevées
 - **Les moules et les presses peuvent être conçus avec différents matériaux**
- ➔ **La simulation doit permettre de dimensionner ces pièces massives pour maîtriser l'aspect géométrique & la santé matière, tout en assurant la cadence et la rentabilité du programme moteur**

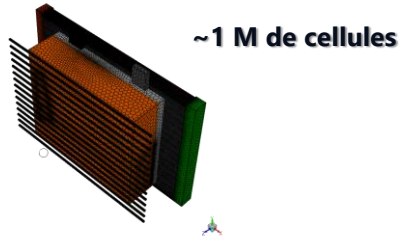


Calculs thermique & Thermo-méca : Pourquoi ?

■ Approche purement thermique :

■ Résolution CFD : FLUENT

- Rapide et moins contraignante en terme de calcul :
 - Géométrie ultra simplifiée avec Maillage polyèdres
 - Résolution du calcul plus rapide



➔ Permet de répondre rapidement à un questionnement design pour assurer par exemple une homogénéité thermique (régulation en cours)

■ Approche thermo-mécanique :

■ Résolution EF : ANSYS MECHANICAL

- Nécessite une définition du maillage plus précise :
 - Géométrie détaillée avec Maillage T4/10 (Skewness, ratio, etc)
 - Résolution du calcul rallongée fct description géométrique

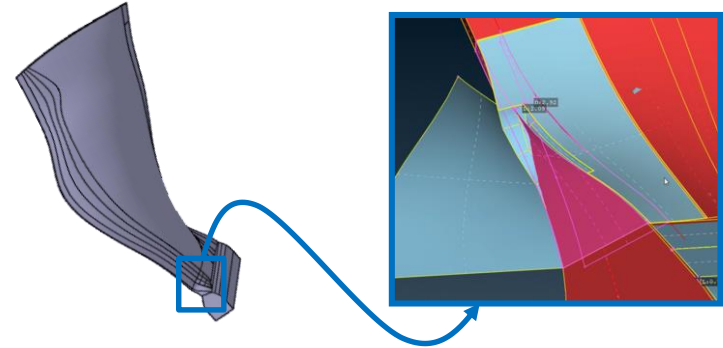
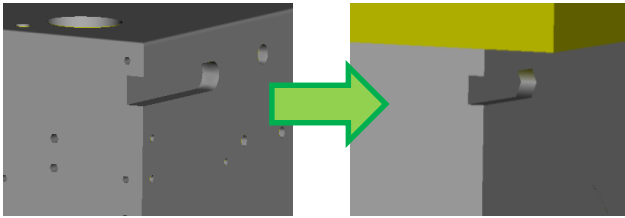


➔ Permet de répondre à des questionnements d'homogénéité de contact et/ou de déformation géométrique du moule

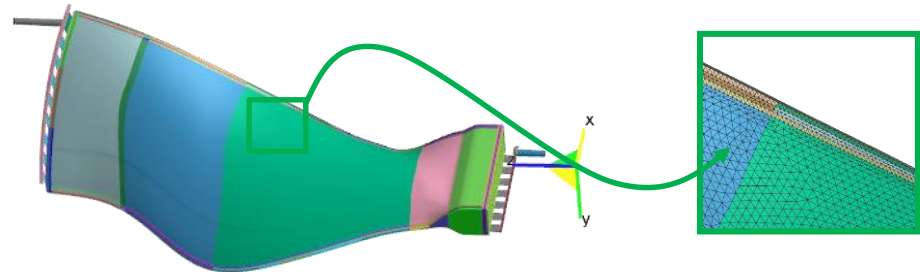
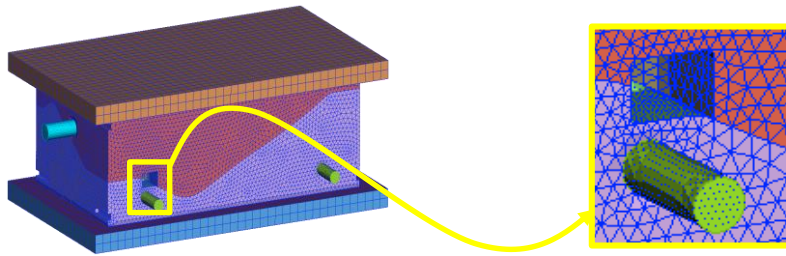
Moule RTM AUBE : Epurations & Maillages, une purge !

- Plusieurs étapes clés sont réalisées sur les géométries proposées par les BM/outilleurs :

- Epurations et simplifications des détails géométriques :



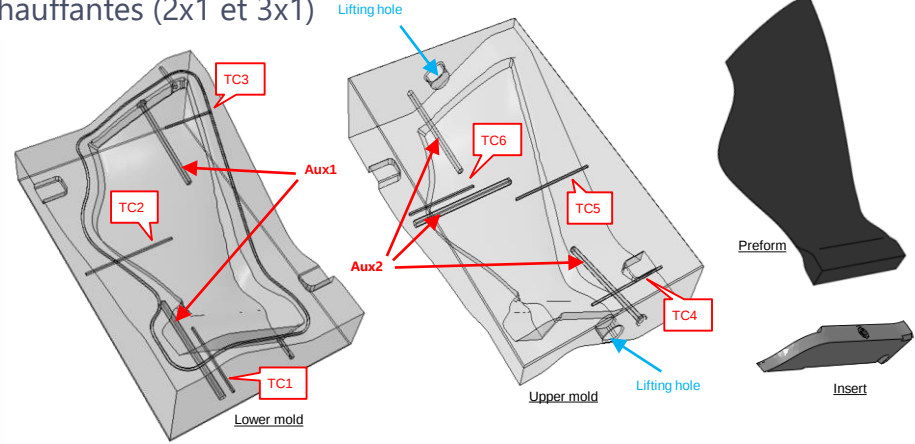
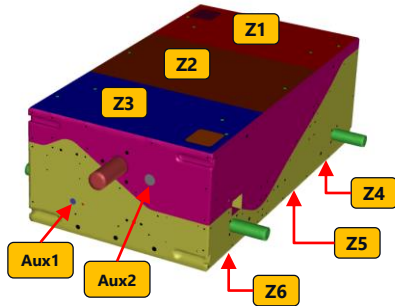
- Gestions des maillages au niveau des interfaces et des zonages matériaux CMO/runners :



Moule RTM AUBE : Protocole calibrage calcul thermique

■ Application d'une inspection thermique (TUS) pour chaque moule réceptionné

- Presse à plateaux chauffants (2x3zones) & Cartouches chauffantes (2x1 et 3x1)



