

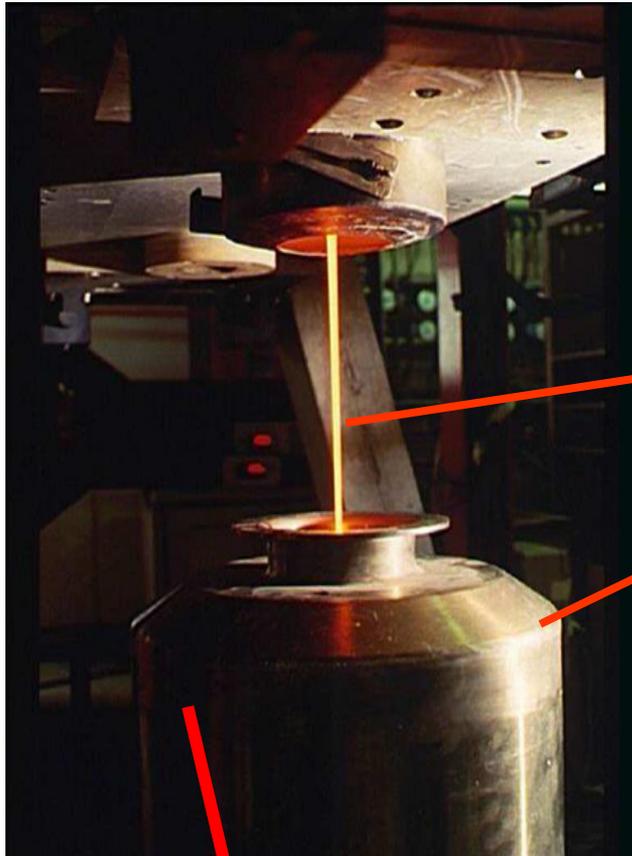
# Modélisation de l'endommagement subi par le verre nucléaire R7T7 lors d'un choc thermique

Martine Dubé  
Véronique Doquet  
Andrei Constantinescu

Laboratoire de Mécanique des Solides (LMS)  
Ecole Polytechnique  
Centre National de Recherche Scientifique (CNRS)

26 Novembre 2009

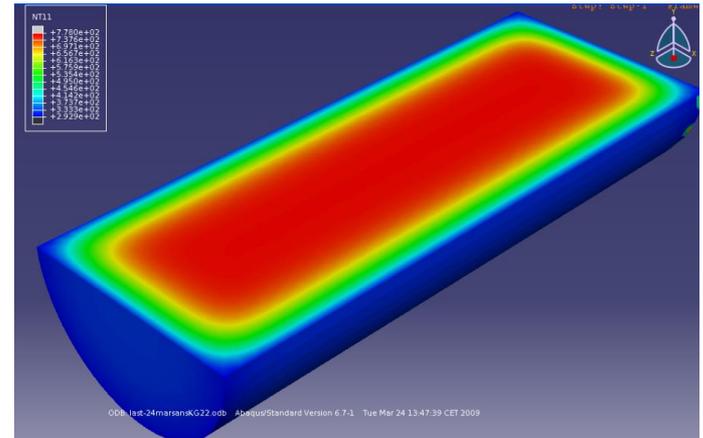
# Vitrification des déchets nucléaires



Solution d'additifs  
de verre et de  
déchets

Conteneur en acier

Refroidissement par  
conduction, convection et  
radiation



Isotempératures pendant  
le refroidissement

**N. Joulaee , A. Makradi, D. George, S.  
Ahzi, Y. Remond, IMFS, Université de  
Strasbourg**

# Détermination de la surface fissurée

Différentes méthodes :  
Tomographie, découpes des  
conteneurs, essais de lixiviation)



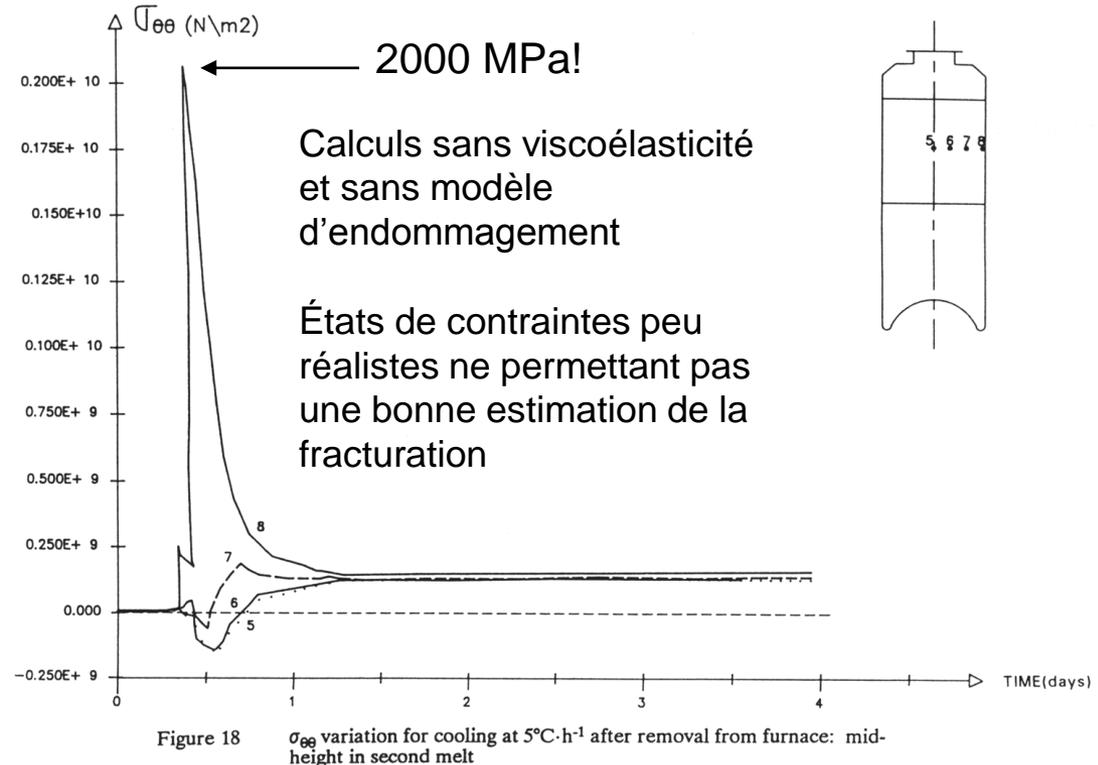
Résultats très différents selon la  
méthode utilisée



