

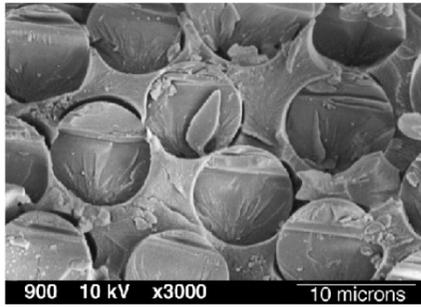
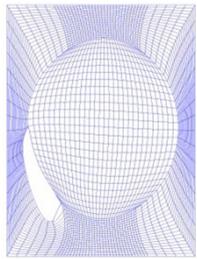
**DÉTERMINATION RAPIDE DE LA LIMITE DE FATIGUE DE
COMPOSITES STRATIFIÉS CARBONE ÉPOXY :
SIMULATION DE L'ESSAI D'AUTO ÉCHAUFFEMENT**

Laurent Gornet

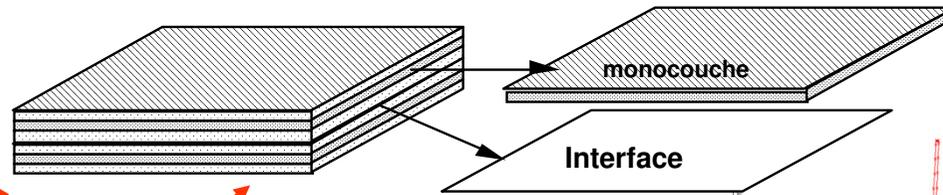
GeM, UMR CNRS 6183

Durabilité des composites

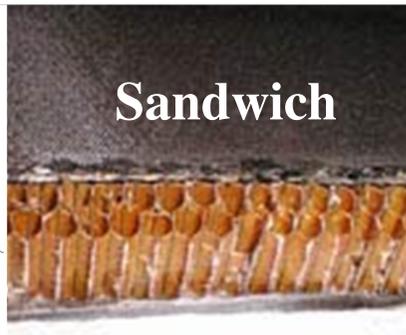
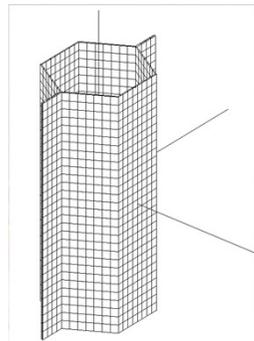
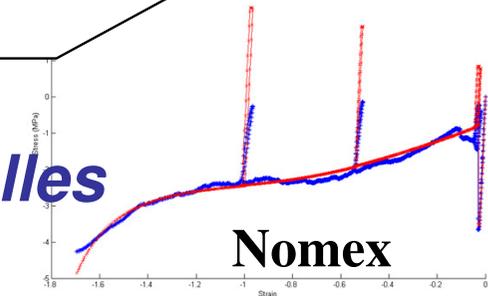
Interaction modèles-expériences fatigue



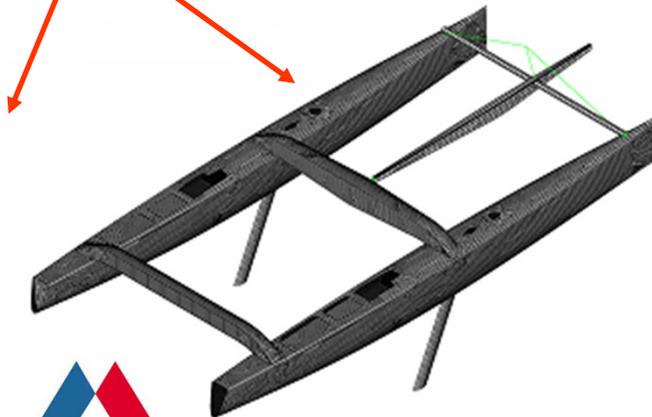
Carbone / époxy



Etudes multi-échelles



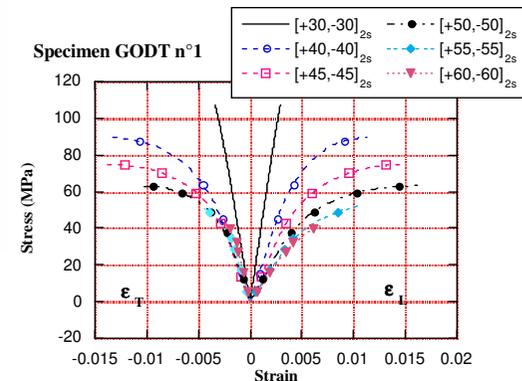
Âmes : Nomex



Structure



Simulation des Endommagements



Plan

- **Caractérisation thermomécanique du pli carbone époxy**
 - Quasi-statique, couplage thermoélastique
- **Caractérisation thermique du pli**
 - Capacité calorifique, conductivité thermique
- **Homogénéisation périodique : mécanique et thermique**
 - Comportement du pli élémentaire de carbone époxy
- **Essais de fatigue (Courbe de Wöhler)**
 - Essais accélérés d'Auto-échauffement
 - Limite de Fatigue
- **Simulations des essais d'Auto-échauffement**

Méthode de l'état local

Potentiel thermodynamique

- Energie libre de Helmholtz

$$\rho\psi(\bar{\varepsilon}, T, V) = \psi_0 + \frac{1}{2} \bar{\varepsilon} : \bar{\bar{C}}(d_1, d_2, d_{12}) : \bar{\varepsilon} - \bar{\bar{C}} : \bar{\alpha} : \bar{\varepsilon} \theta - \frac{\rho c_\varepsilon}{2T_0} \theta^2$$

