



**HAL**  
open science

## Modélisation des effets de l'endommagement dans les milieux hétérogènes viscoélastiques - simulation du comportement des combustibles MOX.

V. Gauthier, R. Masson, M. Garajeu, B. Michel

► **To cite this version:**

V. Gauthier, R. Masson, M. Garajeu, B. Michel. Modélisation des effets de l'endommagement dans les milieux hétérogènes viscoélastiques - simulation du comportement des combustibles MOX.. Colloque National MECAMAT - 2019, Jan 2019, Aussois, France. cea-02394094

**HAL Id: cea-02394094**

**<https://cea.hal.science/cea-02394094v1>**

Submitted on 24 Feb 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



# Modélisation des effets de l'endommagement dans les milieux hétérogènes viscoélastiques – simulation du comportement des combustibles MOX.

V. GAUTHIER<sup>1</sup> ; R. MASSON<sup>1</sup> ; M. GARAJEU<sup>2</sup> ; B. MICHEL<sup>1</sup>



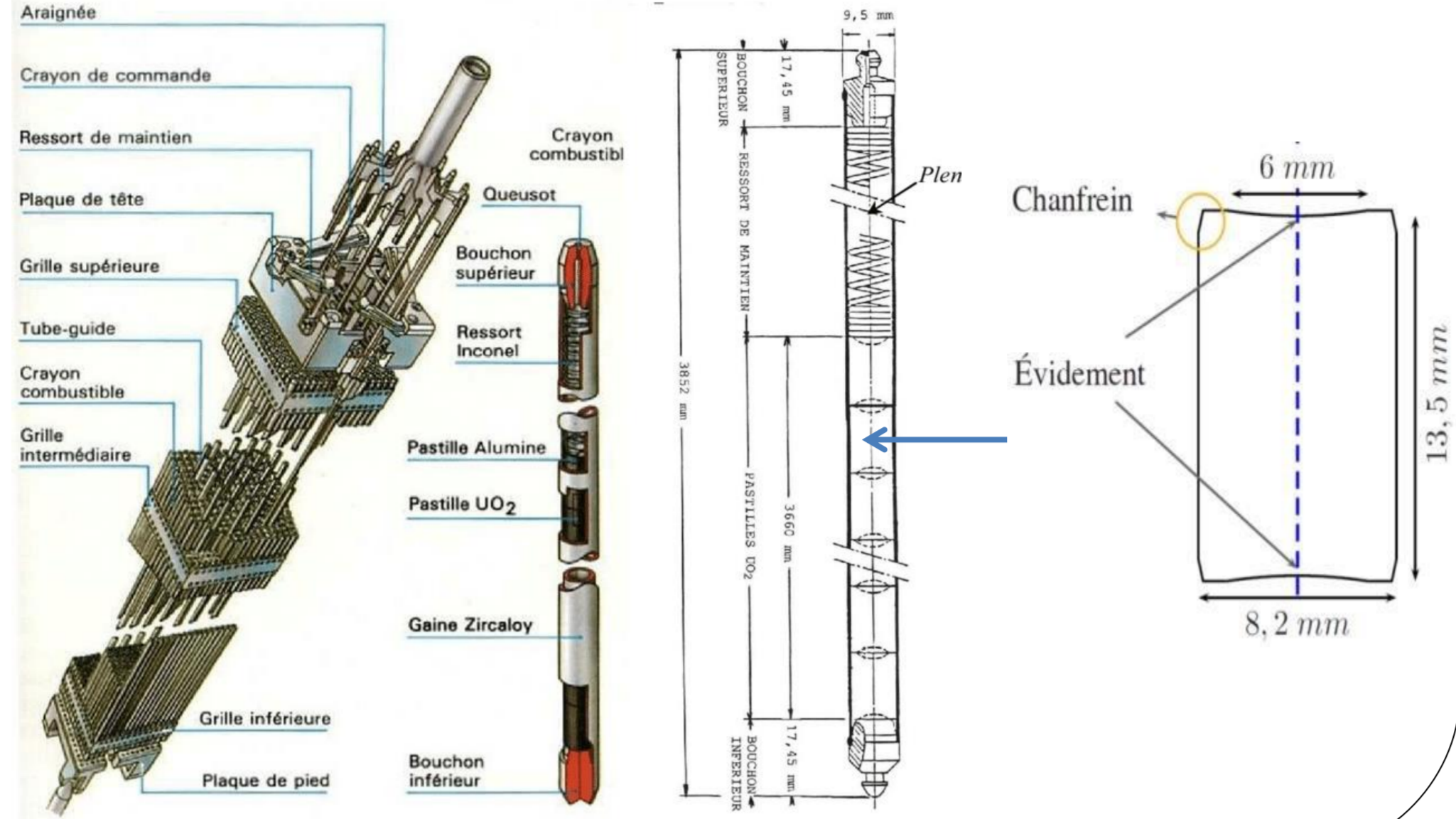
1. CEA / DEN / DEC / SESC  
Cadarache Saint-Paul-lez-Durance, France



