

# Simulation du délaminage sous des sollicitations de fatigue

*Application au Carbone époxy UD  
Théorie et programmation dans CAST3M*

**Laurent GORNET**

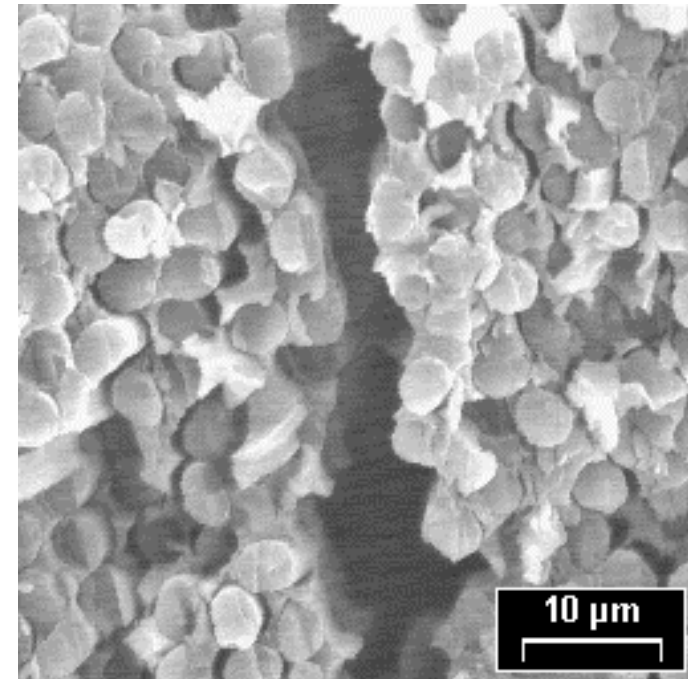
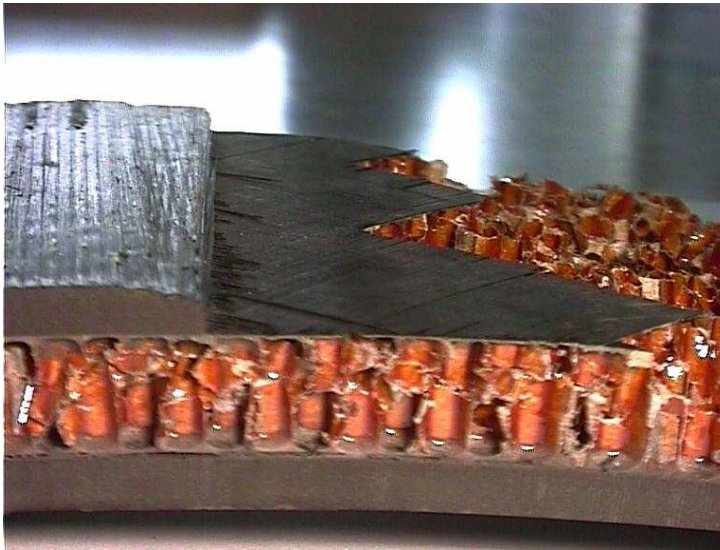
*Maître de Conférences HDR*

# Plan

- **Contexte**
- **Modélisation des composites**
  - Endommagements, délaminages
- **Développement UMAT**
  - De la théorie à la programmation
- **Exemples de validation**
  - 2D
- **Conclusion**

