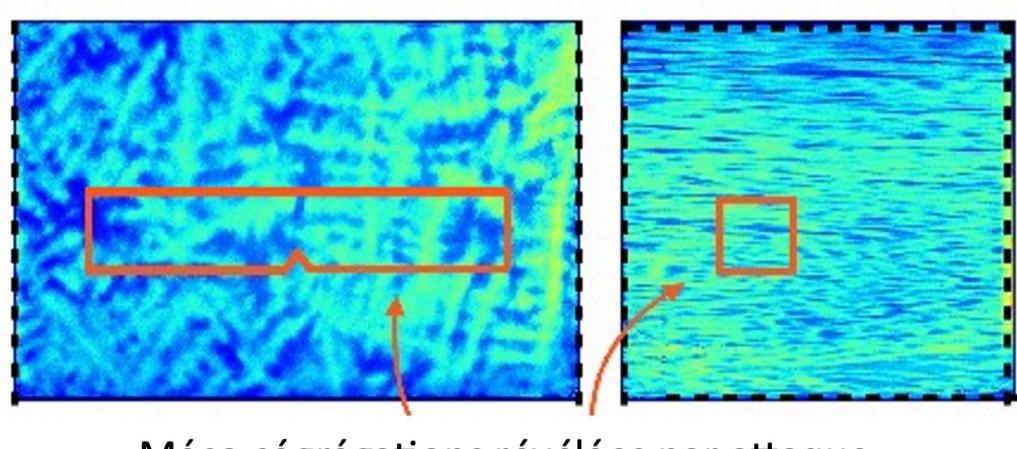


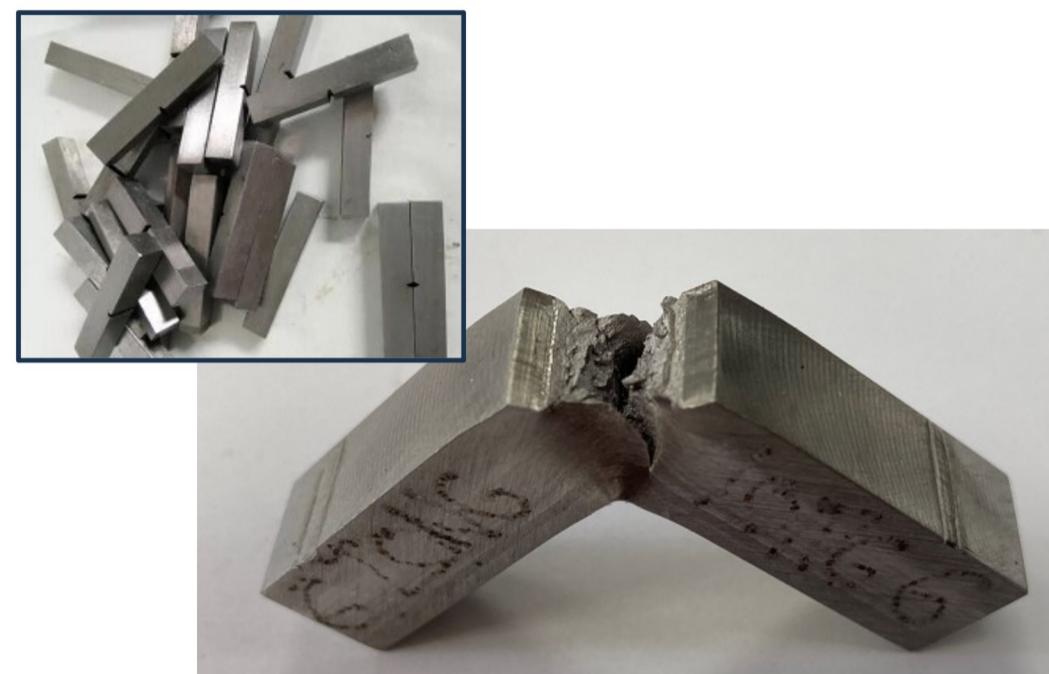
# Sûreté des réacteurs nucléaires : expérimentation et jumelage numérique