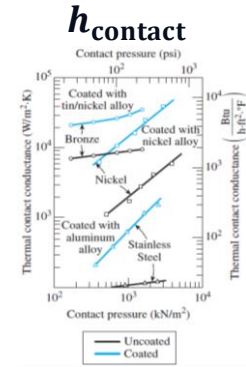
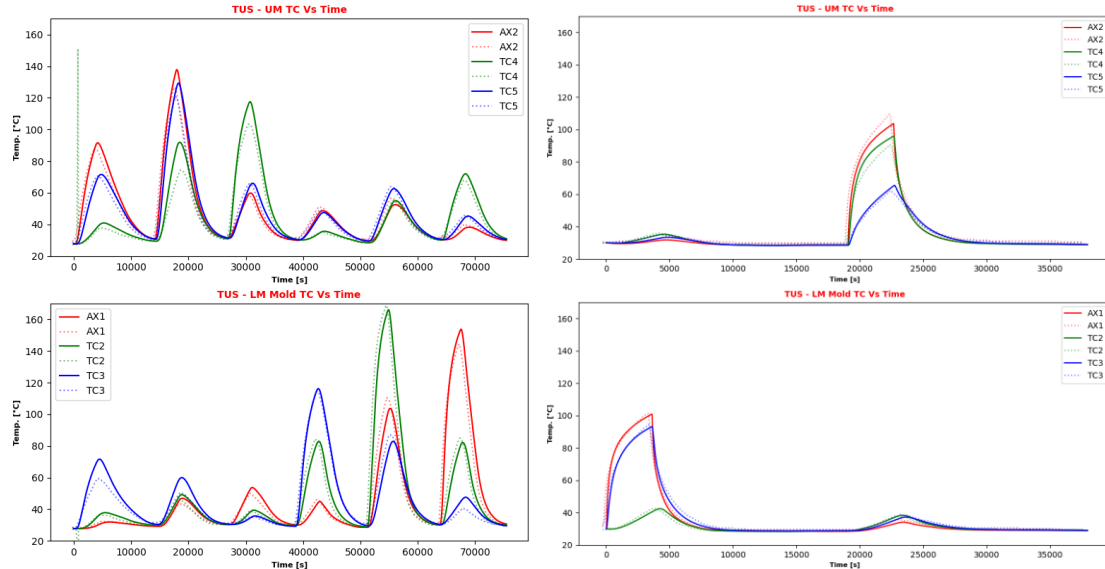
- **Conduction** : via Loi de Fourier ($\varphi = -\lambda \nabla T$) avec prise en compte des inerties (masses et Capa Calo)
- **Convection** : Prise en compte échange solide/air ($\varphi = HTC \times S_{mouillée} \times (T_{solide} - T_{CL})$) et des isolants
- **Contact** : Prise en compte des échanges entre solides avec résistance (et épaisseur virtuelle : $R_{TC} = \frac{e}{\lambda}$)

$$\varphi = \frac{1}{R_{TC}} \times S_{contact} \times (T_{solide} - T_{CL})$$



Moule RTM AUBE : Comparaison Expé/simu

■ Cycles thermiques zone par zone (6) et pour les cartouches chauffantes (2) vu par les TC



[Çengel et Ghajar, 2015]

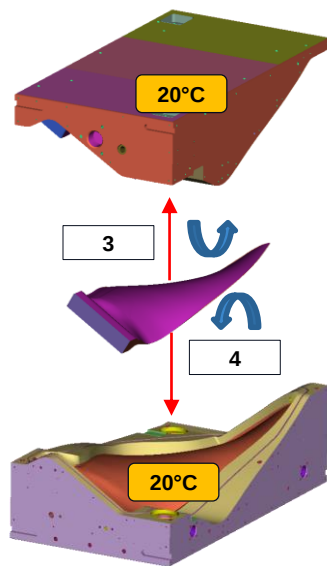
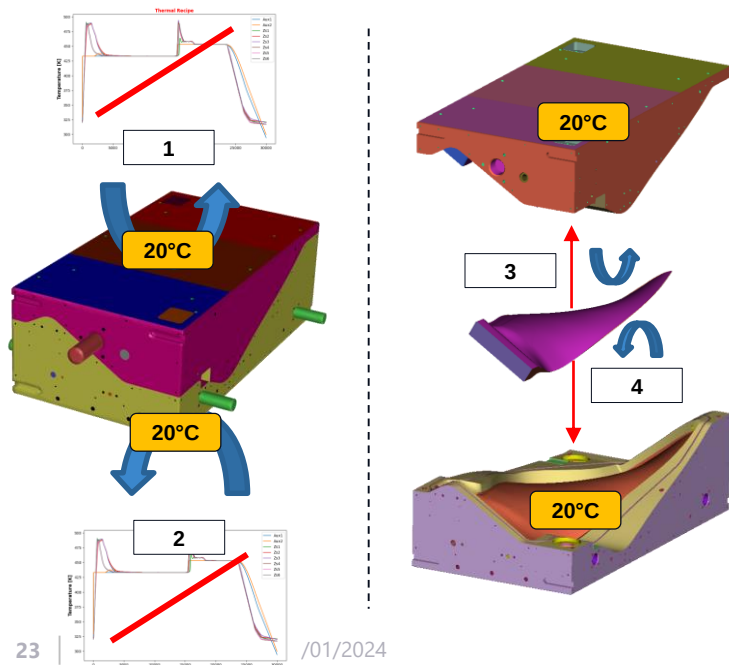


■ Identification des résistances thermiques h_{contact} entre le Moule / plateaux & cartouches

- Recalage avec delta de température inférieur à 10°C

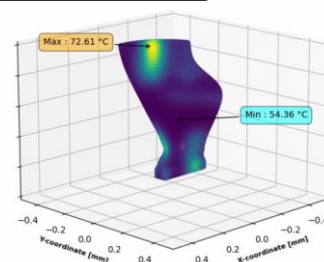
Moule RTM AUBE : Application du cycle thermique production

- Amélioration de la représentation physique :
 - Prise en compte de la séquence de démoulage



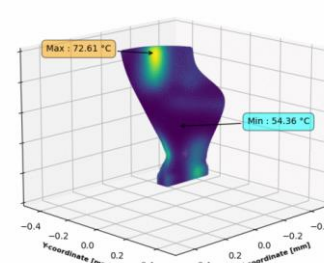
Temperature Gradient at 250 seconds

Sans démoulage



Temperature Gradient at 250 seconds

Avec démoulage



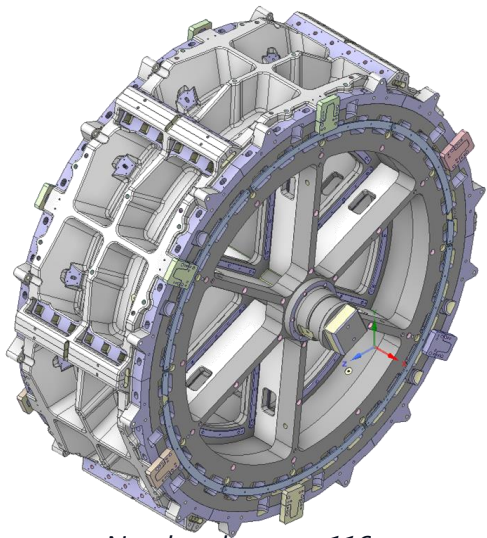
Phases 1 et 2 : Application d'un coefficient d'échange convectif (convection naturelle avec de l'air à température ambiante)

Phases 3 et 4 : Application d'une température ambiante sur l'ensemble du maillage. La résistance de contact CMO/Moule est adaptée pour correspondre à une conductance équivalente à de la convection naturelle de 10 W/m².K.

