

**21ème Congrès Français de Mécanique  
Bordeaux – 26 au 30 août 2013**



**Etude de l'influence d'une agression  
thermique sur les  
propriétés mécaniques résiduelles de  
matériaux composites**

**M. ROPITAL, T. ROGAUME, D. HALM, V. ALEMANY MARI**

Institut P' • UPR CNRS 3346  
Département Physique et Mécanique des Matériaux  
ENSMA • Téléport 2  
1, avenue Clément Ader • BP 40109  
F86961 FUTUROSCOPE CHASSENEUIL Cedex



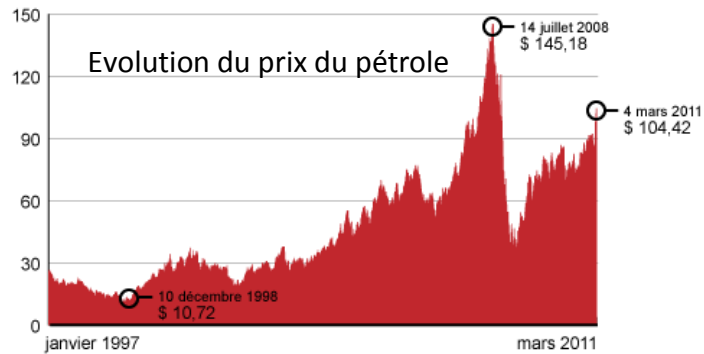
# Sommaire

- **Contexte et objectifs de l'étude**
- **Essais d'agression thermique**
- **Essais de caractérisation mécanique**
- **Simulation du comportement mécanique**
- **Bilan**

# Contexte et objectifs

- **Economie hydrogène**
- *Vulnérabilité des stockages*
- *Objectifs*

## Crise énergétique



## Enjeux environnementaux

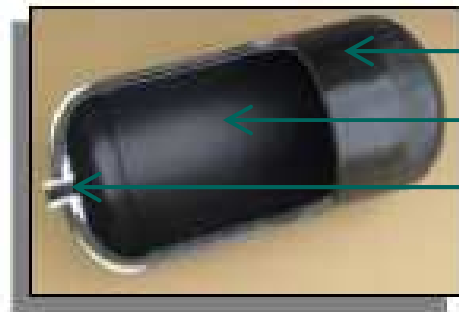


# Contexte et objectifs

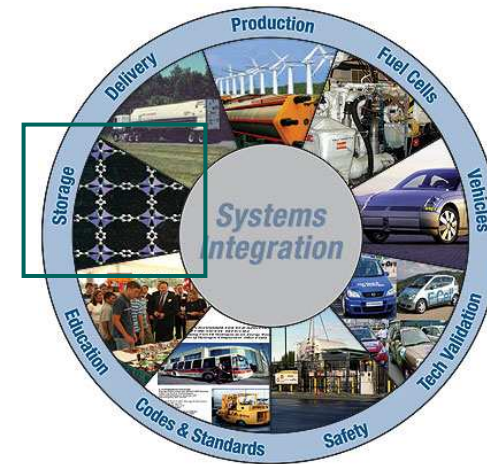
- *Economie hydrogène*
- *Vulnérabilité des stockages*
- *Objectifs*

