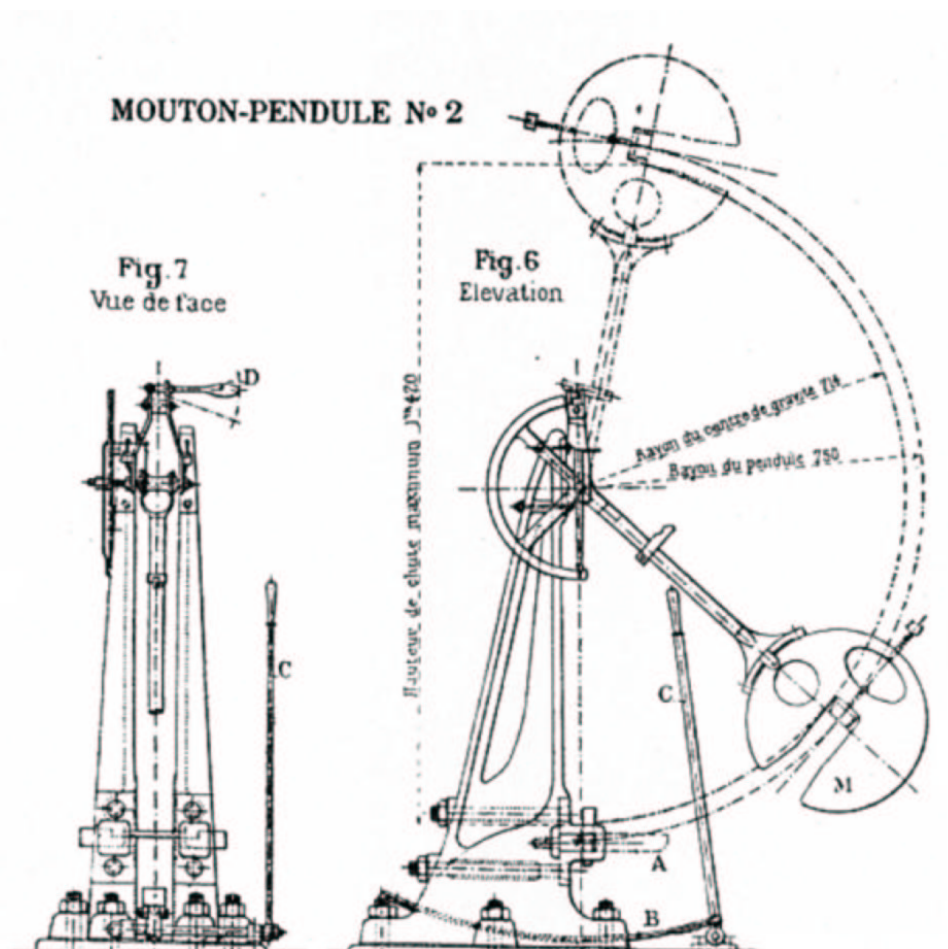

Modélisation de l'essai Charpy : application à la transition
ductile–fragile d'un acier bainitique 16MND5

B. Tanguy, J. Besson, A. Pineau

Centre des Matériaux, École des Mines de Paris,
UMR CNRS 7633, BP 87 Evry cedex 91003

L'essai Charpy depuis 1901

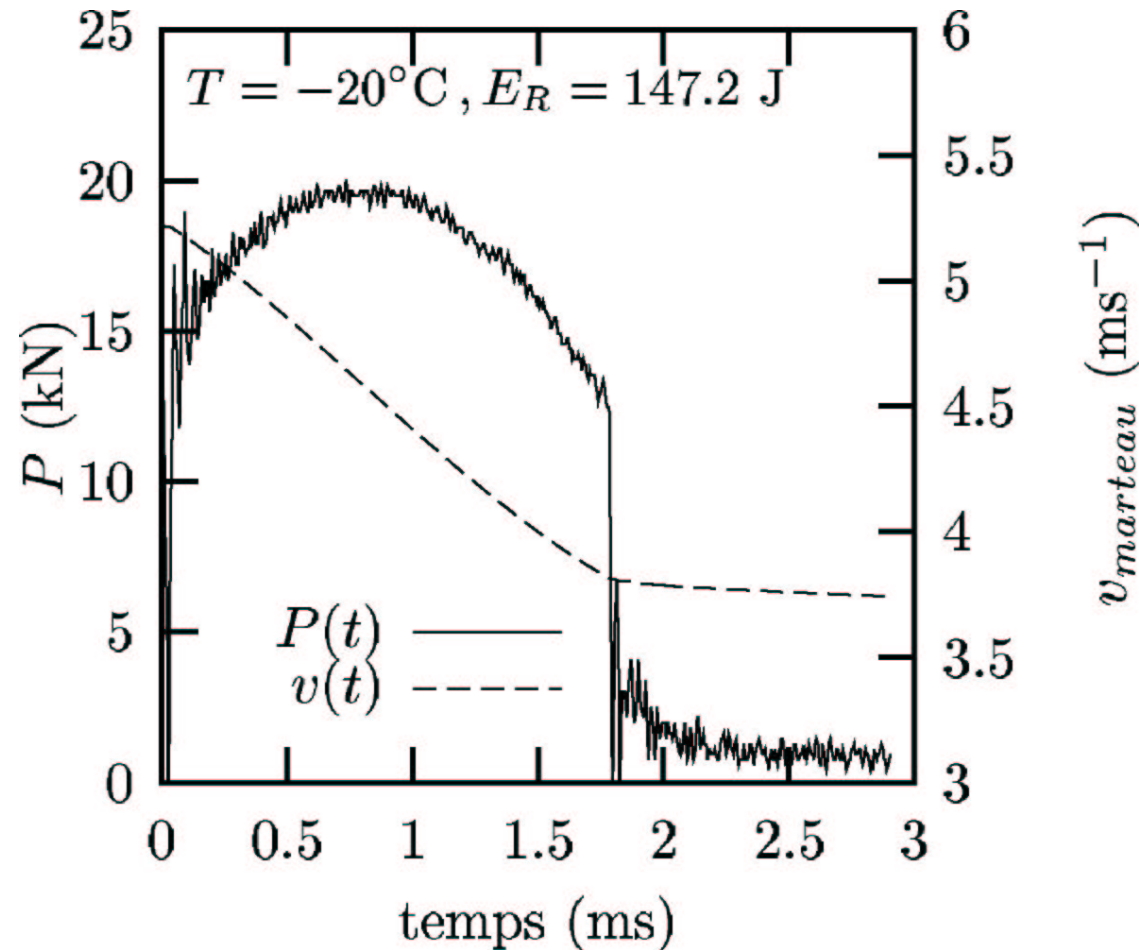


[Charpy,1904]

- Un essai simple !
- Mesure d'une énergie de "rupture"
- Essai comparatif

L'essai Charpy instrumenté

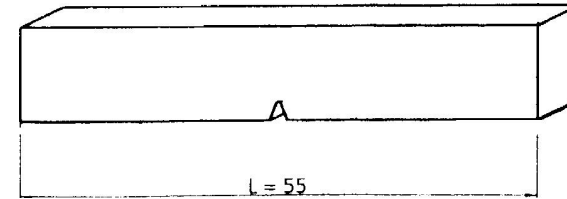
- Emploi de jauges de déformation pour mesurer la force agissant sur le marteau
- Intégration de la loi fondamentale de la dynamique pour obtenir le déplacement



- Information plus riche

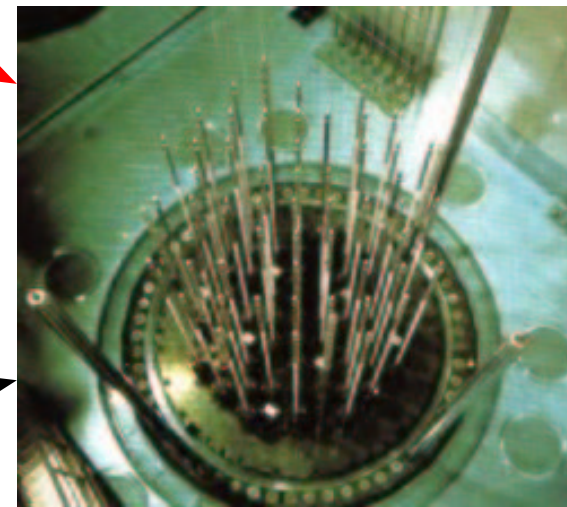
Pourquoi modéliser l'essai Charpy ? [1]

Le programme de surveillance des cuves des réacteurs nucléaires



Eprouvettes Charpy

suivi du vieillissement



Vieillissement en service dû à l'irradiation

Pourquoi modéliser l'essai Charpy ? [2]

- L'essai Charpy fournit une énergie de rupture (CVN [J/cm²])
- Le dimensionnement est effectué à partir d'une analyse en ténacité

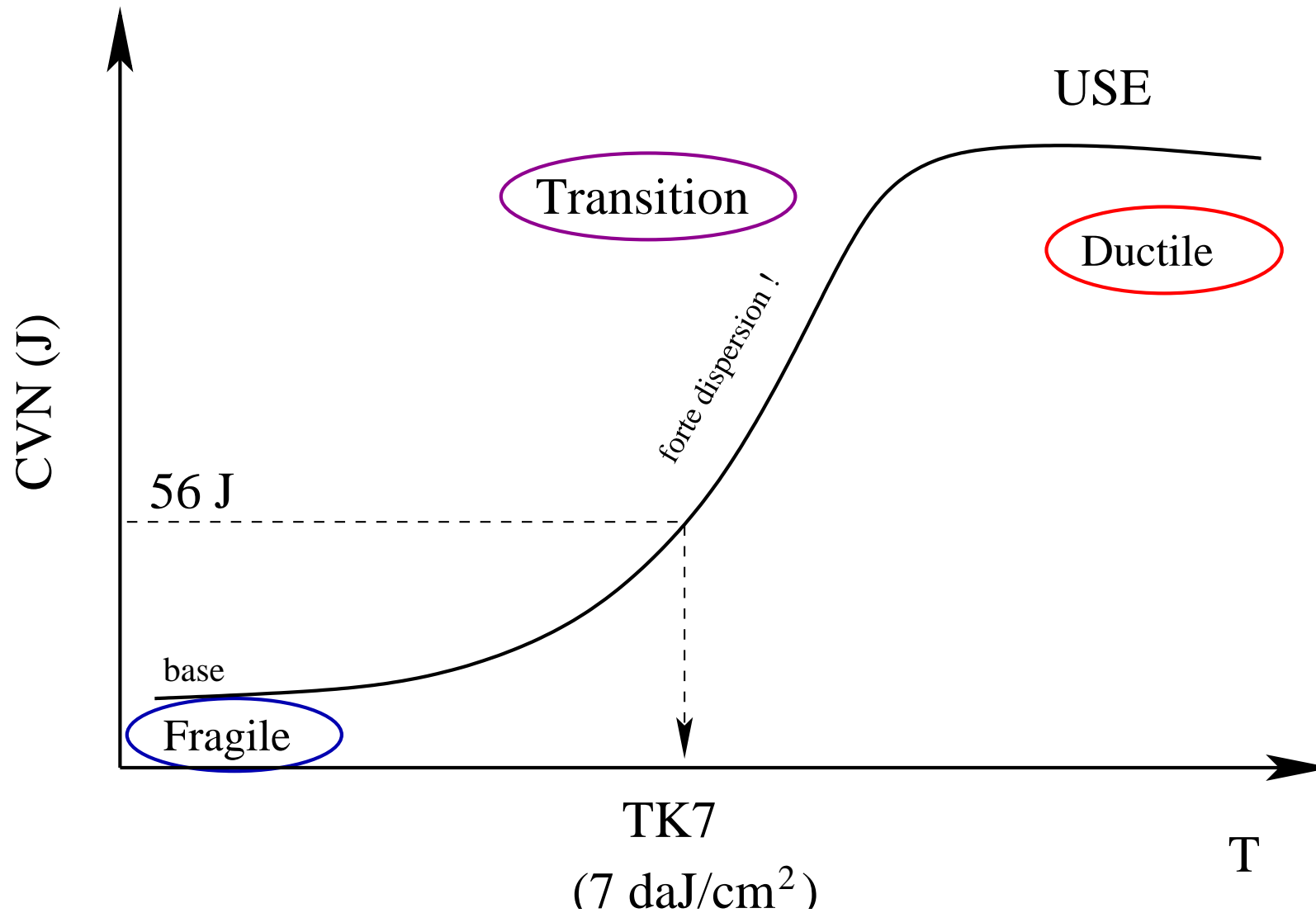
Passage : résilience → ténacité

- Utiliser des corrélations empiriques :

