

Simulation de la reprise d'efforts
des plis au sein de stratifiés à
matrice thermoplastique soumis
à un chargement combinant flux
radiant et fluage

Yann Carpier, Fabrice Barbe,
Benoit Vieille, Alexis Coppalle

INSA Rouen Normandie

JST Homogénéisation et calcul multi-échelles – 14 & 15
octobre 2019, Champs-sur-Marne

Plan de la présentation

1. Contexte aéronautique
2. Problématique
3. Matériaux étudiés
4. Etude du couplage thermo-mécanique
5. Simulation du couplage thermo-mécanique
 - Les différentes échelles
 - Evolution des comportements thermique et mécanique avec la température
 - Modèles thermiques et mécaniques
 - Température uniforme
 - Chargement combiné (flux thermique+mécanique)
6. Conclusions

Contexte aéronautique

- Conditions critiques en service :
Incendie de nacelle de moteur d'avion [Bartlett, 2001]



British Airways, septembre 2015



Orenair, février 2016



Korean Air, mai 2016



Singapour Airlines, juin 2016

Problématique

- Comprendre l'action combinée flamme + sollicitation mécanique

- Crucial pour les constructeurs aéronautiques
- Développement de moyens de caractérisation adaptés
- Deux échelles :

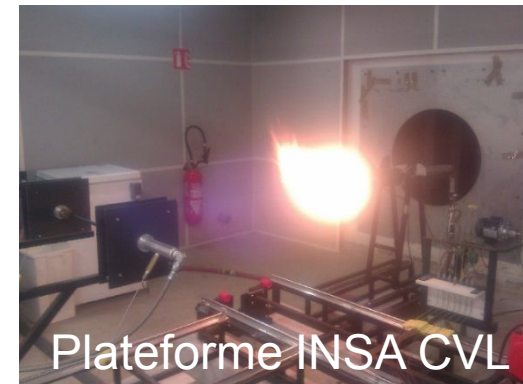
Industrielle : brûleur à flamme
kérosène Nextgen certifié ISO/FAA

Température = $1100^{\circ}\text{C} \pm 80^{\circ}\text{C}$
Flux thermique = $116 \pm 10 \text{ kW/m}^2$
→ chargement mécanique
très complexe

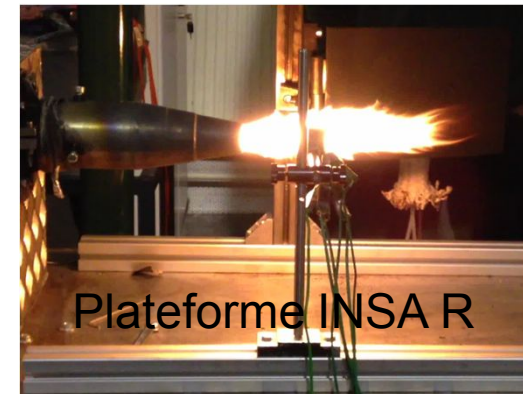
Laboratoire : brûleur kérosène/propane

Température = 1150°C
Flux thermique = $116 - 200 \text{ kW/m}^2$
→ possibilité de chargement
mécanique combiné

Transfert
technologique



Plateforme INSA CVL



Plateforme INSA R

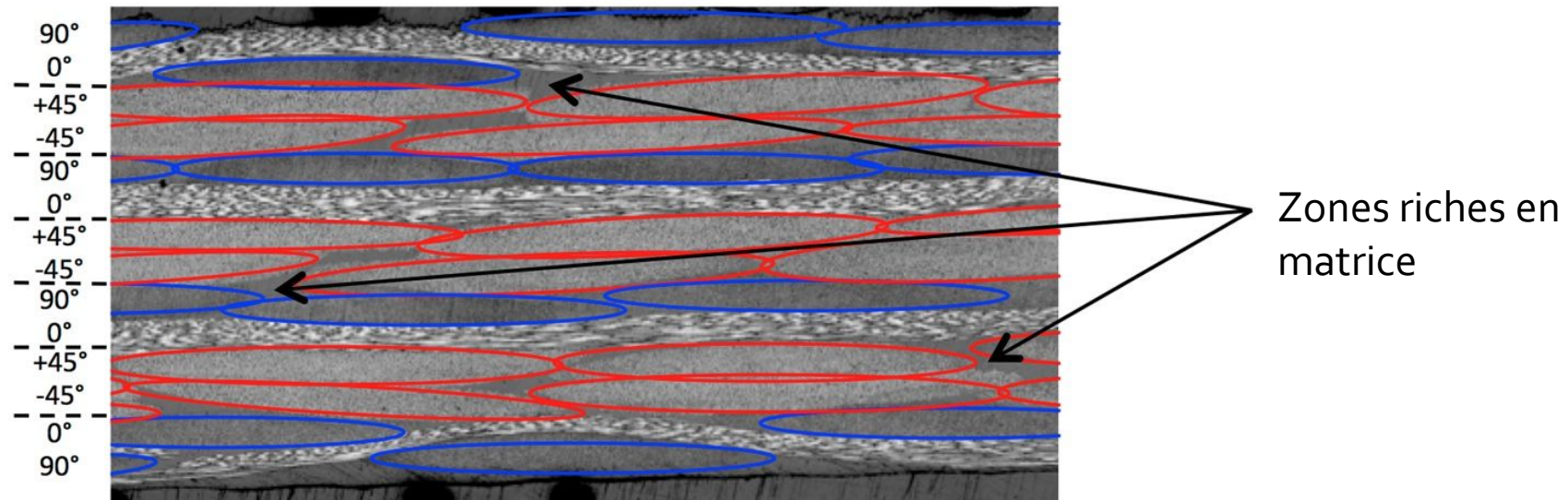
Matériaux étudiés

- Comparaison TD vs TP


	T_g (° C)	T_m (° C)	T_d (° C)	Cristallinity (%)
C/PPS	96	283	450	27
C/Epoxy	190	-	350	-

- Matériaux

[Blond, 2011]



- Drapage: Quasi-isotrope : réponse pilotée par les fibres
Plis orientés 45° : réponse pilotée par la matrice

- 
1. Contexte aéronautique
 2. Problématique
 3. Matériaux étudiés
 4. **Etude du couplage thermo-mécanique**
 5. Simulation du couplage thermo-mécanique
 - Les différentes échelles
 - Evolution des comportements thermique et mécanique avec la température
 - Modèles thermiques et mécaniques
 - Température uniforme
 - Chargement combiné (flux thermique+mécanique)
 6. Conclusions

Etude du couplage thermo-mécanique

● Dégradation et décomposition thermique

→ *Modification des propriétés physico-chimiques / mécaniques avec la température*

