

Effet de l'hétérogénéité des carbures sur la résistance à la rupture fragile de l'acier 16MND5

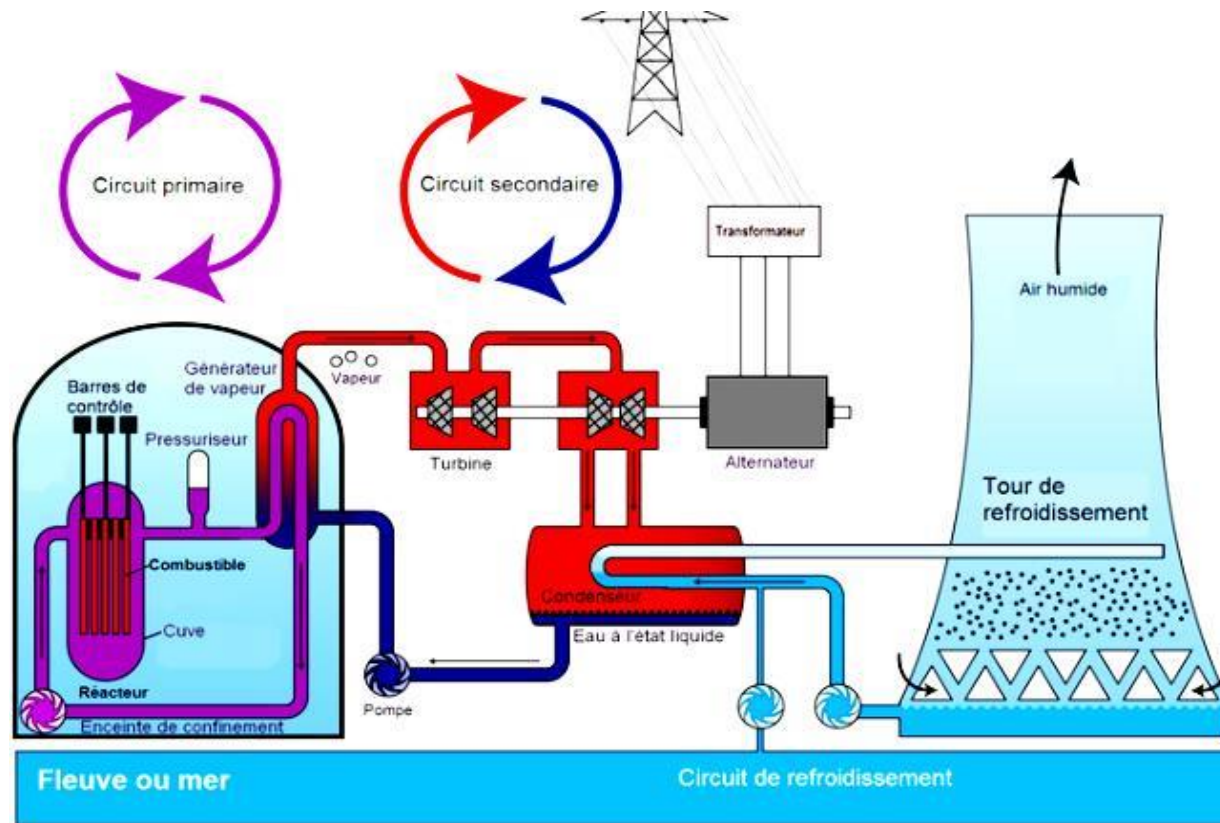
M. Berveiller, G. Blatman, F. Latourte (EDF R&D)

R. Décatoire (PHIMECA)



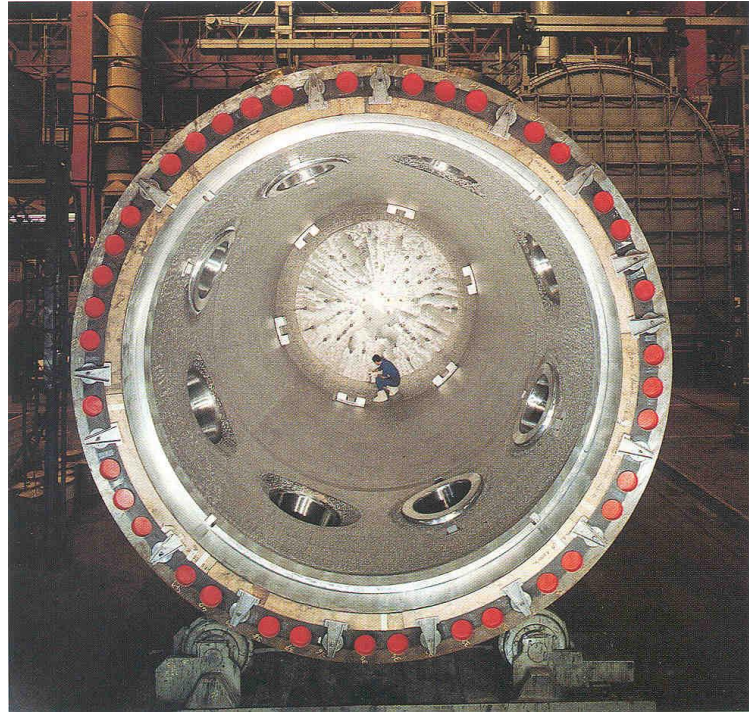
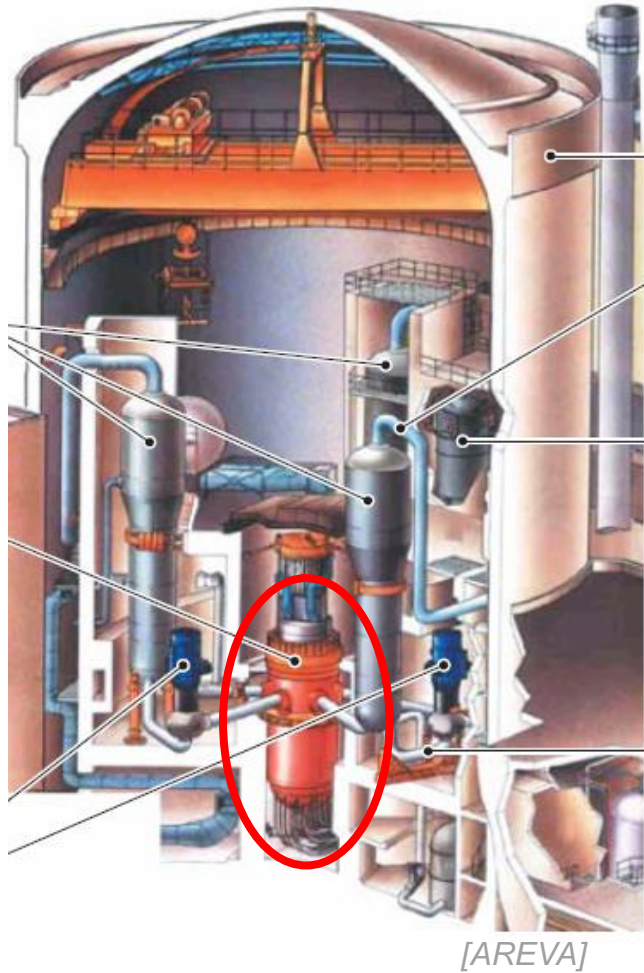
Sûreté des sites de production nucléaire

