

Simulation du délaminage sous des sollicitations de fatigue

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

Laurent GORNET

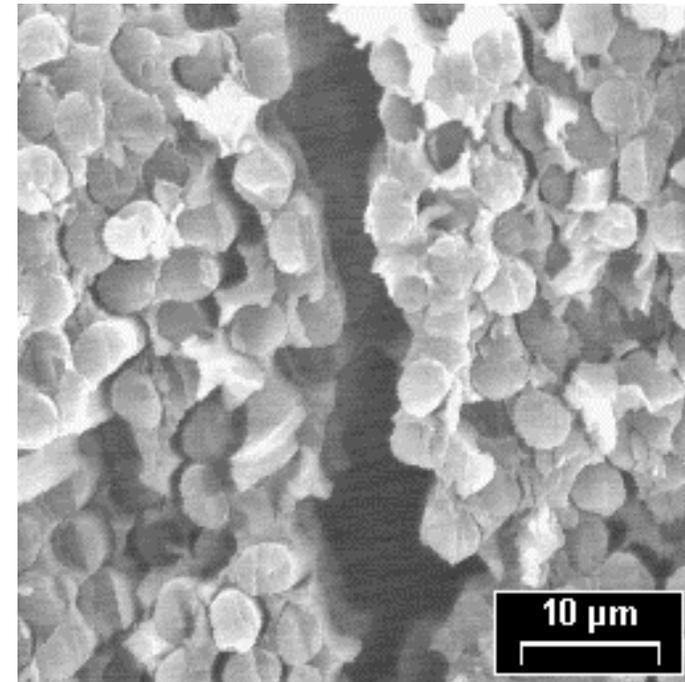
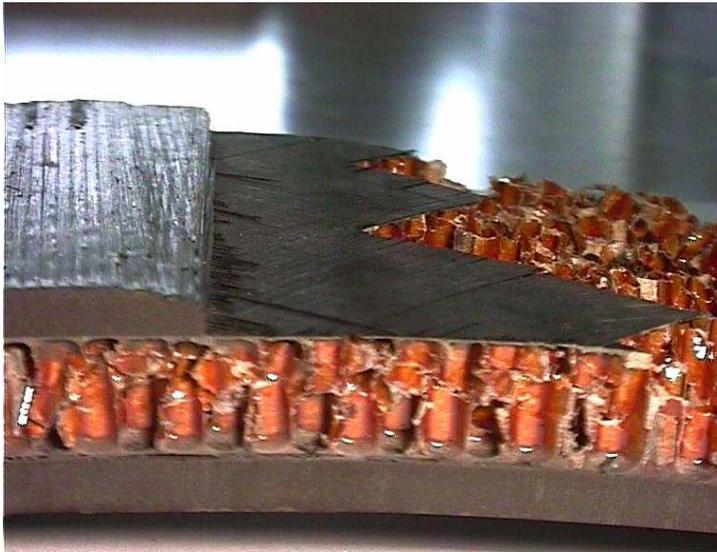
Maître de Conférences HDR