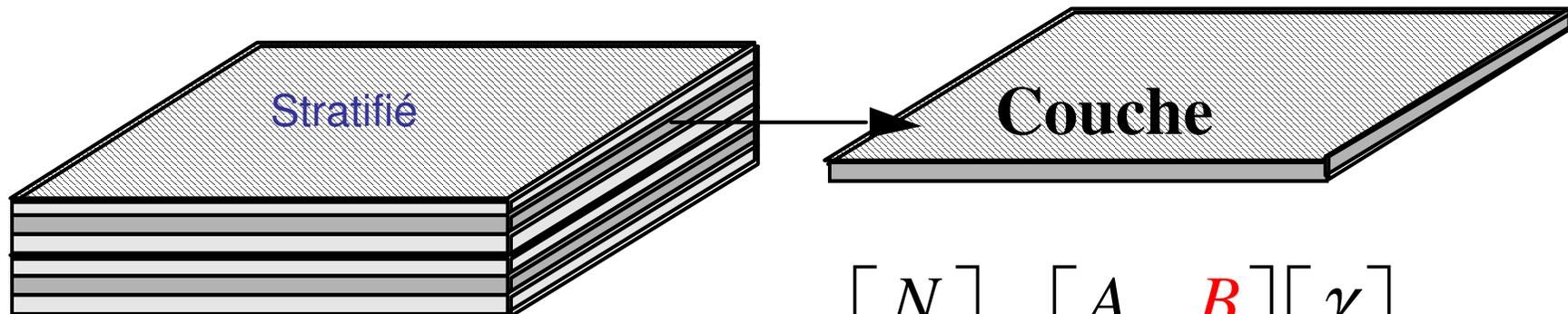
$$\theta = T - T_0$$

- Rigidité : “**C**”, dilatation thermique : “ **α** ”

$$\sigma_{ij} = \rho \frac{\partial \Psi}{\partial \varepsilon_{ij}^e} \Rightarrow \sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl} - C_{ijkl} \alpha_{kl} \theta$$

Composites stratifiés

- Peaux Carbone / black métal
- Epaisseur des couches 0,1 ; 0,3 mm



- Comportement

$$\begin{bmatrix} N \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \gamma \\ \chi \end{bmatrix}$$

$$\varepsilon = \gamma + z\chi$$

Caractérisation mécanique Statique et Fatigue

Ophélie Westphal 2012

- **Caractérisation thermomécanique du pli carbone époxy**

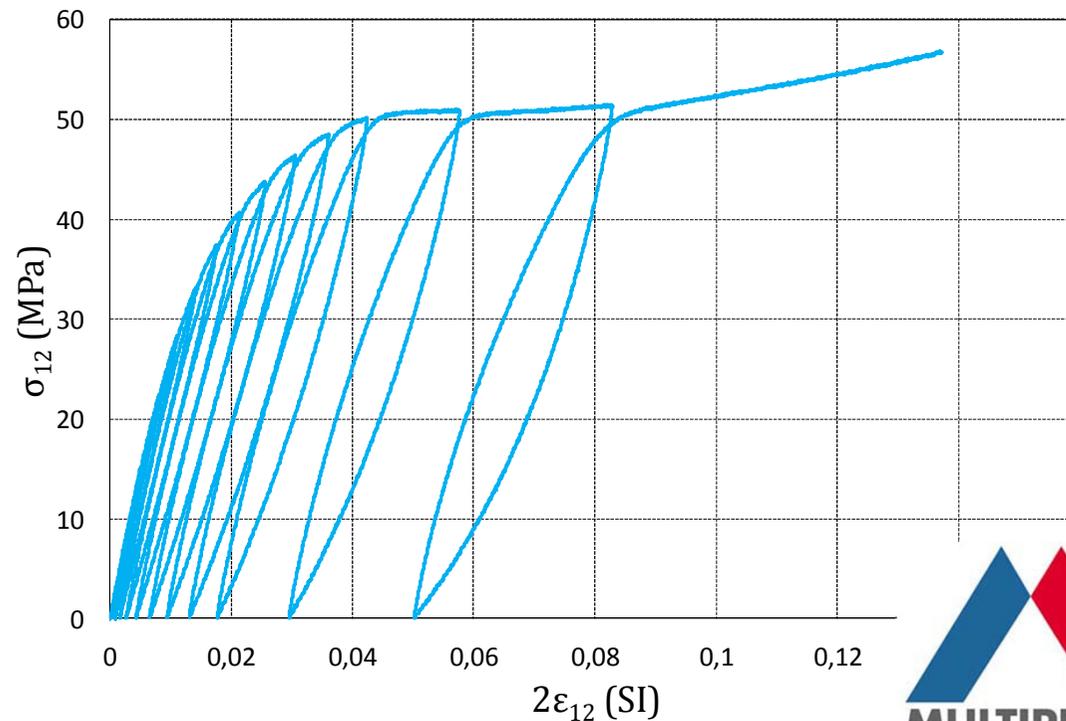
- Base canonique UD : $[0^{\circ}]_8$, $[(\pm 67,5^{\circ})_4]_S$ et $[(\pm 45)_4]_S$

- Validations

$[0/90/0/90]_S$,

$[+45/-45/90/0]_S$

$[+45/90/-45/0]_S$



Plan

- **Caractérisation thermomécanique du pli carbone époxy**
 - Quasi-statique, couplage thermoélastique
- **Caractérisation thermique du pli**
 - Capacité calorifique, conductivité thermique
- **Homogénéisation périodique : mécanique et thermique**
 - Comportement du pli élémentaire de carbone époxy
- **Essais de fatigue (Courbe de Wöhler)**
 - Essais accélérés d'Auto-échauffement
 - Limite de Fatigue
- **Simulations des essais d'Auto-échauffement**

Dilatations thermiques

Comportement thermomécanique

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl} - C_{ijkl} \alpha_{kl} \theta$$

- Eprouvettes dans une étuve
- Montée en température de 20°C à 80°C
 - paliers de 10°C
- La durée des paliers est fixée à 30 minutes
 - Enregistrement : déformations, températures
 - Éprouvette étuve
 - Eprouvette alu étuve

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11}^e \\ \varepsilon_{22}^e \\ \sqrt{2} \varepsilon_{12}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} \theta \\ \alpha_{22} \theta \\ 0 \end{bmatrix}$$