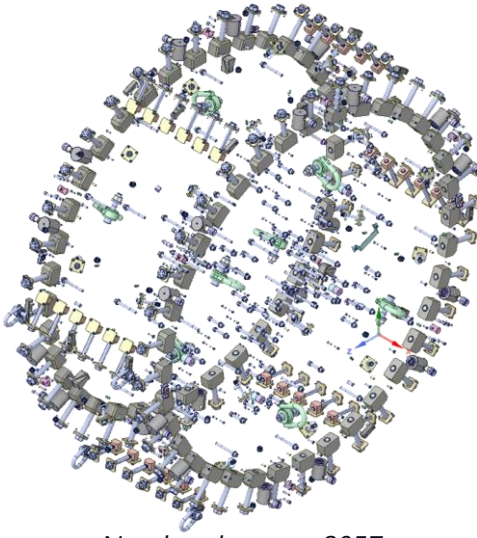
Le démoulage introduit une variation de température plus abrupte et importante sur l'aube lors de la phase de refroidissement
 ($\Delta T \approx 50^\circ\text{C}$ avec démoulage contre 40°C sans).

Moule RTM CARTER :

- CAO très complexe : Grand volume & Nb de corps !

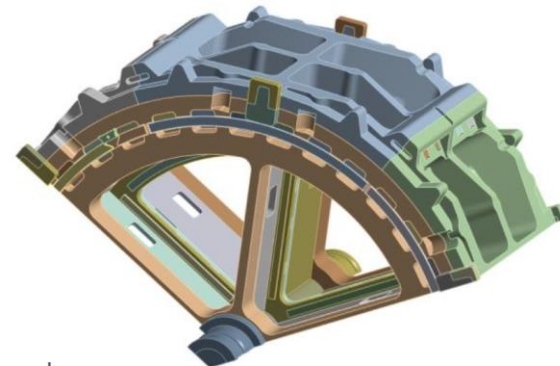


Nombre de corps: 116



Nombre de corps: 2057

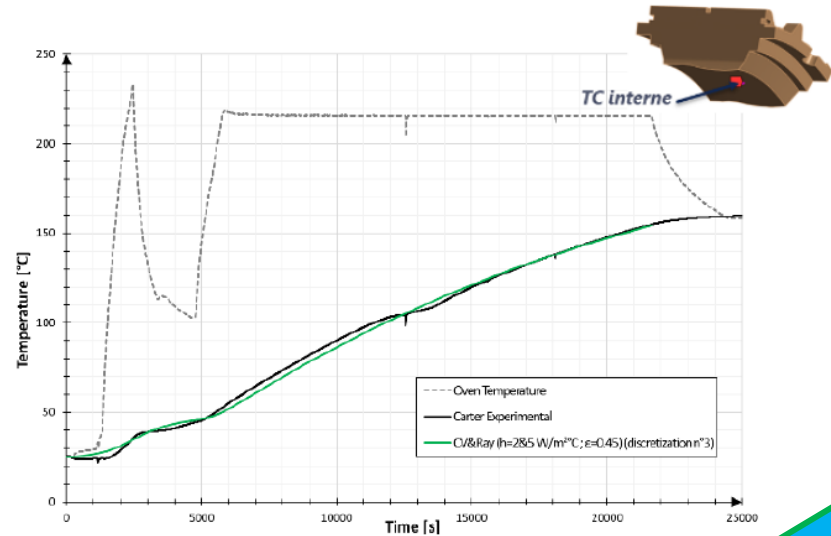
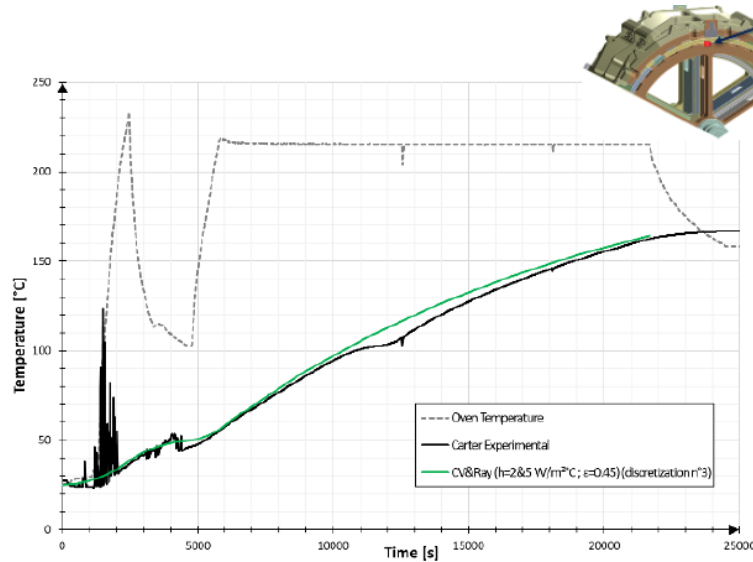
Epurations
Simplifications
Maillage



13M DDL !!!

Moule RTM CARTER : cycle thermique en four

- **Même stratégie avec positionnement de TC dans la cavité et recalage des h_{contact} & ε**
 - Différence importante : Chauffe en étuve pendant ~7h !

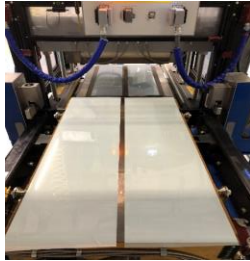


- Recalage satisfaisant avec $h=2\ \&\ 5\text{ W.m}^{-2}\text{.K}^{-1}$ et $\varepsilon=0,32\ \&\ 0,45$ pour les surfaces peintes

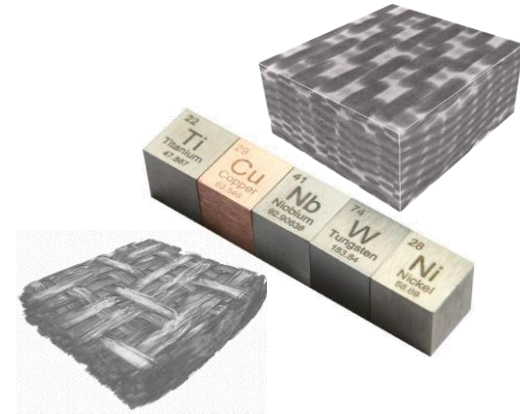
14h de calcul
(16 CPU & 200GO RAM)

Moule RTM AUBE : Comparaison Expé/simu

Recalage améliorable ?



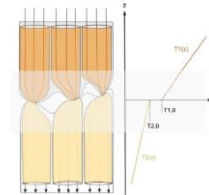
Utilisation papier pression à l'interface moule/presse @Commercy



Bcp de matériaux : Préforme, presse, moule, Composite...