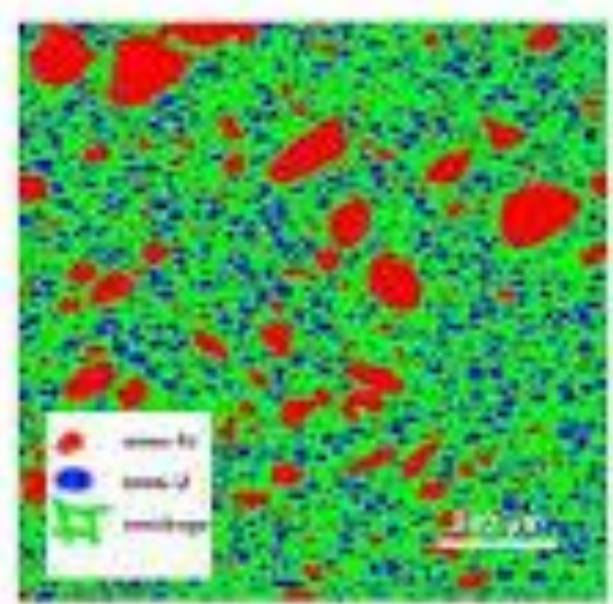
2. Laboratoire de mécanique et d'acoustique. Château Gombert. Marseille. France.

## Contexte du sujet

### De l'échelle de l'assemblage,,,



### ,,, au combustible nucléaire MOX.



200 μm

- Le MOX (Mixture of OXides) est un mélange d'oxyde d'uranium ( $UO_2$ ) et d'oxyde de plutonium ( $PuO_2$ ).
- Le MOX provient du retraitement des combustibles usés.
- Le MOX est un combustible utilisé dans les Réacteurs à eau pressurisé français (REP) de 900 MWe.
- C'est un matériau hétérogène au sens de la distribution des teneurs en plutonium : matériau triphasé (thèse Oudinet, 2003).