### Dispersion des propriétés à rupture des aciers pour gros composants forgés

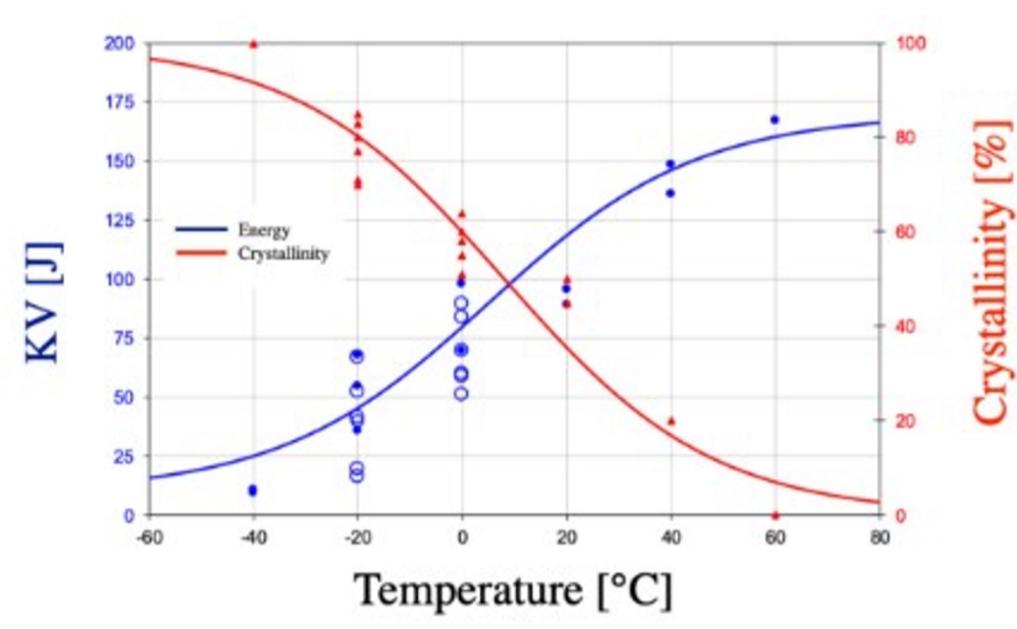
- Contexte: essais de résilience très dispersifs dans les pièces en acier forgées de grande taille  
→ "points bas" en résilience
- Problématique: comment la dispersion est-elle liée aux ségrégations en éléments d'alliage observées sur ces Matériaux ?



Meso-ségrégations révélées par attaque chimique au Nital en surface



Éprouvettes Charpy

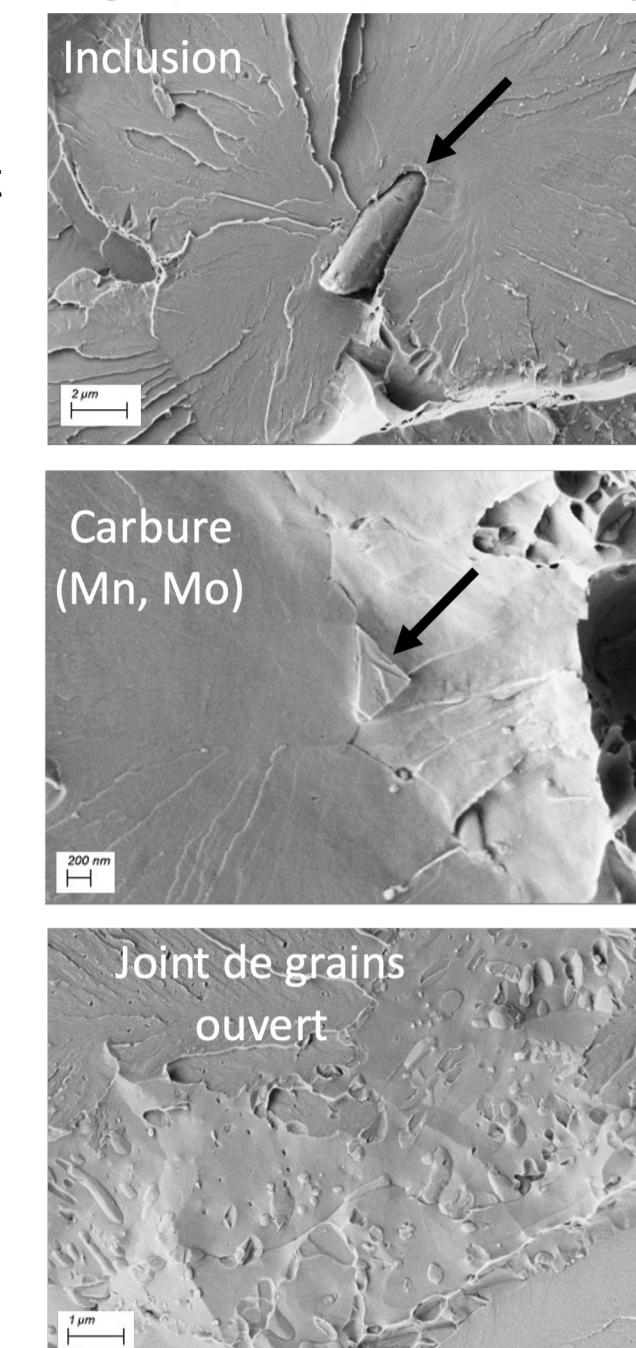


Résultats d'essais de résilience

### Nature du site d'amorçage de la rupture fragile

Typeologie des sites d'amorçage du clivage, déterminée par fractographie couplée à l'analyse chimique locale

