

Thèse de Doctorat

présentée à l'Ecole Doctorale en Sciences Technologie et Santé par:

Ghassan ALHAJJ HASSAN

pour obtenir le grade de Docteur de l'Université de Picardie Jules Verne

Modélisation par la MED des couplages thermo-élastique et thermo-hydrique, et de l'endommagement induit par effet thermique dans les milieux continus

Le 30 septembre 2020

Contexte général

Projet CUBISM (programme INTERREG V)

Monitoring des structures en béton

- séchage des bétons réfractaires
- suivi de l'humidité des structures pour le génie civil

Contexte général

Projet CUBISM (programme INTERREG V)

Monitoring des structures en béton

- séchage des bétons réfractaires
- suivi de l'humidité des structures pour le génie civil

Objectif

Proposer des capteurs d'humidité et de pression intégrés dans les structures en béton

Contexte général

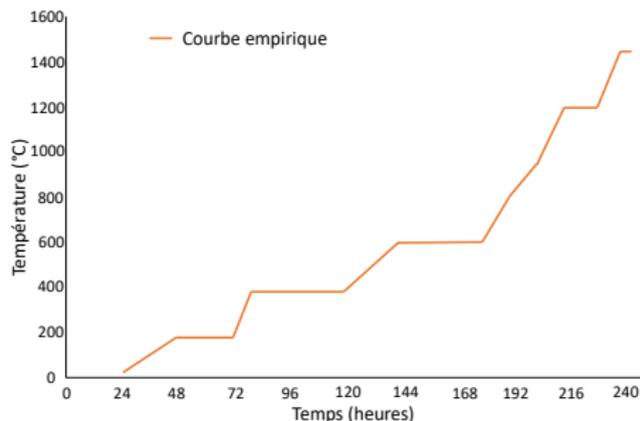
Projet CUBISM (programme INTERREG V)

Monitoring des structures en béton

- séchage des bétons réfractaires
- suivi de l'humidité des structures pour le génie civil

Objectif

Proposer des capteurs d'humidité et de pression intégrés dans les structures en béton



Séchage du béton réfractaire

Contexte général

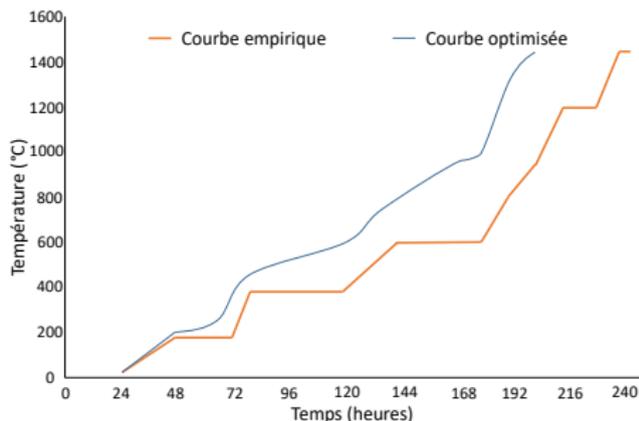
Projet CUBISM (programme INTERREG V)

Monitoring des structures en béton

- séchage des bétons réfractaires
- suivi de l'humidité des structures pour le génie civil

Objectif

Proposer des capteurs d'humidité et de pression intégrés dans les structures en béton



Séchage du béton réfractaire

Contexte général

Projet CUBISM (programme INTERREG V)

Monitoring des structures en béton

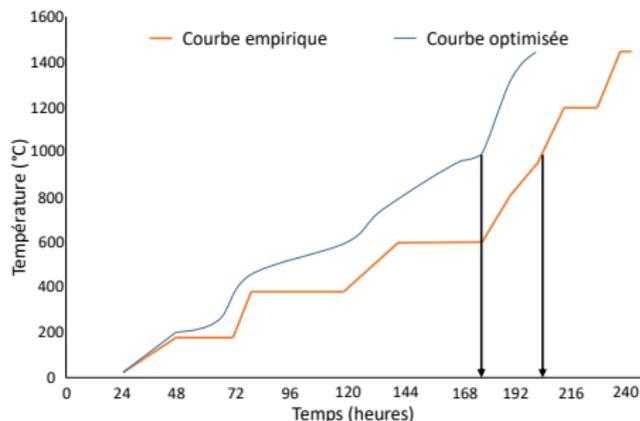
- séchage des bétons réfractaires
- suivi de l'humidité des structures pour le génie civil

Impact économique

- Diminuer les temps de séchage
- Limiter le risque d'endommagement

Objectif

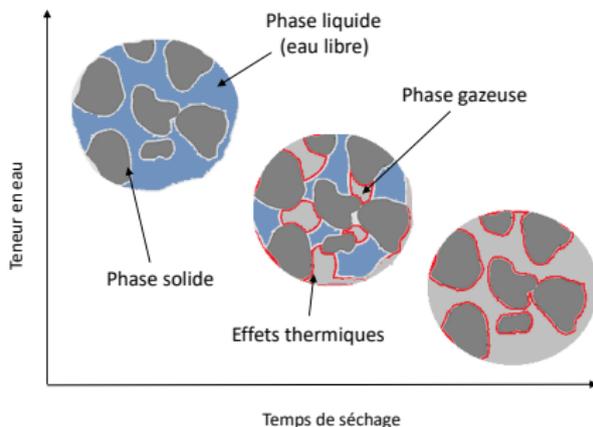
Proposer des capteurs d'humidité et de pression intégrés dans les structures en béton



Séchage du béton réfractaire

Problématique du séchage de matériaux

- Dans le cas du béton réfractaire à liant hydraulique : L'eau se transforme en vapeur et engendre une augmentation de pression dans le matériau



Processus de séchage

Problématique du séchage de matériaux

- Dans le cas du béton réfractaire à liant hydraulique : L'eau se transforme en vapeur et engendre une augmentation de pression dans le matériau
- Pression $>$ résistance mécanique (80 bars)



Problématique du séchage de matériaux

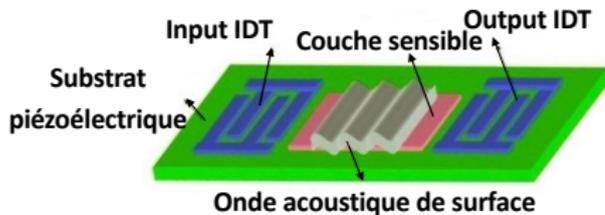
- Dans le cas du béton réfractaire à liant hydraulique : L'eau se transforme en vapeur et engendre une augmentation de pression dans le matériau
- Pression $>$ résistance mécanique (80 bars)



- Solution \implies monitoring in-situ des mesures physiques (température, pression, humidité)

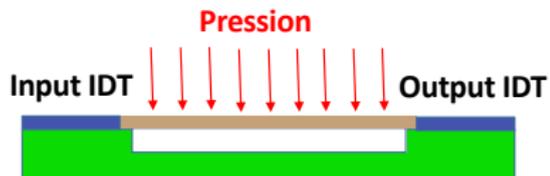
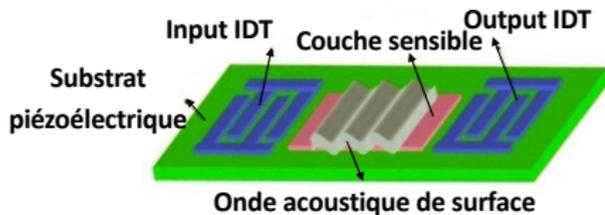
Capteur de type SAW

- Fonctionnement du capteur SAW



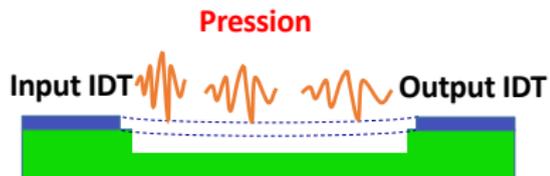
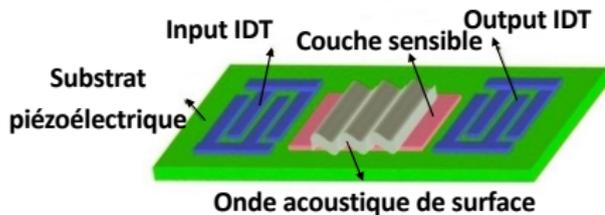
Capteur de type SAW

- Fonctionnement du capteur SAW



Capteur de type SAW

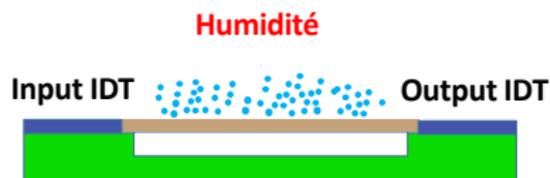
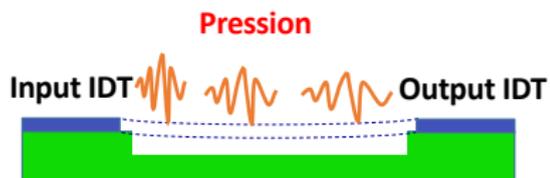
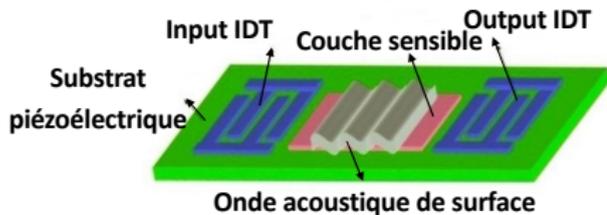
- Fonctionnement du capteur SAW



déformation du substrat

Capteur de type SAW

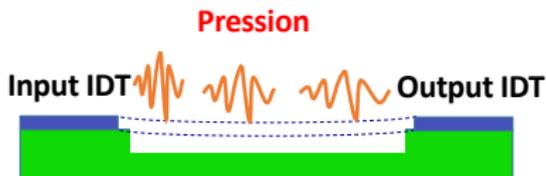
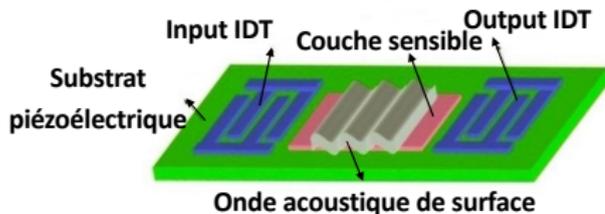
- Fonctionnement du capteur SAW



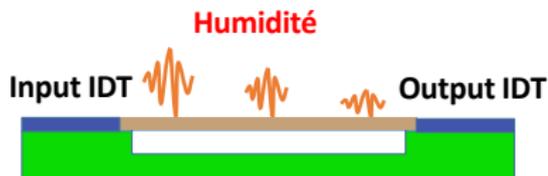
déformation du substrat

Capteur de type SAW

- Fonctionnement du capteur SAW



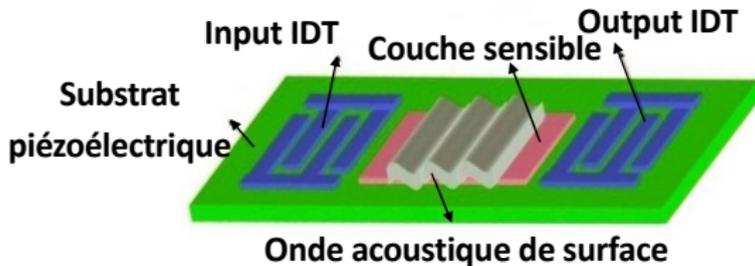
déformation du substrat



transformation de la couche sensible

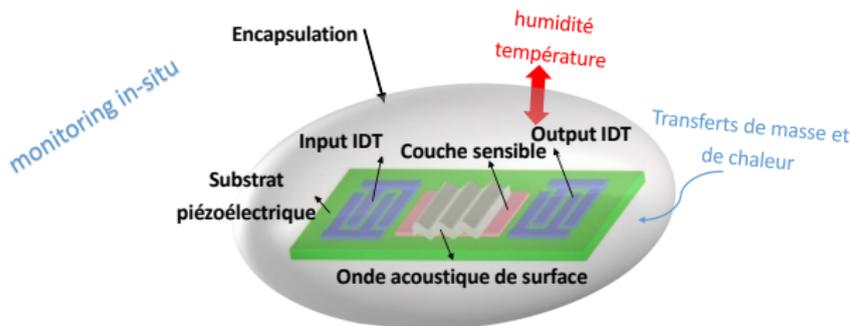
Monitoring in situ du séchage des matériaux

- Les matériaux dans CUBISM : support piézoélectrique en vitrocéramique, couche sensible en silice



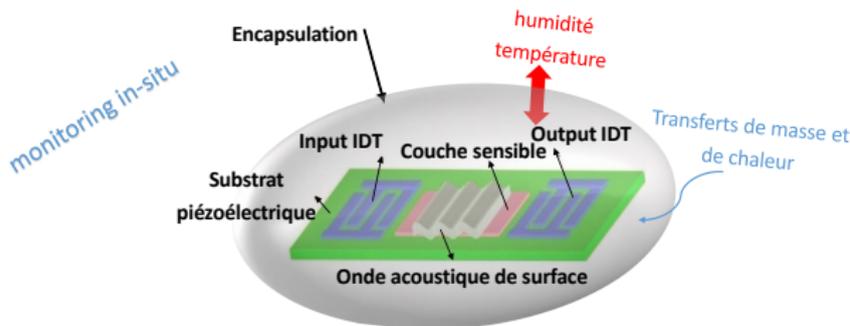
Monitoring in situ du séchage des matériaux

- Les matériaux dans CUBISM : support piézoélectrique en vitrocéramique, couche sensible en silice, béton réfractaire poreux pour l'encapsulation



Monitoring in situ du séchage des matériaux

- Les matériaux dans CUBISM : support piézoélectrique en vitrocéramique, couche sensible en silice, béton réfractaire poreux pour l'encapsulation



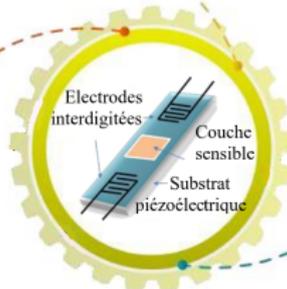
- Parmi les problématiques :
 - Matériaux hétérogènes, assemblage, milieux poreux ...
 - Plusieurs mécanismes entrent en jeu et peuvent influencer les propriétés des matériaux utilisés et leur durée de vie

Consortium du projet CUBISM

(BE)
Sélection des couches sensibles et Synthèse
de substrats piézoélectriques "hautes
températures" (vitrocéramiques et céramiques
poreuses)



(BE)
Réalisation des couches sensibles
par des technologies additives
et essais pilotes des capteurs



(BE)
Réalisation des électrodes des
capteurs et encapsulation



Consortium du projet CUBISM

(BE)

Sélection des couches sensibles et Synthèse de substrats piézoélectriques "hautes températures" (vitrocéramiques et céramiques poreuses)



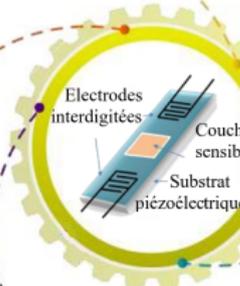
(FR)

Synthèse des matériaux des couches sensibles et des substrats piézoélectriques (céramiques denses et composites)



(BE)

Réalisation des couches sensibles par des technologies additives et essais pilotes des capteurs



(BE)

Réalisation des électrodes des capteurs et encapsulation



(FR)

Modélisation et caractérisation du fonctionnement électromécanique des capteurs



Consortium du projet CUBISM

(BE)

Sélection des couches sensibles et Synthèse de substrats piézoélectriques "hautes températures" (vitrocéramiques et céramiques poreuses)



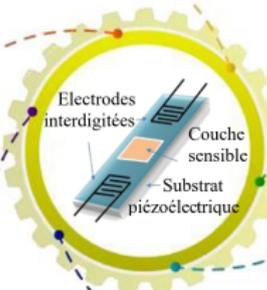
(FR)

Synthèse des matériaux des couches sensibles et des substrats piézoélectriques (céramiques denses et composites)



(BE)

Réalisation des couches sensibles par des technologies additives et essais pilotes des capteurs



(BE)

Réalisation des électrodes des capteurs et encapsulation



(FR)

Modélisation et caractérisation du fonctionnement électromécanique des capteurs



(FR)