→ *Endommagement des micro- et mesostructures*

1

Transition vitreuse

Rupture des liaisons faibles dans les zones amorphes

2

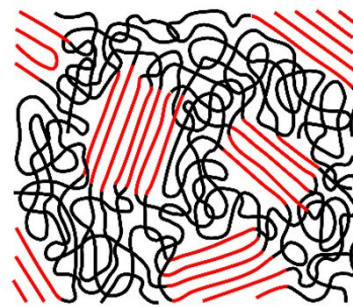
Fusion

Destruction des zones cristallines

3

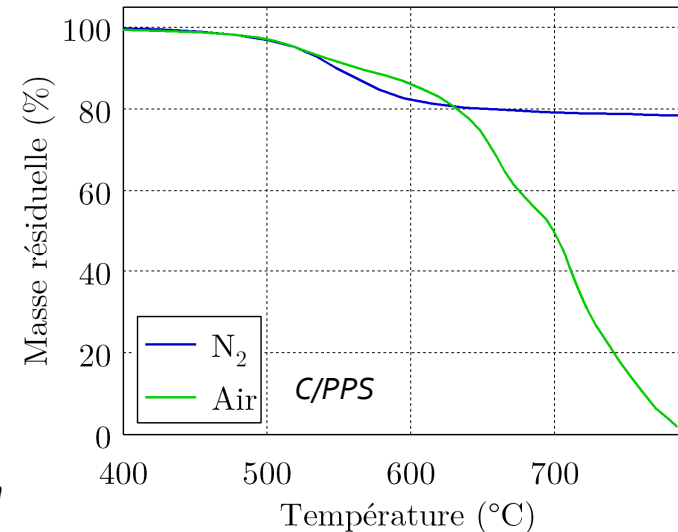
Décomposition thermique

Modification de la composition et de la structure chimique



— Zones cristallines
— Zones amorphes

Structure d'un polymère semi-cristallin



Ambiante

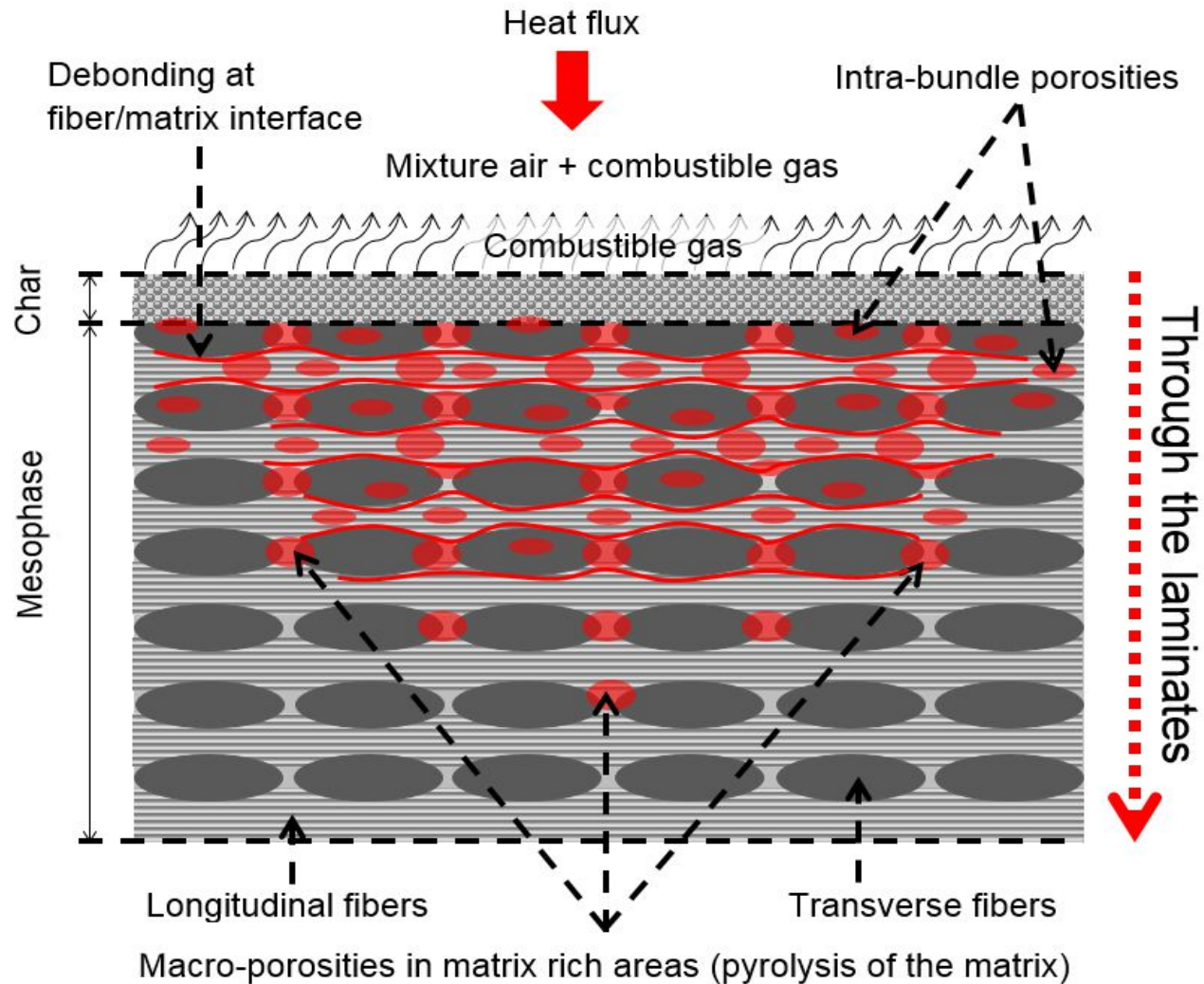
T_g

T_f

T_d

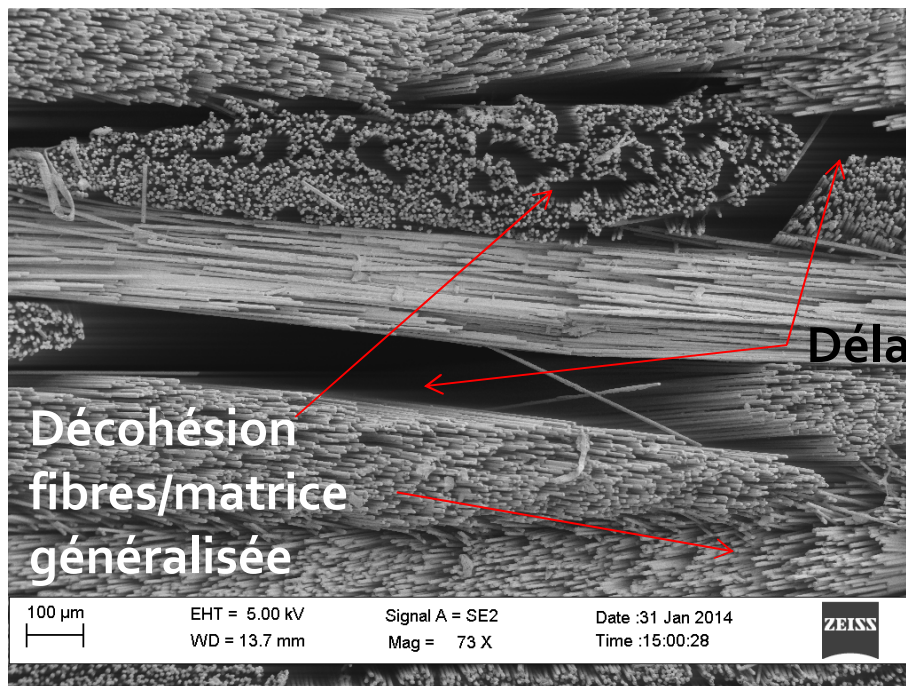
Etude du couplage thermo-mécanique

- Mécanismes de décomposition sous flux thermique dans un stratifié

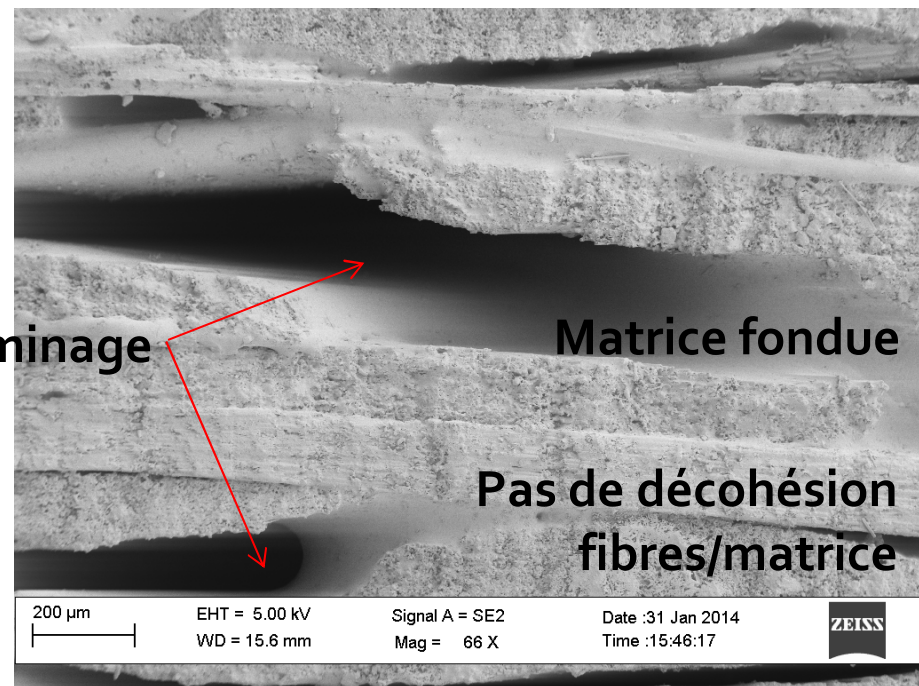


Etude du couplage thermo-mécanique

- Comportement mécanique post-incendie [Vieille et al, 2014]
→ Influence du feu sur la méso-structure de composites stratifiés



