

**Passage de la résilience à la ténacité dans la zone de transition
ductile-fragile de l'acier de cuve**

1 / Contexte et objectifs

2 / Démonstration dans la transition

3 / Perspectives

EDF R&D - Département Matériaux et Mécanique des Composants - A. PARROT, A. DAHL

Contexte

- Enjeux : Durée de vie des cuves
 - Les analyses de sûreté des matériels utilisent la ténacité
 - Nécessité de connaître la ténacité en fin de vie des matériaux
 - Actuellement, la ténacité est évaluée par des méthodes empiriques (conservatives):
 - RCC-M (Design Code)

- Objectif final :
 - Évaluation directe de la ténacité à partir des essais Charpy du programme de surveillance de l'irradiation

Contexte

Démarche de conception

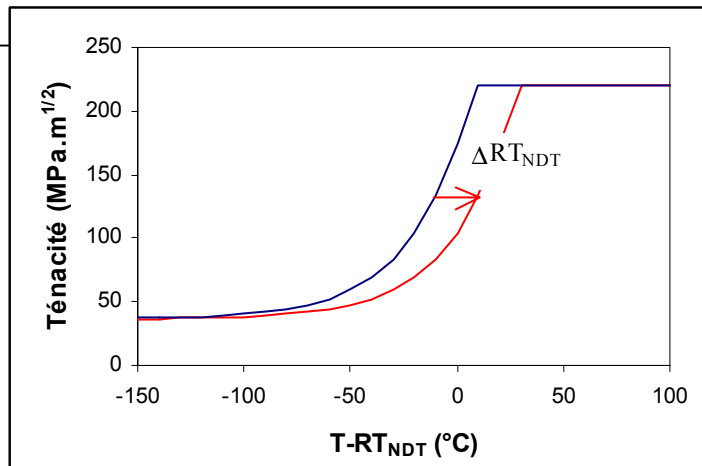
1/ Courbe de transition en ténacité ER

$$K_{1C} = f(T - RT_{NDT})$$

2/ Calcul (fin de vie) par un décalage de RT_{NDT} :

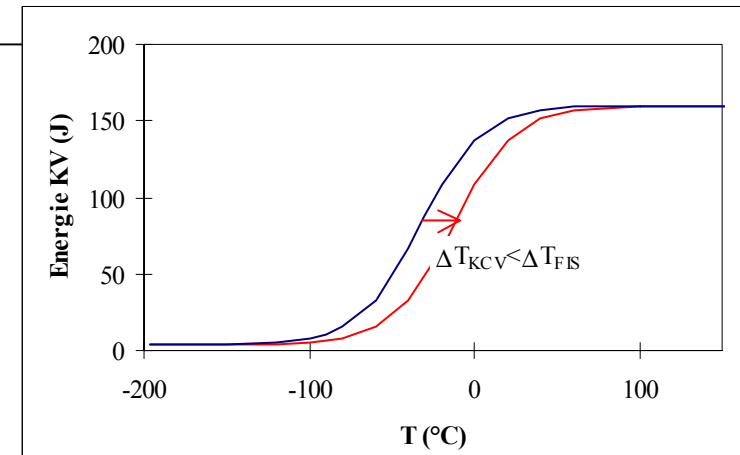
$$\Delta RT_{NDT} = FIS = g(\text{chimie}, \Phi)$$

$$K_{1C} = f(T - RT_{NDT} - \Delta RT_{NDT})$$



Démarche d'exploitation

1/ Vérification du conservatisme de FIS à partir du PSI

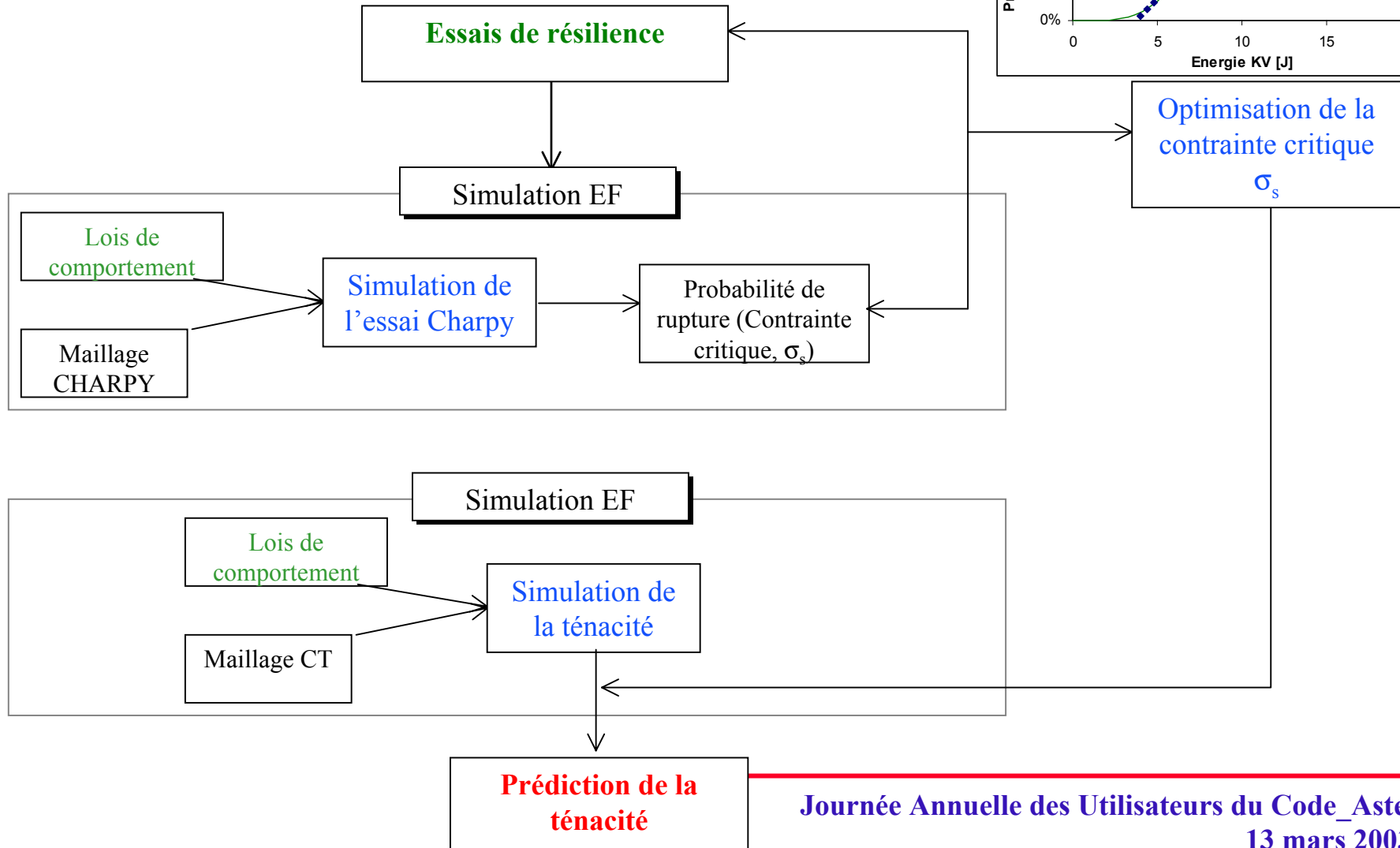
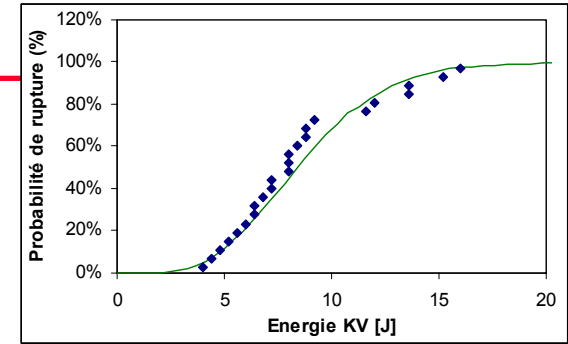