Modélisation thermo-hydro-mécanique et des tests en ambiance contrôlée

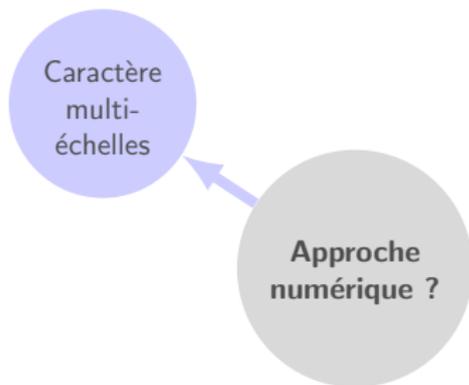


Choix de l'approche numérique

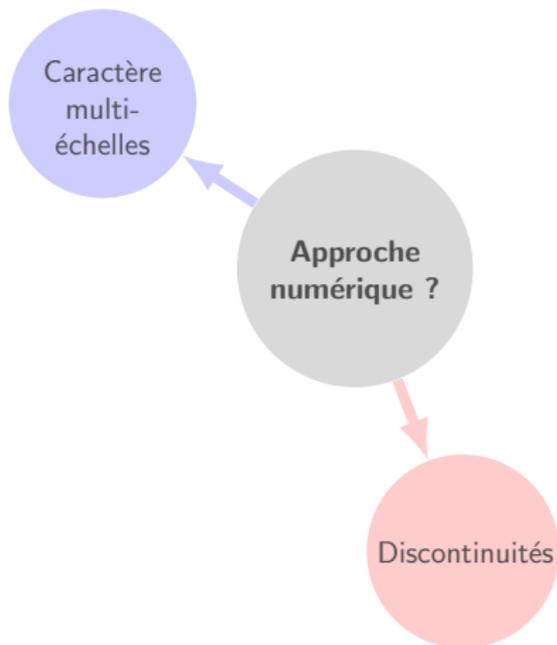


**Approche
numérique ?**

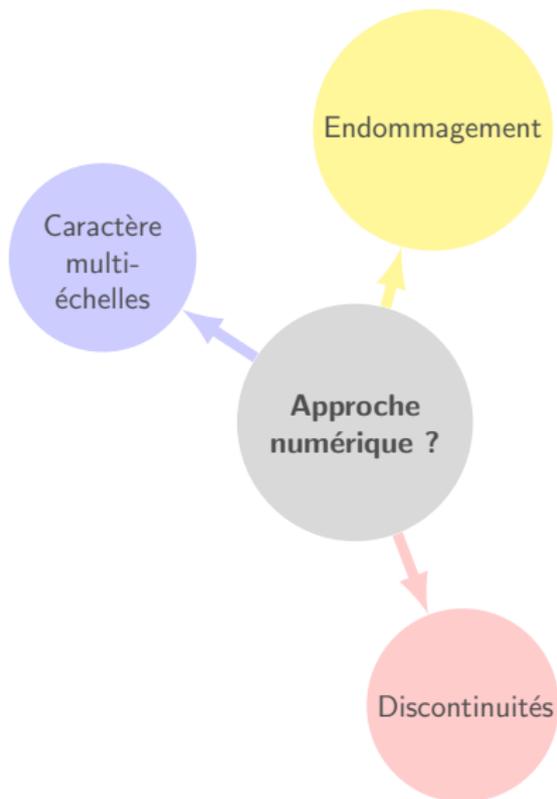
Choix de l'approche numérique



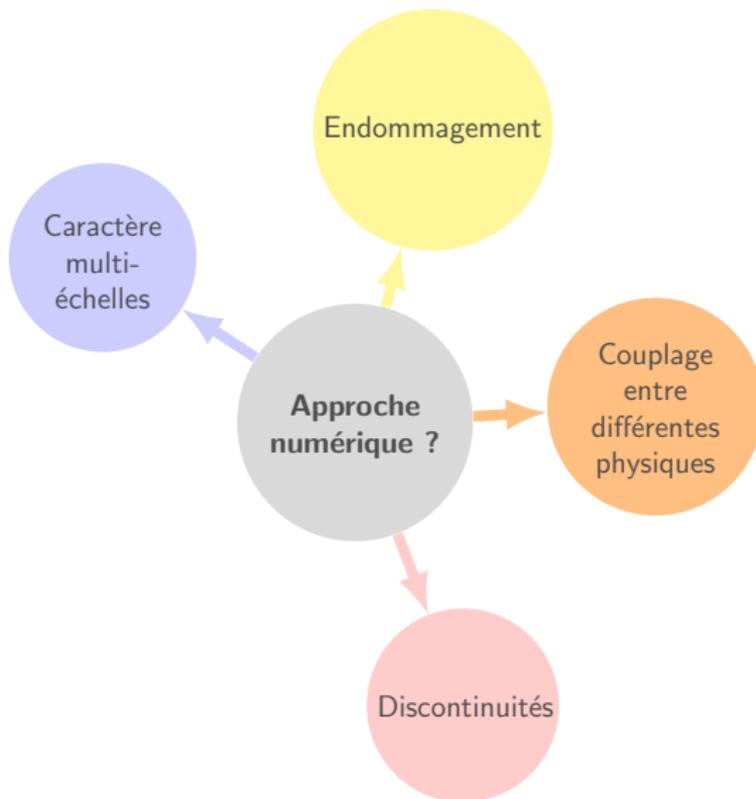
Choix de l'approche numérique



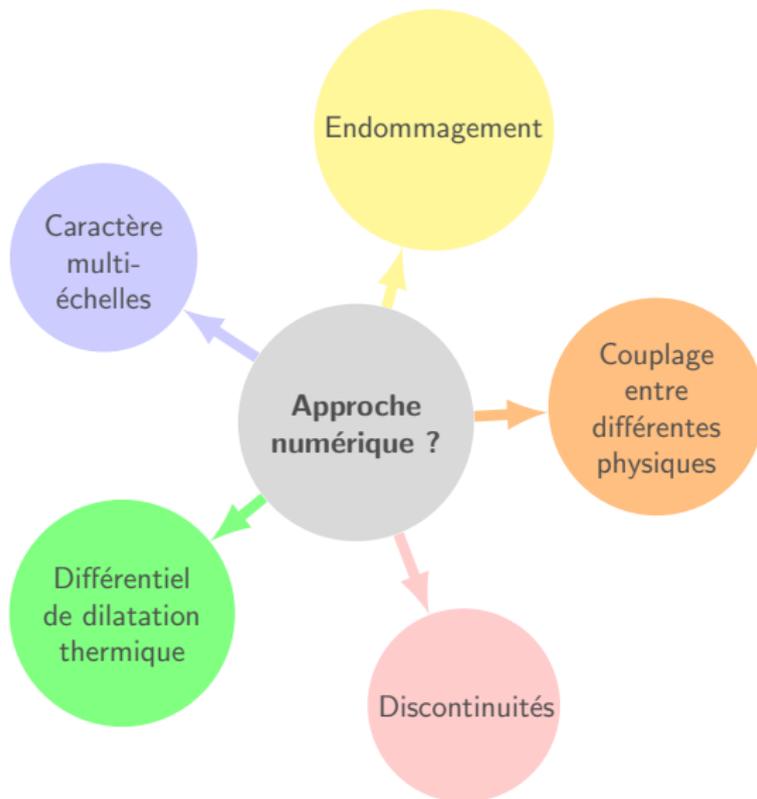
Choix de l'approche numérique



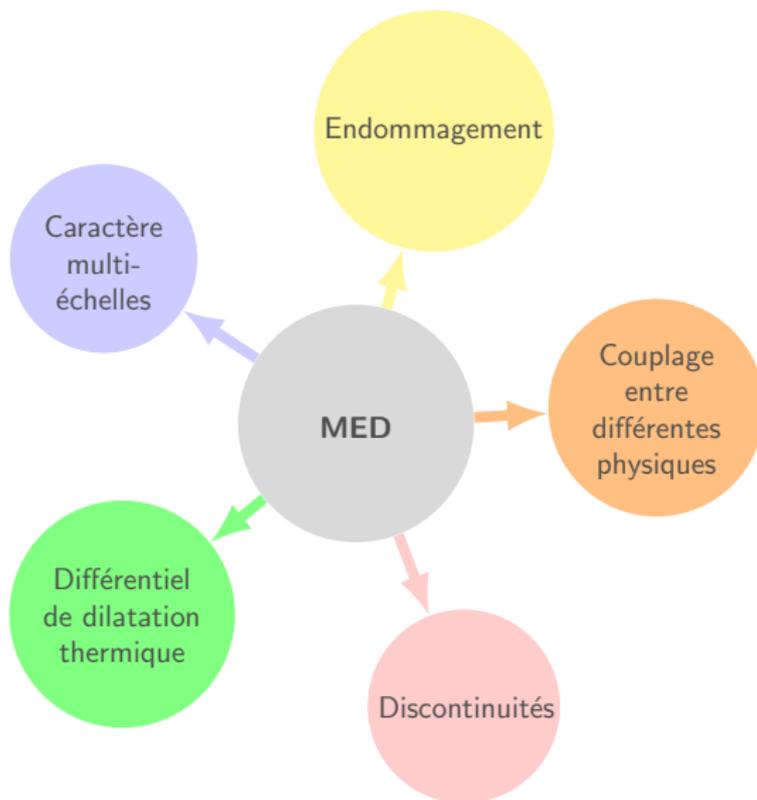
Choix de l'approche numérique



Choix de l'approche numérique



Choix de l'approche numérique



Méthode des Éléments Discrets

1

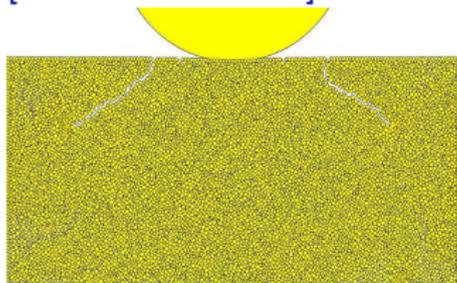
Modéliser l'endommagement induit par le différentiel de dilatation thermique en milieu hétérogène

Méthode des Éléments Discrets

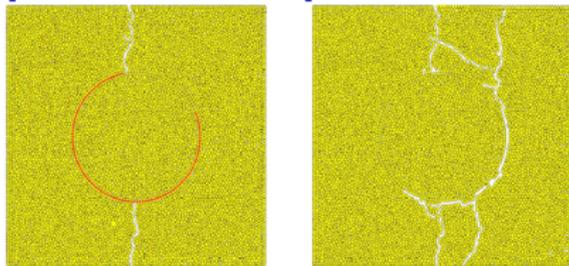
1

Modéliser l'endommagement induit par le différentiel de dilatation thermique en milieu hétérogène

Test d'indentation
[Leclerc et al.,2016]



Initiation et propagation des fissures
[Leclerc et al.,2017]



Méthode des Éléments Discrets

1

Modéliser l'endommagement induit par le différentiel de dilatation thermique en milieu hétérogène

2

Considérer l'influence des échanges de chaleur avec le milieu extérieur sur la durabilité du capteur

Méthode des Éléments Discrets

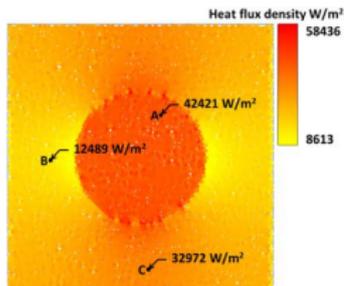
1

Modéliser l'endommagement induit par le différentiel de dilatation thermique en milieu hétérogène

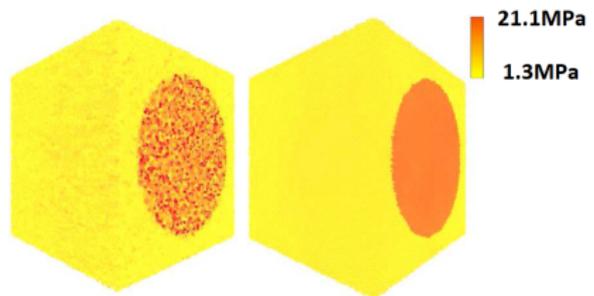
2

Considérer l'influence des échanges de chaleur avec le milieu extérieur sur la durabilité du capteur

Transfert thermique par conduction [Haddad et al. 2018]



Contrainte par la méthode Halo [Moukadiri et al. 2019]



Méthode des Éléments Discrets

1

Modéliser l'endommagement induit par le différentiel de dilatation thermique en milieu hétérogène

2

Considérer l'influence des échanges de chaleur avec le milieu extérieur sur la durabilité du capteur

3

Étendre le modèle au transfert hydrique dans des matériaux poreux

Méthode des Éléments Discrets

1

Modéliser l'endommagement induit par le différentiel de dilatation thermique en milieu hétérogène

2

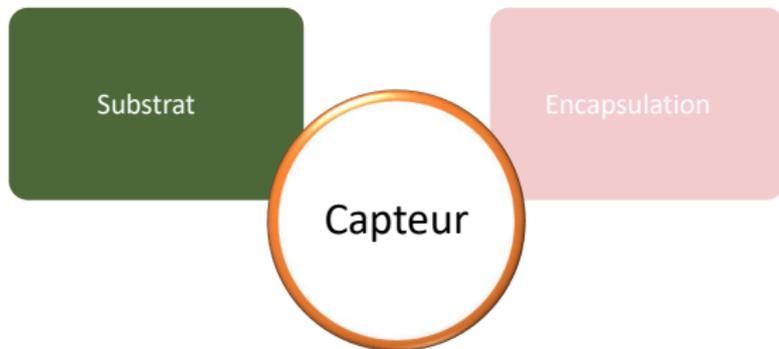
Considérer l'influence des échanges de chaleur avec le milieu extérieur sur la durabilité du capteur

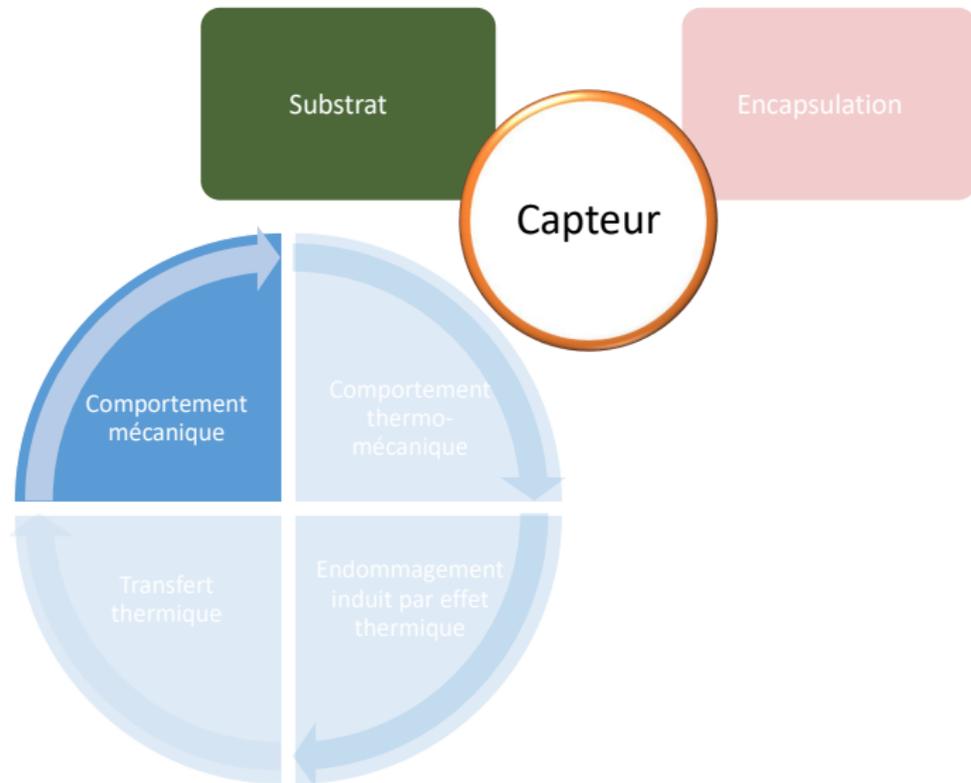
3

Étendre le modèle au transfert hydrique dans des matériaux poreux

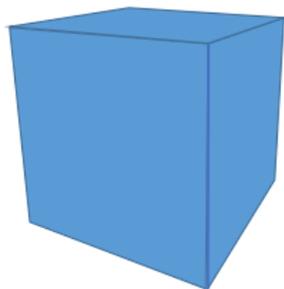
MULTICOR3D++

- ① MED pour la modélisation des milieux continus
- ② Couplage thermo-élastique
- ③ Modélisation de l'endommagement induit par effet thermique
- ④ Simulation du transfert thermique
- ⑤ Couplage thermo-hydrique
- ⑥ Conclusions et perspectives

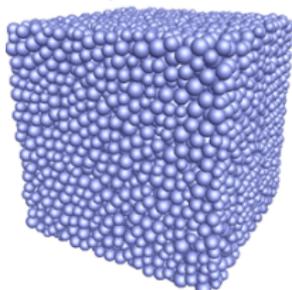




Milieu continu équivalent

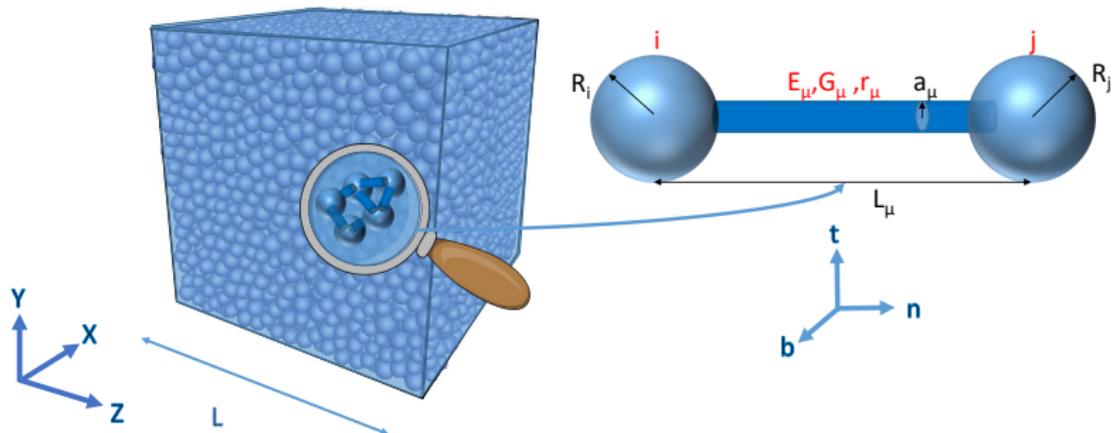
Milieu continu de densité ρ_c 

modélisé par

Milieu continu équivalent de densité ρ_d 

- * Hypothèses de Random Close Packing (RCP) [Donev et al., 2004]
 - $z = 6.2 \rightarrow$ isotropie et fraction volumique [André et al., 2012]
 - $\phi = \frac{V_{ED}}{V_{VER}} = 0.64 \rightarrow$ réseau d'ED monodisperses
 - isotropie \rightarrow polydispersité avec $CoV = 3\%$
- * Conservation de masse et de volume : $\rho_c = \phi \rho_d$

Modèle cohésif de type poutre



- Paramètre géométrique adimensionné : $r_\mu = \frac{2a_\mu}{R_i + R_j}$
- Longueur de l'élément poutre : $L_\mu = R_i + R_j$