- Sites majoritaires : carbures aux joints
- Autres sites : inclusions ; rarement : décohésion à un joint de grains



Inclusion  
Carbure (Mn, Mo)  
Joint de grains ouvert

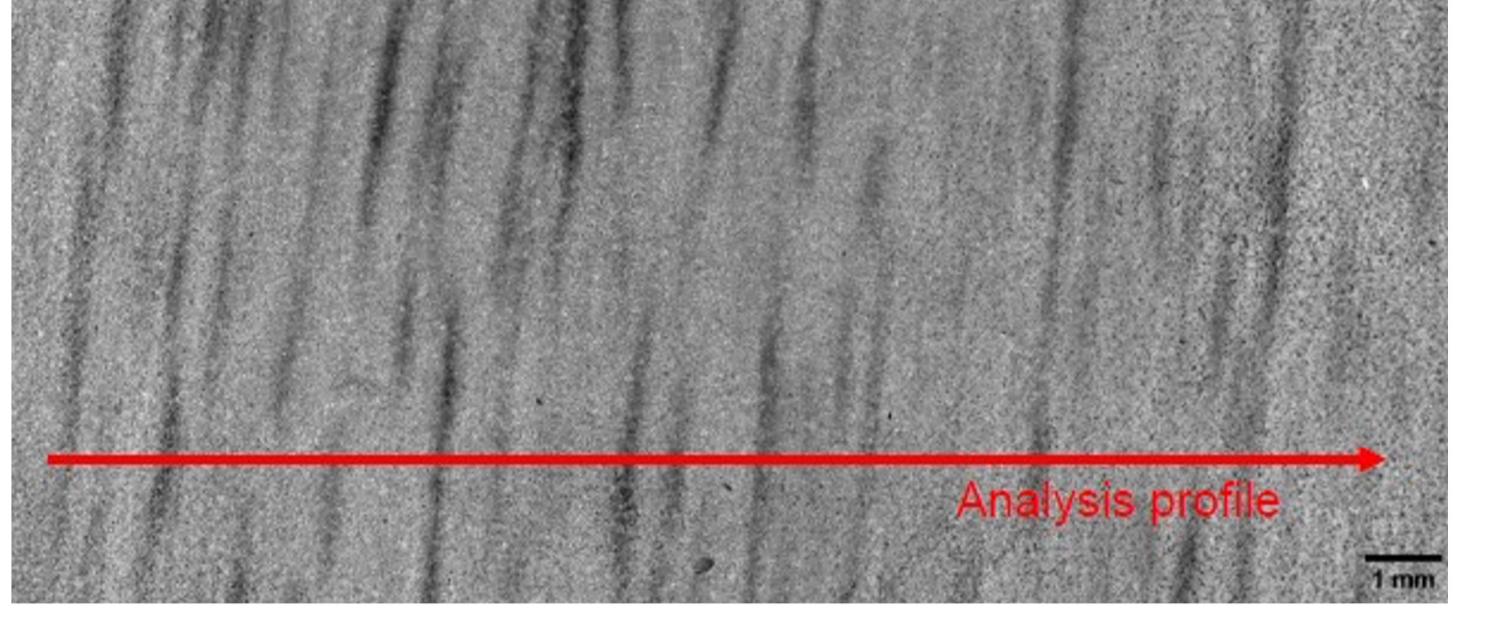
Site d'amorçage du clivage

10 µm EHT = 10.00 kV WD = 10.2 mm 15 Mar 2024 Signal A = SE2 R. Weisbecker et coll., EMMC19, 2024