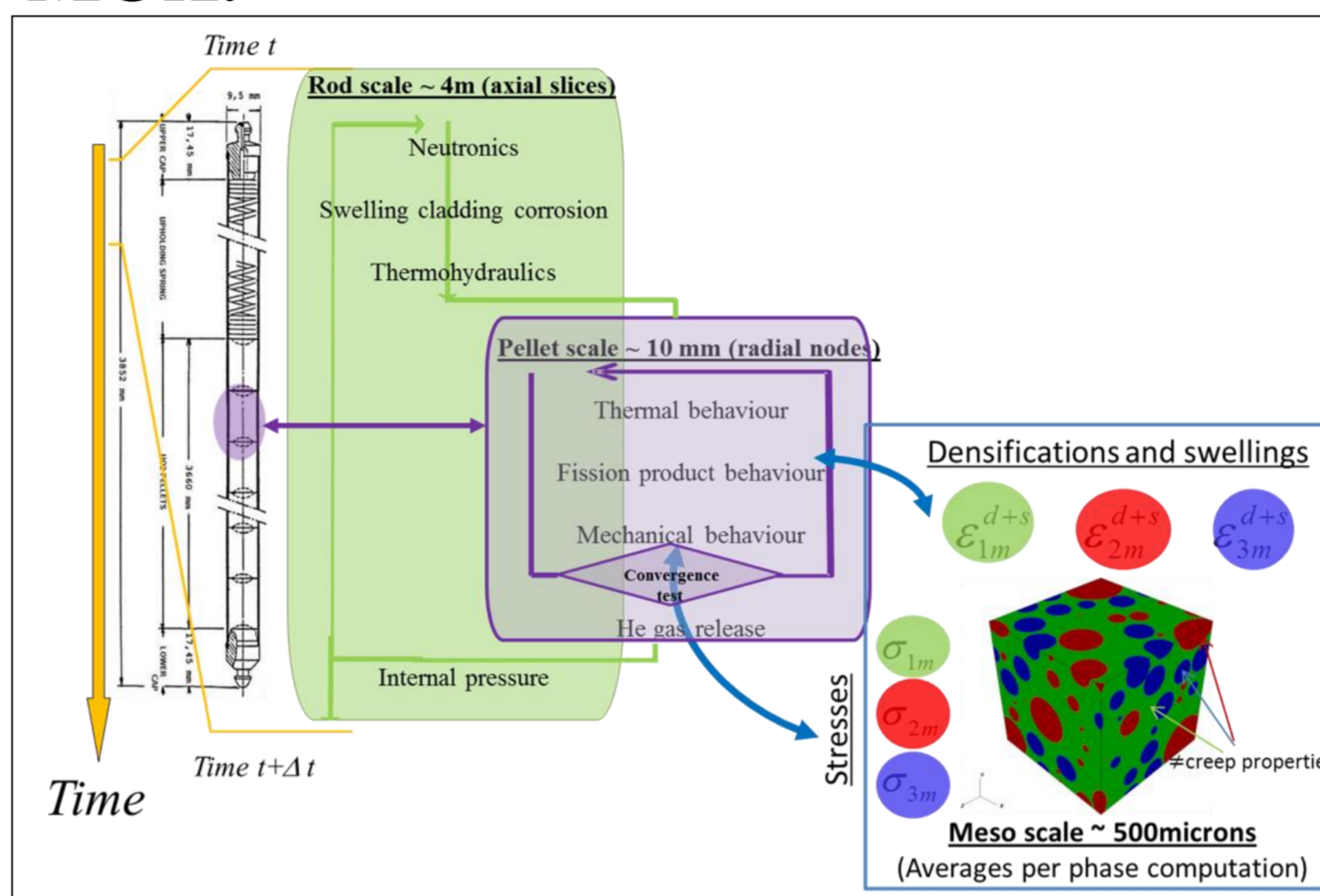
Objectif du sujet de thèse : établir la loi 3-phases d'endommagement.

## Comportement sous irradiation du MOX en situation accidentelle.

- Les propriétés élastiques entre les phases sont identiques mais les effets dus à la fission sont différents (le taux de fission du plutonium est plus élevé que celui de l'uranium)
- Le MOX est un matériau poreux (4-5%). L'irradiation cause :
  - La densification du MOX (diminution volume combustible) en début d'irradiation.
  - Le gonflement solide.
  - Le gonflement gazeux.
- En situation accidentelle, l'augmentation de la température provoque l'augmentation de la pression des gaz de fission; augmentation des contraintes dans les phases.

⇒ Apparition d'endommagement fragile.