$$\frac{K_{Ic}^2}{E} = 0.222(\text{CVN})^{3/2} \quad [\text{Barsom \& Rolfe}]$$

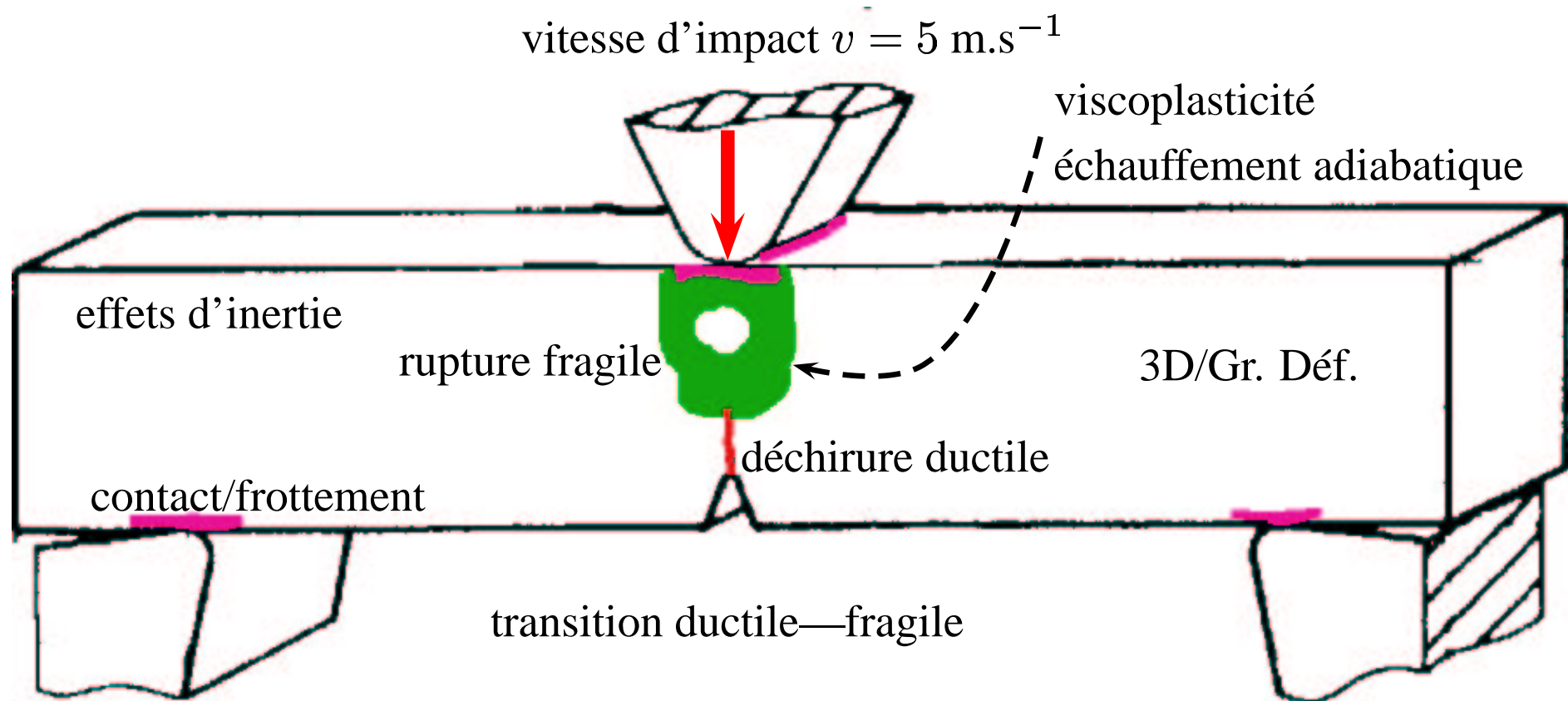
- Utiliser la simulation numérique pour effectuer le passage
 - Essai Charpy instrumenté → ajustement des paramètres
 - paramètres ajustés → simulation de la ténacité

Que cherche-t-on à modéliser ?

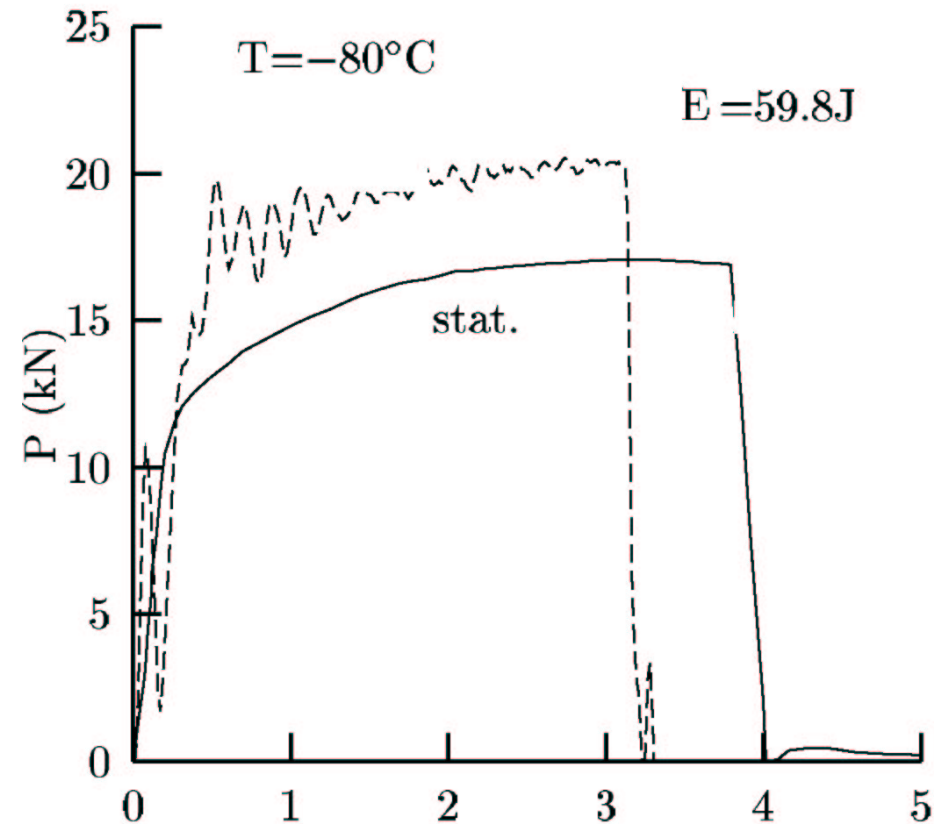


- mais aussi : avancée de fissure, courbe force—déplacement,...

L'essai Charpy : un essai complexe

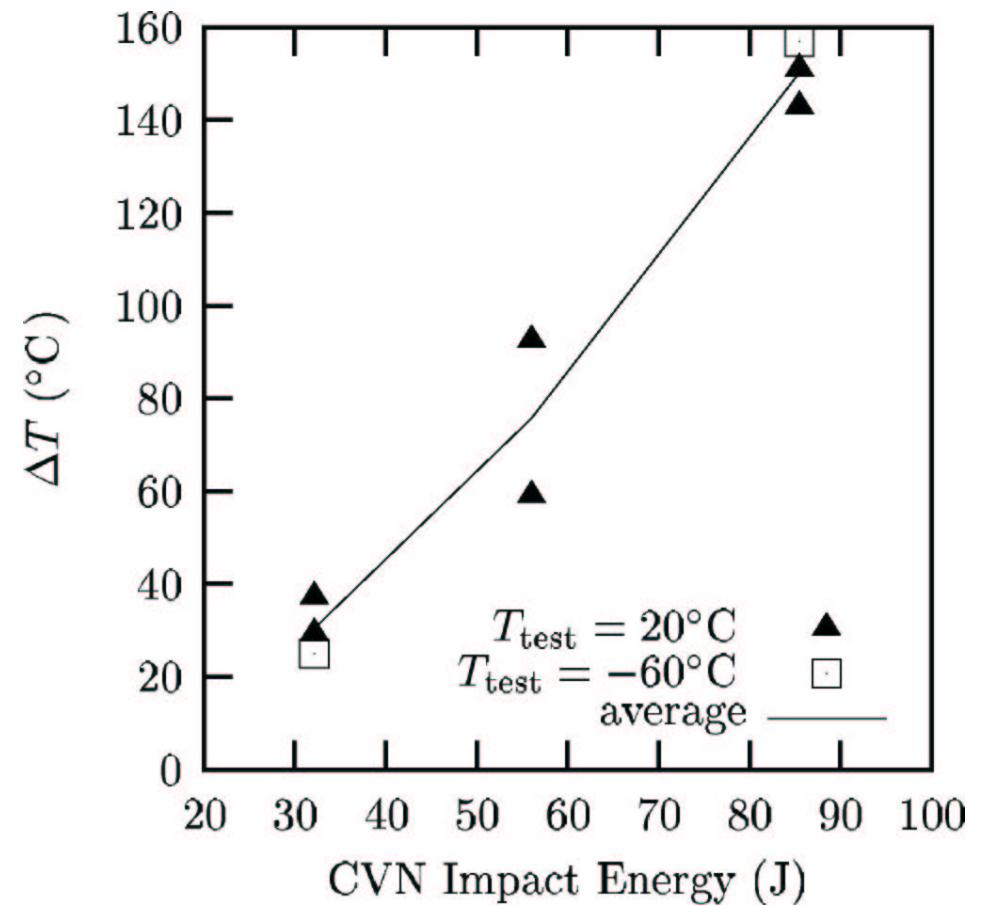
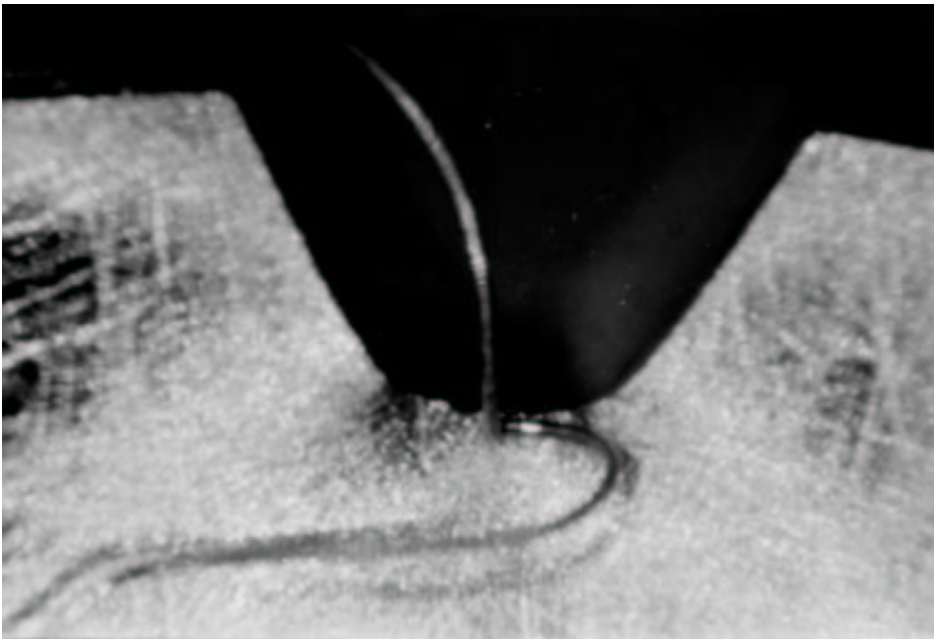


Comportement viscoplastique

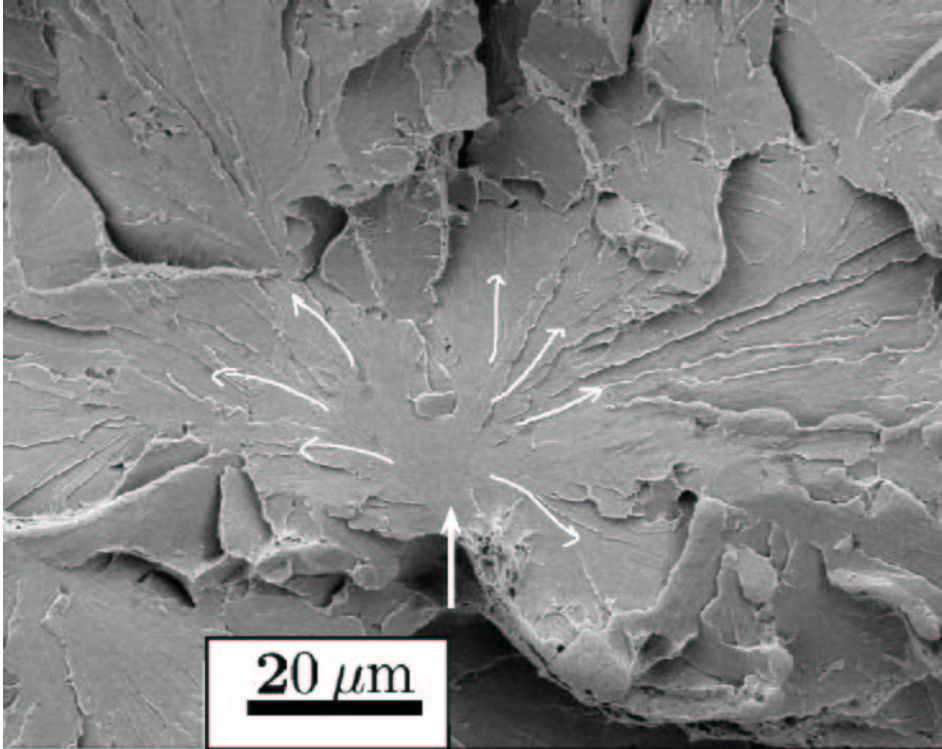
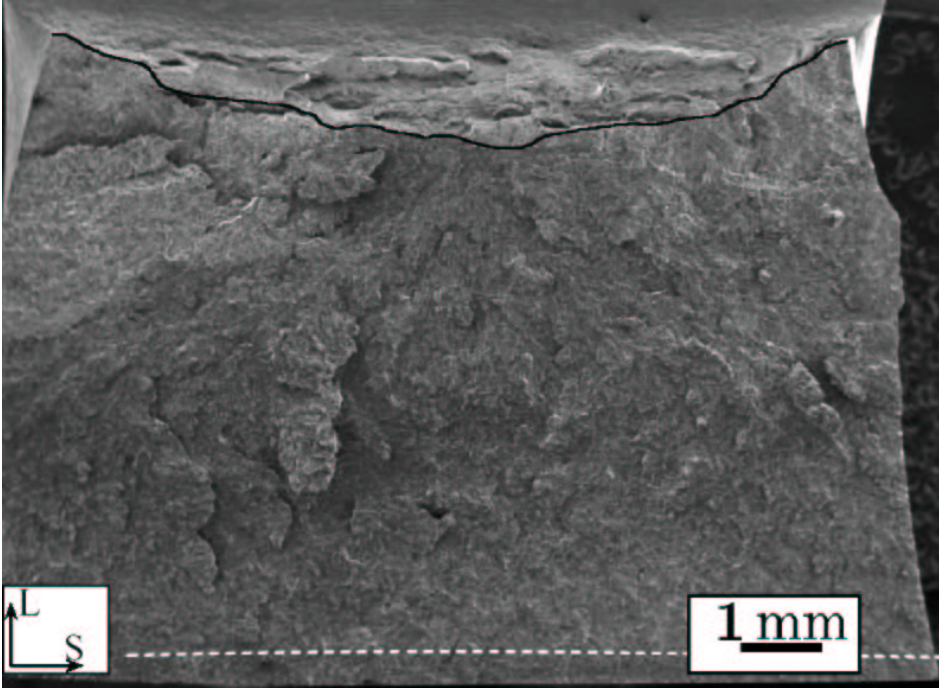