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

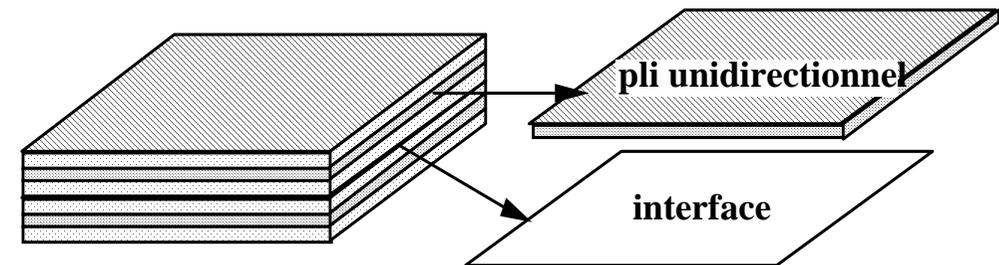
- **Pli**

- rupture des fibres
- fissuration matricielle

Mécanismes homogènes dans l'épaisseur

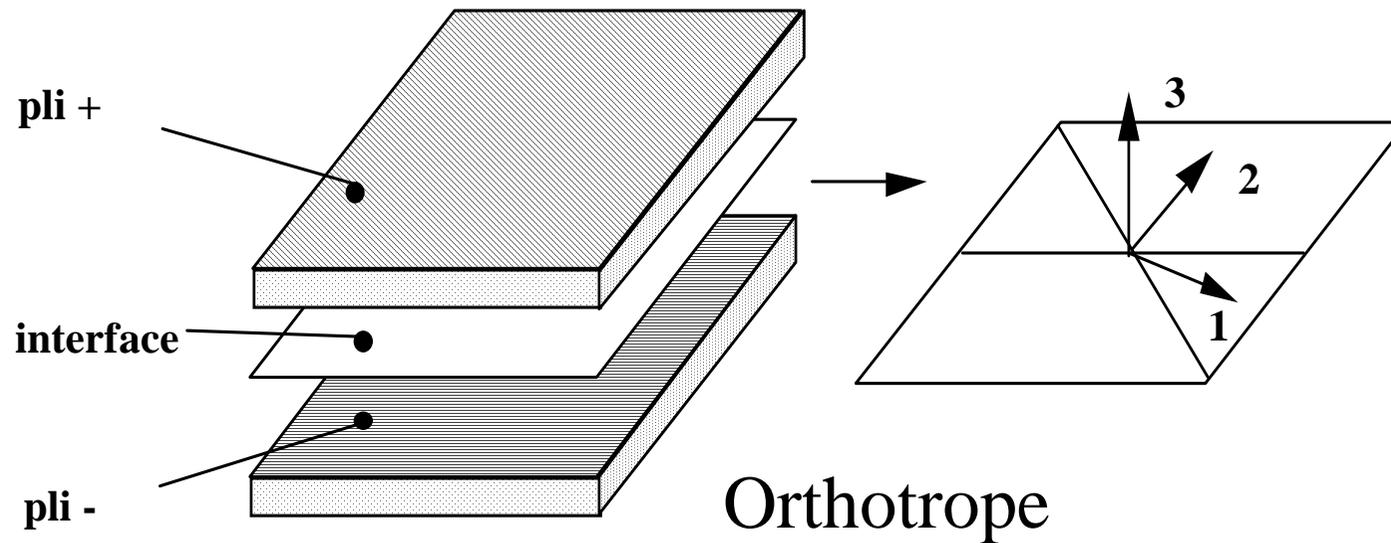
- **Interface**

- 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

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



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

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

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

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

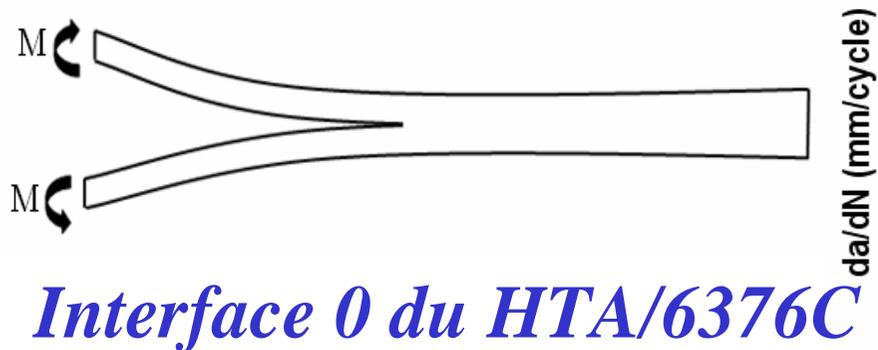
- **Contexte**
- **Modélisation des composites**
 - Endommagements, délaminages
- **Développement UMAT**
 - De la théorie à la programmation
- **Exemples de validation**
 - 2D
- **Conclusion**