α_{kl}

Dilatations thermiques Pli élémentaire	α_{11}	-1,01E-06	/°C
	α_{22}	4,01E-05	/°C

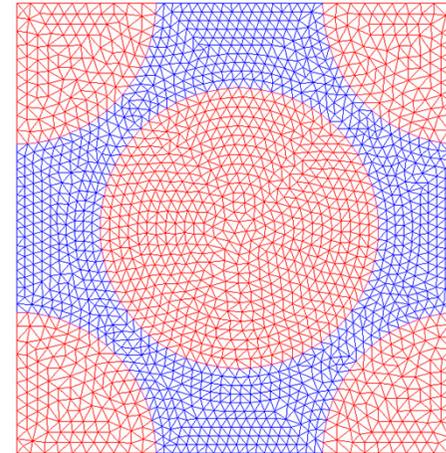
Plan

- **Caractérisation thermomécanique du pli carbone époxy**
 - Quasi-statique, couplage thermoélastique
- **Caractérisation thermique du pli**
 - Capacité calorifique, conductivité thermique
- **Homogénéisation périodique : mécanique et thermique**
 - Comportement du pli élémentaire de carbone époxy
- **Essais de fatigue (Courbe de Wöhler)**
 - Essais accélérés d'Auto-échauffement
 - Limite de Fatigue
- **Simulations des essais d'Auto-échauffement**

Homogénéisation Mécanique et Thermique

Simulations des VER

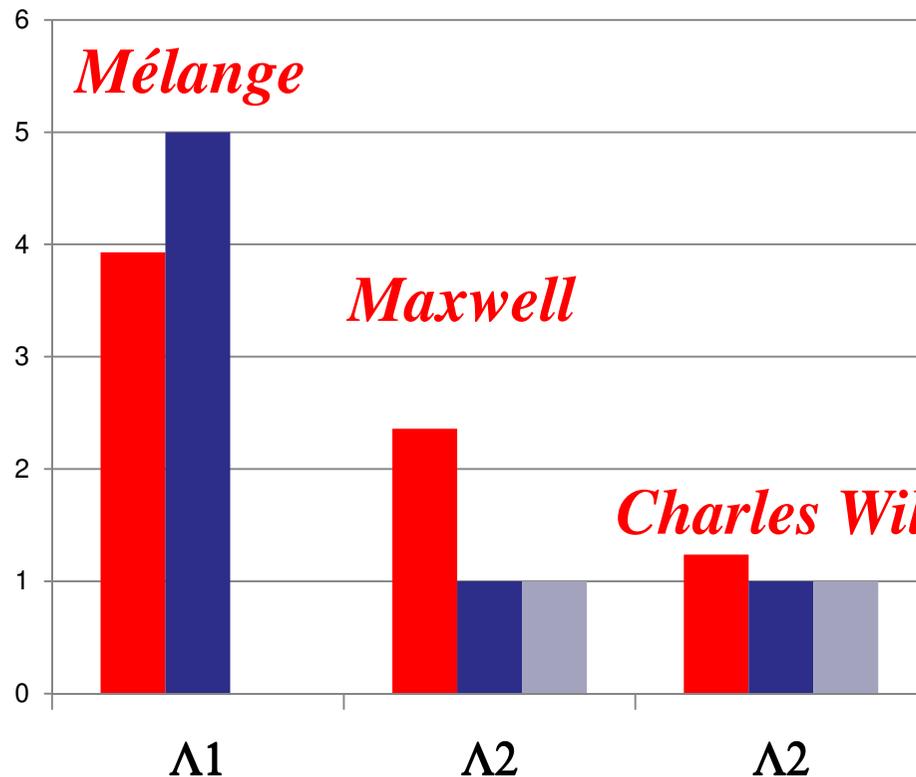
- **Les données**
 - Le maillage du VER
 - Le comportement des phases
- **Hypothèses**
 - Homogénéisation périodique
 - Hill-Mandel
- **Les résultats**
 - Propriétés mécaniques et thermiques homogénéisées



CAST3M-CEA

$$\Lambda_H = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix} \text{ dans la base } (\vec{N}_1, \vec{N}_2, \vec{N}_3)$$

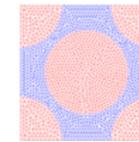
Homogénéisation Thermique



$$\lambda_1 = (1 - v_f)\lambda_r + v_f\lambda_{f1}$$

$$\lambda_{2M} = \lambda_r \left[\frac{\lambda_{f2} + 2\lambda_r + 2v_f(\lambda_{f2} - \lambda_r)}{\lambda_{f2} + 2\lambda_r - 2v_f(\lambda_{f2} - \lambda_r)} \right]$$