Résolution des forces de contact

* Loi de Newton

- Équation de mouvement de translation :

$$m_i \vec{u}_i = \vec{F}_i^{\text{ext}} + \sum_j \vec{F}^{j \rightarrow i}$$

- Équation de mouvement de rotation :

$$I_i \vec{\theta}_i = \vec{M}_i^{\text{ext}} + \sum_j \vec{M}^{j \rightarrow i}$$

Résolution des forces de contact

- * Efforts de cohésion : système correspondant à deux ED i et j en contact

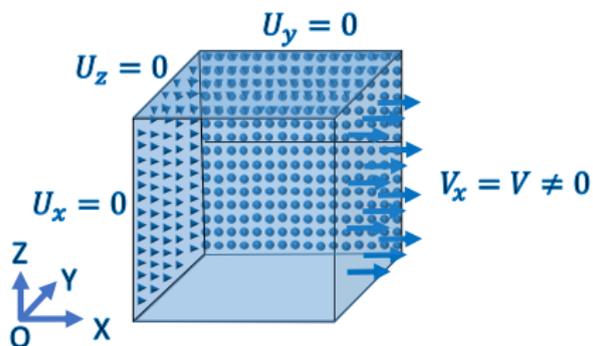
$$\begin{bmatrix} F_n^{j \rightarrow i} \\ F_t^{j \rightarrow i} \\ F_b^{j \rightarrow i} \\ M_n^{j \rightarrow i} \\ M_t^{j \rightarrow i} \\ M_b^{j \rightarrow i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_n & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_t & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{k_t L_\mu}{2} & \frac{k_t L_\mu}{2} \\ 0 & 0 & k_t & 0 & -\frac{k_t L_\mu}{2} & -\frac{k_t L_\mu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_n & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{k_t L_\mu}{2} & 0 & \frac{k_t L_\mu^2}{3} & \frac{k_t L_\mu^2}{6} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{k_t L_\mu}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{k_t L_\mu^2}{3} & \frac{k_t L_\mu^2}{6} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_n^i - u_n^j \\ u_t^i - u_t^j \\ u_b^i - u_b^j \\ \theta_n^i - \theta_n^j \\ \theta_t^i \\ \theta_t^j \\ \theta_b^i \\ \theta_b^j \end{bmatrix}$$

$$k_n = \frac{E_\mu A_\mu}{L_\mu}$$

$$k_t = \frac{12E_\mu I_\mu}{L_\mu^3}$$

$$S_n = \frac{2G_\mu I_\mu}{L_\mu}$$

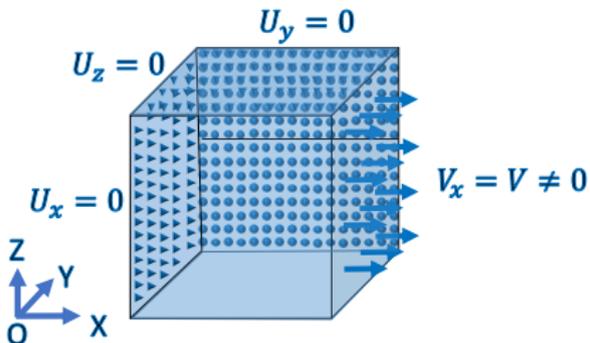
Identification des paramètres macroscopiques élastiques



Volume élémentaire représentatif
(VER)

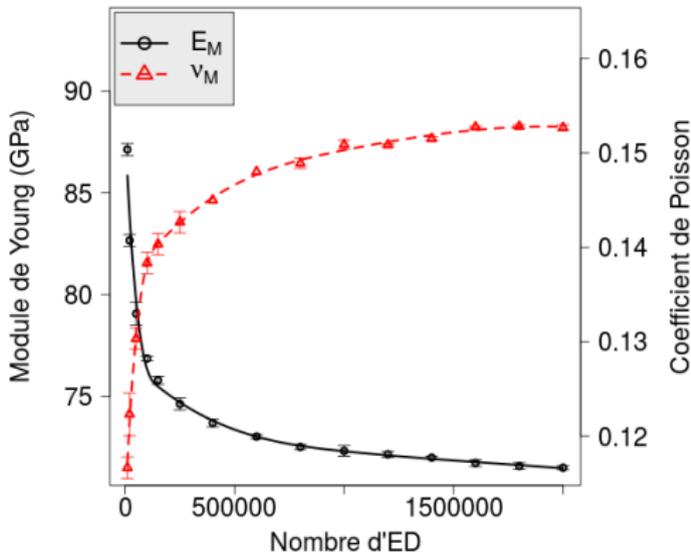
$$E_M = \frac{F}{S\epsilon_L}, \nu_M = \frac{-\epsilon_T}{\epsilon_L}$$

Identification des paramètres macroscopiques élastiques



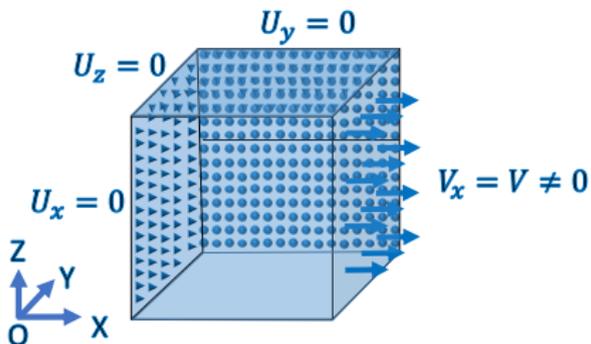
Volume élémentaire représentatif (VER)

$$E_M = \frac{F}{S_{\epsilon_L}}, \nu_M = \frac{-\epsilon_T}{\epsilon_L}$$



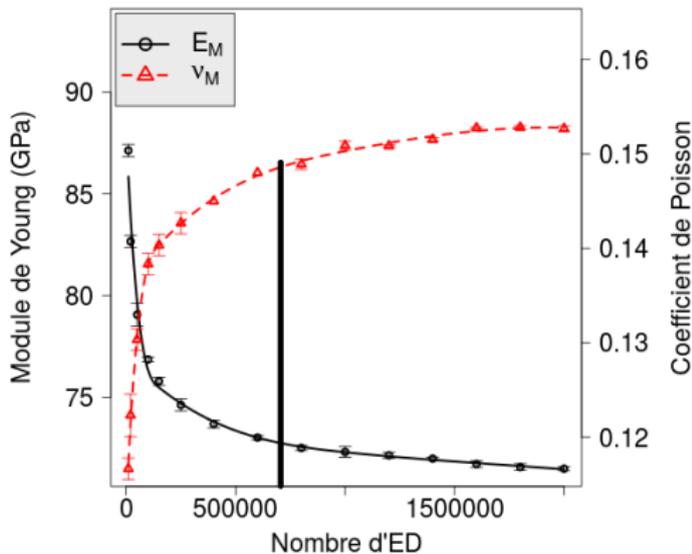
Convergence des paramètres élastiques

Identification des paramètres macroscopiques élastiques



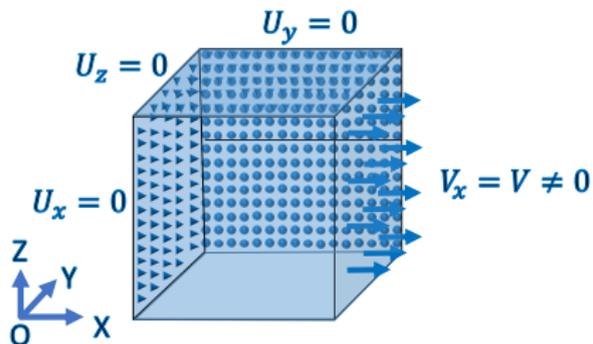
Volume élémentaire représentatif (VER)

$$E_M = \frac{F}{S_{\epsilon_L}}, \nu_M = \frac{-\epsilon_T}{\epsilon_L}$$



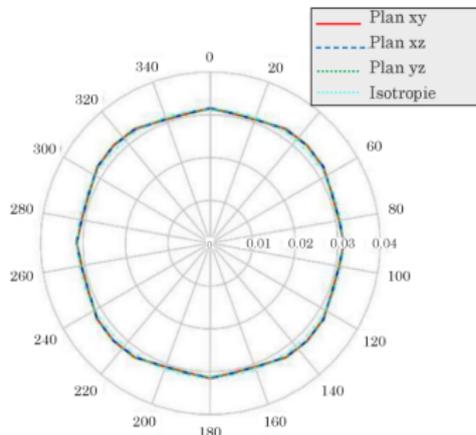
Convergence des paramètres élastiques

Identification des paramètres macroscopiques élastiques



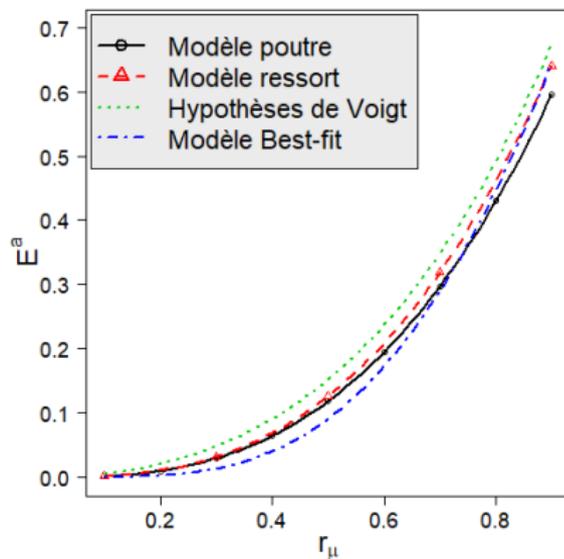
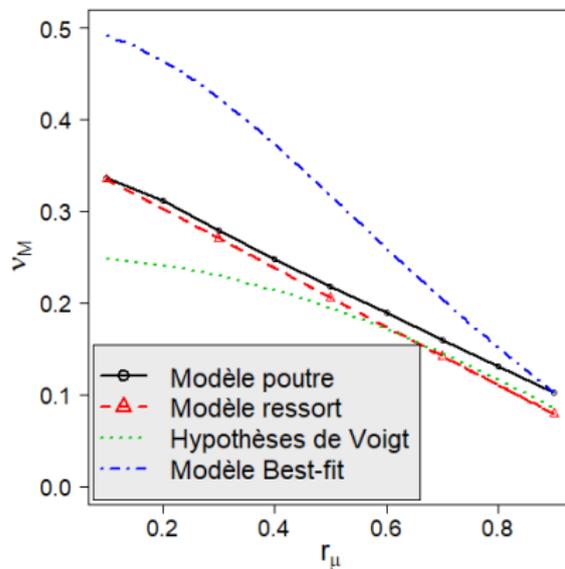
Volume élémentaire représentatif (VER)

$$E_M = \frac{F}{S_{\epsilon_L}}, \nu_M = \frac{-\epsilon_T}{\epsilon_L}$$



Distribution des angles de contact

Relation micro-macro



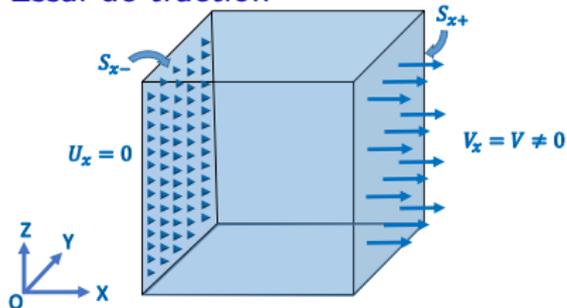
$$E^a = \frac{E_M}{E_\mu}$$

E_M : Module de Young macroscopique

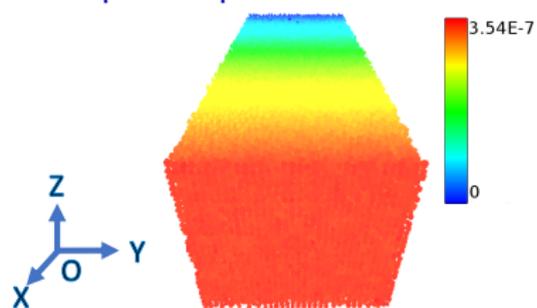
E_μ : Module de Young microscopique

Vérification du modèle cohésif de type poutre

Essai de traction

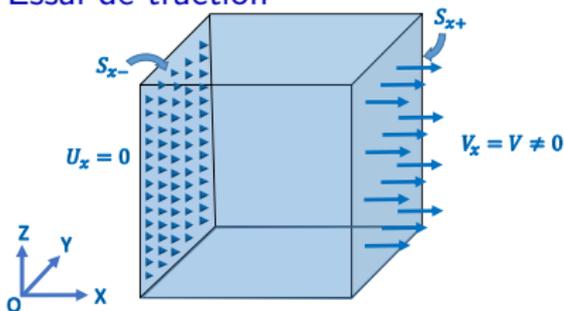


Champ de déplacement obtenu

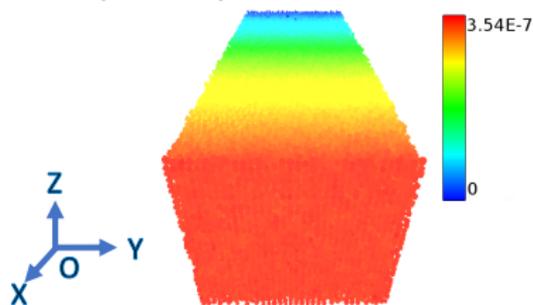


Vérification du modèle cohésif de type poutre

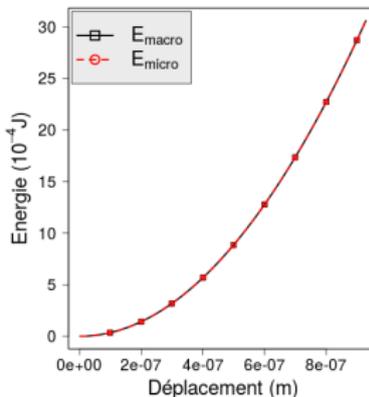
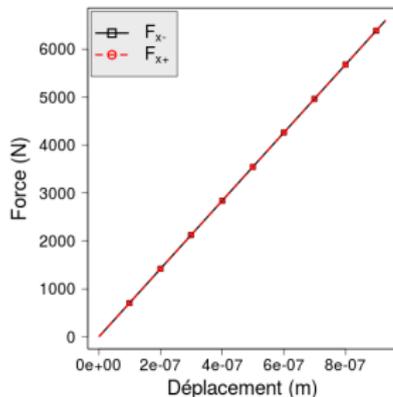
Essai de traction



Champ de déplacement obtenu

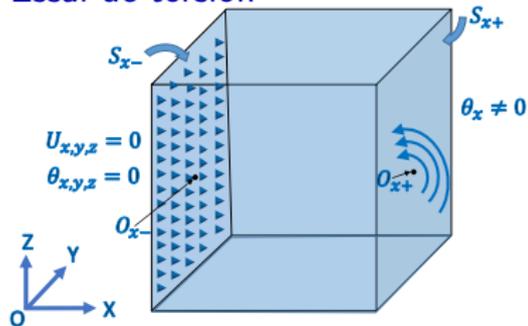


Évolution de la force/énergie de déformation en fonction du déplacement

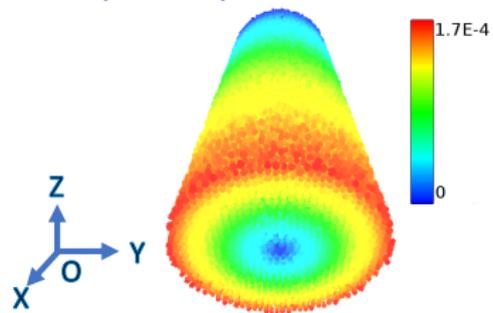


Vérification du modèle cohésif de type poutre

Essai de torsion

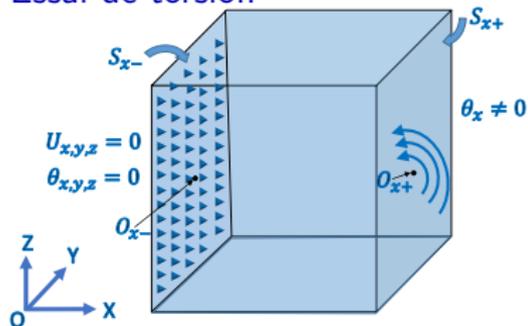


Champ de déplacement obtenu

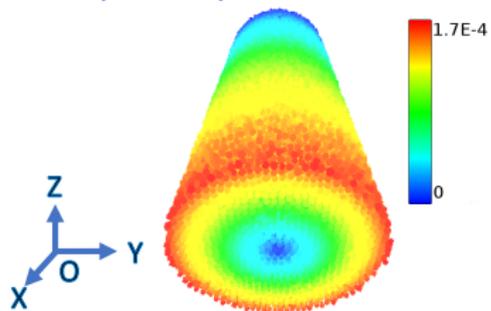


Vérification du modèle cohésif de type poutre

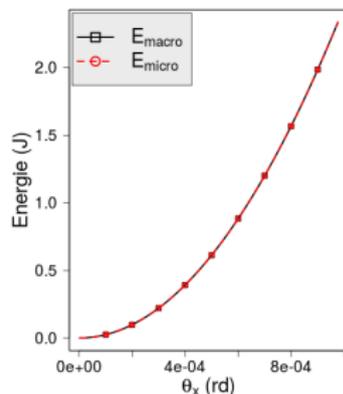
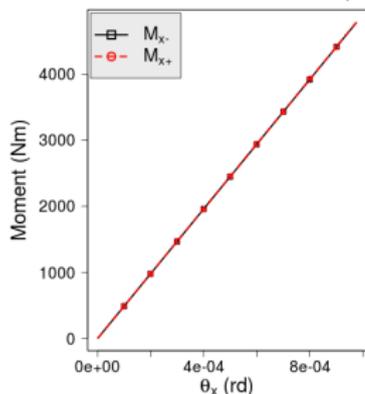
Essai de torsion