Mode I

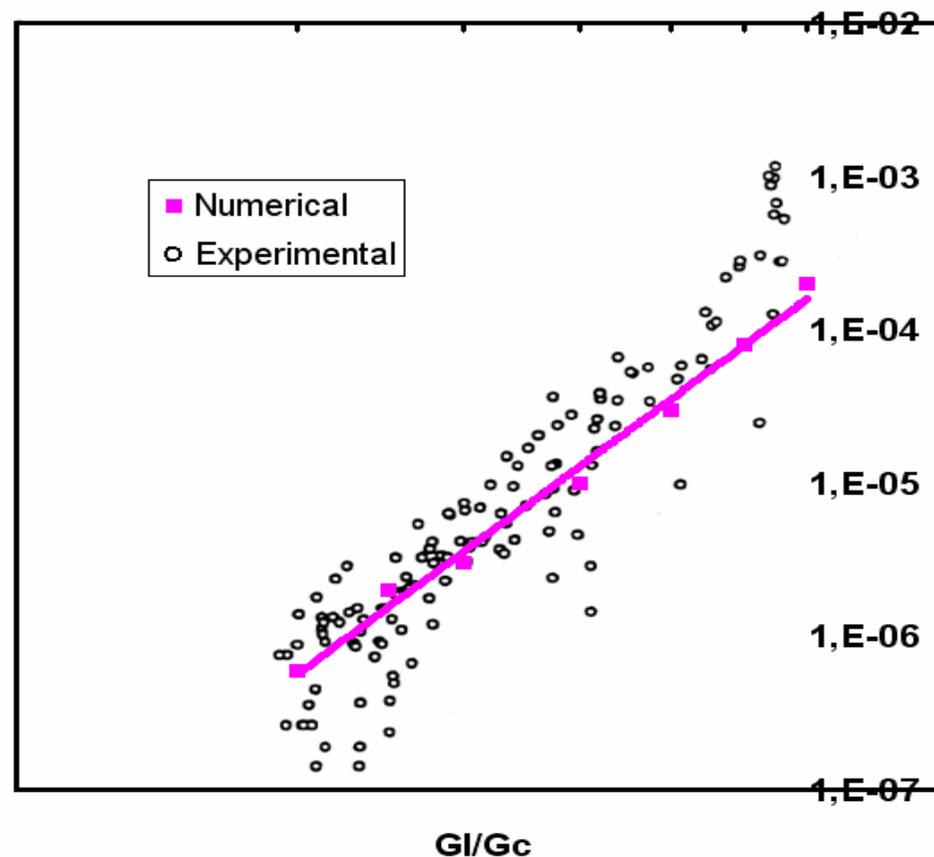
Propagation de Fatigue

0,1

1

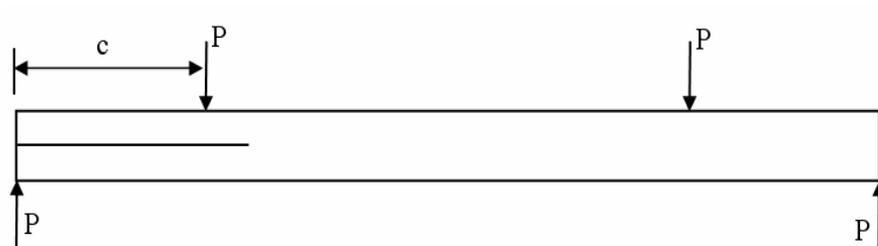


$$G_I = \frac{M^2}{bEI}$$



