



Modélisation de la fermeture des pores aux interfaces des pièces soudées-diffusées

Maxime Huguet (doctorant), Isabelle Moro,

Laurent Briottet, Olivier Gillia

CEA/DRT/LITEN/DTBH/SCPC/LCA



Sommaire

1. Contexte et objectifs

2. Modélisation

Mécanismes physiques à prendre en compte et hypothèses faites
Méthode de résolution et cas tests

3. Exemples d'utilisation

4. Validation sur cavité modèle

5. Conclusions et perspectives



1 ■ Contexte et objectifs

Contexte technologique

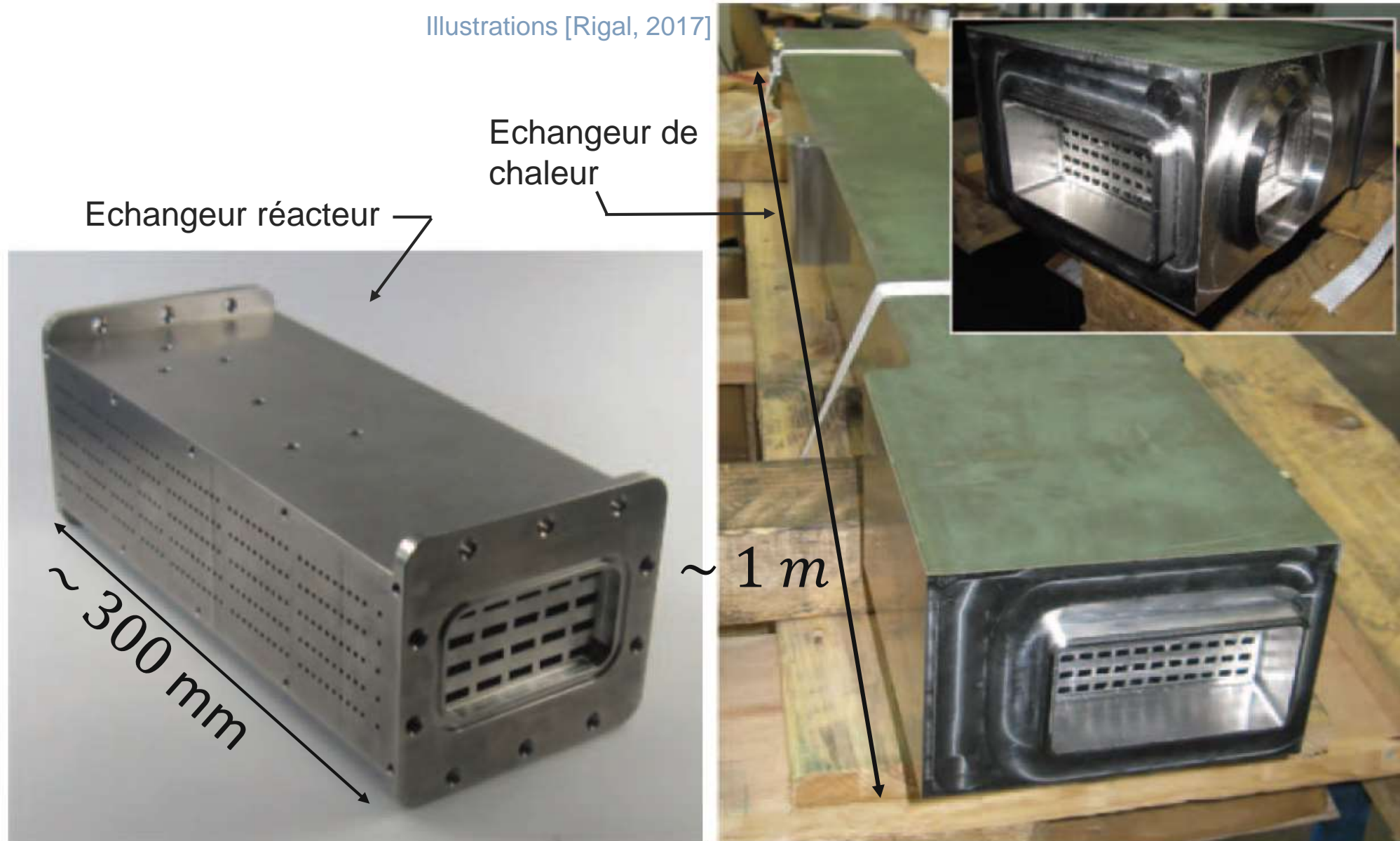
Cavités et soudage diffusion

Objectif du travail

Contexte technologique

Fabrication d'échangeurs compacts par le procédé de **Compression Isostatique à Chaud** (CIC).

Illustrations [Rigal, 2017]



Contexte technologique

Compression Isostatique à Chaud

Canaux usinés dans des plaques

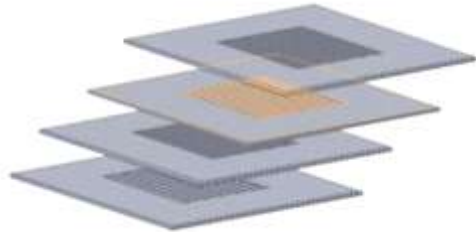
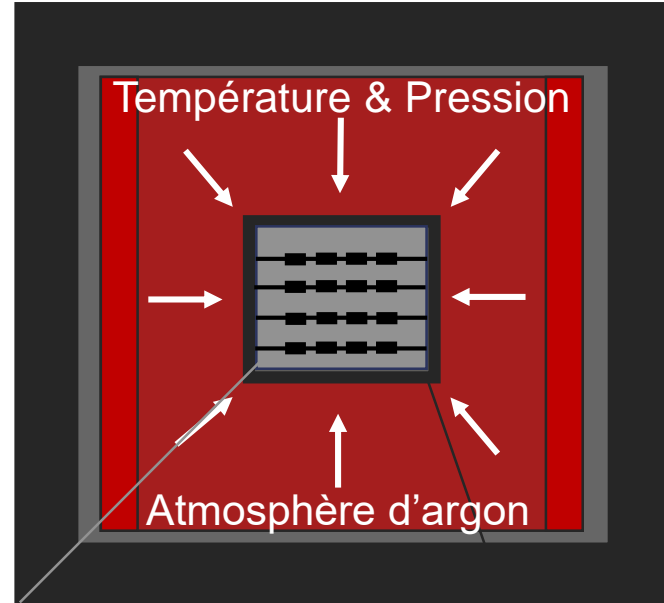


Illustration [Maunay, 2016]



Pièces à souder

Conteneur sous vide

Echangeur de chaleur compact

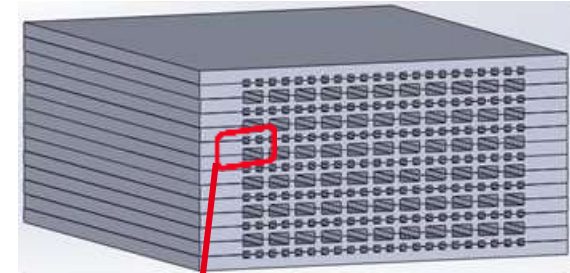
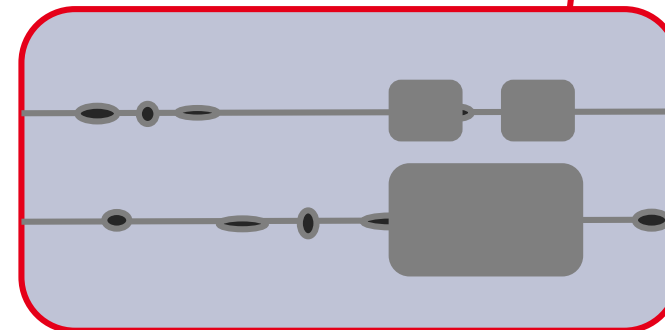
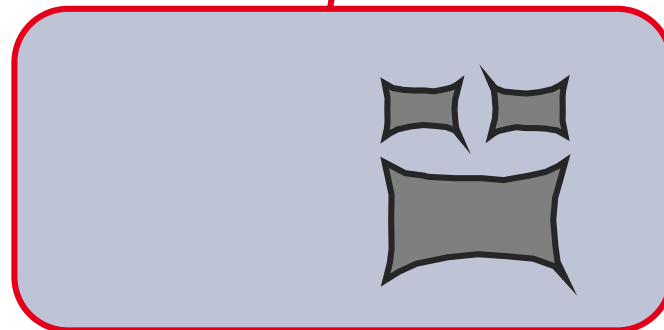


Illustration [Maunay, 2016]

Trop de température,
pression ou temps



Canaux déformés



Pas assez de
température,
pression ou temps

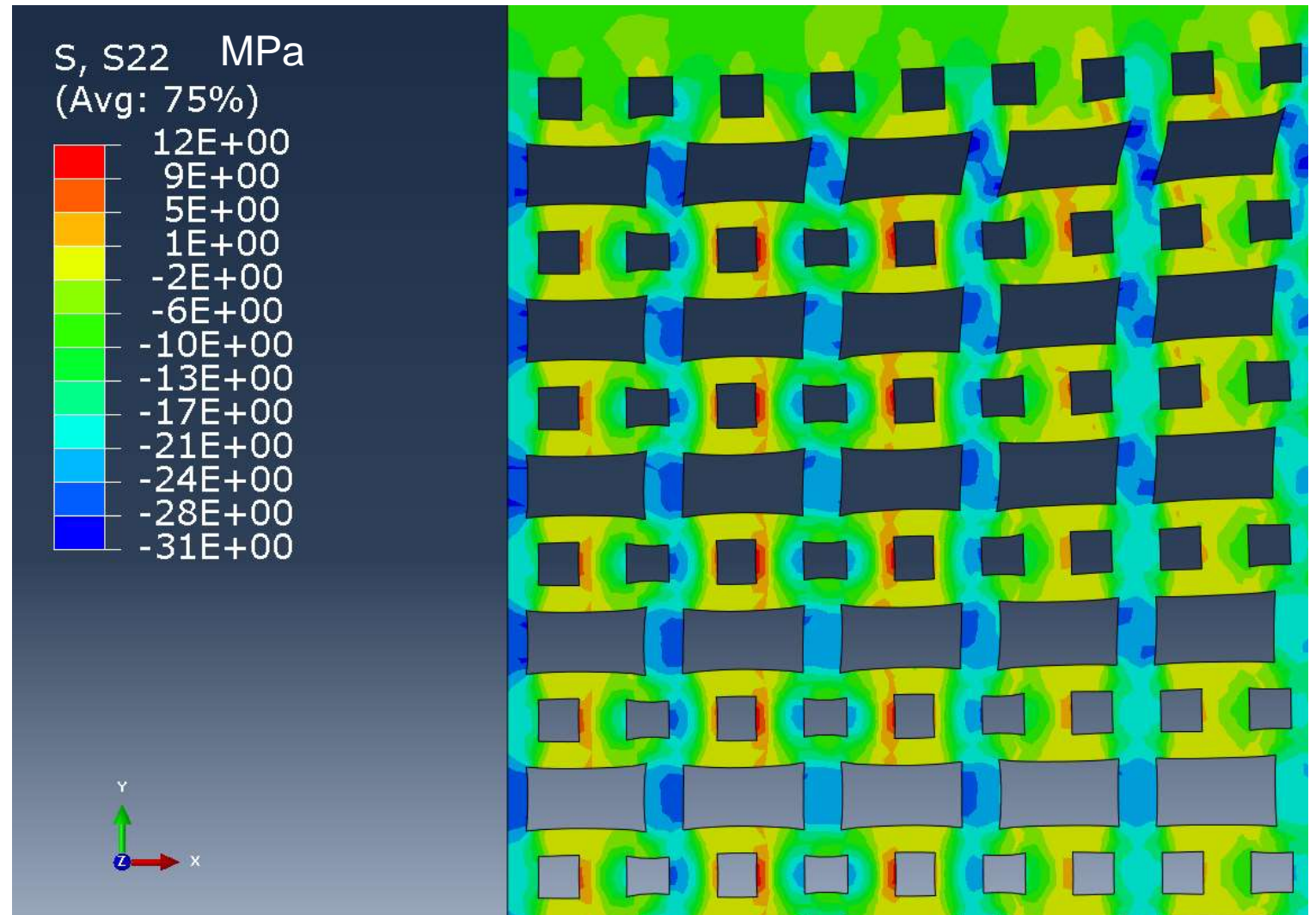


Cavités à l'interface

Objectifs du travail (thèse)

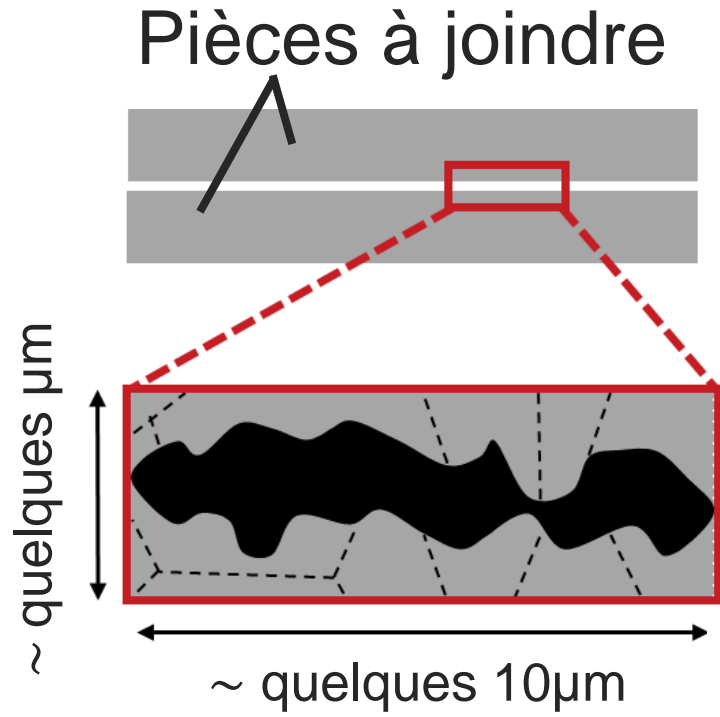
Objectif technologique : Optimisation d'un cycle de CIC pour l'assemblage d'une pièce

- Températures
- Pressions
- Durées
- Conception de la pièce



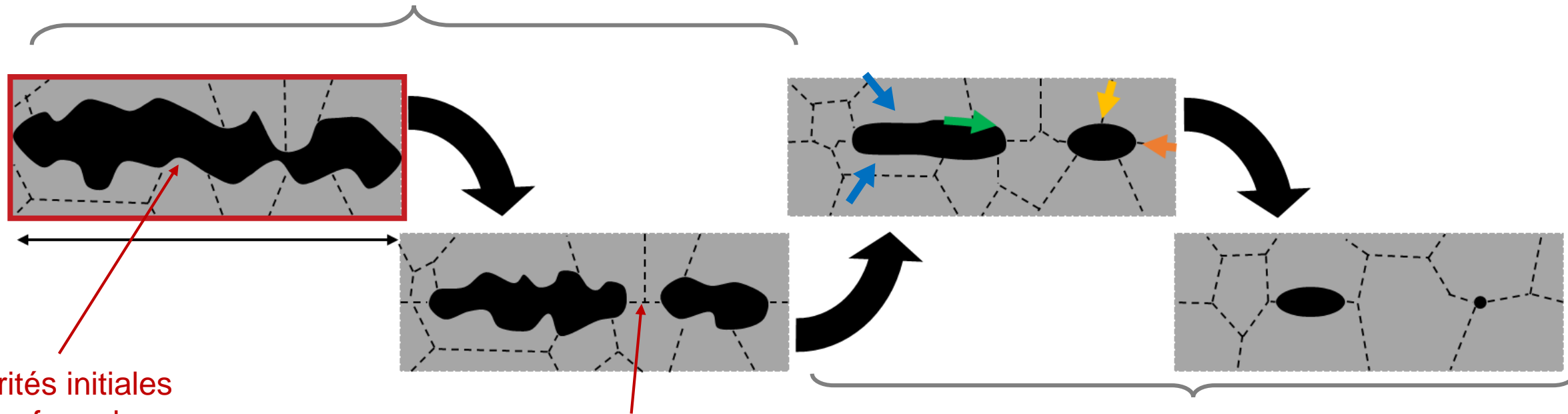
Simulation Abaqus [Maunay, 2016]

Cavités et soudage diffusion



Cavités et soudage diffusion

1. Mise en contact intime des plaques



Aspérités initiales
en surface des
plaques

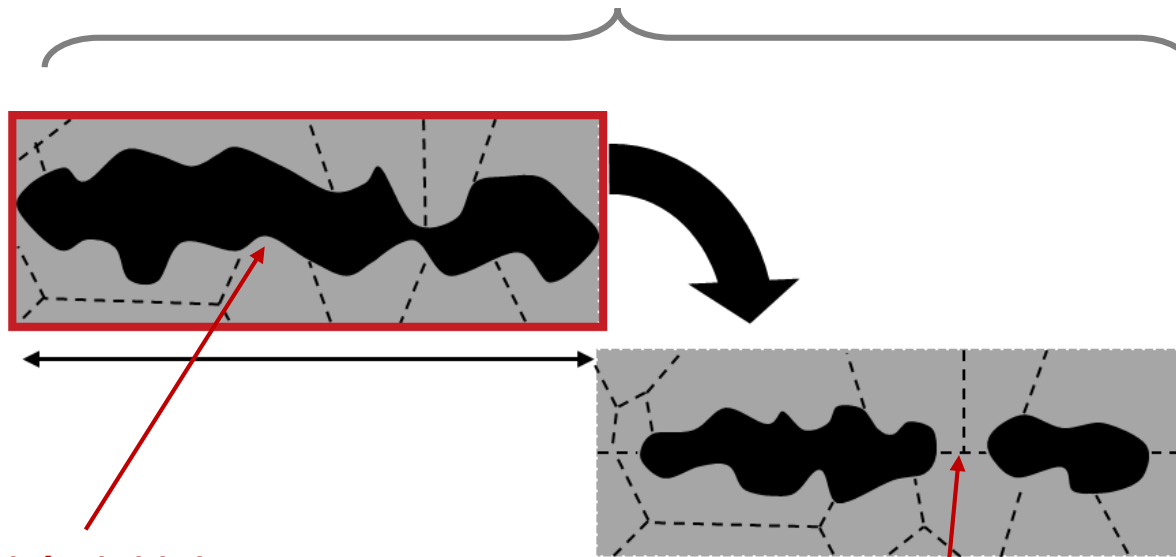
Formation d'isthmes par
déformation plastique

2. Fermeture des cavités
3. Franchissement de l'interface soudée

Cavités et soudage diffusion



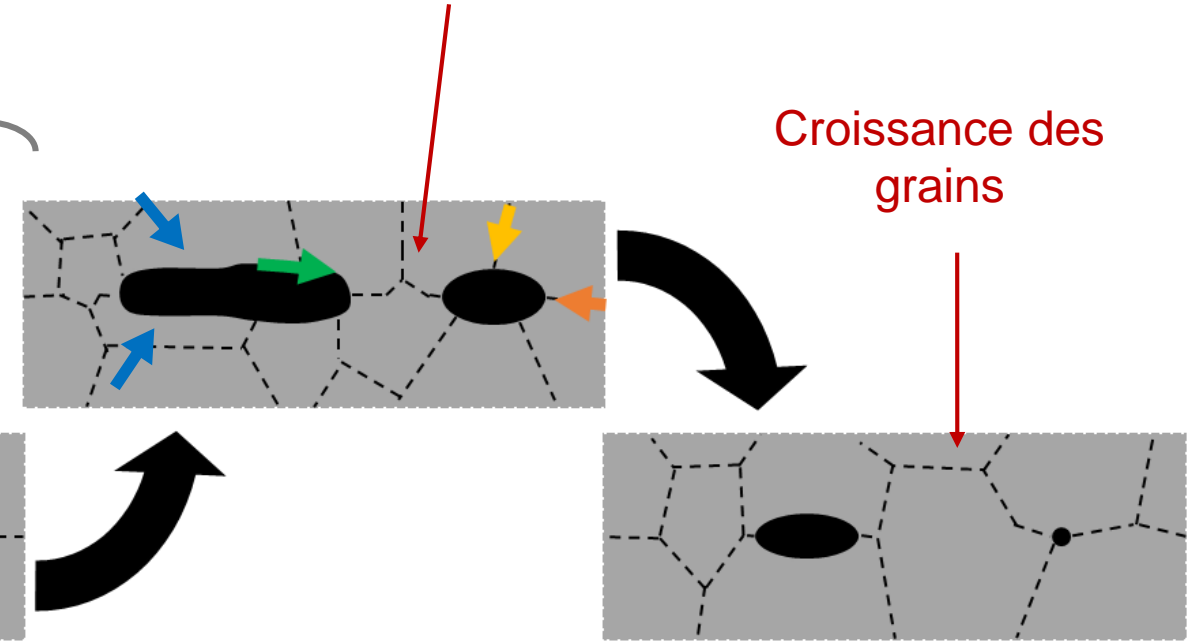
1. Mise en contact intime des plaques



Aspérités initiales
en surface des
plaques

Formation d'isthmes par
déformation plastique

Franchissement des points triples et des joints



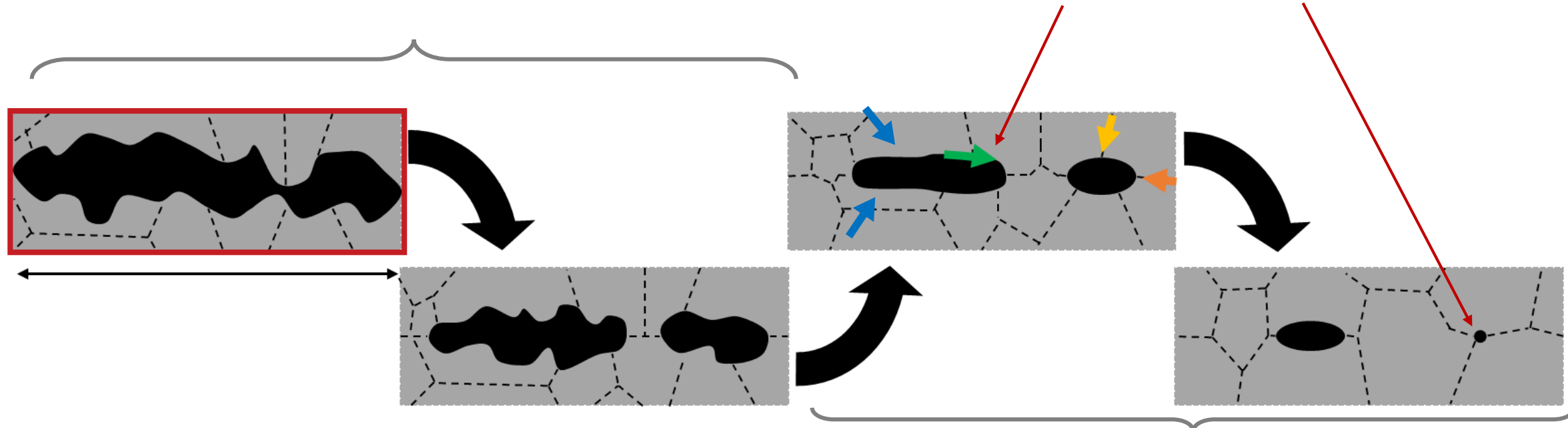
Croissance des
grains

2. Fermeture des cavités
3. Franchissement de l'interface soudée
 - Par diffusion
 - Par déformation viscoplastique

Cavités et soudage diffusion



1. Mise en contact intime des plaques



- Diffusion en surface
- Diffusion sur l'interface soudé
- Diffusion suivant les joints de grain
- Ecoulement visco-plastique

- ## 2. Fermeture des cavités
- ## 3. Franchissement de l'interface soudée
- Par diffusion
 - Par déformation viscoplastique

[Zhang et al., 2015, 2016 et 2017]

Objectifs scientifiques



Amélioration de la modélisation de la cinétique de fermeture des cavités.