Besoin de développer une  
méthode de prédiction de la  
surface fissurée par un modèle  
thermo-mécanique de la  
vitrification



Nécessité de calculs en **visco-élasticité, couplant** comportement et  
endommagement



# Sommaire de la présentation

- Modèle d'endommagement et identification des paramètres
- Implantation du modèle dans Cast3m
- Méthode proposée pour la prévision de la surface fissurée
- Résultats des simulations
- Comparaison avec données expérimentales
  - Surface fissurée
  - Rigidité résiduelle

# Modèle d'endommagement élastique anisotrope

$$\sigma_{ij} = \left\{ [K_{ijkl}^e] + [K_{ijkl}^d] \right\} \cdot \left\{ \varepsilon_{kl} - \varepsilon_{kl}^{th} \right\}$$

$[K_{ijkl}^e]$  = Matrice de rigidité du matériau sain

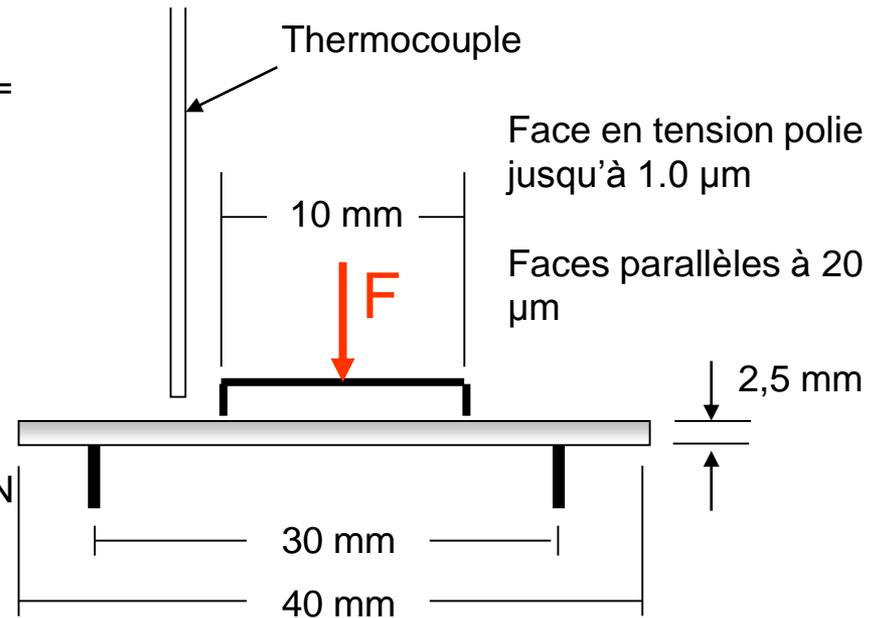
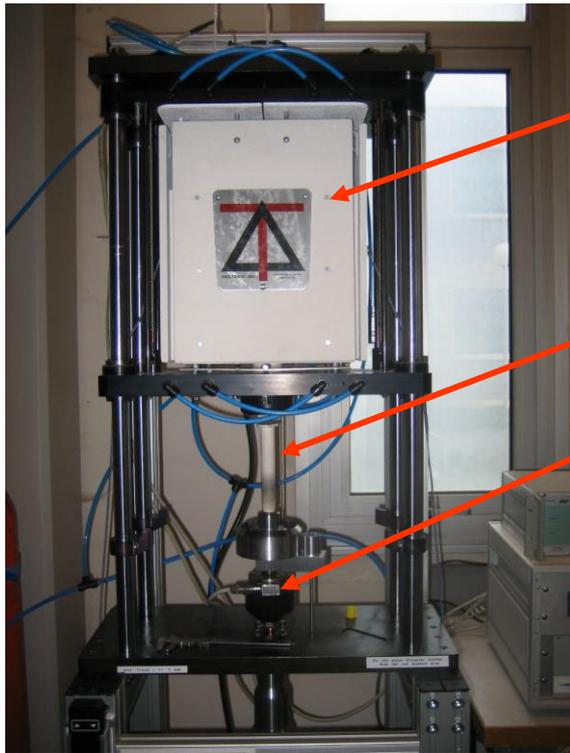
$[K_{ijkl}^d]$  = Contribution de l'endommagement

$\varepsilon^{th}$  = Déformations thermiques =  $\alpha\Delta T$

$$K_{ijkl}^d = C_1 (\delta_{ij} D_{kl} + \delta_{kl} D_{ij}) + C_2 (\delta_{jk} D_{il} + \delta_{il} D_{jk})$$

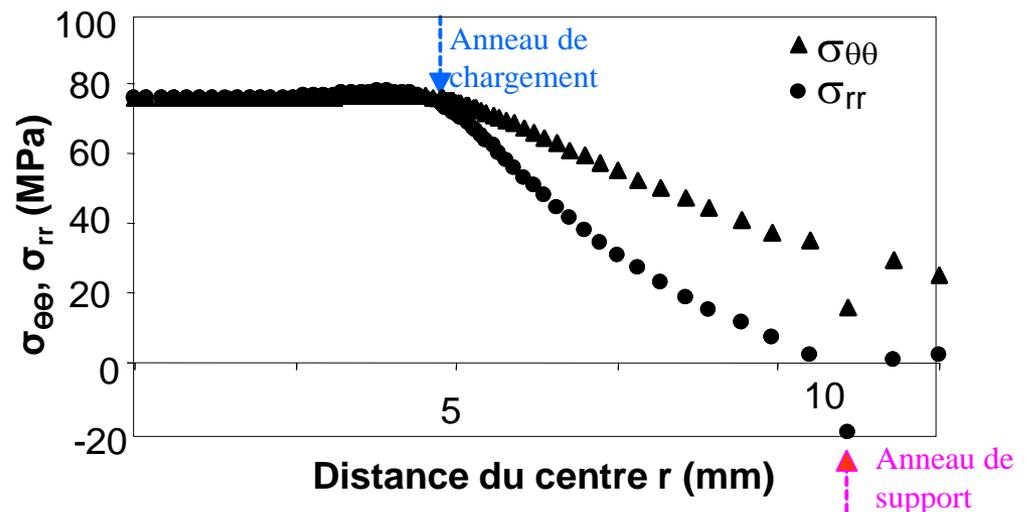
$$D_{ii} = \begin{cases} 0 & \sigma_i \leq \sigma_{threshold} \\ \frac{\sigma_i - \sigma_{threshold}}{\sigma_{crit} - \sigma_{threshold}} & \sigma_{threshold} < \sigma_i < \sigma_{crit} \\ 1 & \sigma_i \geq \sigma_{crit} \end{cases}$$