- Calcul
- Essais
- EF Périodique

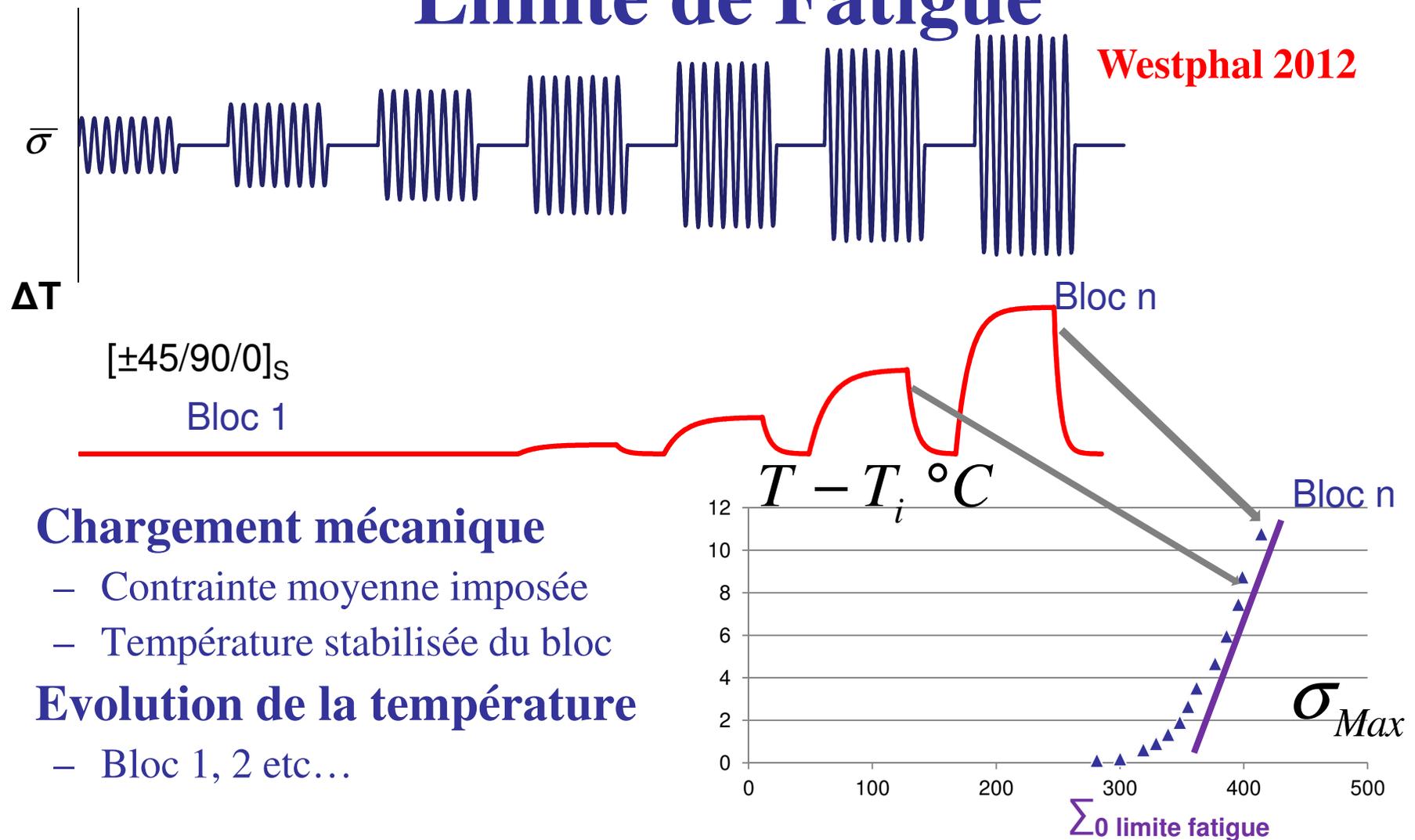


$$\lambda_{2CW} = \lambda_r \left[\frac{\lambda_{f2}(1 + v_f) + \lambda_r(1 - v_f)}{\lambda_{f2}(1 - v_f) + \lambda_r(1 + v_f)} \right]$$

Plan

- **Caractérisation thermomécanique du pli carbone époxy**
 - Quasi-statique, couplage thermoélastique
- **Caractérisation thermique du pli**
 - Capacité calorifique, conductivité thermique
- **Homogénéisation périodique : mécanique et thermique**
 - Comportement du pli élémentaire de carbone époxy
- **Essais de fatigue (Courbe de Wöhler)**
 - Essais accélérés d'Auto-échauffement
 - Limite de Fatigue
- **Simulations des essais d'Auto-échauffement**

Limite de Fatigue



- **Chargement mécanique**
 - Contrainte moyenne imposée
 - Température stabilisée du bloc
- **Evolution de la température**
 - Bloc 1, 2 etc...

Plan

- **Caractérisation thermomécanique du pli carbone époxy**
 - Quasi-statique, couplage thermoélastique
- **Caractérisation thermique du pli**
 - Capacité calorifique, conductivité thermique
- **Homogénéisation périodique : mécanique et thermique**
 - Comportement du pli élémentaire de carbone époxy
- **Essais de fatigue (Courbe de Wöhler)**
 - Essais accélérés d'Auto-échauffement
 - Limite de Fatigue
- **Simulations des essais d'Auto-échauffement**
 - Thermique, thermomécanique...

Auto-échauffement

Simulations éléments finis

- **Théorie des plaques stratifiées en thermique**
 - Conductivité thermique, capacité calorifique, masse volumique
- **Chargements**
 - Convection, rayonnement
 - Températures imposées, source interne
- **Simulations stationnaires**
 - Température initiale
 - Température stabilisée du bloc
- **Simulations instationnaires**
 - Evolution de la température du bloc