A partir de :

- Topographie des surfaces à souder ;
- Conditions de CIC ;
- Comportement du matériau ;

Simuler la fermeture des cavités le long d'une interface soudée diffusée.



2. Modélisation

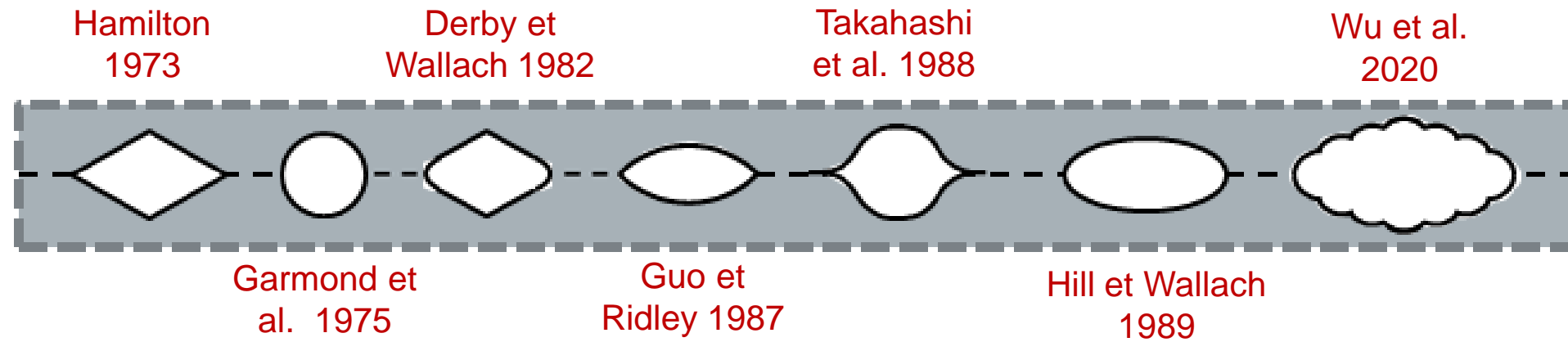
Cadrage sur une cavité modèle

Mécanismes pris en compte et hypothèses

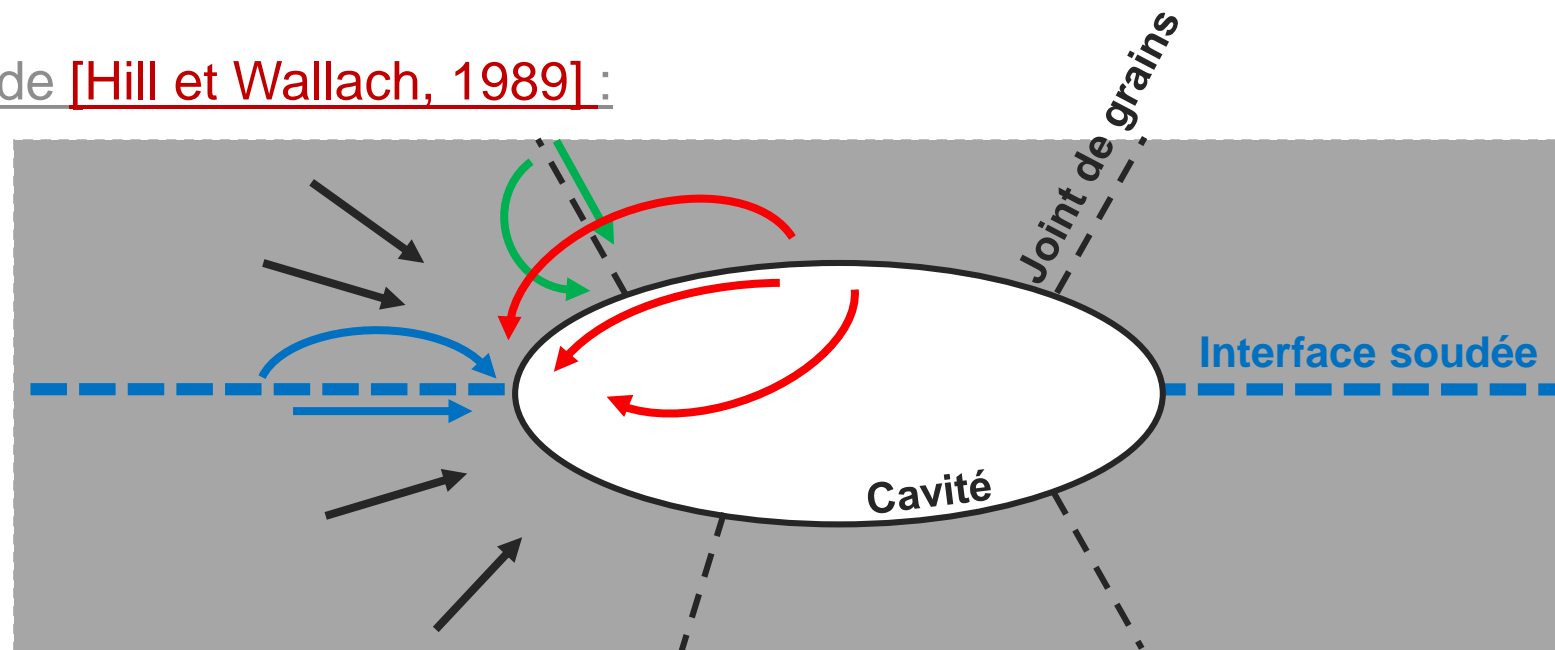
Méthode de résolution

Etat de l'art

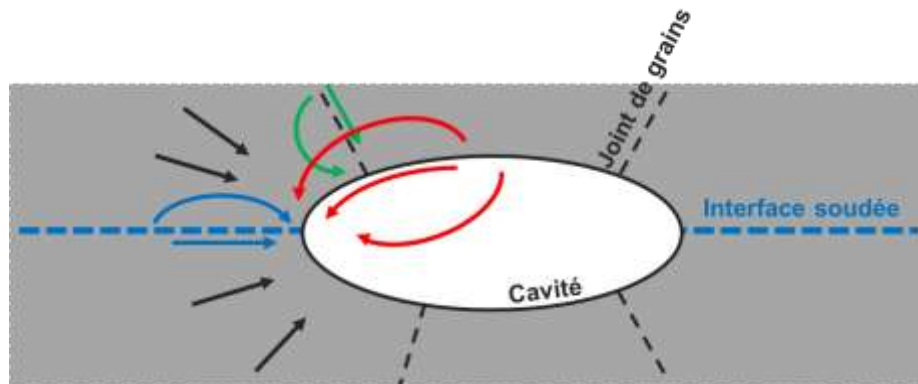
Evolution des cavités représentatives des modèles analytiques :



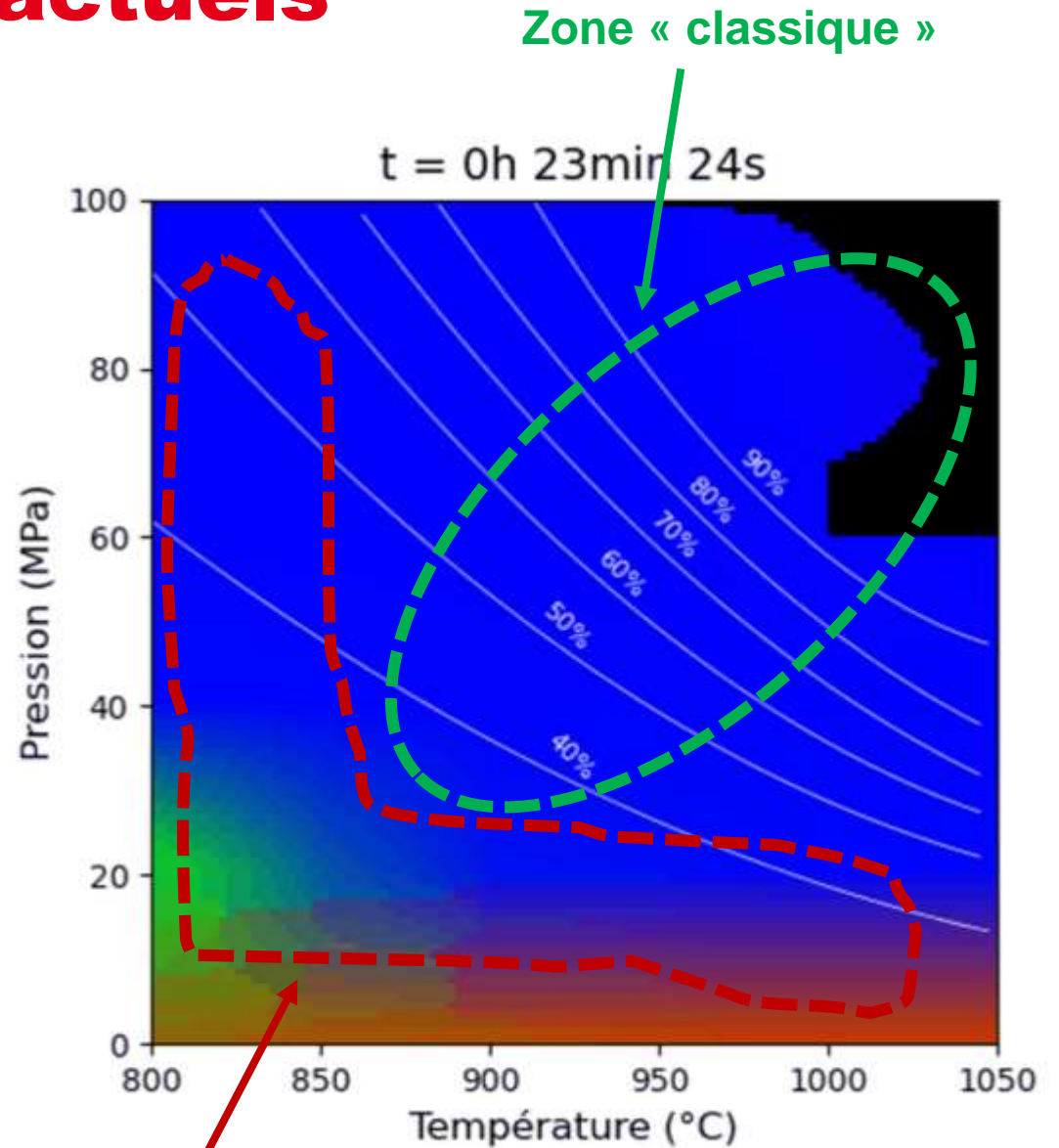
Exemple du modèle de [Hill et Wallach, 1989] :



Limitation des modèles actuels



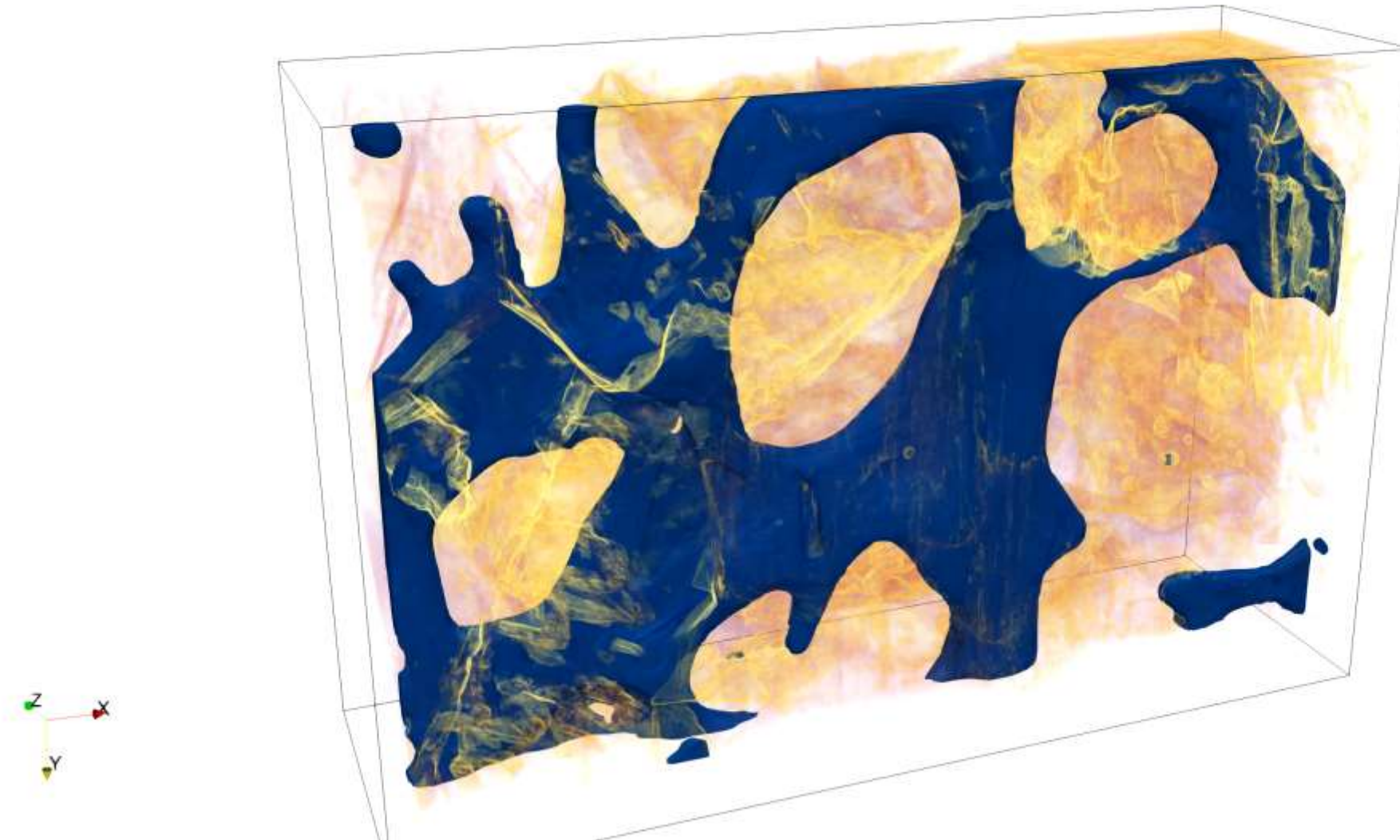
[thèse Maunay, 2016]



Zone d'intérêt

Visualisation 3D des pores aux interfaces

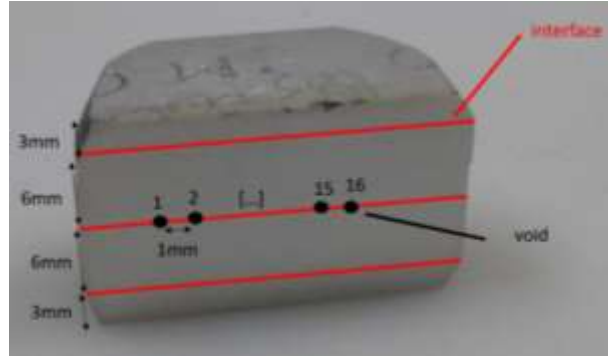
Image FIB-SEM (Slice & View)



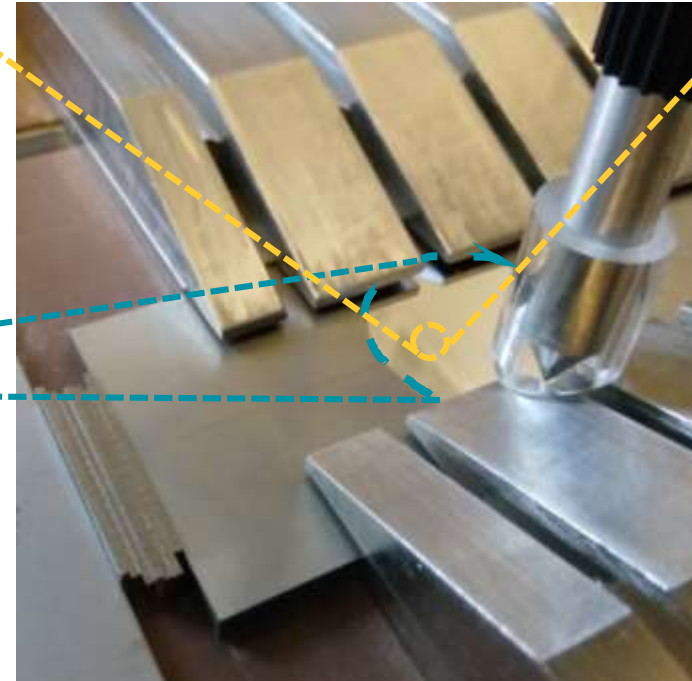
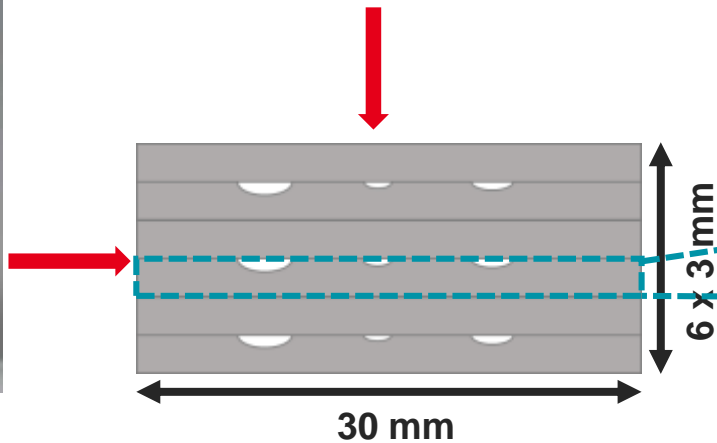
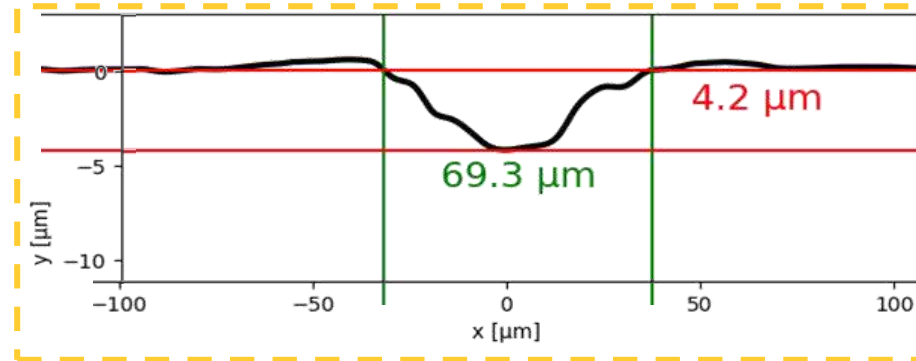
1ère étape : travail sur des cavités modèles 2D obtenues par rayures



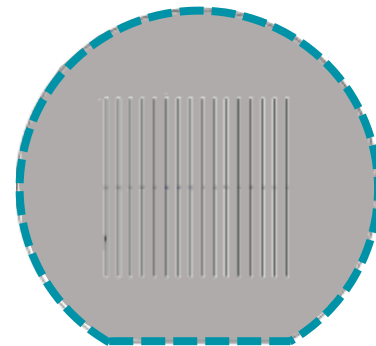
Assemblage dans un conteneur avant cycle de CIC