→ Travaux en cours avec LTEN/CAPACITES (V. LE-LOUËT) :

- Conductance thermique Interface moule/presse et Moule/Préforme fct T&P
 - Caractérisation via plateaux « fluxmètres » (ASTM D5470)
- Caractérisations thermo-mécanique de tous les matériaux
 - Tenseur de conductivité thermique $[\lambda]$ par méthode flash laser
 - Capacité thermique (Cp) par calorimétrie différentielle à balayage (DSC)
 - Tenseur de Dilatation thermique (CTE) par dilatomètre linéaire



$$h_{contact} = \frac{\varphi}{T_{1,0} - T_{2,0}}$$



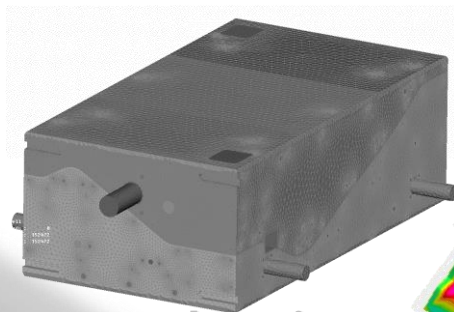
Mise en Forme

(ANSYS/LsDyna)



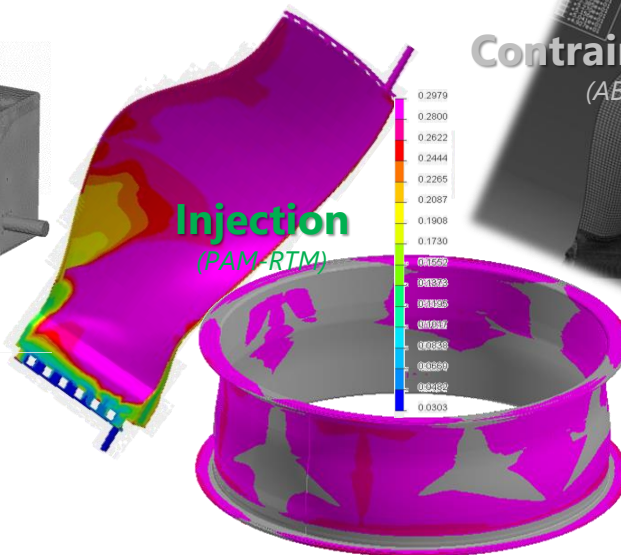
Thermique

(Fluent/ANSYS)



Injection

(PAM-RTM)



Contraintes internes

(ABAQUS/Zset)



Usinage

(MORFEO)



Displacement
0.176

Chapter 3.2

Simulations Thermique & Injection

Cavité Moule : Calcul d'injection sur pièces

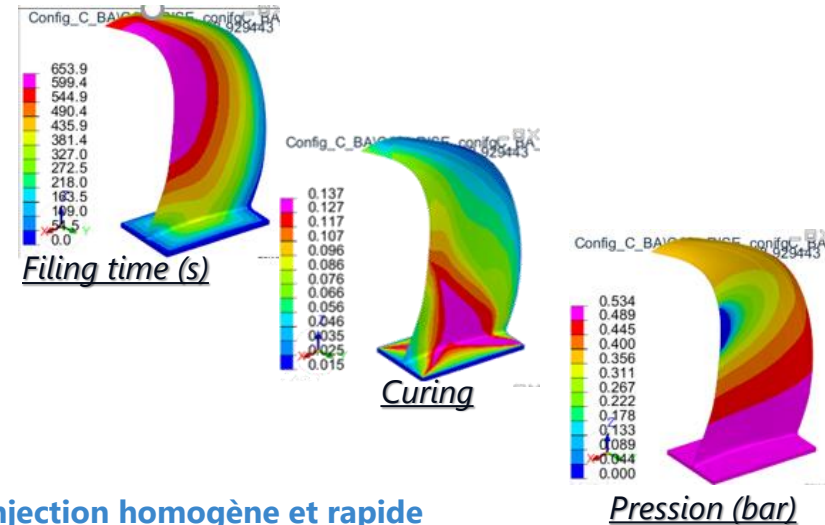


Darcy, H (1856) : Les fontaines publiques de la ville de Dijon ; exposition et application des principes à employer dans les questions de distribution d'eau

Vernet, N. (2013) : Étude des propriétés de mise en œuvre de renforts fibreux interlock tridimensionnels [Thèse de doctorat, École Polytechnique de Montréal].

Pupin C. (2017) : Développement d'outils de prévision de la porosité résiduelle d'origine chimique destinés à l'optimisation des paramètres de fabrication de pièces composites structurales en RTM

- Simulations avec les outils commerciaux : PAM-RTM pour remplissage [Darcy H, 1856] et polymérisation [Pupin C, 2017]
- Perméabilités basées sur caractérisations banc de perméabilité $k_1/k_2/k_3$ [Vernet N, 2013]
- Retex des injections avec Runners subits, passage dans les plans de joints, TVF local... → MàJ perméa impérative !!



Ces simulations permettent :

- Les positionnements optimum des I/O et runners pour une injection homogène et rapide
- Maitriser les positions des fermetures de front de résine

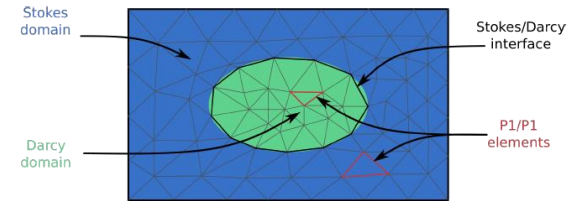
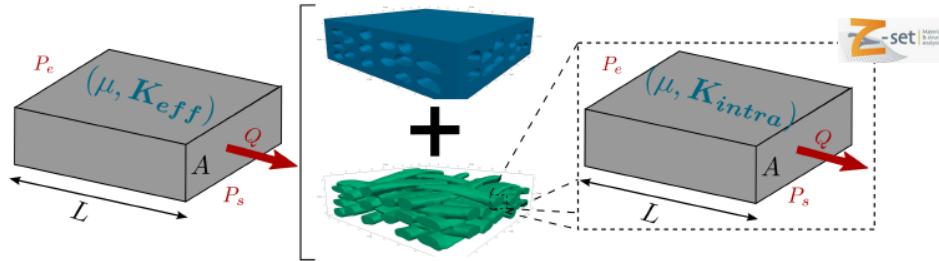


Cavité Moule : Quid de la perméabilité des tissés

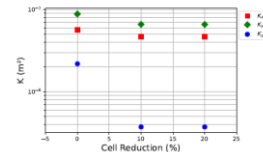
Cf. Présentation S. DRAPIER le 23/01 @9h50

Constats :