CAST3M-CEA
ABAQUS

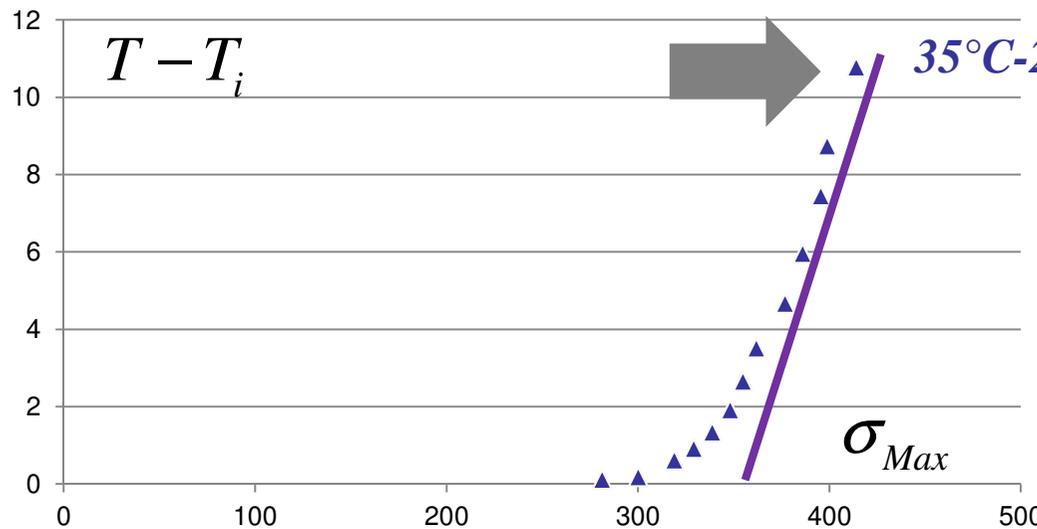
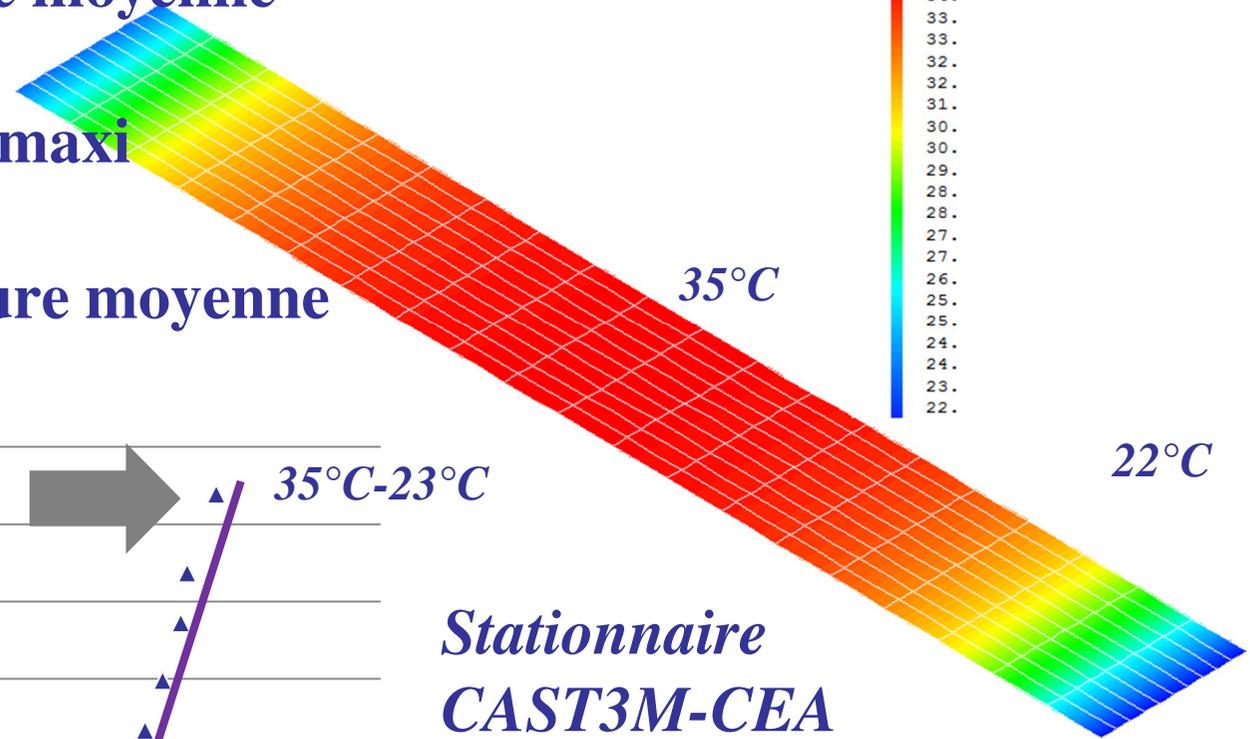
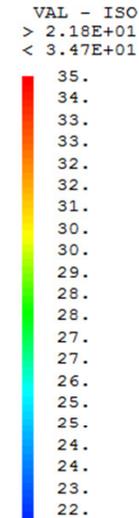
$$\operatorname{div}\left(-\bar{\lambda} \overrightarrow{\operatorname{grad}}(T)\right) + r - A_K \dot{V}_K = 0$$

$$\rho C_p \dot{T} = \operatorname{div}\left(-\bar{\lambda} \overrightarrow{\operatorname{grad}}(T)\right) + r - A_K \dot{V}_K$$

Auto-échauffement

Simulation plaque stratifiée $[\pm 45/90/0]_S$

- **Température initiale moyenne**
 – 23°C
- **Température finale maxi**
 – 35°C
- **Variation température moyenne**
 – 12°C



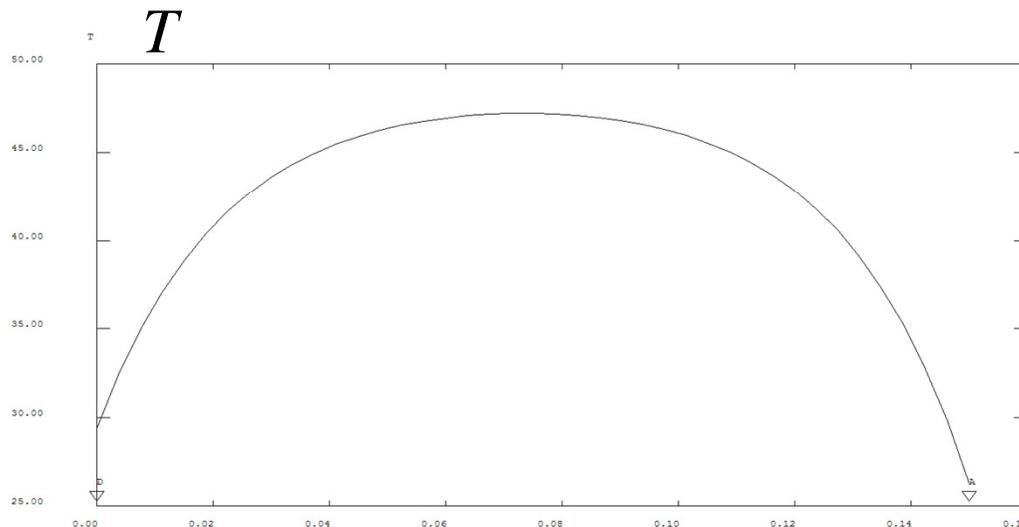
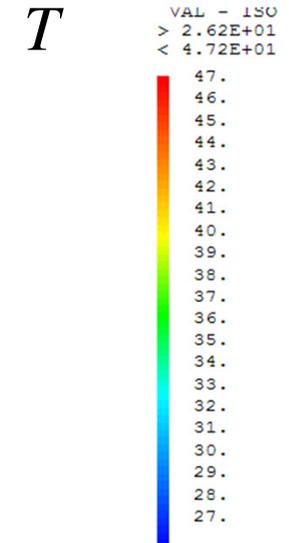
Stationnaire
CAST3M-CEA

$$\text{div} \left(-\bar{\lambda} \overrightarrow{\text{grad}} (T) \right) + r - A_K \dot{V}_K = 0$$