Coupe d'un assemblage soudé uniaxialement

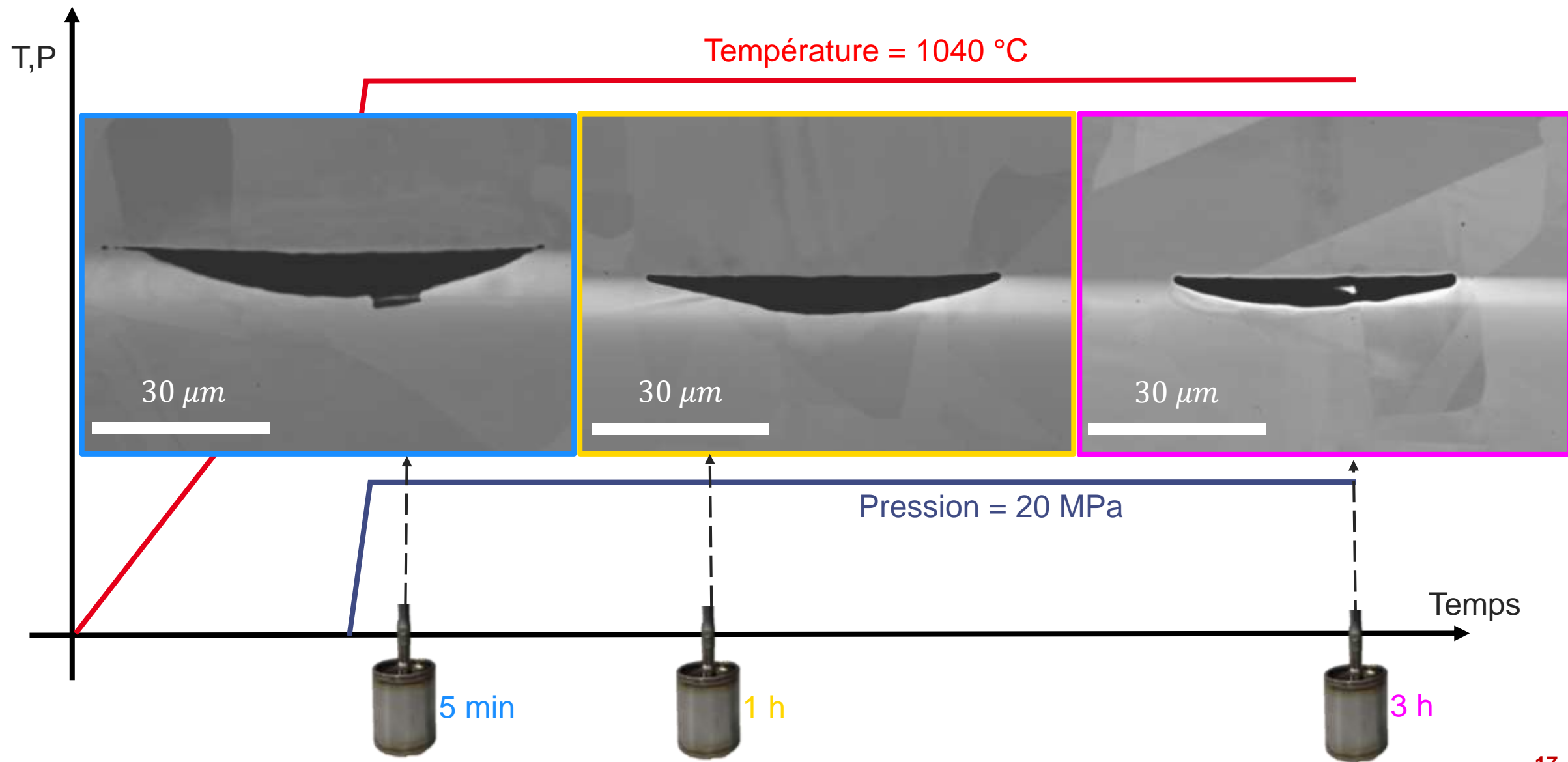


Disque acier 316L



Cavités modèles obtenues par rayures

Cavités de tailles différentes obtenues sur des cycles interrompus

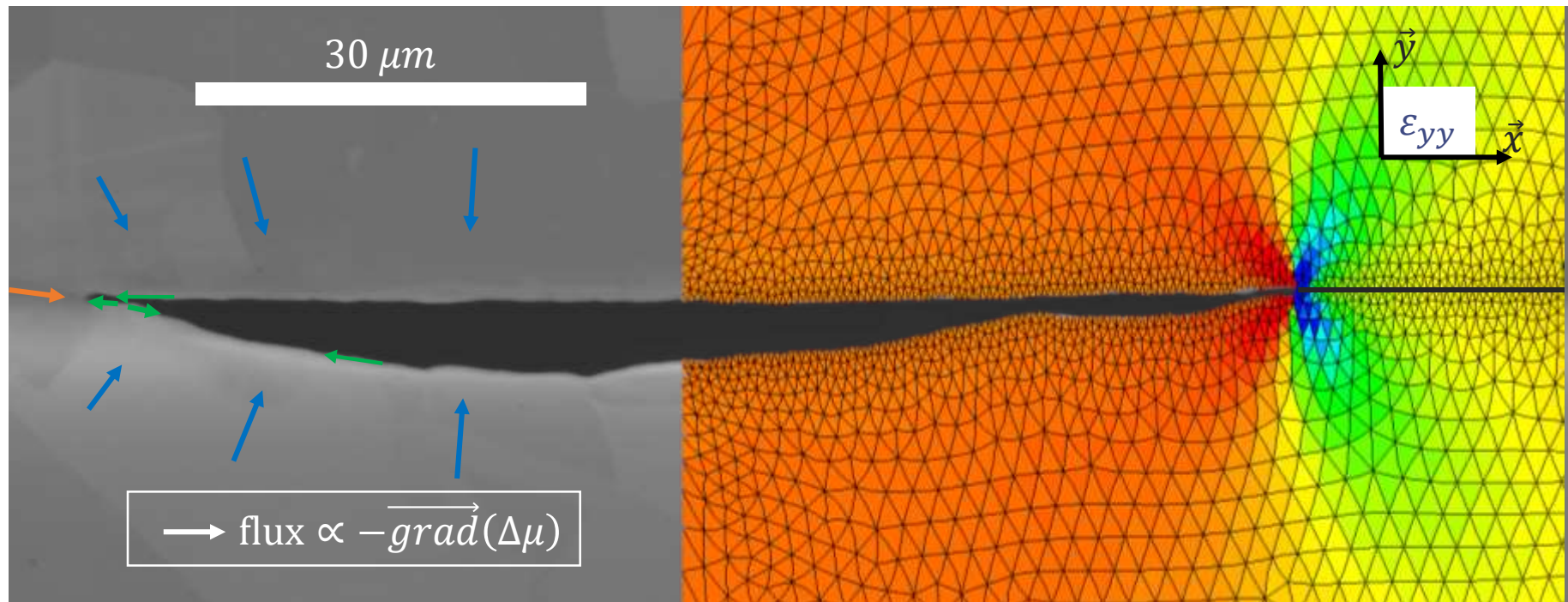


Modélisation

Mécanismes pris en compte

- Diffusion due à la contrainte normale le long de l'interface $\Delta\mu \propto -\sigma_n$
 - Diffusion due à la courbure le long de la cavité $\Delta\mu \propto \kappa$
- Autres chemins de diffusion négligés

→ Flux viscoplastique

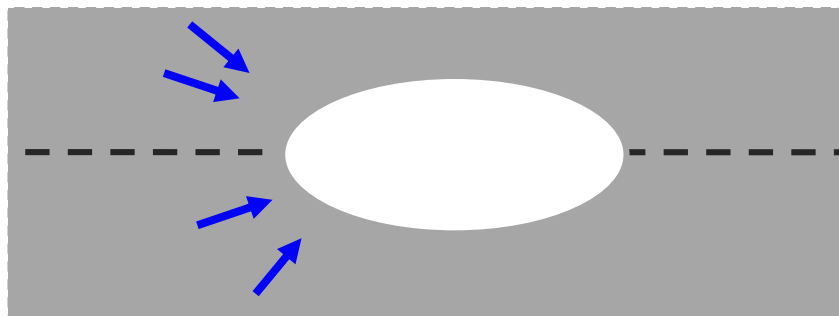


Description des mécanismes pris en compte

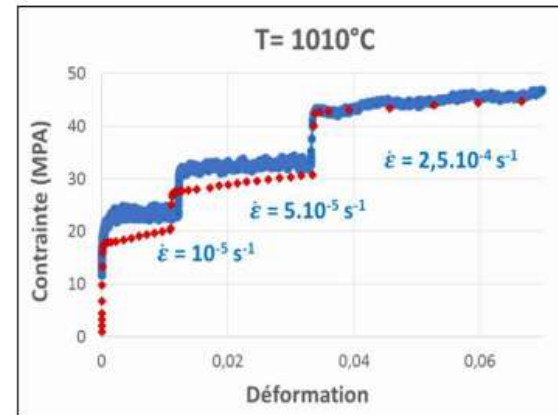
Ecoulement viscoplastique

Loi de Chaboche et Lemaitre avec écrouissage isotrope :

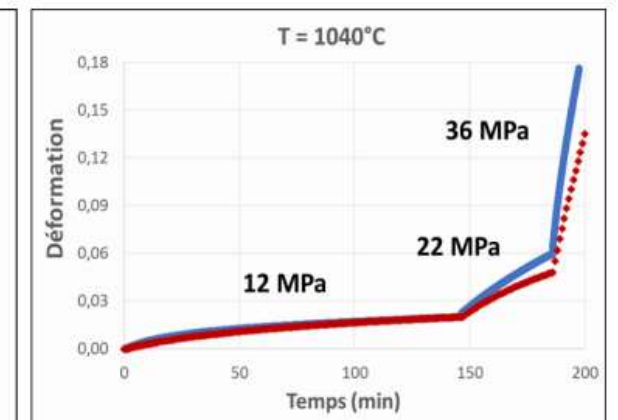
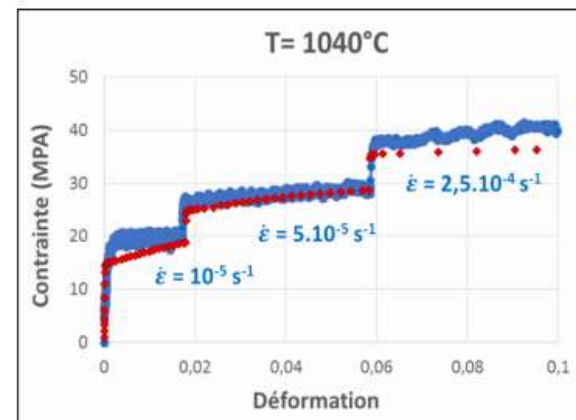
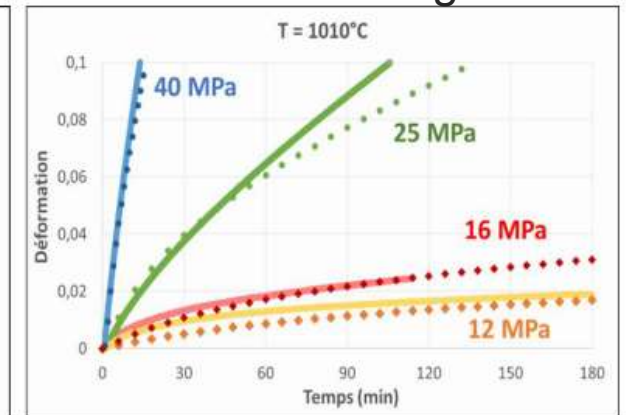
$$\dot{\bar{\epsilon}}^{vp} = \frac{3}{2} \left\langle \frac{J(\bar{\sigma}) - \mathcal{R} - Re}{K} \right\rangle^n \frac{\bar{\sigma}}{J(\bar{\sigma})}$$



Essais de traction



Essais de fluage



Acier X2CrNiMo 17-12-2 à 1010°C (316L)

lignes continues = essais expérimentaux

lignes pointillées = modèle

[thèse Maunay, 2016]

Description des mécanismes pris en compte

Diffusion en surface

Potentiel chimique : **courbure** κ de la surface libre [$J \cdot mol^{-1}$]

$$\Delta\mu = \nu\gamma_s\kappa$$

Flux de diffusion le long de la surface [$mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$] :

$$\vec{j}_s = -\frac{D_s}{\nu RT} \overrightarrow{grad}(\Delta\mu)$$

[Herring, 1951]

Conservation de la matière : vitesse de la surface [$m \cdot s^{-1}$]

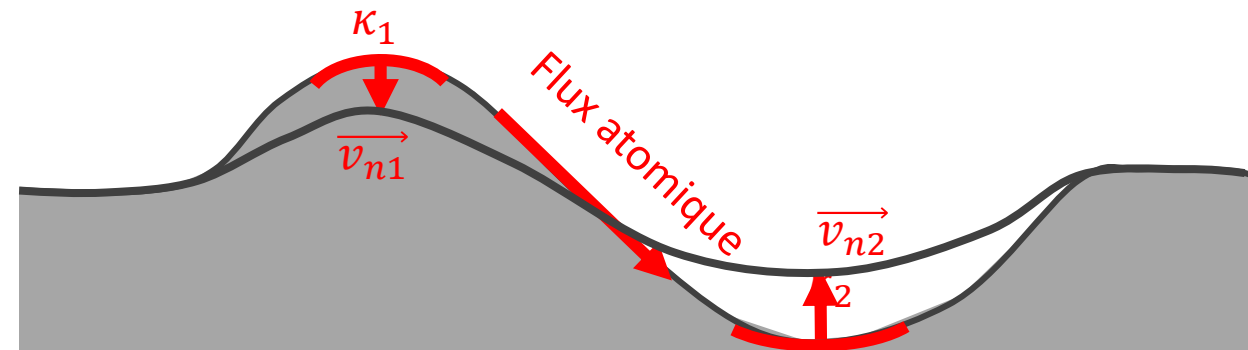
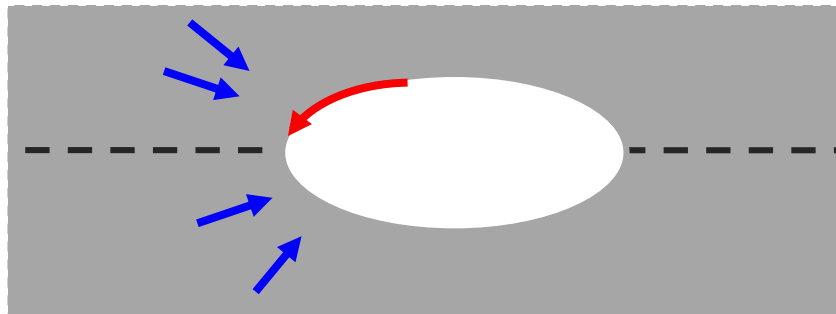
$$v_n = \nu\delta_s \frac{\partial}{\partial s} (\vec{j}_s)$$

$$\kappa_1 > \kappa_2$$

$$\Rightarrow \Delta\mu_1 > \Delta\mu_2$$

$$\Rightarrow \frac{\partial}{\partial s} (\Delta\mu_2 - \Delta\mu_1) < 0$$

$$\Rightarrow j_s > 0$$



Description des mécanismes pris en compte

Diffusion aux interfaces (jdg et interface soudée-diffusée)

Potentiel chimique : **contrainte normale** à l'interface [$J.mol^{-1}$]

$$\Delta\mu = -v\sigma_n \quad [\text{Herring, 1950}]$$

Flux de diffusion le long de l'interface [$mol.m^{-2}.s^{-1}$] :

$$\vec{j}_i = -\frac{D_i}{vRT} \overrightarrow{grad}(\Delta\mu)$$

Conservation de la matière : vitesse de l'interface [$m.s^{-1}$]

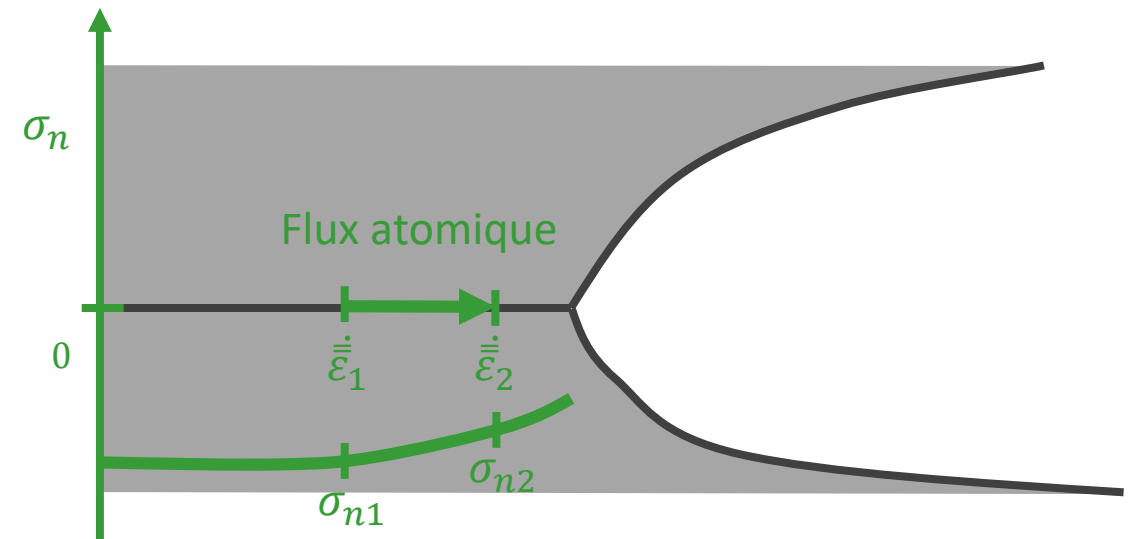
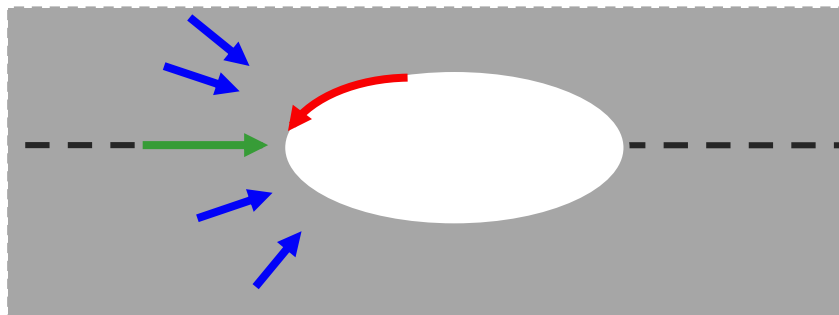
$$2v_n = v\delta_i \frac{\partial}{\partial s} (\vec{j}_i)$$

$$\sigma_{n1} < \sigma_{n2}$$

$$\Rightarrow \Delta\mu_1 > \Delta\mu_2$$

$$\Rightarrow \frac{\partial}{\partial s} (\Delta\mu_2 - \Delta\mu_1) < 0$$

$$\Rightarrow j_s > 0$$



Description des mécanismes pris en compte

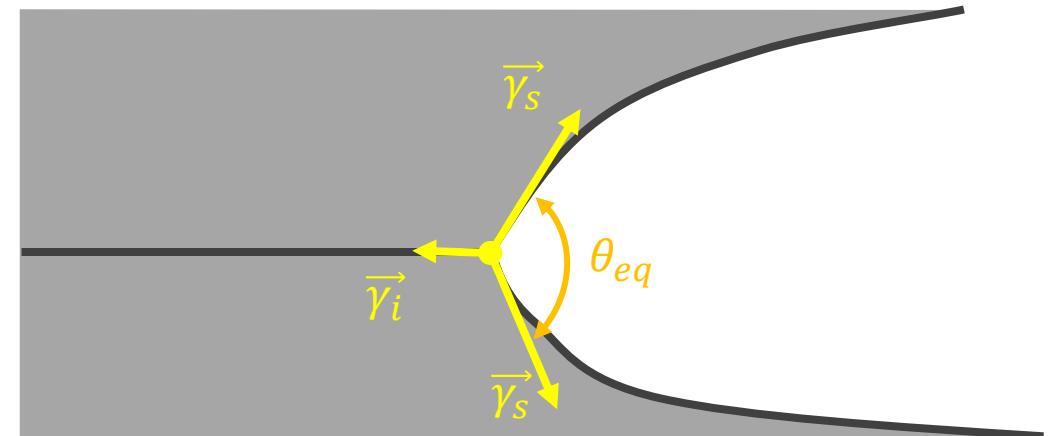
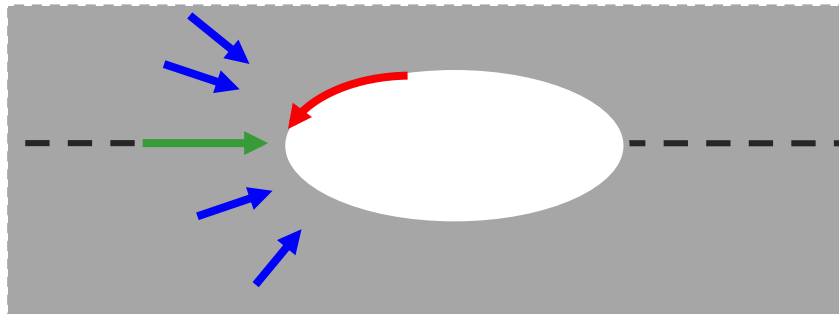
Equilibre des tensions superficielles au point triple

Aux points triple : équilibre des tensions superficielles

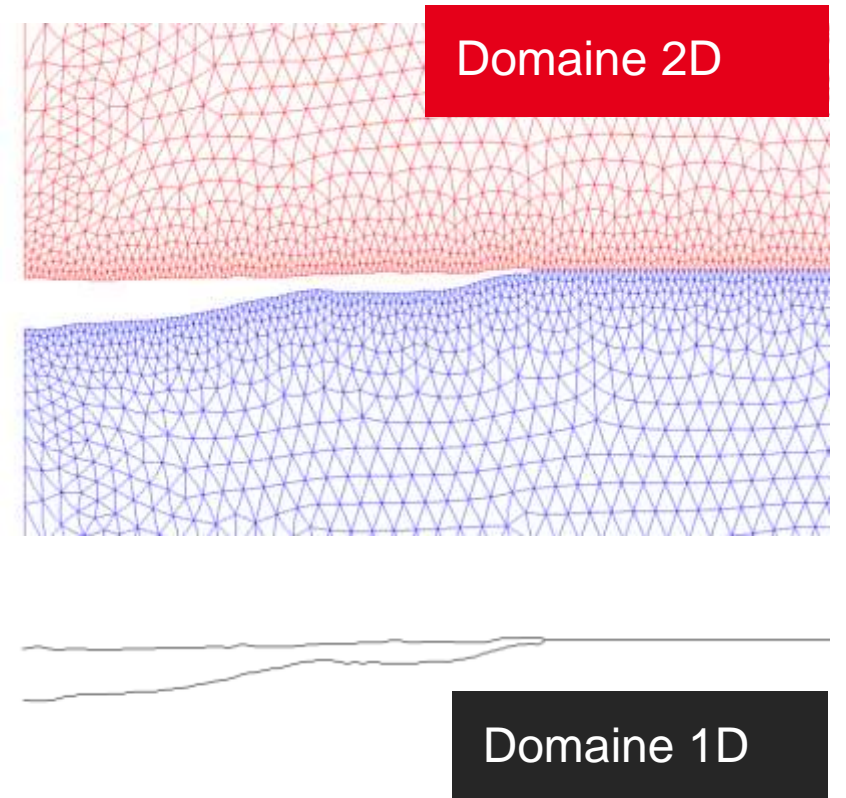
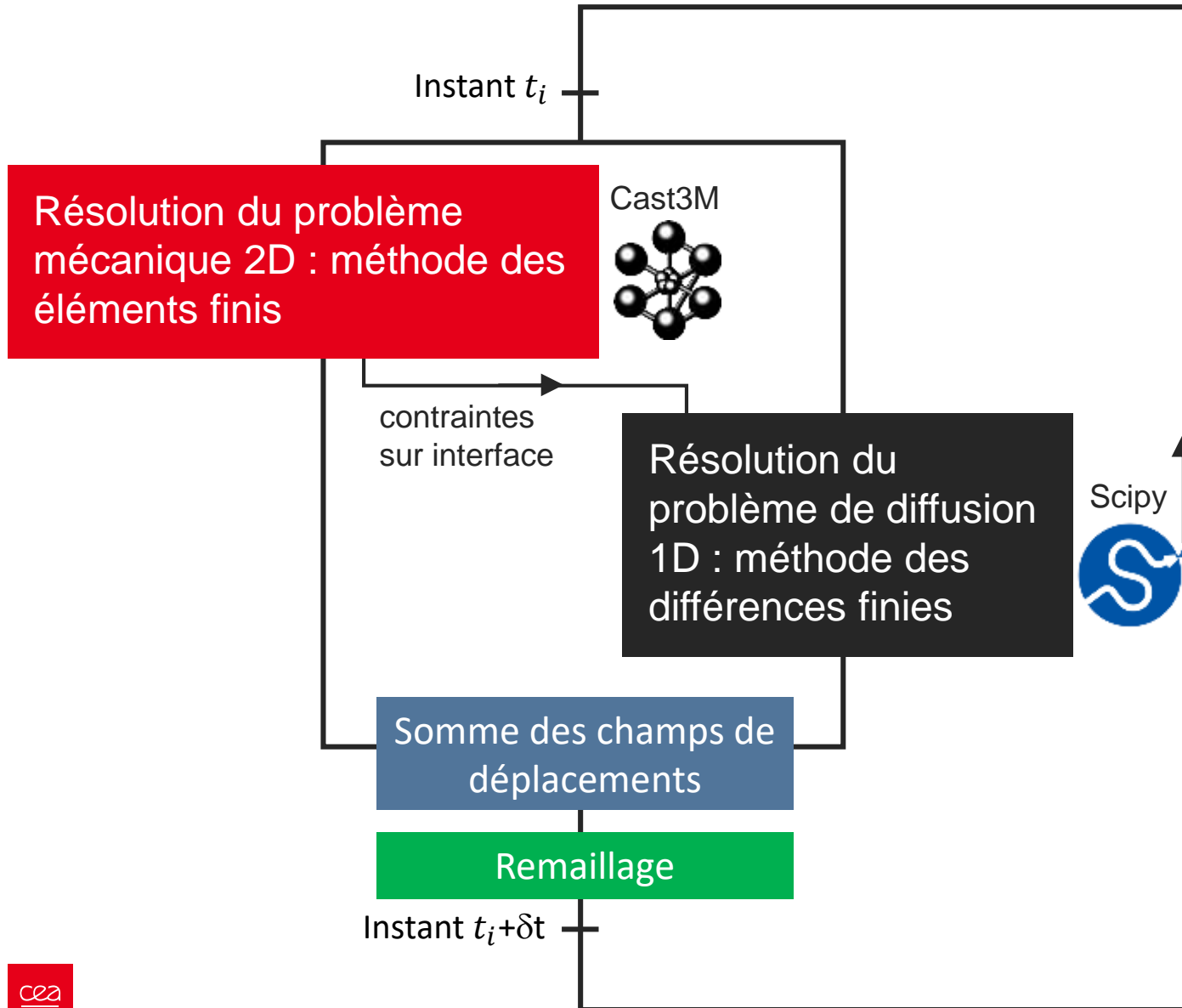
$$\sum_{i=1}^3 \gamma_i \vec{t}_i = \vec{0}$$