- ☐ Schéma de fonctionnement d'une centrale à eau pressurisée (REP)



- ☐ Évaluation de l'intégrité des composants du circuit primaire essentielle vis-à-vis de la sûreté (2^e barrière de confinement)

Composant d'intérêt : la cuve du réacteur

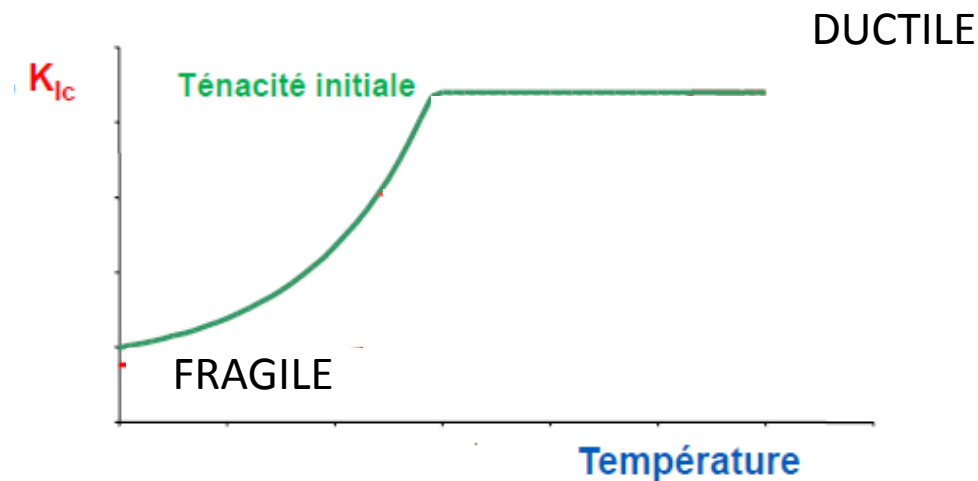


Matériaux :

- Acier ferritique faiblement allié : 16MND5
- Revêtement en acier inoxydable austénitique

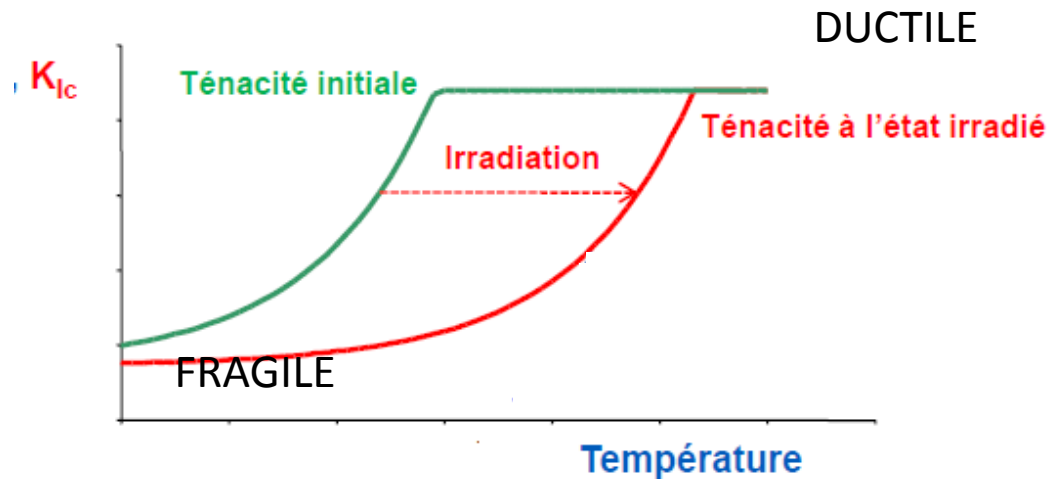
Sensibilité au risque de rupture fragile (1)

☐ Acier ferritique sensible à la rupture brutale fragile



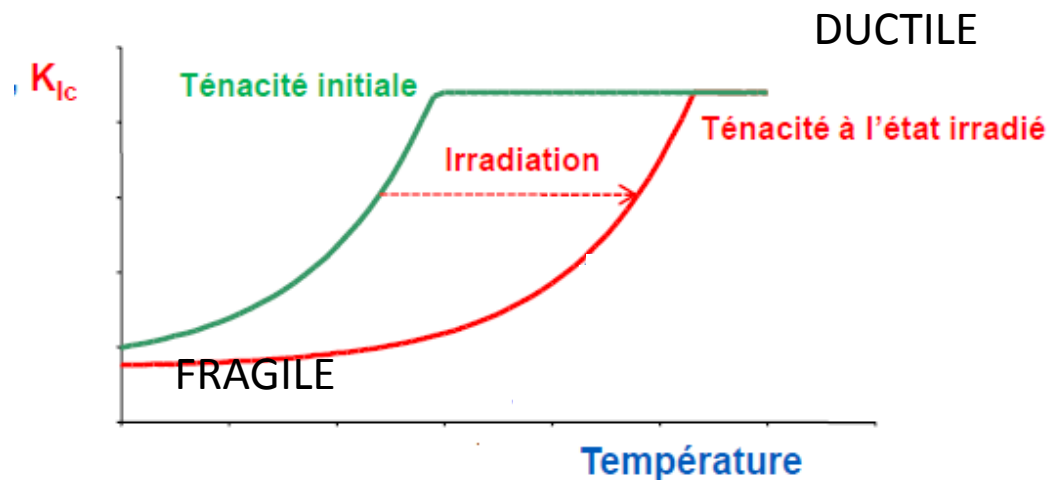
Sensibilité au risque de rupture fragile (1)

- ☒ Acier ferritique sensible à la rupture brutale fragile
- ☒ Irradiation dégrade la résistance du matériau



Sensibilité au risque de rupture fragile (1)

- ☐ Acier ferritique sensible à la rupture brutale fragile
- ☐ Irradiation dégrade la résistance du matériau



Contexte réglementaire : démontrer l'absence de risque de rupture brutale en toute situation

→ Nécessité de prendre en compte la fragilisation du matériau dans la démonstration

Sensibilité au risque de rupture fragile (2)

☒ Quelques cas de rupture fragile...