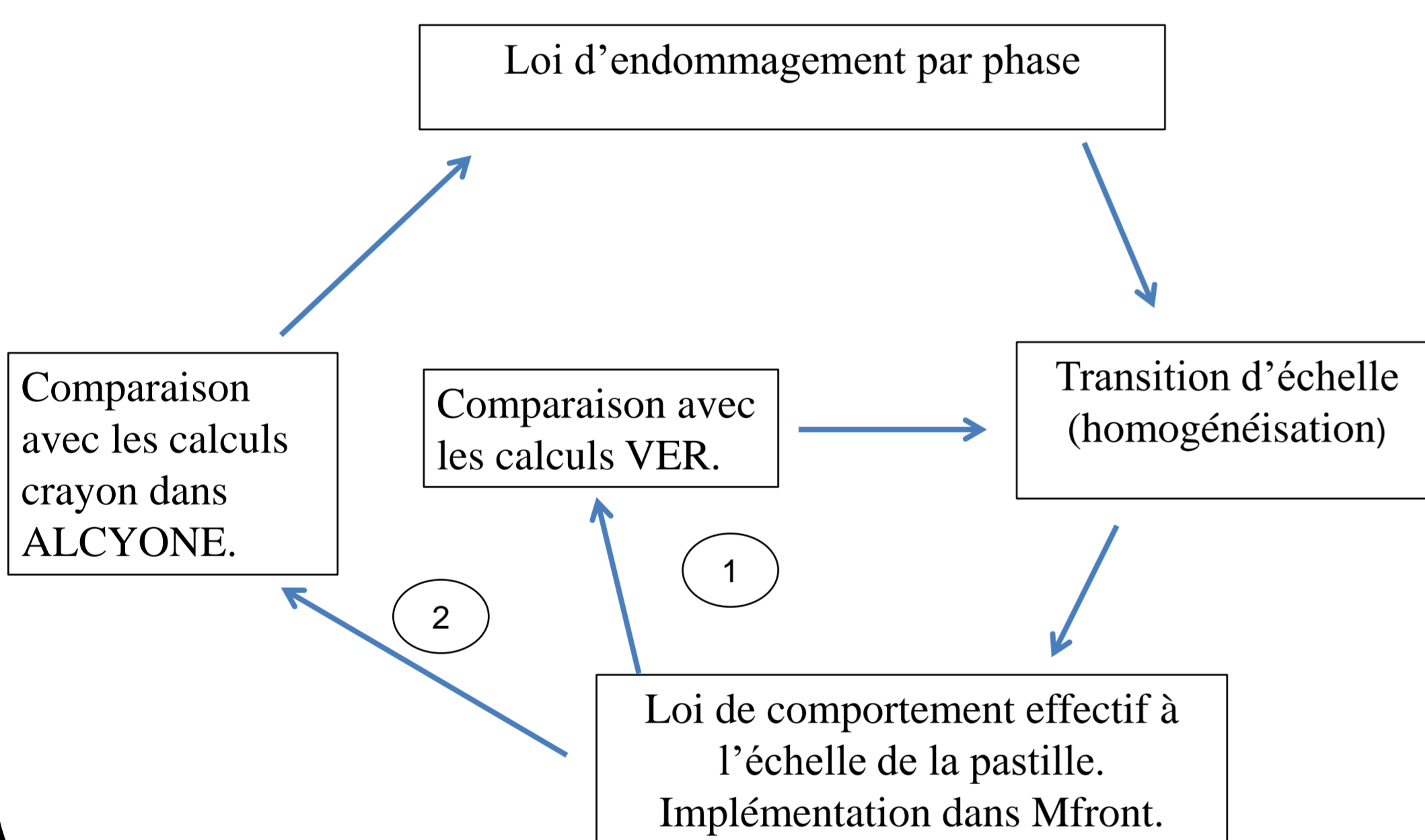
## Etat de l'art sur la modélisation-simulation du comportement sous irradiation du MOX.



- Modélisation du relâchement des gaz de fission
- Modélisation par homogénéisation du gonflement viscoélastique (fluage):
  - Fluage sous irradiation (Largenton, 2012).
  - Fluage thermique (Rousette, 2005; Seck 2018).

Nécessité de disposer de lois modélisant le comportement d'endommagement fragile du MOX.