- Pléthore de tissages dans les pièces composites SAE (~15 sur une aube // ~5 sur un carter) avec TVF $\neq$
- les caractérisations de perméabilité sont difficiles à mener sur les tissages
 - Importante dispersion du fait de volume souvent trop petit et chaque banc d'essai donne sa valeur... [Vernet N. 2014]
- Pourquoi ne pas utiliser la simulation multi-échelle via notre chaine de calcul pour alimenter nos bases de données ? [Cataldi M. 2024]

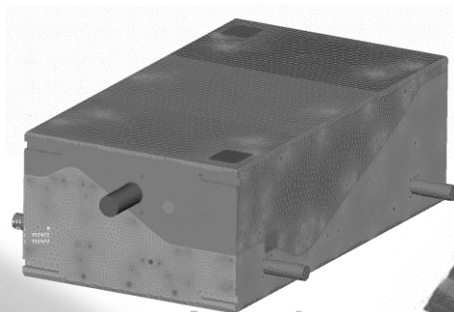


- Ecoulement à double échelles via Lois de Darcy & Stokes (Prise en compte des TVF locaux & globaux)
 - Points d'attention au niveau des bords (comme en expérimental) et à la morphologie meso (Stokes) !



Mise en Forme

(ANSYS/LsDyna)

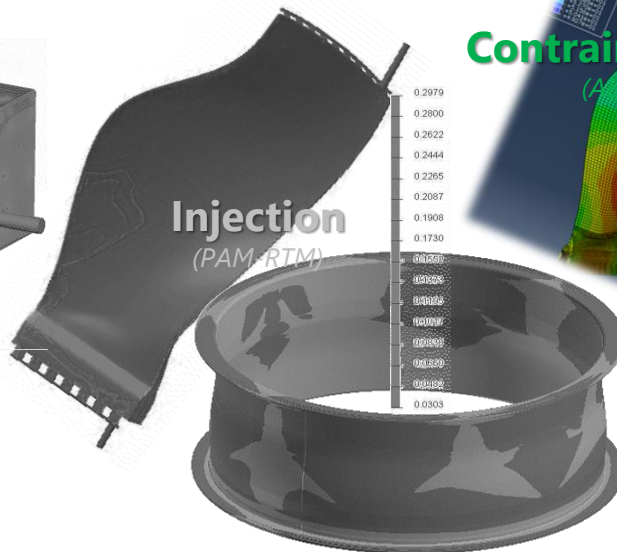


Thermique

(Fluent/ANSYS)

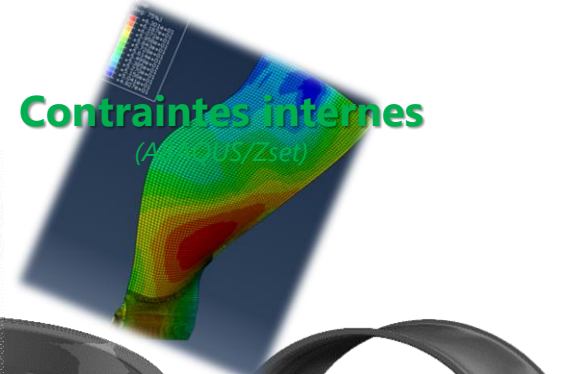
Injection

(PAM-RTM)



Contraintes internes

(ANSYS/USZset)



Usinage

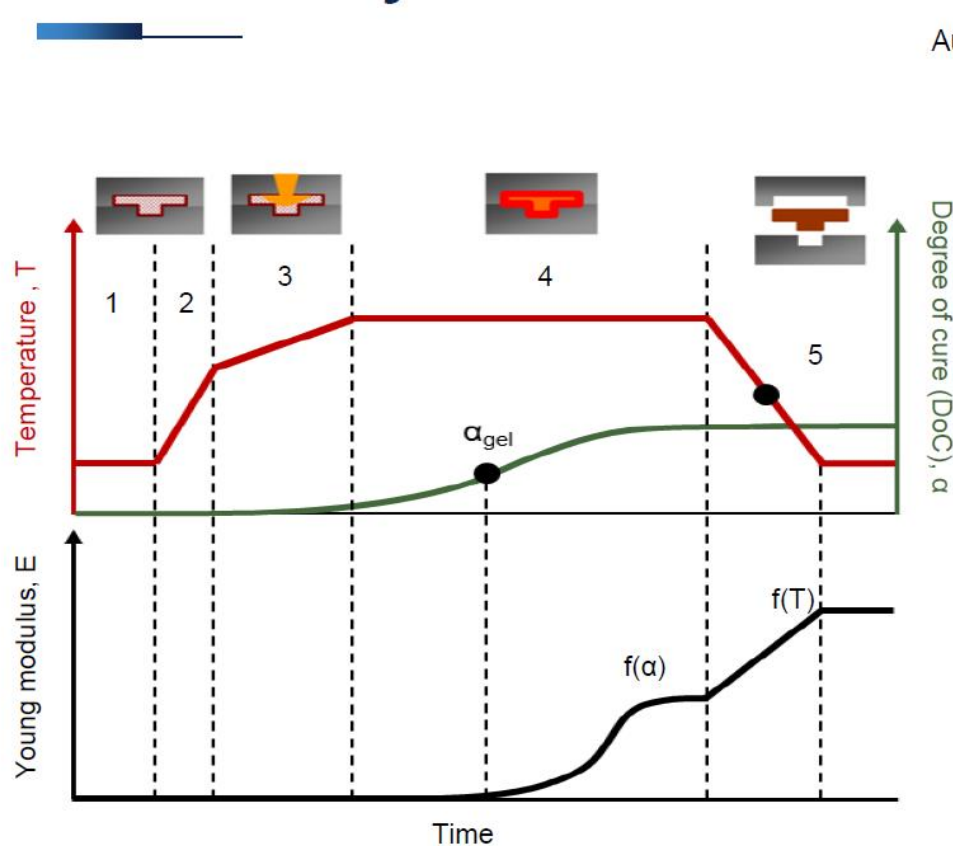
(MORFEO)