Hypothèses

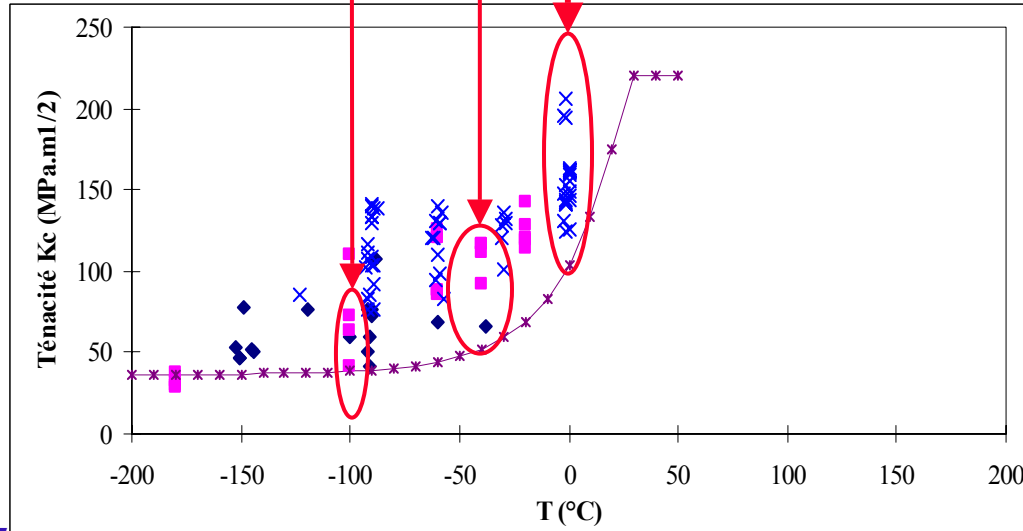
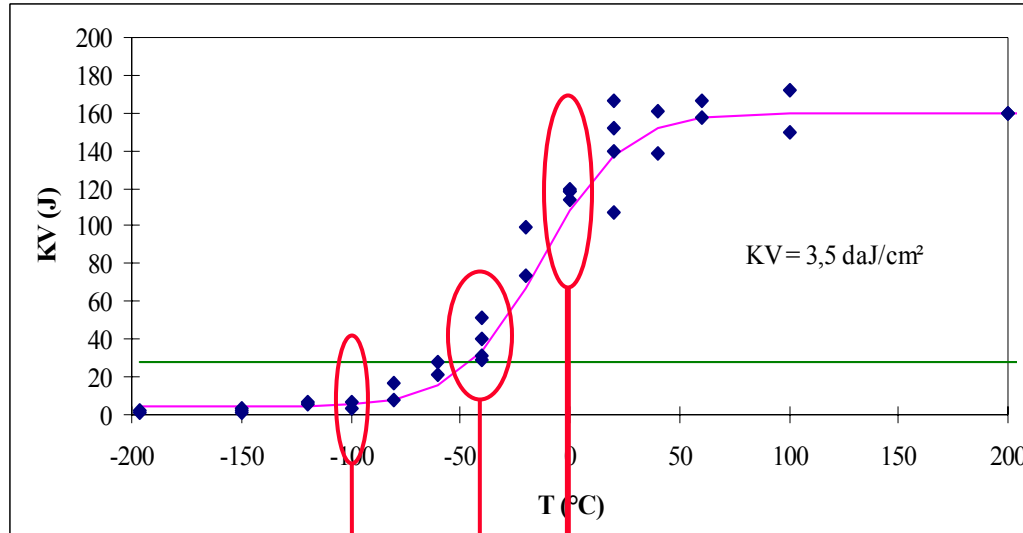
1/ $\Delta RT_{NDT}(K_{1c}) = \Delta T_{K7}(KV)$

2/ $f_{ER} = f_{irradié}$

Méthodologie



Matériau étudié : H1BQ12 de type 16MND5

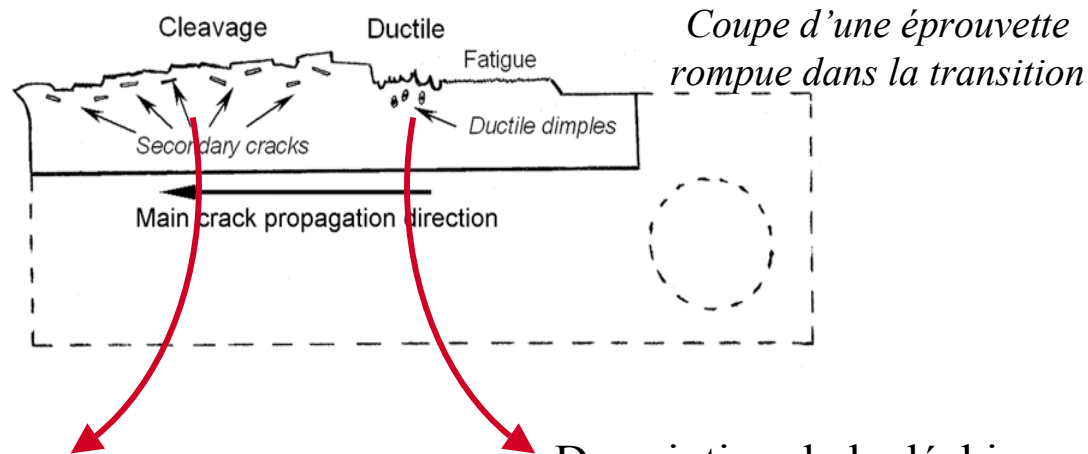


C	Mn	Ni	Mo
0,16	1,30	0,7	0,51

P	S	Si	Cr
0,008	0,006	0,20	0,20

**Passage résilience ténacité dans le domaine de la transition
ductile-fragile (-60°C, -30°C & 0°C)**

- Mécanismes dans le domaine de la transition



Description de la rupture par
clivage à l'aide du modèle de
Beremin

Description de la déchirure
ductile à l'aide d'un modèle
d'endommagement couplé :
modèle de Rousselier