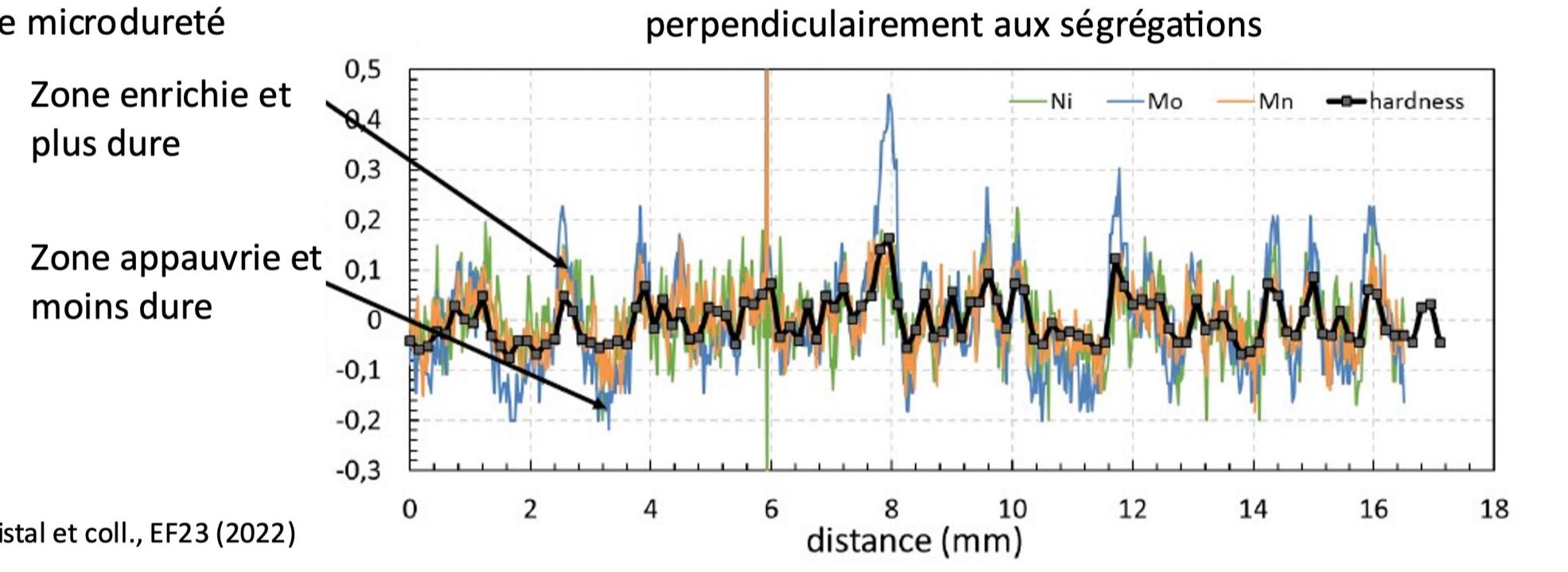
### Correspondance microstructure – composition – dureté

Reconnaître les ségrégations ?

- Méthode 1 : microscope optique après attaque métallographique (niveaux de gris)
- Méthode 2 : mesure de la composition chimique : Ni, Mo, Mn
- Méthode 3 : mesures de microdureté



Analysis profile



Profil de composition chimique et de microdureté (HV<sub>0,2</sub>) perpendiculairement aux ségrégations

Zone enrichie et plus dure  
Zone appauvrie et moins dure

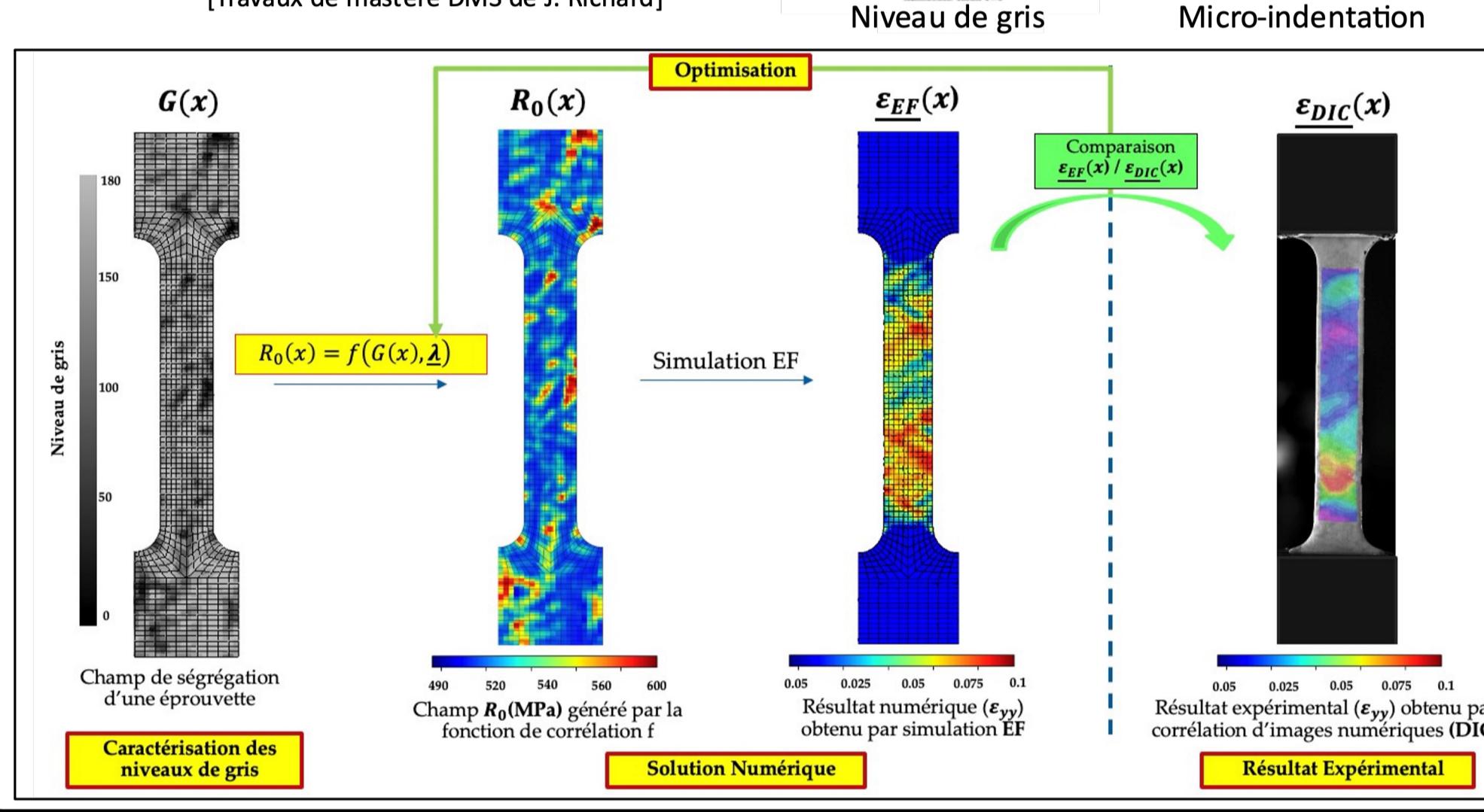
A. Christal et coll., ECF23 (2022)