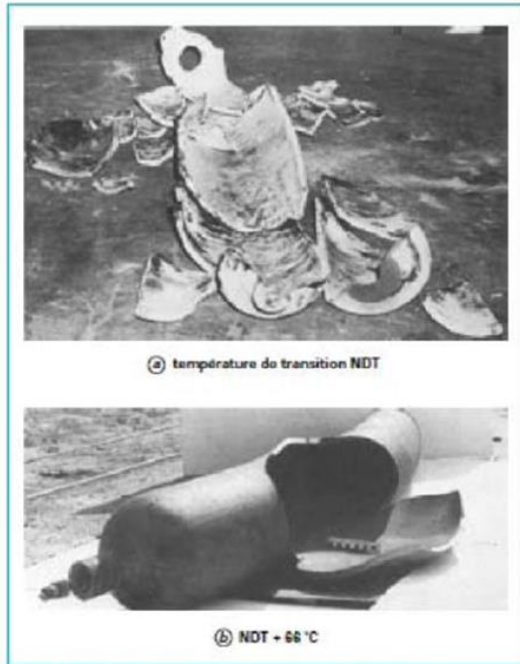
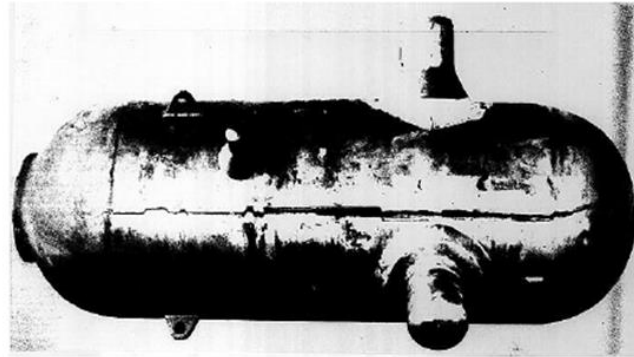


Figure 12 - Différence de comportement à l'éclatement d'un récipient sollicité à la température de transition NDT (Nil Ductility Temperature) et à NDT + 66 °C



Brittle failure of vessel during PTS experiment (ORNL)

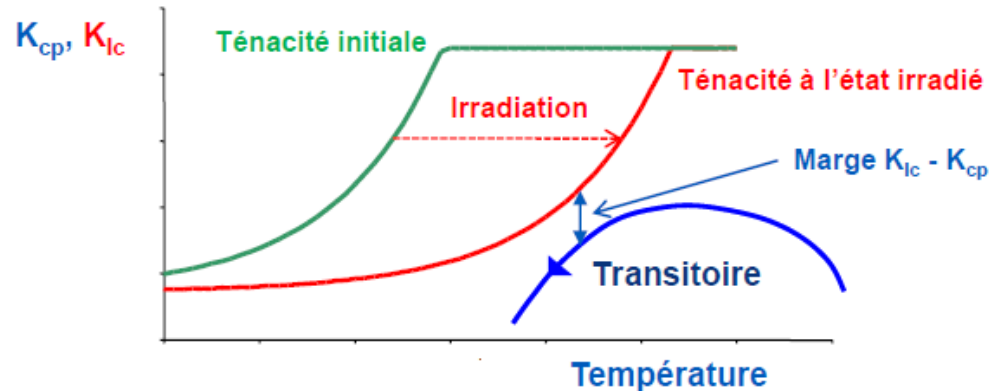
Boucharé, (NH), 1978, R.M. Peltois



Brittle failure of Liberty ship during WW II

Sensibilité au risque de rupture fragile (3)

- ☐ Justification mécanique basée sur une approche conservative et s'appuyant sur des méthodes codifiées (RSE-M)

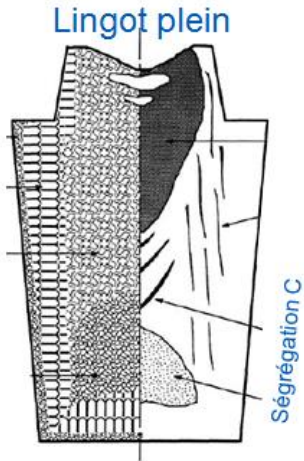


- ☐ Extension de la durée de fonctionnement → Développement de méthodes alternatives moins conservatives, plus ou moins raffinées
 - Préchargement à chaud (WPS)
 - Thermohydraulique 3D (→ transitoires réalistes)
 - Modélisation multi-échelles
 - Approche locale de la rupture
 - etc.