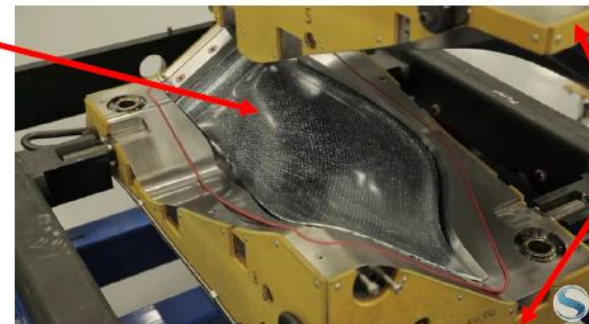
Chapter 4

Simulations des contraintes internes

Procédé d'injection RTM



Aube FAN



Moule

Sources des contraintes résiduelles

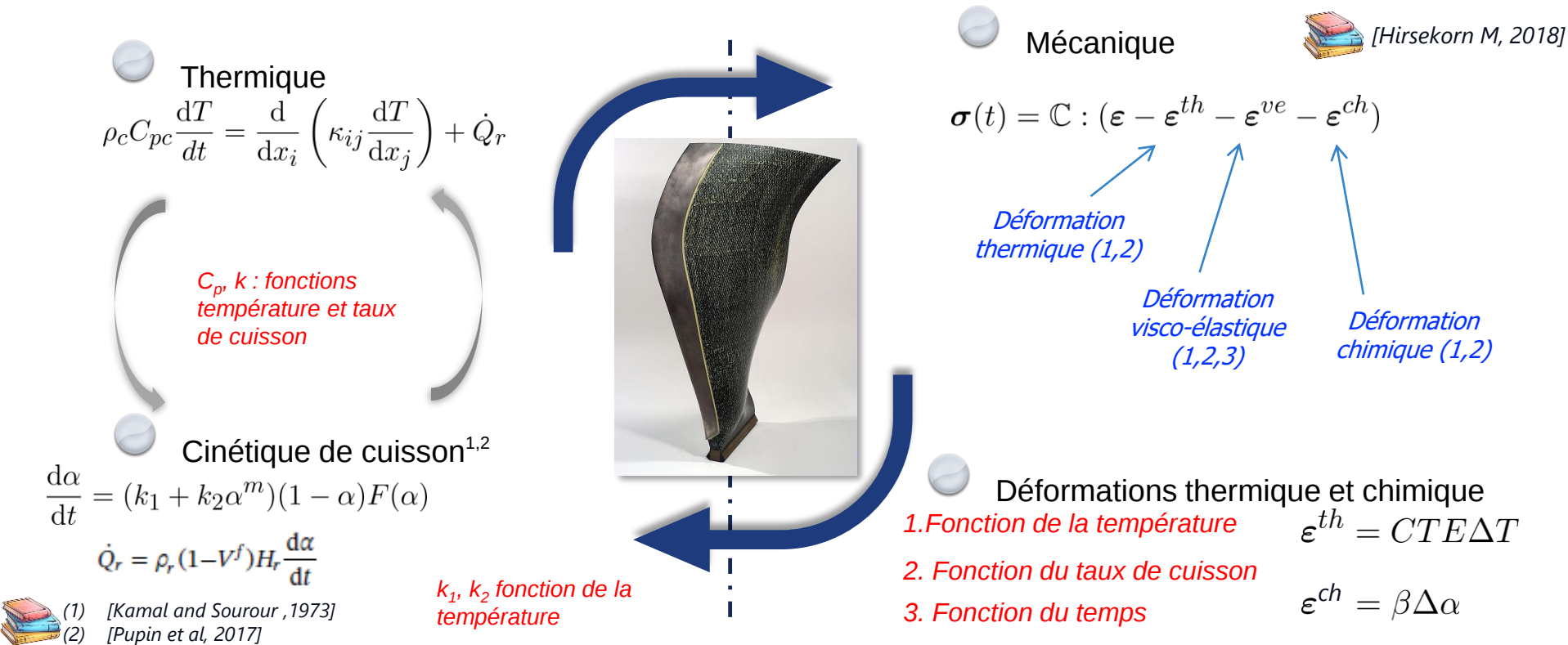
- ✓ Interaction moule/pièce [1]
- ✓ Retrait chimique [2]
- ✓ Différents coefficients de dilation thermique [3]

Problématiques

- ✓ Quel est l'impact sur la géométrie finale ?
- ✓ Quelle est l'évolution dans le temps (post-cuisson, vie en service) ?

[1] Twigg et al., Comp Part A, 2004
 [2] Wisnom et al., Comp Part A, 2006
 [3] Ersoy et al., Comp Part A, 2010

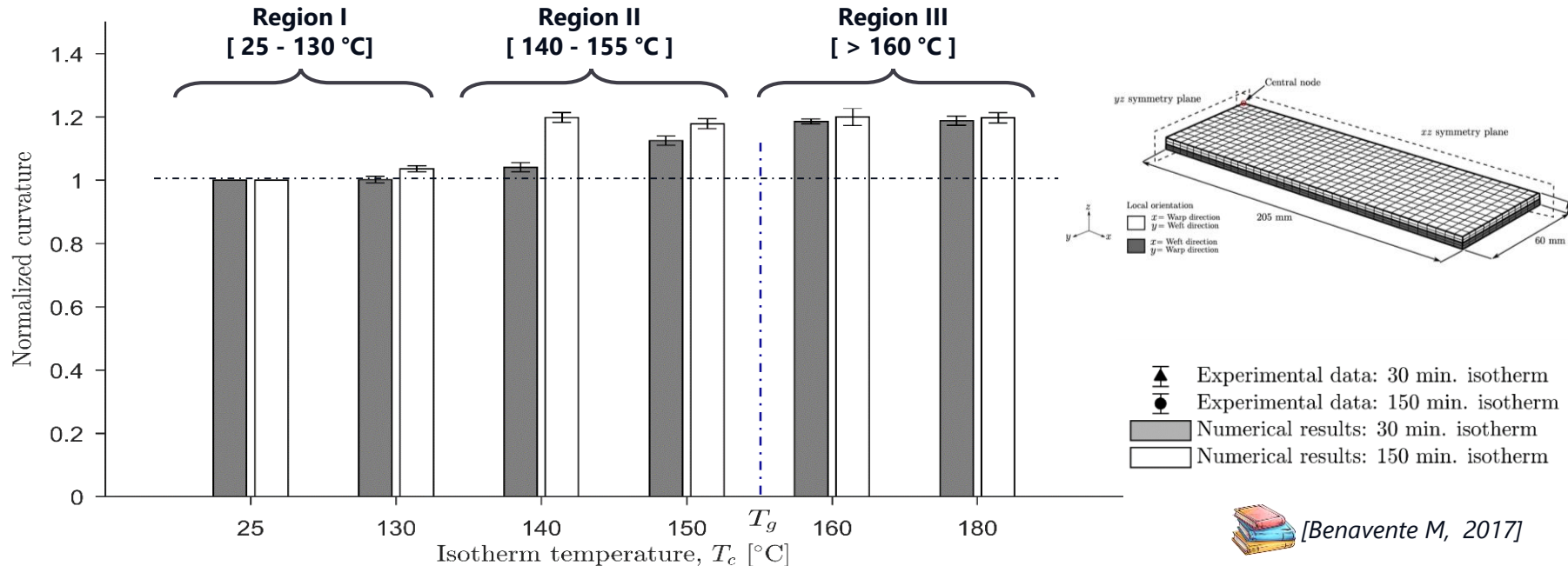
Chaine de modélisation multi-échelle et multi-physique



Transition d'échelle par micro/meso et meso/macro avec comportement thermo-chimico-mécanique de la résine !!!