Passage résilience ténacité dans le domaine de la transition ductile-fragile (-60°C, -30°C & 0°C)

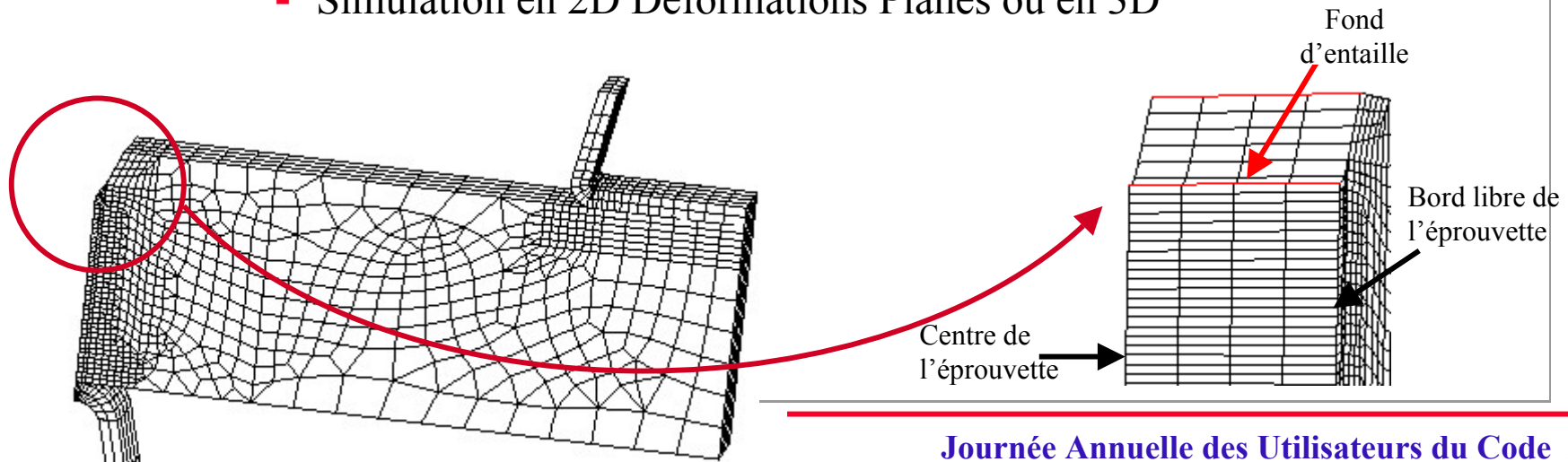
- Simulation numérique de l'essai Charpy :

➤ Lois de comportement :

- Modèle de Rousselier : $\phi_p = \frac{\sigma_{eq}}{\rho} + D\sigma_1 f \exp\left(\frac{\sigma_m}{\rho\sigma_1}\right) - R(p) = 0$

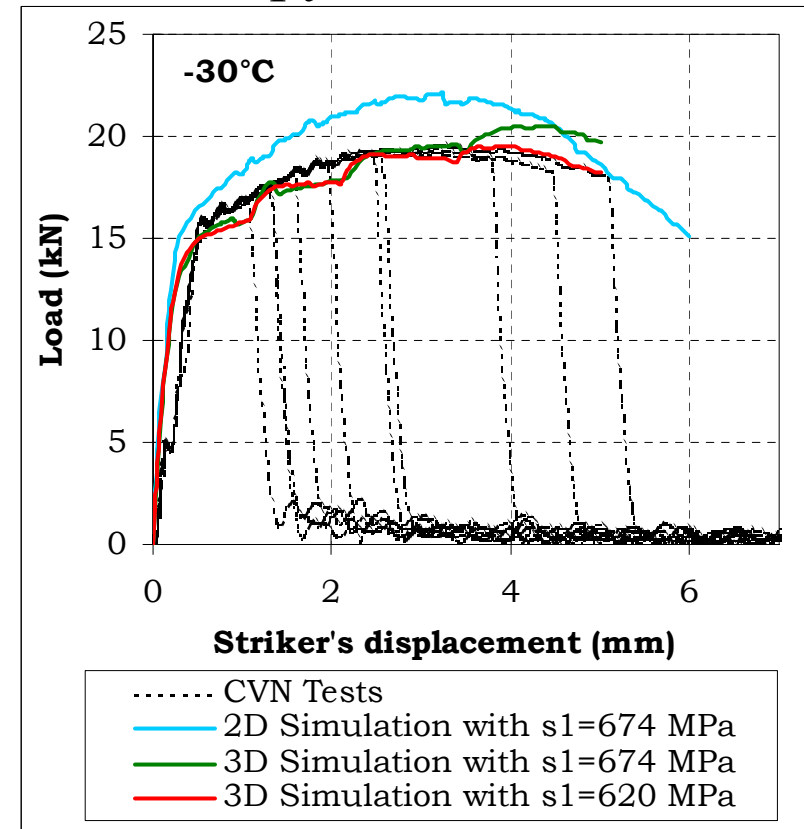
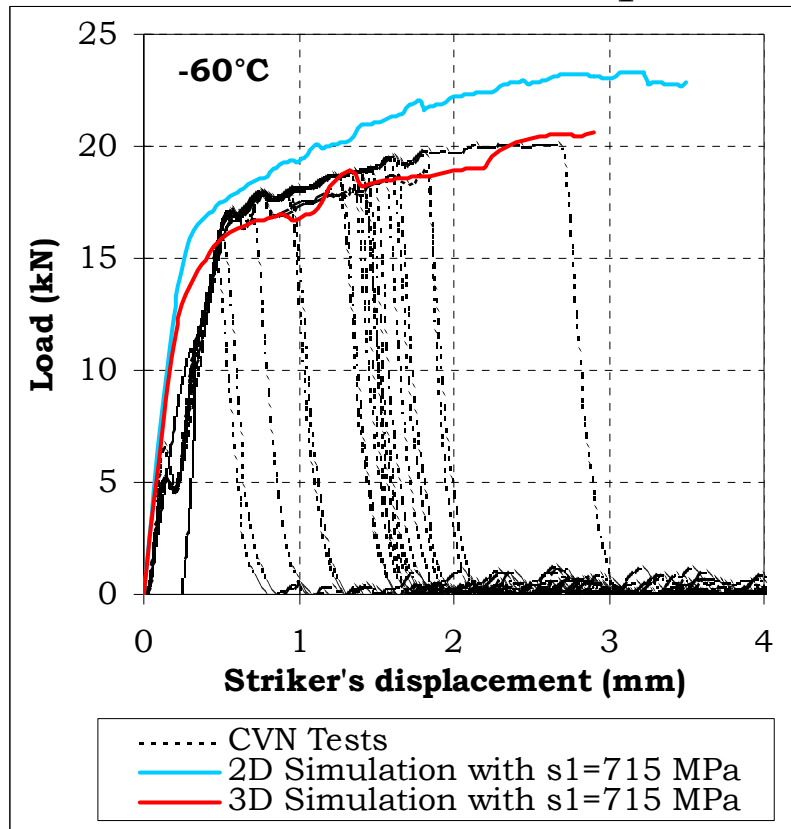
- Comportement viscoplastique : $R(p, \dot{p}) = \sigma_{y-visc}(p) + \sigma_0 \sinh^{-1}\left[\left(\frac{\dot{p}}{\dot{\epsilon}_0}\right)^{\frac{1}{m}}\right]$