(a) Observations MEB x 73
C/Epoxy – 40 kW/m²

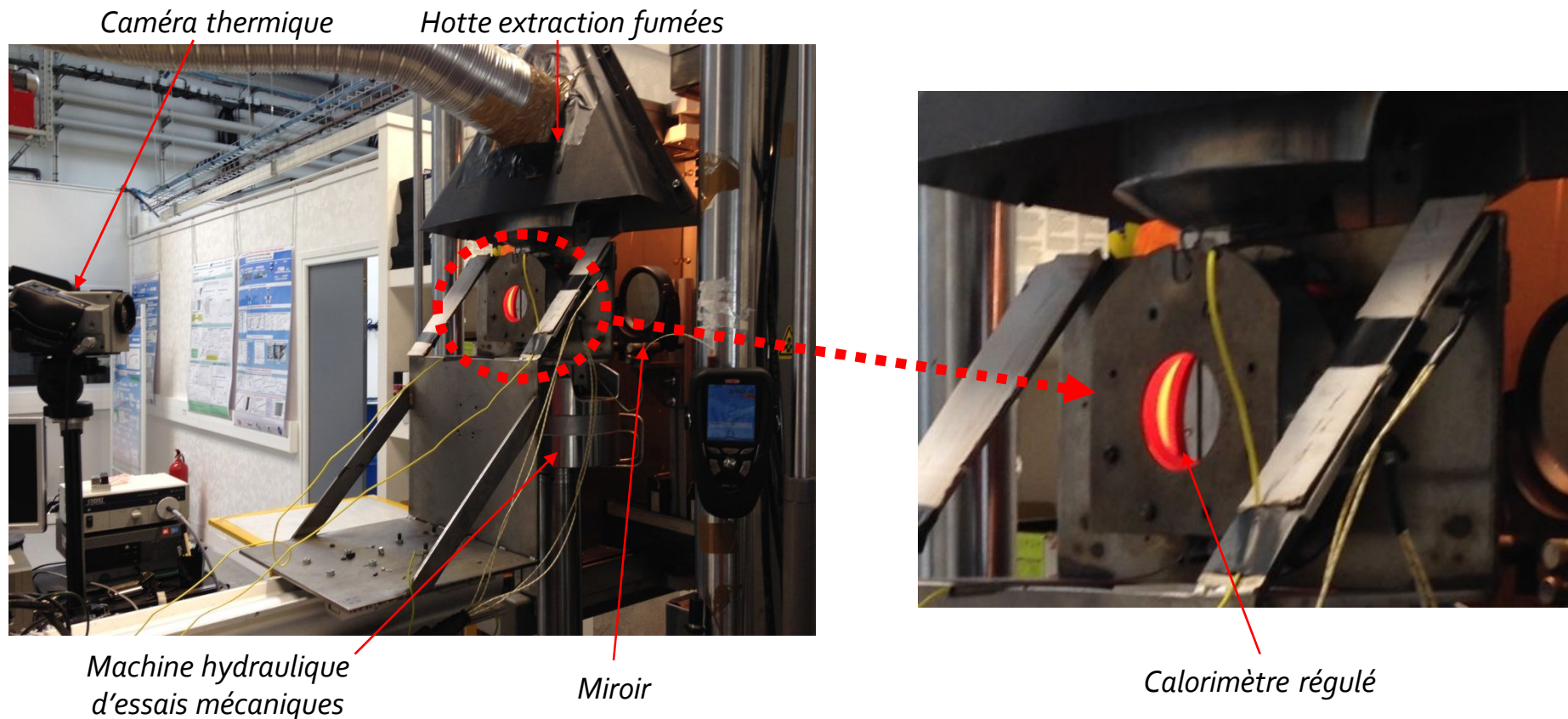


(b) Observations MEB x 66
C/PPS – 40 kW/m²

Action combinée : mécanique + flux thermique

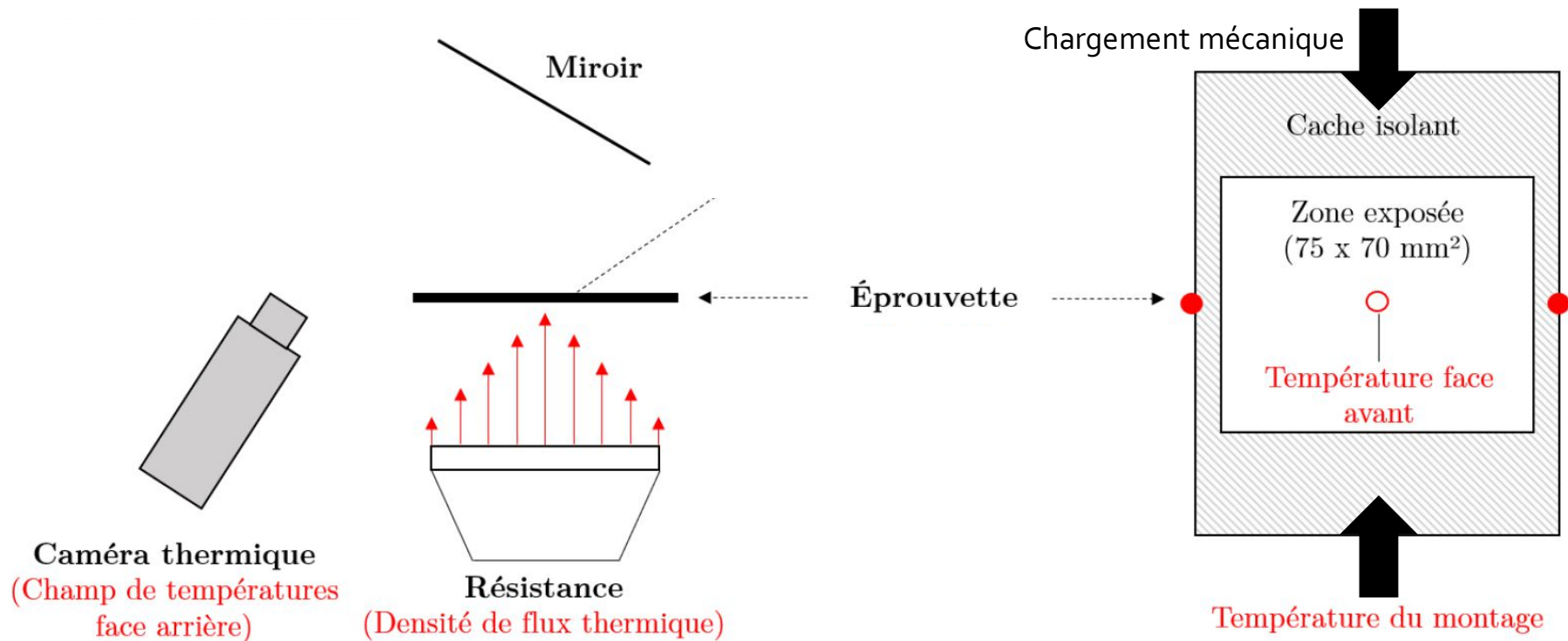
- Développement d'une plateforme d'Etude du COmportement mécanique au feu de composites thermoplastiques pour L'aéronautique

→ Projet Carnot ESP DECOLLE (2015-2016)