Caractérisation des distorsions géométriques post-cuisson

- Evolution de la courbure K des plaques bilame à température ambiante après chauffage



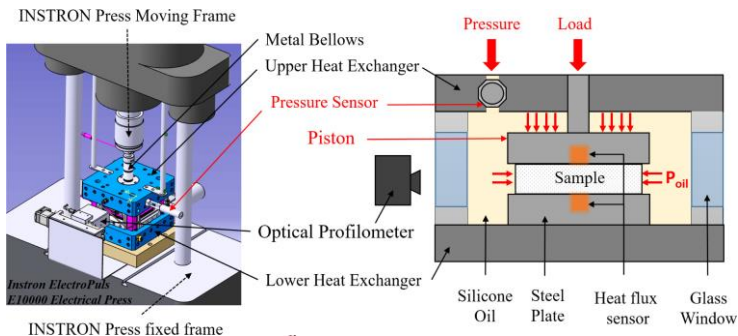
Caractérisation Matériaux :

- La caractérisation matériaux (physico-chimique, thermique, mécanique) s'appuie sur un référentiel (norme, procédure interne) établi. Le but, entre autres, est d'avoir accès aux variations de volume (retrait chimique (CCS), dilatation thermique (CTE)) en fonction de la température et du degré de cuisson.
- Axes d'amélioration de la connaissance du comportement des matériaux (résine et composite tissé 3D) en cours :

- **PVT- α**
- **PVT-HADDOC**



PhD à venir en collaboration avec LTEN !



[Sfar Zbed, R., Le Corre, S., & Sobotka, V. (2022)]

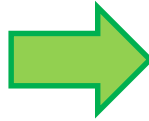
Paramètres	Essai
Cinétique de cuisson	DSC <i>Différentes isothermes</i> <i>Dynamique différentes vitesses de chauffe</i>
Tg	DSC ou DMA (avec différents taux de cuisson)
Cp	DSC
Propriétés élastiques	DMA <i>Différentes températures</i> <i>Différents taux de cuisson</i>
Propriétés visqueuses	DMA <i>Différentes températures</i> <i>Différents taux de cuisson</i> <i>Différentes fréquences</i> Fluage <i>Différentes températures</i> <i>Différents taux de cuisson</i>
CTE	Dilatomètre, TDMA <i>Différents taux de cuisson</i>
Retrait chimique	Moyen d'essai spécifique
Conductivité	Flash laser, plaque chaude gardée
Densité	Simple pesée

Mesures dimensionnelles des pièces (Aube) :

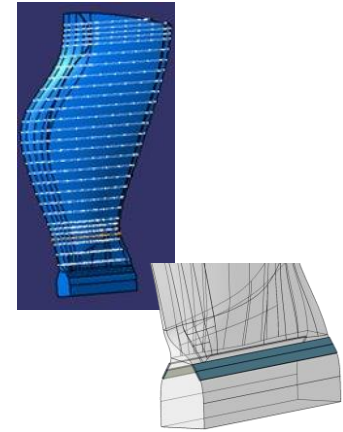
- Les mesures sur pièces en production sont acquises en environnement industriel dans un cadre robuste, fiable et minimisant les dispersions des moyens et positionnements
 - Les contrôles CMM vérifient des fonctions aéros et mécaniques !



La pièce est placée dans un mors et palpée sur le pied et la pale



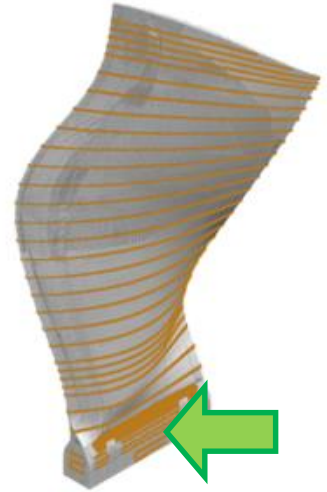
Nuages de points dans le pied et à différentes sections (CR)



La géométrie simulée subit une mise en référentiel et est palpée « virtuellement » sur le pied et la pale

PORTEE : COMPARAISON PRODUCTION/CALCULS

● visco
● élastique



- **Les courbures et valeurs des planéités sont proches des résultats de production avec la loi ThermoViscoElastique**
 - Ce n'est pas le cas avec la loi ThermoElastique

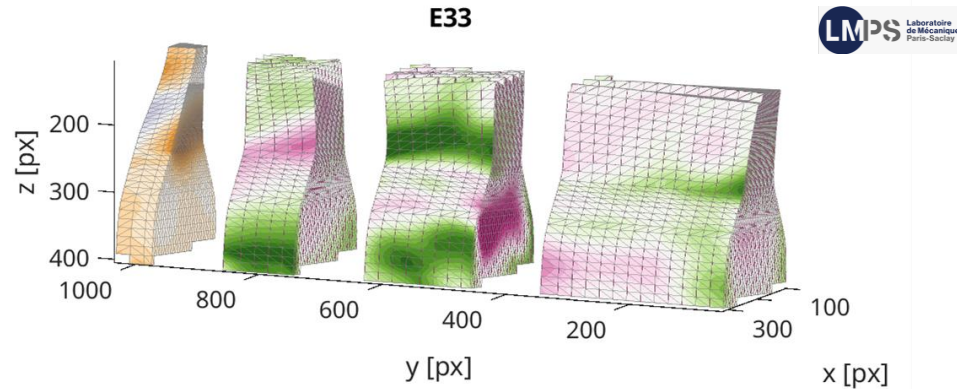
SECTIONS : COMPARAISON PRODUCTION/CALCULS



- **Les tendances sont bonnes avec les 2 types de Loi de Comportement**
 - On observe néanmoins des écarts de type « décalage » à certaines hauteurs de coupe d'aube

Vers l'estimation des contraintes résiduelles sur Tissé 3D

- Utilisation de la DVC pour mesurer la déformation induite par la libération des contraintes internes
 - Application sur aube av/ap usinage → Cf. Poster Yannick YASOTHAN