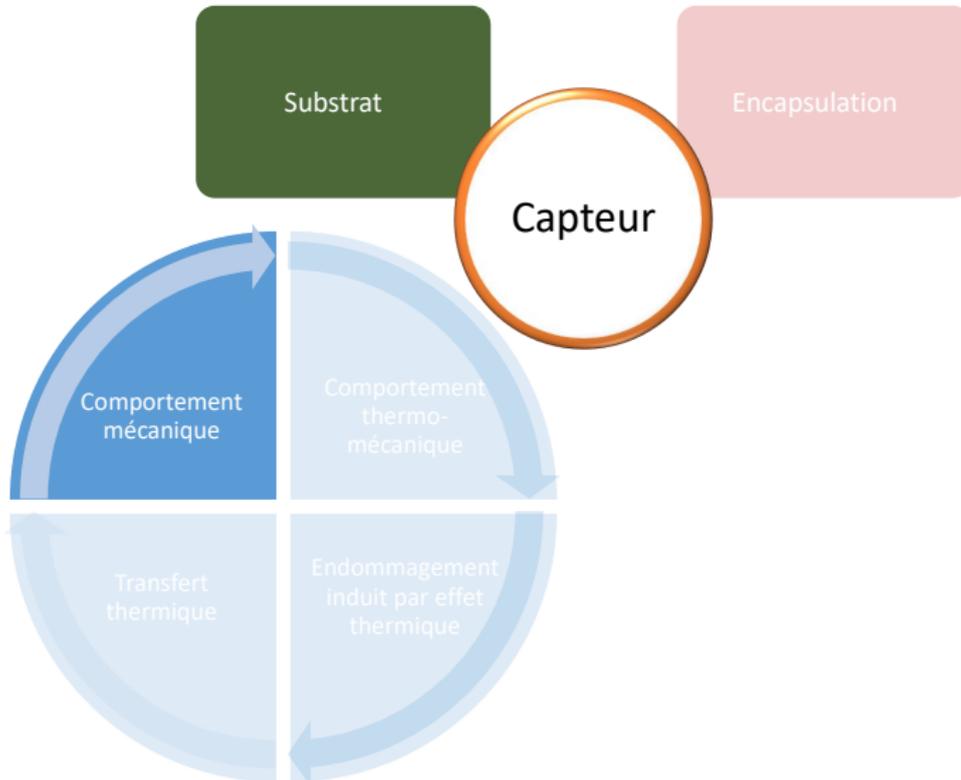
Champ de déplacement obtenu



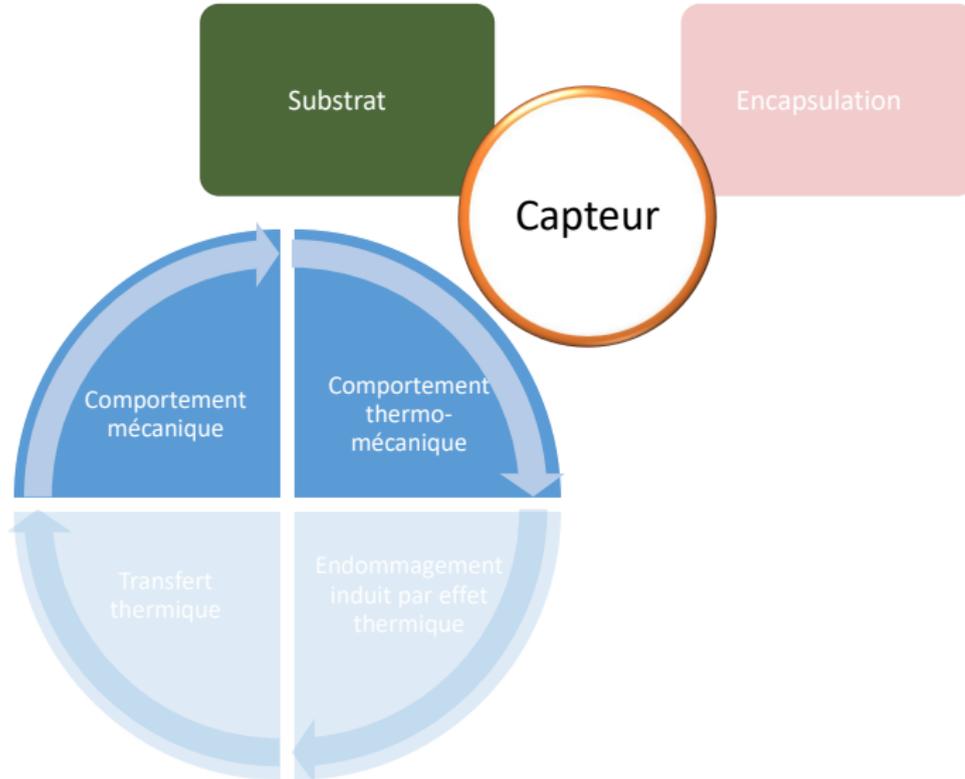
Évolution du moment/énergie de déformation en fonction de θ



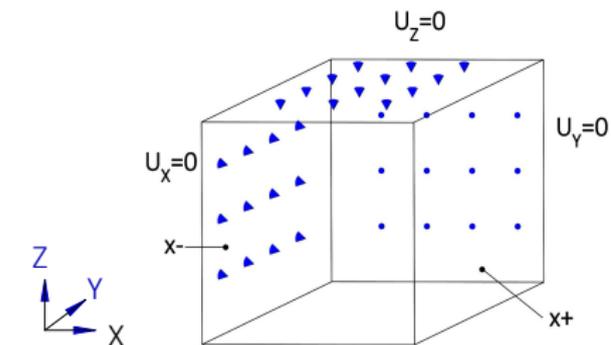
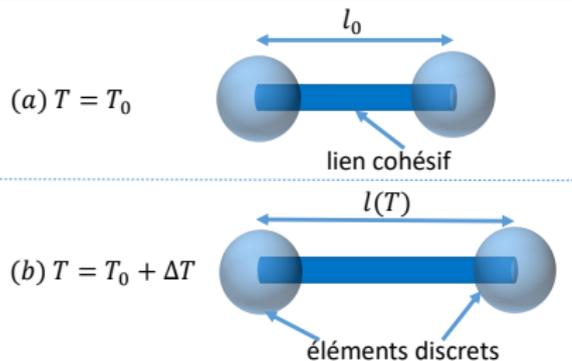
Démarche scientifique



Démarche scientifique

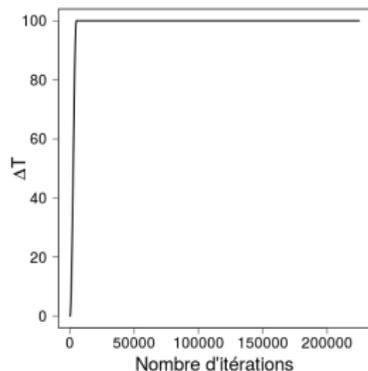


Modèle de dilatation thermique

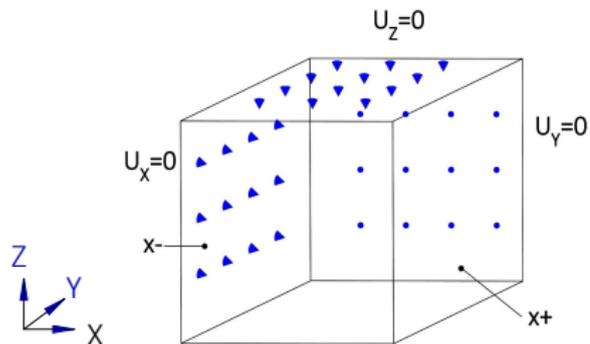
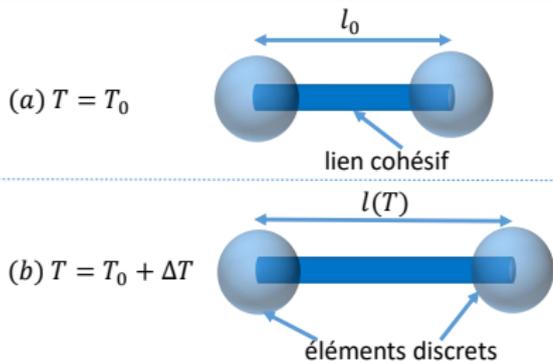


$$l(T) = l_0(1 + \alpha_\mu \times \Delta T)$$

$$\alpha_\mu = 2.25 \times 10^{-5} K^{-1}$$

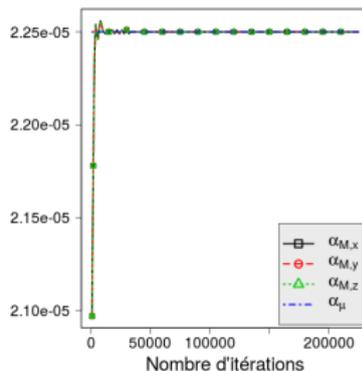
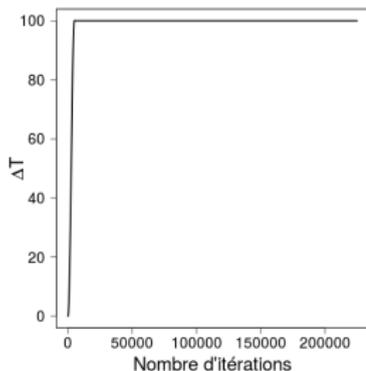


Modèle de dilatation thermique



$$l(T) = l_0(1 + \alpha_\mu \times \Delta T)$$

$$\alpha_\mu = 2.25 \times 10^{-5} K^{-1}$$



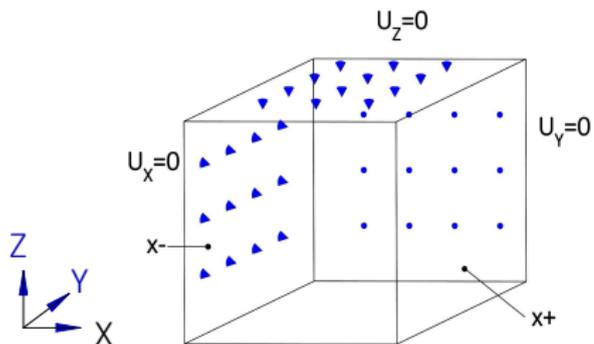
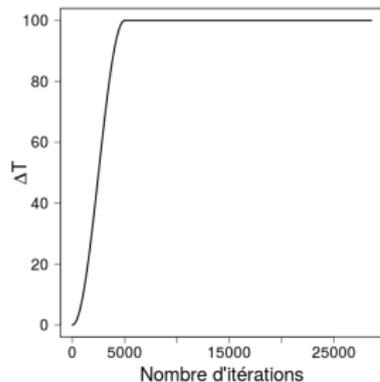
Comparaison MED vs MEF

Échantillon de silice

$$E_M = 72 \text{ GPa}$$

$$\nu_M = 0.16$$

$$\alpha = 2.25 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$$



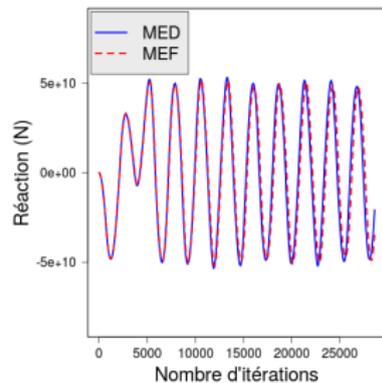
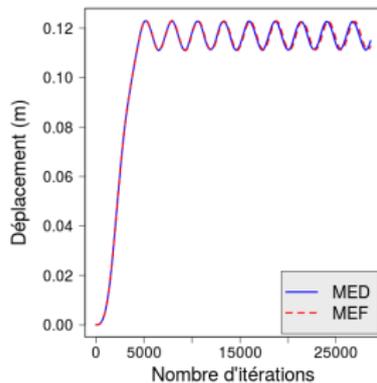
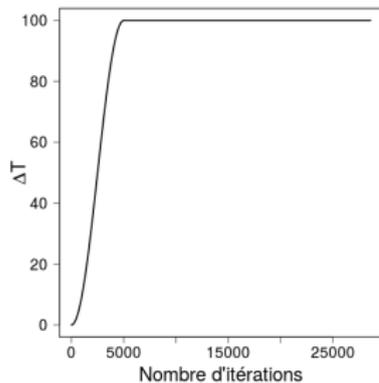
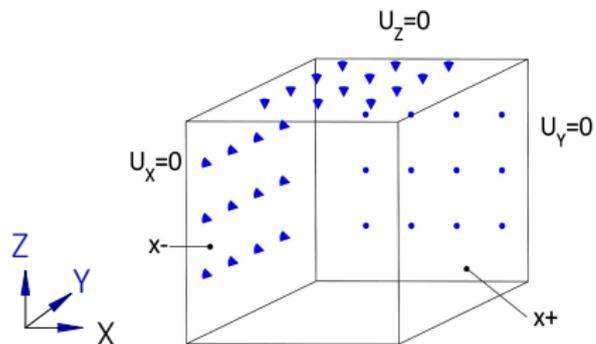
Comparaison MED vs MEF

Échantillon de silice

$$E_M = 72 \text{ GPa}$$

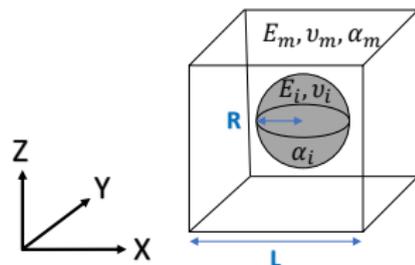
$$\nu_M = 0.16$$

$$\alpha = 2.25 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$$



Milieu hétérogène

- Matrice d'alumine:
 $E_m=350$ GPa, $\nu_m=0.22$
- Inclusion métallique:
 $E_i=69$ GPa, $\nu_i=0.28$



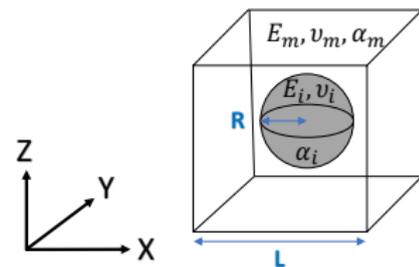
Milieu hétérogène

- Matrice d'alumine:

$$E_m = 350 \text{ GPa}, \nu_m = 0.22$$

Inclusion métallique:

$$E_i = 69 \text{ GPa}, \nu_i = 0.28$$

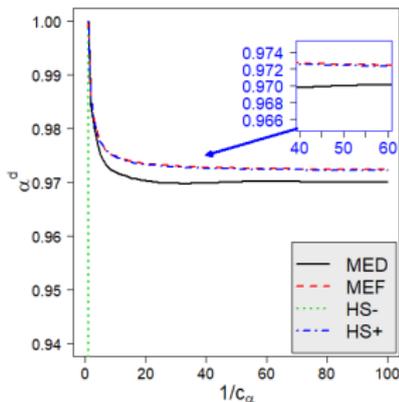


- Coefficient de dilatation thermique effectif:

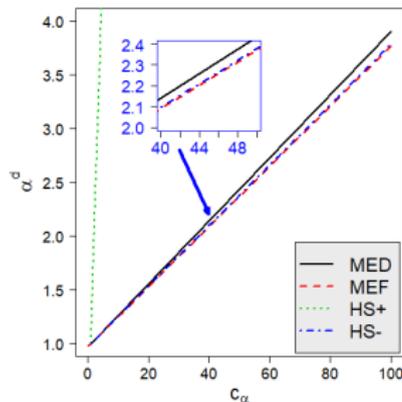
$$\alpha^d = \frac{\alpha_e}{\alpha_m}$$

$$c_\alpha = \frac{\alpha_i}{\alpha_m}$$

$$c_\alpha < 1$$



$$c_\alpha > 1$$

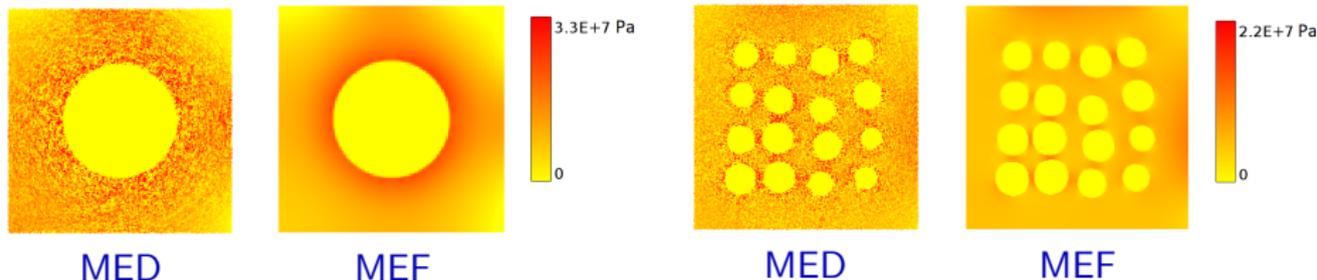


Champs de contraintes

contraste= 3 $\Rightarrow \alpha_m = 7.5 \times 10^{-6} K^{-1}$, $\alpha_i = 2.25 \times 10^{-5} K^{-1}$

$\rightarrow \Delta T = 10$ K

Champs de contraintes hydrostatiques



Formule donnée par Zhou ^{1, 2} pour calculer le tenseur des contraintes

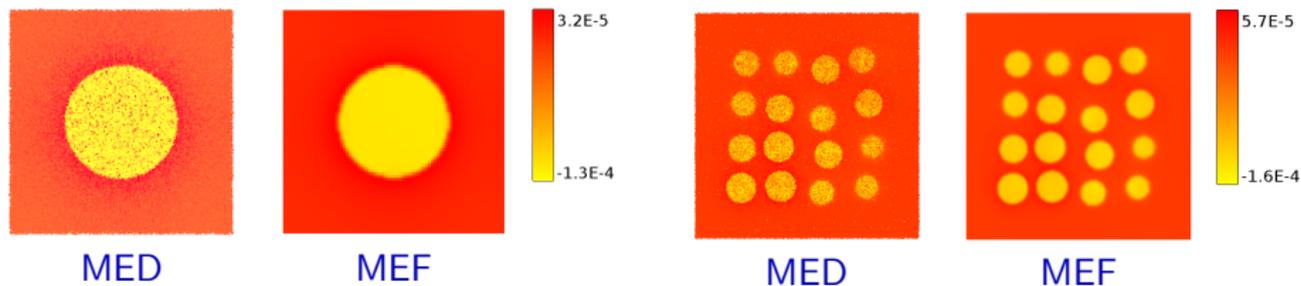
$$\bar{\sigma}^i = \frac{1}{2\Omega_i} \left(\frac{1}{2} \sum_{j \in Z_i} r_{ij} \otimes f_{ij} + f_{ij} \otimes r_{ij} \right)$$