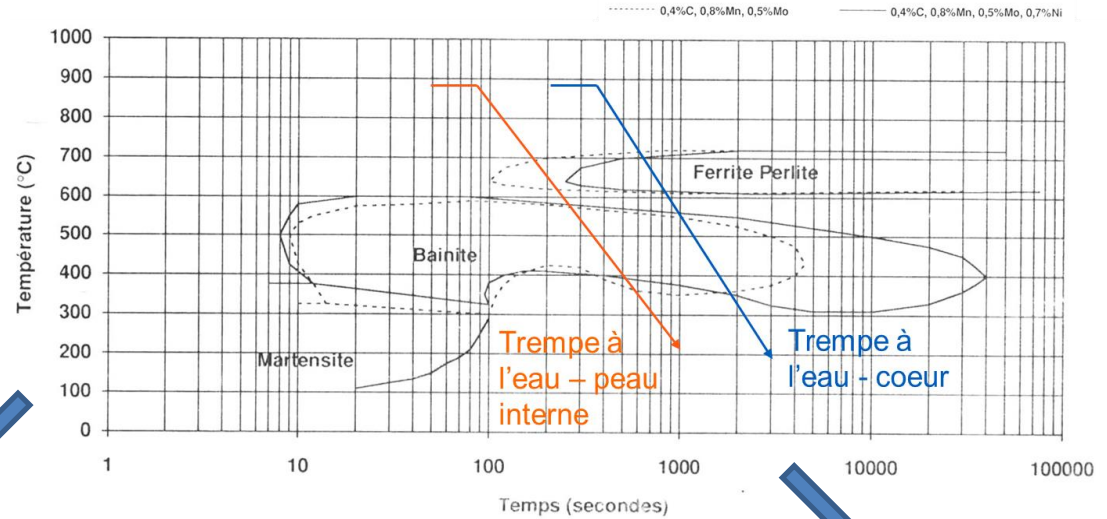
Approches en appui à la justification

Des propriétés hétérogènes : effet de prélèvement

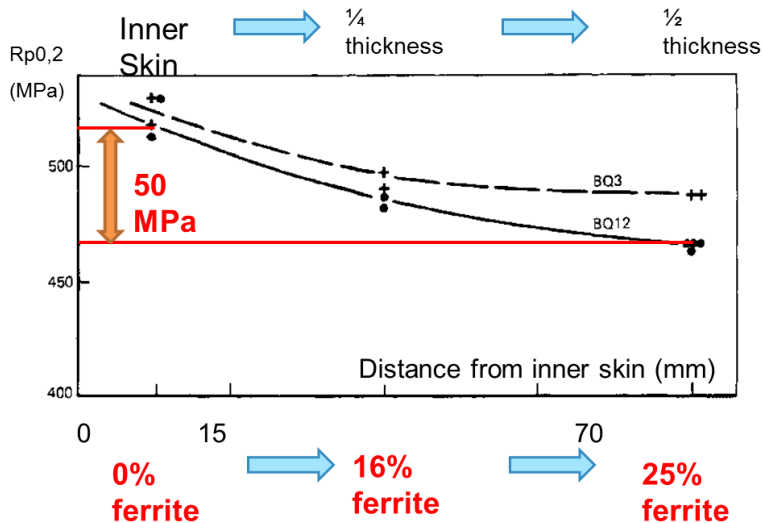
Procédé de fabrication



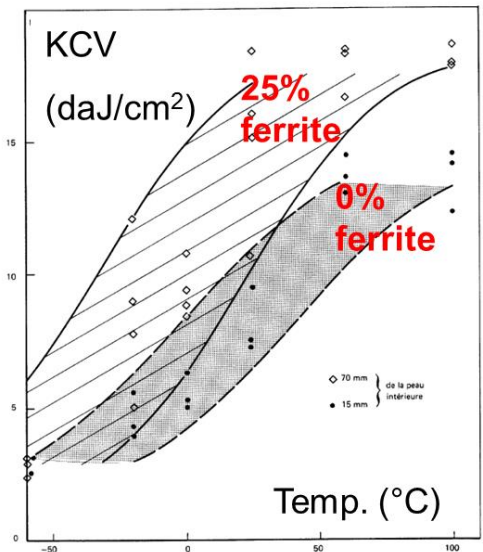
Différences de vitesses de refroidissement cœur-peau



Variations des propriétés de traction...

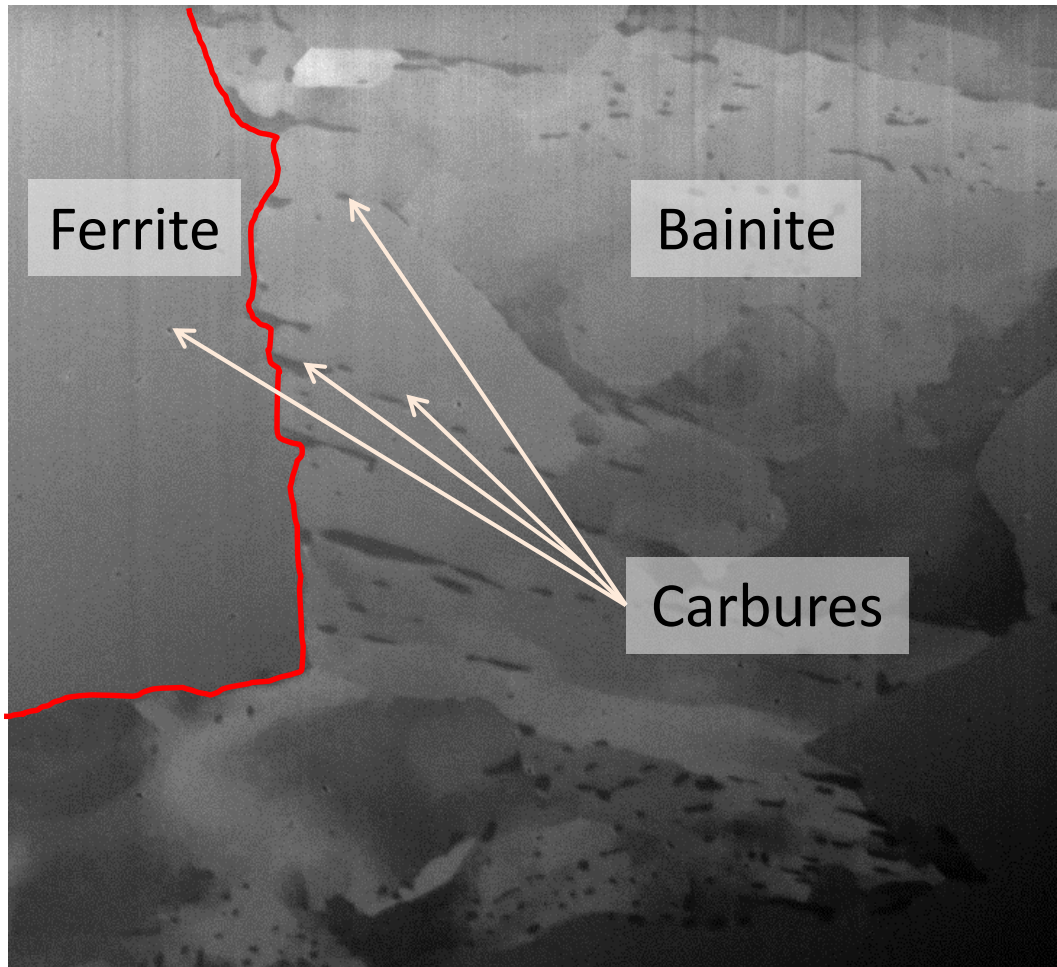


... et de la résistance mécanique



Acquisitions au microscope électronique à balayage (MEB)

Volume de matière de 12x12x9 μm – *Stack* de 500 coupes dans l'épaisseur

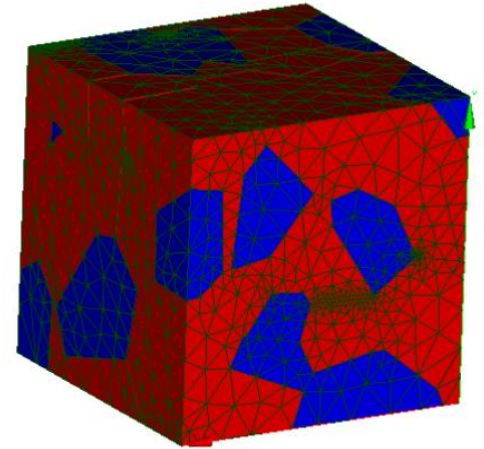


- Bainite & Ferrite :
 - Phases co-existantes au sein de l'acier 16MND5
 - A l'échelle microscopique : structuration de l'acier en grains
- Carbures :
 - **Influencent la résistance mécanique de l'agrégat : répartition hétérogène**

Prévision fine de la ténacité du 16MND5

☐ Modélisation **micromécanique** du comportement (F. Latourte, Q. Shi ; 2014-15)

- Loi de plasticité cristalline à base physique
- Modèle d'agrégat **biphasique** (Voronoi 3D)