[Herring, 1951]

$$2\gamma_s \cos\left(\frac{\theta_{eq}}{2}\right) = \gamma_i$$



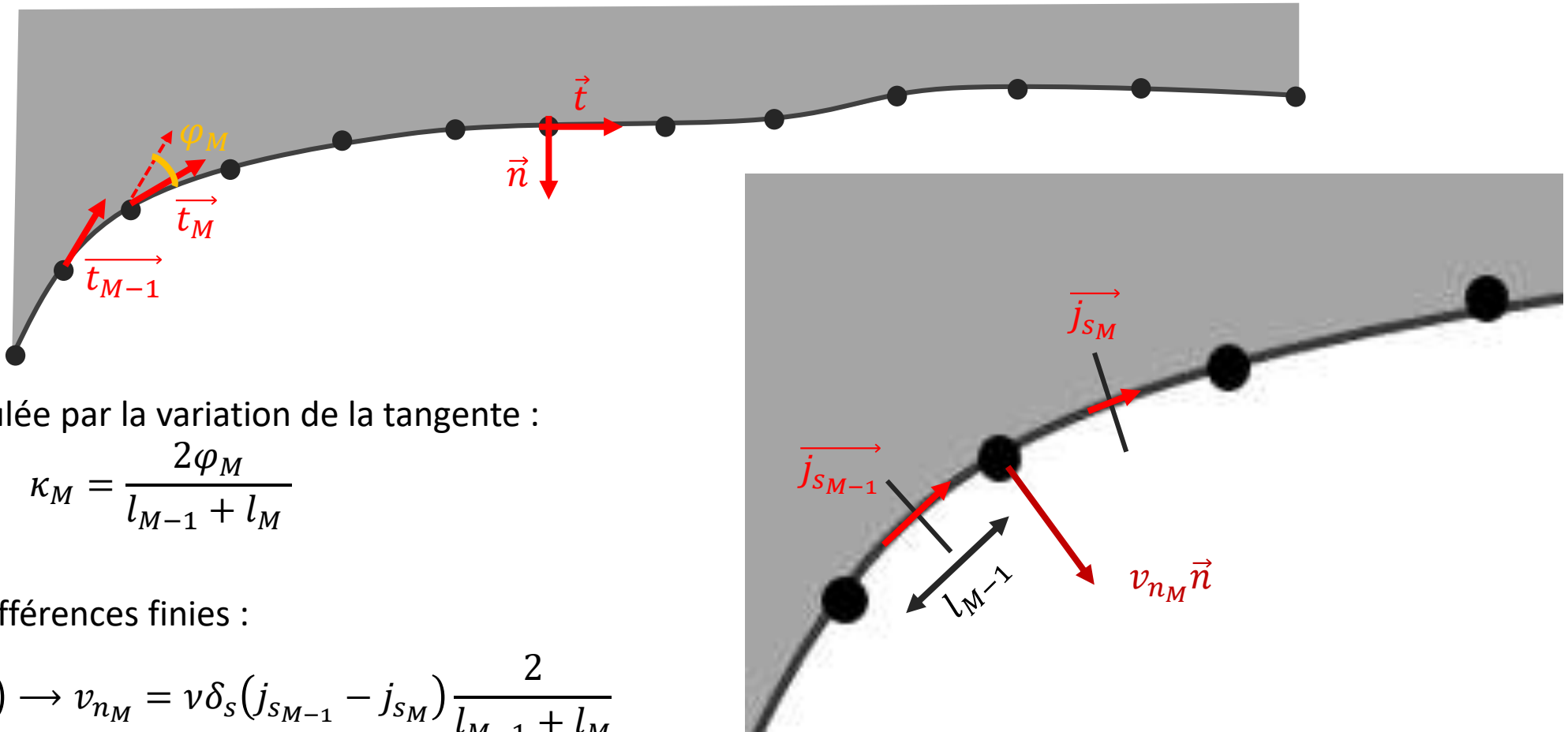
Résolution globale



Différences finies sur domaine 1D

Surface libre

Schéma aux différences finies pour résoudre la diffusion le long de la cavité :



Courbure calculée par la variation de la tangente :

$$\kappa_M = \frac{2\varphi_M}{l_{M-1} + l_M}$$

Schéma aux différences finies :

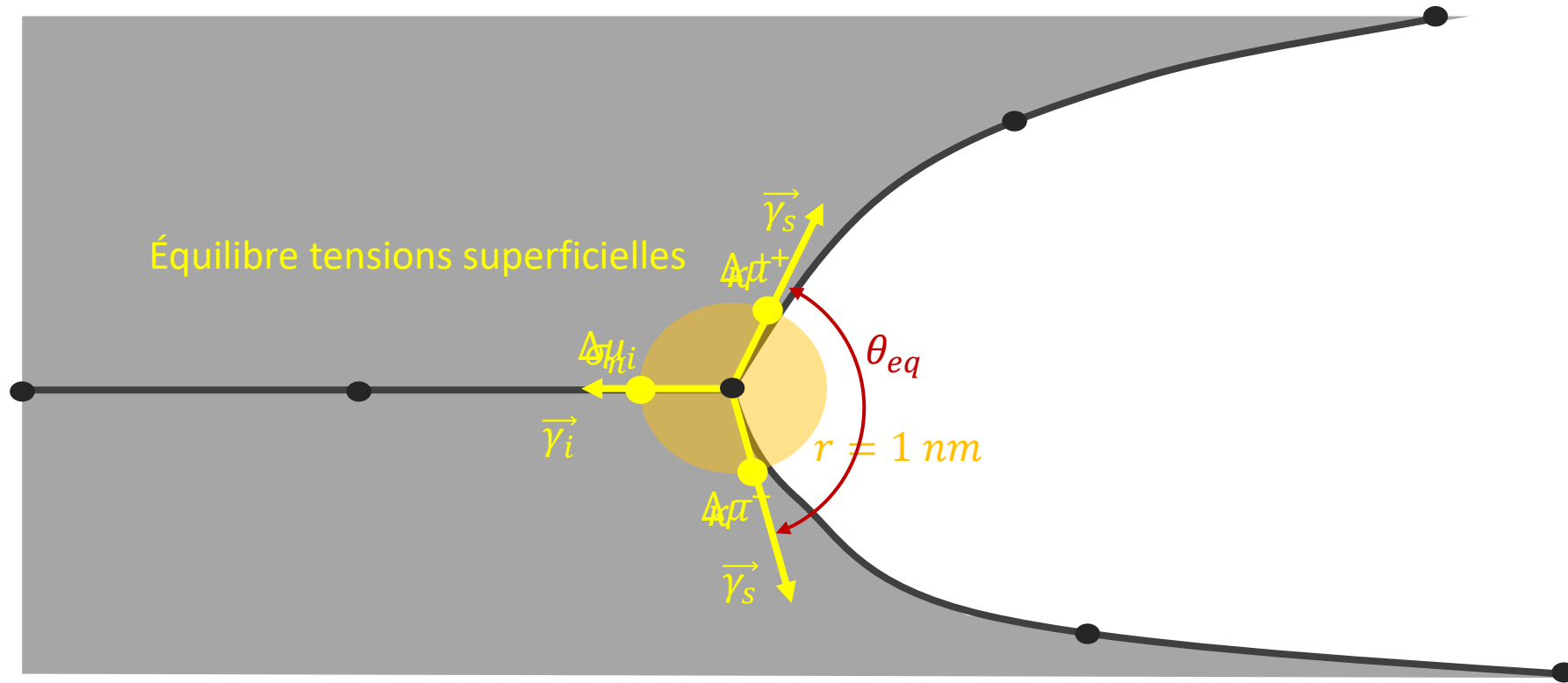
$$v_n = v \delta_s \frac{\partial}{\partial s} (\vec{j}_s) \rightarrow v_{nM} = v \delta_s (j_{sM-1} - j_{sM}) \frac{2}{l_{M-1} + l_M}$$

Différences finies sur domaine 1D

Traitement du point triple

Équilibre des tensions superficielles aux points triples :

Quels points situés à 1nm du point triple vérifient $2\gamma_s \cos\left(\frac{\theta_{eq}}{2}\right) = \gamma_i$?

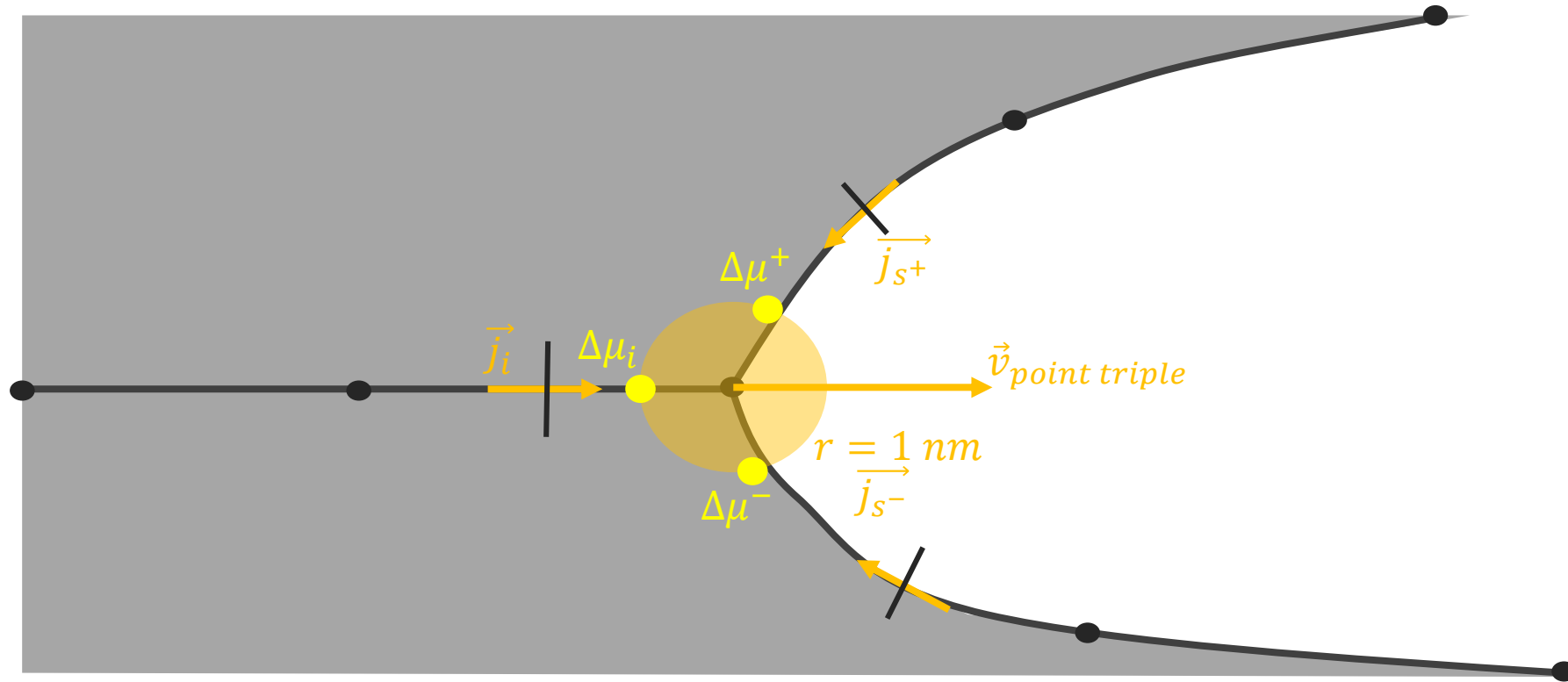


Différences finies sur domaine 1D

Traitement du point triple

Equilibre des tensions superficielles aux points triples :

Quels mouvement associé aux point triples ? => Bilan de matière autour du point triple

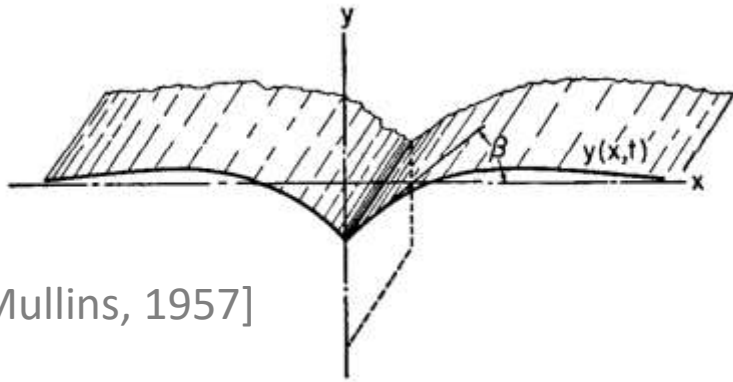


Validation avec le modèle de Mullins

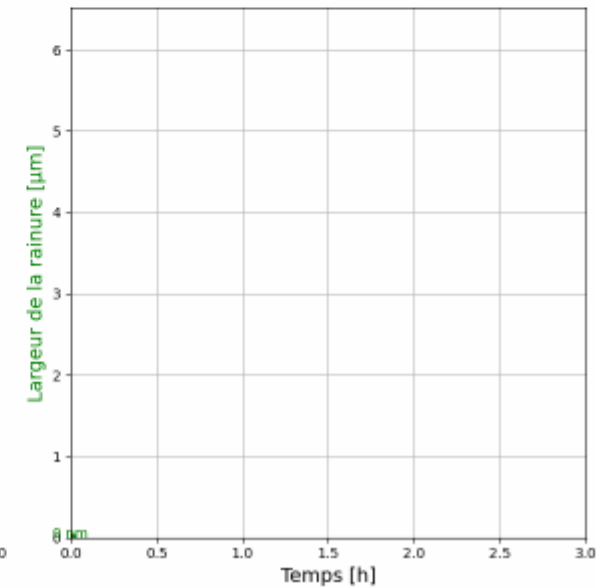
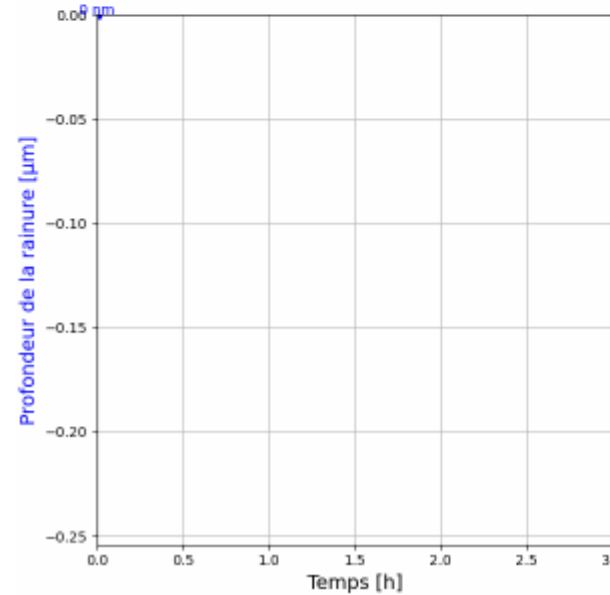
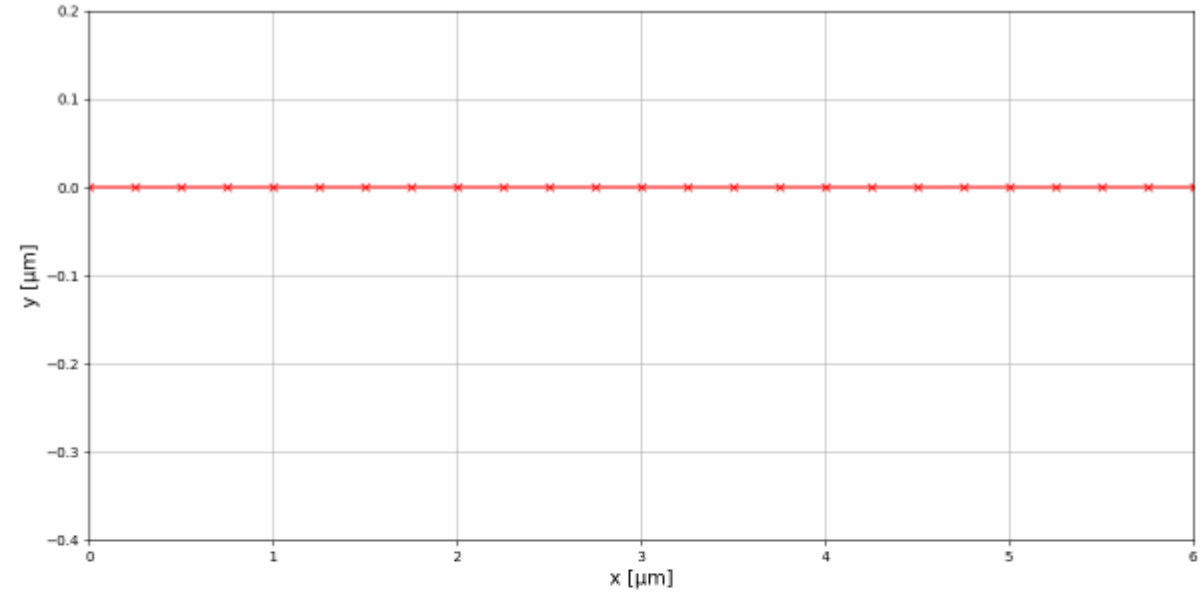
Diffusion de surface et équilibre point triple

Comparaison avec le modèle analytique de Mullins

Evolution isotherme de l'intersection d'un joint de grain orthogonal à une surface plane

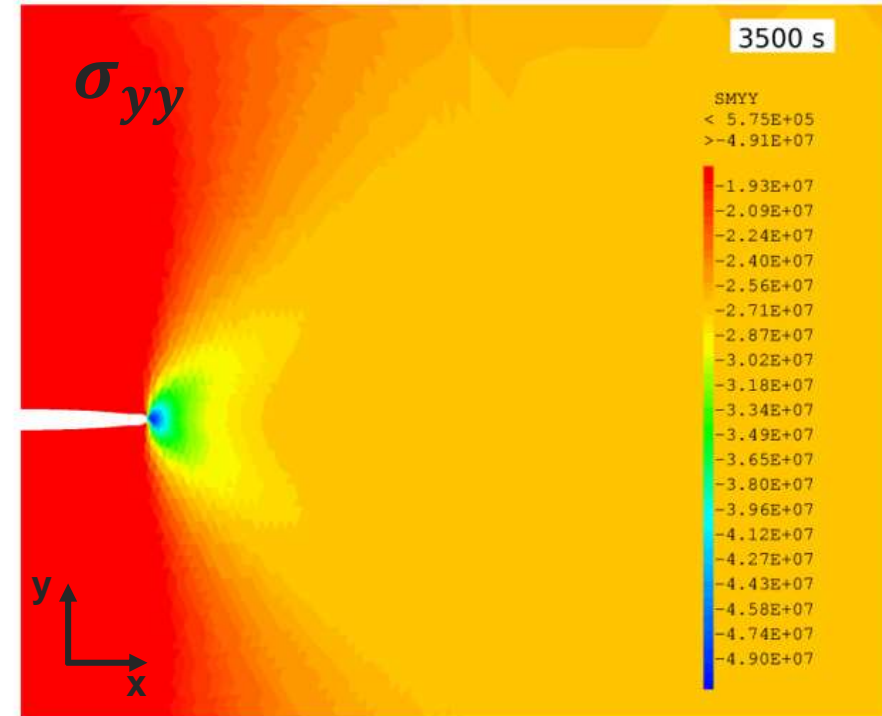
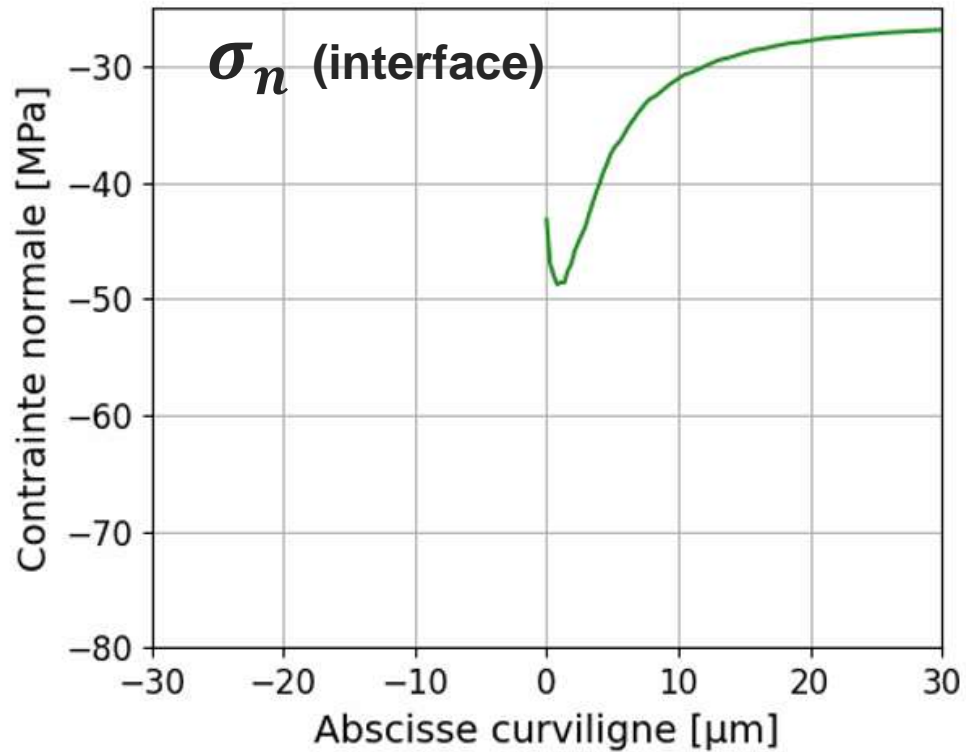


[Mullins, 1957]



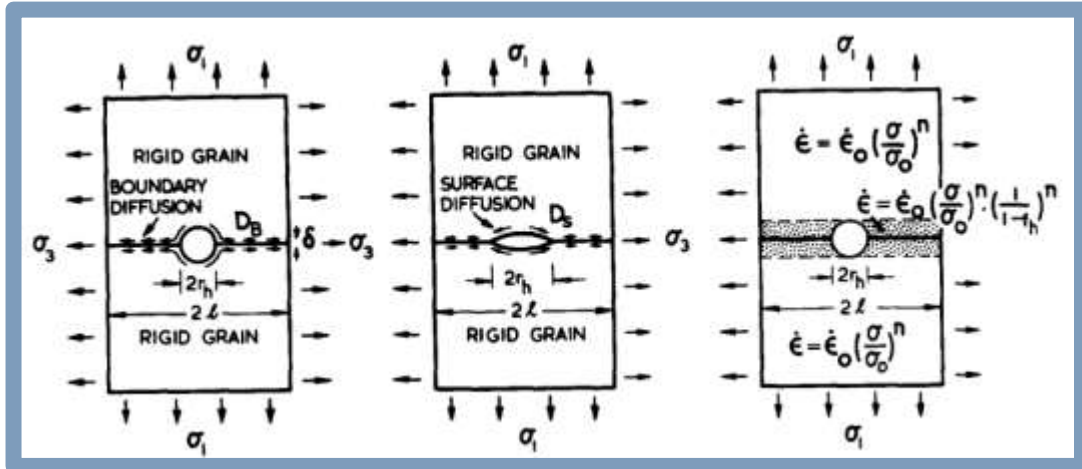
Différences finies sur domaine 1D

Diffusion à l'interface



Différences finies sur domaine 1D

Diffusion à l'interface



Modèle par tranche : [Cocks et Ashby, 1982] et beaucoup d'autres

→ le volume d'une tranche de l'interface se répartit d'un coup dans la cavité idéalisée (souvent lenticulaire) (i.e. contrainte moyennée)

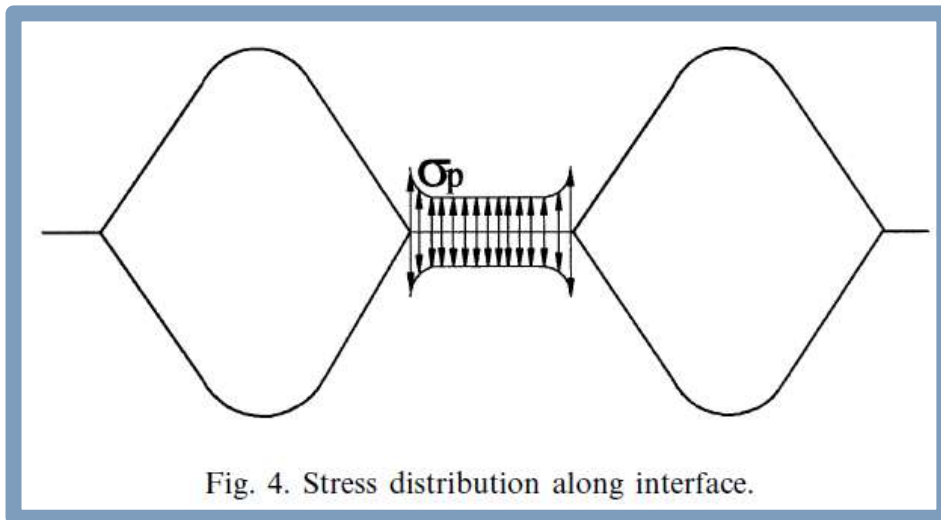


Fig. 4. Stress distribution along interface.