## Une technologie prometteuse :

- réservoir de type IV
- pression nominale : 700 bar



← composite bobiné  
← liner polymère  
← embase métallique



## Nécessité d'estimer la tenue **en service** :

Exemple : **agressions thermiques**



**Endommagement  
mécanique**

**couplage**

**Dégradation  
thermique**

**Normes,  
réglementations**



**Modification :**

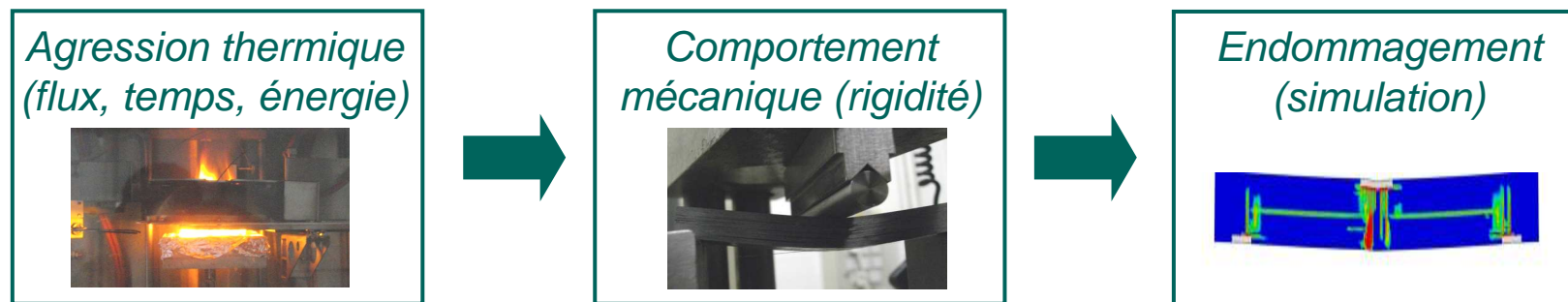
pression éclatement,  
temps éclatement,...

## Contexte et objectifs

- *Economie hydrogène*
- *Vulnérabilité des stockages*
- **Objectifs**

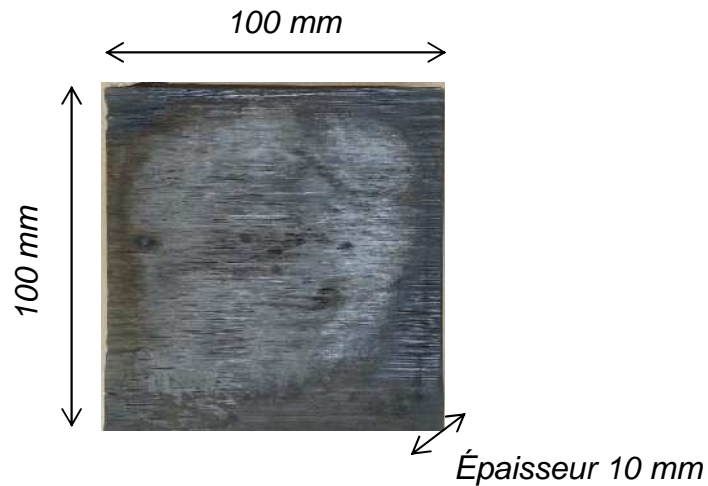
### Etude préliminaire : découplage thermique / mécanique

- Estimer l'influence d'une agression thermique sur les propriétés mécaniques
- Déterminer les paramètres pilotant cette détérioration
- Relier le comportement mécanique à un état d'endommagement
- Relier les conditions d'agression thermique à un état d'endommagement