# Essai de flexion biaxiale : Montage experimental

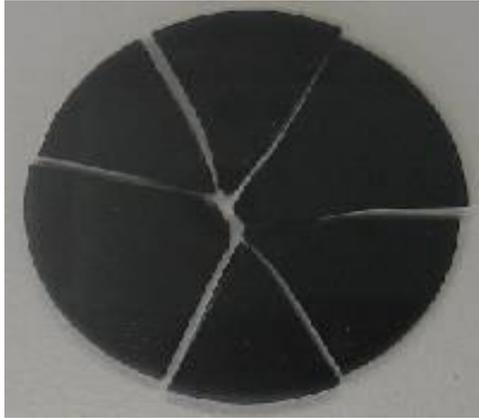


Essais effectués  $T = 20, 200$  et  $506^{\circ}\text{C}$

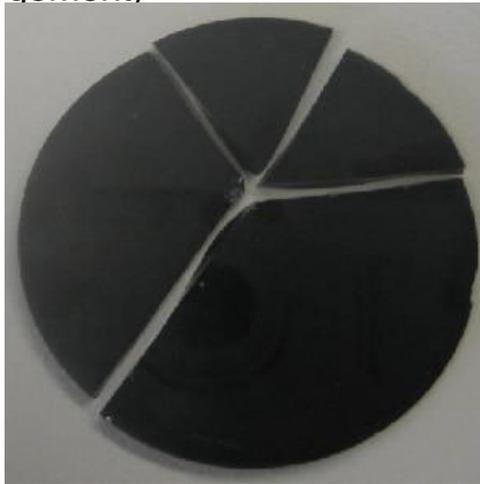
$T_g = 512^{\circ}\text{C}$



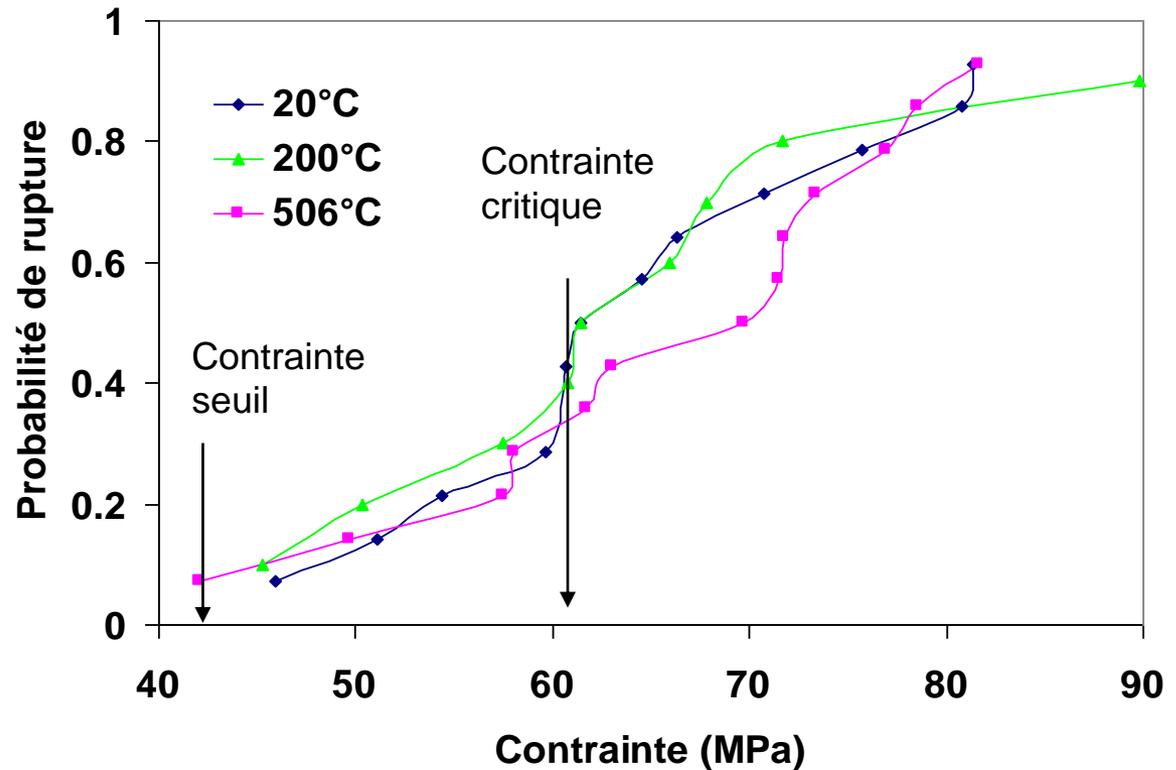
# Comparaison entre les distributions de contrainte à rupture à 20°C, 200°C et 506°C



Exemple d'essai valide (initiation de la rupture à l'intérieur de l'anneau de chargement)



Exemple d'essai non valide (initiation de la rupture sous l'appui)



$$D_{ii} = \frac{\sigma_i - \sigma_{seuil}}{\sigma_c - \sigma_{seuil}} \quad \begin{array}{l} \sigma_{seuil} \approx 41.6 \text{ MPa} \\ \sigma_c \approx 64.1 \text{ MPa} \end{array}$$

On obtient  $E = C_1(1-u^2) + C_2(1-u^2)(1-u)/(1+u)$

Nécessité d'un autre type d'essai pour découpler E et u

# Mesure des propriétés élastiques par méthode vibratoire

Les structures à comportement élastique linéaire possèdent des fréquences de vibrations naturelles associées aux modes de vibration.