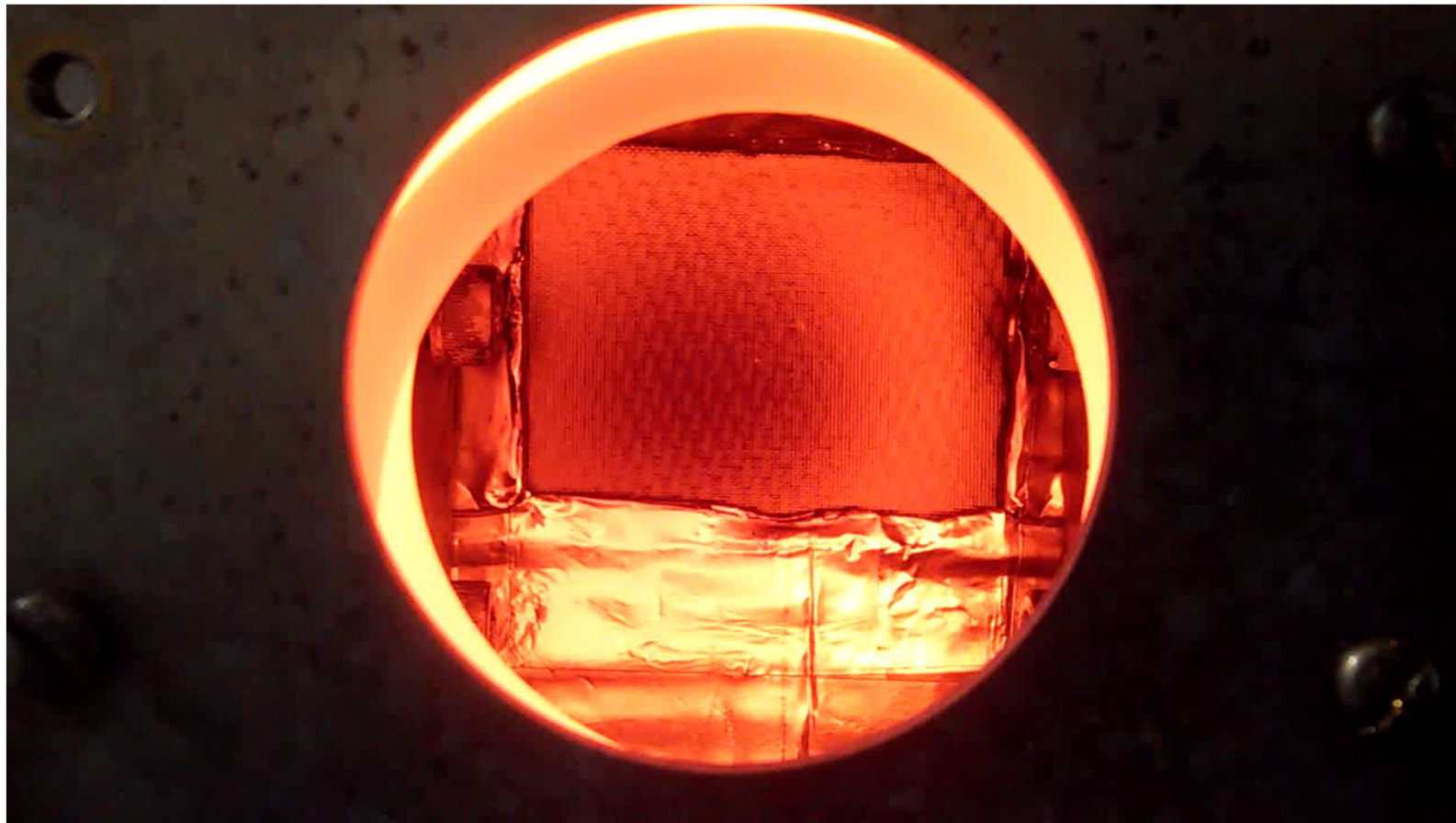
Action combinée : mécanique + flux thermique

- Développement d'une plateforme d'Etude du COmportement mécanique au feu de composites thermoplastiques pour L'aéronautique



Action combinée : mécanique + flux thermique

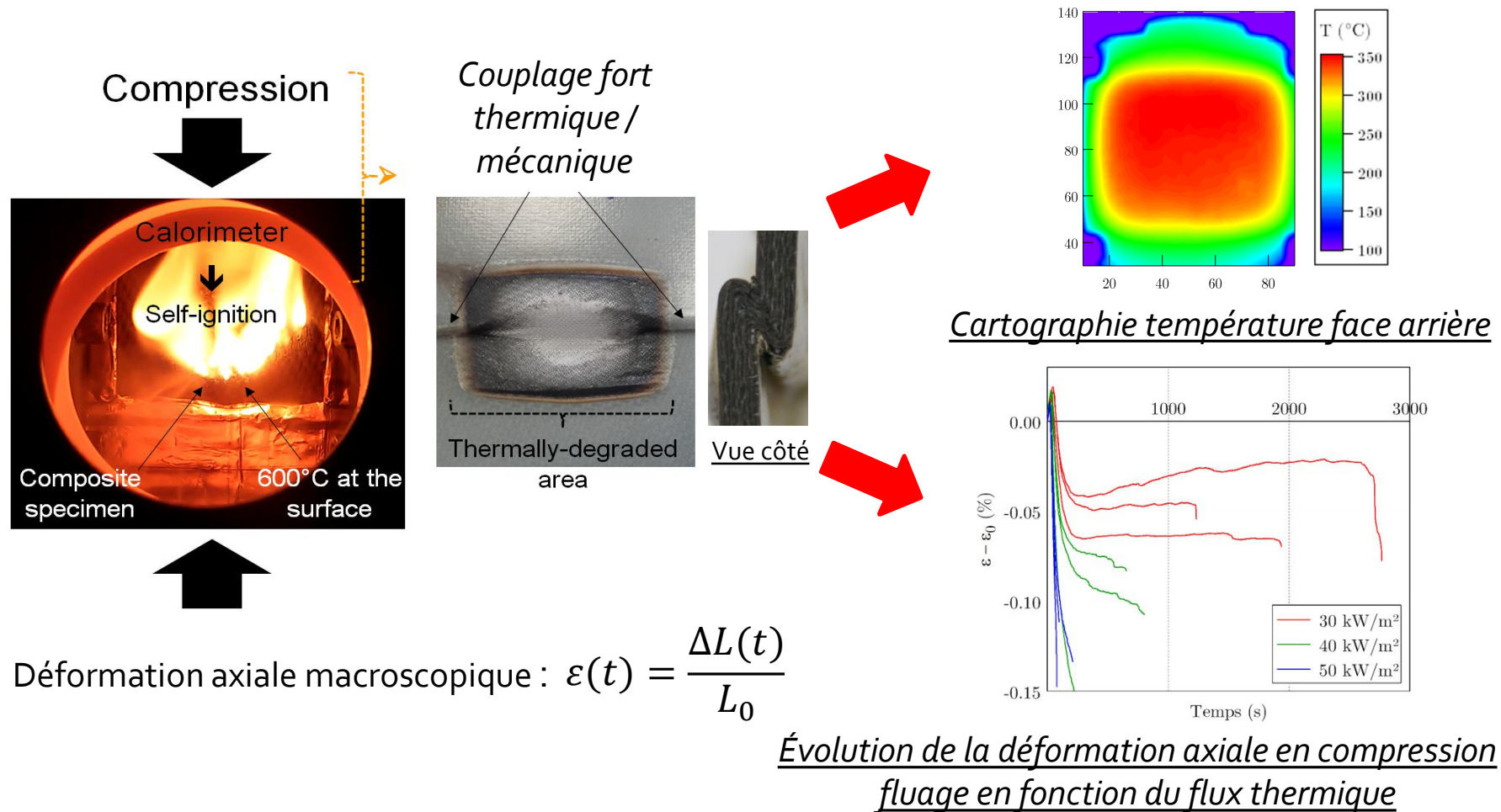
- Action combinée : flux thermique + compression




— 10mm

Action combinée : mécanique + flux thermique

- Action combinée : flux thermique + compression

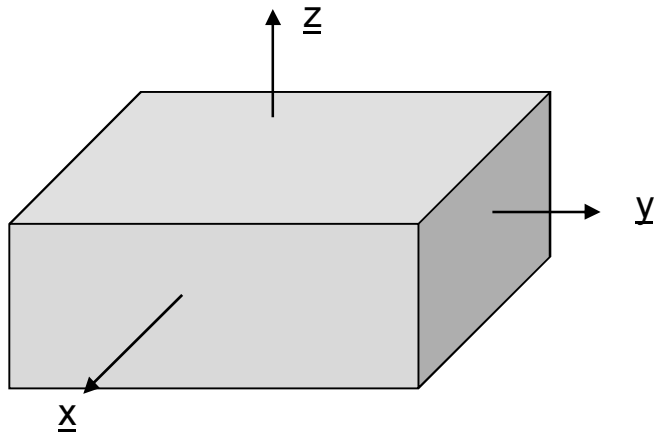


- 
1. Contexte aéronautique
 2. Problématique
 3. Matériaux étudiés
 4. Etude du couplage thermo-mécanique
 5. **Simulation du couplage thermo-mécanique**
 - Les différentes échelles
 - Evolution des comportements thermique et mécanique avec la température
 - Modèles thermiques et mécaniques
 - Température uniforme
 - Chargement combiné (flux thermique+mécanique)
 6. Conclusions

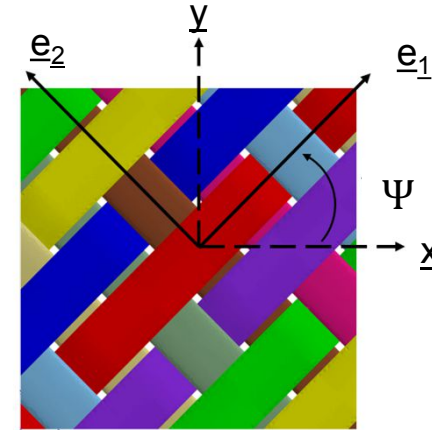
Simulation du couplage thermo-mécanique

Les différentes échelles :