¹ Zhou. Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2003

² Jebahi et al. Journal of Non-Crystalline Solids, 2013

Champs de déformations

Champs de déformations

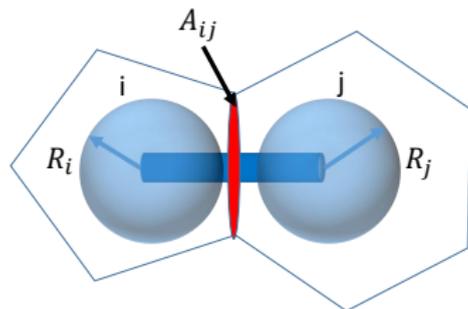


Formule proposée par Leclerc et al. ³ pour calculer le tenseur des déformations

$$\bar{\epsilon}^i = \frac{1}{2\Omega_i} \sum_{j \in Z_i} A_{ij} n_{ij} \otimes \Delta_{ij}$$

³Leclerc et al. On a discrete element method to simulate thermal-induced damage in 2D composite materials. Computers & Structures, 196:277 – 291, 2018

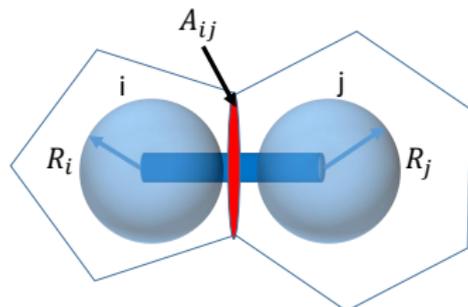
Surface de représentation



- * Corréler A_{ij} à un paramètre C_t et une surface $S_{ij} = \pi R_{moy}^2$

$$A_{ij} = S_{ij} C_t$$

Surface de représentation

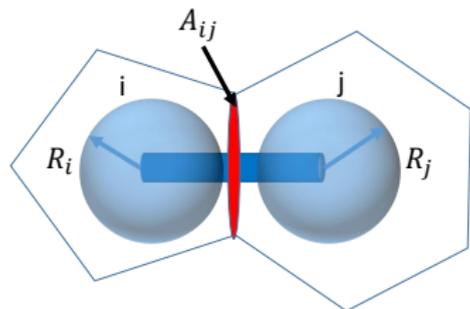


- * Corréler A_{ij} à un paramètre C_t et une surface $S_{ij} = \pi R_{moy}^2$

$$A_{ij} = S_{ij} C_t$$

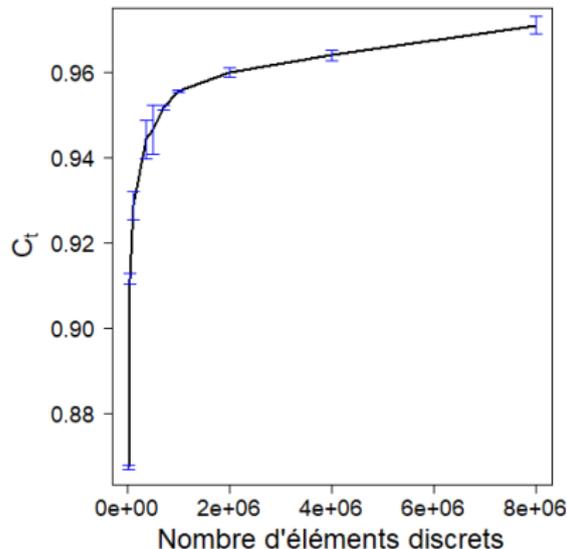
- * C_t est **calibré** afin d'obtenir une égalité entre la déformation **calculée à l'échelle de l'échantillon** et celle **obtenue par les contributions des contacts**

Surface de représentation



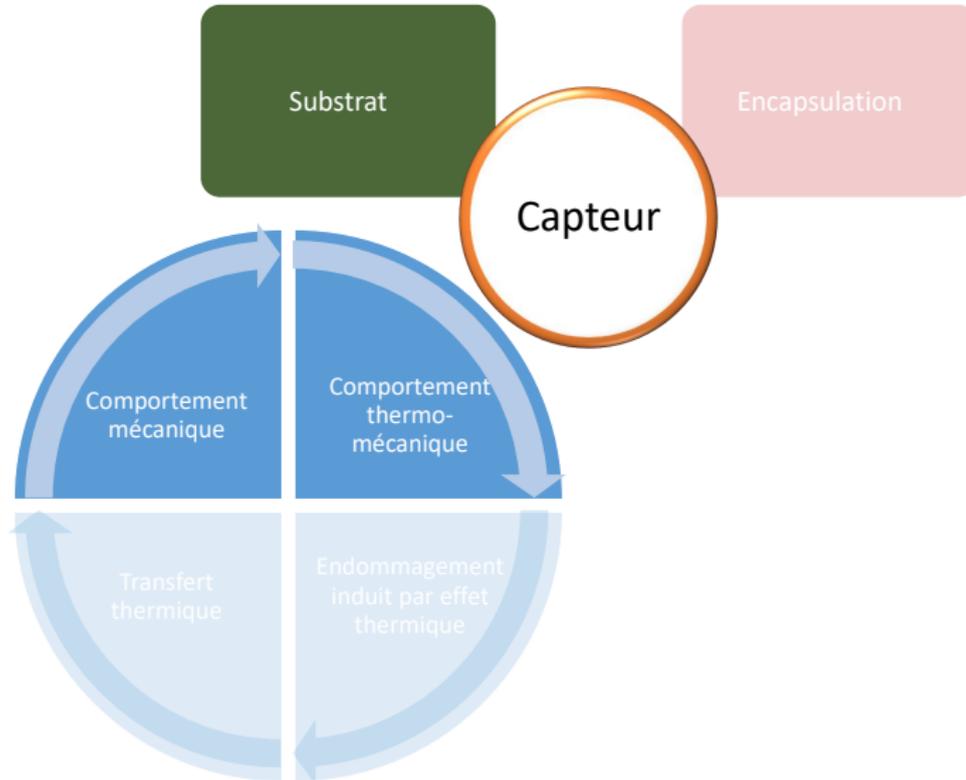
- * Corréler A_{ij} à un paramètre C_t et une surface $S_{ij} = \pi R_{moy}^2$

$$A_{ij} = S_{ij} C_t$$

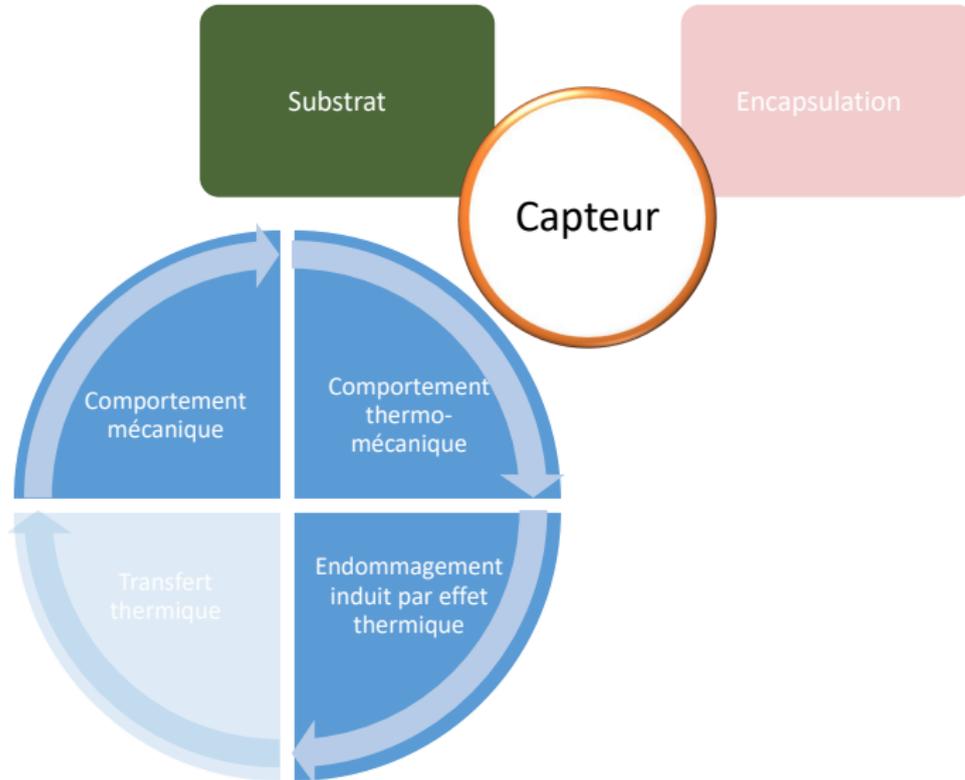


- * C_t est **calibré** afin d'obtenir une égalité entre la déformation **calculée à l'échelle de l'échantillon** et celle **obtenue par les contributions des contacts**

Démarche scientifique



Démarche scientifique



Fissuration

Le critère de rupture RDEF⁴ (Removed Discrete Element Failure) est introduit

$$\sigma_{hydro} > 200MPa \rightarrow \text{particule exclue}$$

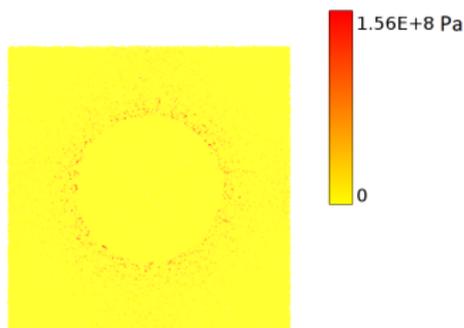
⁴ André et al. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2017

Fissuration

Le critère de rupture RDEF (Removed Discrete Element Failure) est introduit

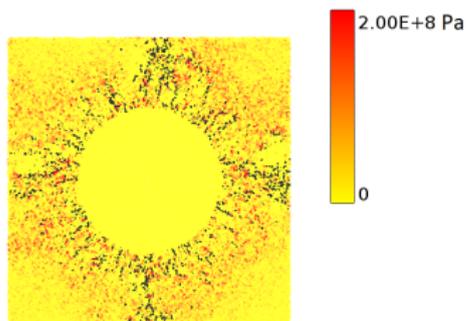
$$\sigma_{hydro} > 200MPa \rightarrow \text{particule exclue}$$

Chargement thermique linéaire $\Delta T > 0$



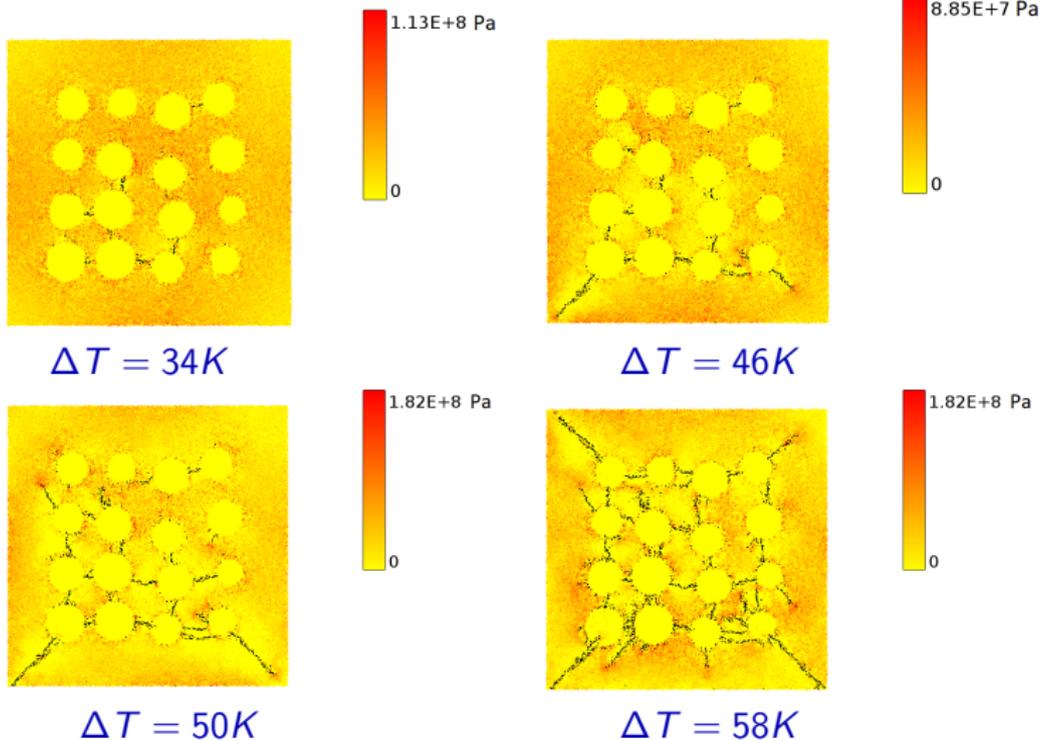
$$\Delta T = 28K$$

⇒ La fissuration se propage radialement, ce qui est en accord avec les attentes théoriques



$$\Delta T = 112K$$

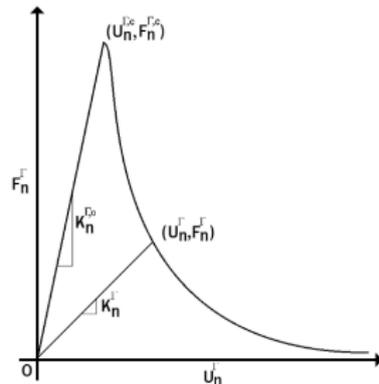
Application au cadre du milieu hétérogène multi-inclusion



Endommagement interfacial

DDZM⁴ (Discrete Damage Zone Model)

Deux éléments discrets appartenant à deux phases différentes sont reliés par des ressorts

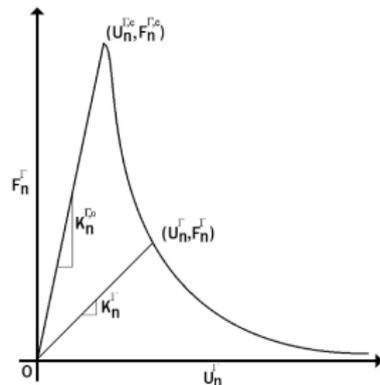


⁴Liu et al. Engineering Fracture Mechanics, 2012

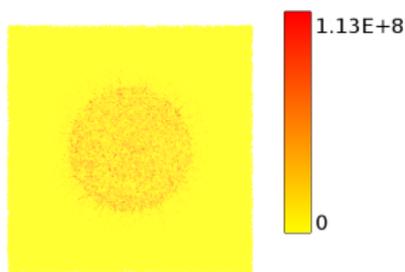
Endommagement interfacial

DDZM (Discrete Damage Zone Model)

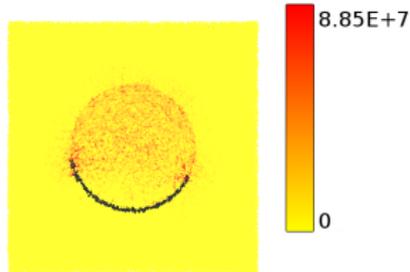
Deux éléments discrets appartenant à deux phases différentes sont reliés par des ressorts



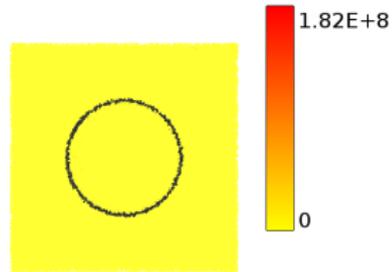
Chargement thermique linéaire $\Delta T < 0$