Pour une plaque mince circulaire, la fréquence propre du mode de déformation fondamental est :

$$f_0 = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}} \frac{h}{R^2} \alpha$$

où :

E est le module d'Young (Pa),

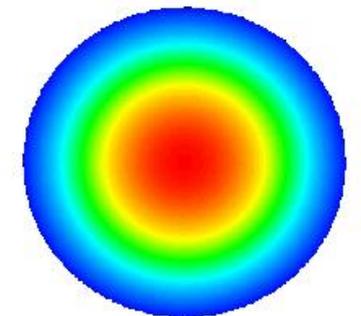
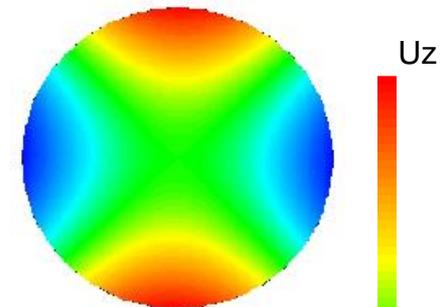
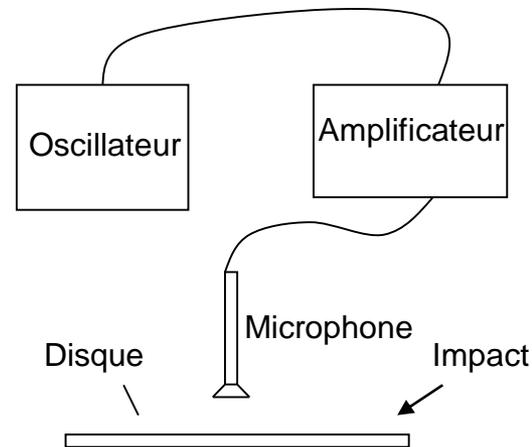
$\rho$  est la masse volumique ( $\text{kg/m}^3$ ),

$\nu$  est le coefficient de Poisson,

t est l'épaisseur de la plaque (m),

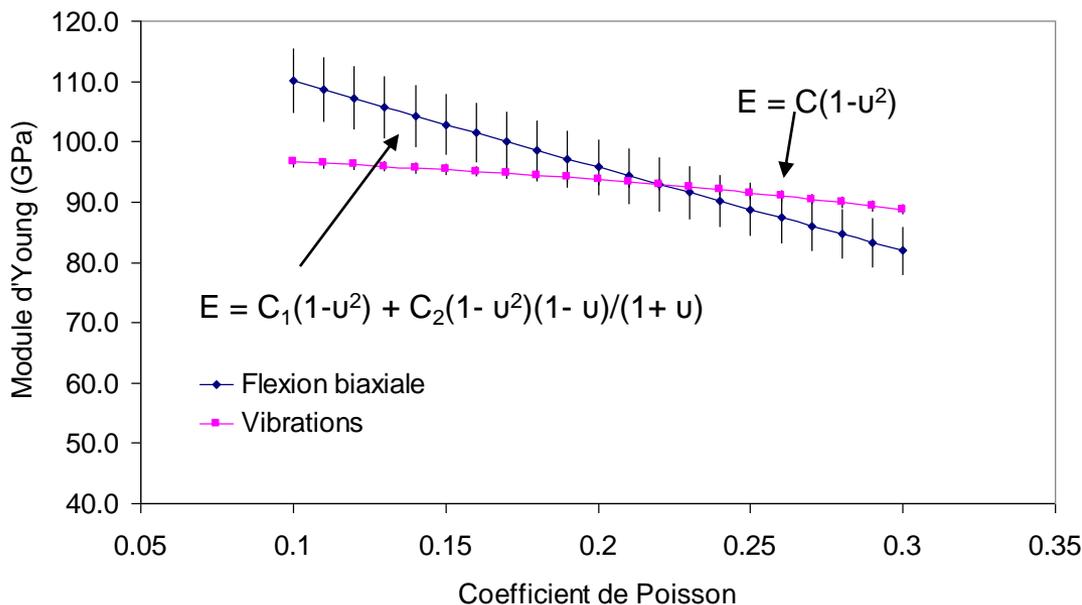
R est le rayon de la plaque (m),

$\alpha$  est un coefficient dépendant des conditions aux limites.