- Effet de vitesse
- Même énergie mais comportement différent

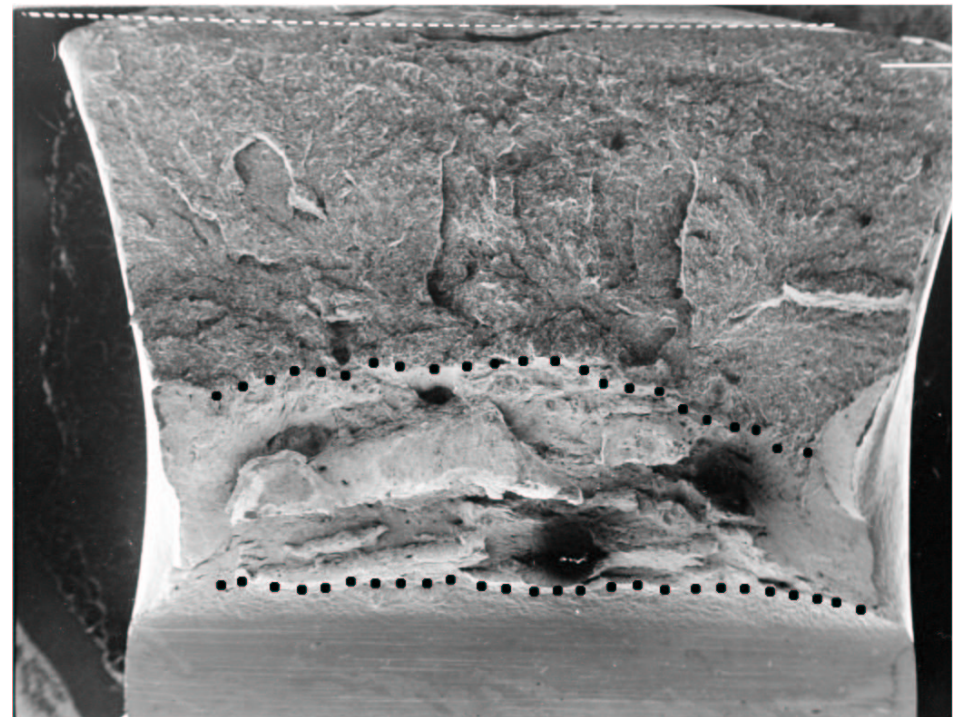
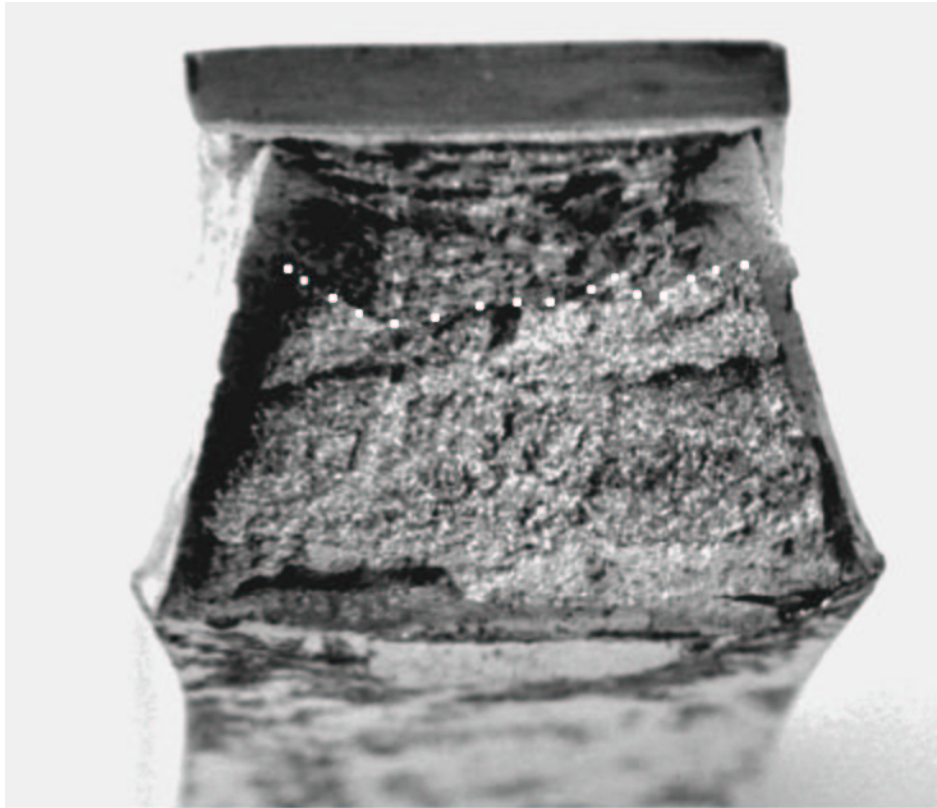
Echauffement



Rupture ductile/Rupture fragile

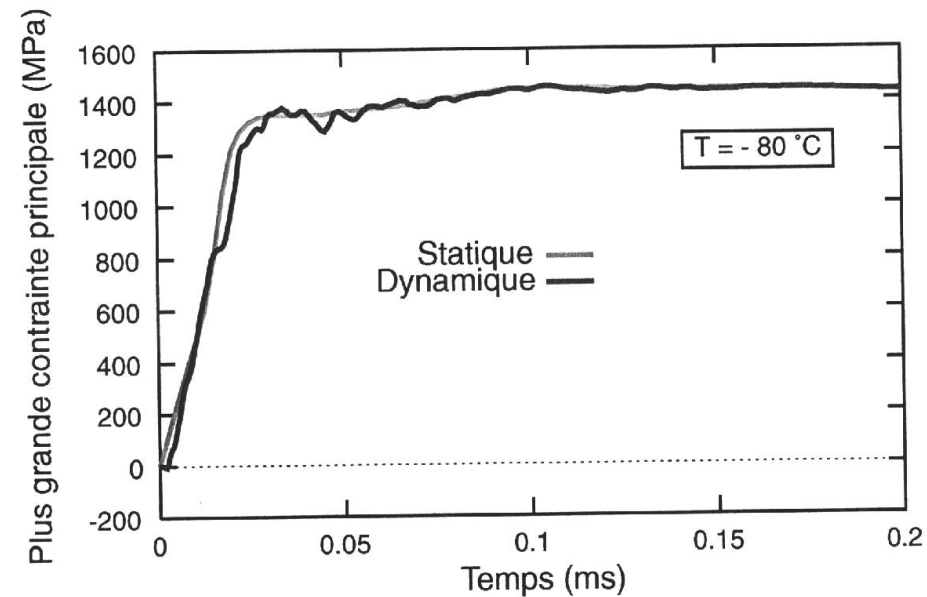


Un problème 3D



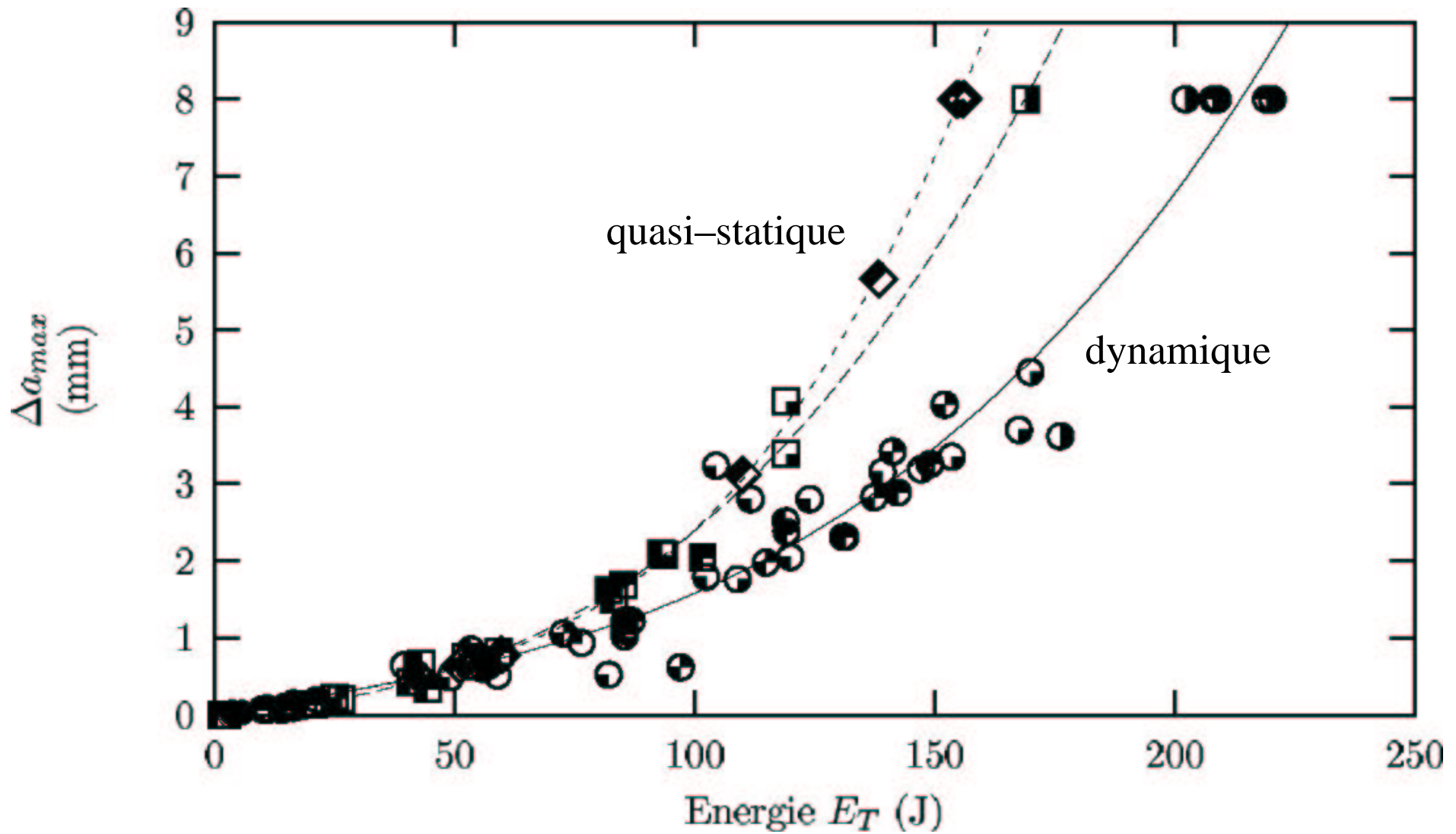
Un problème dymanique ?