☐ Approche locale de la rupture par clivage

- Postulat : les carbures sont les sites potentiels d'amorçage d'une fissure
- Modèle probabiliste de Beremin : évaluation de la probabilité de rupture :

Contrainte de Weibull (solicitation mécanique)

$$P_f = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\sigma_w}{\sigma_u} \right)^m \right]$$

Paramètres ajustés

→ Prise en compte de **l'hétérogénéité des carbures**

Mécanique de la rupture

Le modèle de Griffith

- Etape critique : propagation d'une fissure amorcée
 - Sous l'action d'un chargement, la fissure se propage si la contrainte de **clivage** est supérieure à la **contrainte critique de propagation**
- Le critère de rupture de Griffith est :

$$\sigma_{clivage} > \sigma_c \quad \text{et} \quad \epsilon_p > \epsilon_{pc}$$

- La contrainte critique de propagation est donnée par :

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{\pi E \gamma_p}{2(1 - \nu^2)r_c}}$$

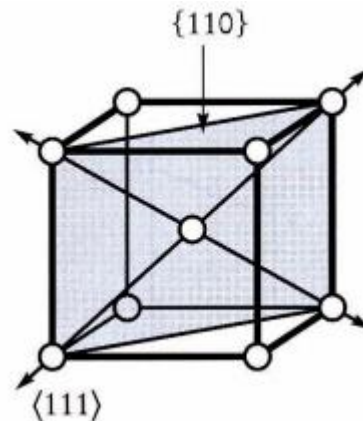
← La taille de carbure

- A **chargement donné**, par tirage de Monte-Carlo de la distribution des carbures, la probabilité de rupture peut être estimée.

Modèle de comportement mécanique

Loi de comportement

- Ecoulement plastique : Dislocation Dynamics for body Centered Cubic crystals (implémentée dans Code_Aster)
- Cette loi décrit le mécanisme de dislocation dans les 12 plans de glissement $\{110\}$



- Relation entre la contrainte de cisaillement τ_s et l'écoulement $\dot{\gamma}_s$ telle que :

$$\tau_s = \sigma,$$

$$\dot{\epsilon} = \sum \dot{\gamma}_s \mu_s, \quad \mu_s = \frac{1}{2} (m_s \otimes n_s + n_s \otimes m_s)$$

Tenseur des
contraintes

Tenseur des
orientations

Modèle éléments finis

☒ Agrégat de 98 grains

☒ Modèle Uniphasique :

- Intégralement composé de ferrite

☒ Modèle Biphase :

- 20% de ferrite
- 80% de bainite

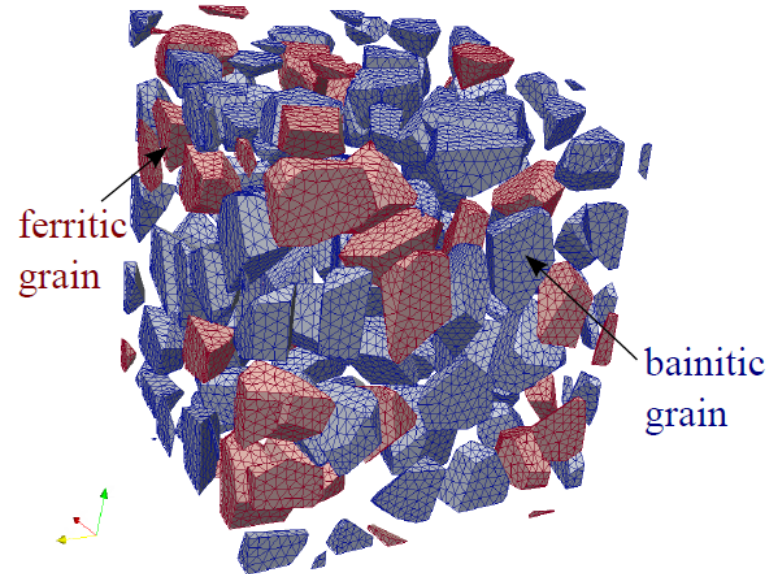
☒ Chargement :

- Triaxialité contrôlée telle que :

$$F_1, F_2 = F_3 = \alpha F_1$$

☒ Conditions aux limites

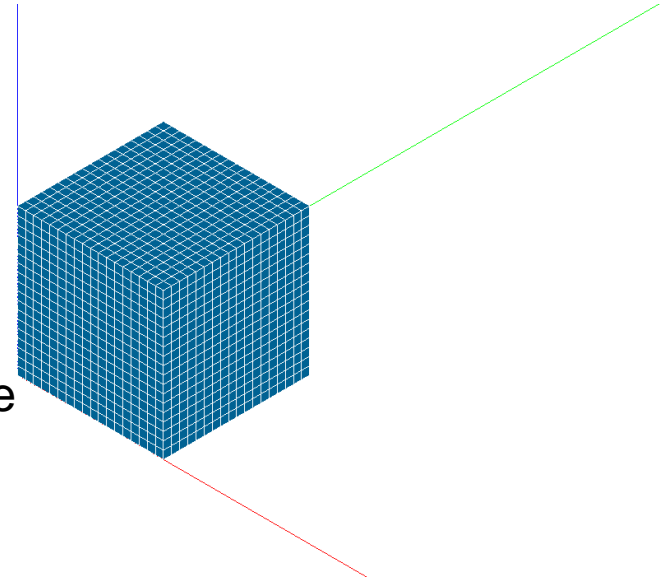
- 6 nœuds maîtres définis sur 3 jeux de faces perpendiculaires
 - les chargements sur 3 d'entre eux
 - encastrement sur les 3 autres
- Ces nœuds sont reliés au maillage par des poutres : **insensibilité** à la planéité des faces.