## Démarche suivie durant la thèse



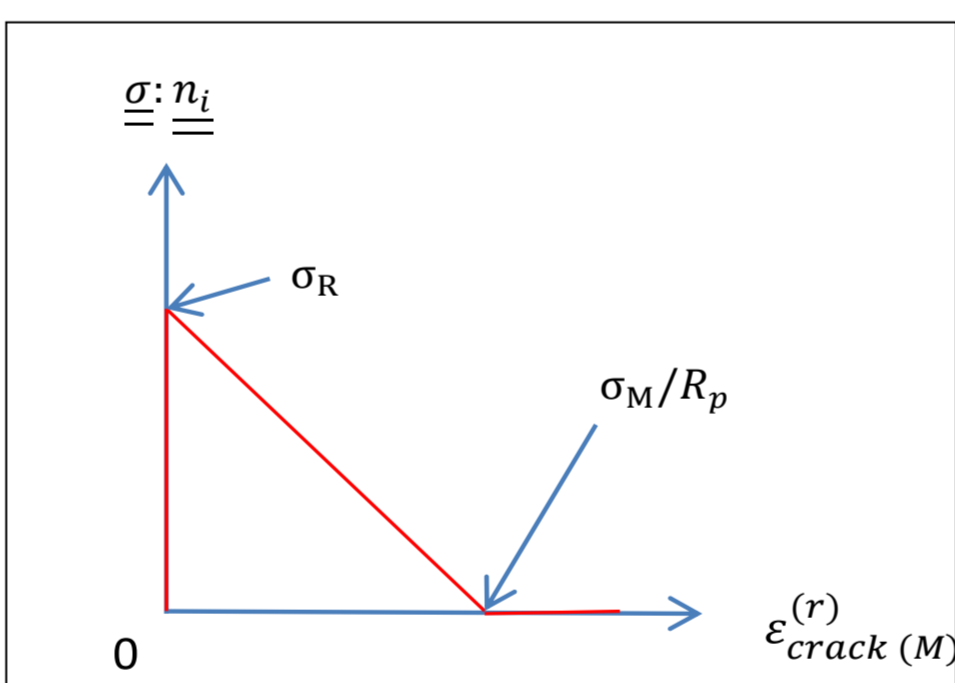
Une première application de la démarche à un modèle MOX simplifié (2 phases).

### Problème physique.

$$\dot{\epsilon}_{tot}^{(r)}(\underline{x}, t) = \dot{\epsilon}_{el}^{(r)}(\underline{x}, t) + \dot{\epsilon}_{visco}^{(r)}(\underline{x}, t) + \dot{\epsilon}_g^{(r)}(\underline{x}, t) + \dot{\epsilon}_{crack}^{(r)}(\underline{x}, t) \quad r=1;2;3$$

Terme lié au comportement viscoélastique.

Terme lié à la fissuration.



Loi de comportement en fissuration retenue (B. Michel et al.):

$$\underline{\sigma}^{(r)} : \underline{n}_i(\underline{x}, t) - \sigma_R - R_p \epsilon_{crack(M)}^{i(r)}(\underline{x}, t) = 0$$

$$\underline{n}_i = w_i \otimes w_i$$

$$\epsilon_{crack(M)}^{(r)} = \sum_{i=1}^3 \epsilon_{crack(M)}^{i(r)}(\underline{x}, t) \underline{n}_i$$

- Modèle anisotrope.
- $w_i$  est la normale au plan de fissuration.
- $\sigma^{(r)} : \underline{n}_i$  est la contrainte normale au plan de fissuration.