### Approche non-standard pour caractériser les ségrégations

Limite d'élasticité  $R_0$  comme fonction du niveau de ségrégation ?

- Méthode 1 : micro-indentation
- Méthode 2 : approche inverse en utilisant les mesures de champs

[Travaux de mastère DMS de J. Richard]



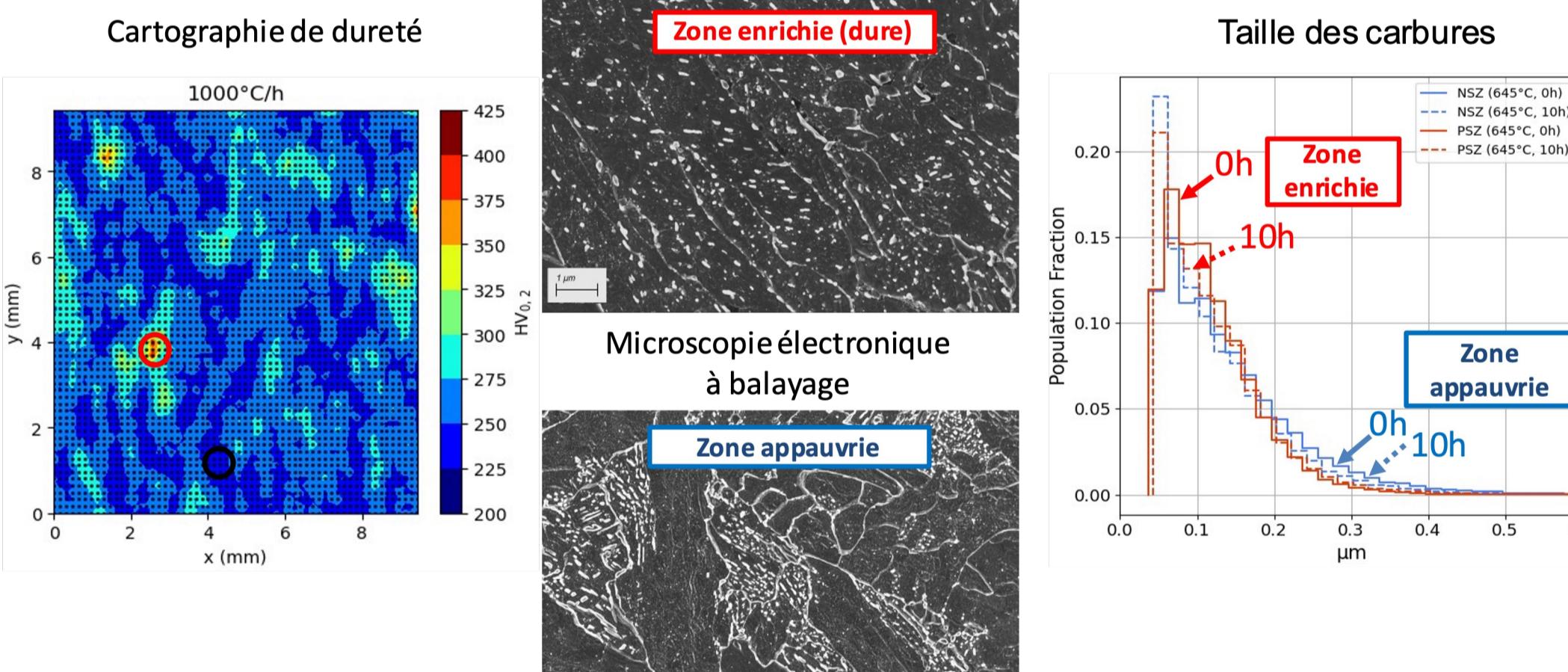
Niveau de gris  
Micro-indentation

G(x) → R<sub>0</sub>(x) → ε<sub>EP</sub>(x) → ε<sub>DIC</sub>(x)