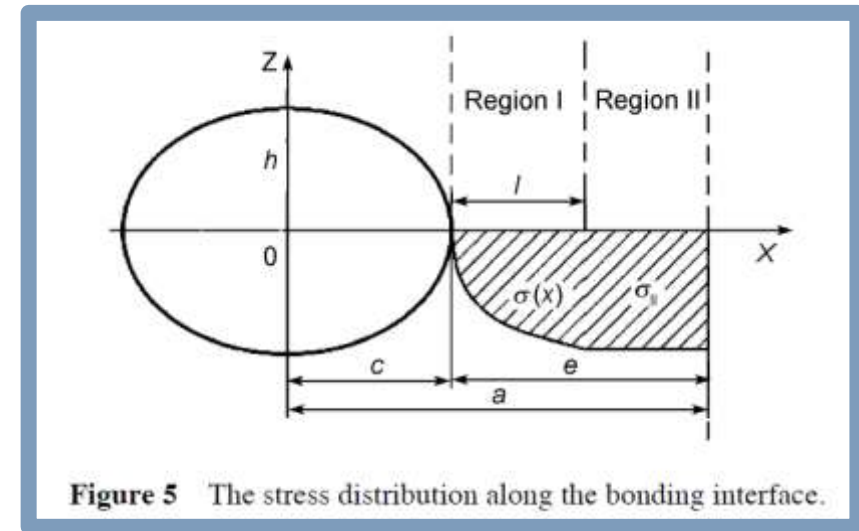


Figure 5 The stress distribution along the bonding interface.

[Orhan et al., 1999] prend en compte un champ hétérogène, mais s'arrange avec le signe de la contrainte

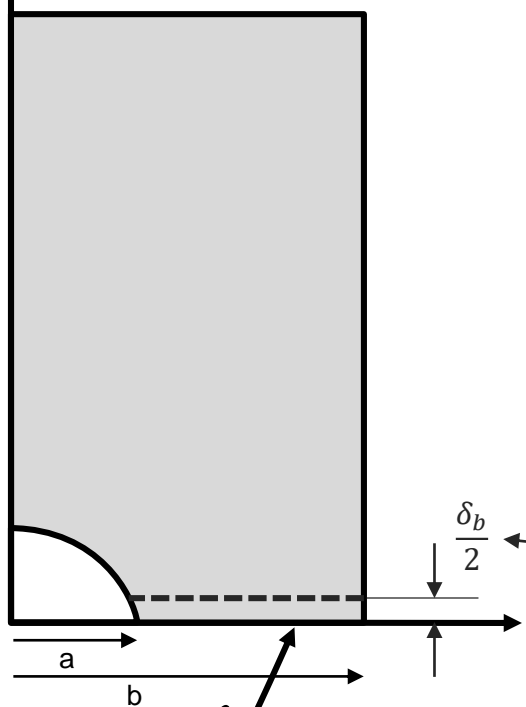
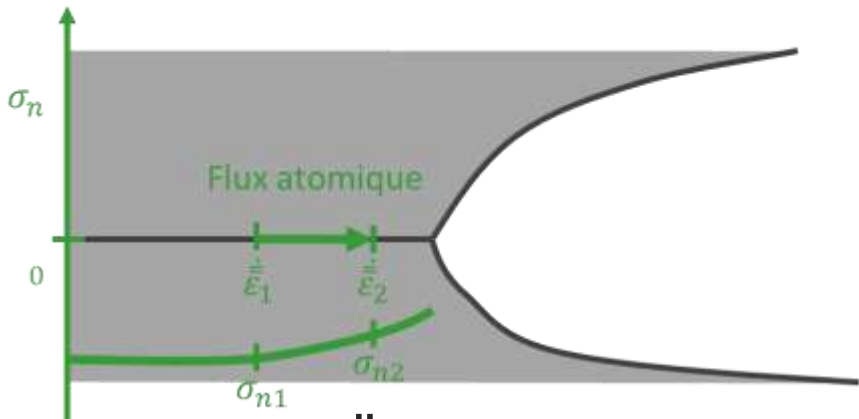
[Ma et al., 2012] dessinent une contrainte arbitraire

Différences finies sur domaine 1D

Diffusion à l'interface : couplage 1D <-> 2D !



[Needleman et Rice, 1980]



Conservation de la masse : $div(\vec{v}) = 0$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_r) + \cancel{\frac{1}{r} \left(\frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} \right)} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0$$

$$v_r = \frac{\Omega J_b}{\delta_b} \text{ (m/s)} \quad \rightarrow \quad \dot{\epsilon}_{zz}$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\Omega J_b}{\delta_b} \right) + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0$$

En intégrant sur l'épaisseur de couche δ_b répartie symétriquement sur l'interface

$$\int_{-\frac{\delta_b}{2}}^{\frac{\delta_b}{2}} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\Omega J_b}{\delta_b} \right) + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right] dz = 0$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \Omega J_b) + 2 v_z \left(z = \frac{\delta_b}{2} \right) = 0$$

ΩJ_b est en m^2/s
 J_b est en $m^{-1}s^{-1}$ (!)
 Ω est en m^3
 D est en $m^3s^{-1}Pa^{-1}$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \Omega J_b) + 2 v_z = 0, \quad \Omega J_b = \mathcal{D} \frac{\partial}{\partial r} (\sigma_{zz}) \quad \text{along } z = 0.$$

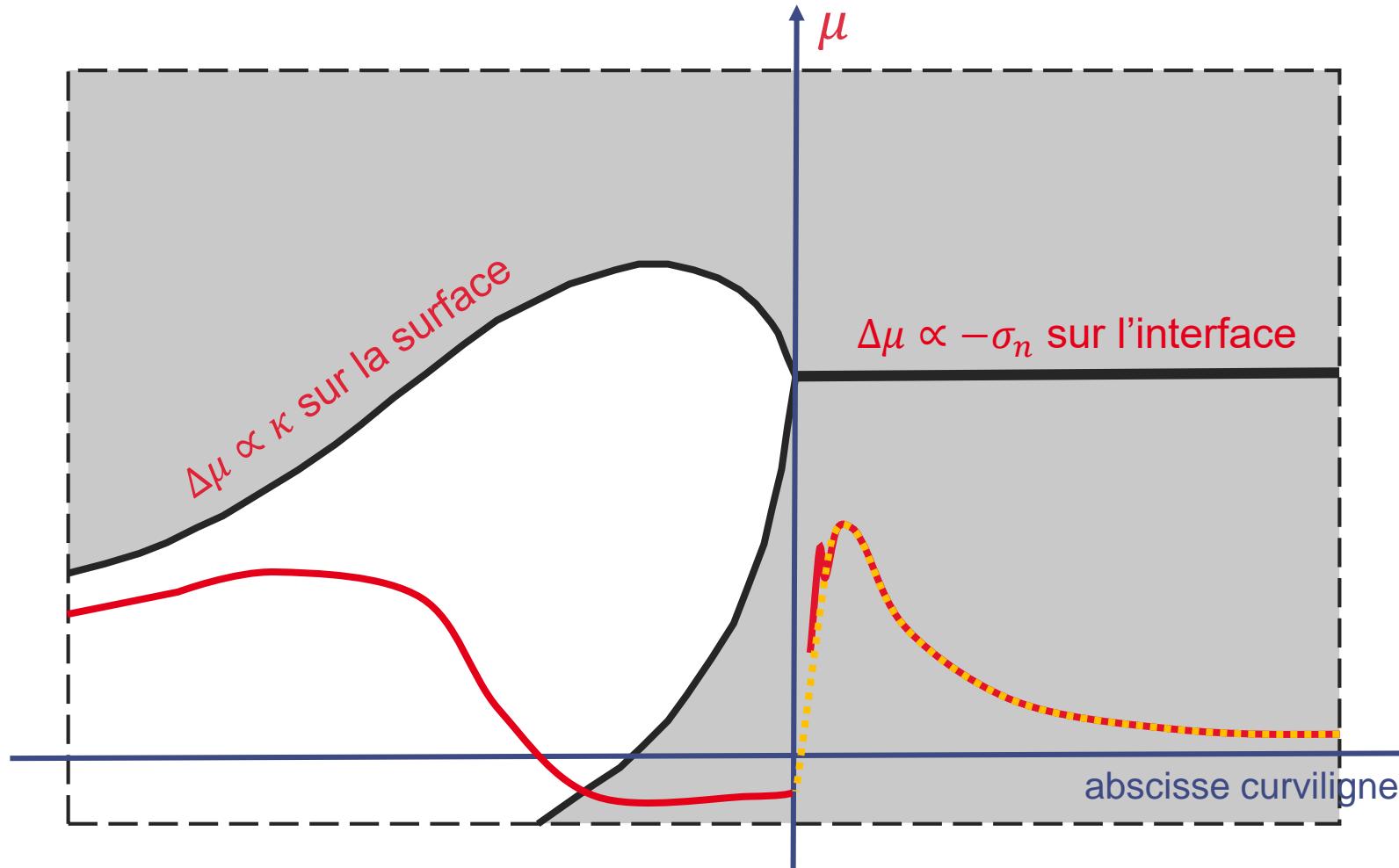
v_z correspond donc à $v_z \left(z = \frac{\delta_b}{2} \right)$

terme de couplage 1D / 2D

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\Omega J_b}{\delta_b} \right) + \dot{\epsilon}_{zz} = 0$$

Différences finies sur domaine 1D

Diffusion à l'interface



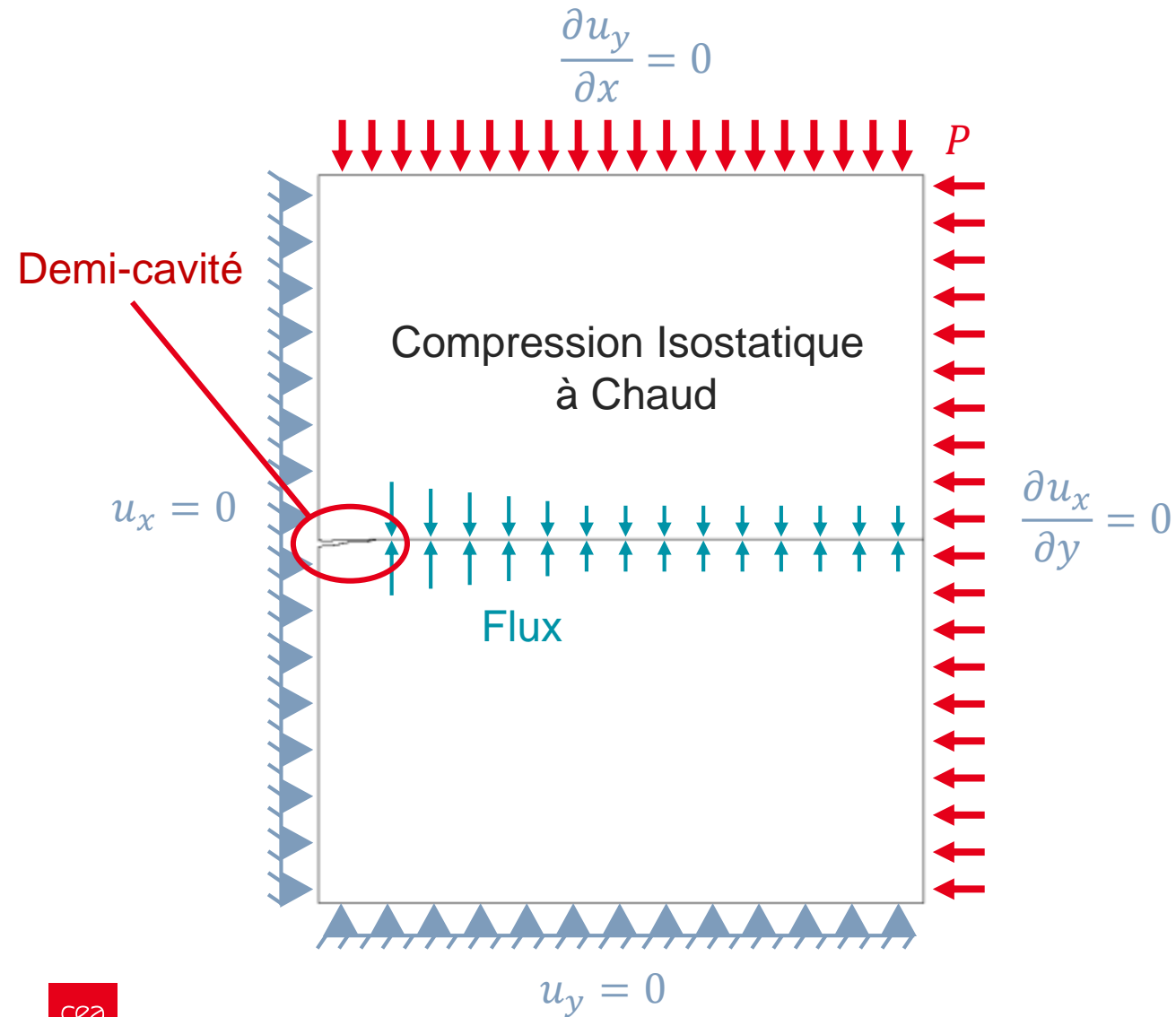


3 ■ Quelques exemples

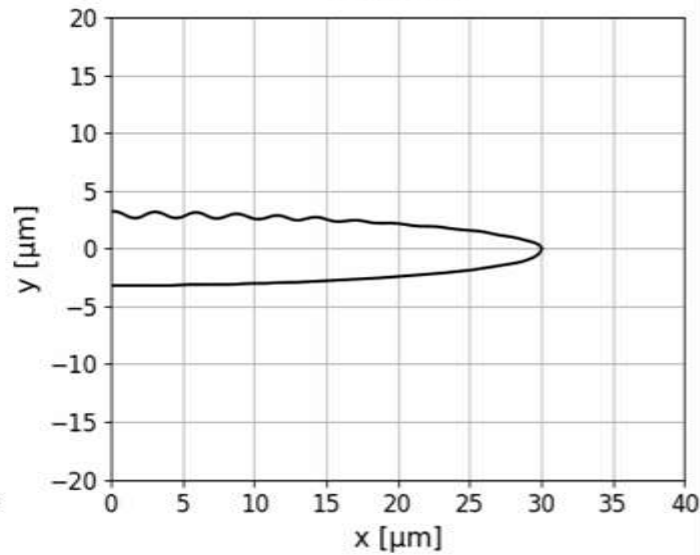
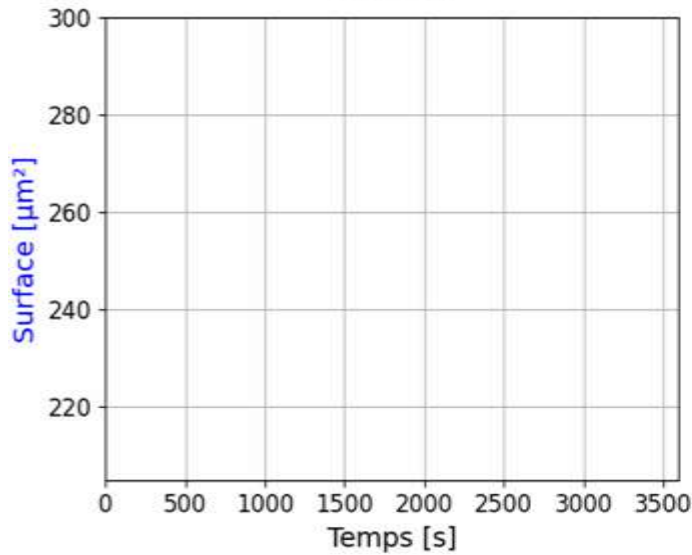
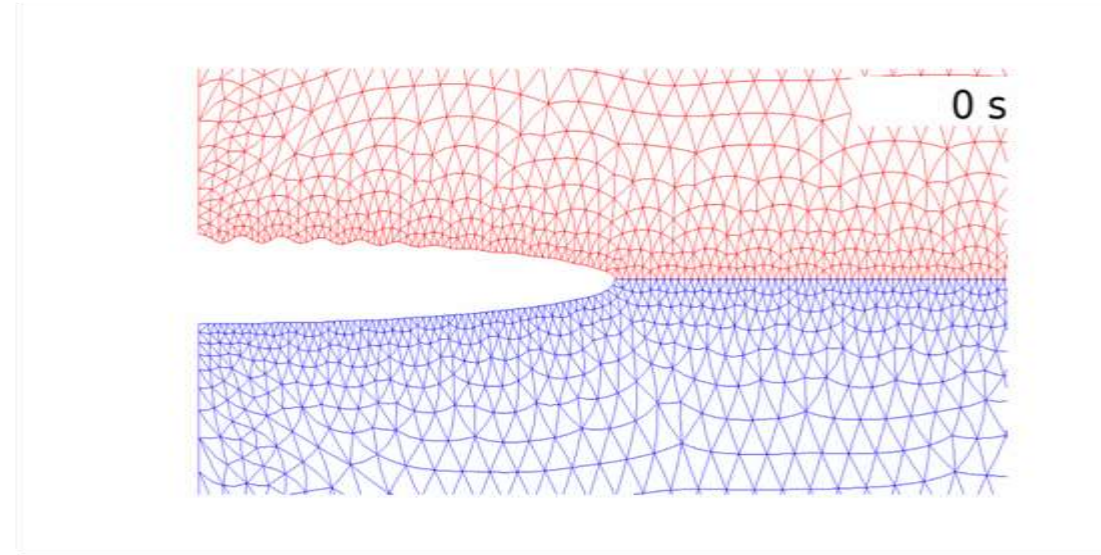
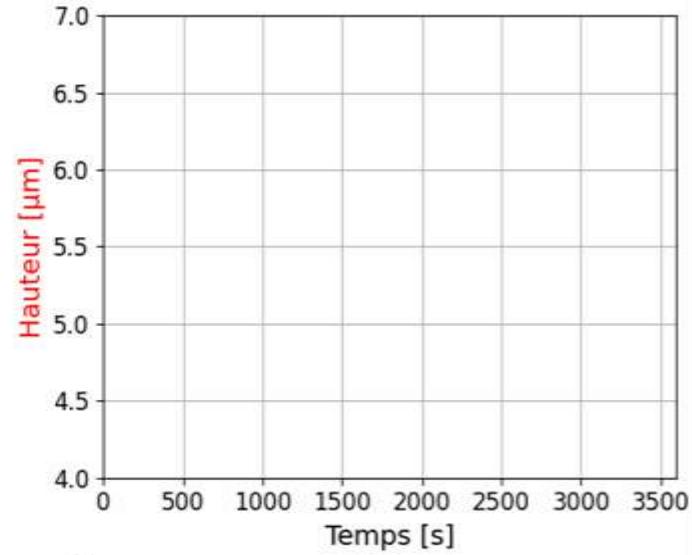
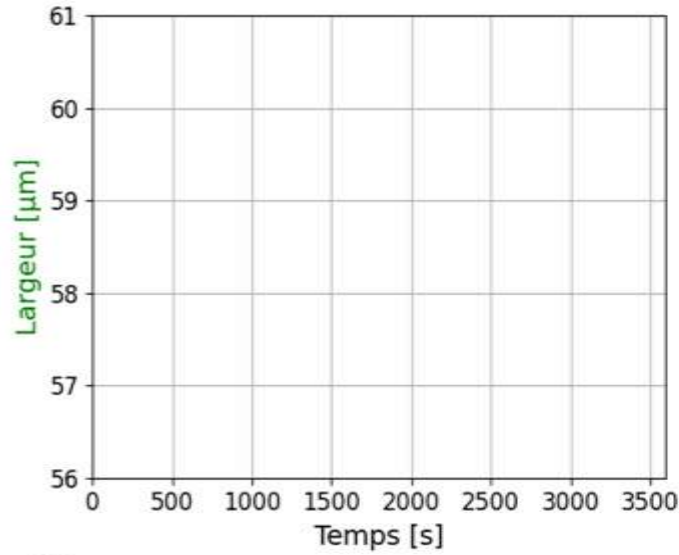
Exemple sur une cavité test