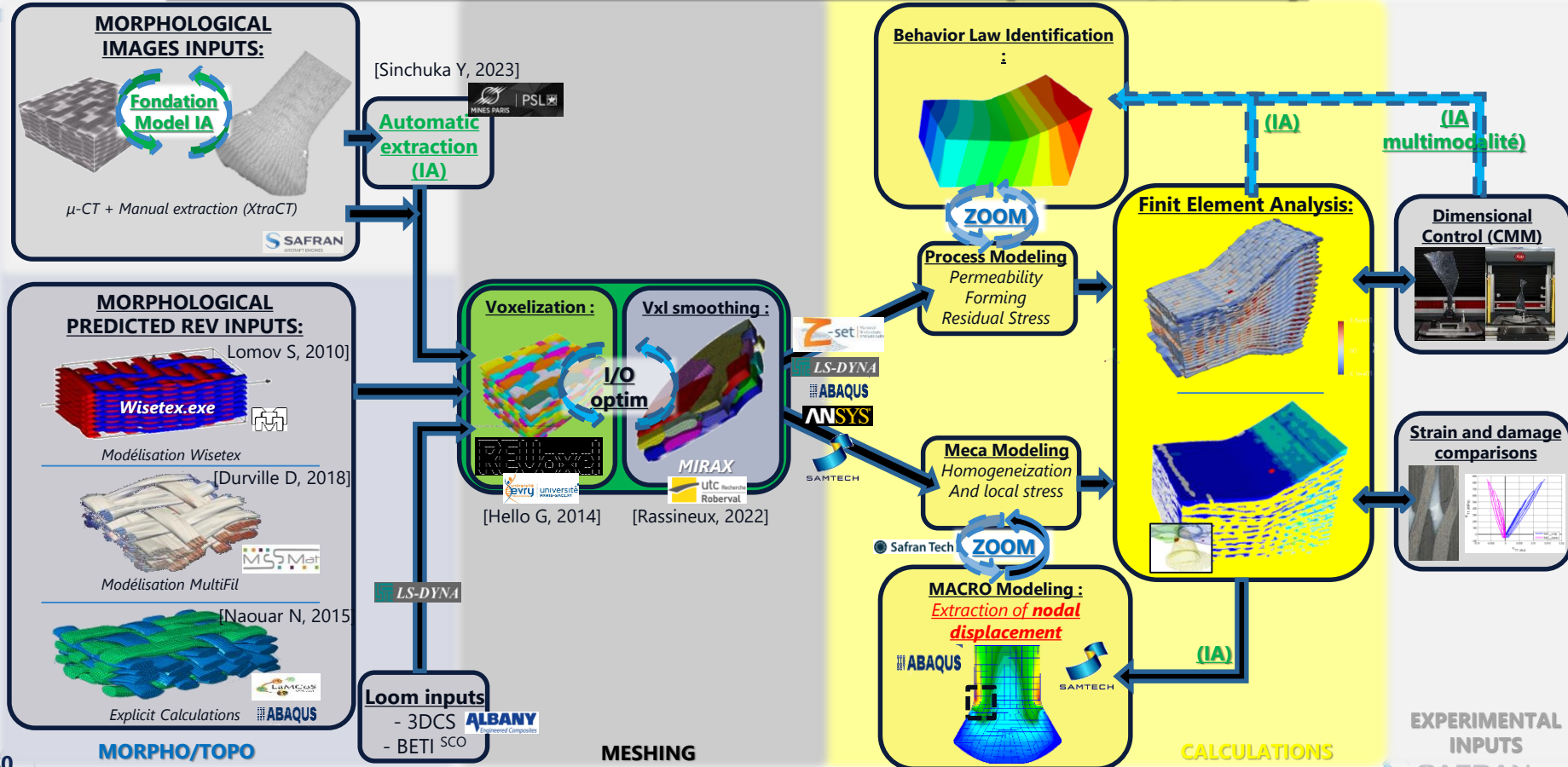


Chapter 5

Chaine de calcul Multi-échelles



COMPOSITE MESOSCOPIC CHAIN (M&P // DO)



- # 1. Prélèvement aube

Diagram illustrating the U-Net architecture for image segmentation. The input image (n-channels) is processed through a series of downsampling steps (encoder) and upsampling steps (decoder). The encoder consists of three stages: Stage 1 (64x64, 128x128), Stage 2 (64x64, 128x128), and Stage 3 (64x64, 128x128). The decoder consists of three stages: Stage 4 (64x64, 128x128), Stage 5 (64x64, 128x128), and Stage 6 (64x64, 128x128). The output image is a 3-channel segmentation map (nF2 = nF2 + 1). The diagram also shows the input image being processed by a series of layers (1, 2, 3, 4, 5, 6) and the resulting output image.

6. Génération des maillages (toron+résine)

Figure 1 is a collage of six panels illustrating the analysis of a protein-ligand complex. The top-left panel shows a graph of 'Calculated stress (F)' versus 'Rigid-body closure (r)'. A red curve represents the stress function, and a yellow box contains the formula $\sigma_{ij} = \alpha \cdot p_i \cdot p_j$. The top-right panel shows a 3D molecular model of a protein-ligand complex with colored sticks. The middle-left panel shows a 3D molecular model of a protein-ligand complex with red and blue surfaces. The middle-right panel shows a 3D molecular model of a protein-ligand complex with a yellow surface. The bottom panel shows a 3D molecular model of a protein-ligand complex with a yellow surface and a black point cloud.

5. **Comparaison CT/EF**

7. Zoom Structural

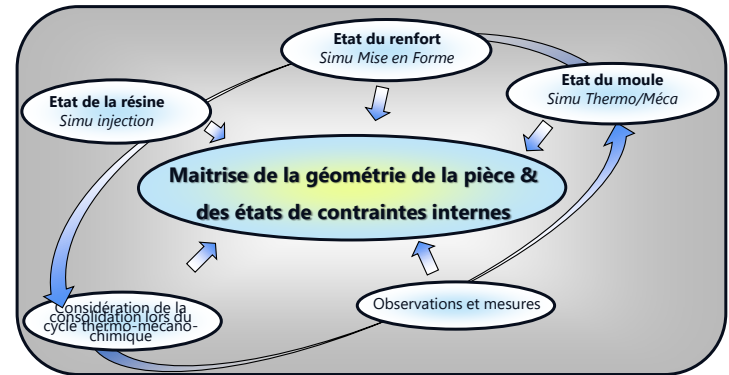
Interpolation des déplacements nodaux du calcul macro : conditions aux limites sur le volume méso

Calcul macro (Take off, Max Climb...



Chapter 6

Conclusions et Challenges !



CONCLUSIONS & PERSPECTIVES

- **Beaucoup de simulations nécessaires pour couvrir la gamme de fabrication**
 - Premiers résultats et comparaisons en accords avec les constats expérimentaux
 - ➔ Il faut continuer à améliorer la précision et la prédictivité des simulations (physique & IA)
 - **Nécessaire pour maîtriser l'état de contrainte interne et la géométrie de nos structures**
 - ➔ Continuer sur le chainage des simulations
 - ➔ Continuer le calcul multi-fidélités et multi-échelles dans les gammes les plus pertinentes
 - ➔ Simulation de l'usinage en cours (MORFEO)
 - **Perspectives :**
 - Mettre en place des protocoles de suivi de front de d'injection et d'évolution de la transmission de pression
 - Suivi de la cinématique des moules lors des cycles thermiques (chauffe/maintien/refroidissement)
 - Généralisation des protocoles de mesure de libération des contraintes internes (DVC)
 - Amélioration des BdD thermo-méca et physico-chimique des matériaux : moule, Composite, préforme, résine
- ➔ Continuer à faire fonctionner l'écosystème et à intégrer les outils/méthodes des travaux de la recherche !!!**

Merci à l'écosystème 😊 :

- ➔ toutes les équipes SAE : P-A POULET, T. GODON, J. NI, M. SANKARE, Y. WIELHORSKI, L. MARCIN, J. NGUCHO, E. MARIN, M. LECOMTE...
- ➔ et nos partenaires académiques : MECANIUM, LAMCOS, INNOVAMICS, LTEN, EPM, ONERA, EMSE, LMPS, CENAERO...

Academic partners