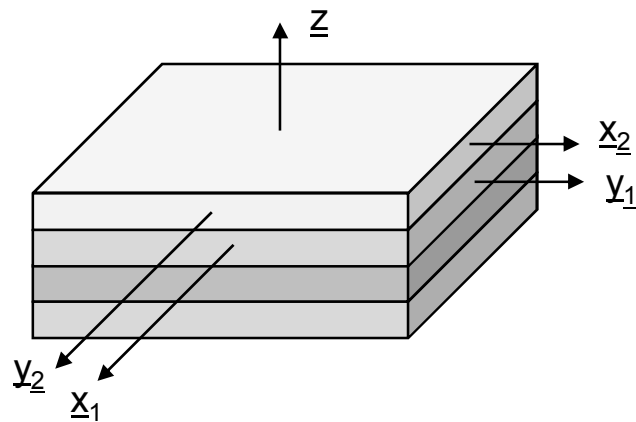
Macro (Repère global)



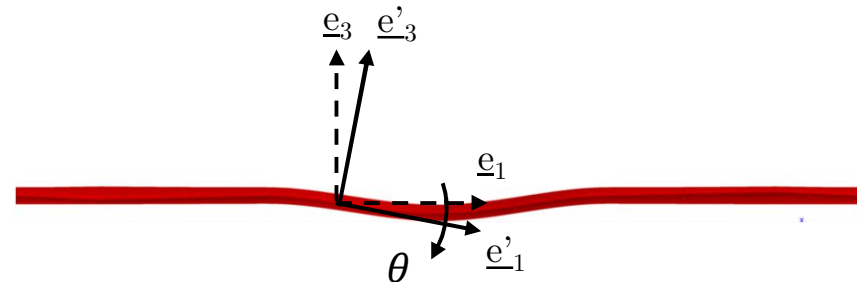
Méso (Repère local du toron)



Macro-Méso (Repère local du pli)



Micro (Repère local de l'élément)



Simulation du couplage thermo-mécanique

- Evolution des comportements thermique et mécanique avec la température

État du matériau	Non dégradé	Dégradé	Dégradé/décomposé
Phénomènes associés	Transferts thermiques Dégradation propriétés thermiques Dilatation thermique Endommagement	Dégradation propriétés mécaniques Comportement visqueux	Formation de porosités Pyrolyse Oxydation
Modélisation	Modélisation de la mésostructure Modèle thermique Loi de comportement	Loi de dégradation des propriétés	Modèle de pyrolyse Croissance de porosités



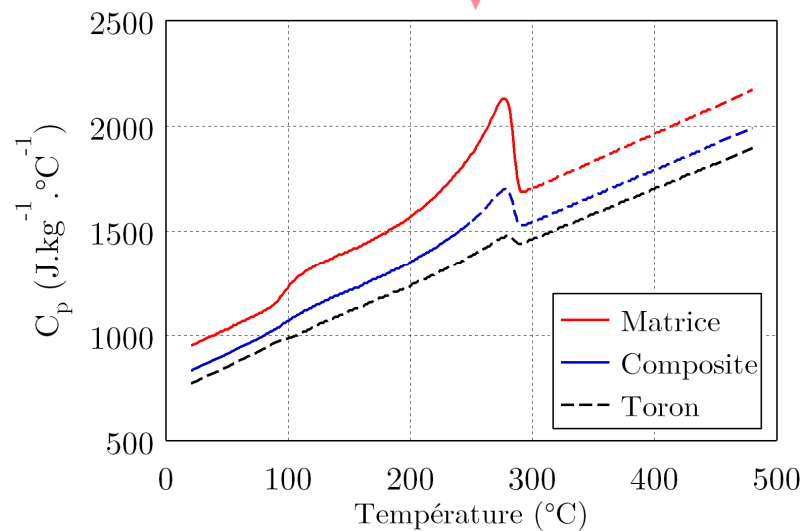
Simulation du couplage thermo-mécanique

- Modèle thermique basé sur l'équation de la chaleur [JNC21]

$$\rho \quad C_p(T) \quad \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda(T) \nabla T)$$

Supposées indépendantes de T

Matrice isotrope : $\lambda_m(T)$



Torons isotropes transverses

$$\lambda_t(T) = \begin{bmatrix} \lambda_t^{ax}(T) & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_t^r(T) & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_t^r(T) \end{bmatrix}$$

Conditions limites :

- Face avant : Rayonnement (émissivité ϵ)
- Face arrière : Rayonnement et convection (coefficient h)

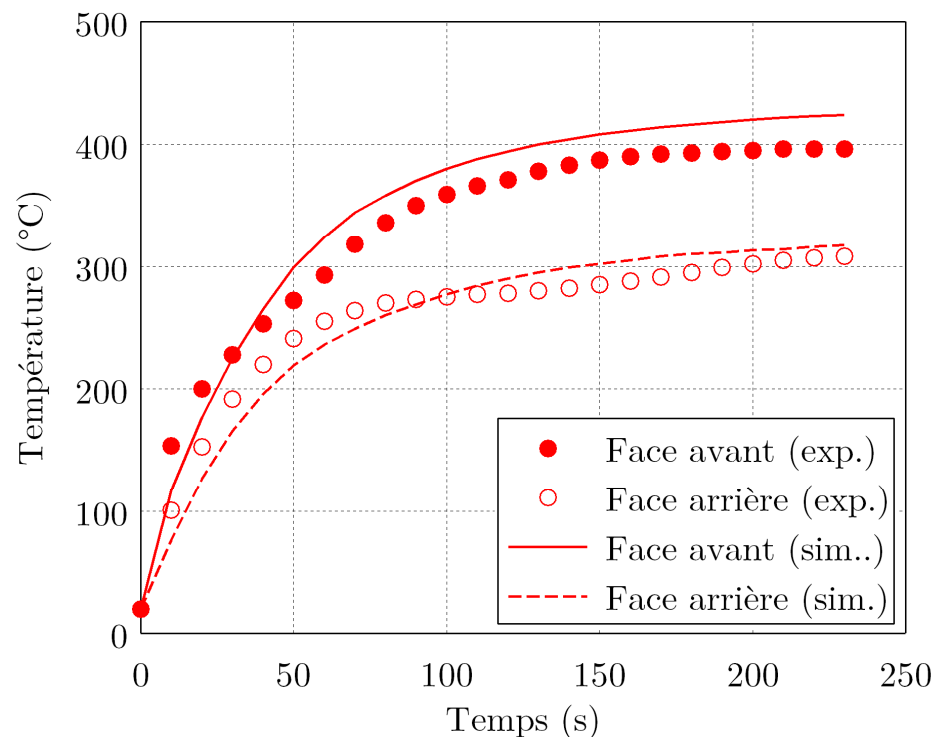
Supposée indépendante de T

Supposé constant et uniforme

Simulation du couplage thermo-mécanique

● Identification paramètres « méso » et simulation du transfert thermique

Paramètre	Valeur
$\lambda_t^{ax}(T_0)$	87 W.m ⁻¹ .K ⁻¹
$a_t^{ax}(T_{d,o})$	0,11 W.m ⁻¹ .K ⁻²
$\lambda_m(T_0)$	0,24 W.m ⁻¹ .K ⁻¹
$a_m(T_g)$	9,9.10 ⁻⁴ W.m ⁻¹ .K ⁻²
$a_m(T_f)$	-1,3.10 ⁻³ W.m ⁻¹ .K ⁻²
$a_m(T_{d,o})$	-2,2.10 ⁻⁴ W.m ⁻¹ .K ⁻²
$\lambda_t^r(T_0)$	1,11 W.m ⁻¹ .K ⁻¹
$a_t^r(T_g)$	8,7.10 ⁻⁴ W.m ⁻¹ .K ⁻²
$a_t^r(T_f)$	-1,9.10 ⁻³ W.m ⁻¹ .K ⁻²
$a_t^r(T_{d,o})$	-1,6.10 ⁻³ W.m ⁻¹ .K ⁻²
h	2,8 W.m ⁻² .K ⁻¹