Auto-échauffement

Simulation plaque stratifiée $[\pm 45]_S$

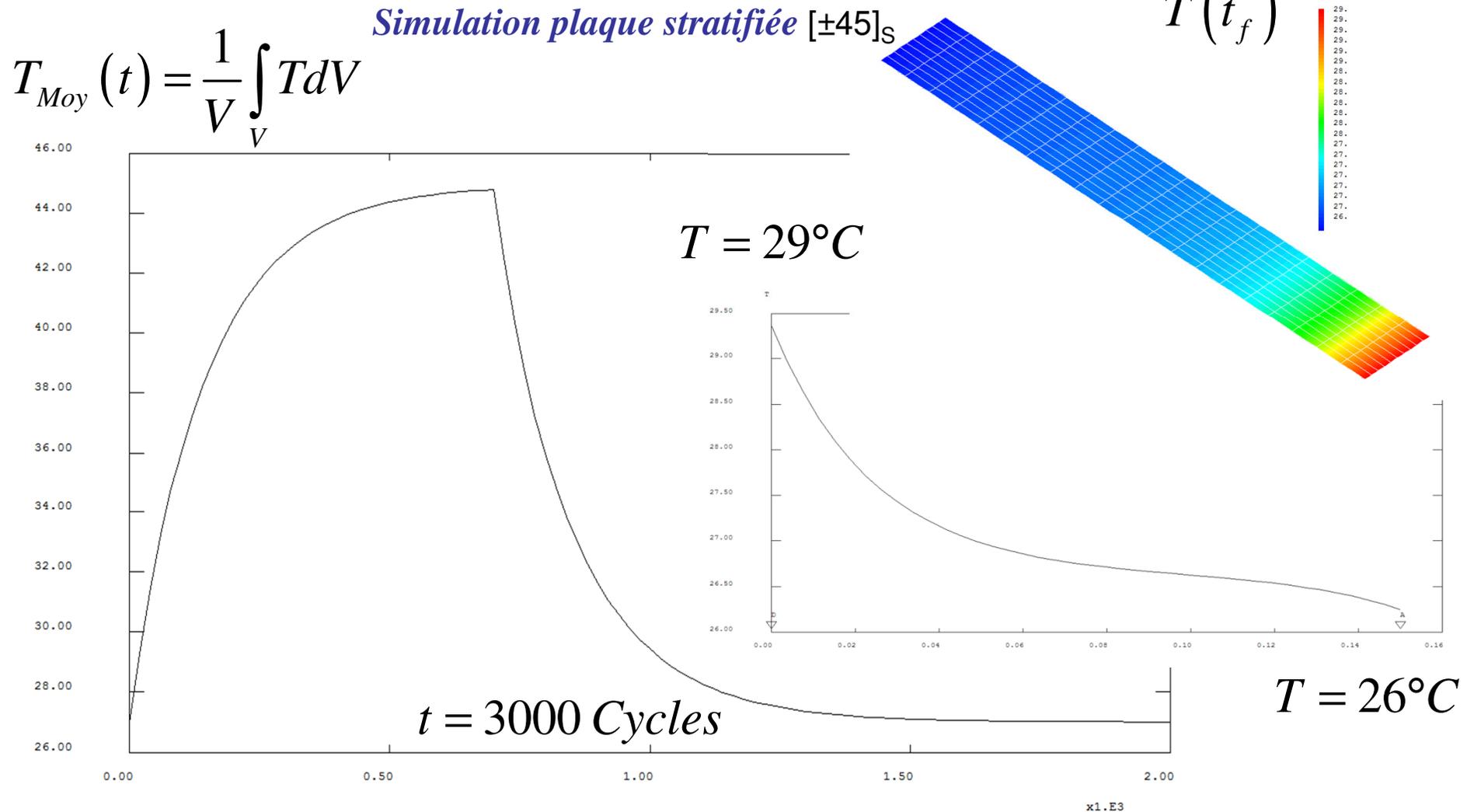
- **Température initiale moyenne**
 – 23°C
- **Température finale maxi**
 – 47°C
- **Variation température moyenne**
 – 14.5 °C