# Essais d'agression thermique

## Eprouvette testée



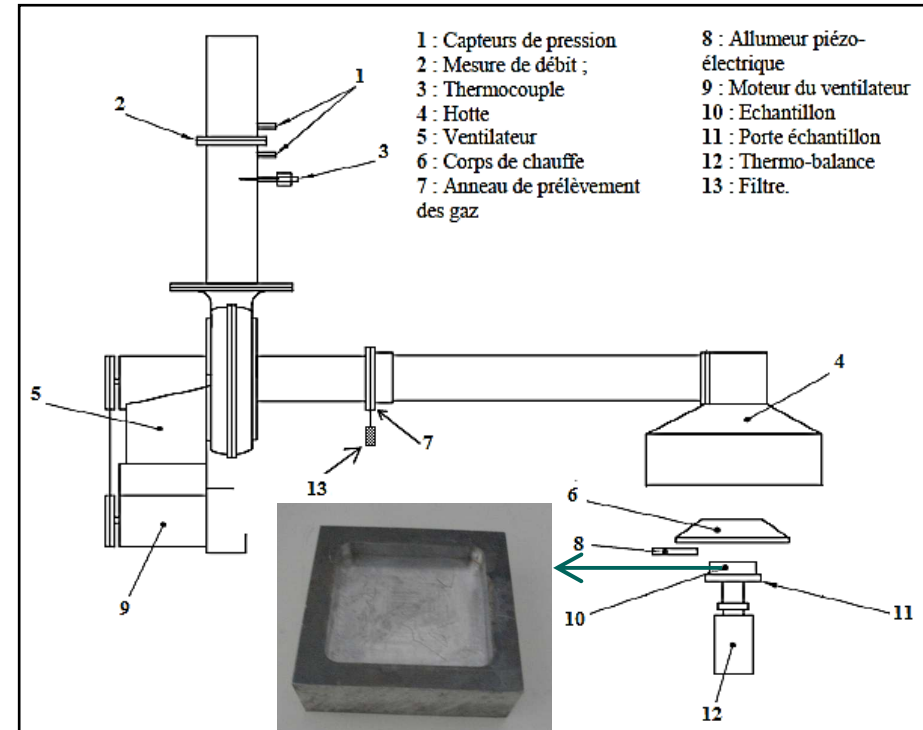
## Matériau

Pré-imprégné, fibre de carbone, résine époxy unidirectionnel

## Paramètres imposés

- Densité d'énergie (entre 6 et 22 MJ/m<sup>2</sup>)
- Flux incident (entre 15 et 60 kW/m<sup>2</sup>)
- Temps d'exposition (entre 150 et 800 s)

## Cône calorimètre



# Essais de caractérisation mécanique

- Dispositif
- Résultats

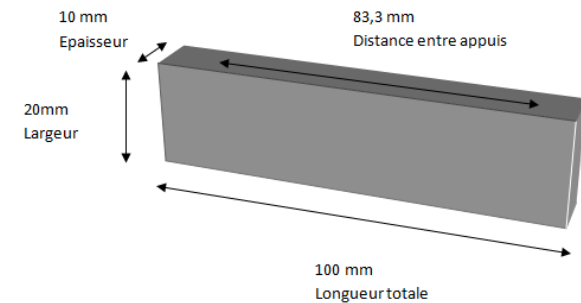
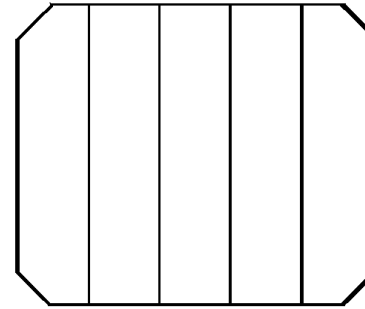
## Eprouvette agressée



(flux, temps, énergie)

## Prélèvement d'échantillon

(sens fibres)