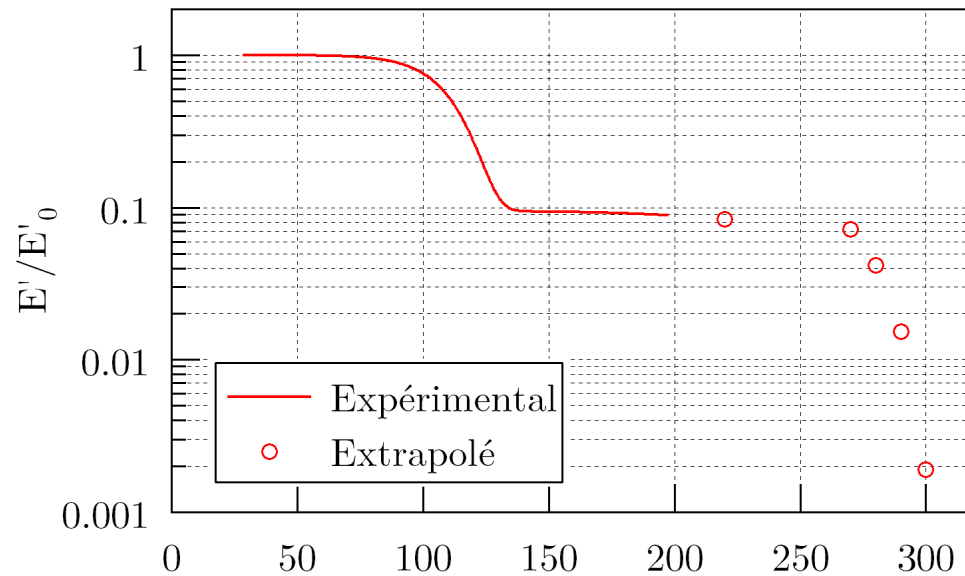


Comparaison températures expérimentales / simulées au centre d'une plaque soumise à un flux de 30 kW/m²

Simulation du couplage thermo-mécanique

● Modèle mécanique

- Plage de température : $T_0 - T_{d,o}$ (ambiante à décomposition)
- Détermination des propriétés mécaniques des constituants $f(T)$



Hypothèses du modèle

- ① Comportement élastique linéaire des constituants
- ② Matrice : comportement isotrope avec $E_m = f(T)$
- ③ Torons : comportement isotrope transverse

Ambiante T_0

T_g

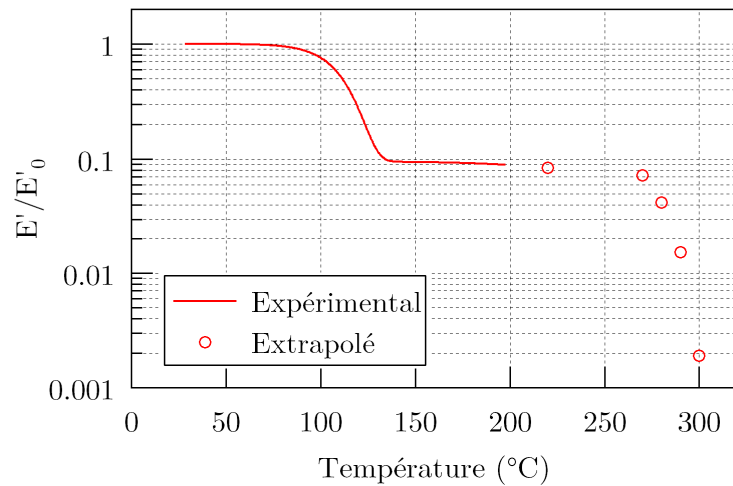
T_f

T_d

Simulation du couplage thermo-mécanique

● Modèle mécanique

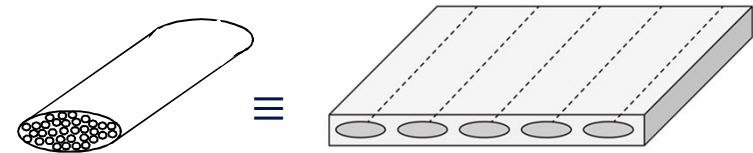
Matrice



Paramètre	Valeur
E_g (MPa)	2620
E_{rub} (MPa)	250
T_g (°C)	96
T_f (°C)	283
m_g	32
m_f	16

Torons

Modèle de Chamis : *Un toron avec 86% fibres a les mêmes propriétés élastiques qu'un pli UD composé de 86% de fibres*



20 - 200°C : DMA

Flexion 3 points – 1 Hz – 2°C/min

200°C – 450°C : Modèle de Mahieux [Mahieux, 2002]

$$E(T) = (E_g - E_{rub}) \exp - \left(\frac{T}{T_g} \right)^{m_v} + E_{rub} \exp - \left(\frac{T}{T_g} \right)^{m_v}$$

$$E_t^T = \frac{E_m}{1 - \sqrt{V_f} \left(1 - \frac{E_m}{E_f} \right)}$$

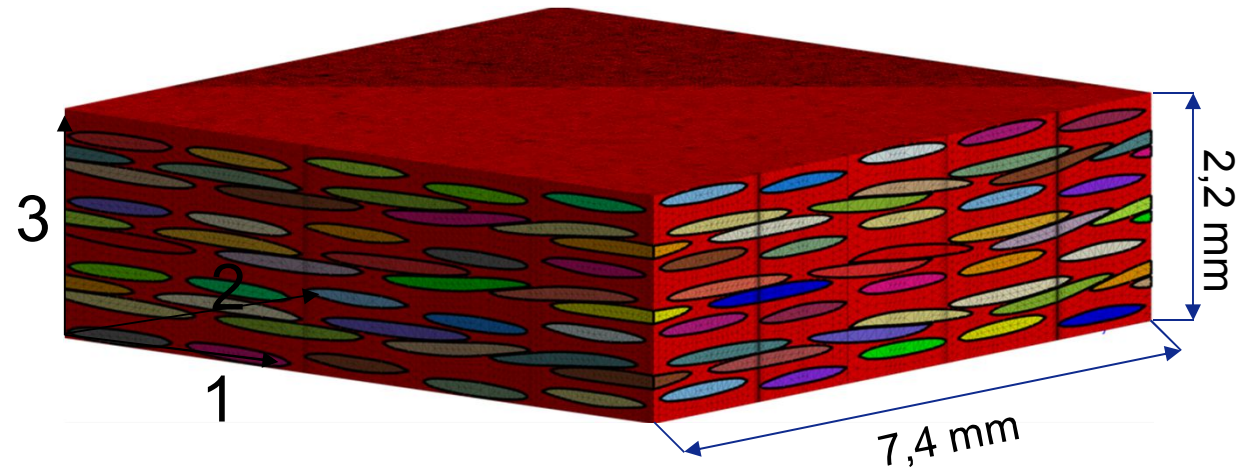
$$G_t^{TL} = \frac{G_m}{1 - \sqrt{V_f} \left(1 - \frac{G_m}{G_f^{TL}} \right)}$$

$$\nu_t^{TL} = \frac{E_t^T}{2G_t^{TL}} - 1$$

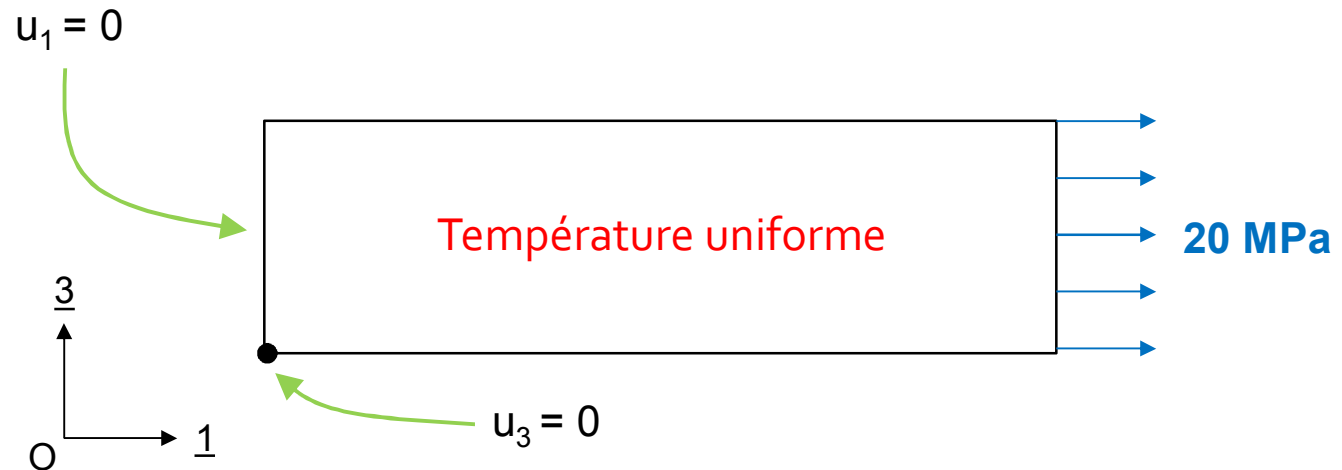
Simulation du couplage thermo-mécanique

- Simulation du comportement sous température uniforme (Zset)