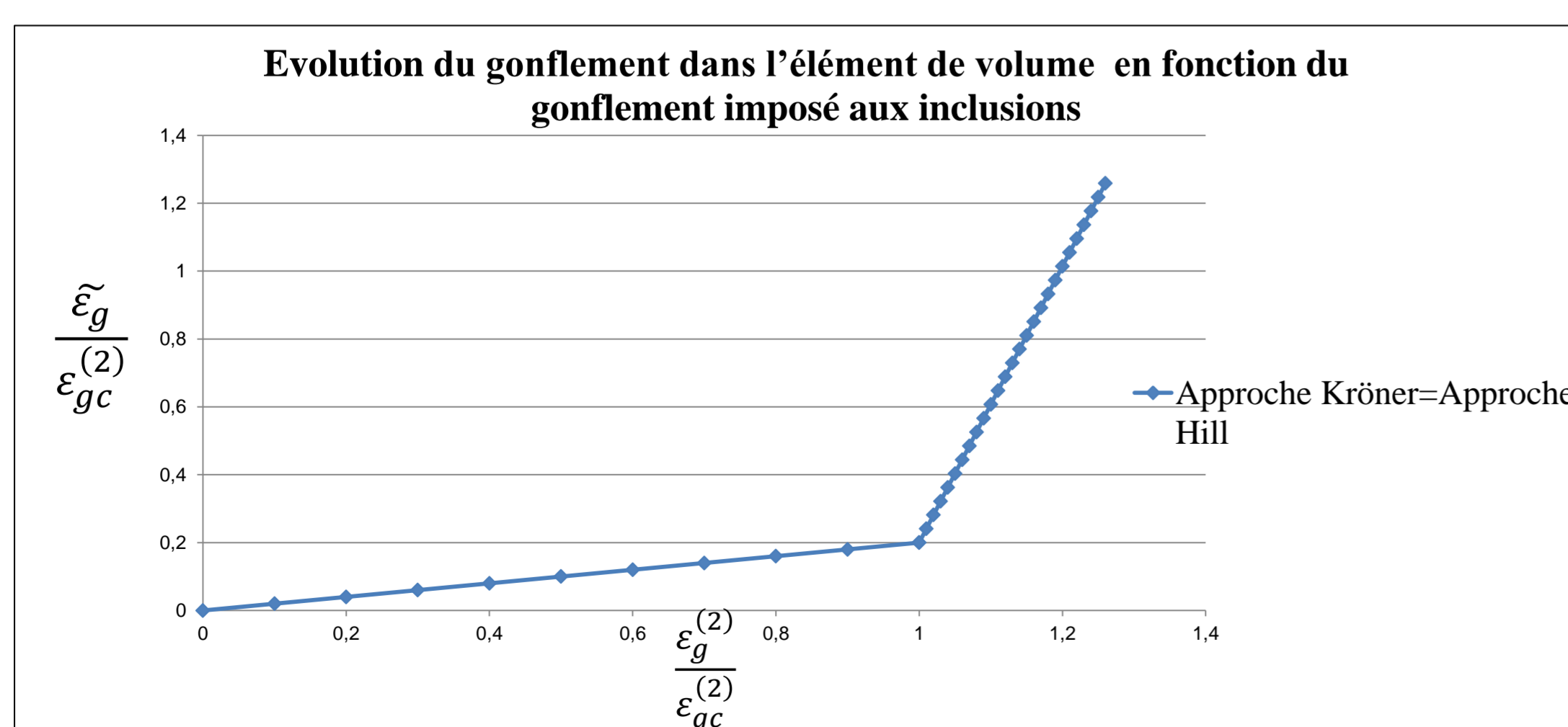