Optimisation  
Comparaison ε<sub>EP</sub>(x) / ε<sub>DIC</sub>(x)  
Résultat numérique (ε<sub>EP</sub>) obtenu par simulation EF  
Résultat expérimental (ε<sub>DIC</sub>) obtenu par corrélation d'images numériques (DIC)

### Quantification des populations de carbures

Traitements thermiques en laboratoire, permettant l'analyse de l'évolution de la microstructure lors du traitement thermique de la pièce  
Revenu à 645 °C : arrêt après 0h et 10h



Cartographie de dureté  
Taille des carbures

Zone enrichie (dure)  
Zone appauvrie

Population fraction

1000°C/h  
y (mm)  
x (mm)  
Microscopie électronique à balayage

Zone enrichie (dure)  
Zone appauvrie

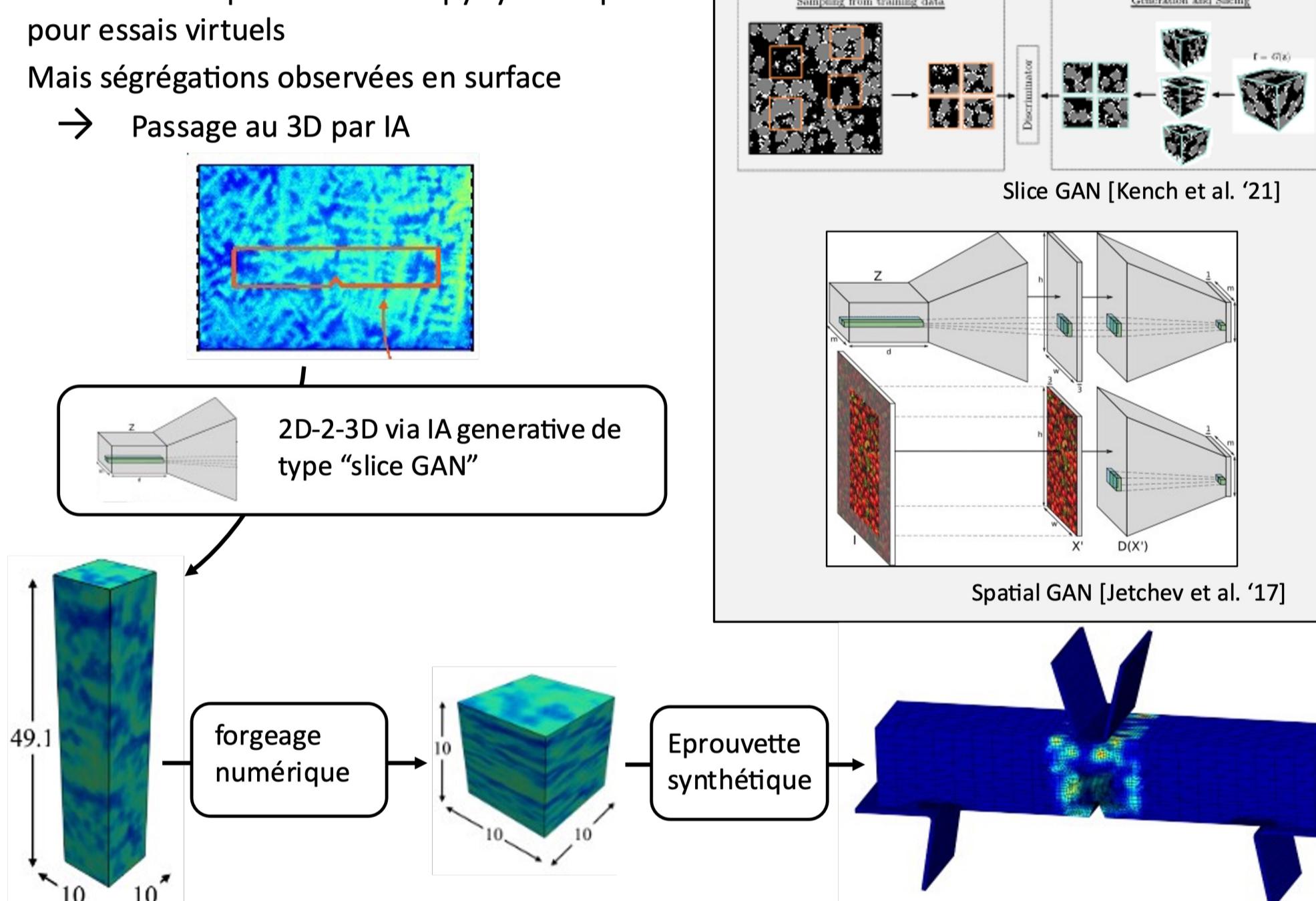
Taille moyenne des carbures : 120-140 nm, pas d'effet du temps de revenu entre 0h et 10h