- Simulation en 2D Déformations Planes ou en 3D



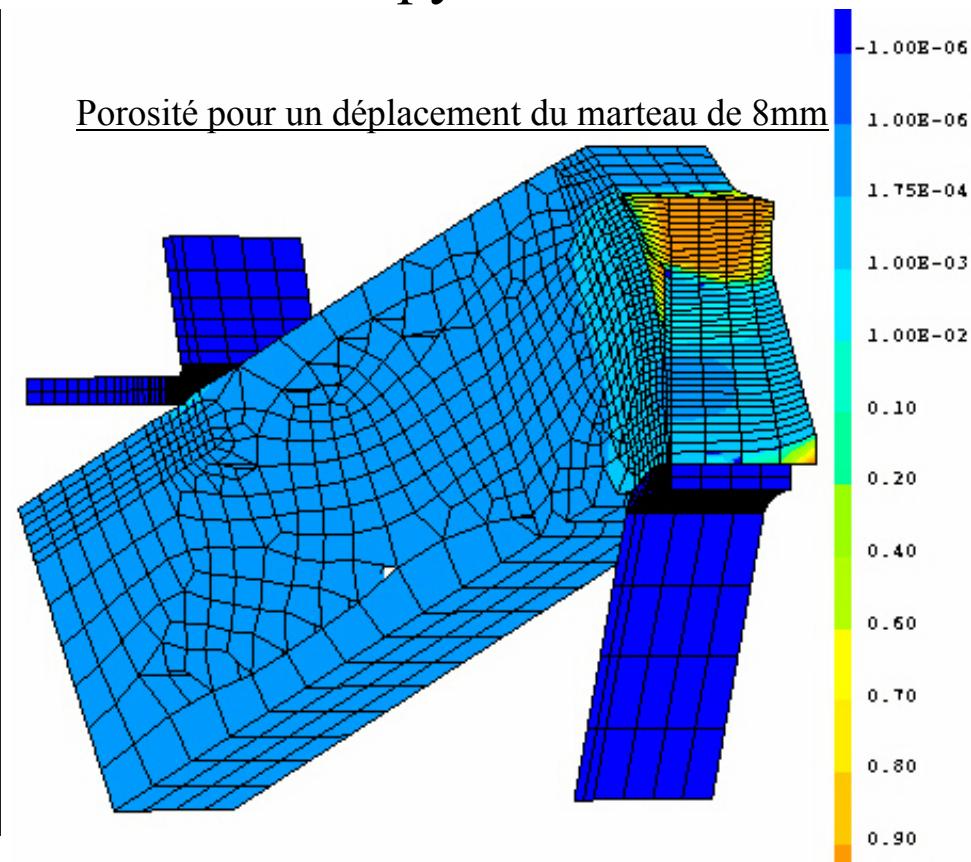
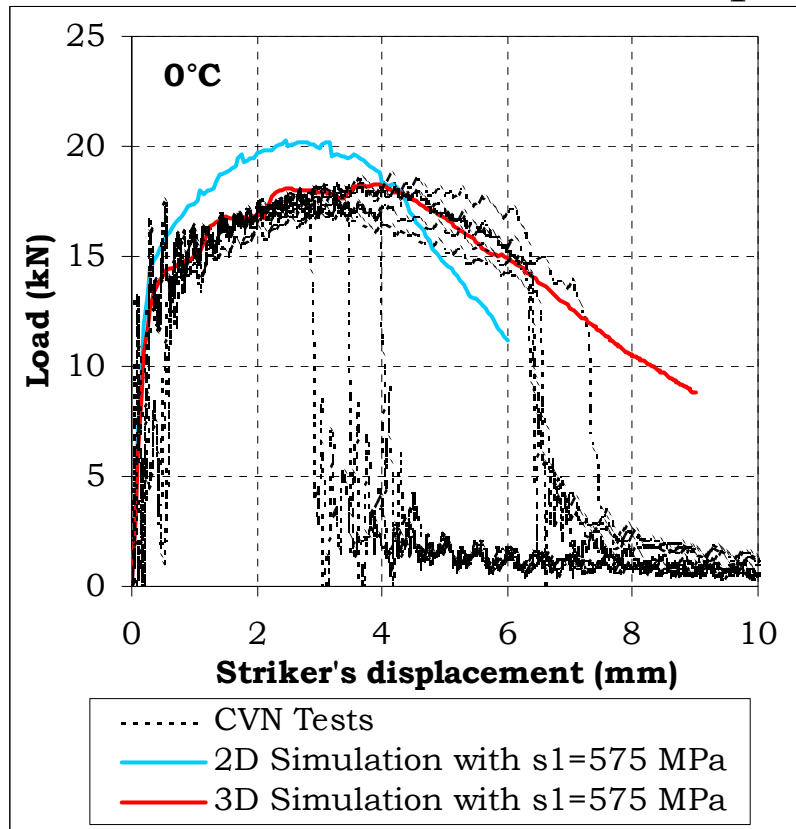
Passage résilience ténacité dans le domaine de la transition ductile-fragile (-60°C, -30°C & 0°C)

- Simulation numérique de l'essai Charpy :



Passage résilience ténacité dans le domaine de la transition ductile-fragile (-60°C, -30°C & 0°C)

- Simulation numérique de l'essai Charpy :