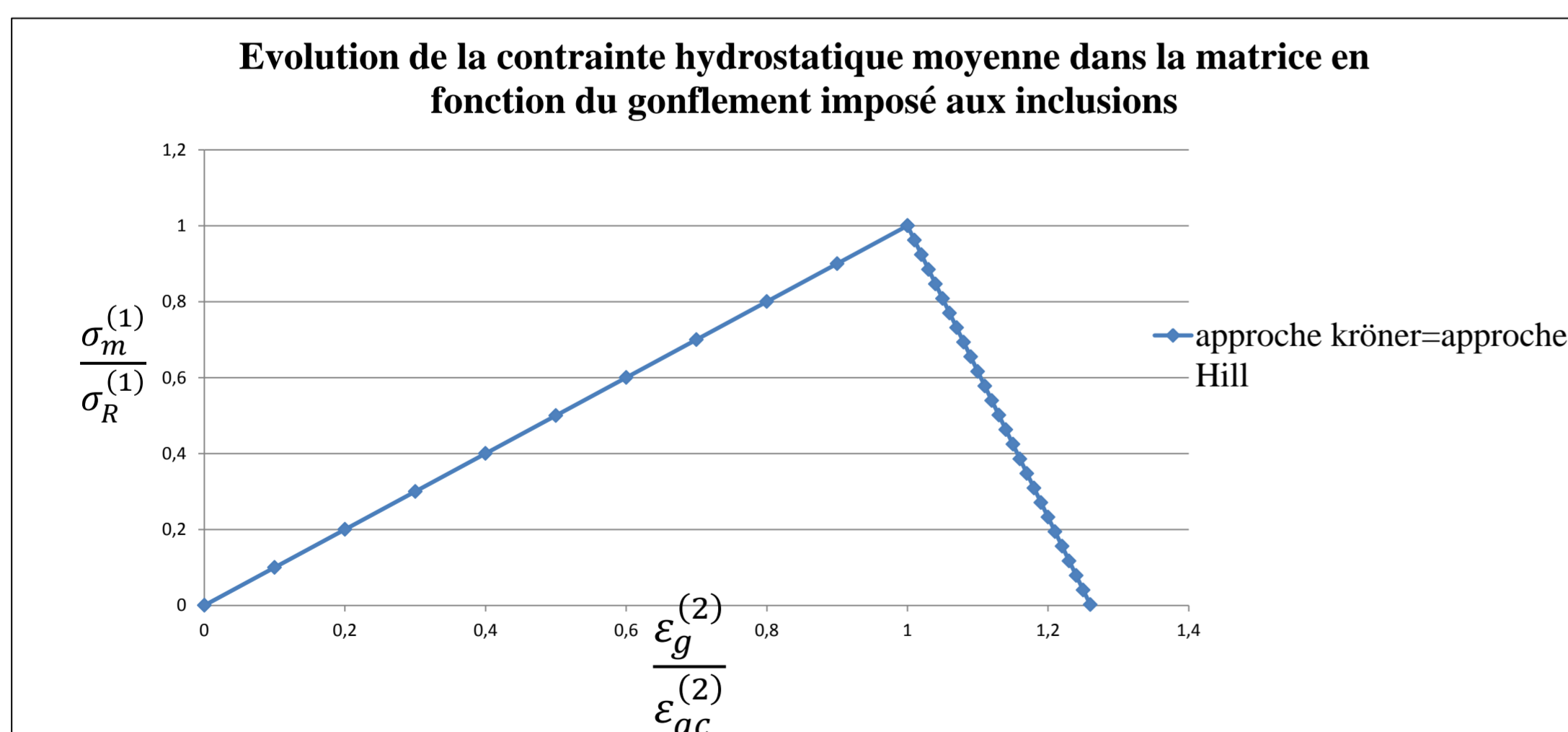
### Premier cas étudié.