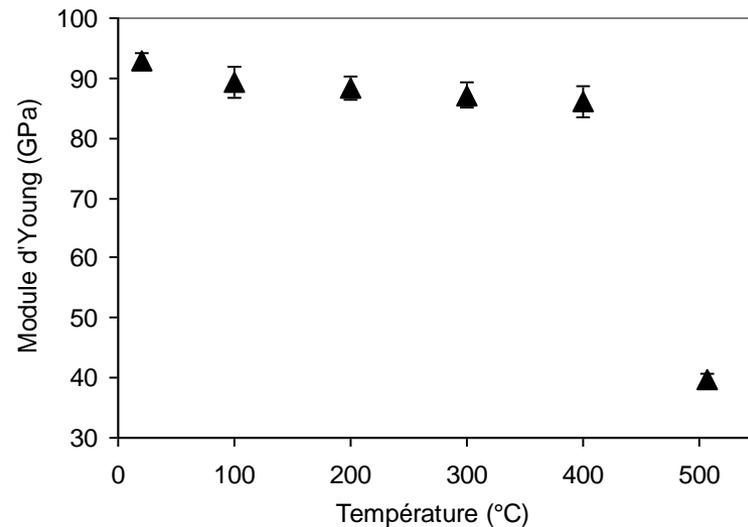


Obtention d'une relation de la forme:  $E = C(1-\nu^2)$

# Identification des propriétés élastiques par recoupement des mesures en flexion et vibrations

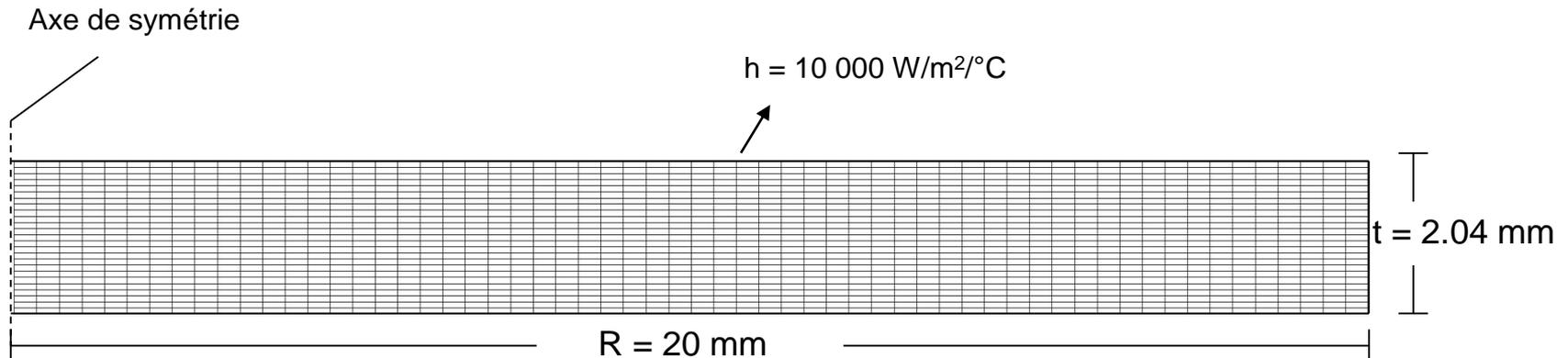


Température (°C)	Module d'Young (GPa)	Coefficient de Poisson	C1 (GPa)	C2 (GPa)
20	91.5 – 94.1	0.19 – 0.25	37.5	-51.8
100	86.7 – 91.9	0.19 – 0.30	36.0	-49.9
200	86.3 – 90.2	0.16 – 0.26	35.6	-49.3
300	85.0 – 89.3	0.16 – 0.27	35.1	-48.7
400	83.4 – 88.7	0.18 – 0.30	34.7	-48.0
500	38.8 – 40.7	0.15 – 0.25	16.0	-22.2



# Calcul thermo-mécanique

- Modèle axisymétrique de choc thermique
- Convection appliquée aux surfaces libres du disque de verre
- Maillage avec éléments QUA8
- Matériau anisotrope (modèle d'endommagement anisotrope)



# Implantation du modèle d'endommagement dans Cast3m

Calcul du champ de températures  
(pas à pas)

Calcul des contraintes associées  
(un seul pas)

Calcul du champ de contraintes  
principales

Calcul de la nouvelle matrice de  
rigidité

Mise à jour du matériau anisotrope  
(MAT = MATE MOD 'D11' E11.i 'D21'  
E21.i 'D22' E22.i 'D31' E31.i 'D32' E32.i  
'D33' E33.i 'D41' 0. 'D42' 0. 'D43' 0.  
'D44' G 'ALP1' alp 'ALP2' alp 'ALP3' alp  
'AL12' 0. 'DIRECTION' VEC1)

$$\sigma_{ij}^n = \left\{ \left[ K_{ijkl}^e \right] + \left[ K_{ijkl}^{d,(n-1)} \right] \right\} \cdot \left\{ \varepsilon_{kl}^n - \varepsilon_{kl}^{n,th} \right\}$$

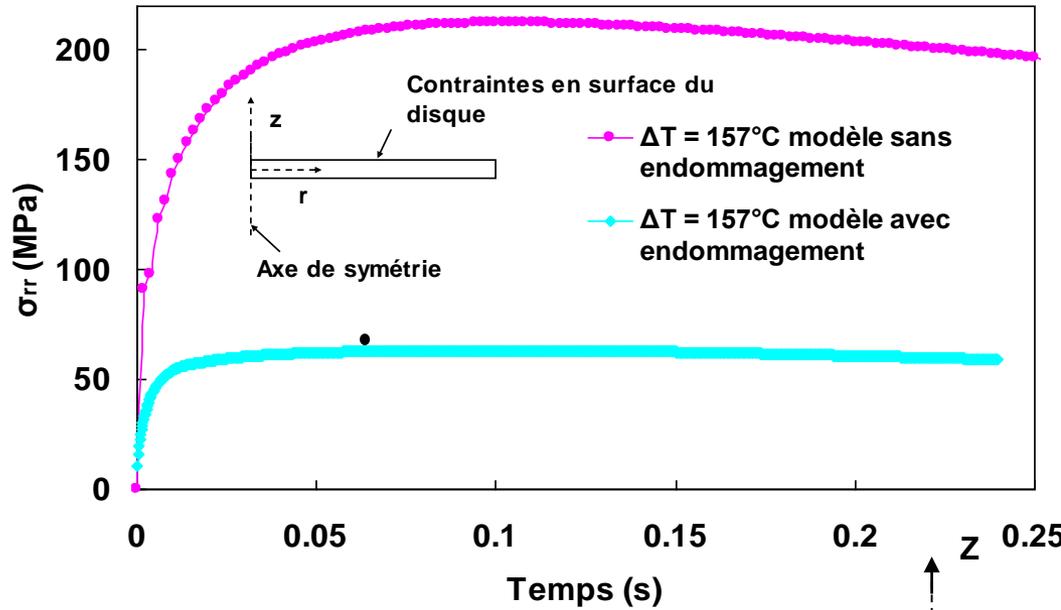
$$D_{ii} = \begin{cases} 0 & \sigma_i \leq \sigma_{threshold} \\ \frac{\sigma_i - \sigma_{threshold}}{\sigma_{crit}^s - \sigma_{threshold}} \cdot \sigma_{threshold} & \sigma_i < \sigma_{crit} \\ 1 & \sigma_i \geq \sigma_{crit} \end{cases}$$