# Sandwich

## Mécanismes endommagement et rupture



Fissuration de la matrice

Décohésion fibre-matrice

Stratifié : rupture de fibres, délaminages

Ame Nomex : rupture par instabilité

# Méso-modélisation des composites stratifiés

Méso-constituants du stratifié

**Ladevèze 86**

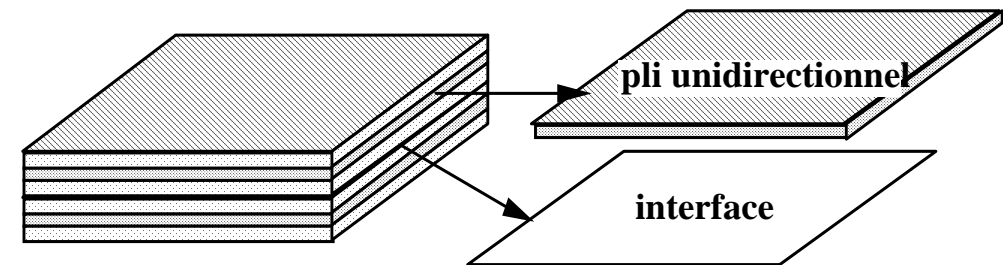
- **Pli**

- rupture des fibres
- fissuration matricielle

*Mécanismes homogènes dans l'épaisseur*

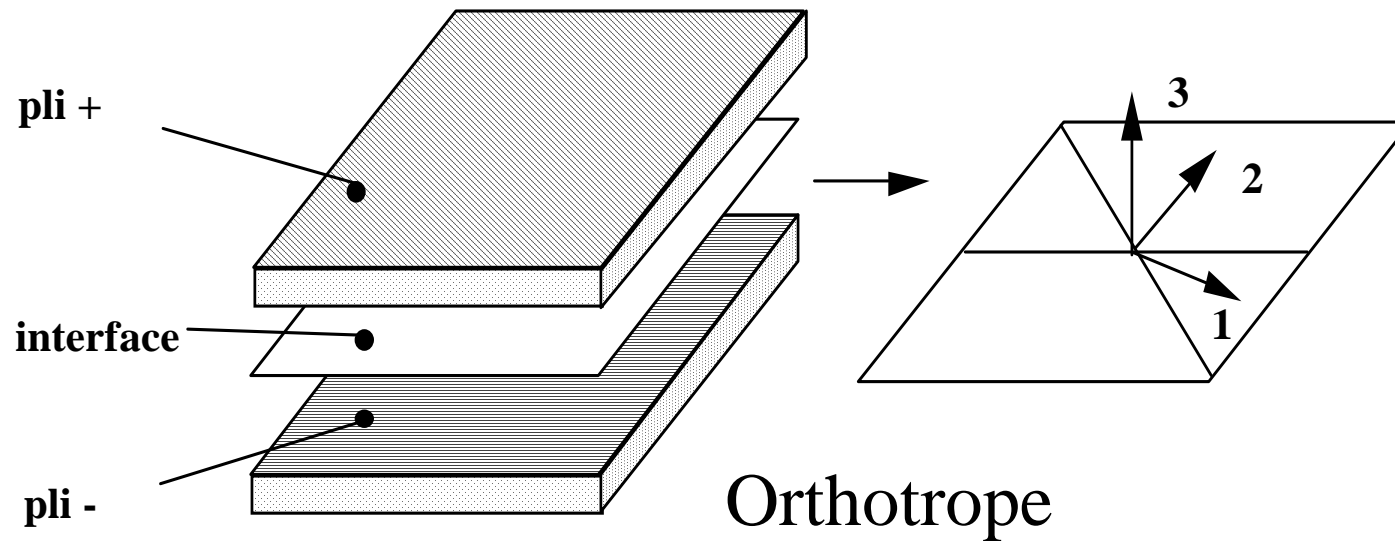
- **Interface**

- Prise en compte du délaminage



**Allix 87**

# Energie de déformation



$$E_D = \frac{1}{2} \left[ \frac{\langle -\sigma_{33} \rangle_+^2}{k_3^0} + \frac{\langle \sigma_{33} \rangle_+^2}{k_3^0 (1-d_3)} + \frac{\sigma_{32}^2}{k_2^0 (1-d_2)} + \frac{\sigma_{31}^2}{k_1^0 (1-d_1)} \right]$$

# Modèle en fatigue

**Gornet, Ijaz, Cartier 2008**

$$\left\{ \begin{array}{l} t \longrightarrow N \\ t + \Delta t \longrightarrow N + \Delta N \end{array} \right.$$



$$\dot{d}_T = \dot{d}_S + \dot{d}_F$$

$$\int_t^{t+\Delta t} \dot{d}_S dt = \int_t^{t+\Delta t} \left[ \frac{n}{n+1} \frac{\langle \underline{Y} - Y_o \rangle_+}{Y_C - Y_o} \right]^n dt$$

$$\dot{d}_F = \frac{\partial d_F}{\partial t} = \begin{cases} g \left( d, \frac{\underline{Y}}{Y_C} \right) \frac{\dot{\underline{Y}}(t)}{Y_C} & \text{if } \dot{\underline{Y}} \geq 0 \\ 0 & \text{if } \dot{\underline{Y}} < 0 \end{cases}$$

# Problèmes et stratégies

- Modèle d'endommagement classique
  - Non unicité de la solution
- Conséquences Numériques
  - Dépendance au maillage
- Solutions
  - Limiteurs de localisation
- Stratégie composites
  - Mésomodélisation
  - Endommagement non-local

# Plan

- **Contexte**
- **Modélisation des composites**
  - Endommagements, délaminages
- **Développement UMAT**
  - De la théorie à la programmation
- **Exemples de validation**
  - 2D
- **Conclusion**



# ABAQUS-UMAT

## Fortran 77

- *SUBROUTINE HINTF* ( **STRESS**, **STATEV**,  
*DDSDDE*, SSE, SPD, SCD,RPL, DDSDDT,  
DRPLDE, DRPLDT, *STRAN*, *DSTRAN*,  
TIME, DTIME,TEMP, DTEMP, PREDEF,  
DPRED,CMNAME, NDI, NSHR, NTENS,  
NSTATV, PROPS, NPROPS,  
COORDS,DROT, PNEWDT, CELENT,  
DFGRD0, **DFGRD1**,NOEL, NPT, LAYER,  
KSPT, KSTEP, KINC )