## Essai de flexion 3 points

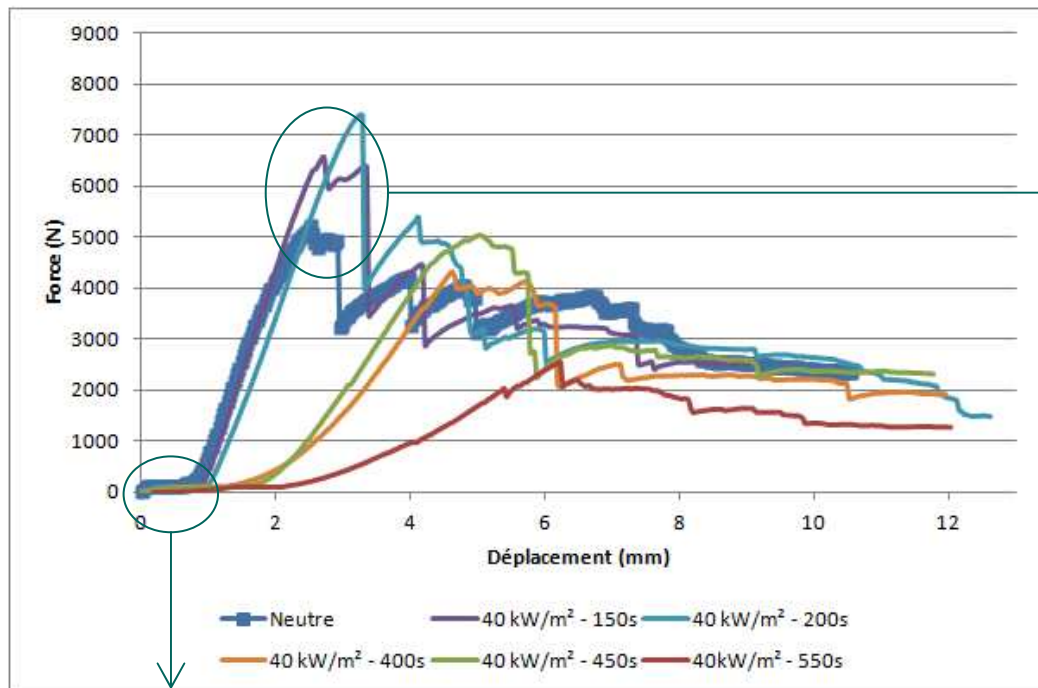


- Courbe force - déplacement
- Module de flexion

# Essais de caractérisation mécanique

- Dispositif
- Résultats

## Comportement à flux constant



Eprouvette épaisse : endommagement par **délaminage successif**