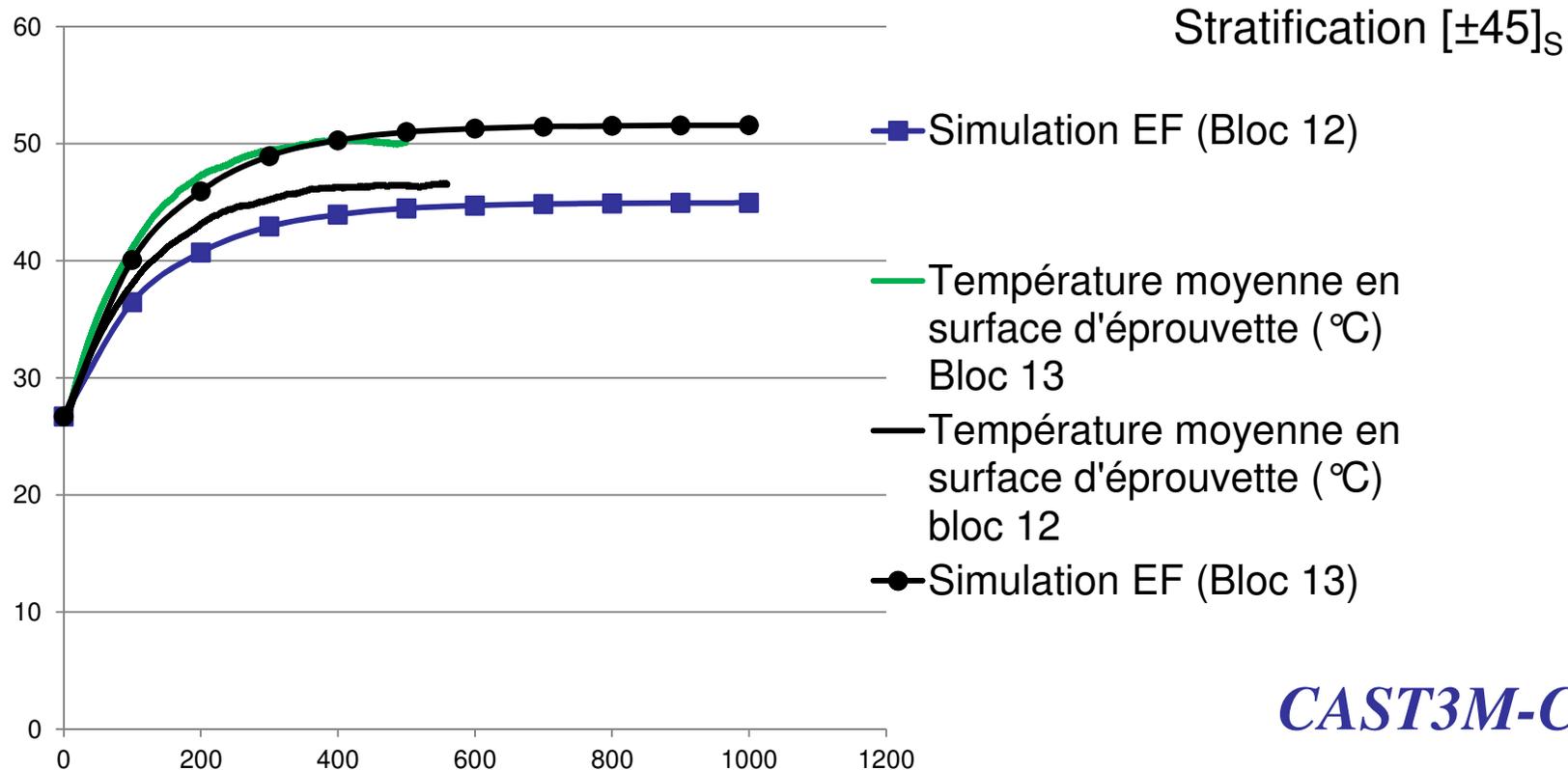
Stationnaire
CAST3M-CEA

$$\text{div} \left(-\bar{\lambda} \overrightarrow{\text{grad}} (T) \right) + r - A_K \dot{V}_K = 0$$

Simulation instationnaire de l'Auto-échauffement



Auto-échauffement phase instationnaire



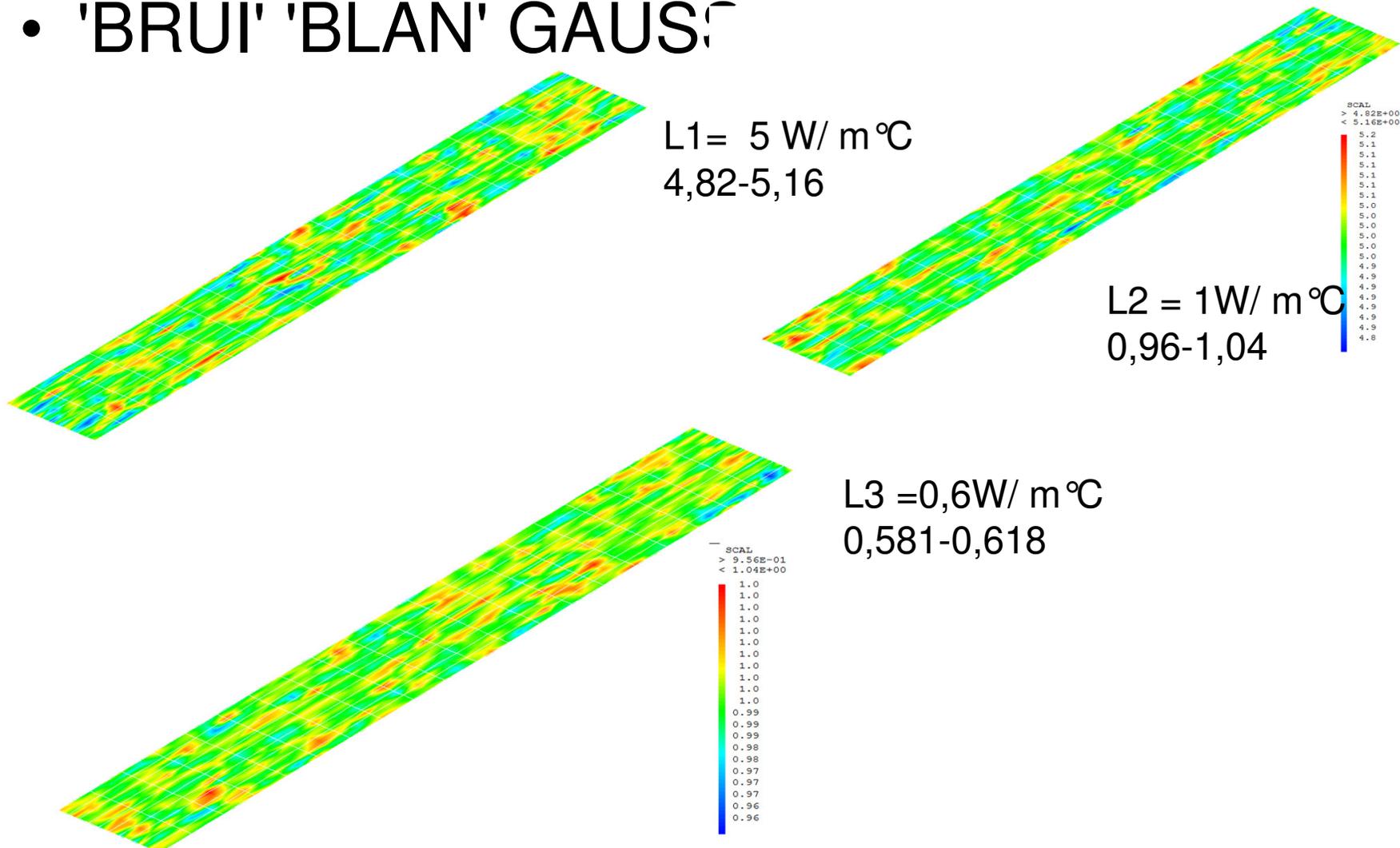
$$\rho C_p \dot{T} = \text{div} \left(-\bar{\lambda} \overrightarrow{\text{grad}} (T) \right) + r - A_K \dot{V}_K$$