- Effets inertiels négligeables [Rossoll, Tahar]

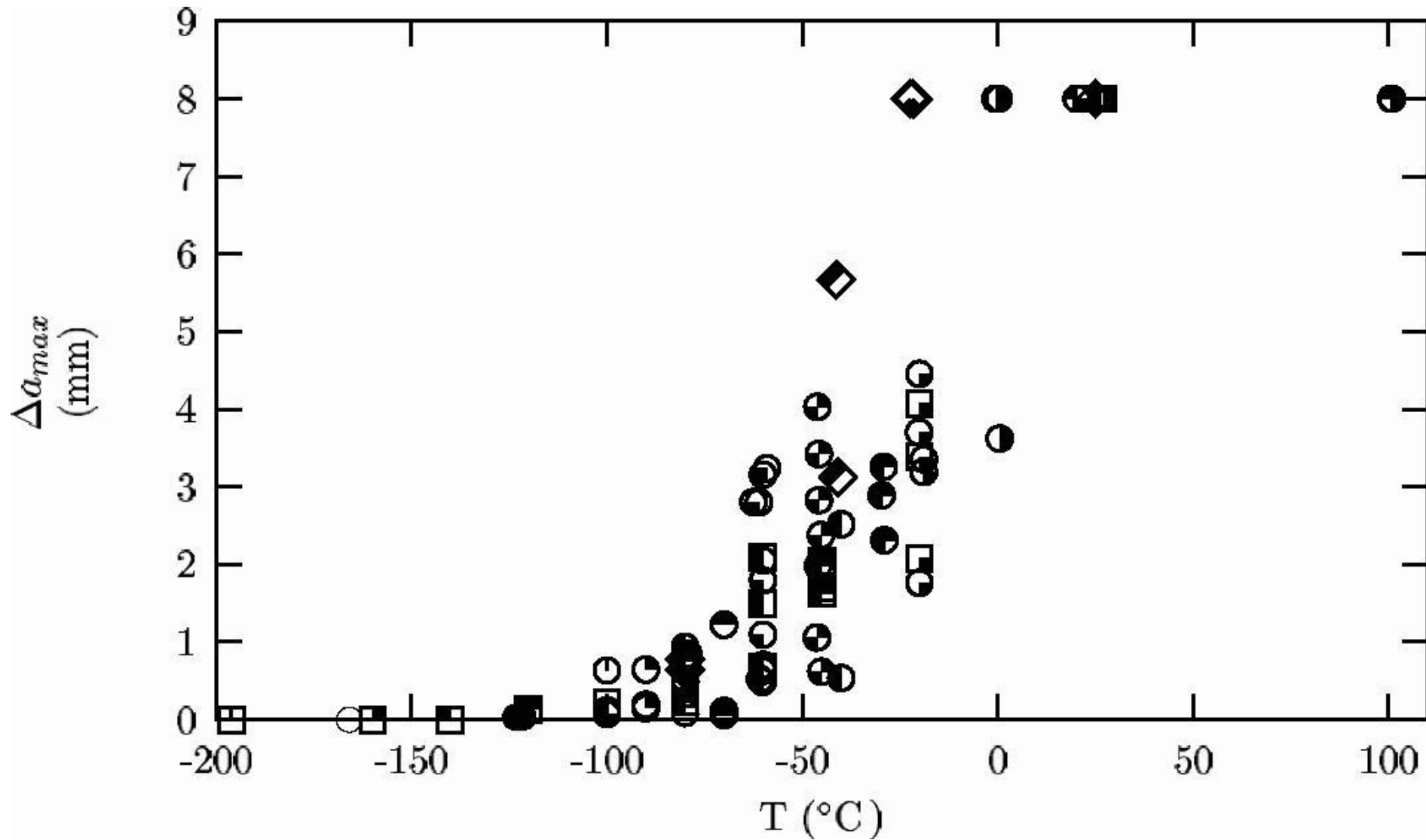


- Mais effet de la vitesse de déformation sur le comportement

Un comportement ductile déterministe



Un comportement fragile aléatoire



Modéliser l'essai Charpy

- Les ingrédients :
 - un modèle : comportement élasto–visco–plastique, échauffement
 - un modèle : rupture ductile
 - un modèle : rupture fragile
 - un modèle : transition ductile—fragile
- Les moyens :
 - Des essais mécaniques
 - Des observations
 - Des moyens de simulations (par éléments finis)
- Matériau employé : acier 16MND5 des cuves REP (structure bainitique)

C	S	P	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Cu	Co	V
0.16	0.004	0.008	0.22	1.33	0.76	0.22	0.51	0.07	0.017	≤ 0.01

Comportement élasto-visco-plastique (1/2)

- La contrainte d'écoulement, σ_f , est exprimée en fonction de : p , \dot{p} and T .

- Domaine de validité :

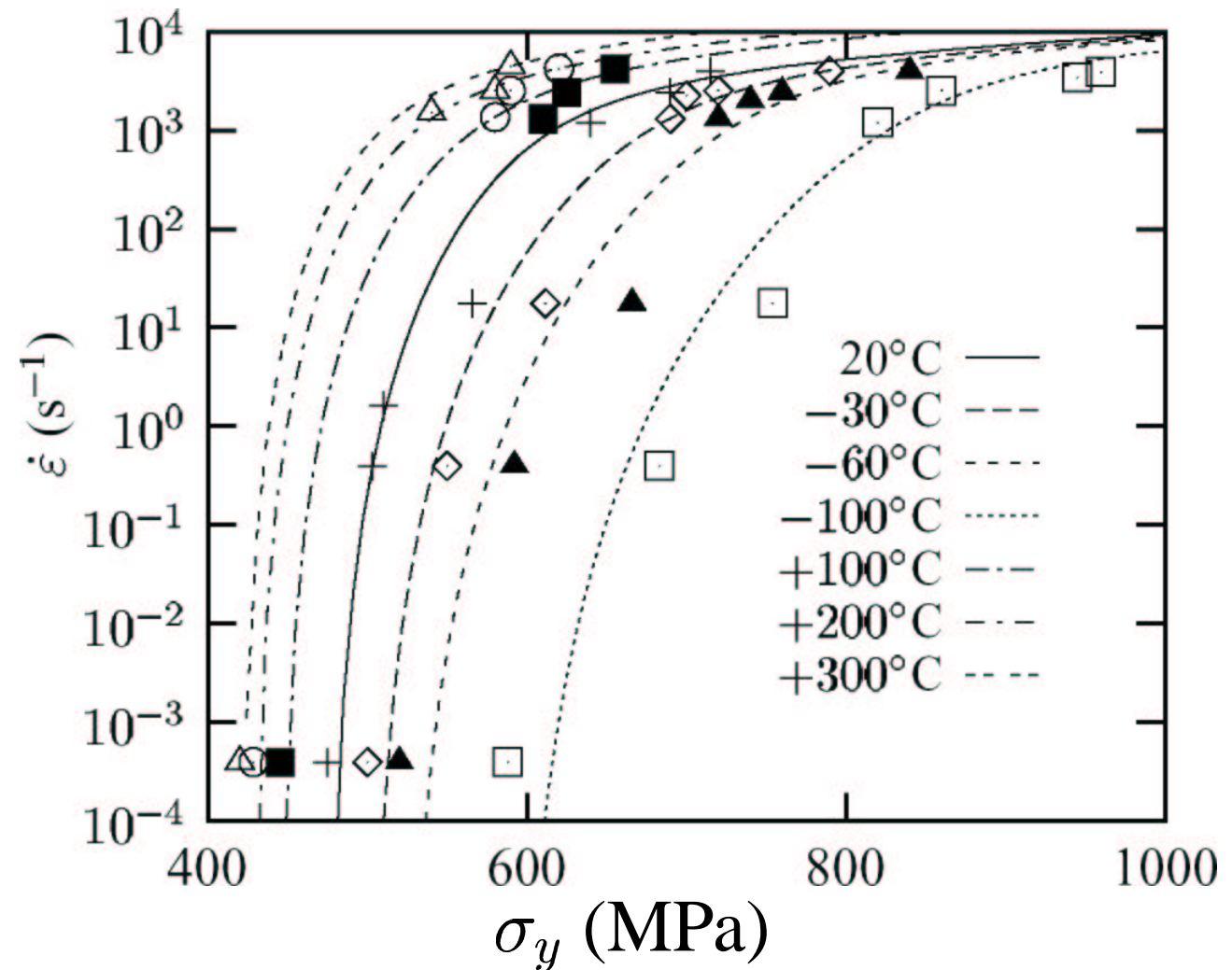
- $\dot{\varepsilon} = 10^{-4} \dots 4000 \text{ s}^{-1}$
- $T = -196 \dots 300^\circ\text{C}$
- $p = 0 \dots 1$

- Echauffement adiabatique

$$C_p \dot{T} = \beta \boldsymbol{\sigma} : \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_p$$

- essais de traction

- barres de Hopkinson



Comportement élasto–visco–plastique (2/2)

- Forme employée

- Ecrouissage isotrope

$$R(p, T) = R_0 + Q_1(1 - \exp(-b_1 p)) + Q_2(1 - \exp(-b_2 p))$$

- Viscoplasticité

$$\frac{1}{\dot{p}} = \frac{1}{\dot{\varepsilon}_1} + \frac{1}{\dot{\varepsilon}_2} \quad \text{avec} \quad \dot{\varepsilon}_i = \left\langle \frac{\sigma - R}{K_i} \right\rangle^{n_i} \quad i = 1, 2$$

(1) friction de Peierls, (2) traînage des phonons

- Les paramètres $(R_0, Q_1, \dots, K_i, n_i)$ dépendent de la température

Rupture ductile : le modèle

- Modèle décrivant l'endommagement des matériaux ductiles (germination, croissance, coalescence)
- Modèle de Rousselier modifié (surface seuil)

$$\phi = \frac{\sigma_{eq}}{(1-f)\sigma_f} + \frac{2}{3}fD_R \exp\left(\frac{q_R}{2} \frac{\sigma_{kk}}{(1-f)\sigma_f}\right) - 1 = 0$$

- f : porosité (variable scalaire d'endommagement)
- Loi d'écoulement (normalité) :

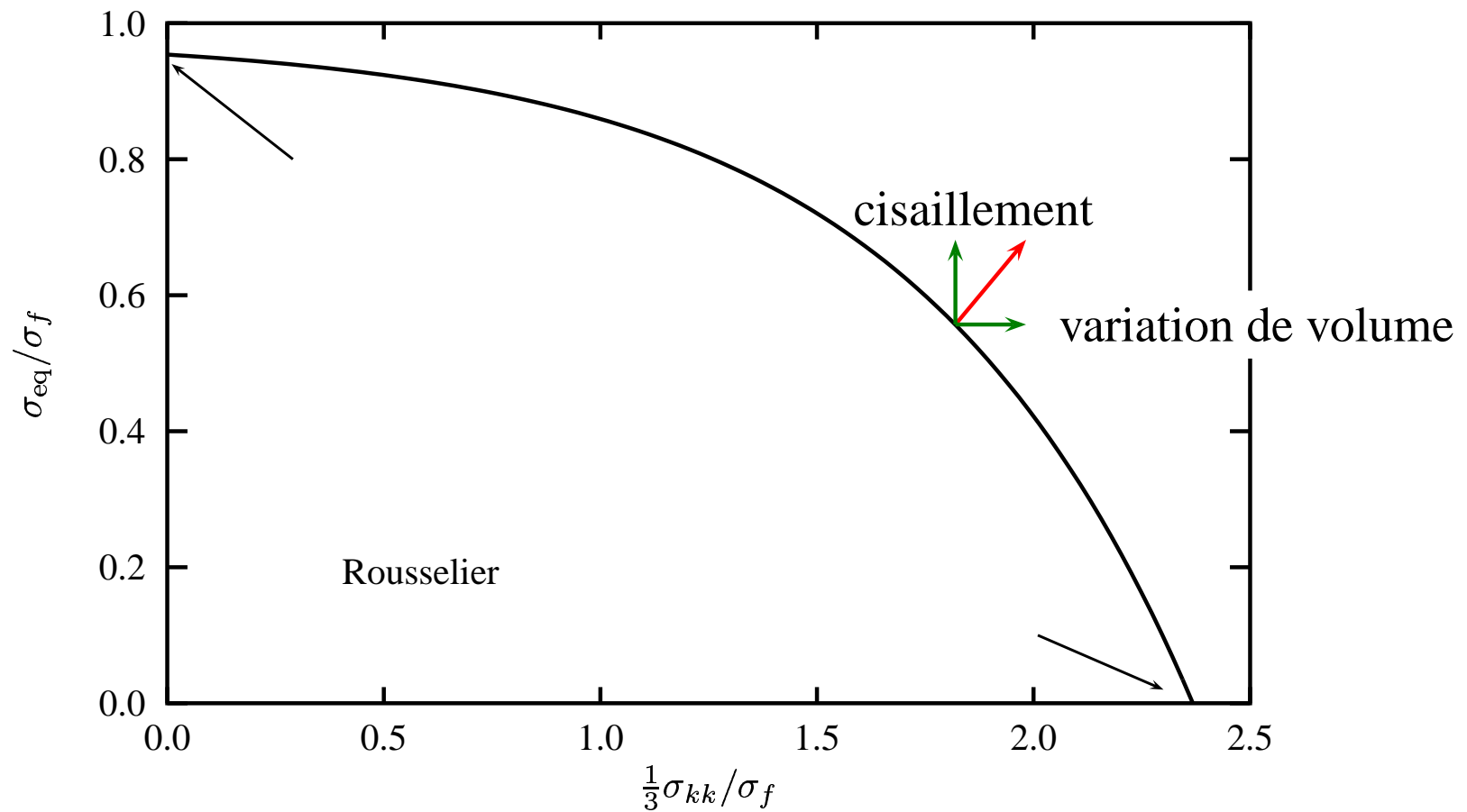
$$\dot{\xi}_p = (1-f)\dot{\lambda} \frac{\partial \phi}{\partial \underline{\sigma}}$$

- Evolution de l'endommagement

$$\dot{f} = (1-f)\text{tr}\left(\dot{\xi}_p\right) + A_n \dot{p}$$

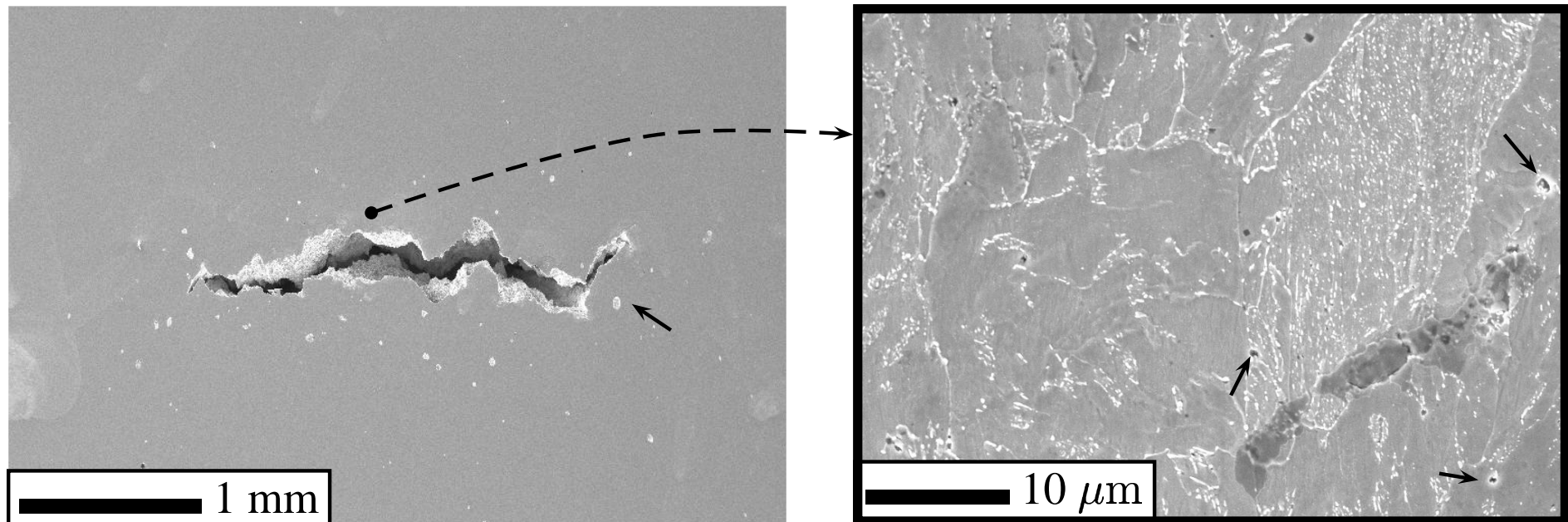
- Paramètres ajustables : q_R , D_R , A_n et h (taille caractéristique)