Modèle
géométrique

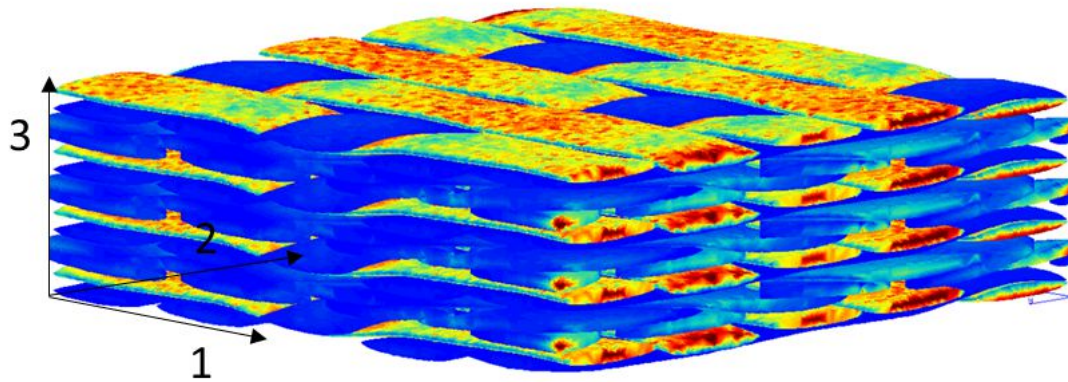


Problème
simulé



Simulation du couplage thermo-mécanique

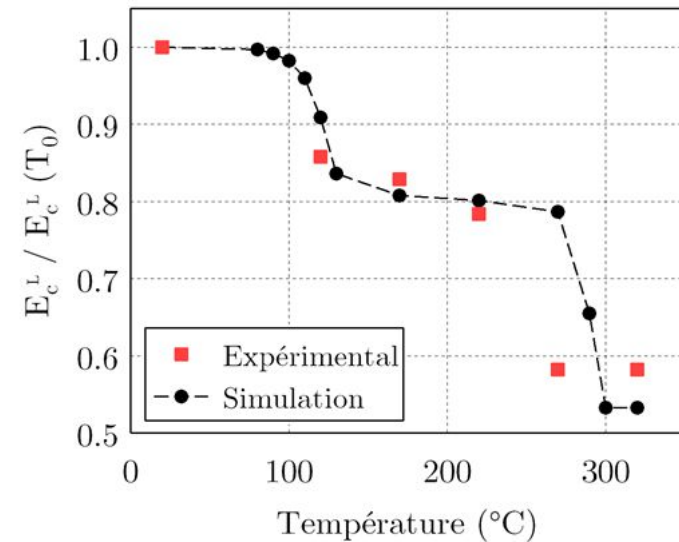
- Simulation du comportement sous température uniforme



Champ de contraintes axiales σ_{11} dans les torons

$$E_{11}(T) = \frac{1}{\bar{V}} \int_V \sigma_{11}(T) dV$$

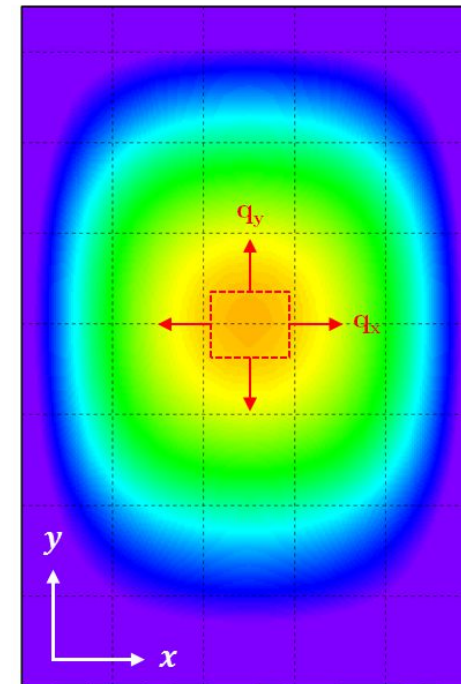
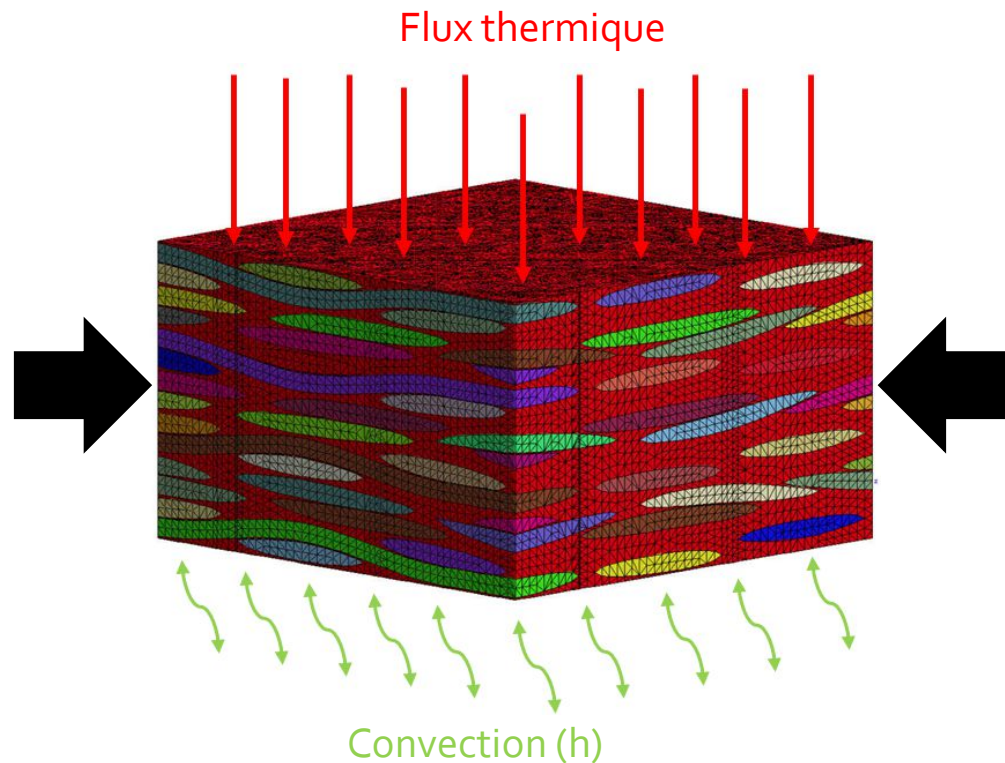
ε_{11}