Stratégie adoptée

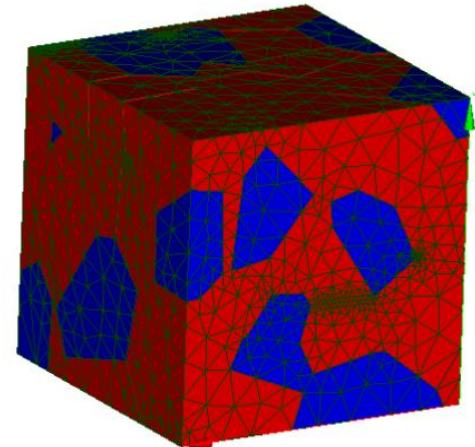
☐ Cas test simplifié sous Code_Aster

- Calculs rapides (~ min)
- 300 grains, 5832 mailles
- Loi de comportement de Meric-Cailletaud
- Objectif :
 - **Calibrer** le modèle probabiliste de rupture



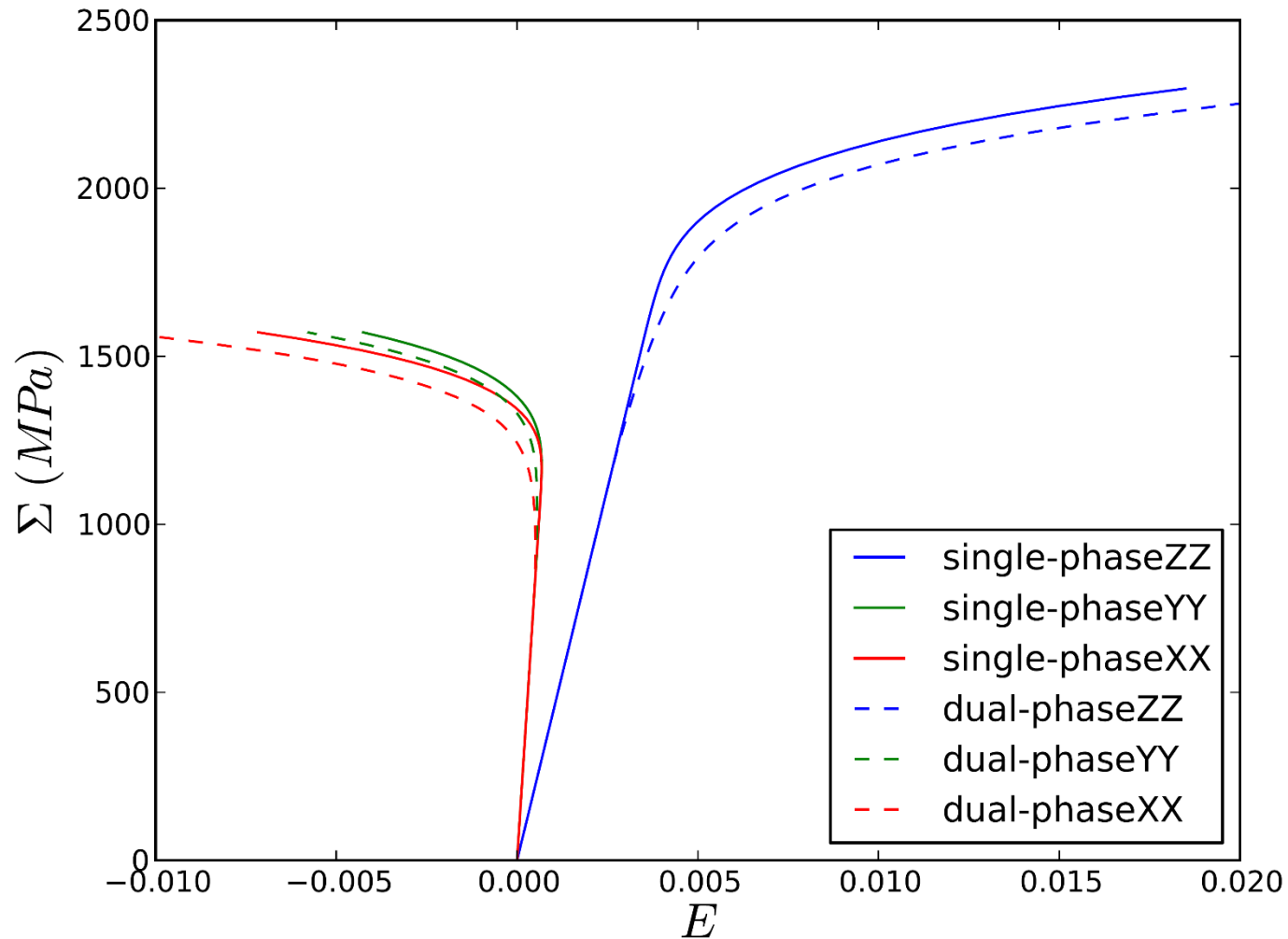
☐ Cas réaliste

- 98 grains, 26717 éléments tétraédriques
- Calculs **longs** (~ 24h sur 8 noeuds)