$\Delta T = -9,5$



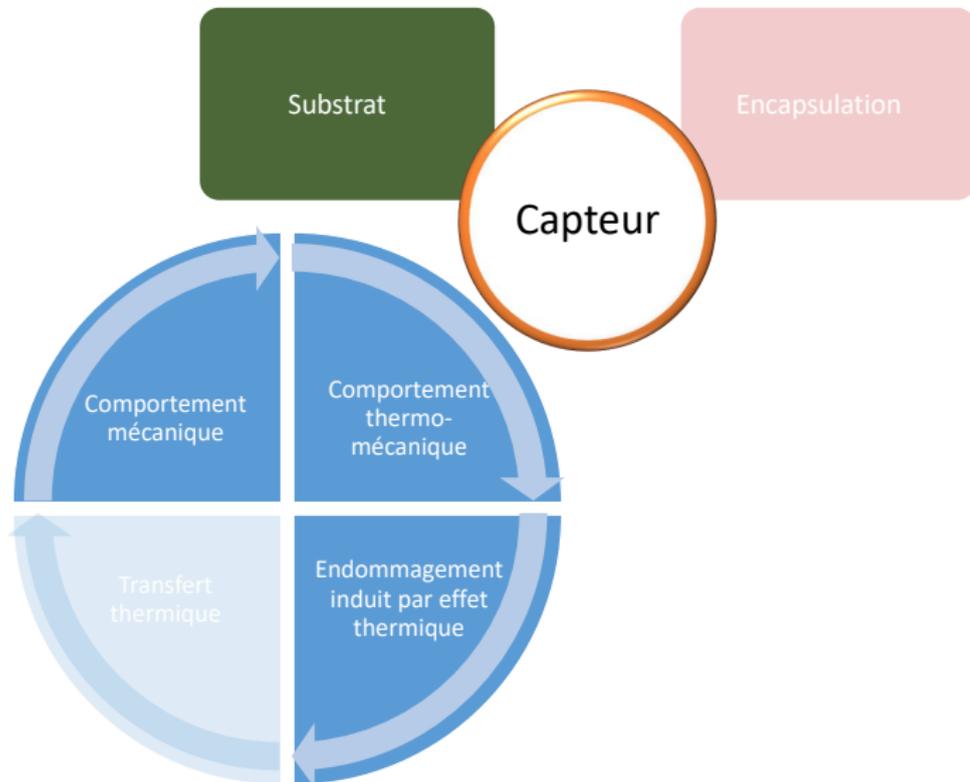
$\Delta T = -17,5$



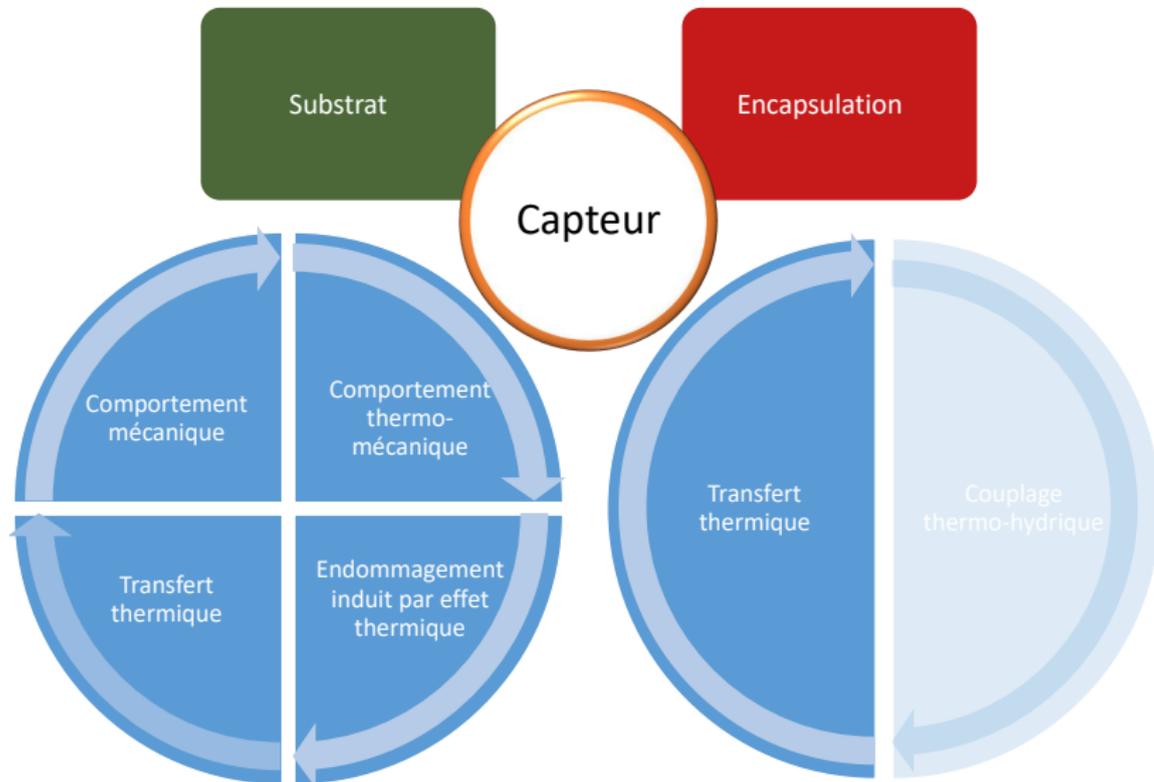
$\Delta T = -35$

\Rightarrow L'inclusion est totalement désolidarisée

Démarche scientifique



Démarche scientifique



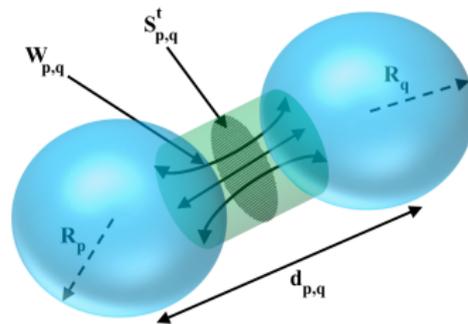
Transfert thermique par conduction

- Flux de chaleur

$$W_{p,q} = H_c^{p,q}(T_q - T_p)$$

- Coefficient de conductivité thermique

$$H_c^{p,q} = \frac{\lambda S_{p,q}^t}{d_{p,q}}$$



Transfert thermique par conduction
à l'échelle d'un contact

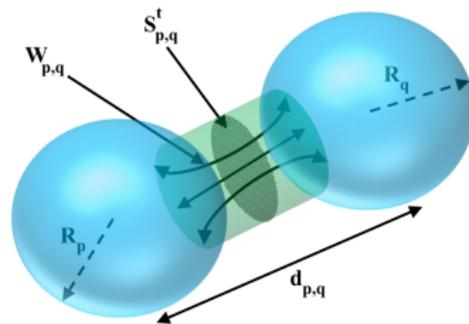
Transfert thermique par conduction

- Flux de chaleur

$$W_{p,q} = H_C^{p,q}(T_q - T_p)$$

- Coefficient de conductivité thermique

$$H_C^{p,q} = \frac{\lambda S_{p,q}^t}{d_{p,q}}$$



Transfert thermique par conduction
à l'échelle d'un contact

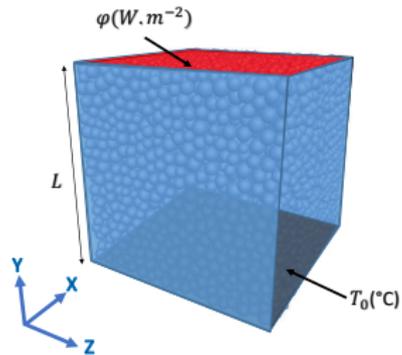
- Discrétisation temporelle

$$T_p^{t+\Delta t} = T_p^t + \frac{\phi \Delta t}{\rho_c C_p V_p} \underbrace{\left[Q_p + \sum_{q=1}^{n_p} \frac{\lambda S_{p,q}^t}{d_{p,q}} (T_q^t - T_p^t) \right]}_{Q_p^{tot}}$$

Calibration de la surface de transmission de chaleur

- Corrélation de $S_{p,q}^t$ à un paramètre adimensionnel C_t

$$S_{p,q}^t = C_t \pi R_m^2$$



Calibration de la surface de transmission de chaleur

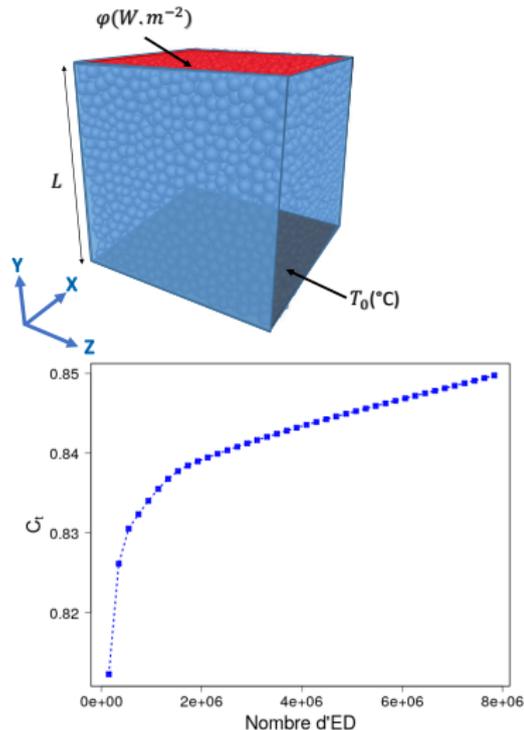
- Corrélation de $S_{p,q}^t$ à un paramètre adimensionnel C_t

$$S_{p,q}^t = C_t \pi R_m^2$$

- Hypothèse : égalité entre la conductivité macroscopique et celle considérée à l'échelle du contact

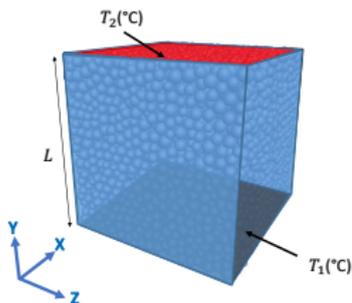
- Identification numérique de λ^{macro} :

$$\lambda^{macro} = \frac{\varphi L}{\Delta T}$$



Validation du modèle numérique

- Propriétés du matériau
- Cas d'un gradient de température imposé



ρ_c	7.800	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
λ	33	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$
C_p	0,9	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\text{K}^{-1}$

$$T_0=25\text{ }^{\circ}\text{C}$$

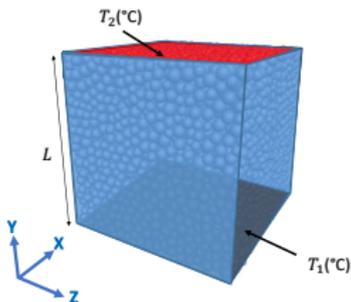
$$T_1=25\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_2=35\text{ }^{\circ}\text{C}$$

Validation du modèle numérique

- Propriétés du matériau

- Cas d'un gradient de température imposé



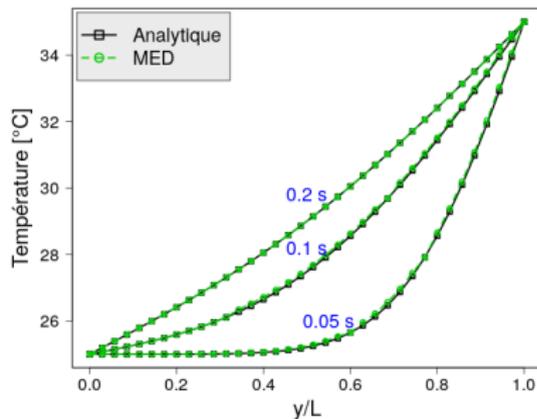
- MED vs Solution analytique

ρ_c	7.800	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
λ	33	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$
C_p	0,9	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\text{K}^{-1}$

$$T_0 = 25^{\circ}\text{C}$$

$$T_1 = 25^{\circ}\text{C}$$

$$T_2 = 35^{\circ}\text{C}$$



Détermination de la densité de flux thermique

Évaluation du champ de densité de flux

$$\varphi_p^i = \frac{\phi}{2V_p} \sum_{q \in Z_p} \underbrace{[\lambda S_{p,q}^t (T_q - T_p)]}_{\phi_{p,q}} e_{p,q}^i$$

- V_p volume de la particule p
- Z_p l'ensemble de particules liées à la particule p
- $e_{p,q}^i$ composante du vecteur normal inter-particulaire correspondant à la direction i

Détermination de la densité de flux thermique

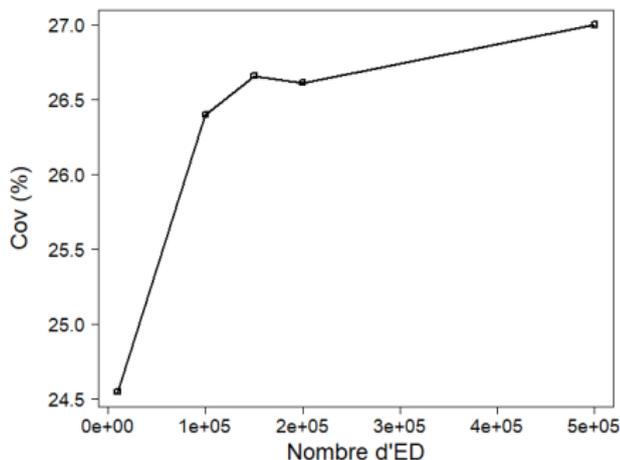
Évaluation du champ de densité de flux

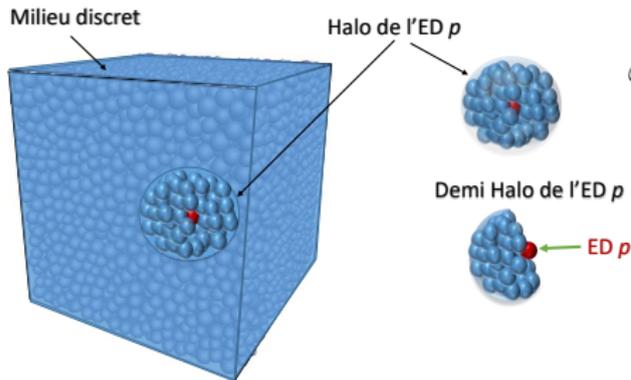
$$\varphi_p^i = \frac{\phi}{2V_p} \sum_{q \in Z_p} \underbrace{[\lambda S_{p,q}^t (T_q - T_p)]}_{\phi_{p,q}} e_{p,q}^i$$

Niveau de dispersion dans le cas d'un milieu homogène

- V_p volume de la particule p
- Z_p l'ensemble de particules liées à la particule p
- $e_{p,q}^i$ composante du vecteur normal inter-particulaire correspondant à la direction i

$$\text{CoV} = \frac{\text{ecart-type } \sigma}{\text{moyenne } \mu}$$



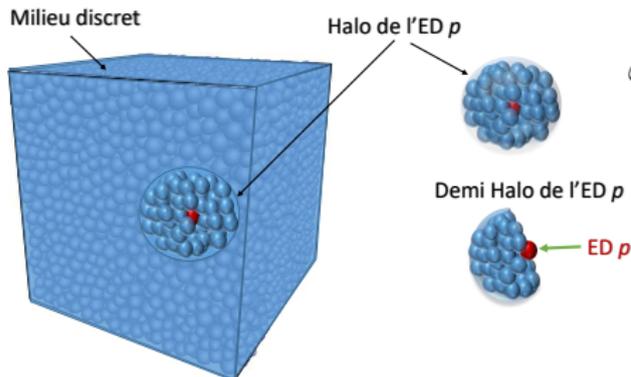
Présentation de la méthode halo ⁴

$$\varphi_p^i = \frac{1}{2\Omega_H} \sum_{r \in \Omega_H} \sum_{q \in Z_r} \varphi_{r,q} e_{r,q}^i$$

$$\Omega_H = \frac{1}{\phi} \sum_{r \in \Omega_H} V_r$$

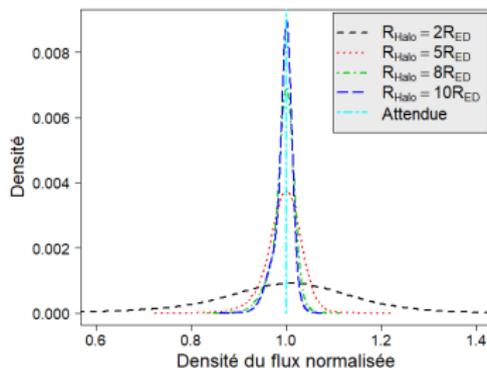
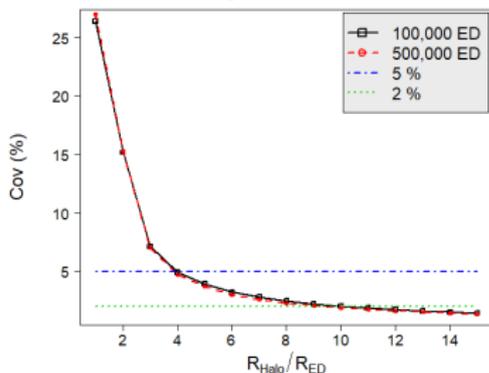
⁴ Moukadiri et al. Halo approach to evaluate the stress distribution in 3D discrete element method simulation : Validation and application to flax/bio based epoxy composite. 2019. ▼

Présentation de la méthode halo

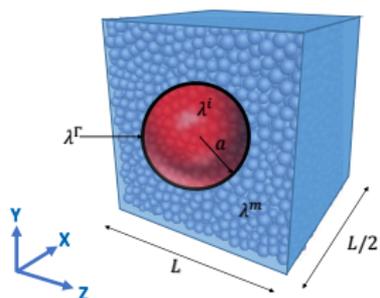


$$\varphi_p^i = \frac{1}{2\Omega_H} \sum_{r \in \Omega_H} \sum_{q \in Z_r} \varphi_{r,q} e_{r,q}^i$$

$$\Omega_H = \frac{1}{\phi} \sum_{r \in \Omega_H} V_r$$



Validation dans le cas d'un milieu hétérogène

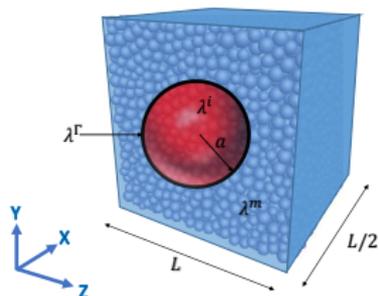


inclusion sphérique

$$a = \frac{L}{3} \implies f_v = 15,5\%$$

$$c_\lambda = \frac{\lambda^i}{\lambda^m}$$

Validation dans le cas d'un milieu hétérogène

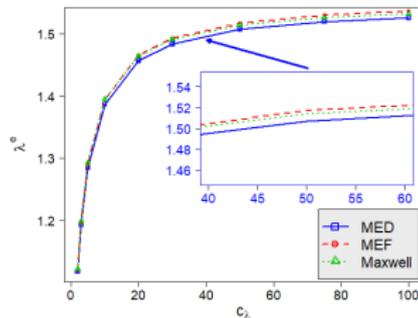
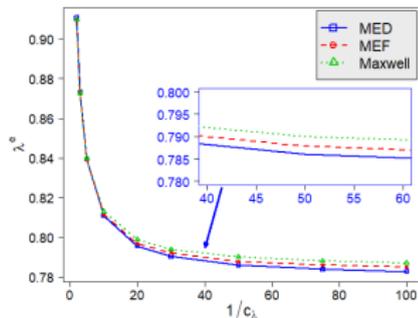


inclusion sphérique

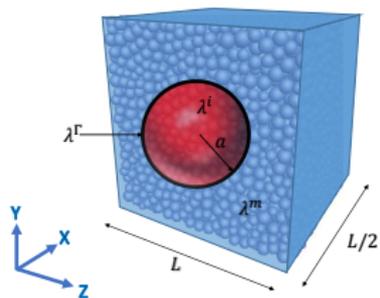
$$a = \frac{L}{3} \implies f_v = 15,5\%$$

$$c_\lambda = \frac{\lambda^i}{\lambda^m}$$

► Influence de c_λ sur CTE



Validation dans le cas d'un milieu hétérogène

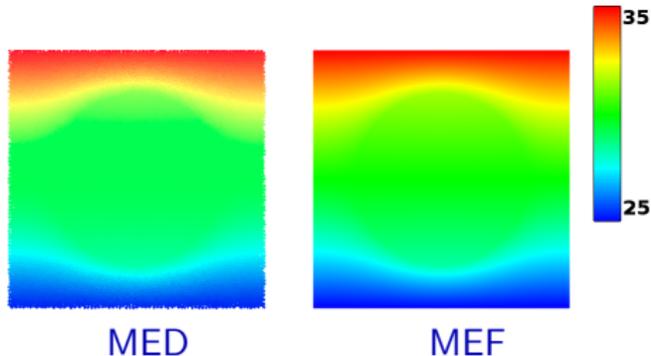


inclusion sphérique

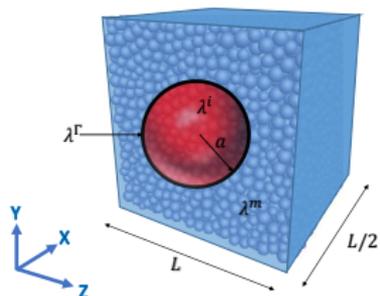
$$a = \frac{L}{3} \implies f_v = 15,5\%$$

$$c_\lambda = \frac{\lambda^i}{\lambda^m} \quad \boxed{c_\lambda = 5}$$

► Champs de température (°C)