Rupture ductile : surface d'écoulement



Rupture ductile : germination

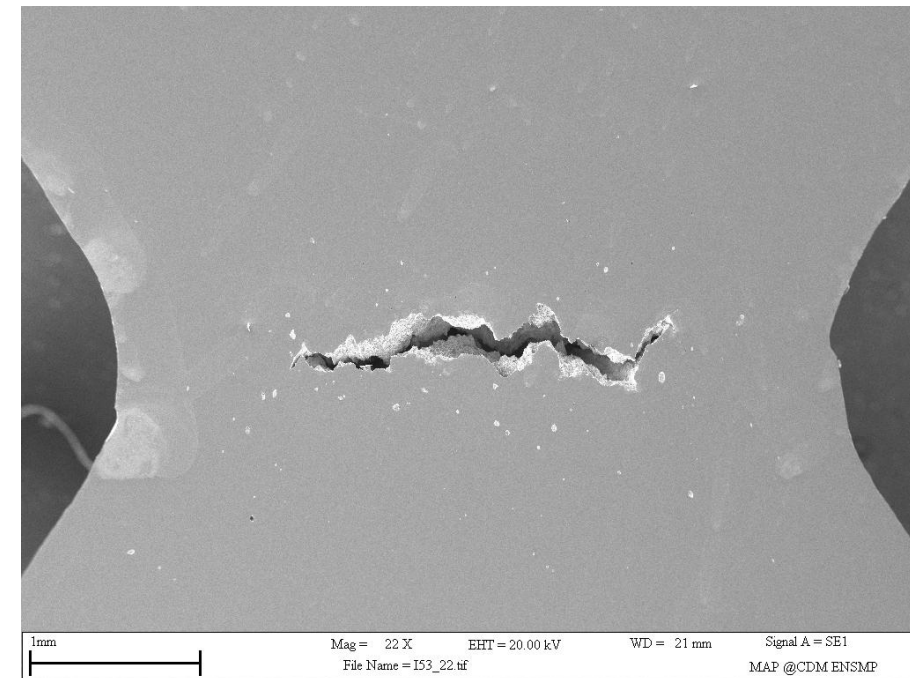
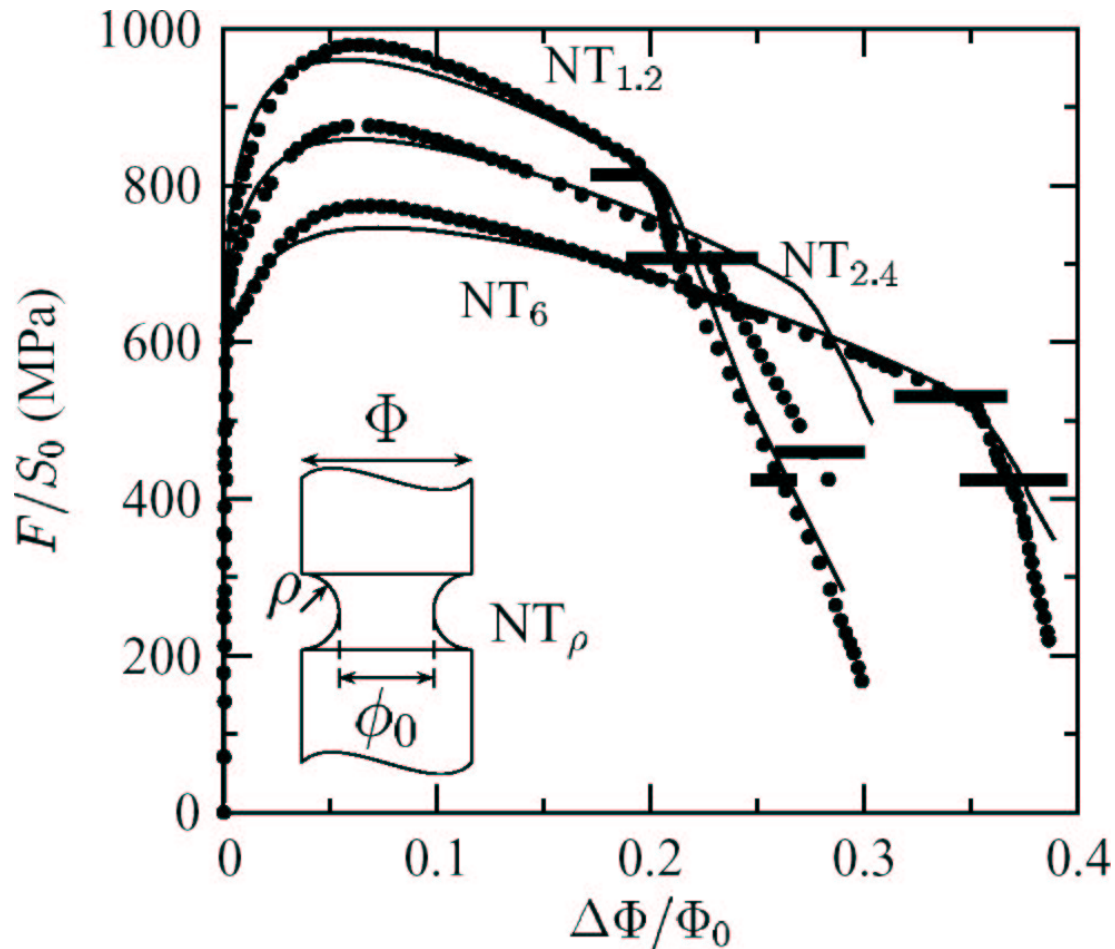
- MnS : décohésion facile $\longrightarrow f_0 = 1.75 \cdot 10^{-4}$ (Franklin & analyse d'image)
 - MnS sphériques
- Carbures (Fe_3C)



- La rupture des carbures débutent pour $p > 0.5$ (on suppose que pour $p = 1.2$ tous les carbures sont rompus)

Rupture ductile : croissance et coalescence

- Identification à $+20^{\circ}\text{C}$ sur les éprouvettes de tractions entaillées
- $q_R = 0.89$, $D_R = 2.2$, $h = 100\ \mu\text{m}$ = taille de maille
- Contrôle de l'essai en vitesse de variation du diamètre : propagation stable



Rupture fragile : le modèle

- Modèle de Beremin :

$$\sigma_{Ip} = \sigma_I \exp(-kp) \quad \sigma_w = \left(\int_{V_p} \sigma_{Ip}^m dV/V_0 \right)^{1/m} \quad P_r = 1 - \exp(-(\sigma_w/\sigma_u)^m)$$

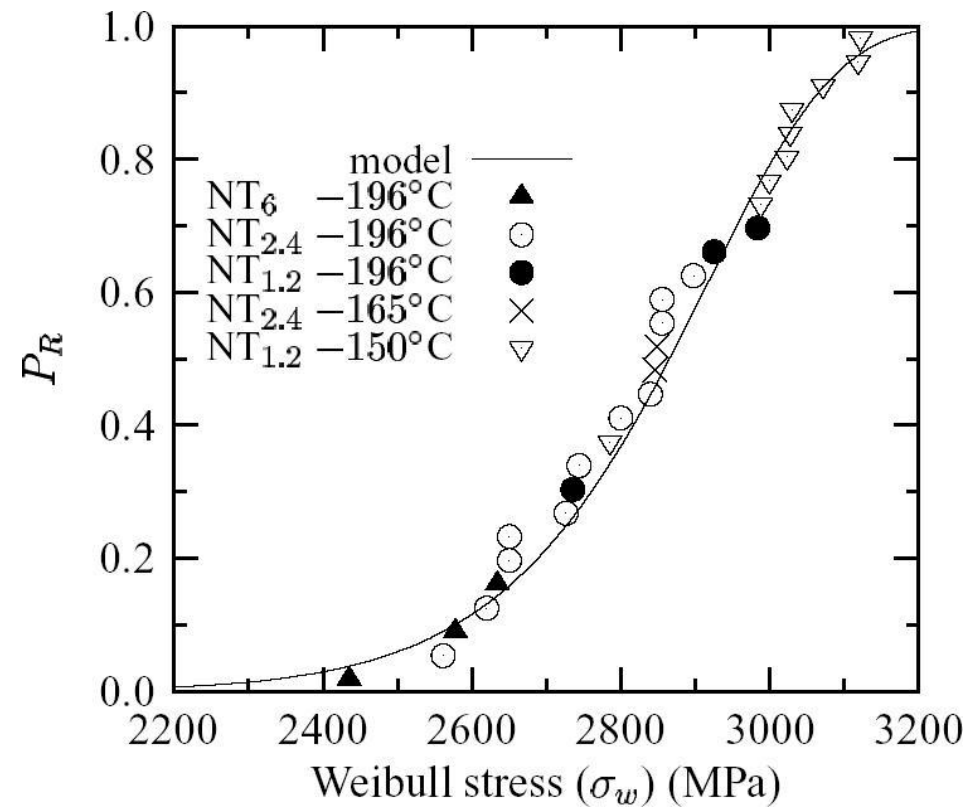
- Problèmes dans le cas d'une propagation ductile de la fissure : déchargement
- Adapter le modèle pour traiter les cas où m , σ_u (\propto contrainte de clivage), k dépendent de la température.
- Modèle adapté :

$$\omega = (\sigma_{Ip}/\sigma_u)^m \quad \tilde{\omega} = \max_{\tau \in [0, t], \dot{p}(\tau) > 0} \omega(\tau)$$

$$\Omega(t) = \int_{V_t} \tilde{\omega}(t) dV/V_0 \quad P_r(t) = 1 - \exp(-\Omega(t))$$

- Ajustement du modèle à basse température sur barreaux entaillés avec m , σ_u et k constants.