Passage résilience ténacité dans le domaine de la transition ductile-fragile (-60°C, -30°C & 0°C)

- Identification des paramètres du modèle de Beremin :
 - Introduction de la correction de déformation plastique dans le modèle

$$Pr = 1 - Exp \left[- \left(\frac{\sigma_w}{\sigma_u} \right)^m \right] \quad \sigma_w = \left(\int_{V_p} \sigma_I^m \exp \left(- \frac{m \varepsilon_I^p}{k} \right) \frac{dV}{V_0} \right)^{\frac{1}{m}}$$

Temperature		σ_u identification with m=20	σ_u identification with m=24	σ_u identification with m=28
-60°C	m	20	24	28
	σ_u	2906	2650	2487
	$\sigma_u(V_0/V)^{1/m}$	1652	1656	1662
-30°C	m	20	24	28
	σ_u	2968	2706	2538
	$\sigma_u(V_0/V)^{1/m}$	1687	1690	1696
0°C	m	20	24	28
	σ_u	3391	3067	2858
	$\sigma_u(V_0/V)^{1/m}$	1928	1916	1909

Passage résilience ténacité dans le domaine de la transition ductile-fragile (-60°C, -30°C & 0°C)

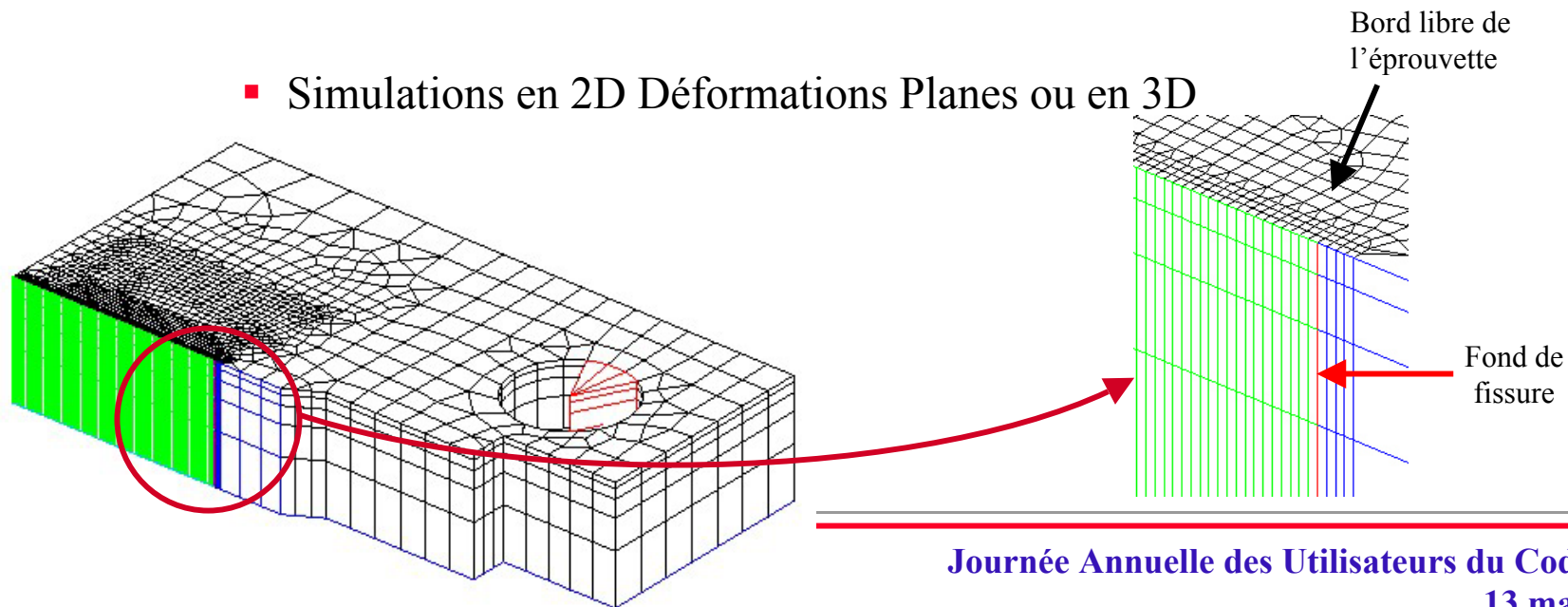
- Simulation numérique des essais sur éprouvette CT :

➤ Lois de comportement :

- Modèle de Rousselier : $\phi_p = \frac{\sigma_{eq}}{\rho} + D\sigma_1 f \exp\left(\frac{\sigma_m}{\rho\sigma_1}\right) - R(p) = 0$