Validation dans le cas d'un milieu hétérogène

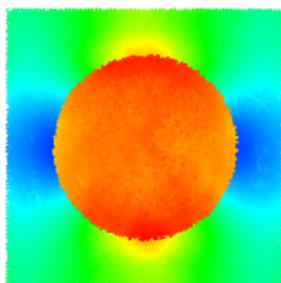


inclusion sphérique

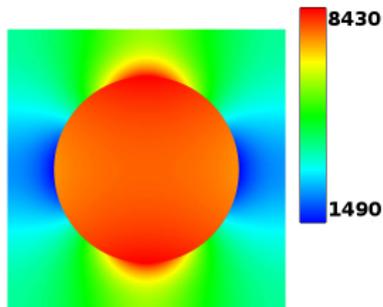
$$a = \frac{L}{3} \implies f_v = 15,5\%$$

$$c_\lambda = \frac{\lambda^i}{\lambda^m} \quad \boxed{c_\lambda = 5}$$

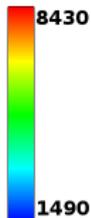
► Densité de flux
thermique (W/m^2)



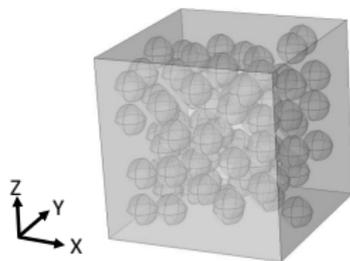
MED



MEF

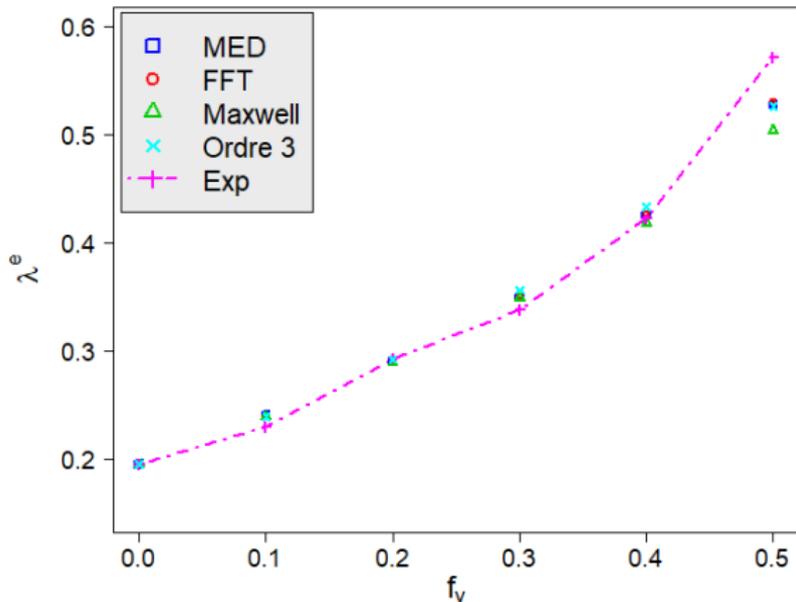


Application au cas d'un matériau époxy/silice



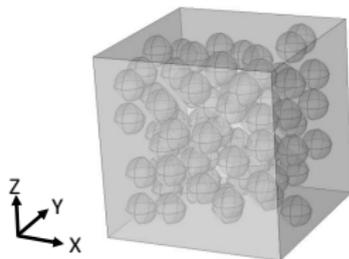
$$c_{\lambda} = \frac{\lambda^i}{\lambda^m} = 7,7$$

$$f_v \in [0\%-50\%]$$

► CTE ⁴

⁴Wong et al. Journal of Applied Polymer Science, 1999

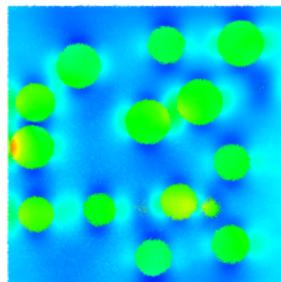
Application au cas d'un matériau époxy/silice



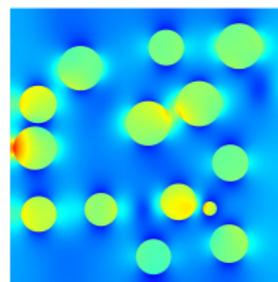
$$c_\lambda = \frac{\lambda^i}{\lambda^m} = 7,7$$

$$f_v \in [0\%-50\%] \quad f_v = 20\%$$

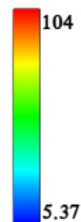
► Densité de flux thermique (W/m^2)



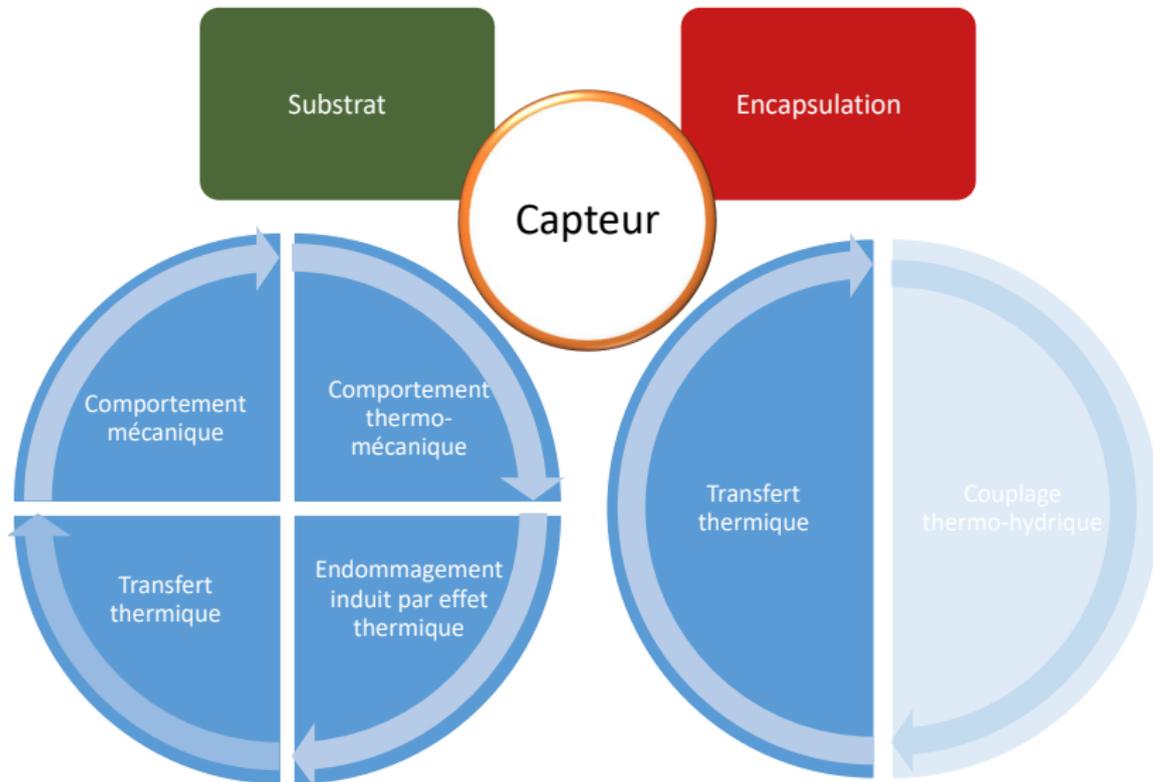
MED



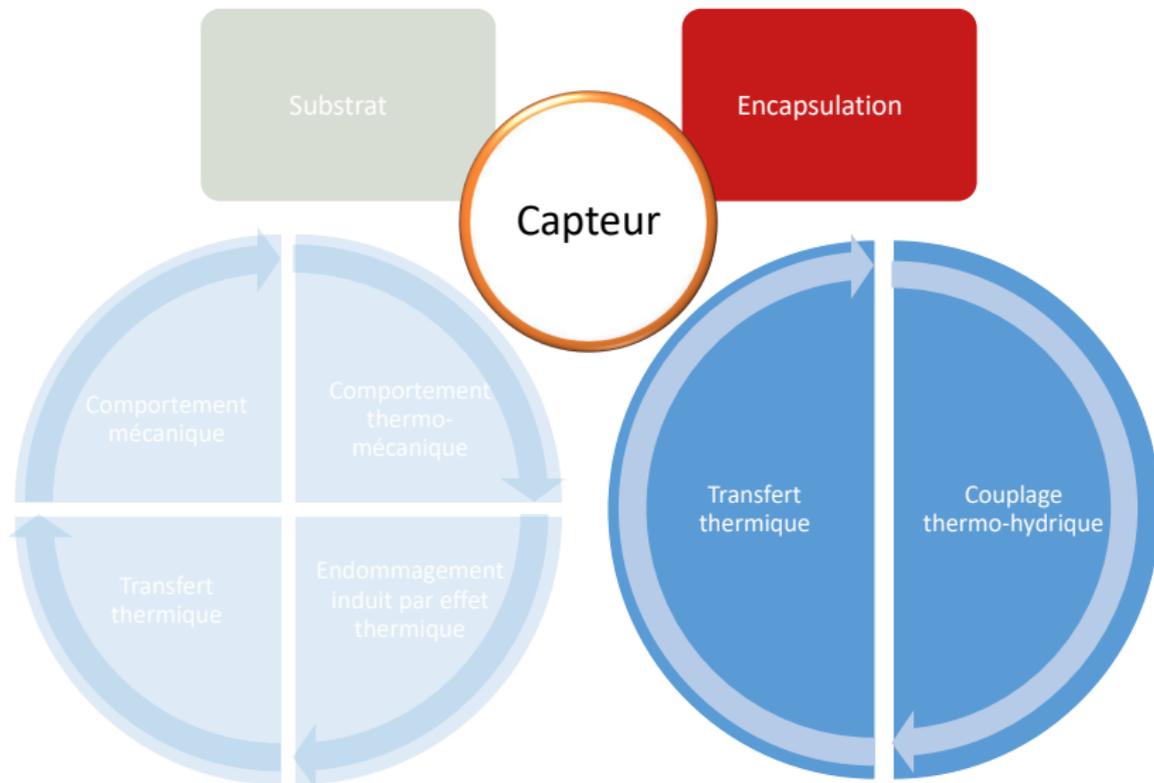
MEF



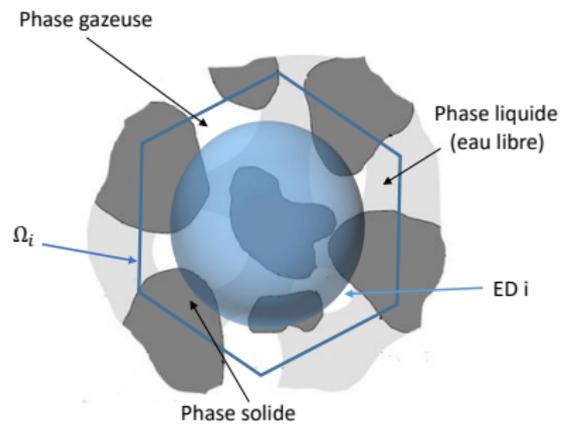
Démarche scientifique



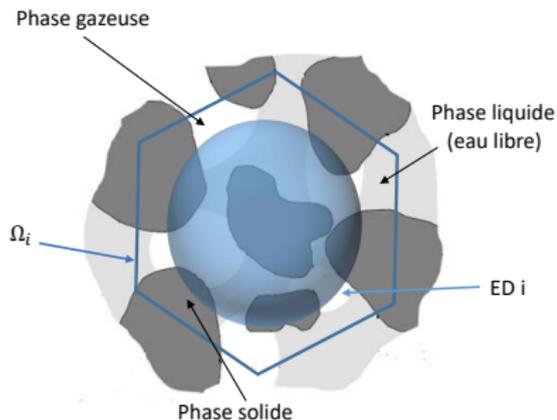
Démarche scientifique



Paramètres du milieu effectif



Paramètres du milieu effectif



Propriétés effectives associées à l'ED i :

- $\rho_i^t \approx \rho_s(1 - p) + C_i^t M_w$
- $\lambda_i^t \approx \lambda_s(1 - p)$
- $Cp_i^t \approx Cp_s \frac{\rho_s(1-p)}{\rho_i^t} + Cp_w \frac{C_i^t M_w}{\rho_i^t}$
- $X_i^t = \frac{C_i^t M_w}{(1-p)\rho_s}$

Modèle discret de transfert de masse

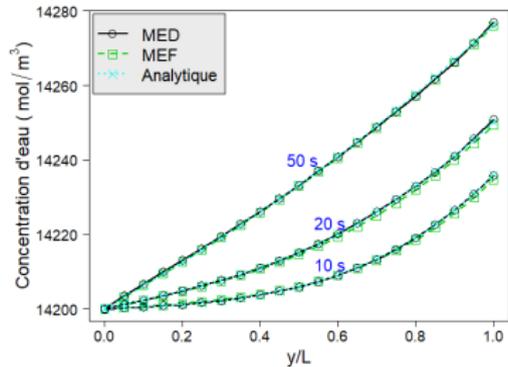
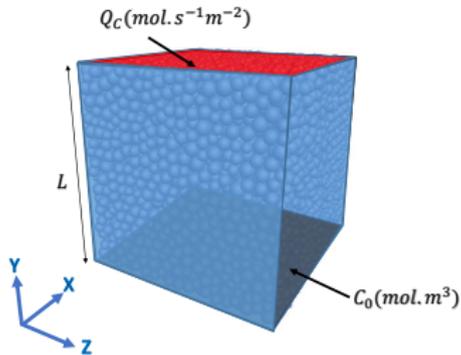
- Discrétisation temporelle

$$C_i^{t+\Delta t} = C_i^t + \frac{\phi \Delta t}{V_i} \underbrace{\left[Q_C + \sum_{j=1}^{n_i} \frac{S_{i,j}^t D_w}{d_{i,j}} (C_j^t - C_i^t) \right]}_{Q_C^{\text{tot}}}$$

Modèle discret de transfert de masse

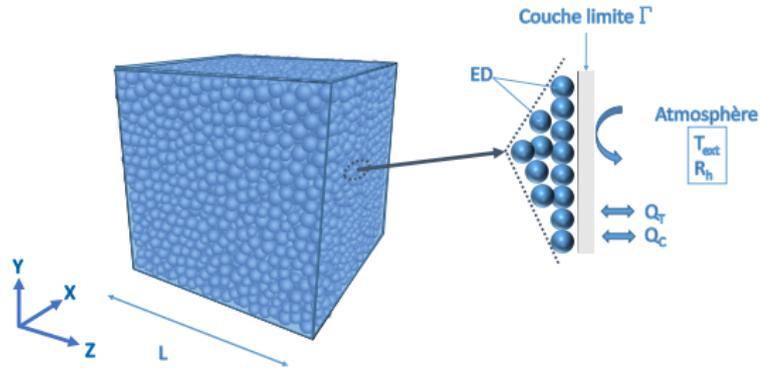
- Discrétisation temporelle

$$C_i^{t+\Delta t} = C_i^t + \frac{\phi \Delta t}{V_i} \underbrace{\left[Q_C + \sum_{j=1}^{n_i} \frac{S_{i,j}^t D_w}{d_{i,j}} (C_j^t - C_i^t) \right]}_{Q_C^{tot}}$$



Modèle de couplage entre transferts de chaleur et de masse

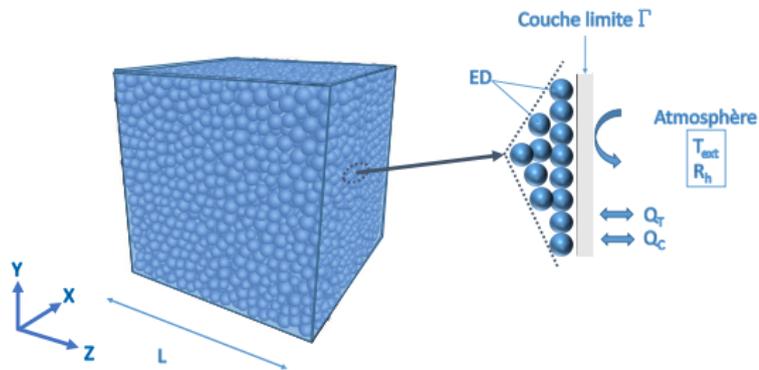
Couche limite Γ est considérée



- * Transfert de masse $Q_C = k(C_{ext} - C_{lim})$
- * Transfert de chaleur $Q_T = h(T_{ext} - T_s) + D_w L_w M_w \nabla C$
- * Facteur de Lewis $Le_f = \frac{h}{k\rho_a C_p a}$