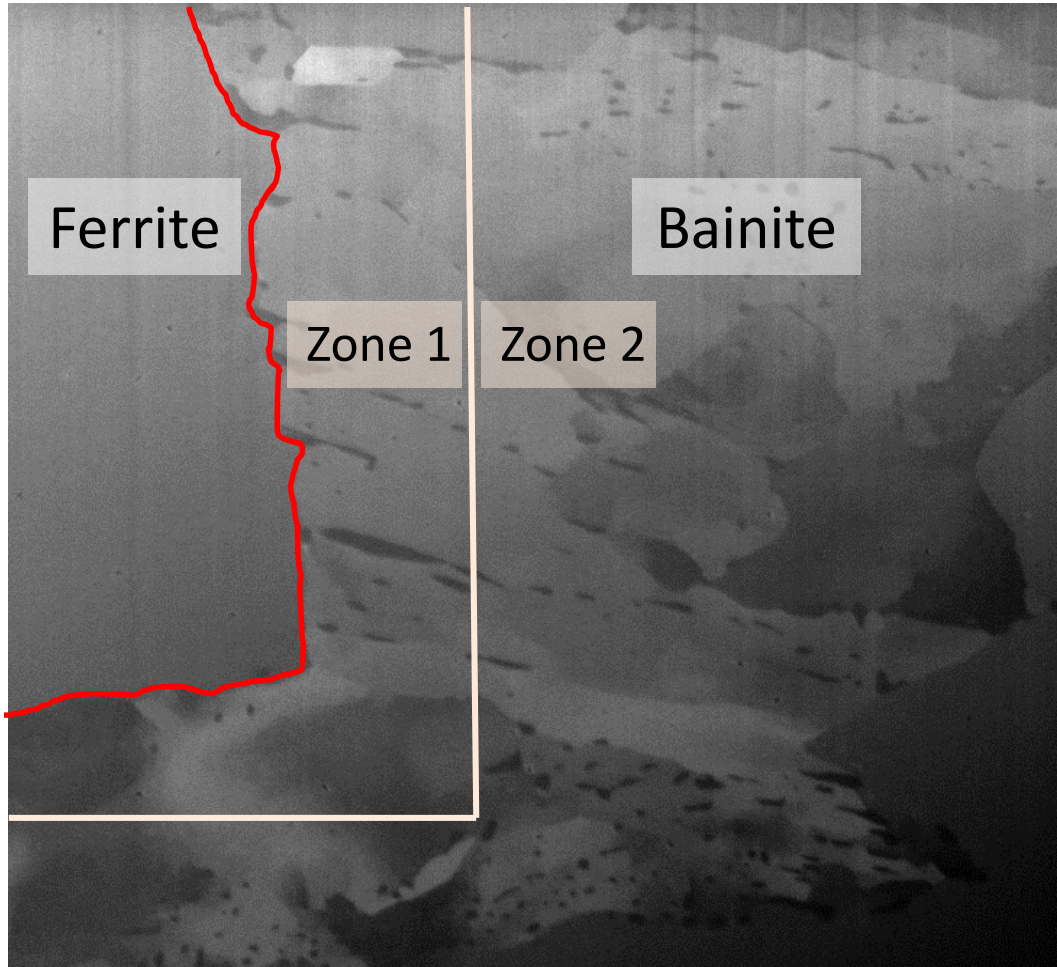
Comparaison des modèles de comportement

☐ Réponses macroscopiques identiques en traction uniaxiale



La répartition des carbures

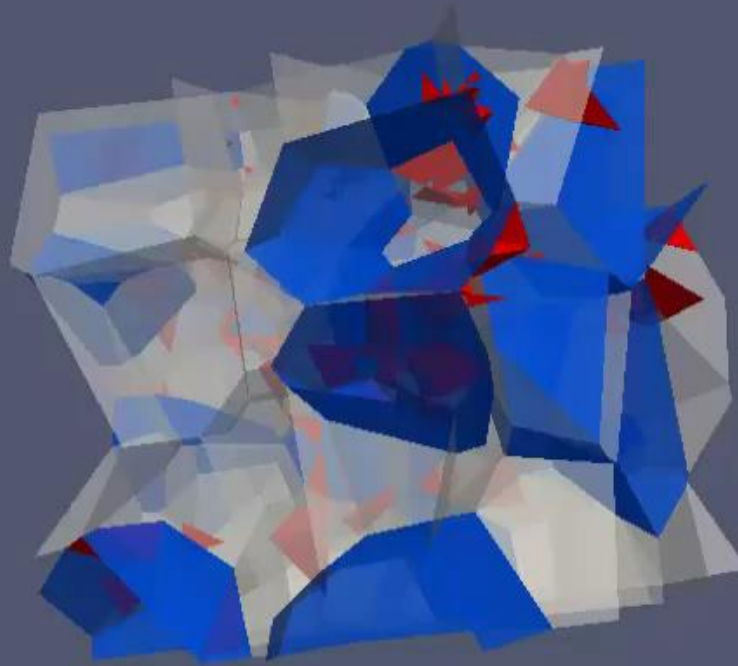
Image MEB



- Littérature :
 - Répartition homogène,
- Observations :
 - Présence de carbures **insignifiante** dans la zone ferritique ;
 - Répartition **hétérogène** dans la bainite.

La répartition des carbures

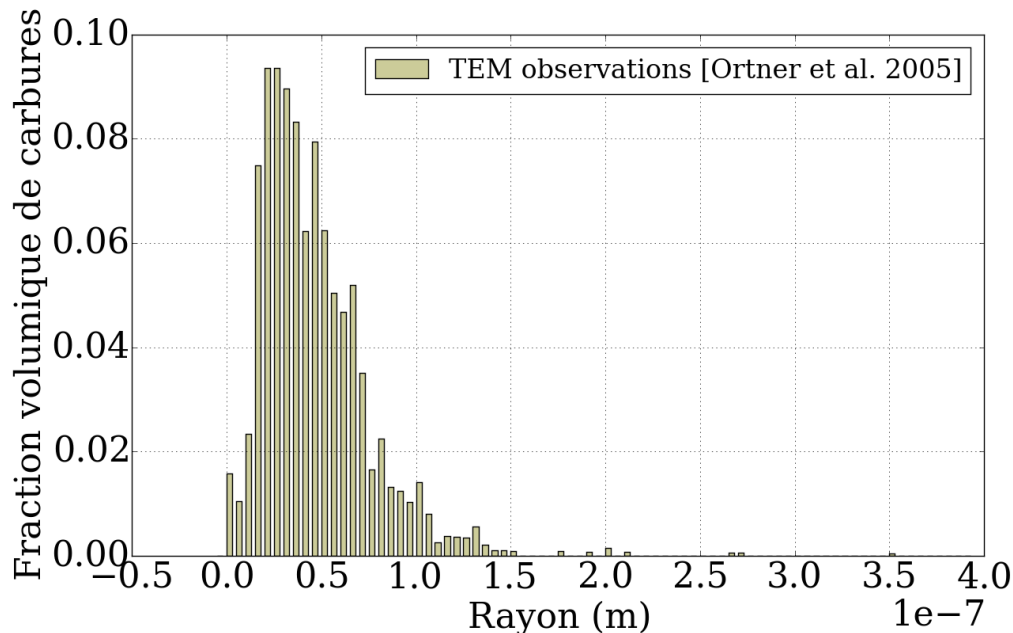
- ☐ Motivation pour densifier le tirage de carbures près des joints de grains :
Prédiction des sites d'amorçage à -150°C (F. Latourte, Q. Shi ; 2015)



La répartition des carbures

3 hypothèses de modélisation

- Les carbures sont répartis de manière **homogène** dans l'agrégat
→ Données extraites des travaux d'Ortner et *al.* 2005