# MODE

- **LCMAT** = **MOTS** 'KS' 'KN' 'GA1'  
'AL' 'DCRI' 'ann' 'Y0' 'YC'  
'CF' 'LMDF' 'BETF' 'NPAS' 'DLTN' ;
- **LCVAR** = **MOTS** 'D1' 'D3' 'YDBP'  
'DF' 'DS' 'GN1' 'NT' 'CNT' 'STR' 'G';
- **MO** = **MODE** **VOL1** 'MECANIQUE' 'ELASTIQUE'  
'ISOTROPE' 'NON\_LINEAIRE' 'UTILISATEUR'  
'NUME\_LOI' 27  
'C\_MATERIAU' **LCMAT** 'C\_VARINTER' **LCVAR** ;

# MATE

MA = MATE MO 'KS' VKS 'KN' VKN  
'GA1' VGA 'AL' VAL 'DCRI' 1.  
'ANN' VANN 'Y0' VY0 'YC' VGC  
'CF' VCF 'LMDF' VLMDF 'BETF' VBETF  
'NPAS' VNPAS 'DLTN' VDLTN ;

\*Initialisation des variables internes

chpD0i = MANU CHML MO 'D ' 0.0 'STRESSES'  
'TYPE' 'VARINTER' ;

# PASAPAS

```
TAB1 = TABLE;  
TAB1. VARIABLES_INTERNES = TABLE ;  
TAB1. VARIABLES_INTERNES .0 = chpD0i ;  
TAB1 . GRANDES_DEFORMATIONS = VRAI ;  
TAB1 . MODELE = MO;  
TAB1 . CARACTERISTIQUES = MA ;  
TAB1 . CHARGEMENT = CH1 ;  
TAB1 . TEMPS_CALCULES = PR1;  
TAB1 . 'TEMPS_SAUVES' = PR2;  
PASAPAS TAB1 ;
```

# Plan

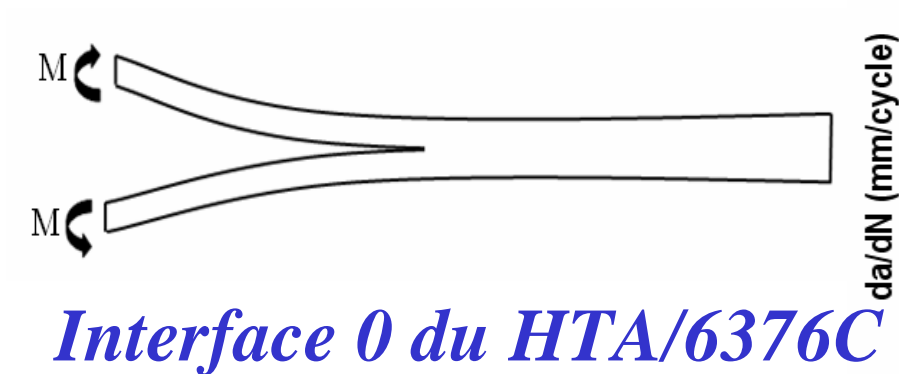
- **Contexte**
- **Modélisation des composites**
  - Endommagements, délaminages
- **Développement UMAT**
  - De la théorie à la programmation
- **Exemples de validation**
  - 2D
- **Conclusion**