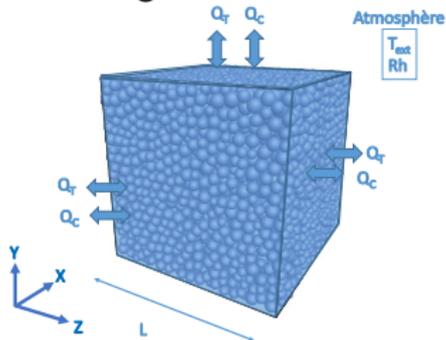
Modèle de couplage entre transferts de chaleur et de masse

Couche limite Γ est considérée



- * Transfert de masse $Q_C = k(C_{ext} - C_{lim})$
- * Transfert de chaleur $Q_T = h(T_{ext} - T_s) + D_w L_w M_w \nabla C$
- * Facteur de Lewis $Le_f = \frac{h}{k \rho_a C_{p_a}}$
- * Activité de l'eau : Formalisme simplifié d'Oswin $a_w = \left[1 + \left(\frac{A}{X} \right)^B \right]^{-1}$

- * Échanges avec l'extérieur par toutes les faces ⁴



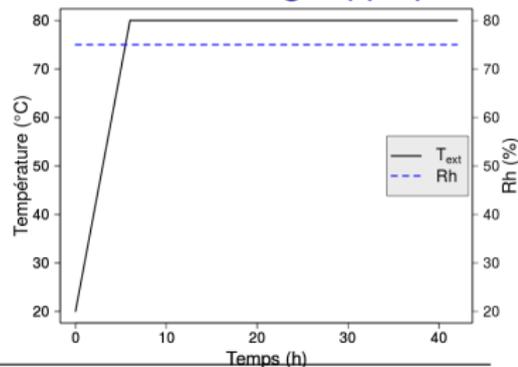
$$\rho_s = 3\,580 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$\lambda_s = 7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

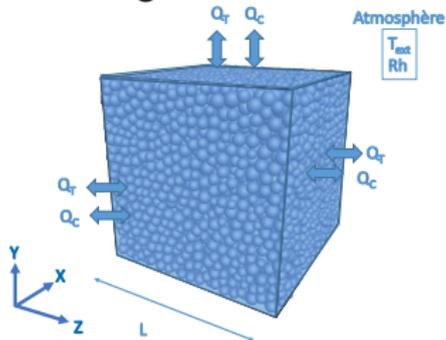
$$Cp_s = 830 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$\rho = 60\%$$

- * Conditions de séchage appliquées



⁴L. Lallemand et al. Modeling of the green body drying step to obtain large size transparent magnesium-aluminate spinel samples. Journal of the European Ceramic Society, 2014

* Échanges avec l'extérieur par toutes les faces ⁴

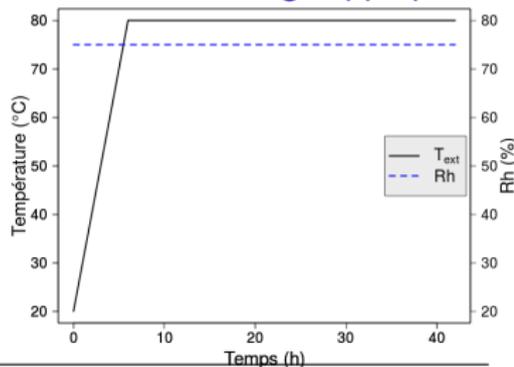
$$\rho_s = 3\,580 \text{ kg.m}^{-3}$$

$$\lambda_s = 7 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$$

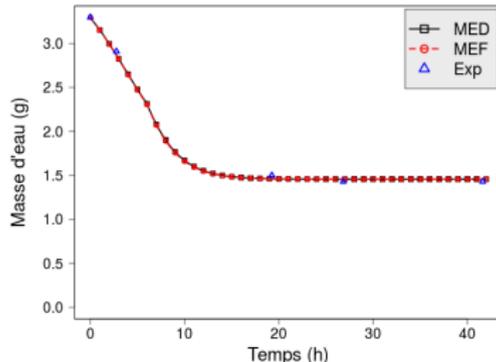
$$Cp_s = 830 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$$

$$\rho = 60\%$$

* Conditions de séchage appliquées



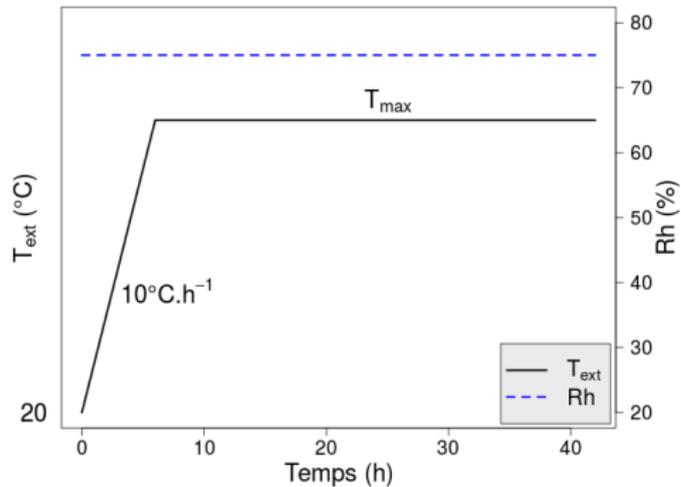
* Variation de la masse d'eau



⁴ L. Lallemand et al. Modeling of the green body drying step to obtain large size transparent magnesium-aluminate spinel samples. Journal of the European Ceramic Society, 2014

Optimisation du séchage

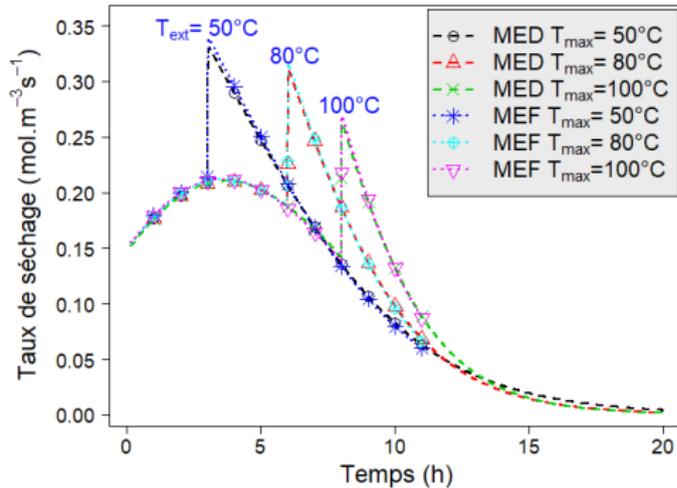
- * Effet du profil de température du four
 - Effet de la température maximale



- Effet de la vitesse d'échauffement

Optimisation du séchage

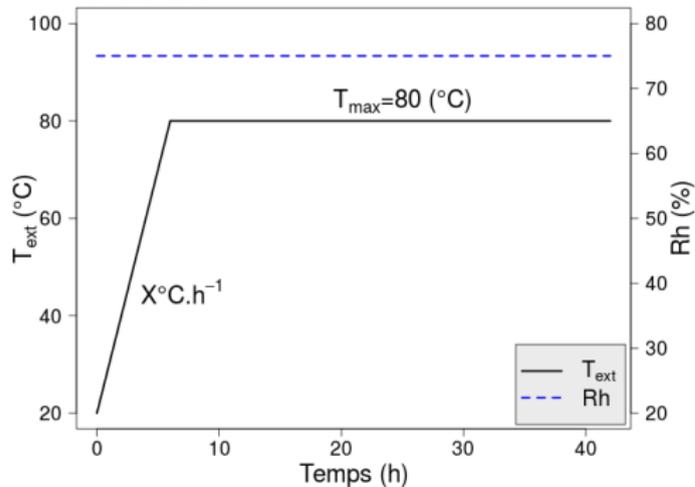
- * Effet du profil de température du four
 - Effet de la température maximale



- Effet de la vitesse d'échauffement

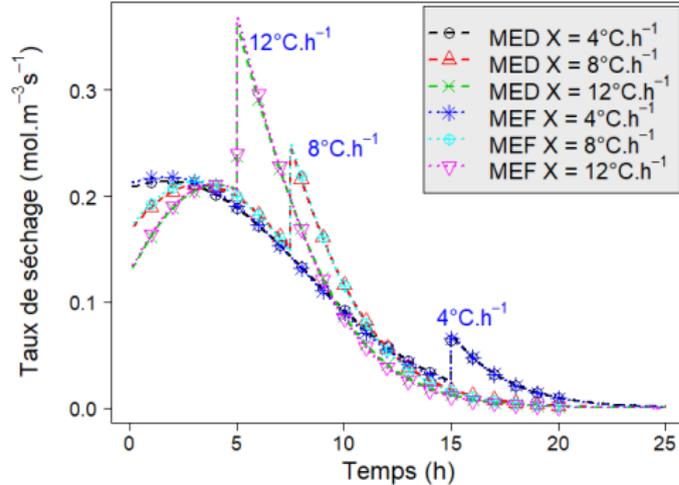
Optimisation du séchage

- * Effet du profil de température du four
 - Effet de la température maximale
 - Effet de la vitesse d'échauffement



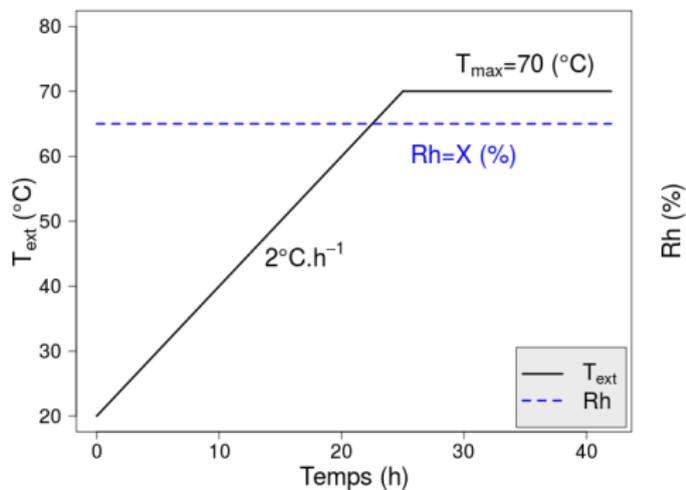
Optimisation du séchage

- * Effet du profil de température du four
 - Effet de la température maximale
 - Effet de la vitesse d'échauffement



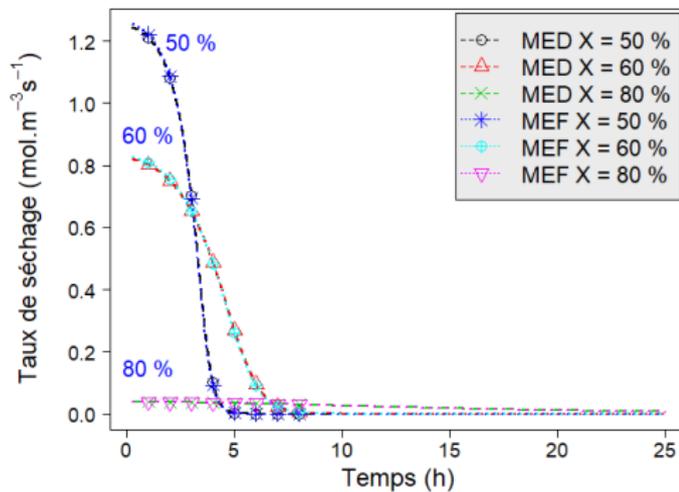
Optimisation du séchage

* Effet de l'humidité relative



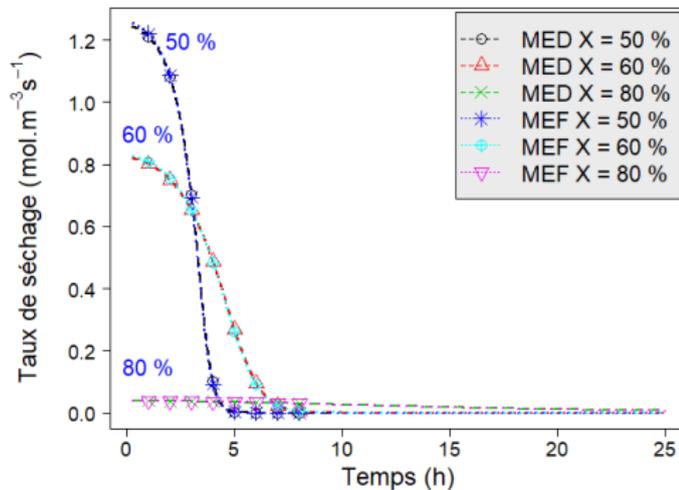
Optimisation du séchage

* Effet de l'humidité relative



Optimisation du séchage

* Effet de l'humidité relative



		$R_h = 50\%$	$R_h = 60\%$	$R_h = 80\%$
m_w (g)	MED	0,148	0,344	2,66
	MEF	0,148	0,344	2,66

Mécanique

- Simulation du comportement thermo-élastique et de l'endommagement induit par effet thermique
- Détermination de surface de contact par un processus de calibration afin de réduire le coût de calcul

Mécanique

- Simulation du comportement thermo-élastique et de l'endommagement induit par effet thermique
- Détermination de surface de contact par un processus de calibration afin de réduire le coût de calcul

Transfert thermique

- Simulation du transfert thermique par conduction dans les milieux continus
- Mise en œuvre de la méthode Halo dans le calcul de la densité de flux thermique

Mécanique

- Simulation du comportement thermo-élastique et de l'endommagement induit par effet thermique
- Détermination de surface de contact par un processus de calibration afin de réduire le coût de calcul

Transfert thermique

- Simulation du transfert thermique par conduction dans les milieux continus
- Mise en œuvre de la méthode Halo dans le calcul de la densité de flux thermique

Couplage thermo-hydrique

- Modélisation du couplage thermo-hydrique dans un milieu poreux
- Optimisation des conditions de séchage via un outil numérique

Perspectives

Couplage thermo-hydrique

- Validation dans le cas d'un milieu hétérogène
- Prise en compte du retrait de l'échantillon étudié

Perspectives

Couplage thermo-hydrique

- Validation dans le cas d'un milieu hétérogène
- Prise en compte du retrait de l'échantillon étudié

Endommagement induit

- Adaptation de la méthode halo à l'initiation et la propagation des fissures
- Adaptation à des effets d'origine thermo-hydrique

Perspectives

Couplage thermo-hydrigue

- Validation dans le cas d'un milieu hétérogène
- Prise en compte du retrait de l'échantillon étudié

Endommagement induit

- Adaptation de la méthode halo à l'initiation et la propagation des fissures
- Adaptation à des effets d'origine thermo-hydrigue

Modèle cohésif de type poutre

- Prise en compte de l'anisotropie et du comportement non-linéaire

Articles dans des revues internationales à comité de lecture

- **G. Alhadj Hassan**, W. Leclerc, C. Pélegris, M. Guessasma, and E. Bellenger. On the suitability of a 3D discrete element method to model the composite damage induced by thermal expansion mismatch. *Computational Particle Mechanics*, 2019.
- **G. Alhadj Hassan**, H. Haddad, W. Leclerc, C. Pélegris, M. Guessasma, and E. Bellenger. Numerical investigation of heat transfer by conduction in composite materials using a based DEM approach. *International Journal of Thermal Sciences*, en révision.

Production scientifique

Articles dans des congrès internationaux à comité de lecture

- **G. AlHajj Hassan**, W. Leclerc, H. Haddad, C. Pégégris, M. Guessasma, E. Bellenger. Towards a discrete element method to predict the thermo-mechanical behavior and the damage of continuous media during a drying process, 8th International Conference on Discrete Element Methods, *DEM 8 proceedings*, 2019.
- **G. Alhajj Hassan**, W. Leclerc, C. Pégégris, M. Guessasma, and E. Bellenger. A Discrete Element approach for Modeling the Thermal-induced Damage in continuous media, the 6th edition of International Conference on Computational Modeling of Fracture and Failure of Materials and Structures (CFRAC 2019), *CFRAC proceedings*, 2019.
- **G. Alhajj Hassan**, S. Humblet, G. Martic, E. Bellenger, W. Leclerc, M. Tandja, M. Guessasma, C. Pelegris, M. Duquennoy, M. Gonon. A Discrete Element Approach for Modeling the 3D Thermal-induced Damage, 13th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XIII), *WCCM proceedings*, 2018.

Articles dans des congrès nationaux à comité de lecture

- **G. Alhajj Hassan**, W. Leclerc, C. Pégégris, M. Guessasma, and E. Bellenger. Simulation du comportement thermo-élastique et de l'endommagement induit par le différentiel de dilatation thermique dans un milieu continu hétérogène par la MED, 14^{ème} colloque national en calcul des structures, *CSMA proceedings*, 2019.
- **G. Alhajj Hassan**, W. Leclerc, C. Pégégris, M. Guessasma, and E. Bellenger. A Discrete Element approach for Modeling the Thermal-induced Damage in continuous media, 24^e Congrès Français de Mécanique (CFM), *CFM proceedings*, 2019.
- **G. Alhajj Hassan**, H. Haddad, D. Moukadiri, W. Leclerc, M. Guessasma. Simulation du transfert thermique par conduction en milieu continu et hétérogène par la méthode des éléments discrets, 24^e Congrès Français de Mécanique (CFM), *CFM proceedings*, 2019.

Merci de votre attention!