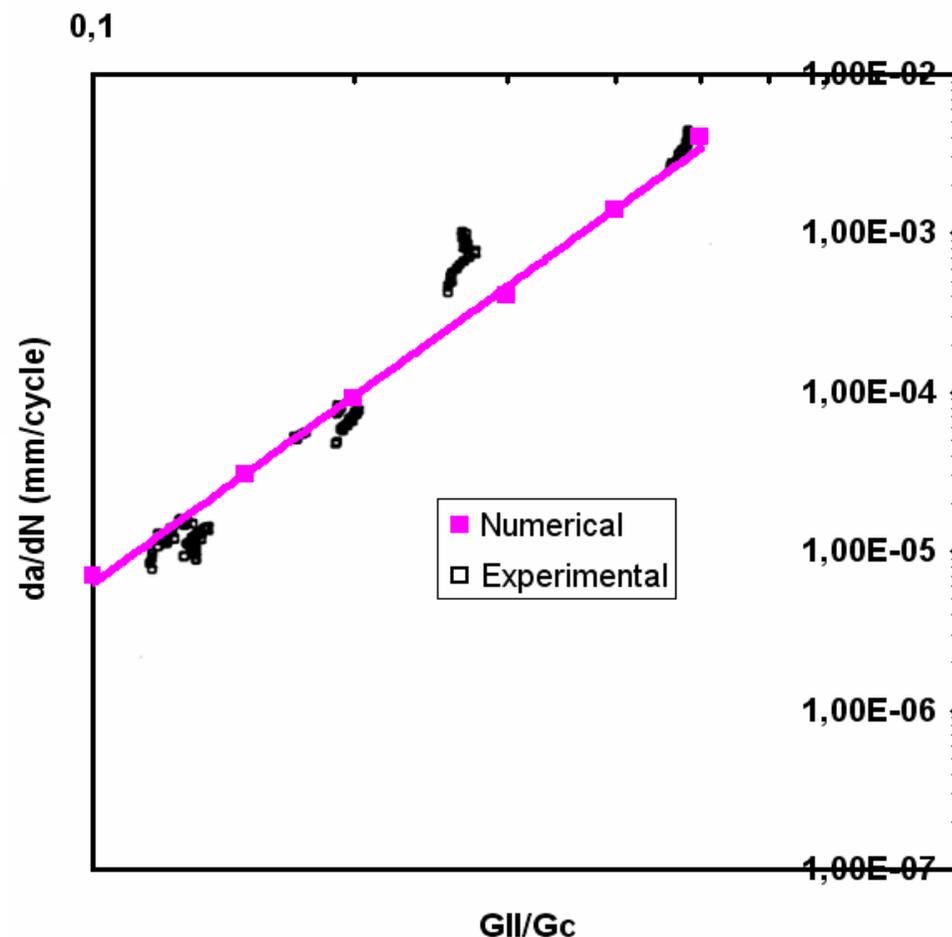
Mode II

Propagation de Fatigue



HTA/6376C

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



Mode mixte