# Mode I

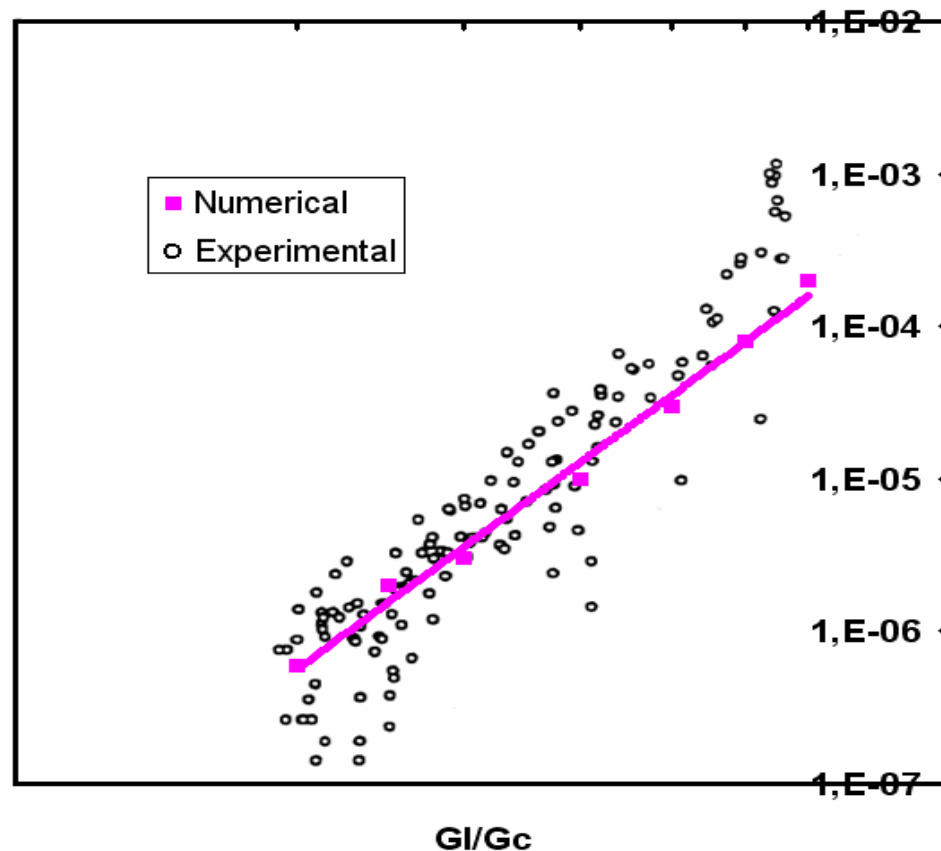
## Propagation de Fatigue

0,1

1

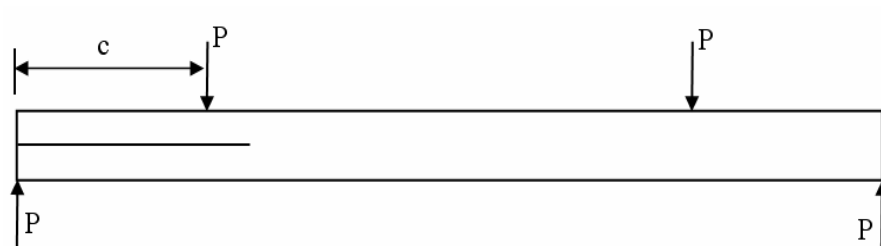


$$G_I = \frac{M^2}{bEI}$$



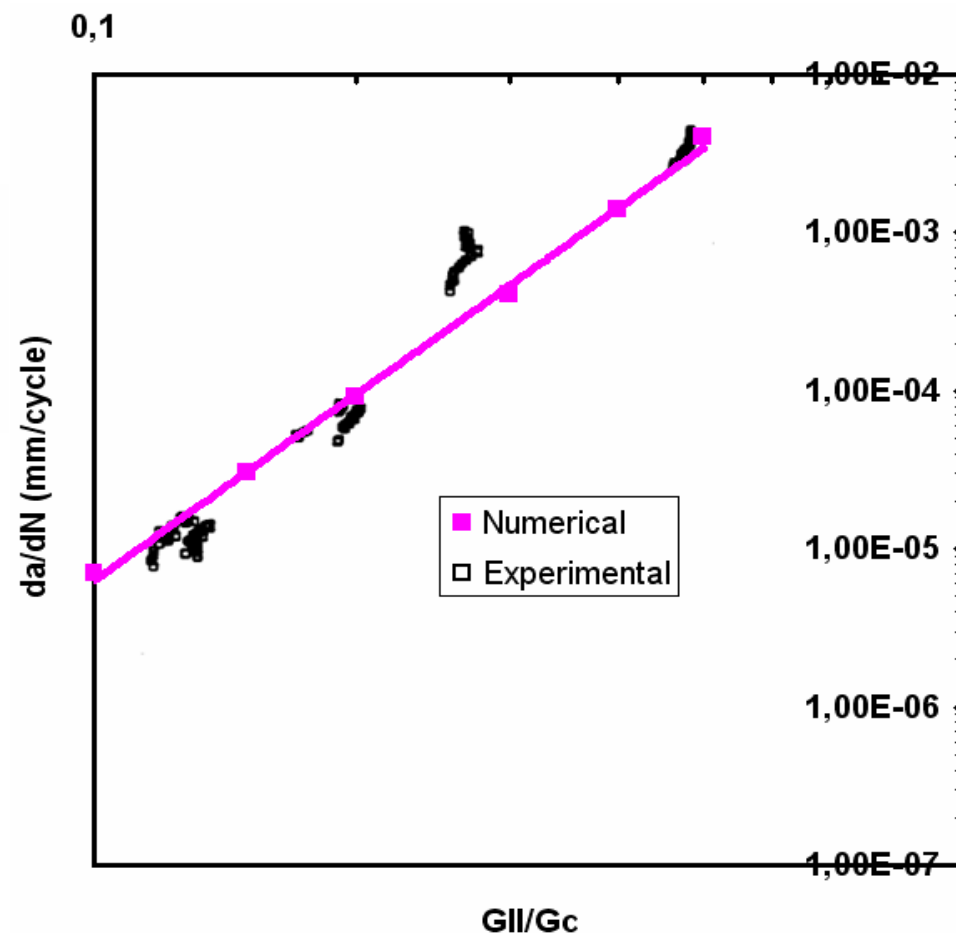