Thermique stratifiées COQ8

- **MODL**
 - THERMIQUE ORTHOTROPE COQ8
 - CONVECTION SUPERIEURE COQ8 (et INFERIEURE)
- **BRUI , CHAN**
 - 'BLAN' GAUSS ;
- **MATR MOD1 'DIRECTION' O1 INCL 45 OZ 'RHO'**
ROV 'C' CCV 'K1' LAM1 'K2' LAM2 'K3' LAM3 EPAI
ep EXCENTREMENT exc1 ;
- **COND, SOUR** **CAST3M**
- **BLOQ, DEPI**
- **CHARTER + codes**
- **RESOU, PASAPAS,**

Conductivité bruitées du Pli Carbone-époxy

- 'BRUI' 'BLAN' GAUS



M. Mateos 2014

A. Krasnobrizha 2015

- Energie Libre de Helmholtz :

$$\varepsilon_{12} = \varepsilon_{12}^e + \varepsilon_{12}^i \quad \rho\psi(\varepsilon_{12}, d_{12}) = \frac{1}{2} 2G_{12}^0 (1 - d_{12}) (\varepsilon_{12}^e)^2 + \frac{Q}{\beta + 1} p^\beta$$

- Premier et second principe :

$$\begin{aligned} \text{– Clausius-Duhem } \Phi &= \left(\sigma_{12} - \rho \frac{\partial \psi}{\partial \varepsilon_{12}^e} \right) \dot{\varepsilon}_{12}^e + \sigma_{12} \dot{\varepsilon}_{12}^i + R\dot{p} - \rho \frac{\partial \psi}{\partial d_{12}} \dot{d}_{12} \geq 0 \\ Y_{12} &= - \frac{\partial \rho\psi}{\partial d_{12}} \end{aligned}$$

- Force thermodynamique :

$$Y_{12} = \frac{1}{2} G_{12} (2\varepsilon_{12}^e)^2$$

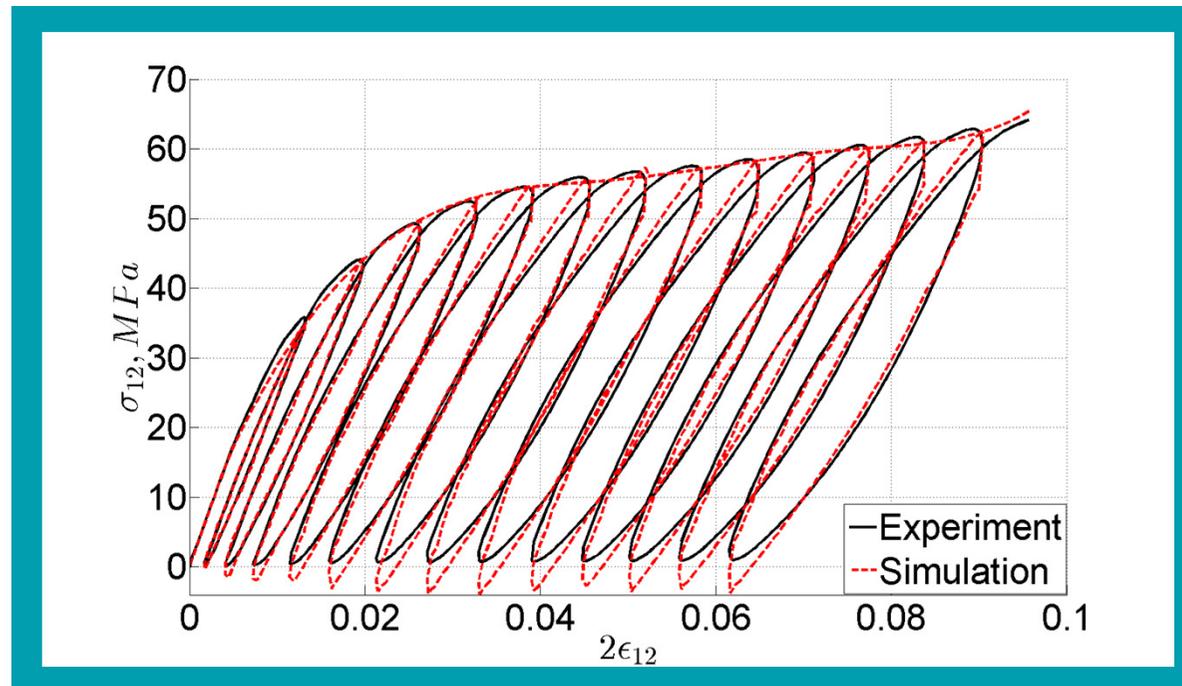
- Potentiel de dissipation :

$$\rho\varphi(\dot{\varepsilon}_{12}; D_t^\alpha \varepsilon_{12}, d_{12}) = \frac{1}{2} \left(\sum_{k=1}^N 2G_k (1 - d_{12}^{v_k}) D^{\alpha_k} \varepsilon_{12}^e(t) \right) \dot{\varepsilon}_{12}$$

Modèle élastoplastique endommageable fractionnaire

- Simulations

A. Krasnobrizha 2015



$$\operatorname{div} \left(\overline{\lambda} \overrightarrow{\operatorname{grad}} (T) \right) - Y_{12} \dot{d}_{12} - R(p) \dot{p} - 2G^v \left(D^{\alpha_k} \boldsymbol{\varepsilon}_{12}^e \right) \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{12}^e = 0$$

Conclusions

Caractérisation thermo-mécanique du pli

Essais de fatigue

Courbes de Wöhler, Limite de fatigue

Essais d'auto-échauffement

Limite de fatigue (4H)

Interactions modèles simulations

Simulations thermiques stationnaires

Simulations thermiques instationnaires