R. Weisbecker et coll., EMMC19, 2024

### IA générative pour la reconstruction 3D des ségrégations

Génération d'éprouvettes Charpy synthétiques pour essais virtuels

Mais ségrégations observées en surface → Passage au 3D par IA



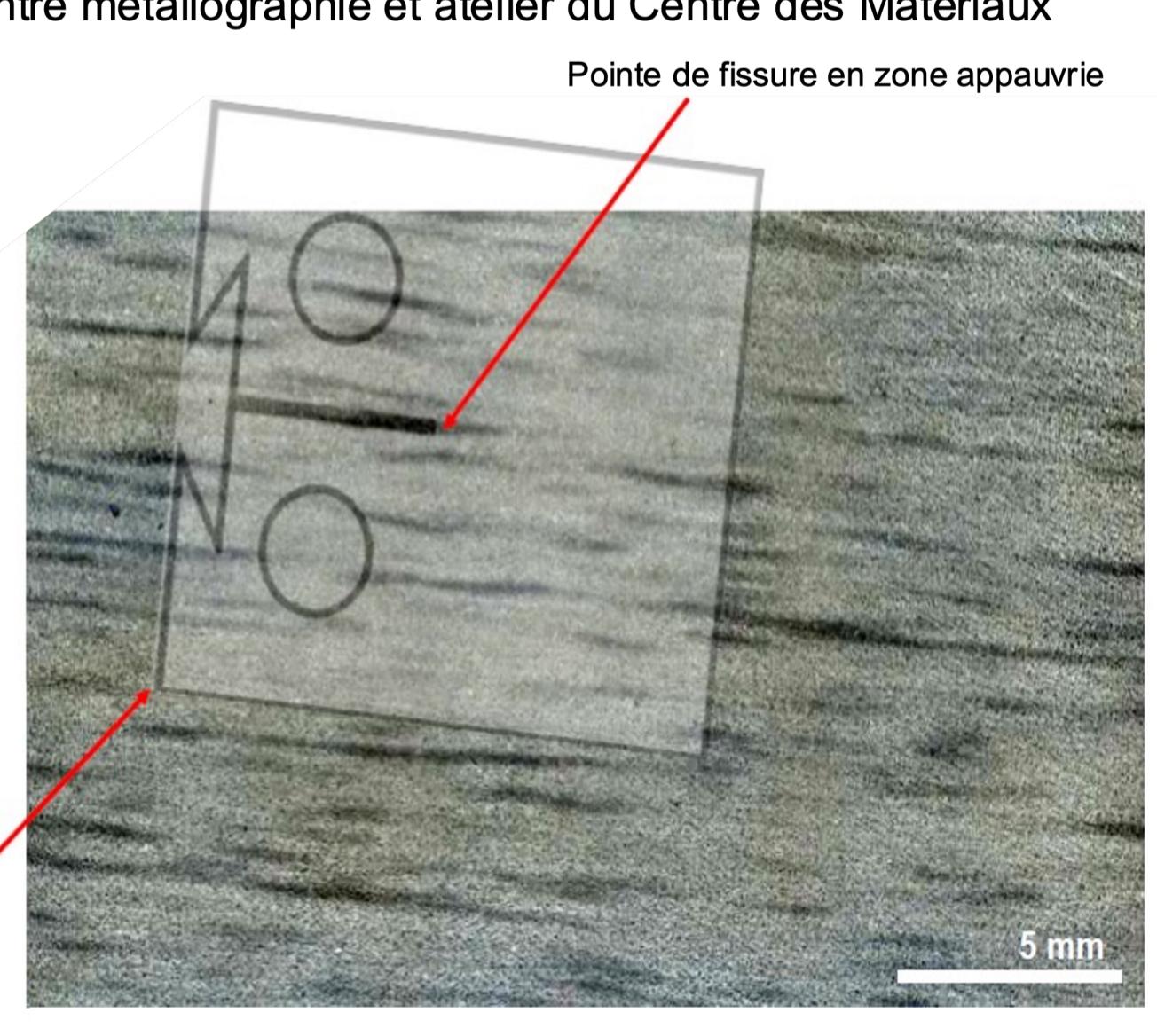
2D-2-3D via IA générative de type "slice GAN"  
Slice GAN [Kench et al. '21]  
Spatial GAN [Jetchev et al. '17]

Eprouvette synthétique

### Approche non-standard pour caractériser les ségrégations

Écart de ténacité entre zones ségrégées et zones appauvries ?