*Rattrapage de jeu*

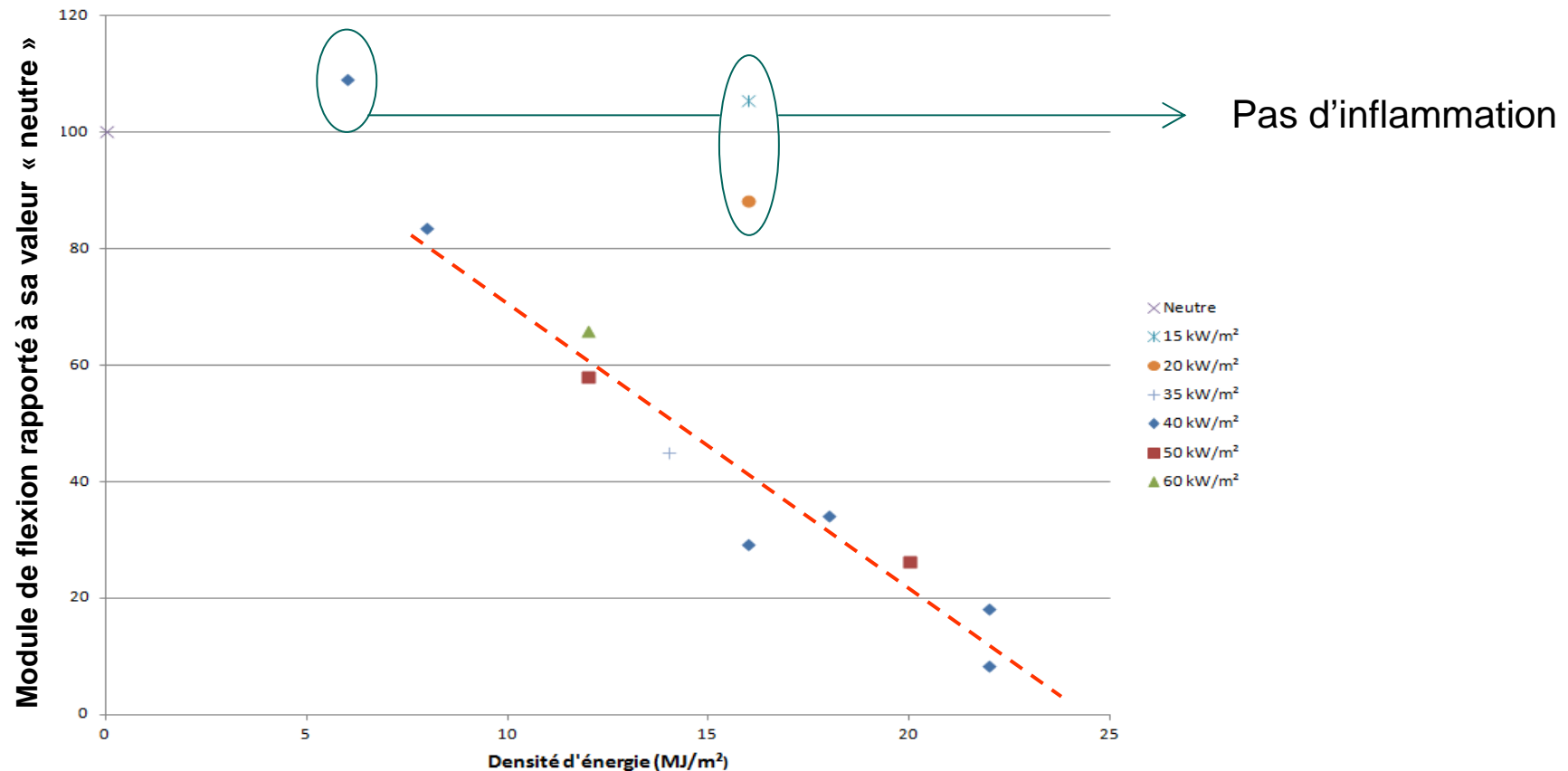
- Faibles temps → pas d'inflammation → pas d'endommagement
- Temps plus longs :
  - diminution de la rigidité
  - diminution de la force maximale
  - courbe plus régulière