La diffusion en surface explique certaines choses

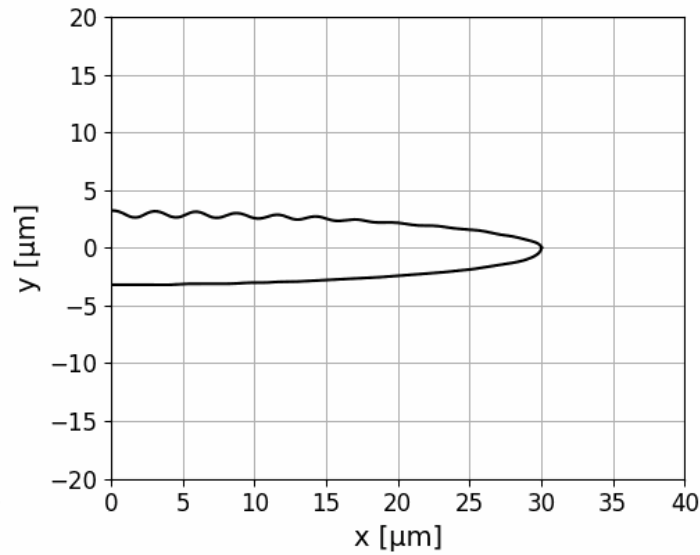
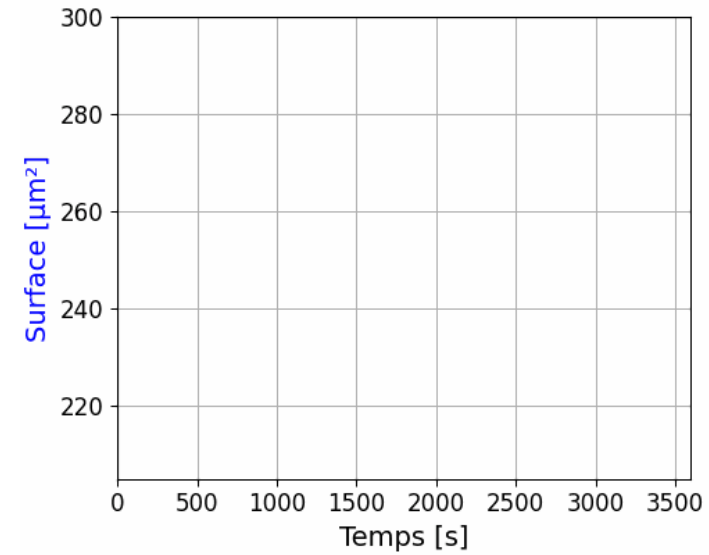
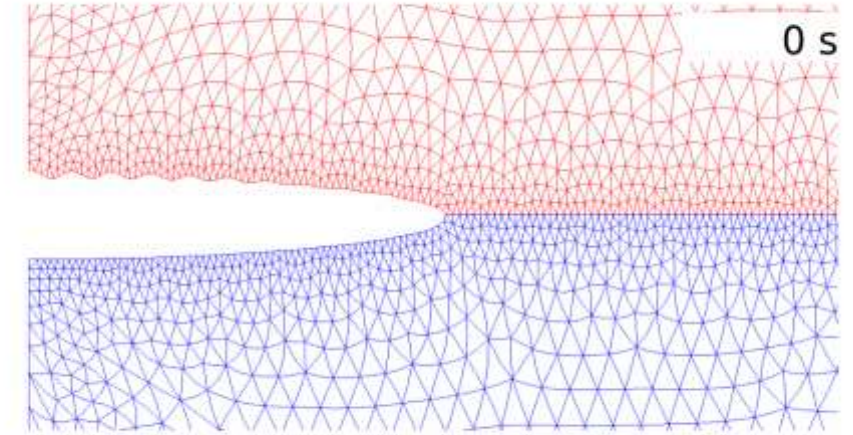
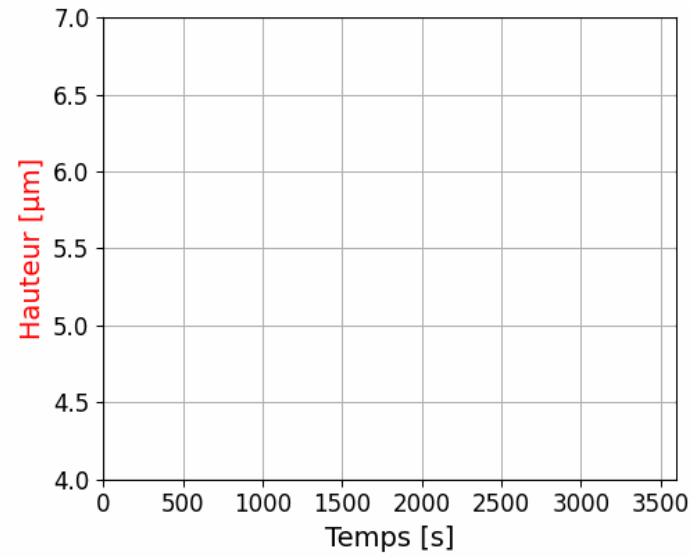
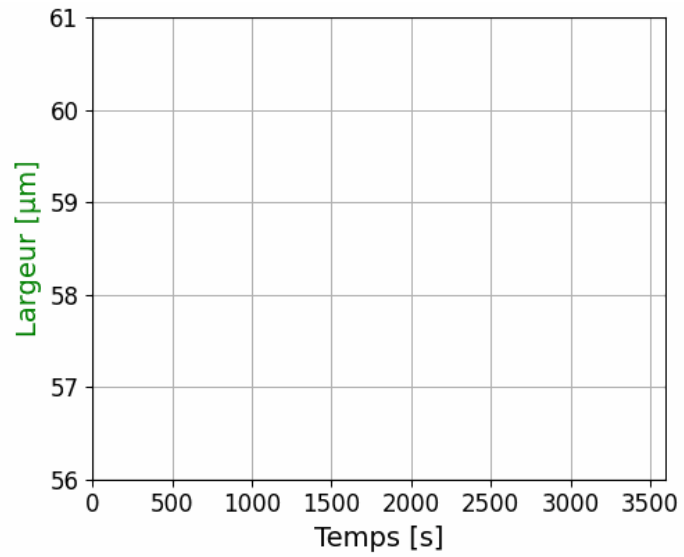
Cellule élémentaire modélisée



Simulation d'une cavité test



Simulation d'une cavité test



Cellule élémentaire modélisée

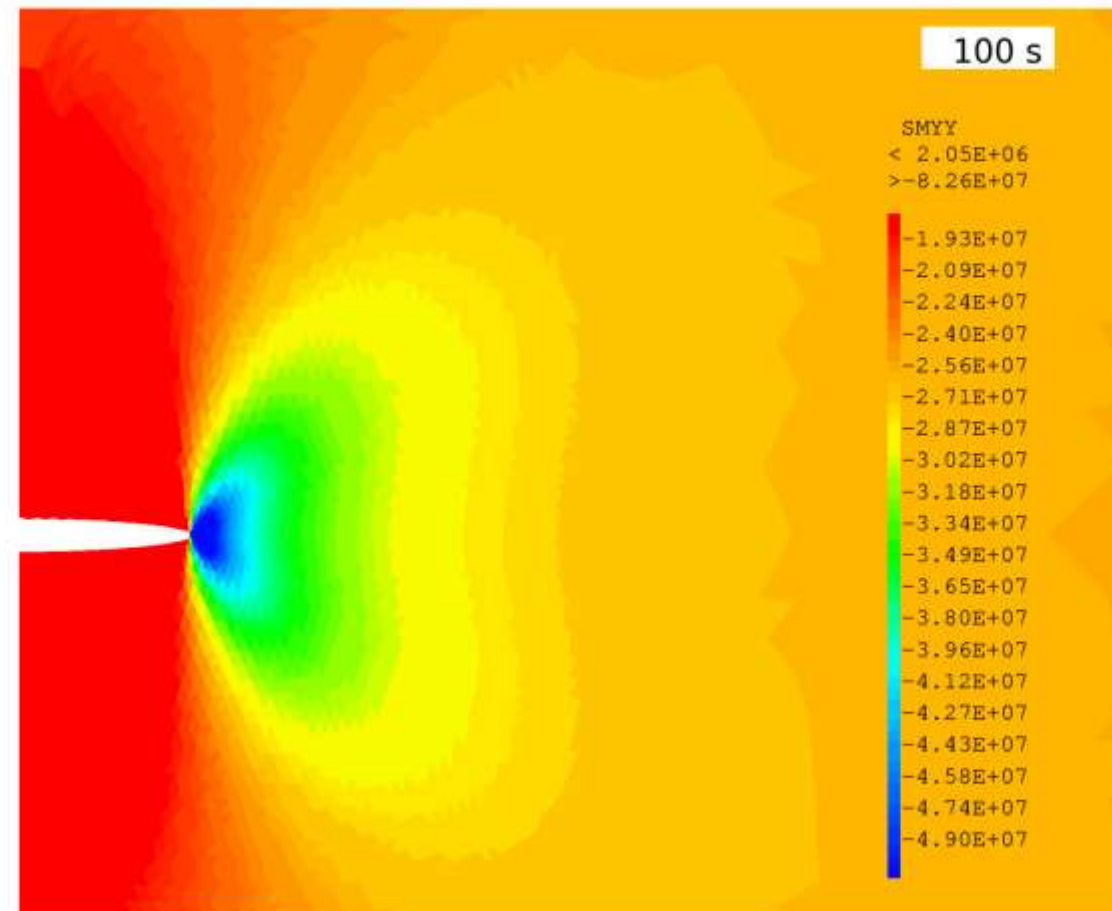
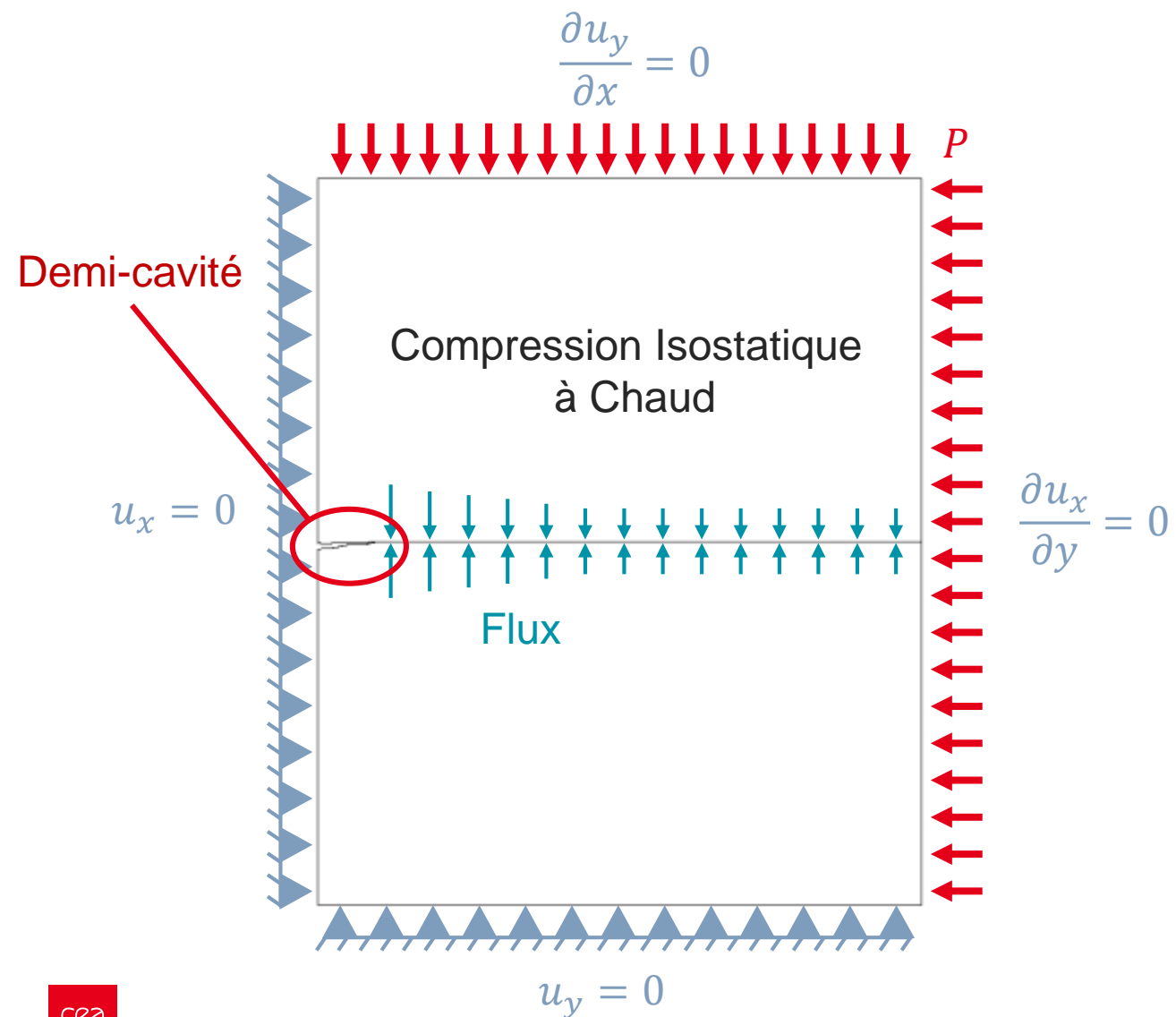
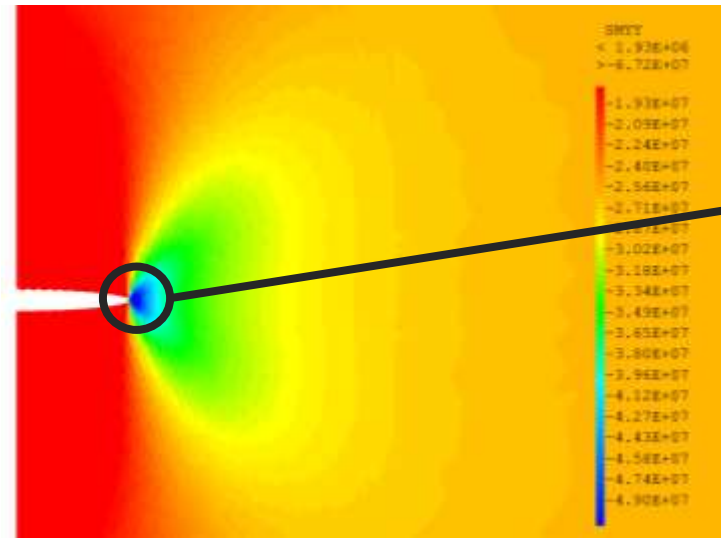
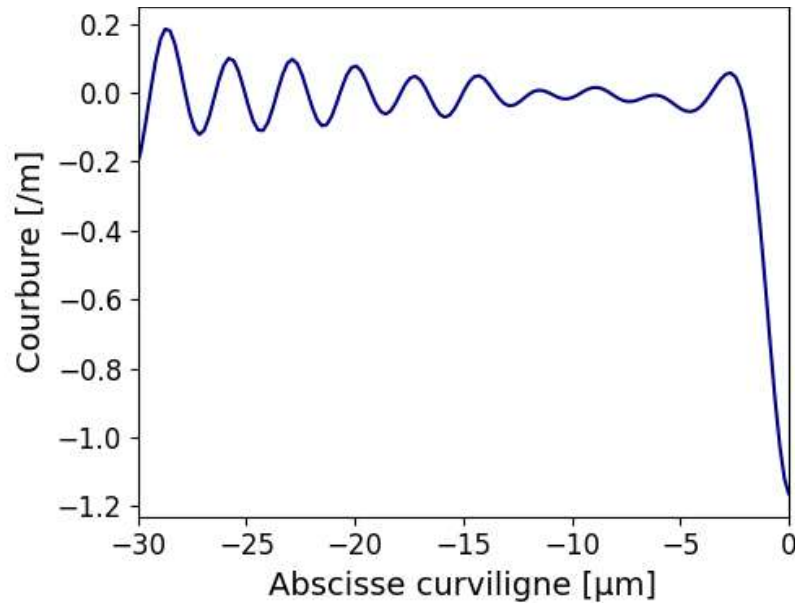
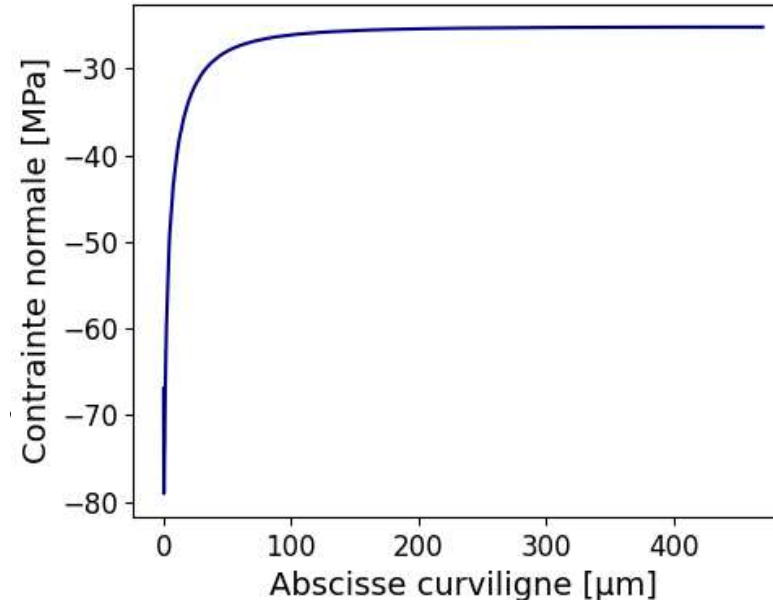
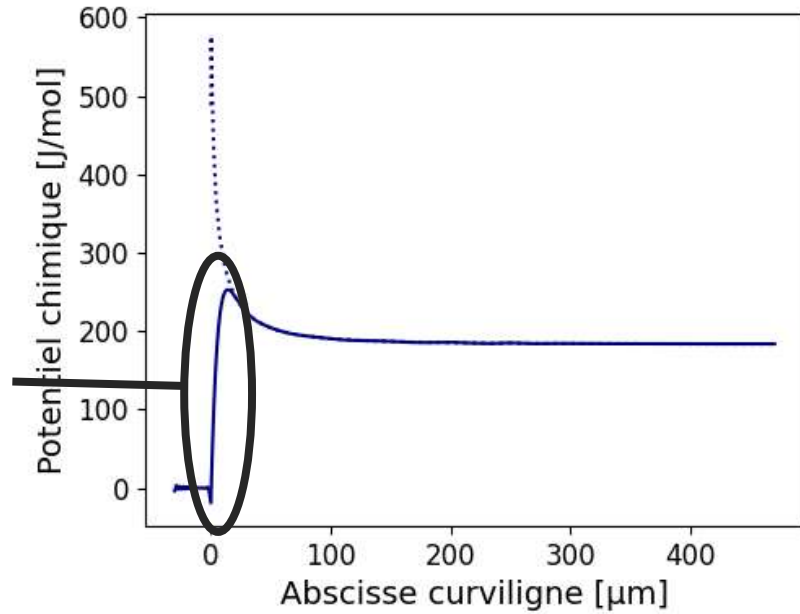