# Mode II

## Propagation de Fatigue



*HTA/6376C*

$$G_{II} = \frac{3}{4} \frac{\left(\frac{cP}{2}\right)^2}{bEI}$$



# Mode mixte

## Propagation de Fatigue

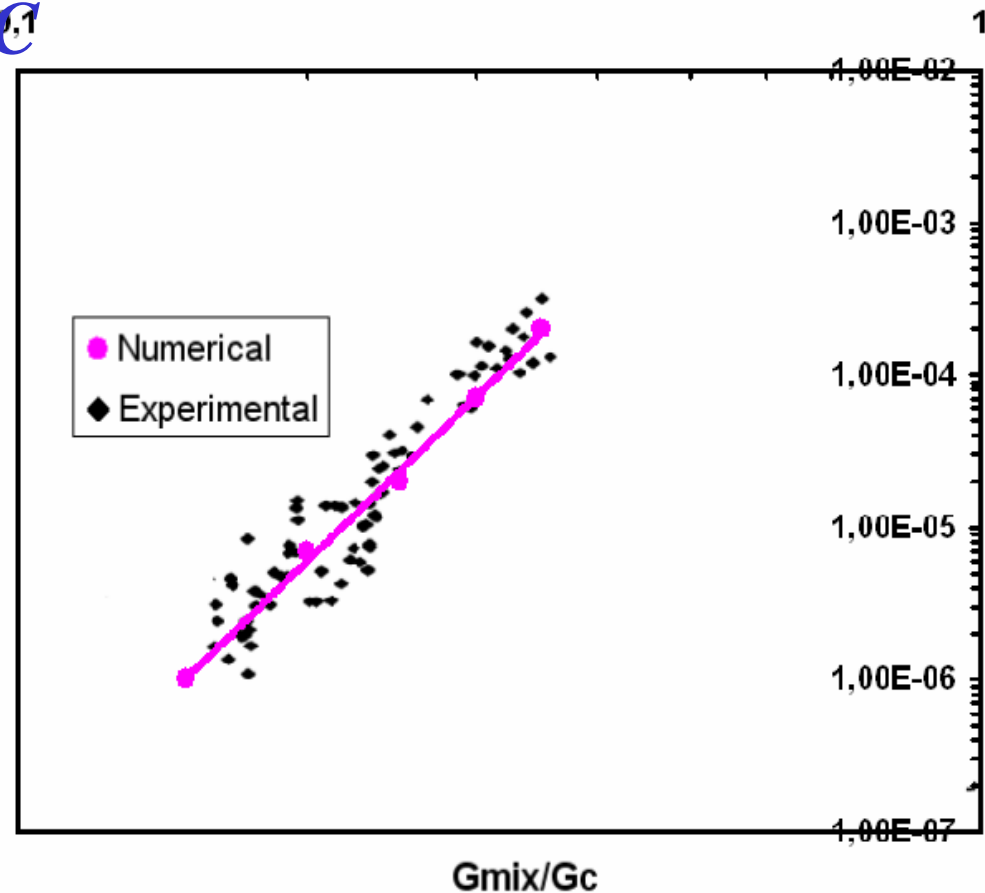