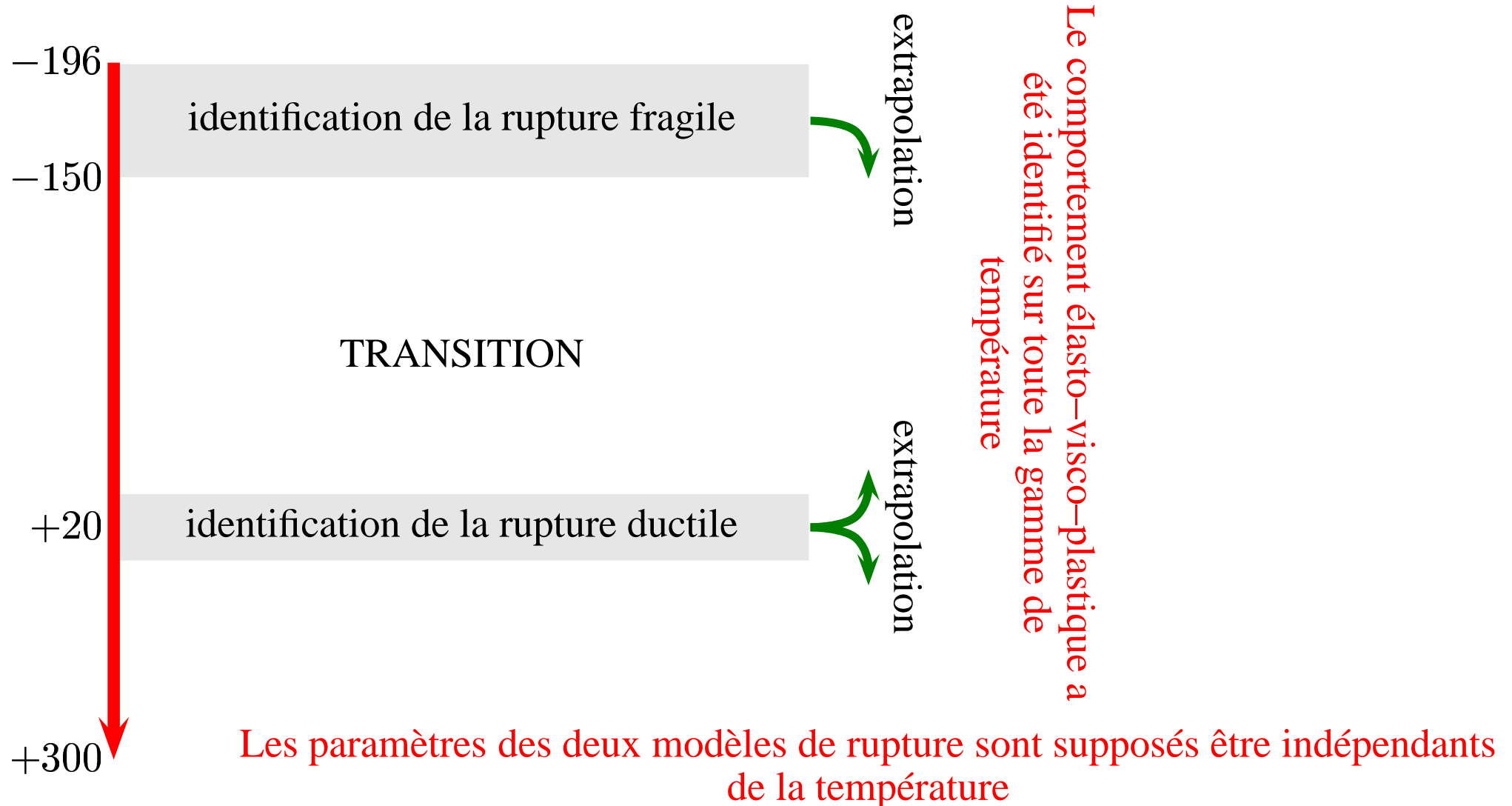
Rupture fragile : l'ajustement



- $V_0 = 0.001 \text{ mm}^3$, $\sigma_u = 2925 \text{ MPa}$, $m = 17.8$, $k = 4$

Transition : le modèle

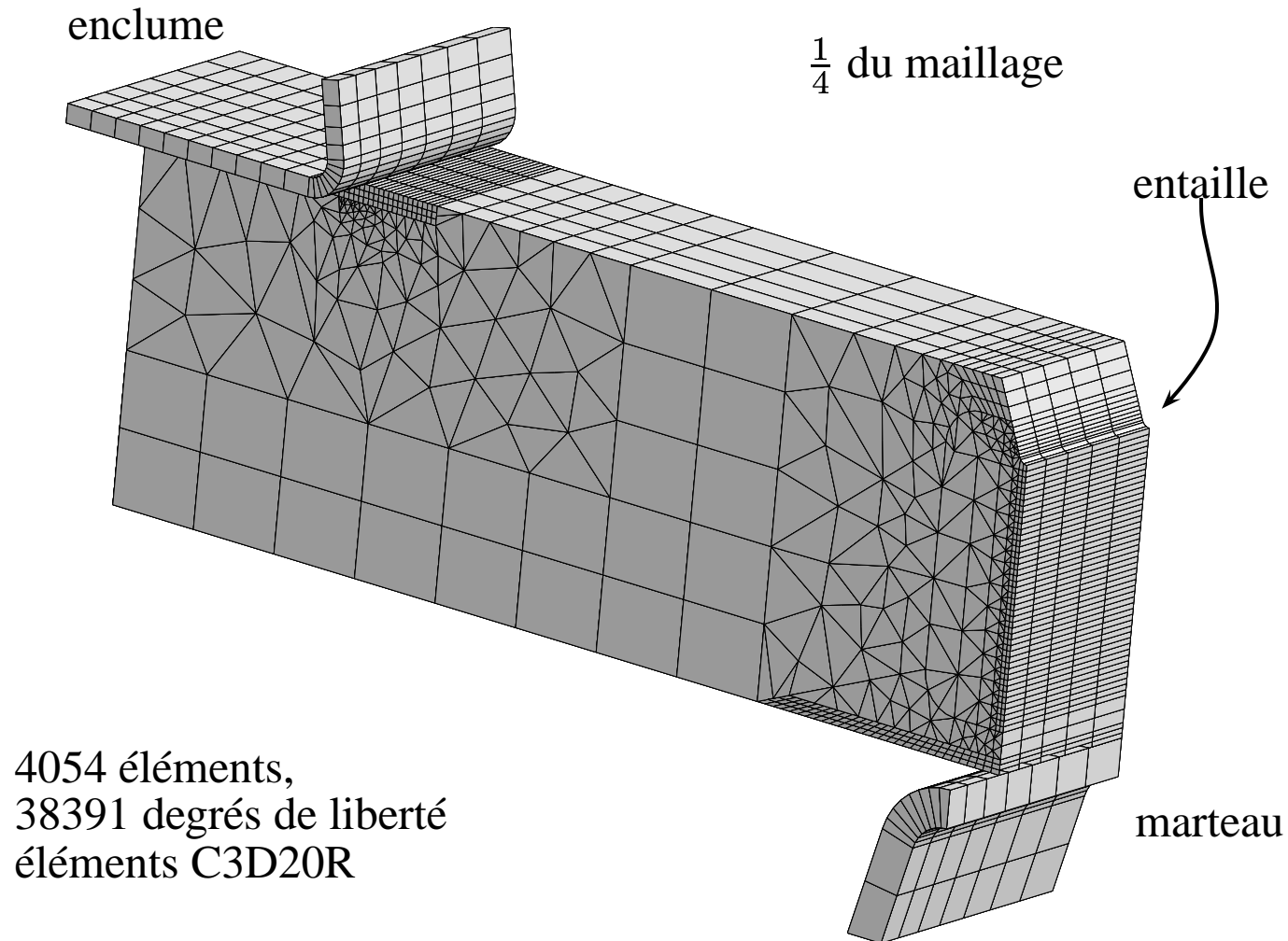
- Pas de modèle ! Simulation uniquement



Simuler l'essai Charpy

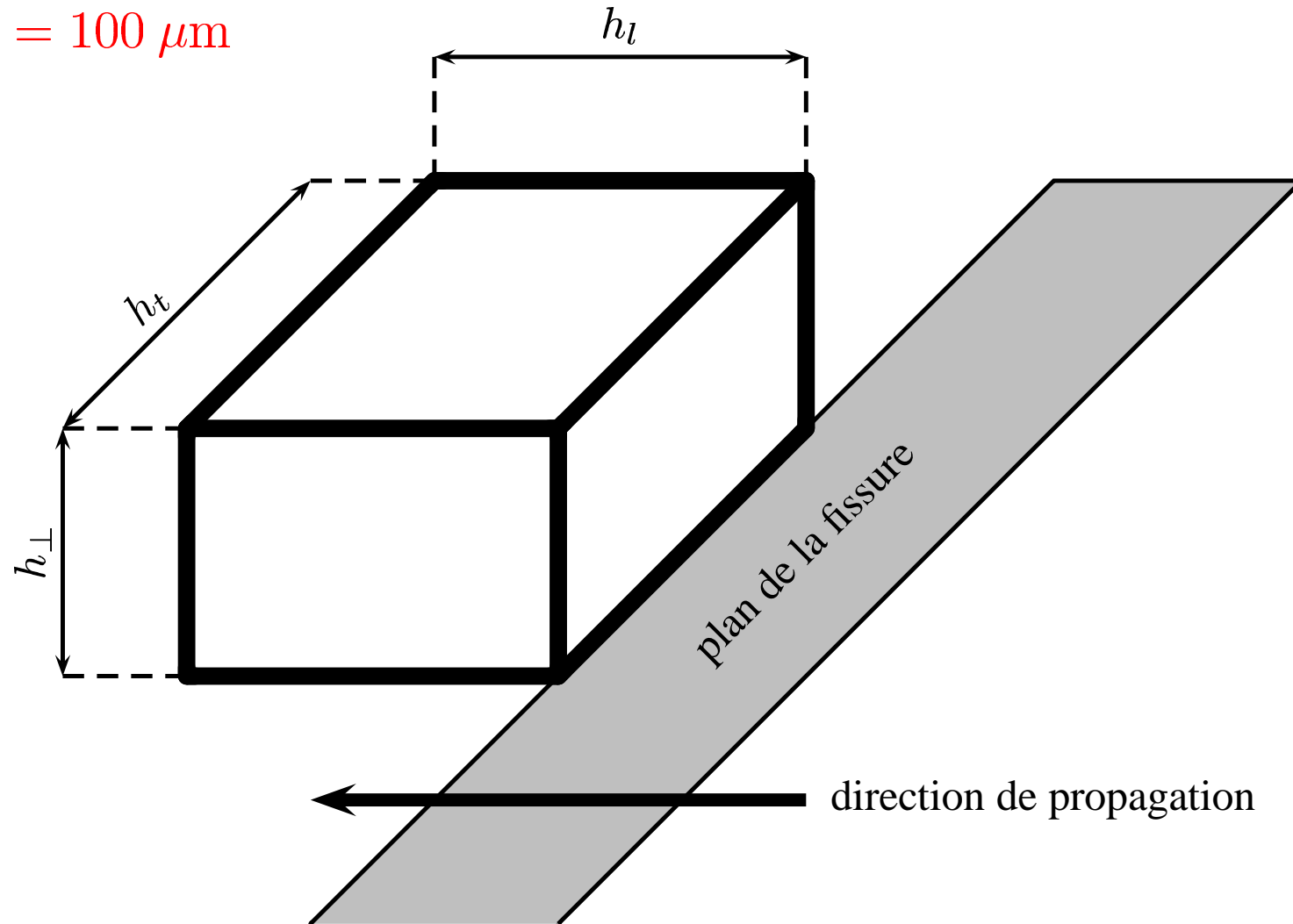
- Calculs éléments finis
- Simulation de la déchirure ductile
- Simulation de la transition

Calculs par éléments finis

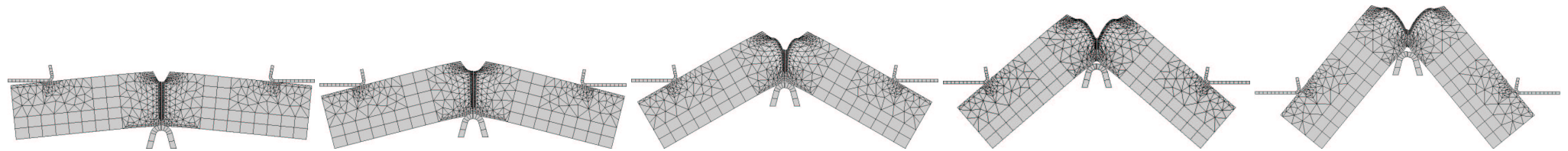
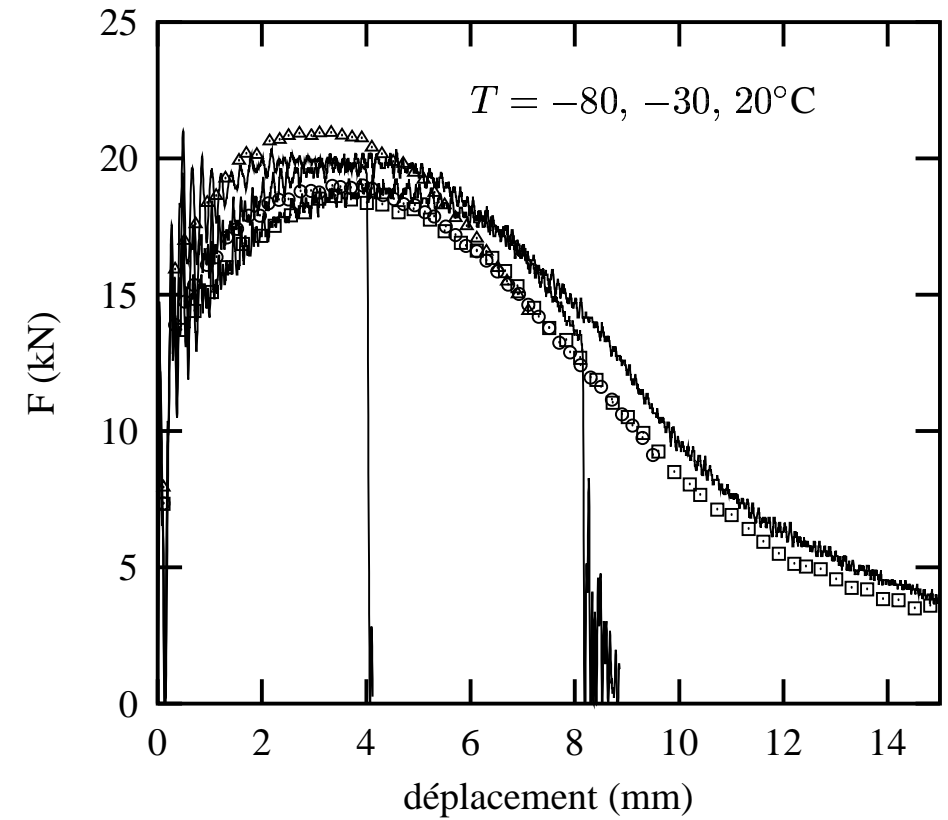
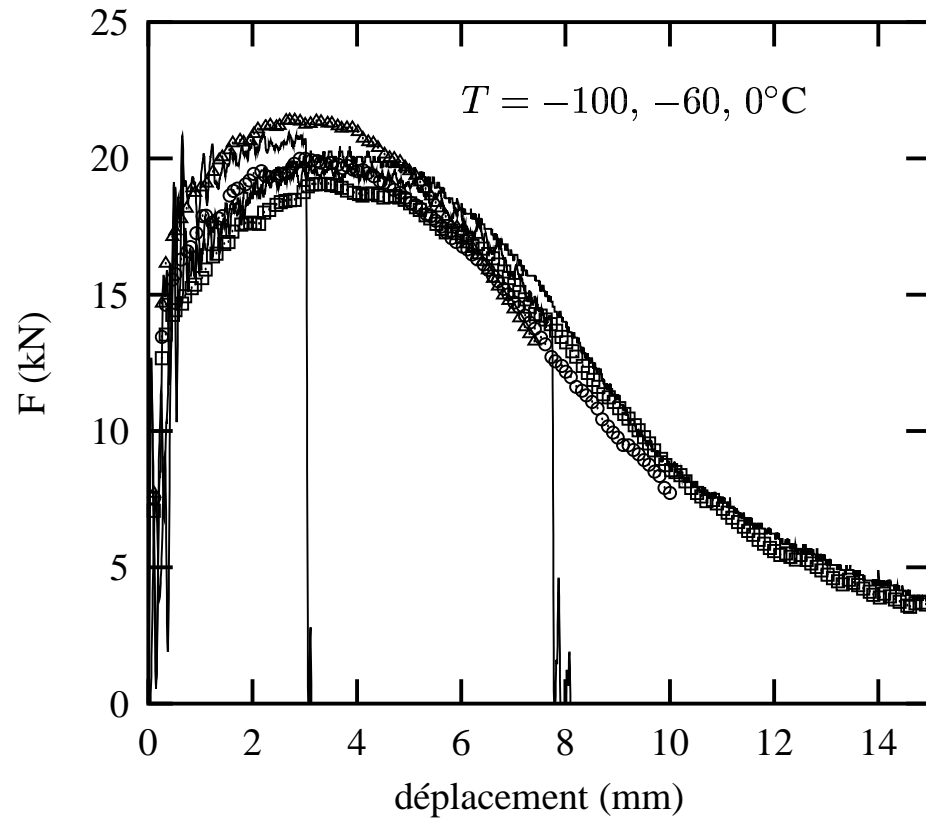