Propagation de Fatigue

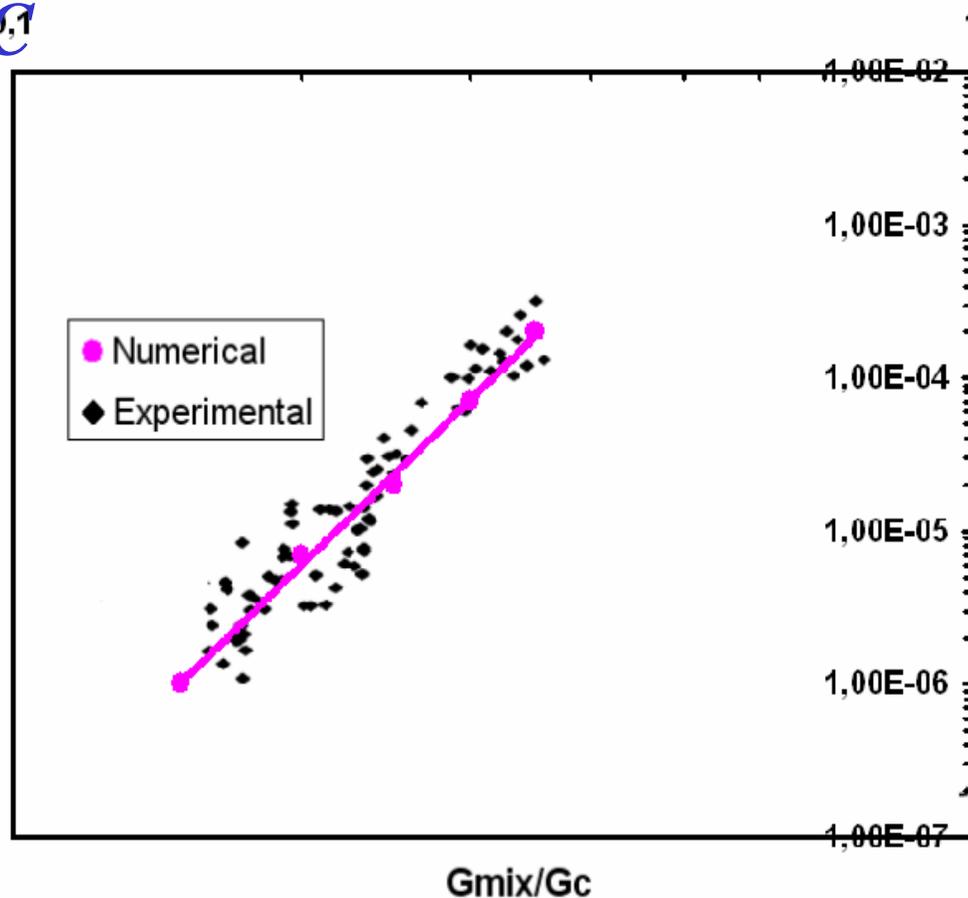
Interface 0 du HTA/6376C



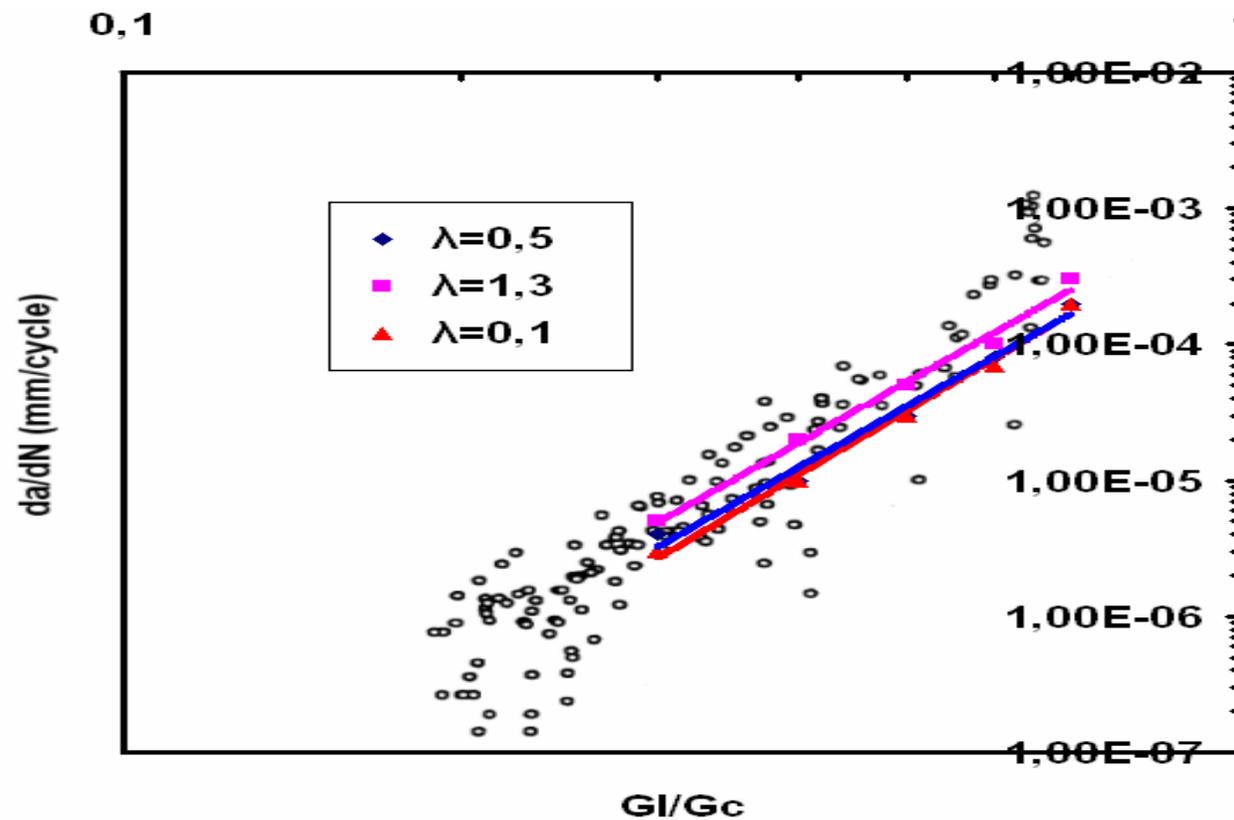
HTA/6376C