Illustration de l'hypothèse potentiel chimique

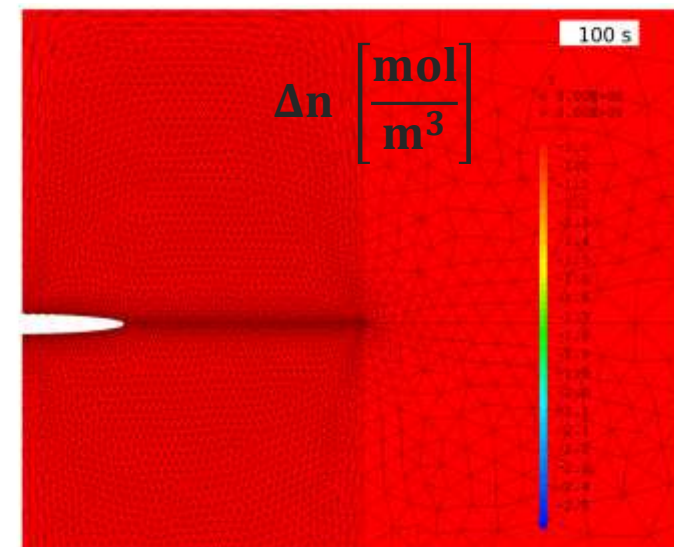
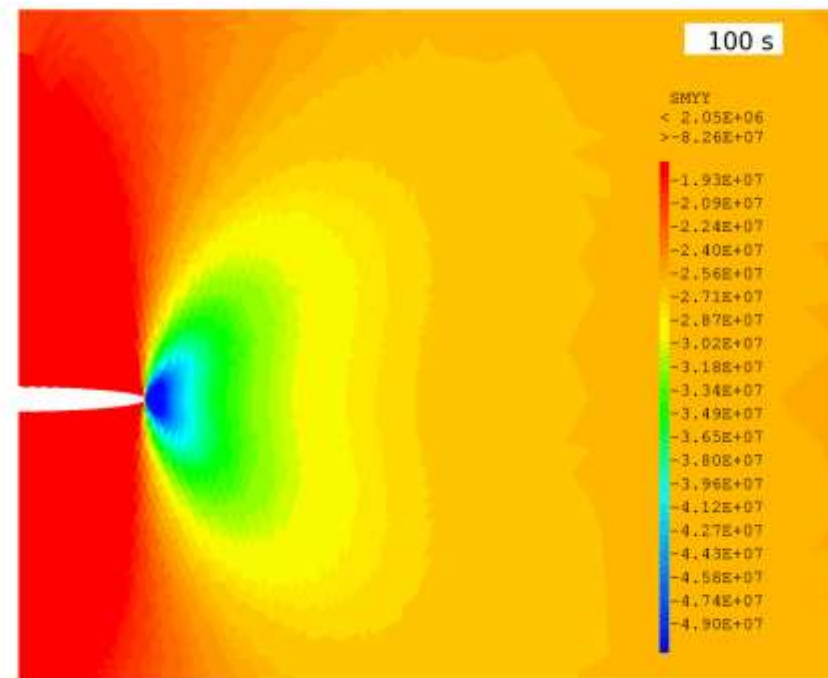
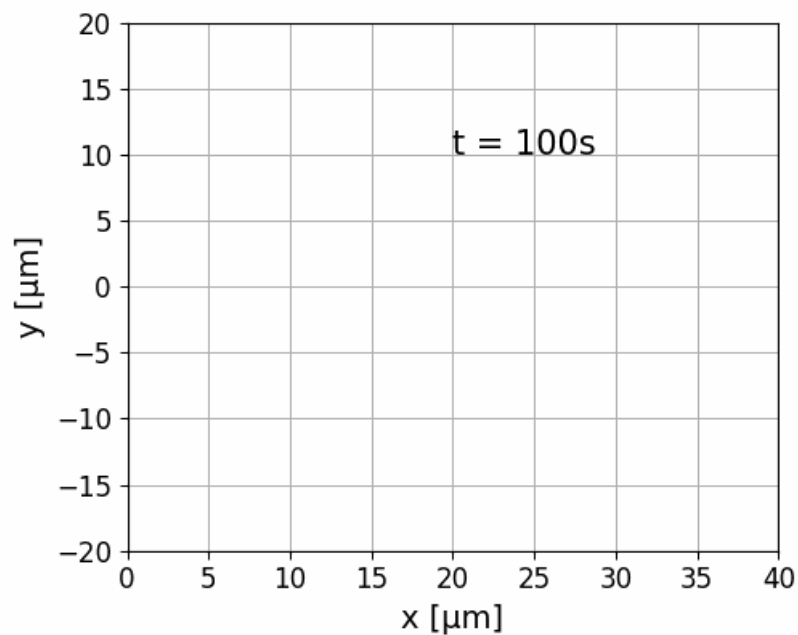
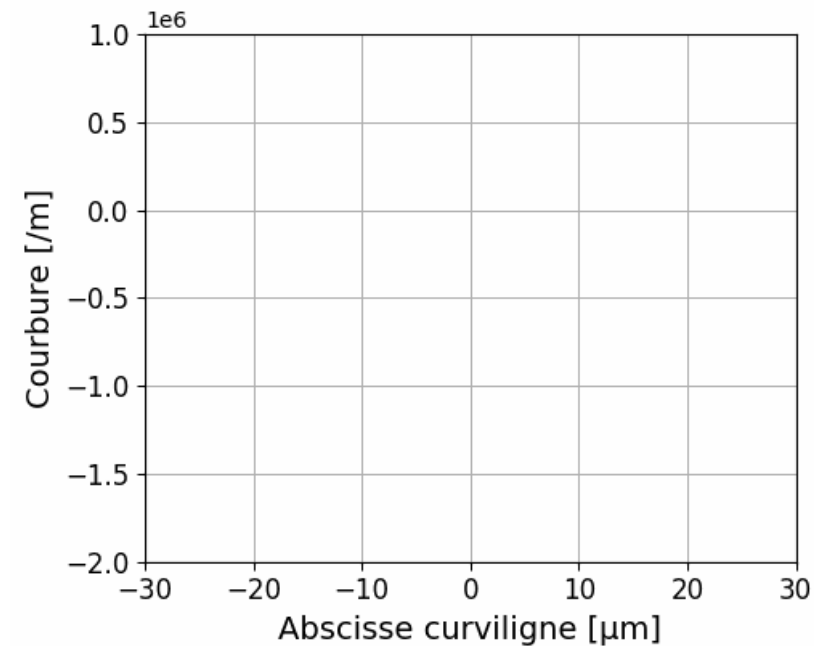
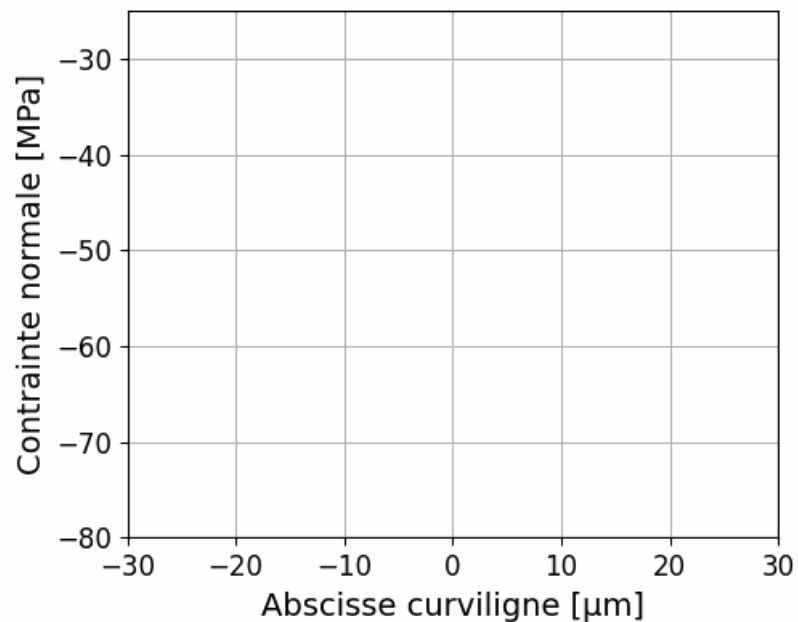
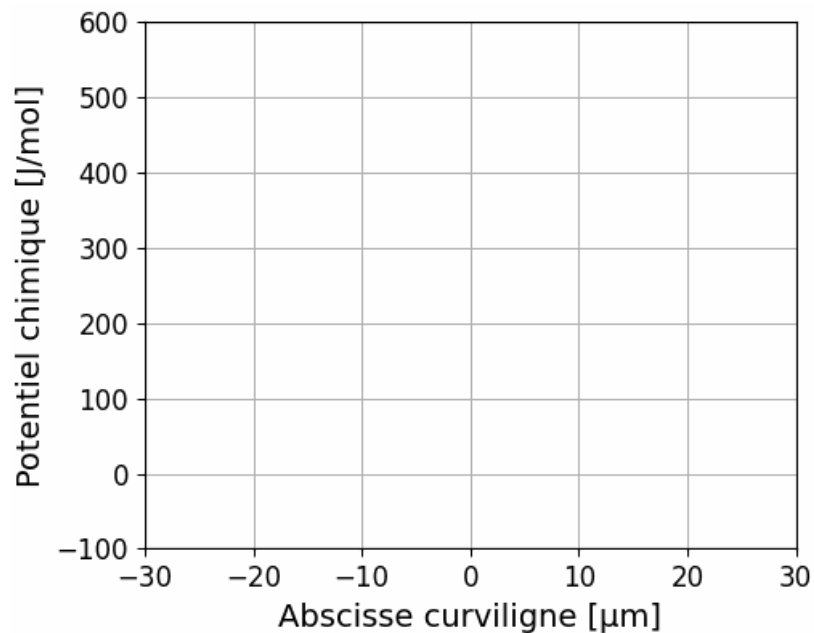


Continuité
forcée



Voisinage de la
singularité :
concentration de
contraintes

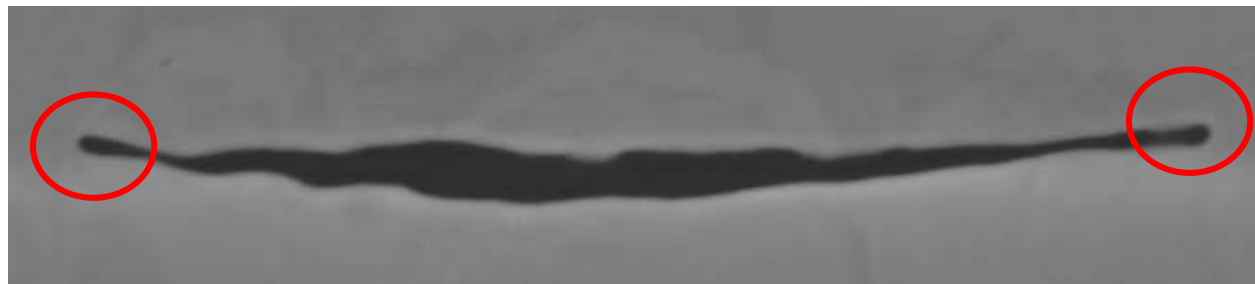
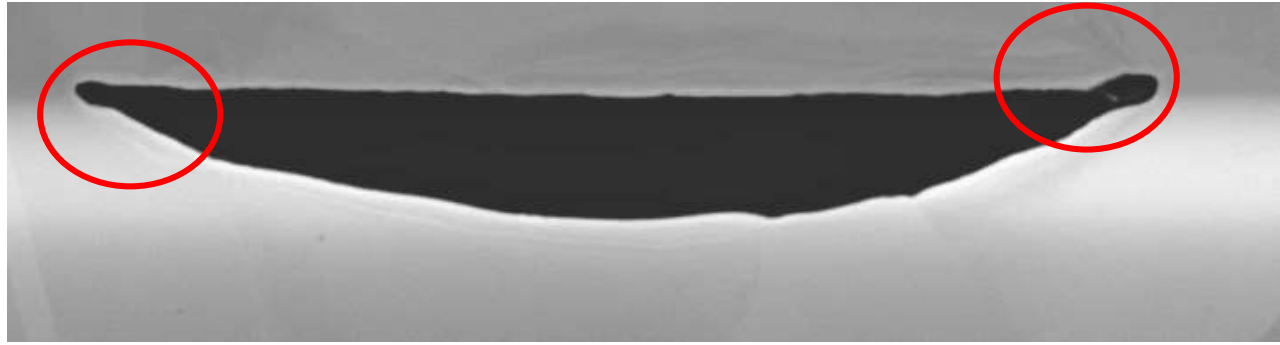
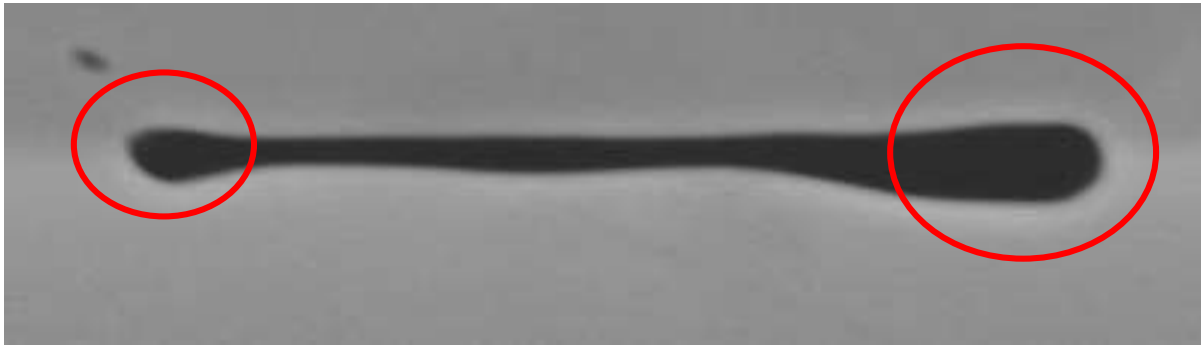
Simulation d'une cavité test





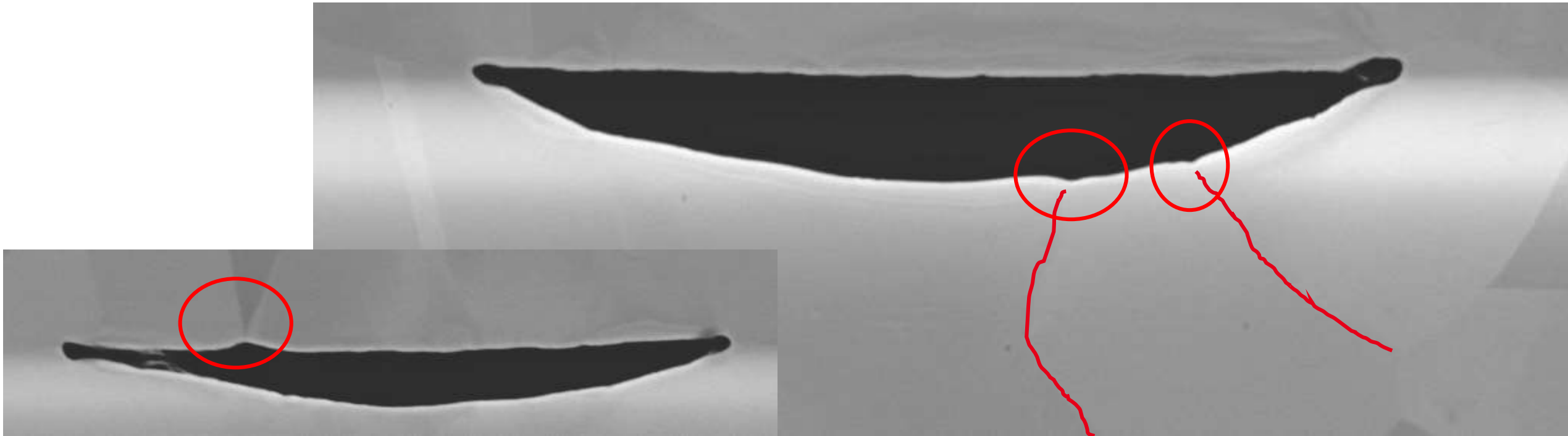
Différences finies sur domaine 1D

Observations sur géométrie modèle



Différences finies sur domaine 1D

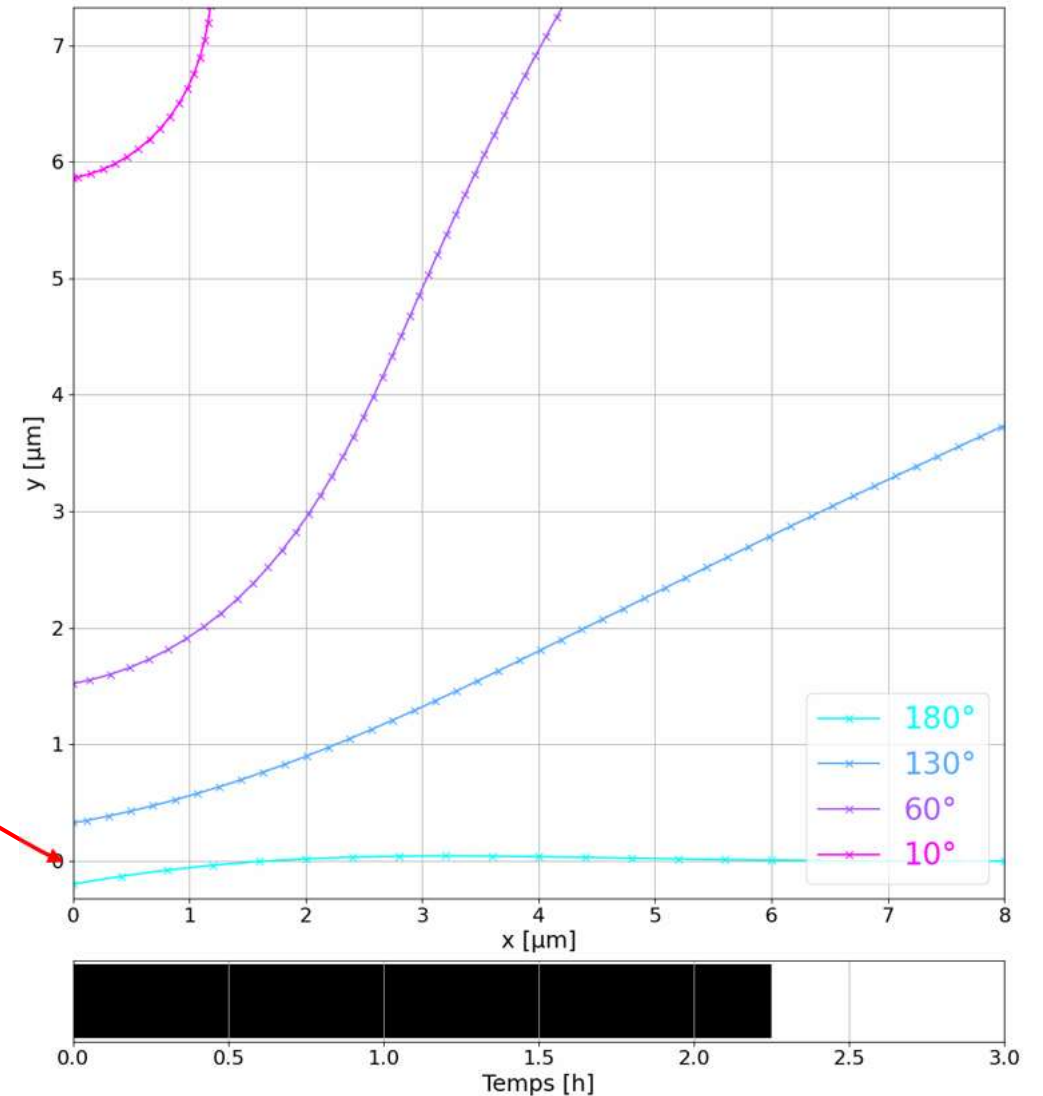
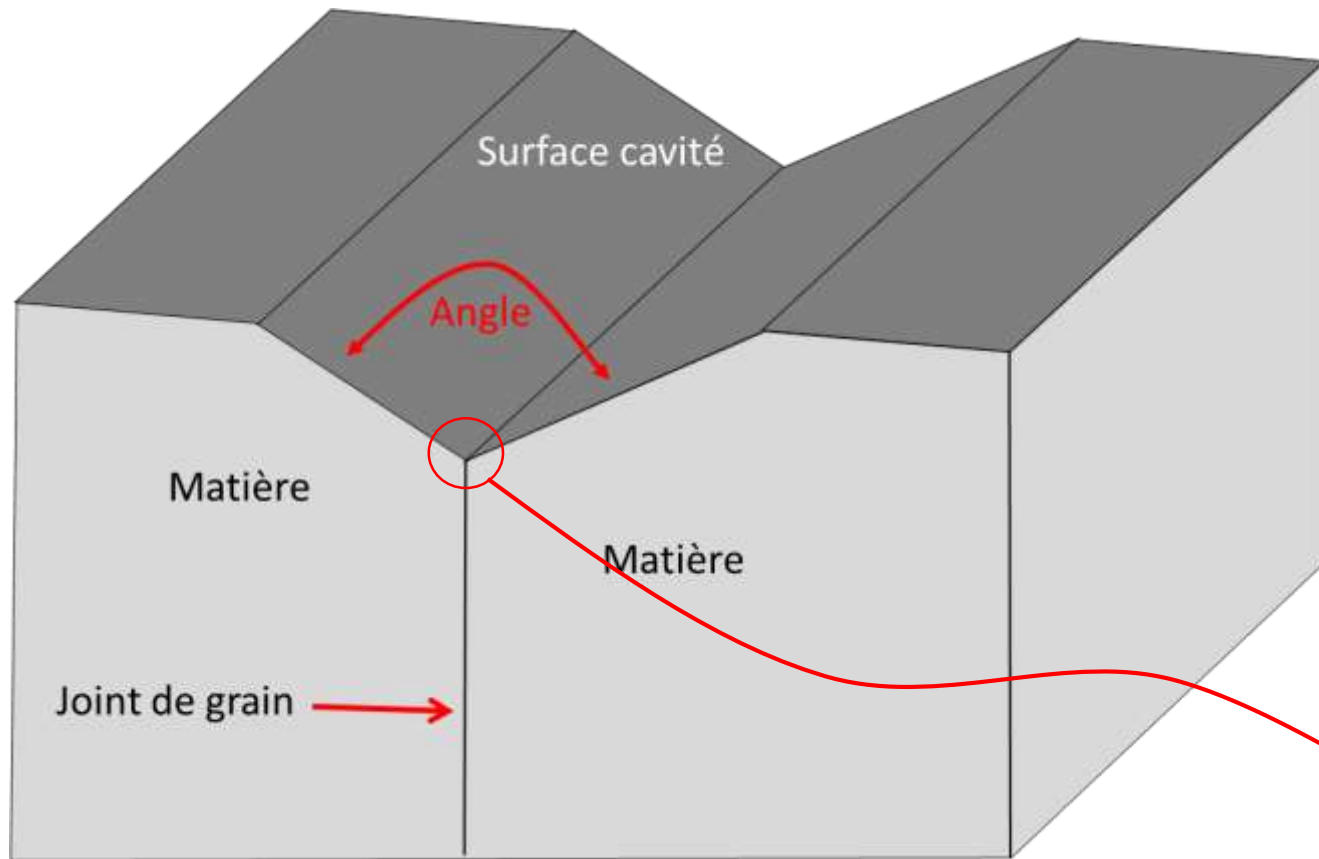
Observations sur géométrie modèle



- Courbure qui diminue aux points triples d'angles $< 160^\circ$ → arrondissement local des extrémités des cavités
- Courbure qui augmente pour les angles $> 180^\circ$ → la matière est « tirée »

Différences finies sur domaine 1D

Reproduction par le modèle de diffusion en surface

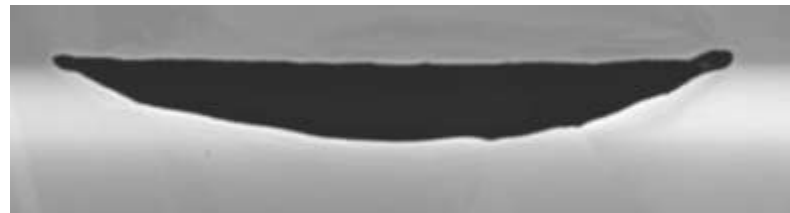
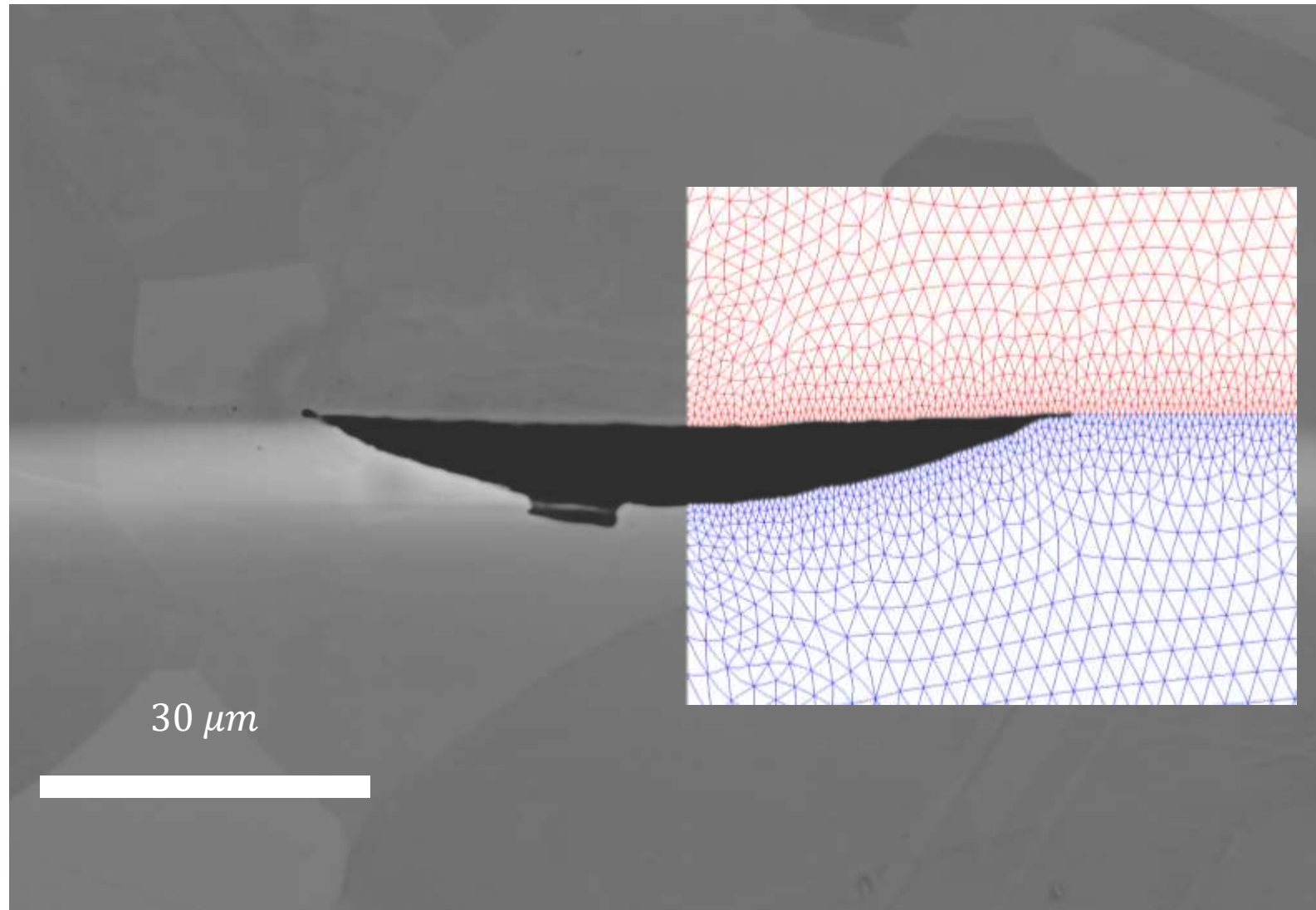