Éléments dans la zone de propagation

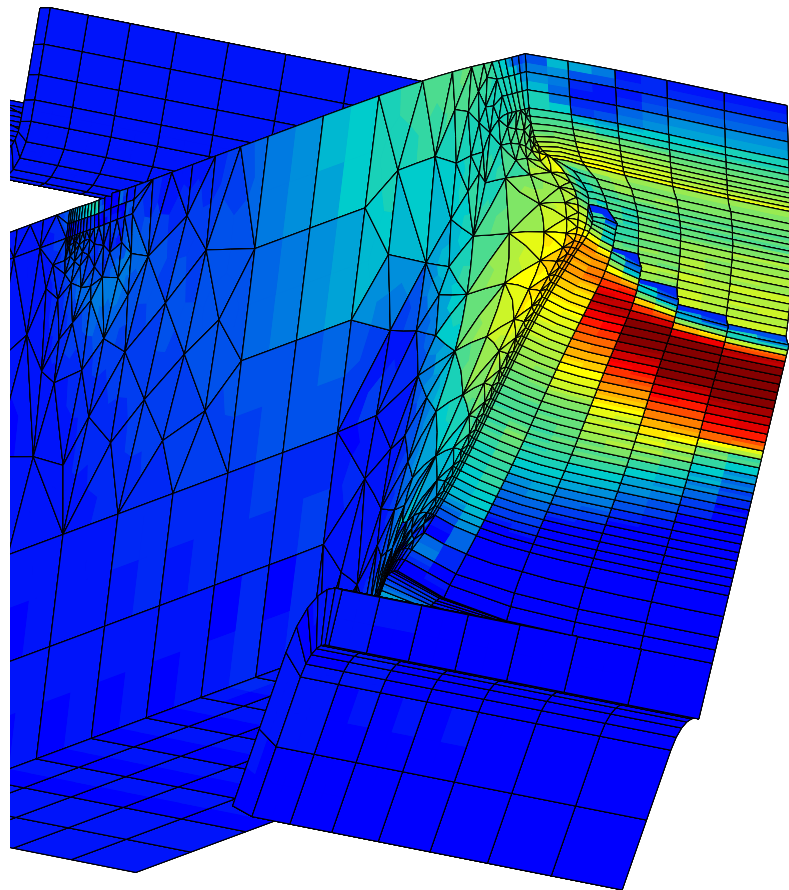
$$h_{\perp} = 100 \mu\text{m}$$



Simulation de la déchirure ductile : Courbes forces—déplacement

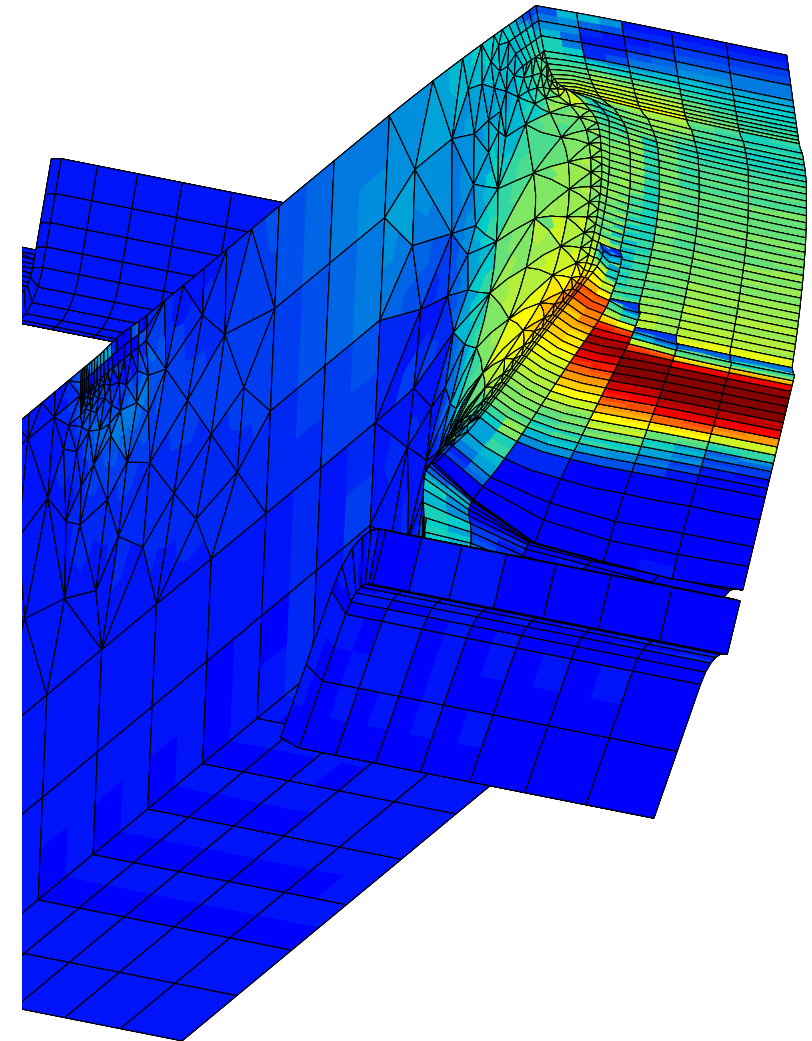


Simulation de la déchirure ductile : avancée de fissure et contraintes



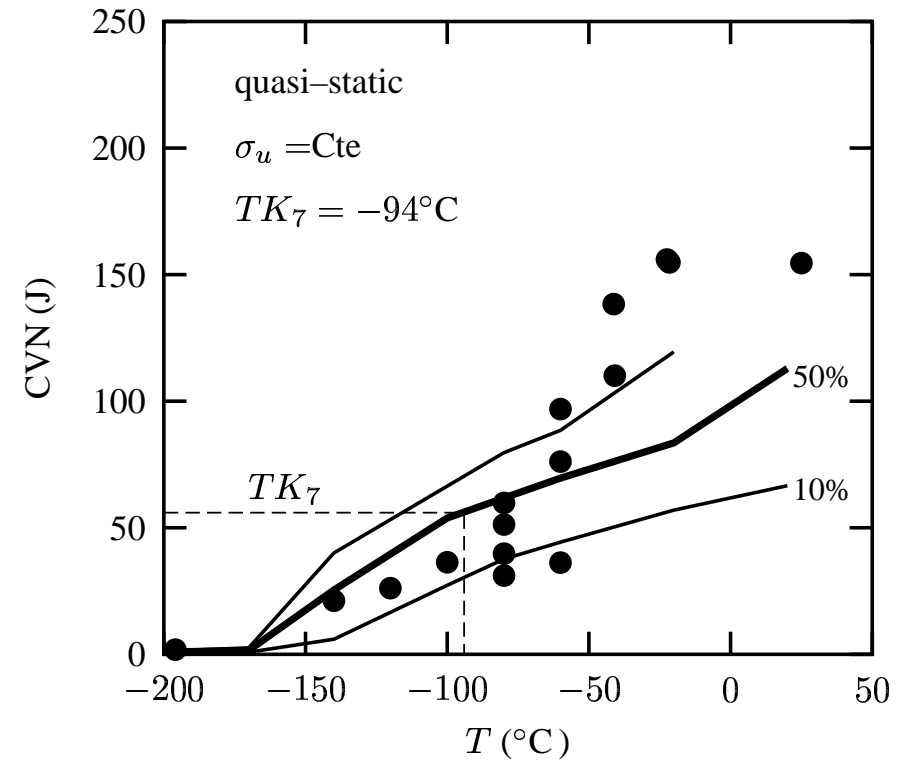
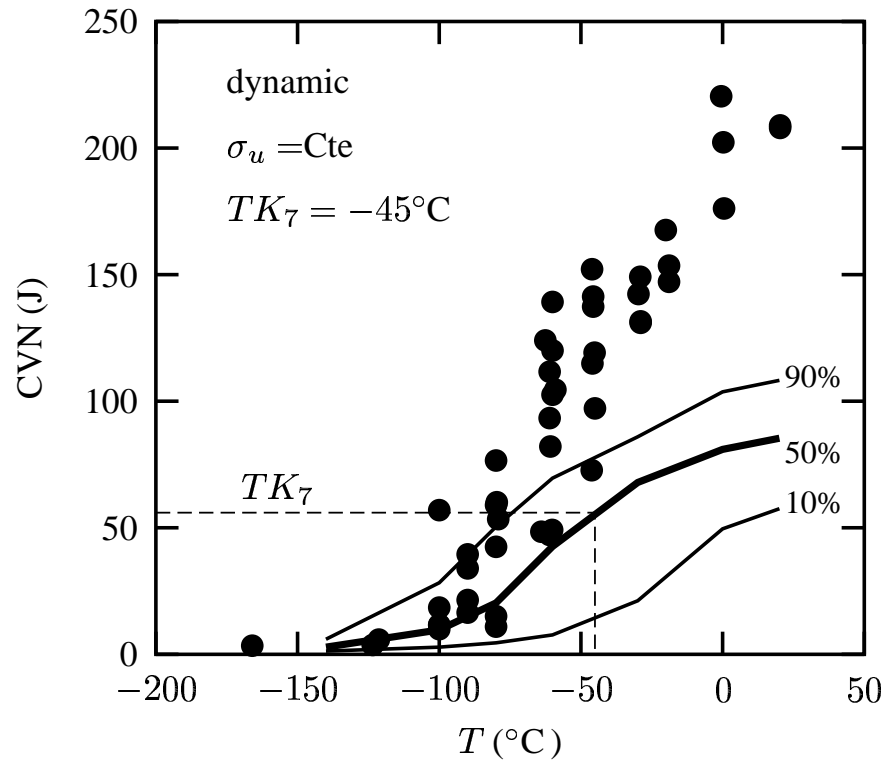
$\delta = 5.3 \text{ mm}$, $\text{CVN} = 97 \text{ J}$,
 $\Delta a = 1.0 \text{ mm}$, $P_r = 0.75$

$0 \leq \text{---} \sigma_I \text{ (MPa)} \text{---} \leq 2000$



$\delta = 10. \text{ mm}$, $\text{CVN} = 157 \text{ J}$,
 $\Delta a = 3.6 \text{ mm}$, $P_r = 1.0$

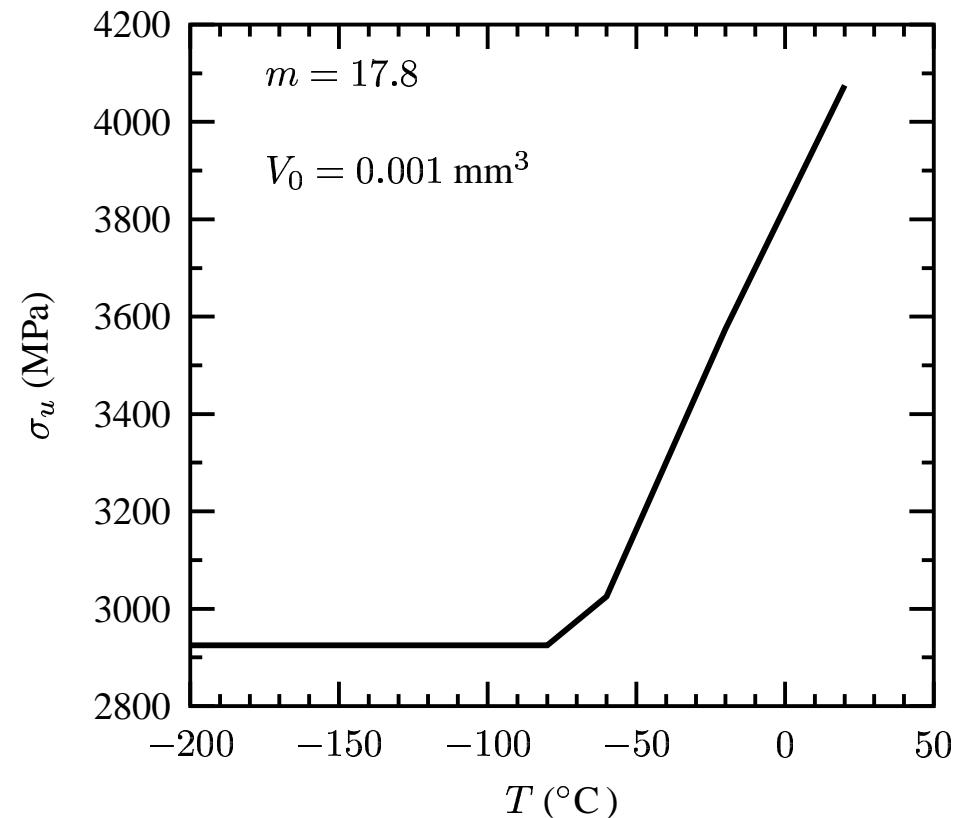
Simulation de la courbe de transition ductile—fragile [$\sigma_u = \text{Cte}$]