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

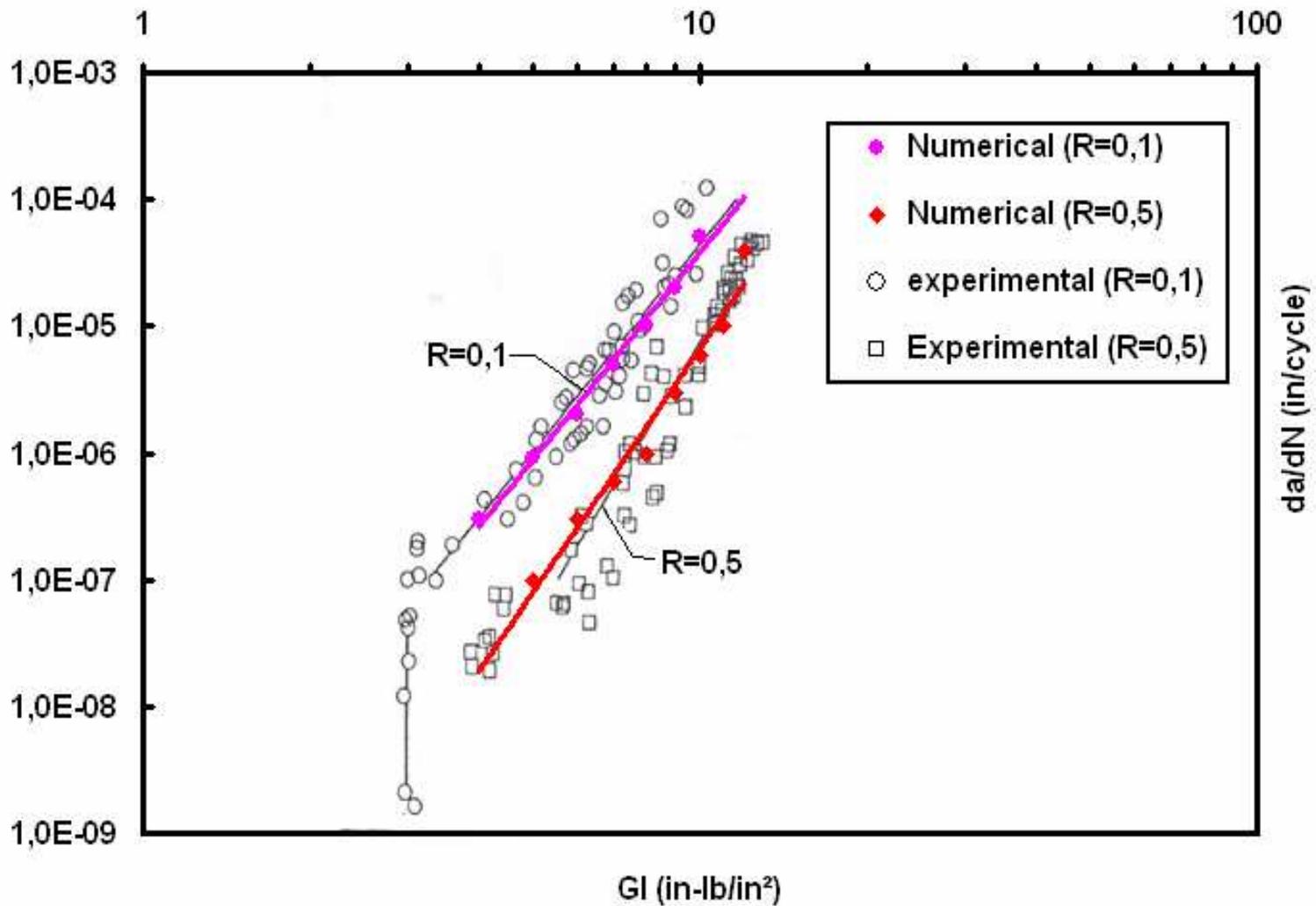
$$\rho = \frac{1 - \frac{\sqrt{3}}{2}}{1 + \frac{\sqrt{3}}{2}}$$