$$D_{ii} = \max(D_{ii}^n, D_{ii}^{n-1})$$

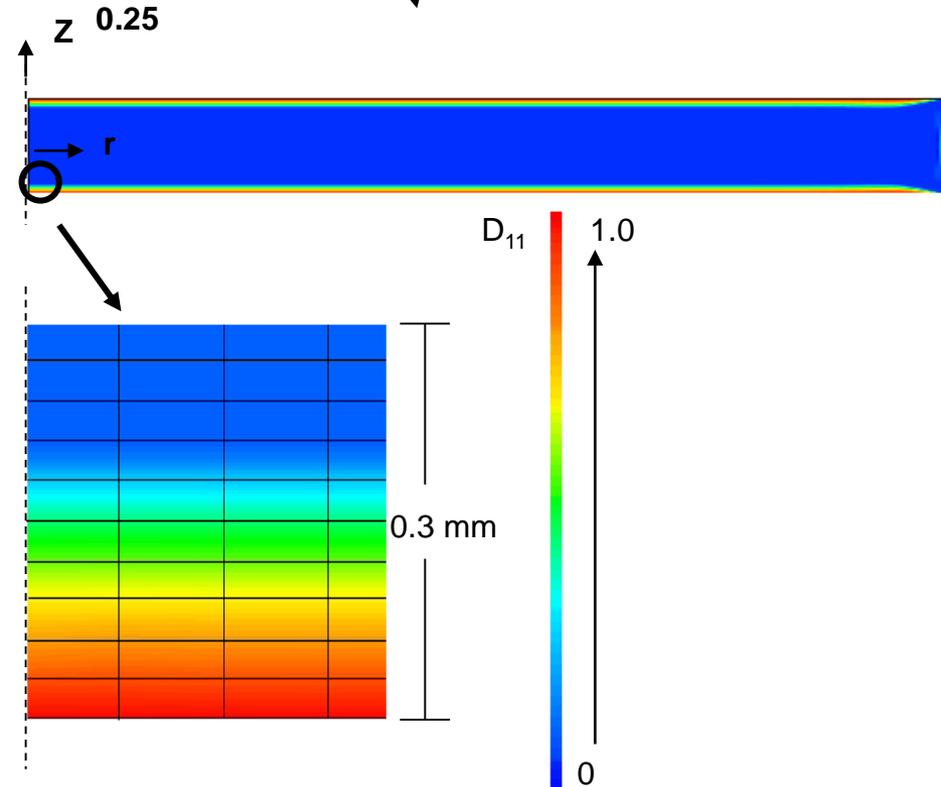
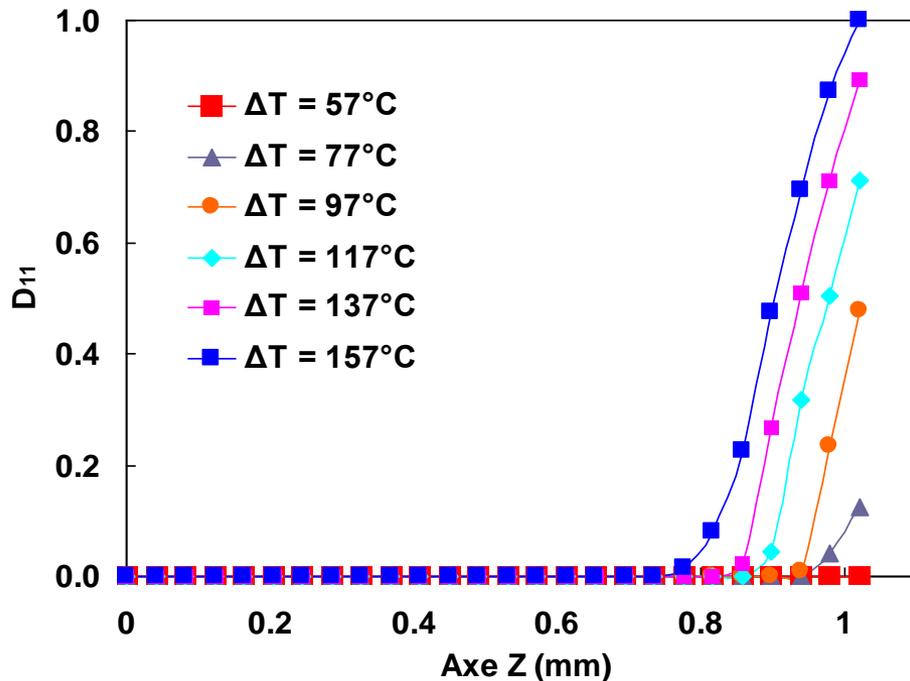
Pas de matériau utilisateur « UMAT »

Études de convergence réalisées selon le  
raffinement de maillage et le pas de temps

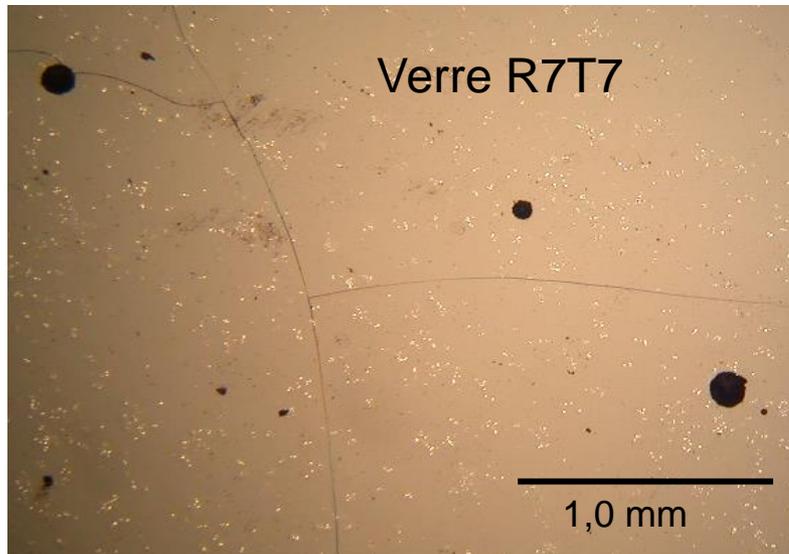
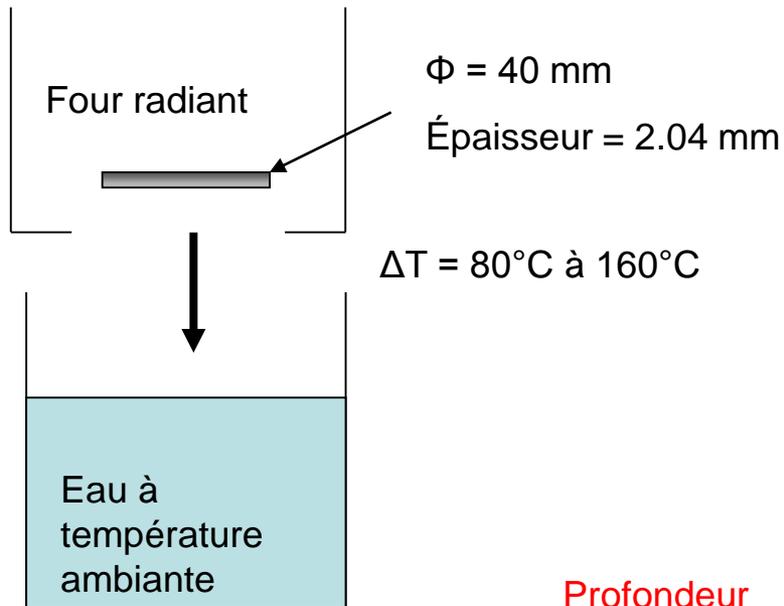
# Résultats de modélisation