- Composite biphasé, libre à son bord.
  - Chargement de gonflement de la phase (2) isotrope d'où:
 
$$\dot{\epsilon}_{tot}^{(r)}(\underline{x}, t) \underline{\delta} = \dot{\epsilon}_{el}^{(r)}(\underline{x}, t) \underline{\delta} + \dot{\epsilon}_{vis}^{(r)}(\underline{x}, t) \underline{\delta} + \dot{\epsilon}_g^{(r)}(\underline{x}, t) \underline{\delta} + \dot{\epsilon}_{crack}^{(r)}(\underline{x}, t) \underline{\delta}$$

$$\dot{\epsilon}_{tot}^{(r)}(\underline{x}, t) \underline{\delta} = \dot{\epsilon}_{el}^{(r)}(\underline{x}, t) \underline{\delta} + \dot{\epsilon}_g^{(r)}(\underline{x}, t) \underline{\delta} + \dot{\epsilon}_{crack}^{(r)}(\underline{x}, t) \underline{\delta}$$

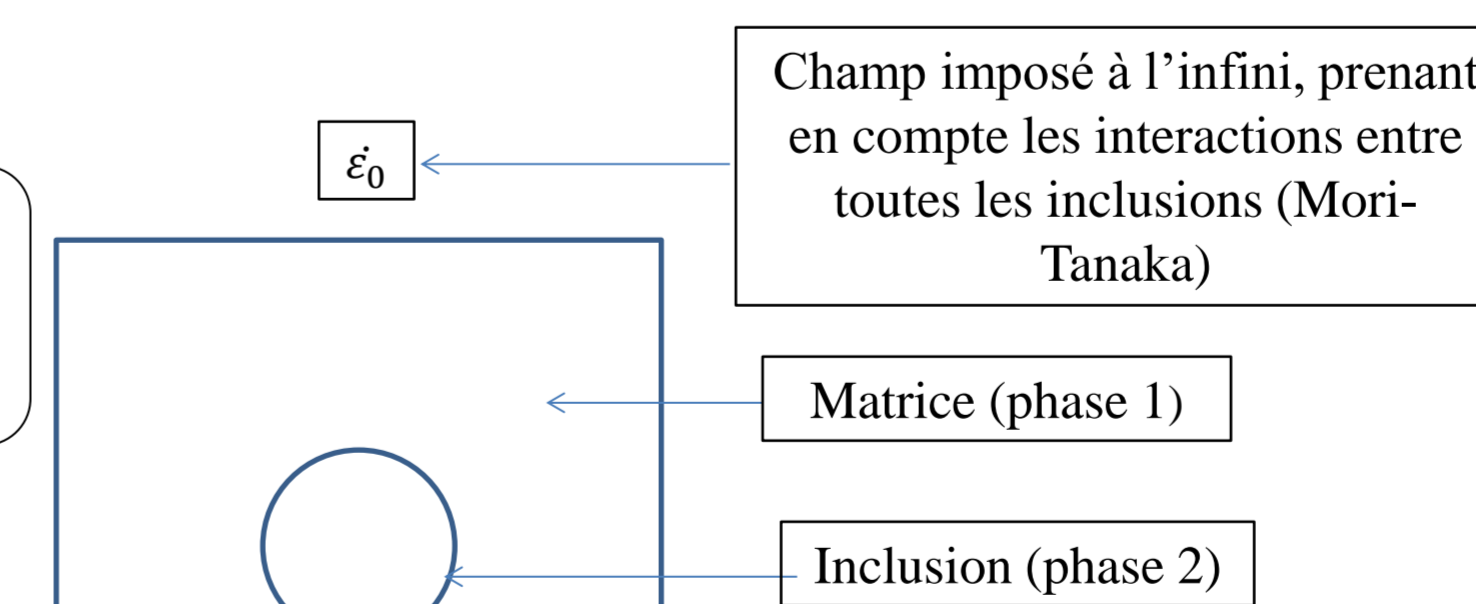
$$\dot{\epsilon}_g^{(1)}(\underline{x}, t) = 0$$
  - Inclusions (phase 2)
  - Matrice (phase 1)
- Objectif : déterminer la déformation effective du composite.

### Homogénéisation



Deux approches qui s'avèrent être équivalentes.

- La déformation de fissuration dans la matrice est pilotée par la moyenne des contraintes dans la matrice.
- Schéma d'homogénéisation de Mori-Tanaka (problème de l'inclusion d'Eshelby + matériau présentant une phase matrice importante).



$$\epsilon_{gc}^{(2)} = \frac{(3k_e + 4\mu_e)}{12c^{(2)}k_e\mu_e} \sigma_R$$

Même gonflement critique.

Champ imposé à l'infini, prenant en compte les interactions entre toutes les inclusions (Mori-Tanaka)

Matrice (phase 1)

Inclusion (phase 2)

Si  $|R_p| < \frac{12c^{(2)}k_e\mu_e}{(3k_e+4\mu_e)}$ , on a, pour Kröner et pour Hill :

$$\dot{\epsilon}_{crack}^{(1)} = \frac{12c^{(2)}k_e\mu_e\dot{\epsilon}_g^{(2)}}{12c^{(2)}k_e\mu_e + R_p(3k_e+4\mu_e)}$$

Même cinétique de propagation.

- 2 approches pour modéliser la fissuration :
- Kröner** : un gonflement libre dans la matrice modélise les effets de la fissuration; les propriétés élastiques des phases sont identiques entre elles. Donc  $\dot{\epsilon}_g^{(1)}(t) = \dot{\epsilon}_{crack(M)}^{(1)}(t)$ .
  - Hill**: la différence des propriétés élastiques entre les phases modélise les effets de la fissuration. Donc pour la phase (1), les propriétés élastiques du matériau sont  $(k_e, \mu_e)$  et pour la phase (2)  $(k_e, \mu_e)$  avec  $\zeta = \frac{R_p}{3k_e + R_p}$

## Perspectives.

- Interprétation énergétique de l'équivalence des approches Hill et Kröner
- Réaliser des calculs VER et améliorer le schéma d'homogénéisation.
- Améliorer le modèle d'endommagement (étude bibliographique).
- Mettre au point d'autres tests pour valider la loi de comportement.

## Remerciements.

Projet Oxyde de l'institut tripartite.