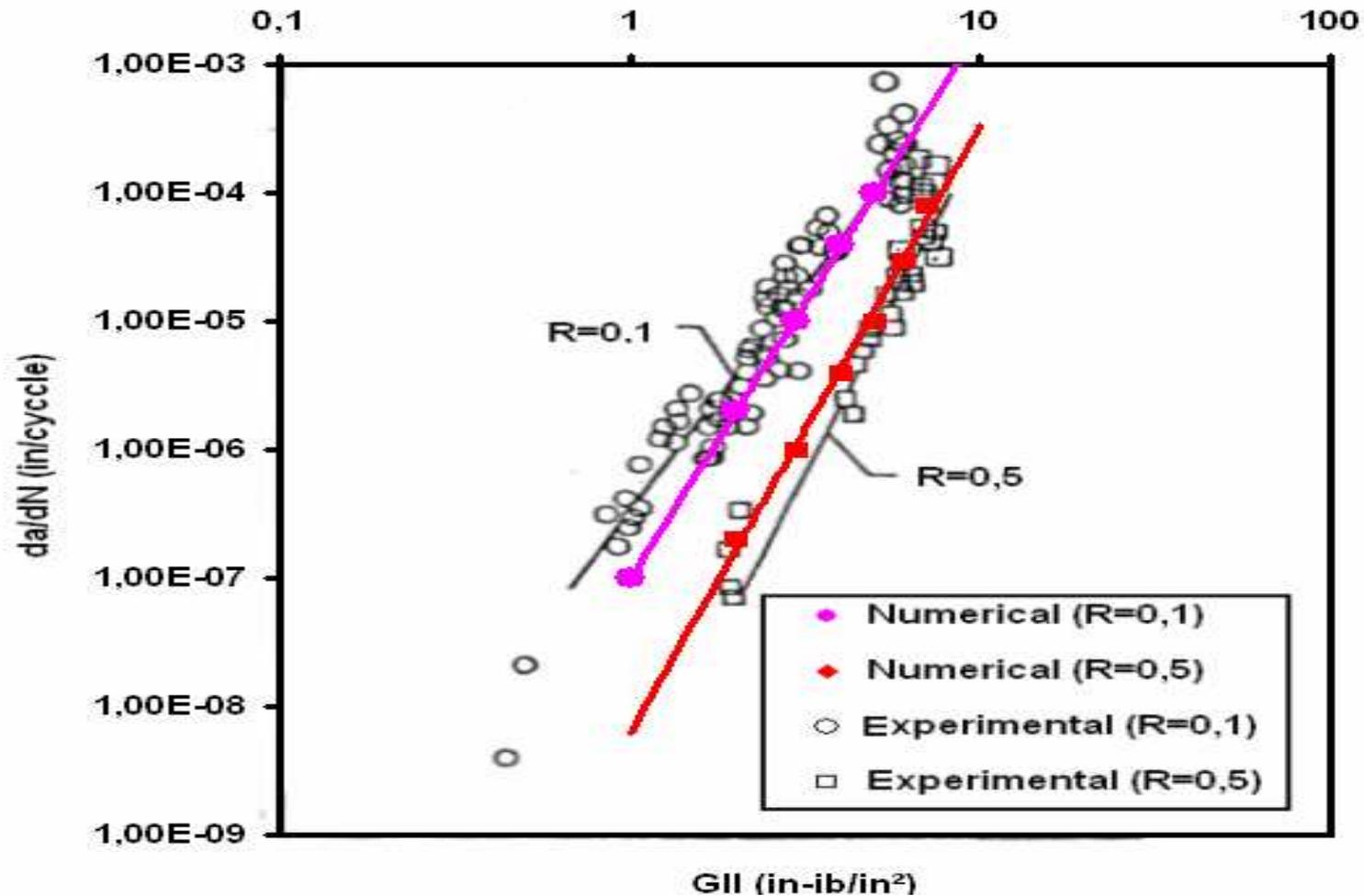
Influence λ



Mode I. AS4/PEEK



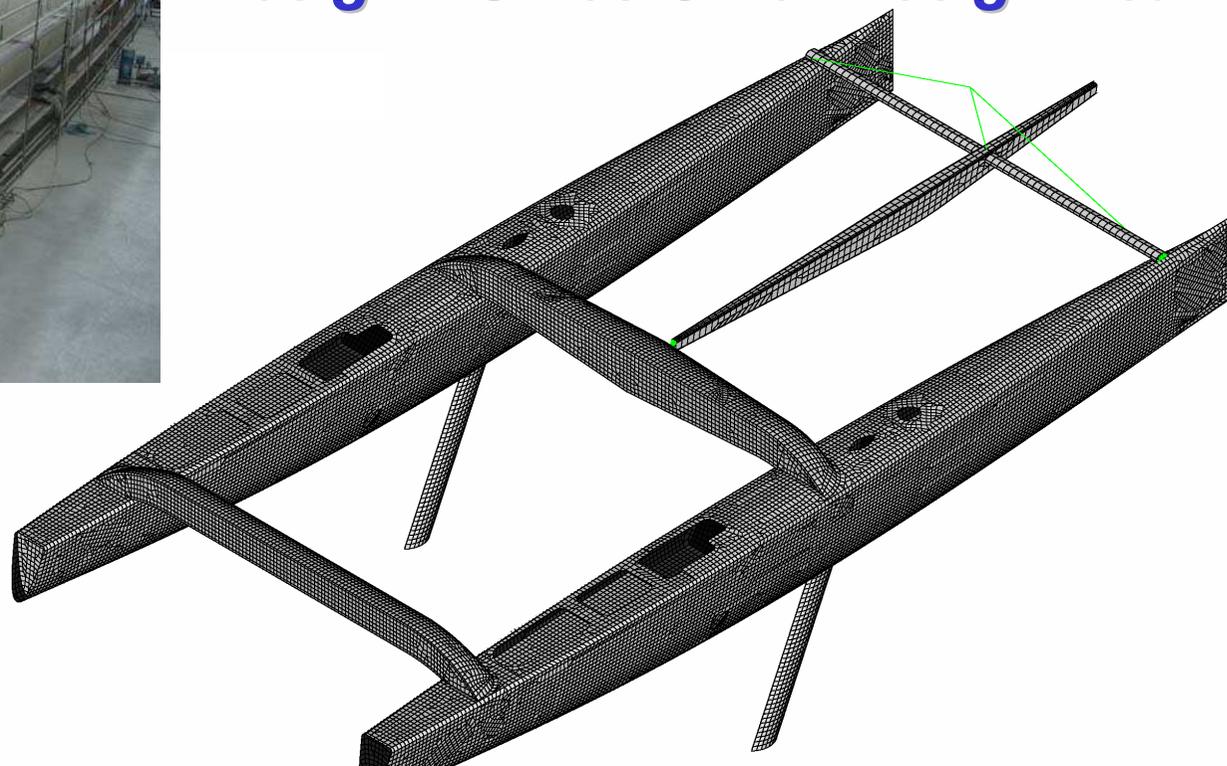
Mode II, AS4/PEEK



« Code B1 »



Design : Gilles Ollier Design Team



Mat 45 m

Voiles 1000 m²



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