Évolution de la rigidité axiale du stratifié avec la température

Simulation du couplage thermo-mécanique

- Simulation du comportement sous chargement combiné

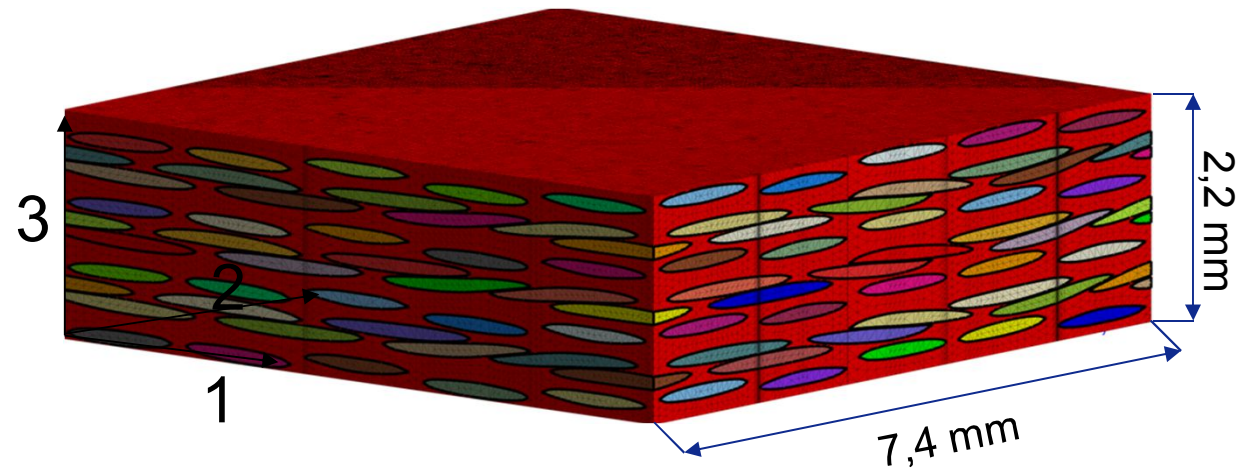


Champ de température face avant

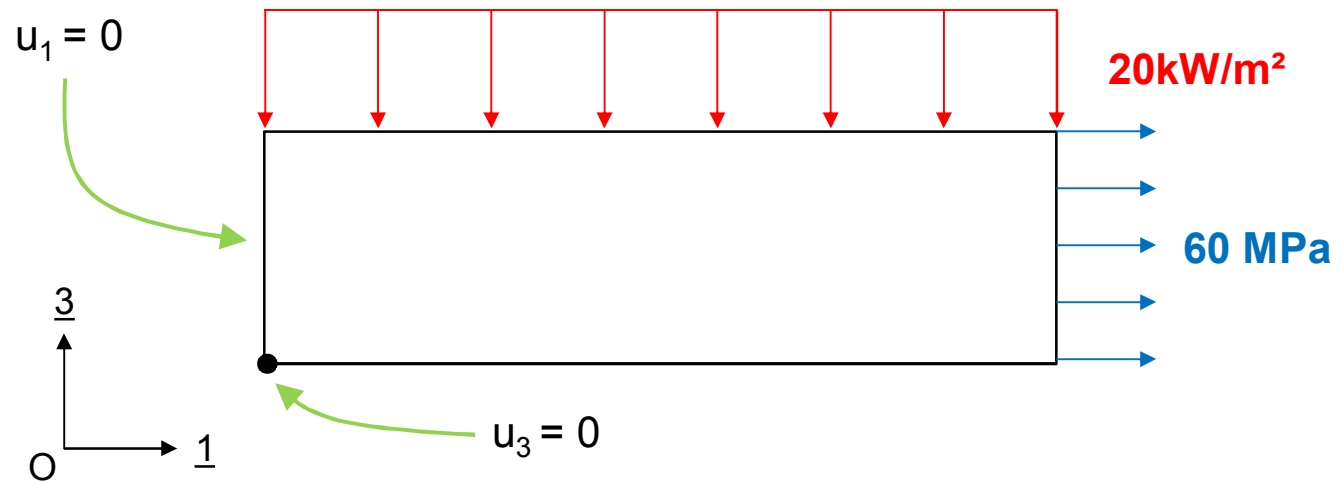
Simulation du couplage thermo-mécanique

- Simulation du comportement sous chargement combiné

Modèle géométrique

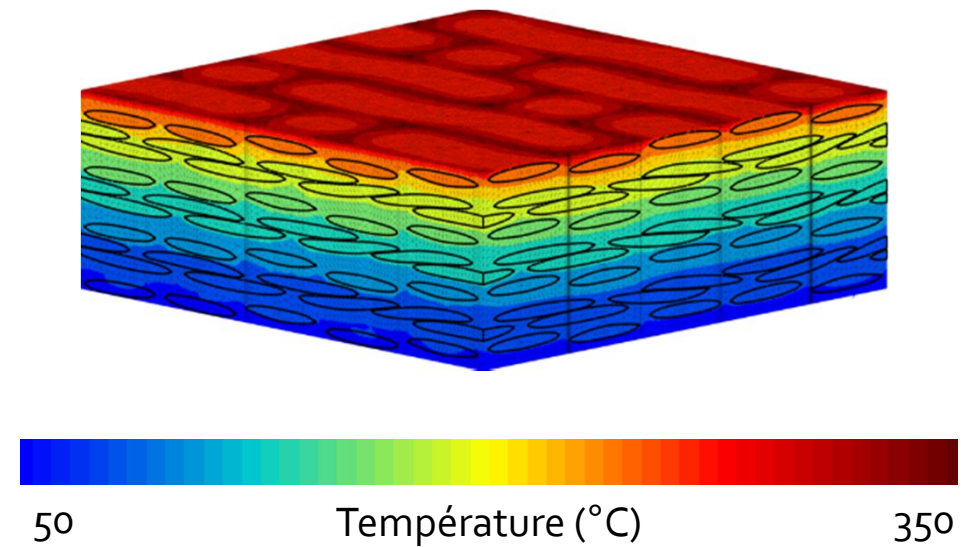
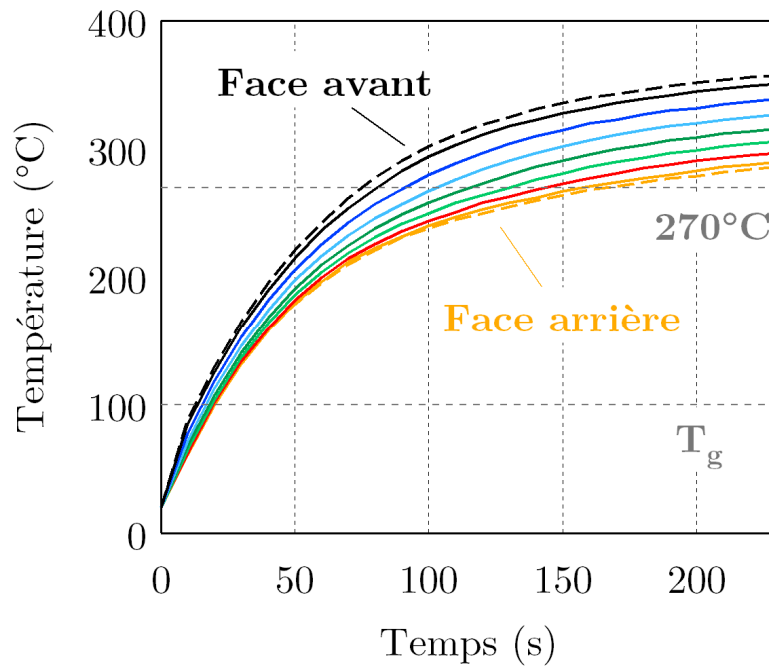
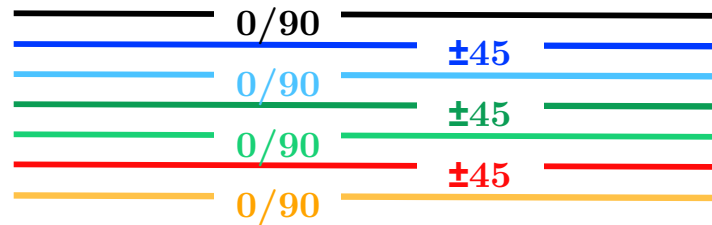


Problème simulé



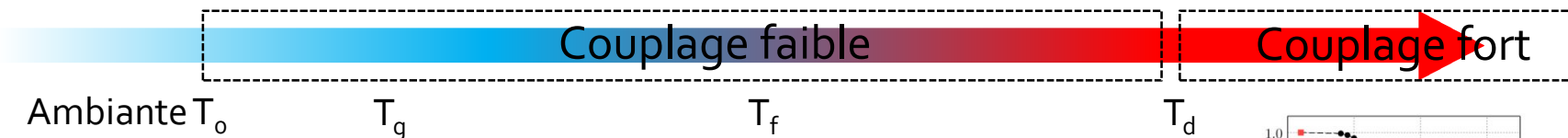
Simulation du couplage thermo-mécanique

- Simulation du comportement sous chargement combiné

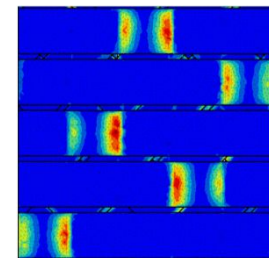
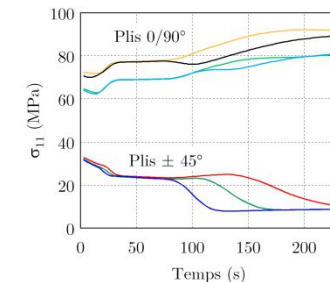
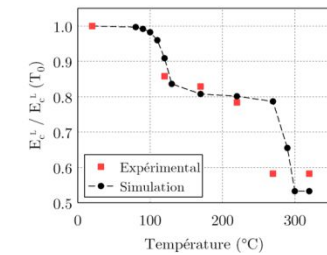


Conclusions

- Complexité des phénomènes : couplages physique-chimique-thermique-mécanique
- Quelles échelles ? Quelles approches ? Quels outils ?
- Caractérisation expérimentale du couplage thermique-mécanique



- Développement modèle à champ complet sur stratifiés 7 plis
 - Représentation explicite matrice / torons
 - Identification des paramètres thermiques et mécaniques $f(T)$
 - Couplage faible
 - Bon caractère prédictif $\rightarrow T_f$
- Simulation reprise des efforts dans les différents plis
- Localisation des déformations dans les zones de chevauchement



Remerciements

● Projet RIN AEROFLAMME

*Comportement de composites **AERO**nautiques sous
FLAMme et chargement **ME**cannique*