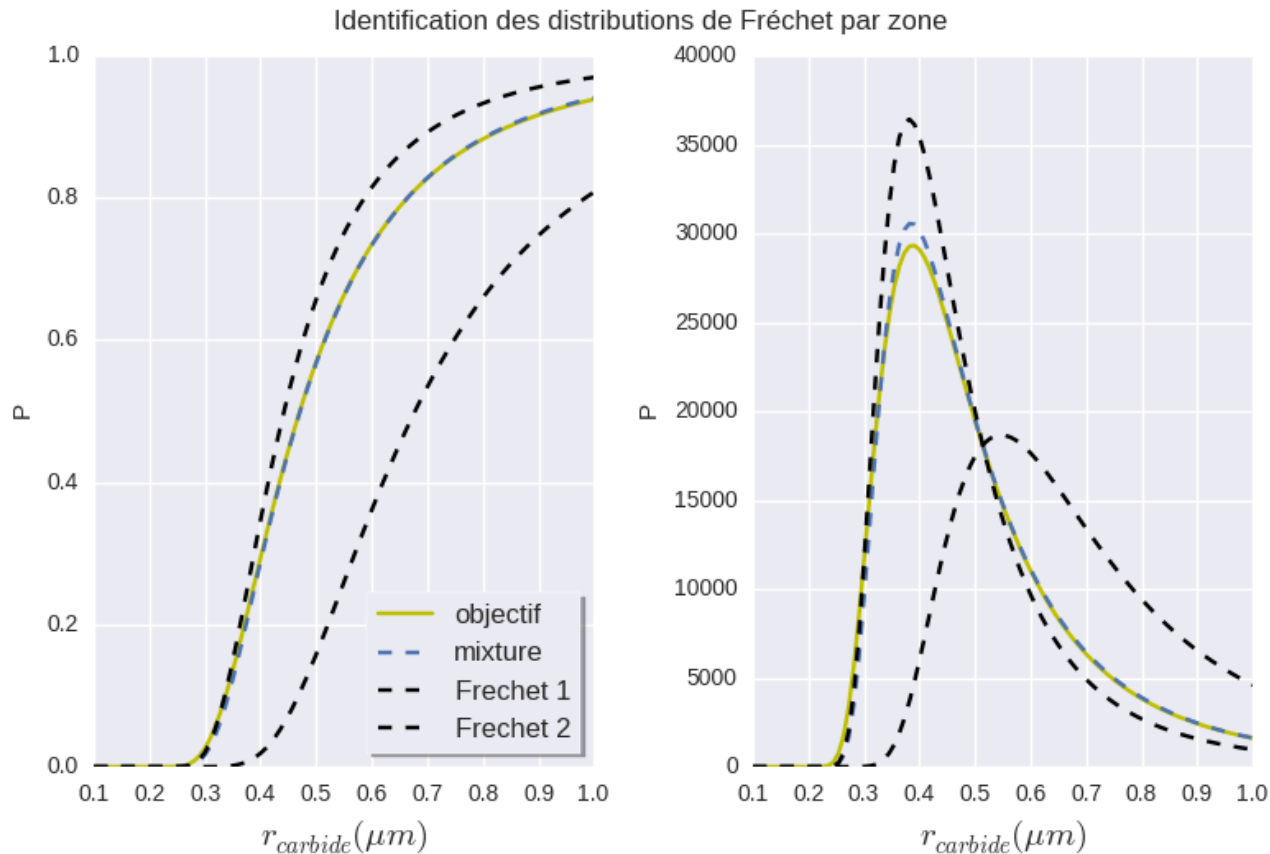
*En restant
représentatif
vis-à-vis des
données
expérimentales*

- Zone **ferritique** sans carbure, phase bainitique avec répartition **homogène**
- Zone **ferritique** sans carbure, phase bainitique avec répartition **homogène par zone** : carbures plus nombreux et plus gros dans la zone 1 (proche joint de grain)

La répartition des carbures

☐ L'idée :

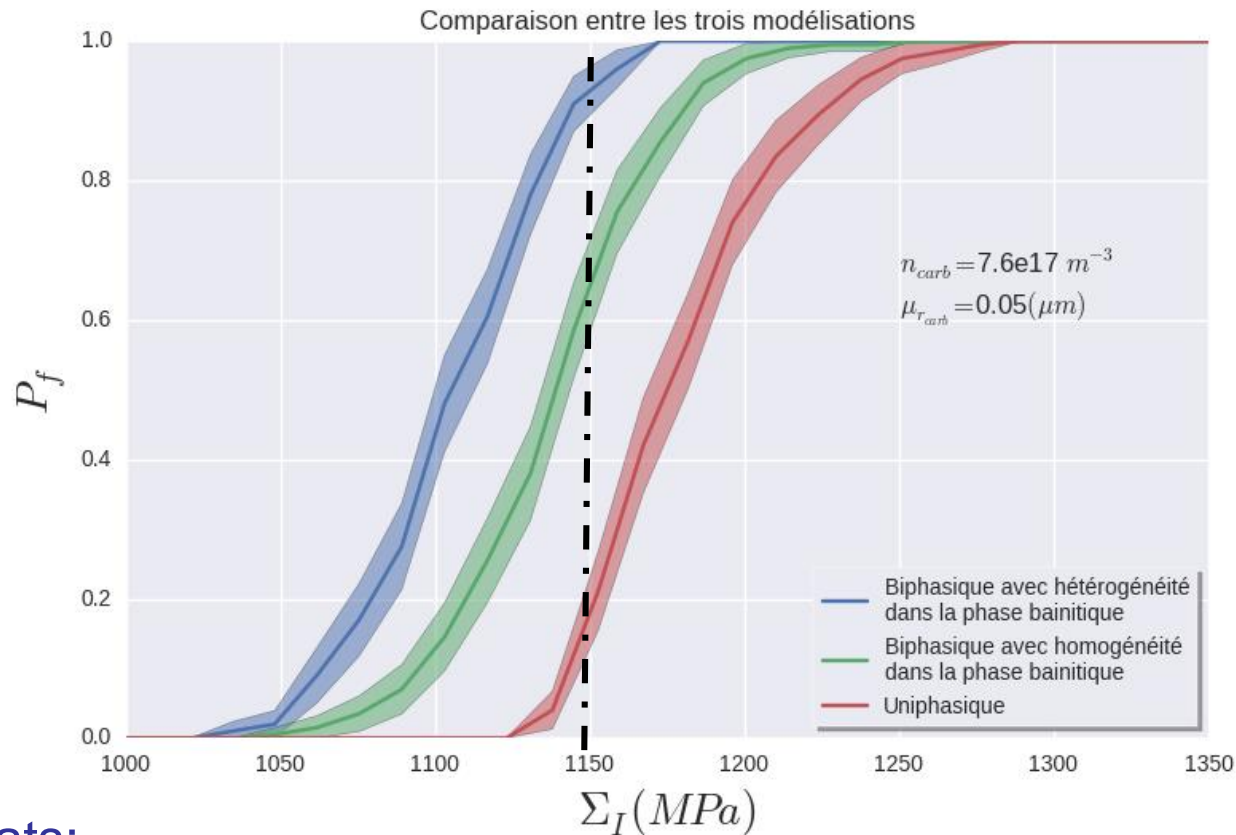
- Déterminer une **distribution** de taille/nombre de carbures pour chaque **zone**
- La combinaison des deux doit correspondre aux **observations macroscopiques**



Modélisation probabiliste de la rupture

La méthode :

- Tirages successifs de distributions de carbures dans l'agrégat (Monte Carlo)



Résultats:

- Impact **significatif** de la modélisation biphase avec hétérogénéité

Conclusions et perspectives

- ☐ Des observations au MEB ont montré une répartition hétérogène des carbures à l'échelle du μm dans un acier de type 16MND5
 - Phases ferritiques pauvres en carbures
 - Carbures principalement situés dans la bainite près des joints de grains

- ☐ Calculs élasto-plastiques d'agrégats avec modèle biphasique + tirages de carbures selon plusieurs types de distributions hétérogènes
 - Impact significatif sur la prévision de la probabilité de rupture

- ☐ Perspectives :
 - Traitement d'image automatisé pour exploiter tout le *stack* d'images MEB
 - Étudier l'impact de la triaxialité du chargement sur la ténacité
 - Étudier la sensibilité à la microstructure (agencement des grains + orientations cristallines)