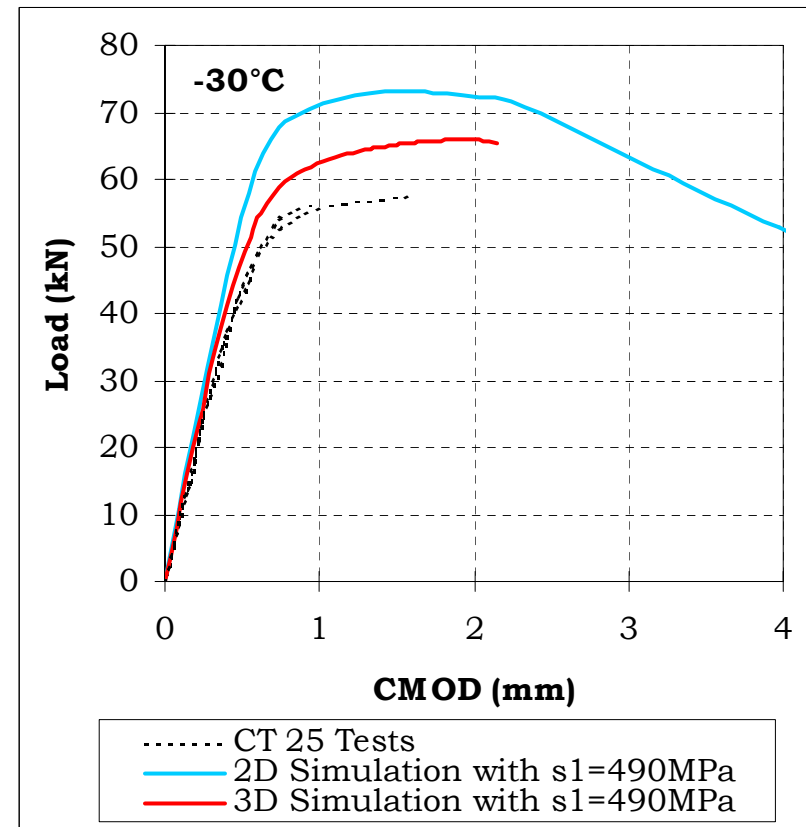
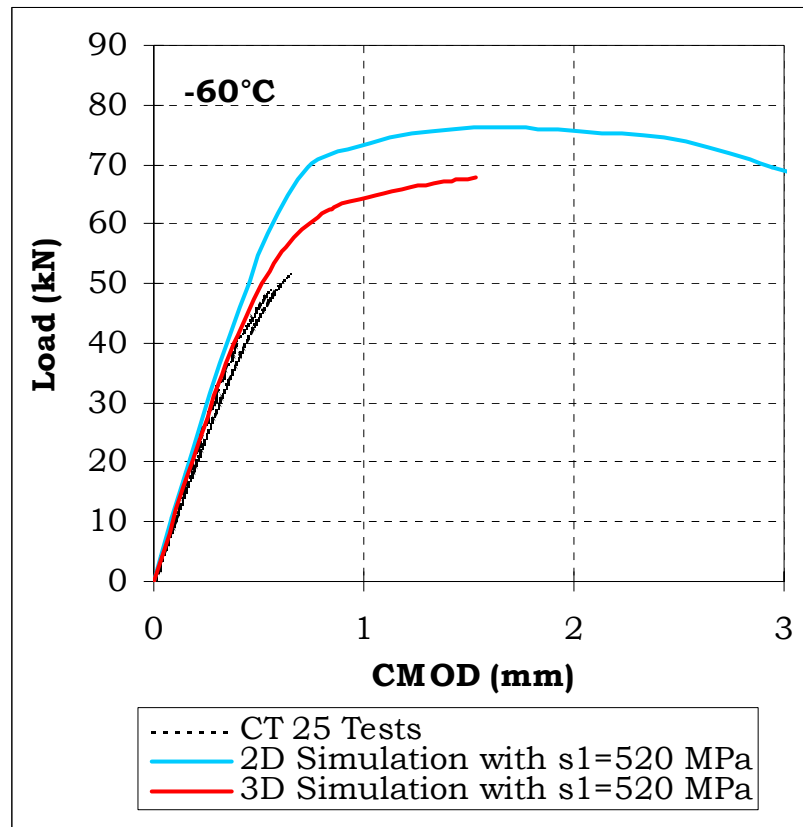
- Comportement élastoplastique : $R(p) = \sigma_{y-qstat}(p)$

- Simulations en 2D Déformations Planes ou en 3D



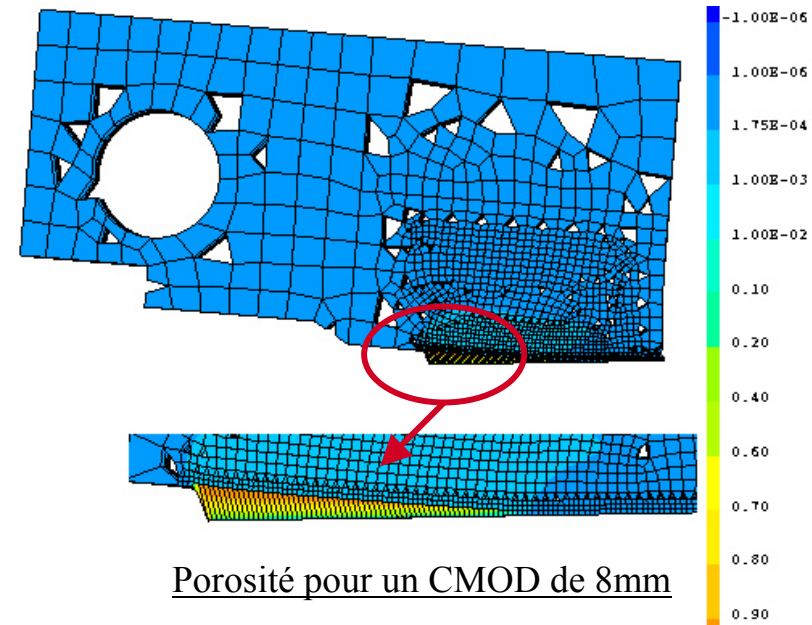
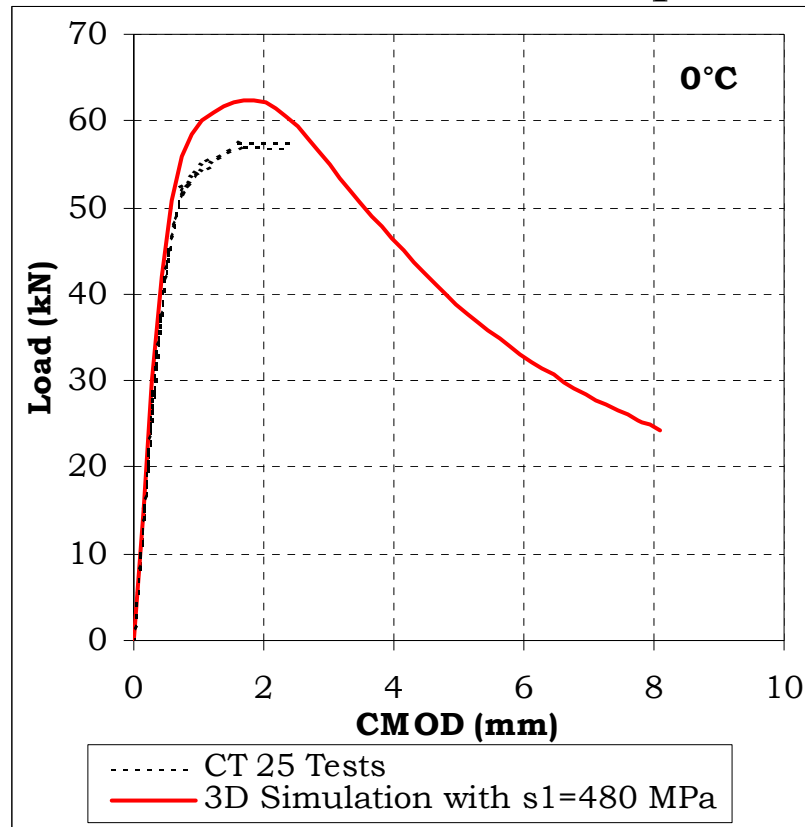
Passage résilience ténacité dans le domaine de la transition ductile-fragile (-60°C, -30°C & 0°C)

- Simulation numérique des essais sur éprouvette CT :