- Prélèvement d'éprouvettes ciblant l'un des deux types de zones
- Électroérosion, allers-retours entre métallographie et atelier du Centre des Matériaux



Pointe de fissure en zone appauvrie

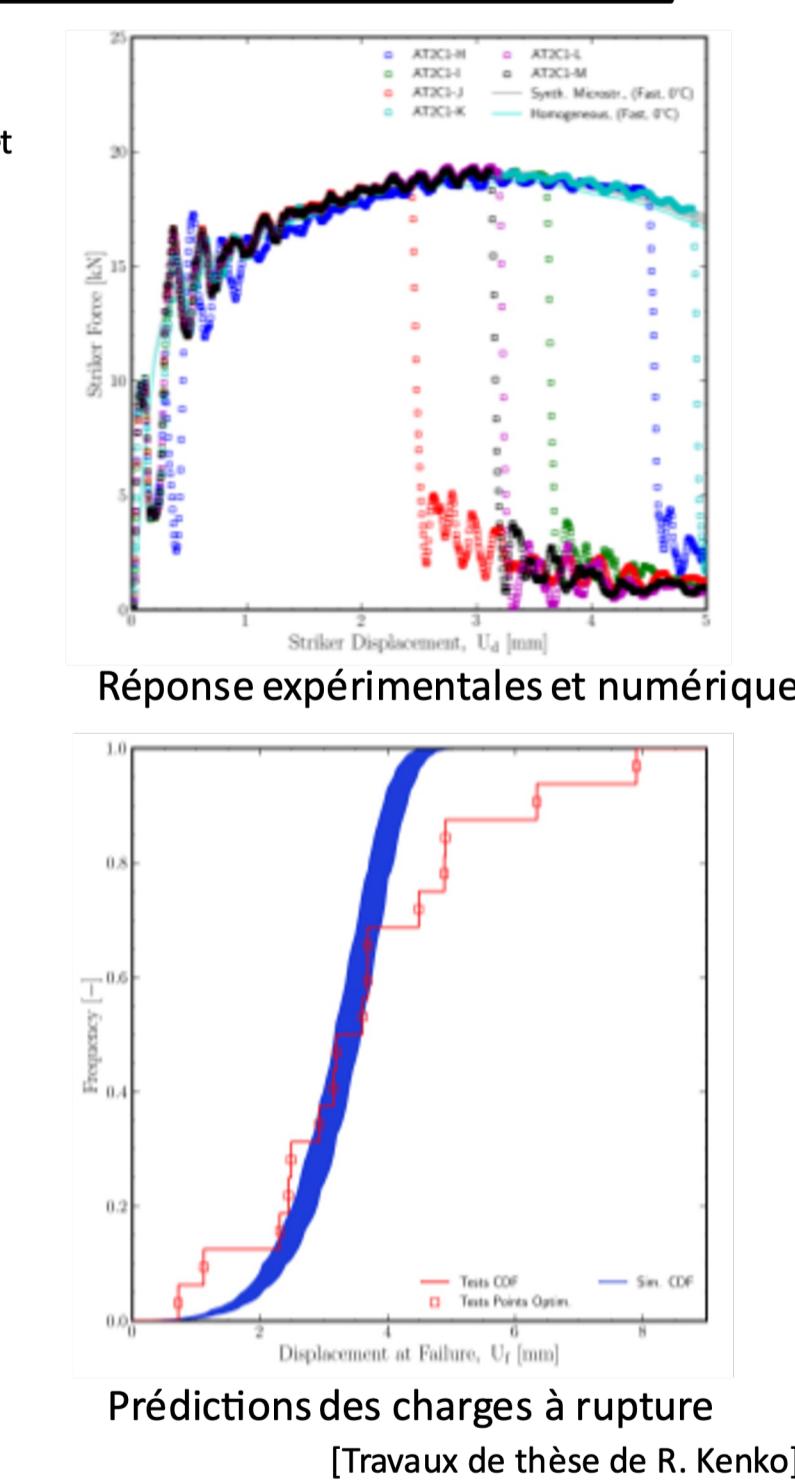
>20% des éprouvettes préfissurées dans la zone enrichie (sinuose, épaisseur 0,2 mm)

CT12.5  
CT4 mini

A. Christal et coll., ECF23, 2022

### Jumeaux numériques pour les essais de résilience

- Comportement élasto-visco-plastique avec limite d'élasticité indexée sur le niveau de ségrégation [Besson et al. '10]
- Modèle EF
- Intégration temporelle pour la fissure ductile, et critère statistique pour la transition ductile-fragile [Beremin '83]



Réponse expérimentales et numériques  
Strain Displacement, U<sub>d</sub> [mm]

Prédictions des charges à rupture [Travaux de thèse de R. Kenko]

Chercheurs permanents : Kais Ammar, Jacques Besson, Sylvain Dépinoy, Anne-Françoise Gourgues, Pierre Kerfriden

Elèves chercheurs (doctorants, mastériens DMS) : Emmanuelle Catel, Arthur Christal, Jean-Baptiste Delattre, Régis Kenko, Julie Papin, Julien Richard, Romain Weisbecker..