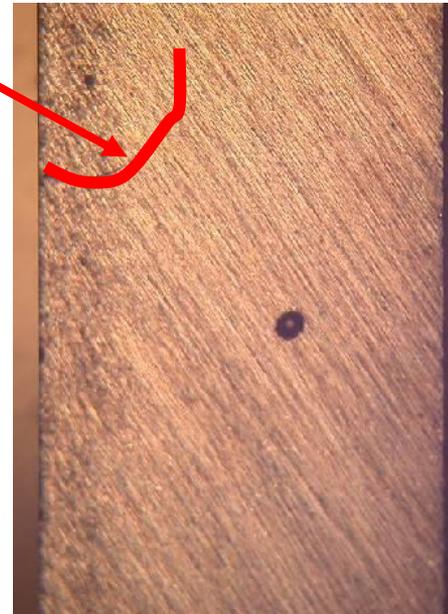
Iso- $D_{11}$  après un choc thermique  $\Delta T = 157^\circ\text{C}$



# Manip de choc thermique



Profondeur des fissures



# Prévision de la surface fissurée

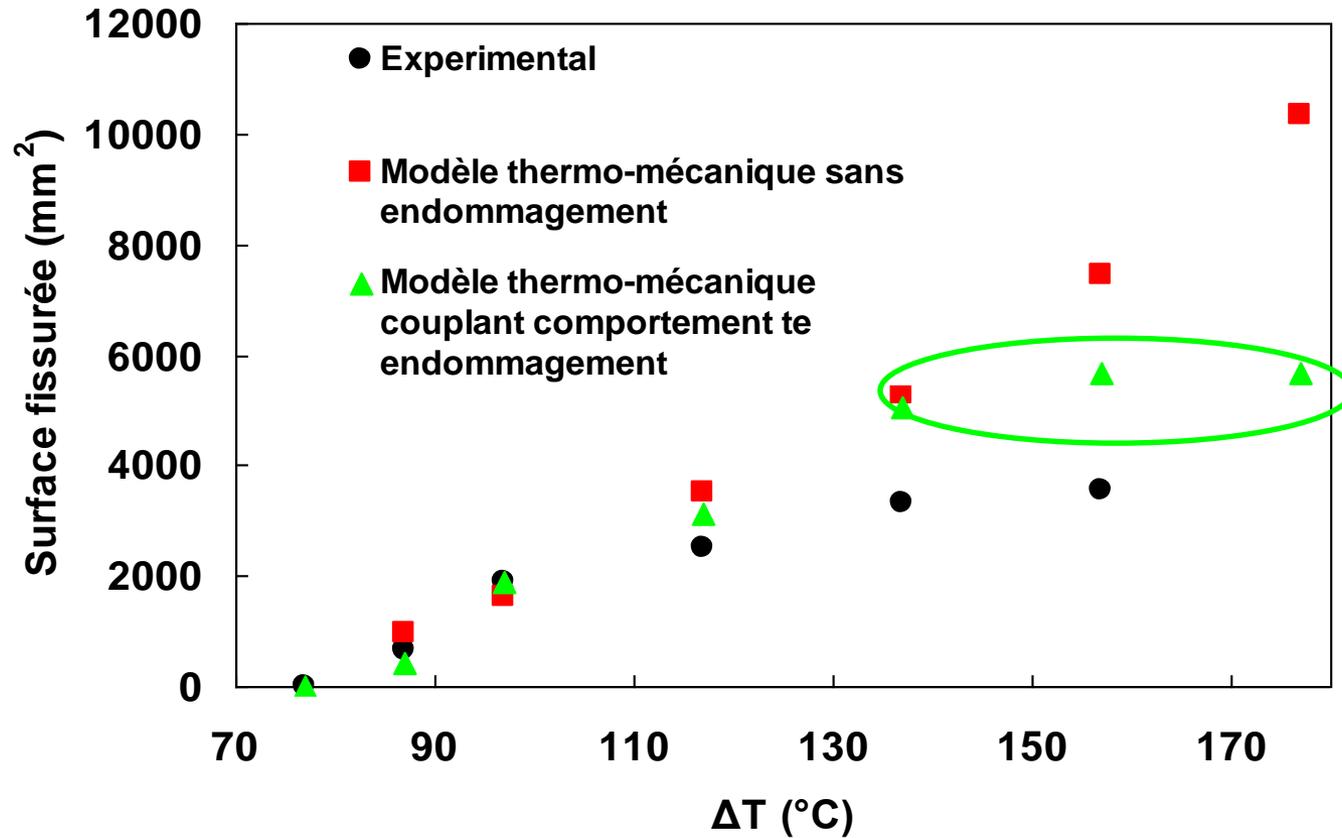
- Hypothèse : Toute l'énergie élastique associée aux contraintes de tension supérieures à la contrainte seuil est dissipée en création de nouvelles surfaces (on néglige l'énergie dissipée sous forme cinétique ou d'ondes acoustiques):

$$\max_{time} \frac{1}{2} \int_{V_{\sigma \geq \sigma_{seuil}}} \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} dV = 2\gamma_s \cdot \sum_V dS_{fissures} = 2\gamma_s \cdot S_{totale}$$