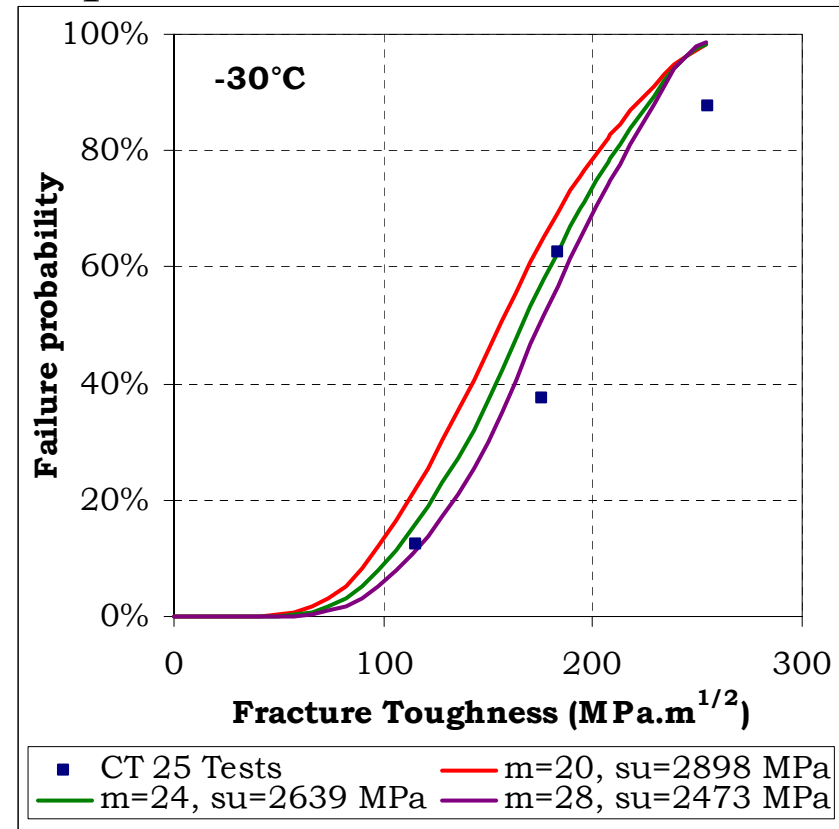
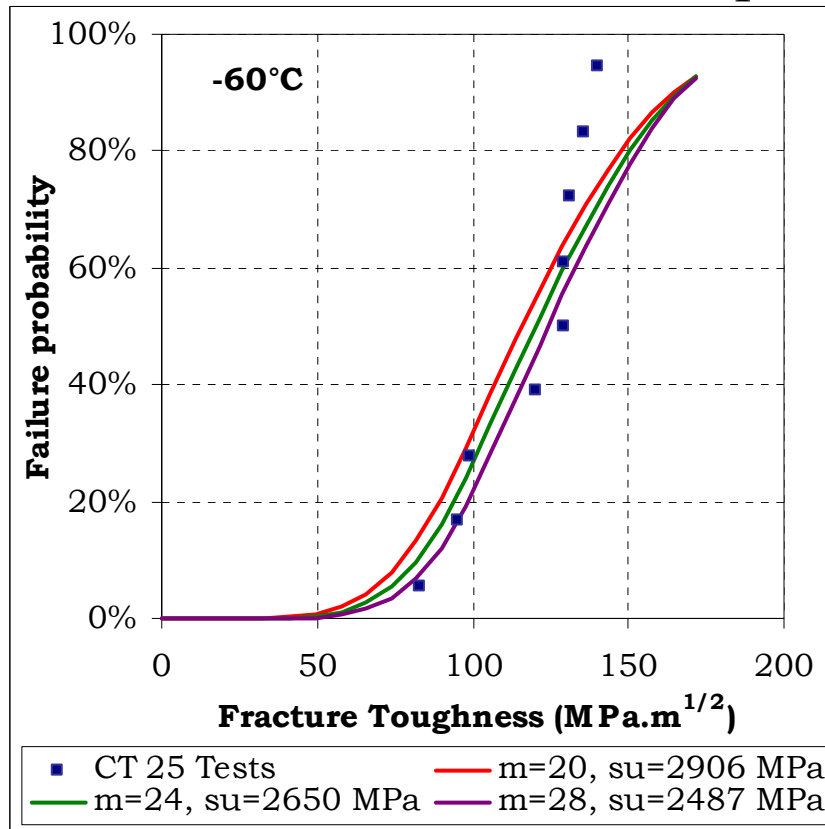
**Passage résilience ténacité dans le domaine de la transition
ductile-fragile (-60°C, -30°C & 0°C)**

- Simulation numérique des essais sur éprouvette CT :