# Essais de caractérisation mécanique

- Dispositif
- Résultats

## Evolution du module de flexion



- Inflammation nécessaire pour diminuer le module de flexion
- Lien direct (tendance linéaire) entre l'endommagement et la densité d'énergie
- Même tendance pour la contrainte maximale

# Simulation du comportement mécanique

- **Modèle d'endommagement**
- *Échantillon dégradé*

## Cadre de construction du modèle d'endommagement mécanique

Mécanique de l'endommagement  
Thermodynamique des processus irréversibles  
(*J.P. Berro Ramirez et al., session 12, 29/08, 10h40*)



- Variables internes  $\rho_i$
- Potentiel thermodynamique  $w(\epsilon, \rho_i)$
- Lois d'évolution  $d\rho_i$

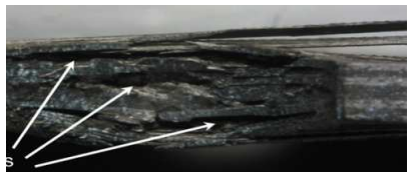
Séparation des modes d'endommagement, quantifiés par différentes **variables internes  $\rho$**  :



$\rho_{\text{fibre}}$



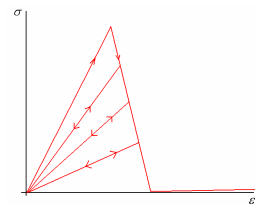
$\rho_{\text{interface}}$



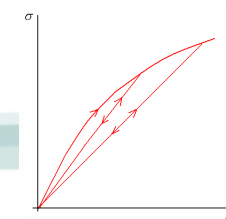
$\rho_{\text{interpli}}$



$\rho_{\text{intrapli}}$

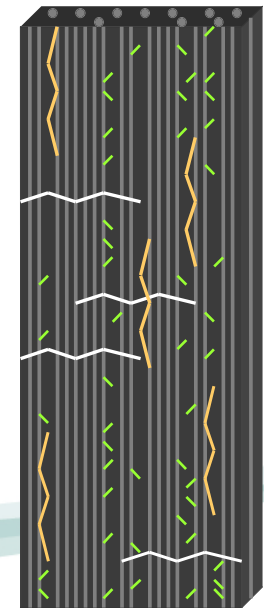


Fragile



Progressif

	Rupture de fibre
	Fissuration matrice Délaminage
	Cisaillement

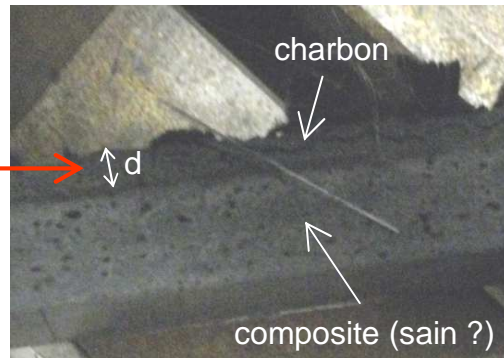


# Simulation du comportement mécanique

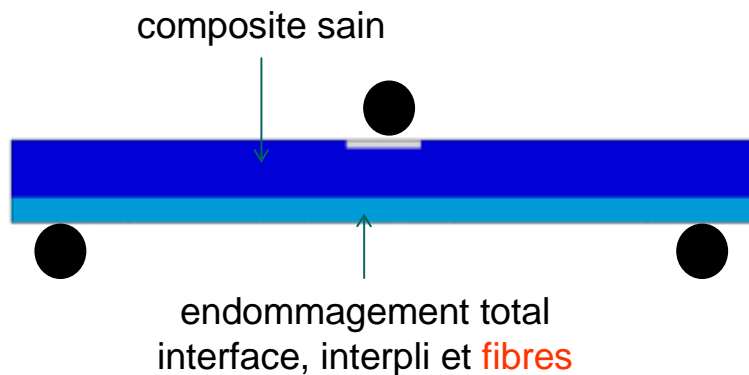
- *Modèle d'endommagement*
- *Échantillon dégradé*

## Observation post-combustion

Densité d'énergie

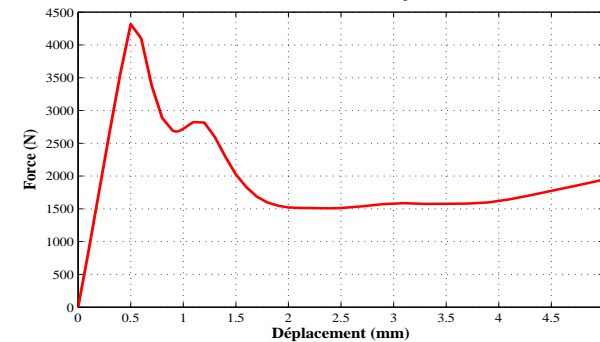


## Hypothèse de modélisation EF

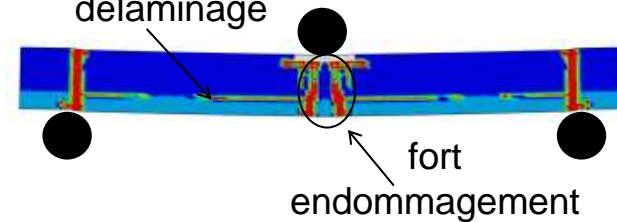


## Résultats

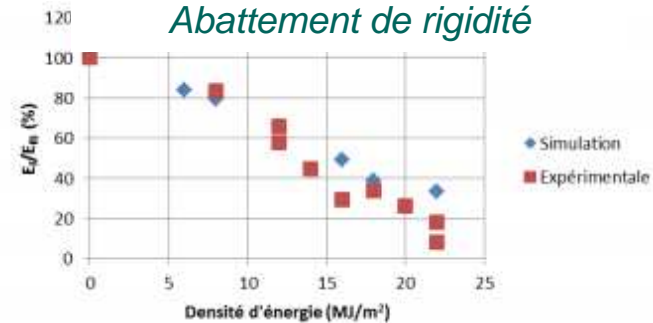
### Courbe force - déplacement



### Configuration d'endommagement délamination



### Abattement de rigidité



# Bilan

## Résultats principaux

- **Inflammation** nécessaire pour endommager le matériau
- **Relation linéaire** entre densité d'énergie et abattement de rigidité (= endommagement)
- Agression thermique = endommagement complet de la **matrice** et des **fibres**  
énergie → épaisseur charbon → endommagement → propriétés résiduelles

## Etapes suivantes

- Caractérisation de la cinétique de combustion **avec charge mécanique**
- **Couplage** des modèles thermique et mécanique
- Simulation du comportement des **réservoirs**