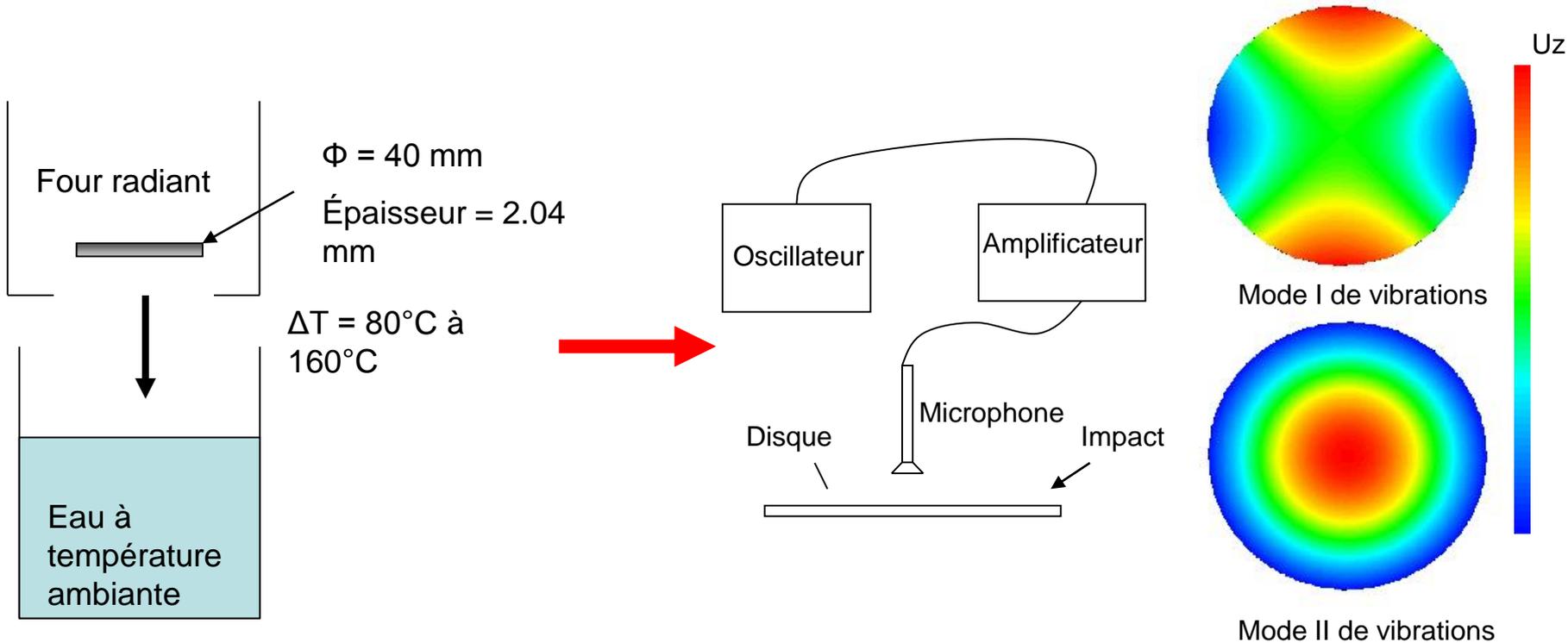
où  $V$  est le volume sur lequel la contrainte seuil est atteinte

- On obtient donc une borne supérieure de la surface fissurée.

# Prévision de la surface fissurée



# Rigidité résiduelle



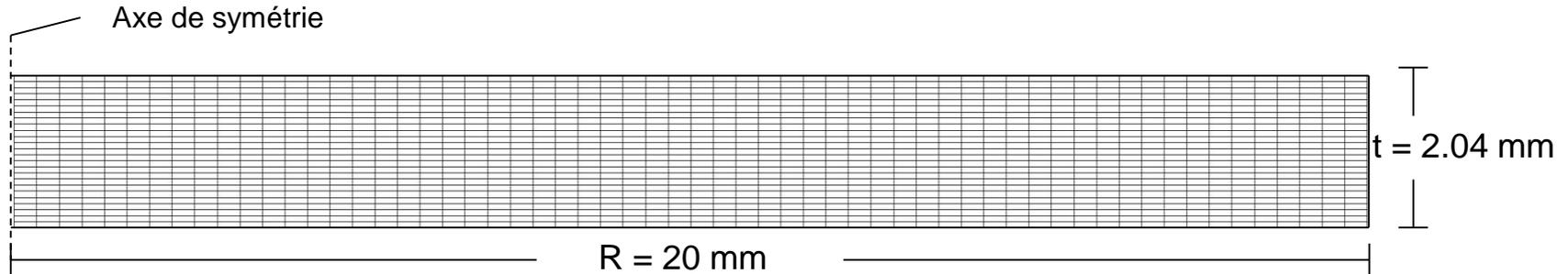
Chocs thermiques suivis d'essais de vibrations

Rigidité résiduelle mesurée par la diminution de la fréquence naturelle

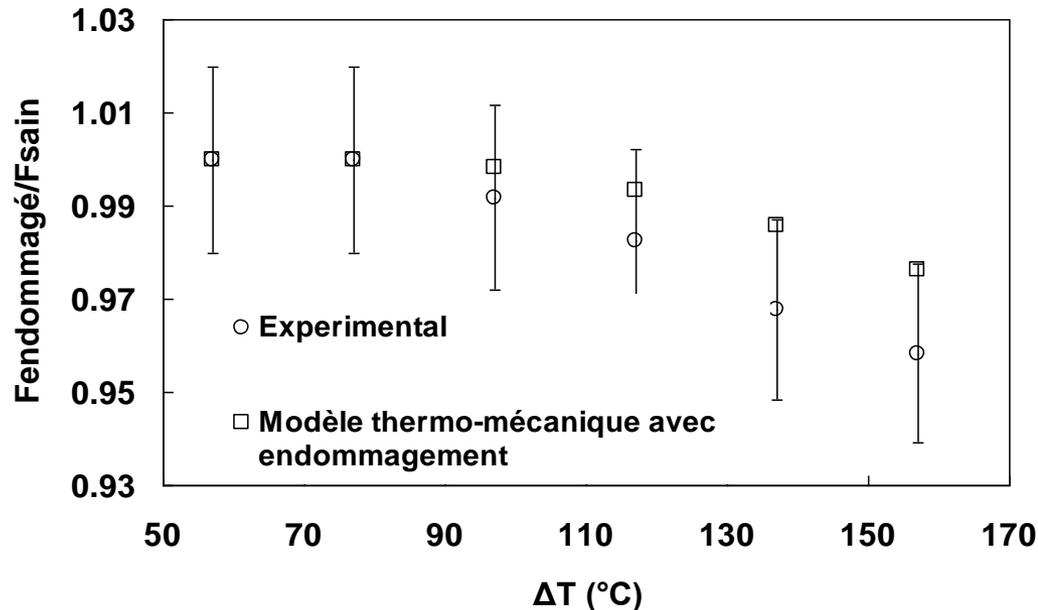
$$f_0 = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}} \frac{h}{R^2} \alpha$$

# Modélisation de l'essai de vibrations après choc thermique

- Même géométrie avec éléments QUA8



- On applique le champ de rigidité de matériau obtenu au dernier pas de temps du calcul thermo-mécanique de choc thermique
- On trouve les fréquences naturelles



# Résumé

- Implantation réalisée en explicite dans le fichier dgibi, sans passer par une loi de comportement externe « UMAT »
- Le modèle d'endommagement implanté dans Cast3m permet de prévoir le comportement du verre lors d'un choc thermique
- Méthode énergétique permet d'obtenir une borne supérieure de la surface fissurée dans le verre