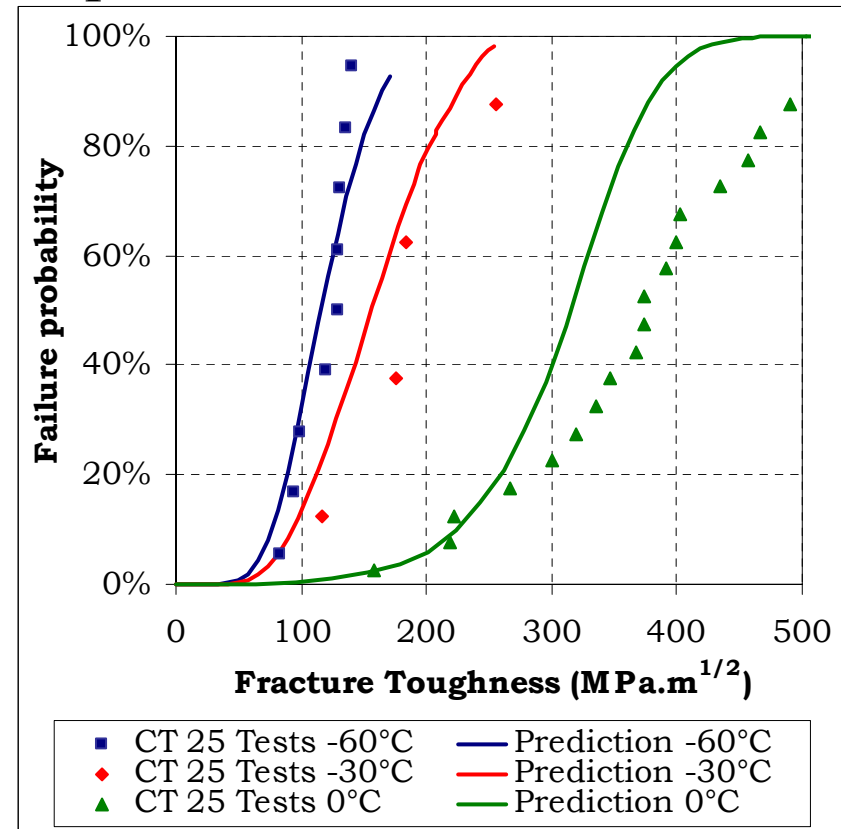
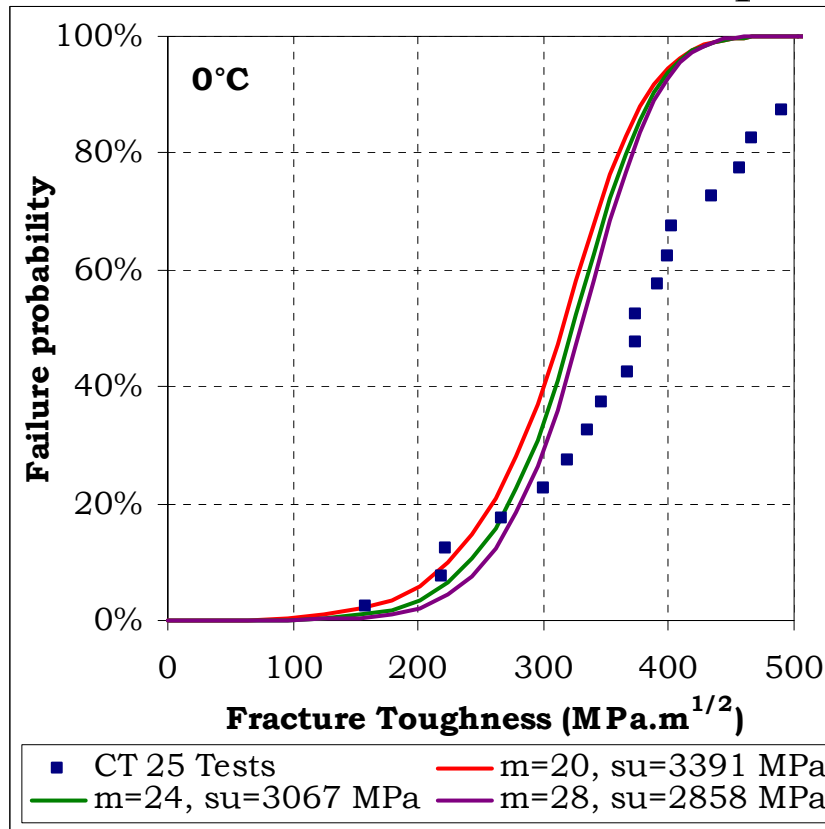
Passage résilience ténacité dans le domaine de la transition ductile-fragile (-60°C, -30°C & 0°C)

- Détermination de la statistique de rupture :



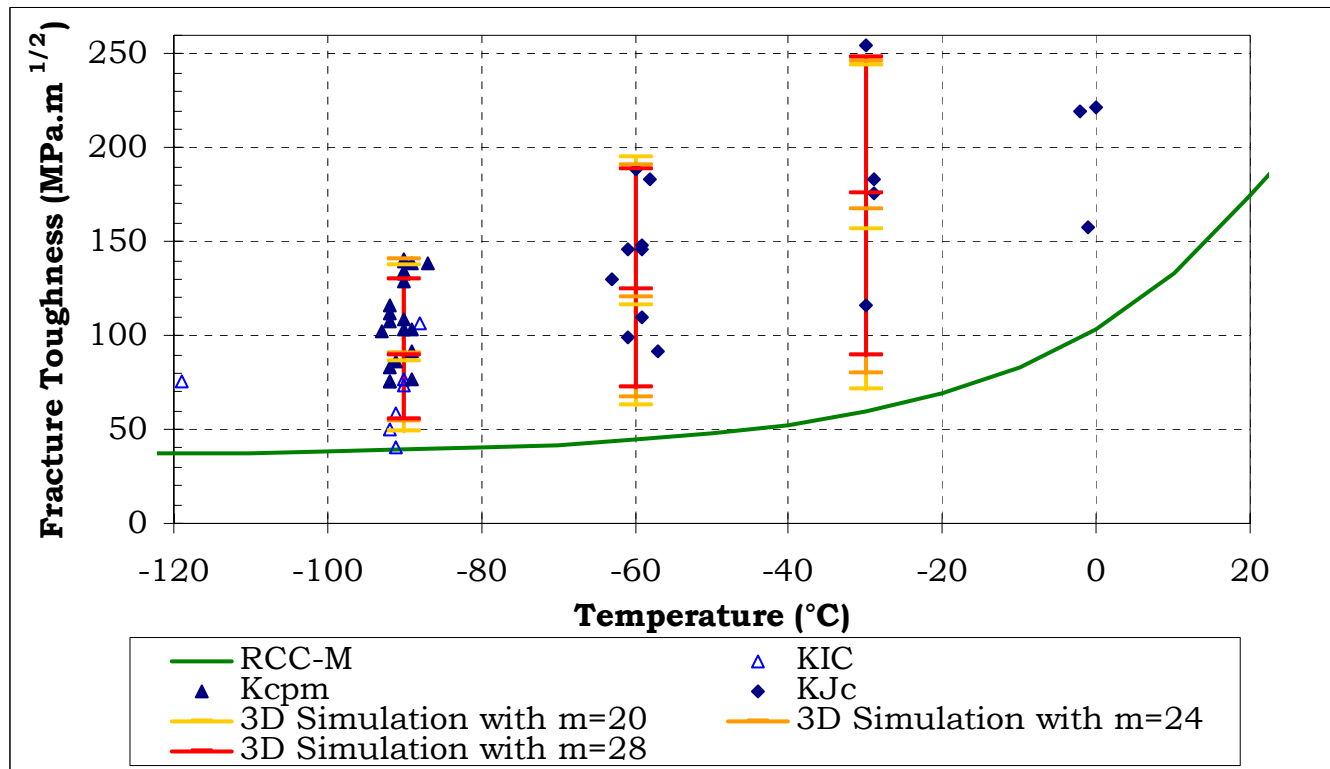
Passage résilience ténacité dans le domaine de la transition ductile-fragile (-60°C, -30°C & 0°C)

- Détermination de la statistique de rupture :



Passage résilience ténacité dans le domaine de la transition ductile-fragile (-60°C, -30°C & 0°C)

- Détermination de la statistique de rupture :
 - Ténacité prédite pour Pr=5%, 50% and 95%



**Passage résilience ténacité dans le domaine de la transition
ductile-fragile (-60°C, -30°C & 0°C)**

- **Conclusion :**

- A -60°C et -30°C, la statistique expérimentale est correctement reproduite
- A 0°C, la statistique simulée est trop fragile

- **Perspectives :**

- Amélioration de la simulation de la résilience et de la ténacité : modification du maillage à 0°C pour forcer la propagation de la déchirure sur les points de Gauss situés sur l'axe de symétrie
- Modèle de Beremin : nécessité de préciser les mécanismes de clivage dans la transition