*Interface 0 du HTA/6376C*



*HTA/6376C*

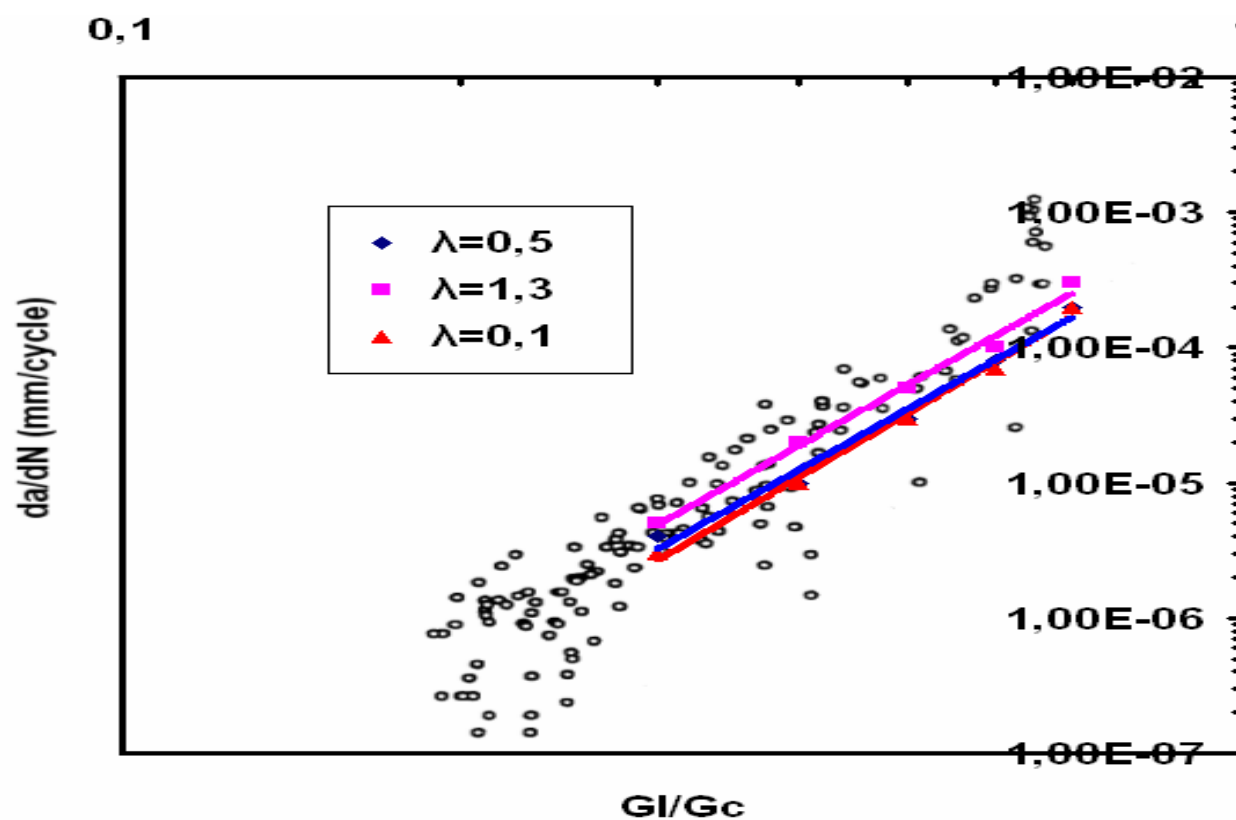
$$G_I = G_{II} = \frac{3}{4 \left(1 + \frac{\sqrt{3}}{2}\right)^2} \frac{M^2}{bEI}$$