4. Validation sur cavité modèle

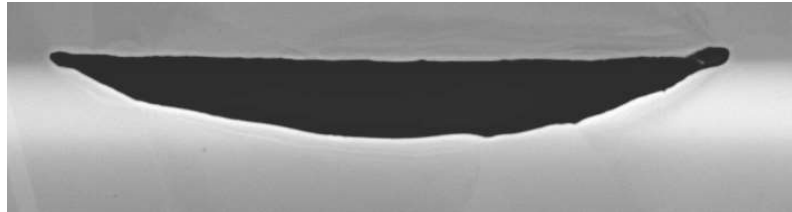
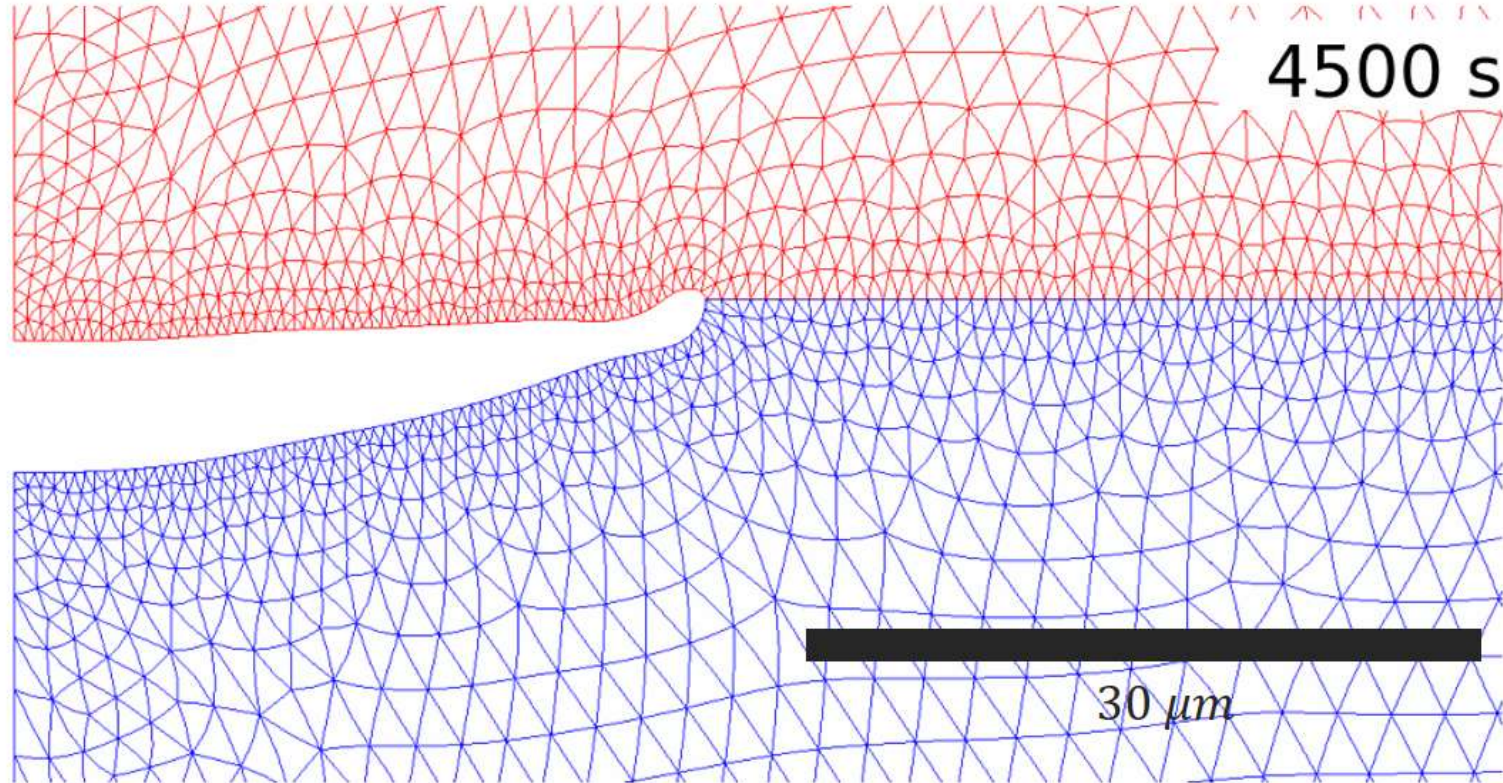
Exemple de simulation

HIP cycle 20 MPa 1040 °C

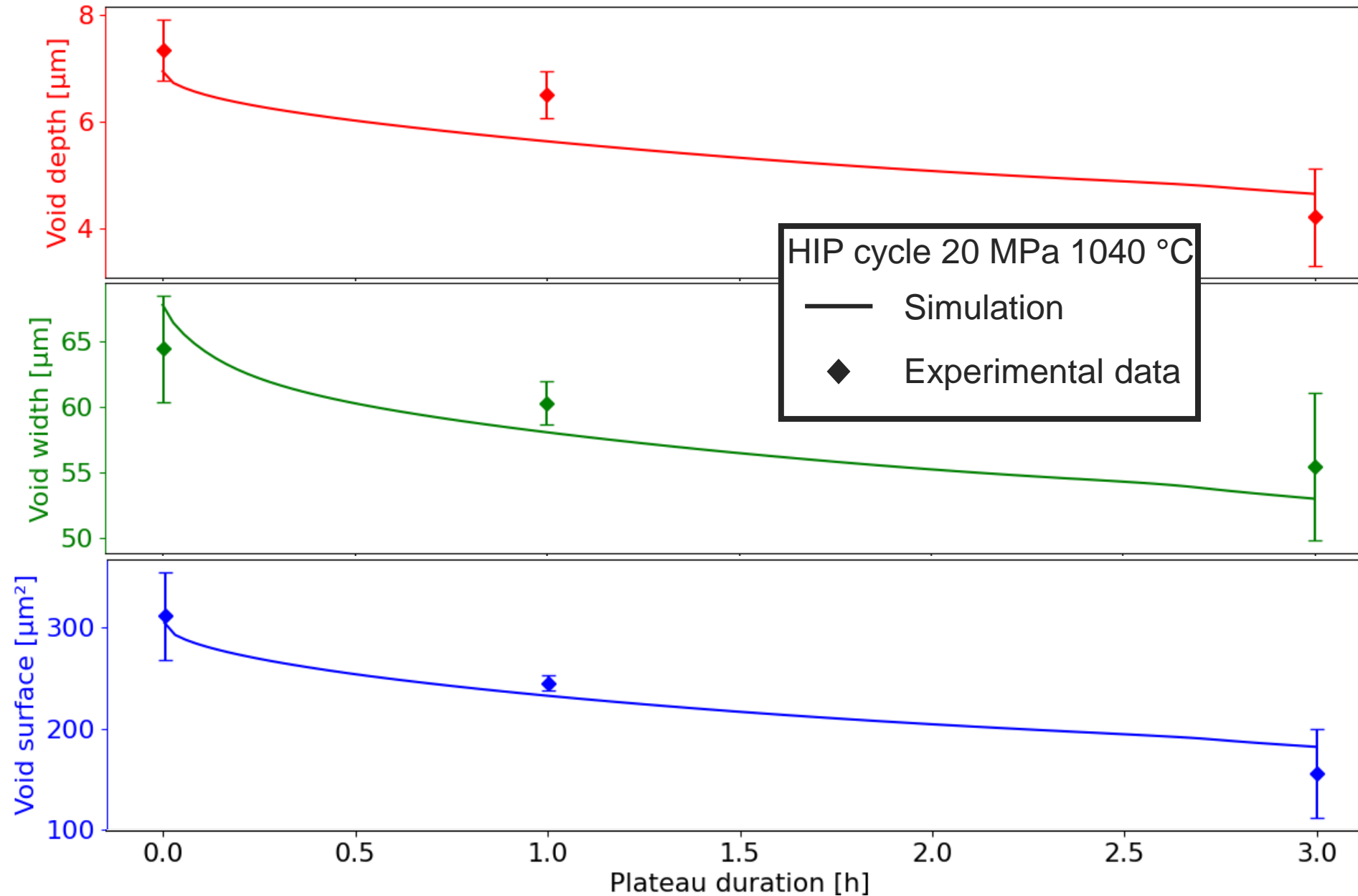


Exemple de simulation

HIP cycle 20 MPa 1040 °C



Expérimental // Simulation





5. **Conclusion**

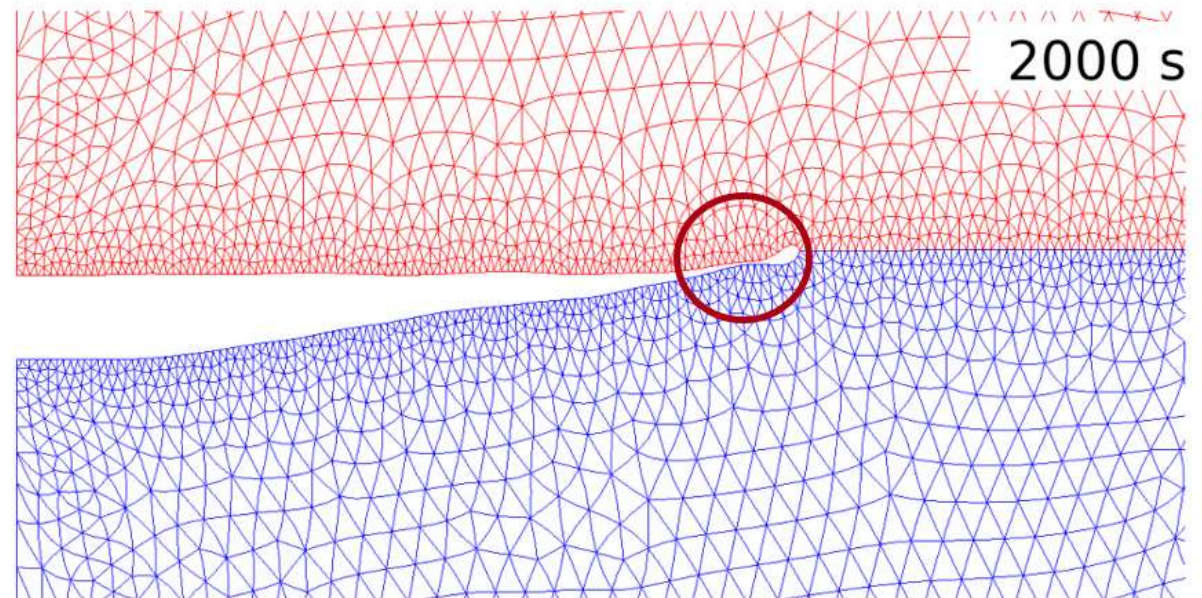
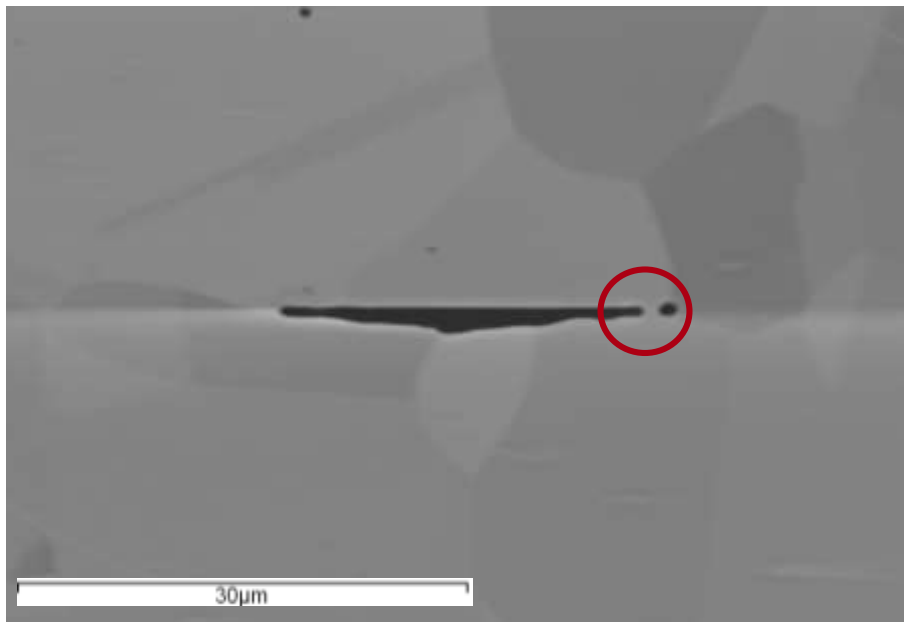
Conclusions et perspectives

Le modèle dans son état actuel :

- Décrit l'évolution d'une section de cavité cylindrique unique (en conditions isobar et isotherme)
- Qualitativement cohérent avec l'expérimental
- Encore du travail sur les hypothèses (singularité, et couplage 1D \leftrightarrow 2D sur interface)

Pour aller plus loin :

- Ajout du contact et formation de sous-cavités
- Terminer la comparaison quantitative
- Application au contact de deux profils de surfaces.






Questions ?

Références

- Maunay, Matthieu. « Echangeur de chaleur obtenu par soudage-diffusion : simulation des déformées et prédiction de la tenue mécanique des interfaces ». PhD Thesis, Université Grenoble Alpes, 2016.
- Takahashi, Y, F Ueno, et K Nishiguchi. « A Numerical Analysis of the Void-Shrinkage Process Controlled by Surface-Diffusion ». *Acta Metallurgica* 36, n° 11 (November 1st 1988): 3007-18.
- Hill, A., et E. R. Wallach. « Modelling Solid-State Diffusion Bonding ». *Acta Metallurgica* 37, n° 9 (September 1st 1989): 2425-37.
- Ferguson, Bryan. « Modeling and Experimental Analysis of Superplastic Forming and Diffusion Bonding ». PhD Thesis, University of Washington, 2020.
- Orhan, N, M Aksoy, et M Eroglu. « A New Model for Diffusion Bonding and Its Application to Duplex Alloys ». *Materials Science and Engineering: A* 271, n° 1 (November 1st 1999): 458-68.
- Ma, RuiFang, MiaoQuan Li, Hong Li, et WeiXin Yu. « Modeling of Void Closure in Diffusion Bonding Process Based on Dynamic Conditions ». *Science China Technological Sciences* 55, n° 9 (September 1st 2012): 2420-31.



This area is
blocked by the live
video from the
lecture hall or your
webcam.

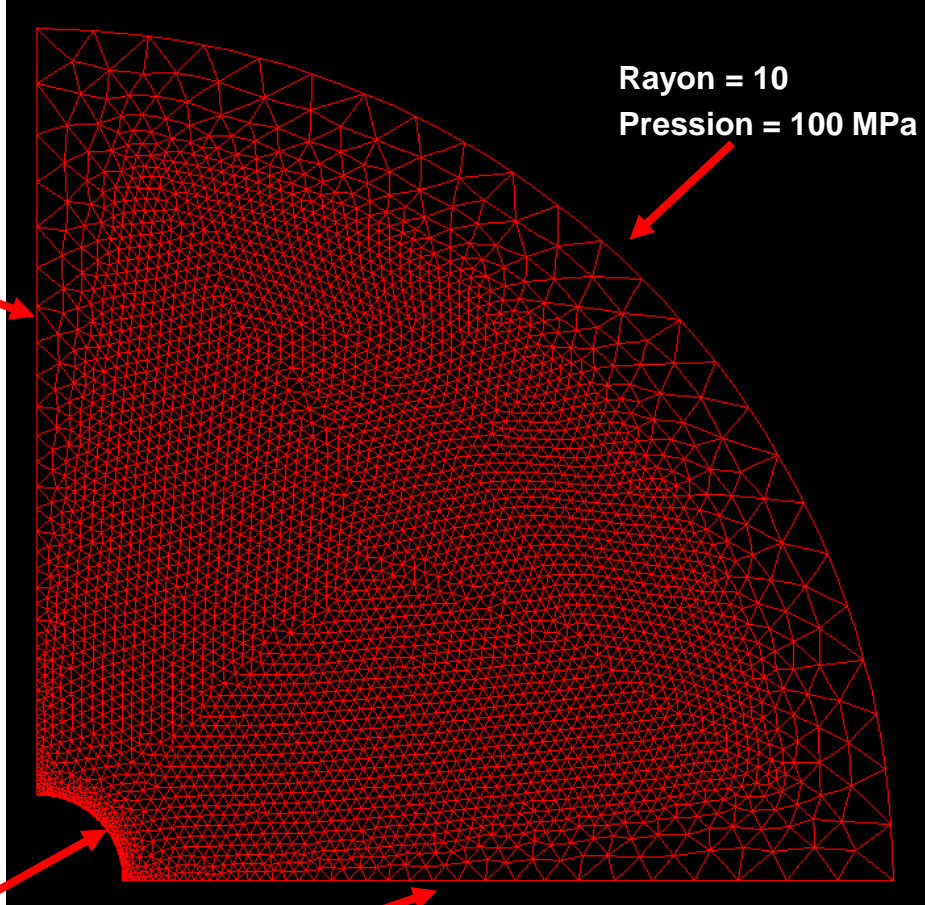
Z. Réserve

(Parenthèse) : problème avec la loi 'VISCOPLASTIQUE' 'PARFAIT'



```
OPTI DIME 2 ;
OPTI MODE 'AXIS' ;
OPTI ELEM 'TRI6' ;
```

Vertical
axe de symétrie axiale
(vertical)

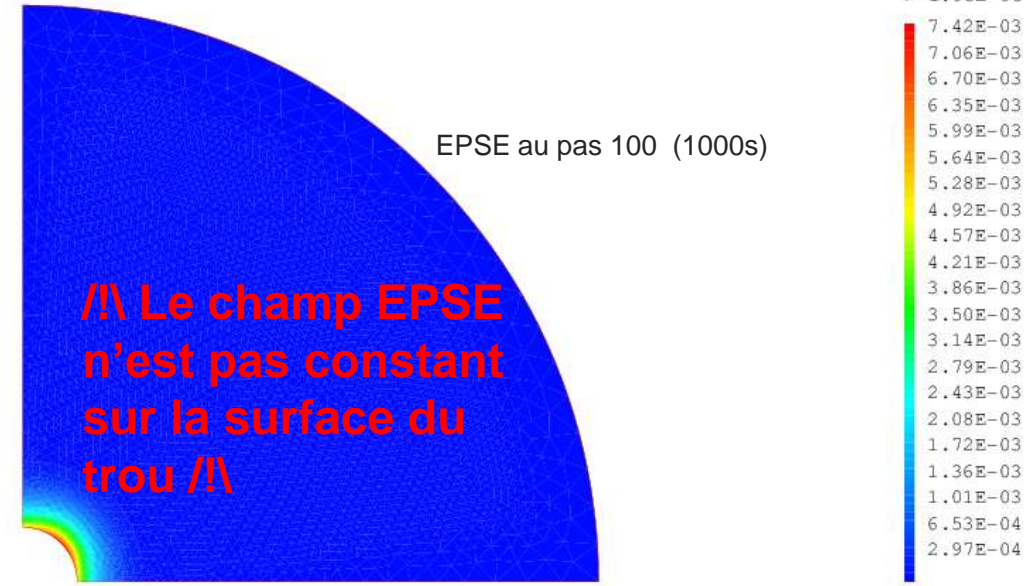


Rayon = 1

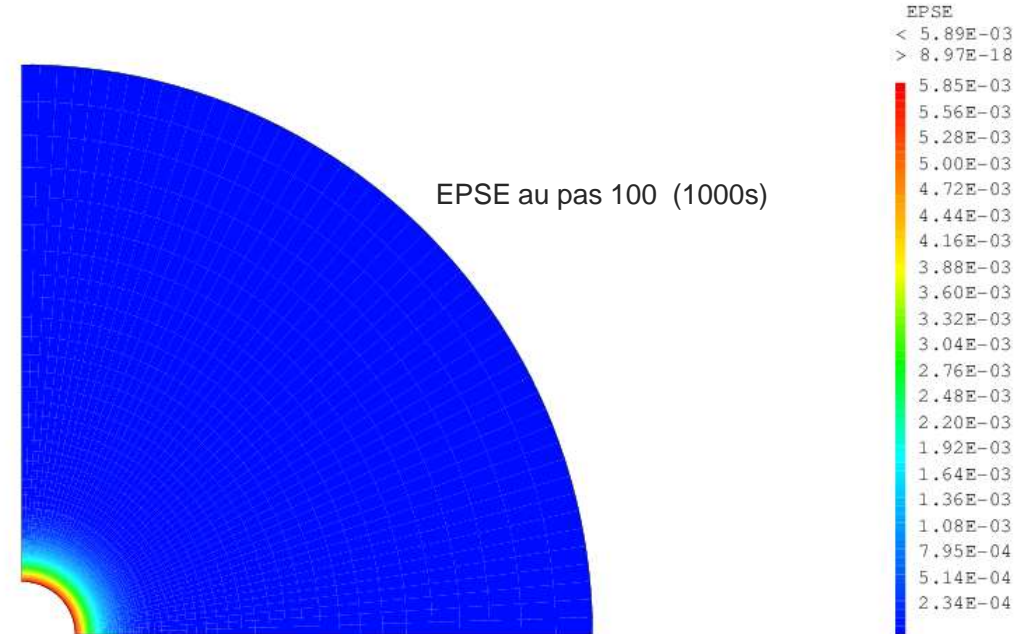
surface trou

Horizontal

axe de symétrie UZ = 0
(horizontal)



'VISCOPLASTIQUE' 'PARFAIT' 'BBAR' ;



'VISCOPLASTIQUE' 'CHABOCHE' 'BBAR'

Implantation dans PASAPAS

Résolution de la diffusion pendant l'appel de PASAPAS

→ Extraction champ méca depuis la table ESTIMATION (donc valeurs à la fin du pas de temps), servent de données d'entrée sur le même pas pour la diffusion car résolution implicite.

Dans PERSO1 :

→ Conf déformée à la fin du pas méca (utilisation de 'WTABLE'.GEO_DEB' en grands déplacements)

→ Calcul contrainte normale

→ Envoi à Python

→ Résolution de la diffusion

→ Conf après ajout de la diffusion

→ Remaillage

→ Conf après remaillage

→ Ecriture de la géométrie en fin de pas pour python

→ Mise à jour de 'ESTIMATION'.DEPLACEMENTS' et 'WTABLE'.GEO_DEB'