$$\rho = \frac{1 - \frac{\sqrt{3}}{2}}{1 + \frac{\sqrt{3}}{2}}$$

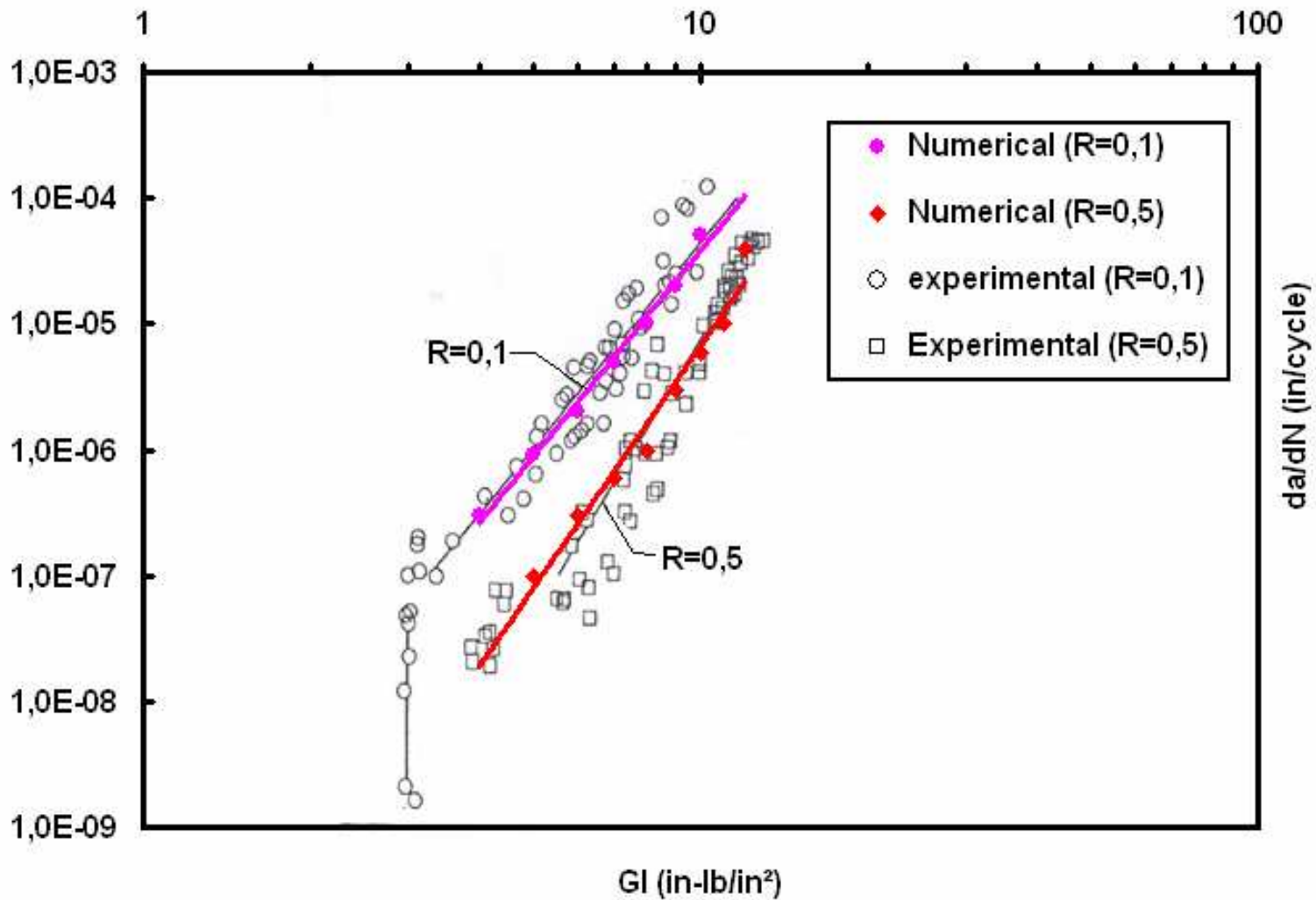




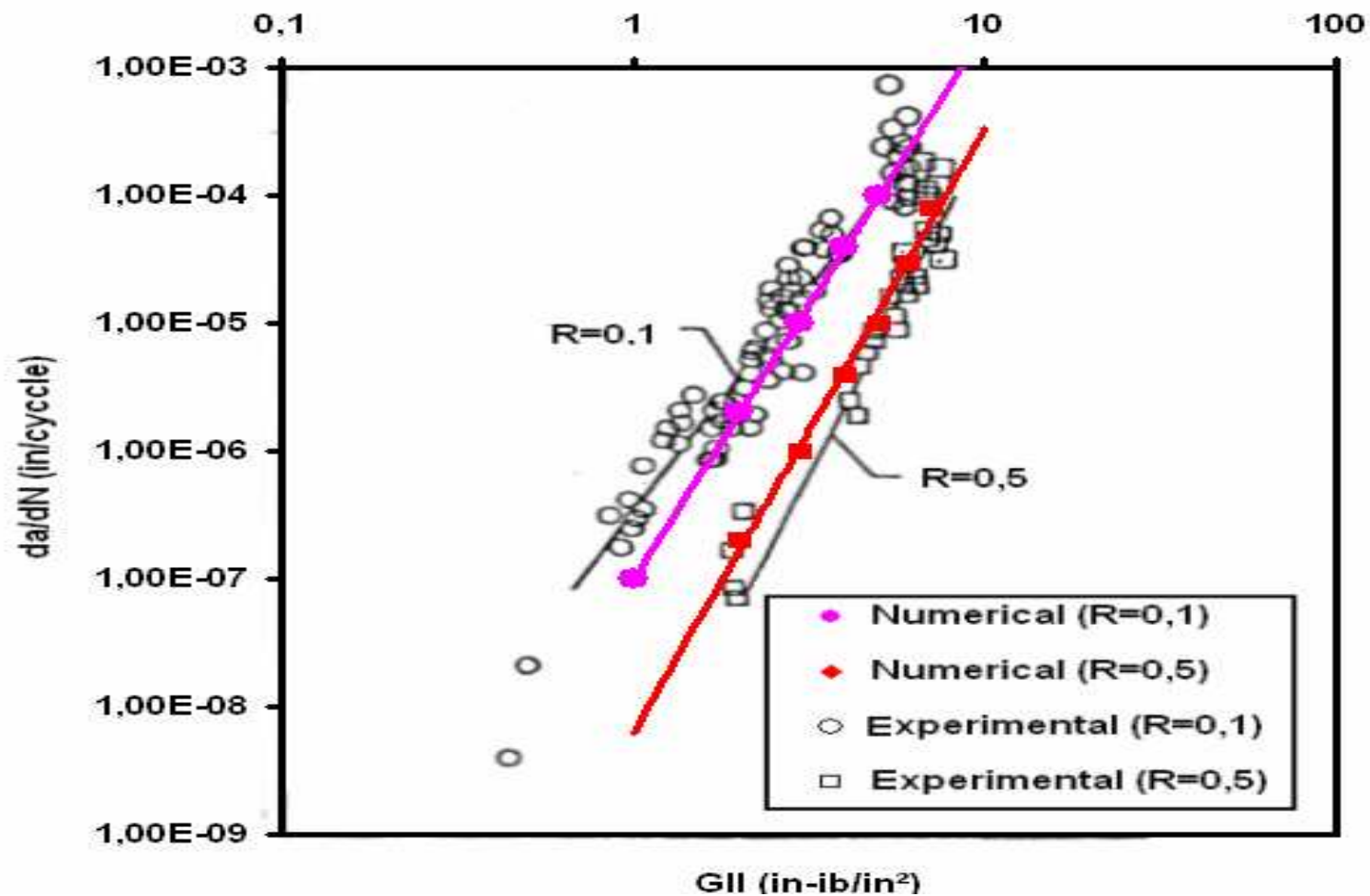
# Influence $\lambda$



# Mode I. AS4/PEEK



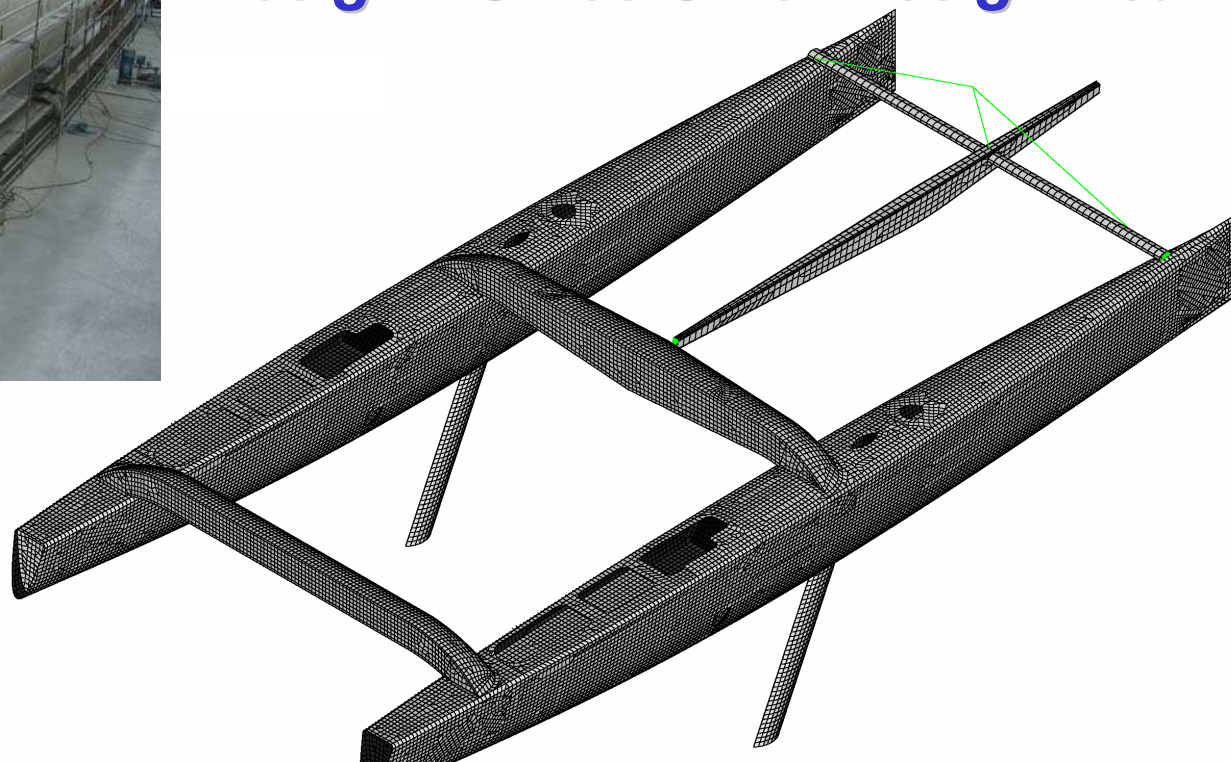
# Mode II, AS4/PEEK



# « Code B1 »



**Design : Gilles Ollier Design Team**



*Mat 45 m*

*Voiles 1000 m<sup>2</sup>*



**110 Pieds (37,80) / 30 Tonnes Carbone-Nomex®**  
**École Centrale de Nantes, GeM UMR CNRS 6183**

# Conclusions

- Modèle « JOIN » en fatigue
  - Interface délaminage
- Stratégie numérique sauts des cycles
- Modèle 2D
  - Bras : poutre et 2D CP/DP/AXIS
- Passage 3D : régularisation Non local