- prédiction jusqu'à -80°C

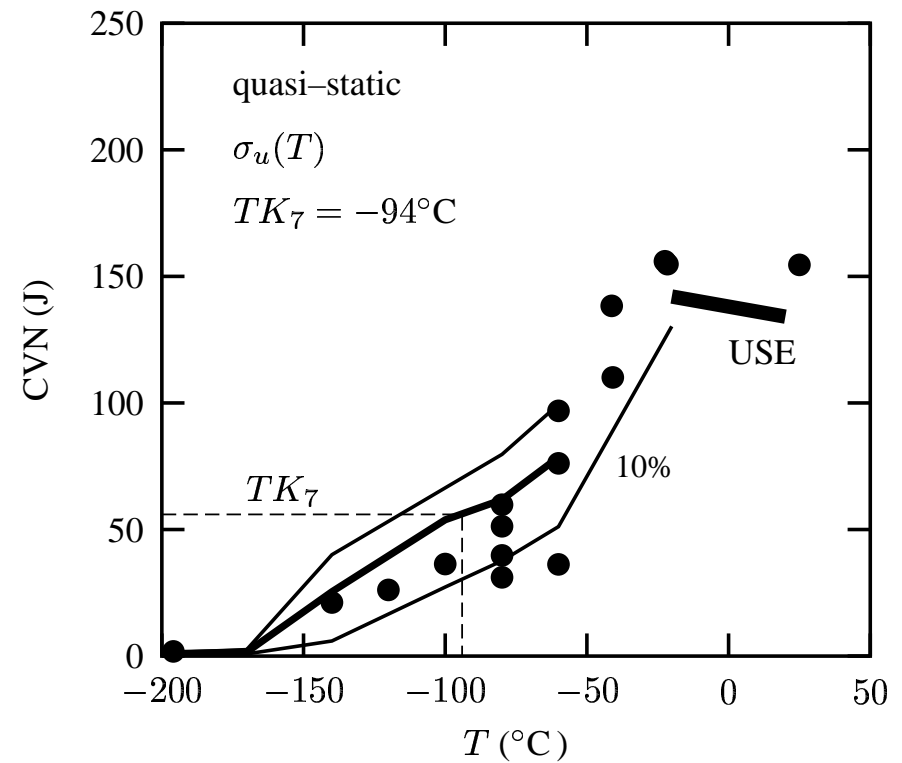
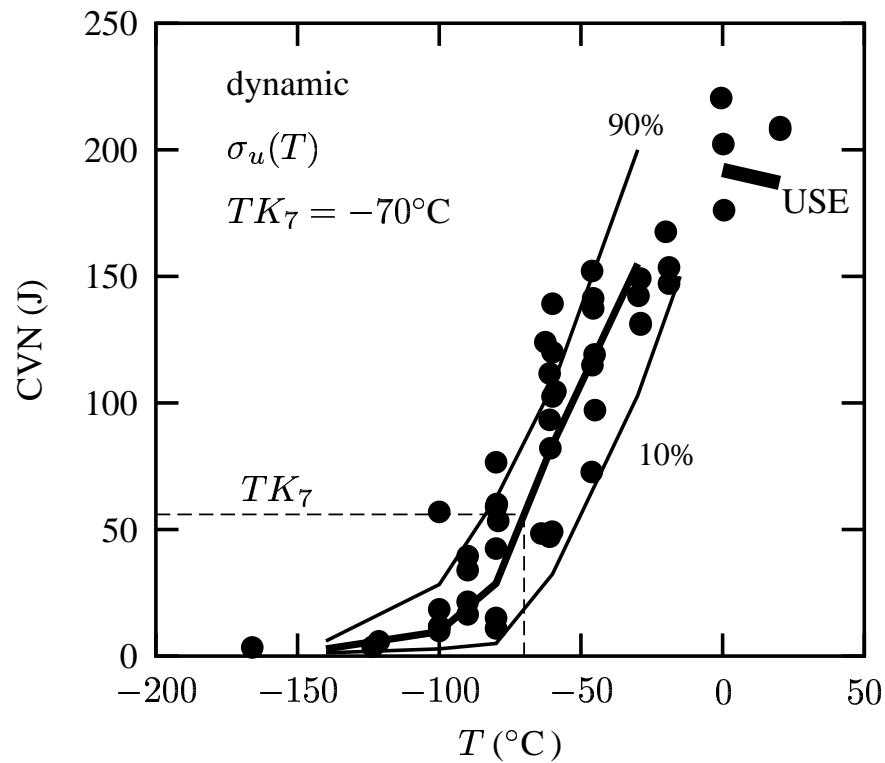
Problème dans la fin de la transition

- Ce problème a été rencontré par d'autres équipes de recherche (ECP [thèse P. Haushild], IWM Freiburg)
- Pas de sites d'amorçage préférentiels en fonction de la température
- Pour résoudre le problème : utiliser $\sigma_u(T)$



- Ajustement sur Charpy dynamique

Simulation de la courbe de transition ductile—fragile [$\sigma_u(T)$]



- Ajustement sur Charpy dynamique. Fonctionne sur Charpy statique
- USE bien modélisée

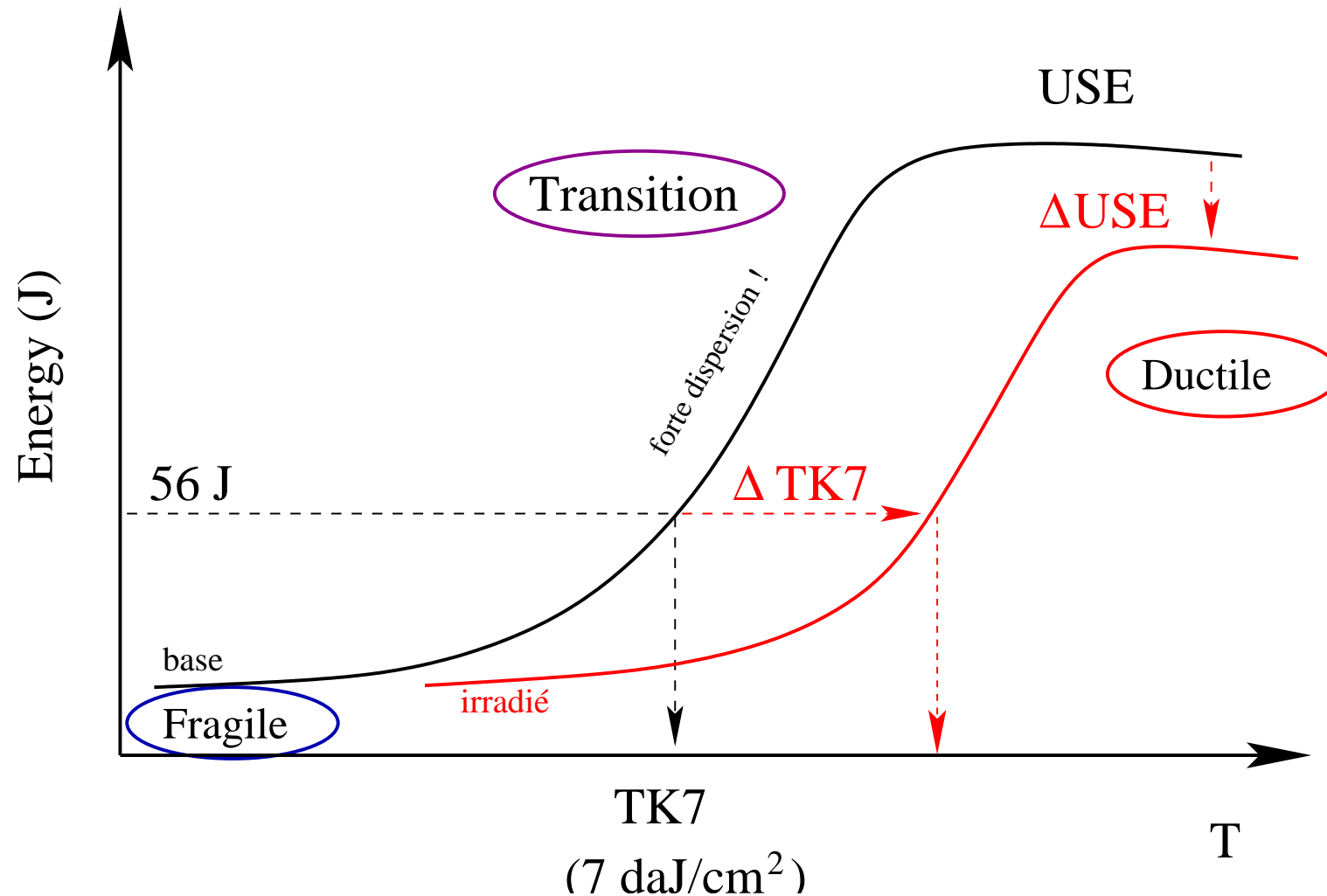
Peut-on simplifier ?

- Déformation plane : si δ petit
- Pas de contact : si δ petit
- Pas de déchirure ductile : si δ petit
- Isotherme : si δ petit
- Plasticité uniquement : modélisation de l'essai Charpy seul

Un modèle plus complexe(t,x) ?

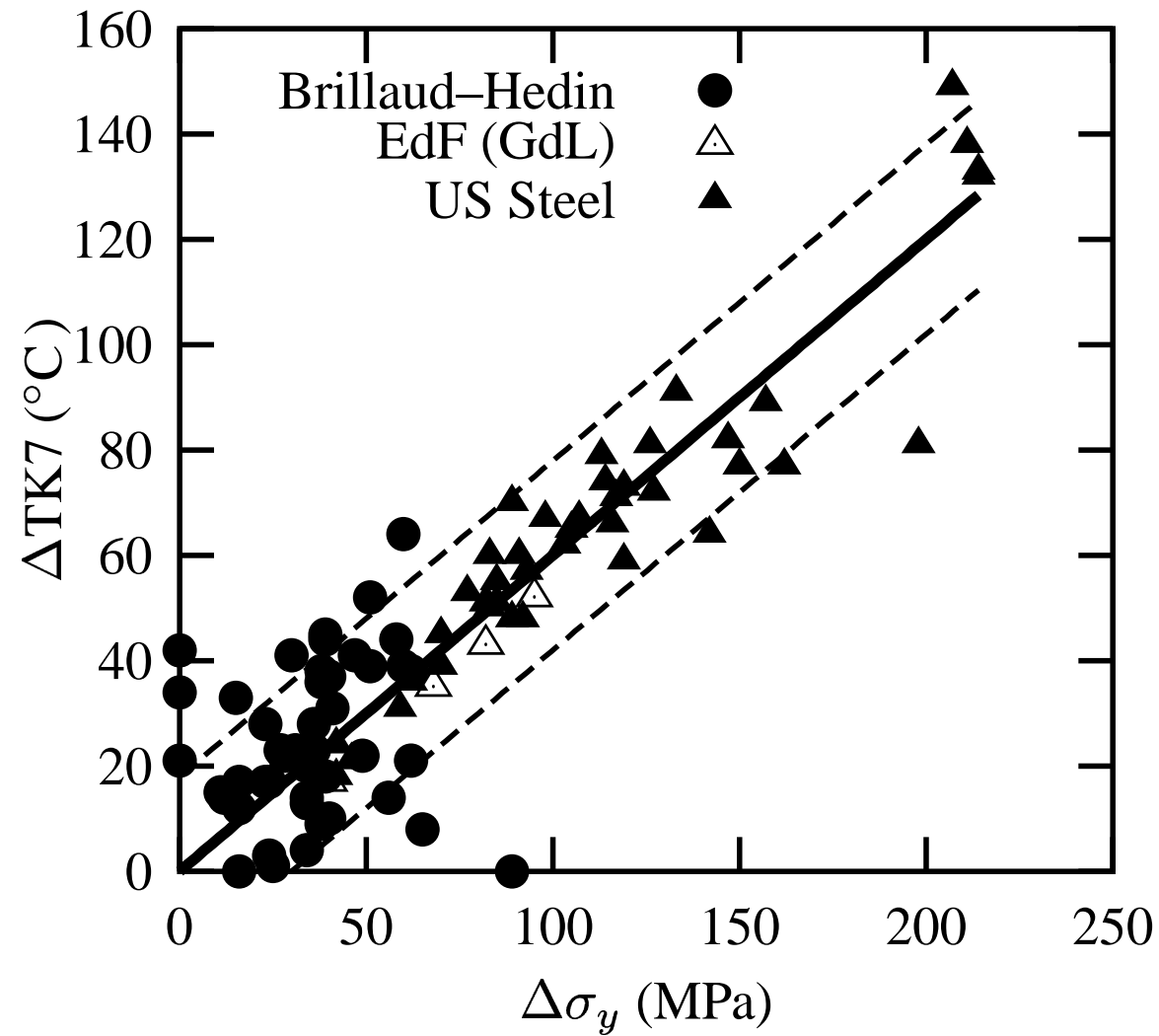
- Inertie
- Diffusion de la chaleur : $\sqrt{Dt} \simeq 100\text{—}200 \mu\text{m}$, $t \simeq 1\text{—}2 \text{ ms}$

Utiliser le modèle pour simuler l'effet de l'irradiation



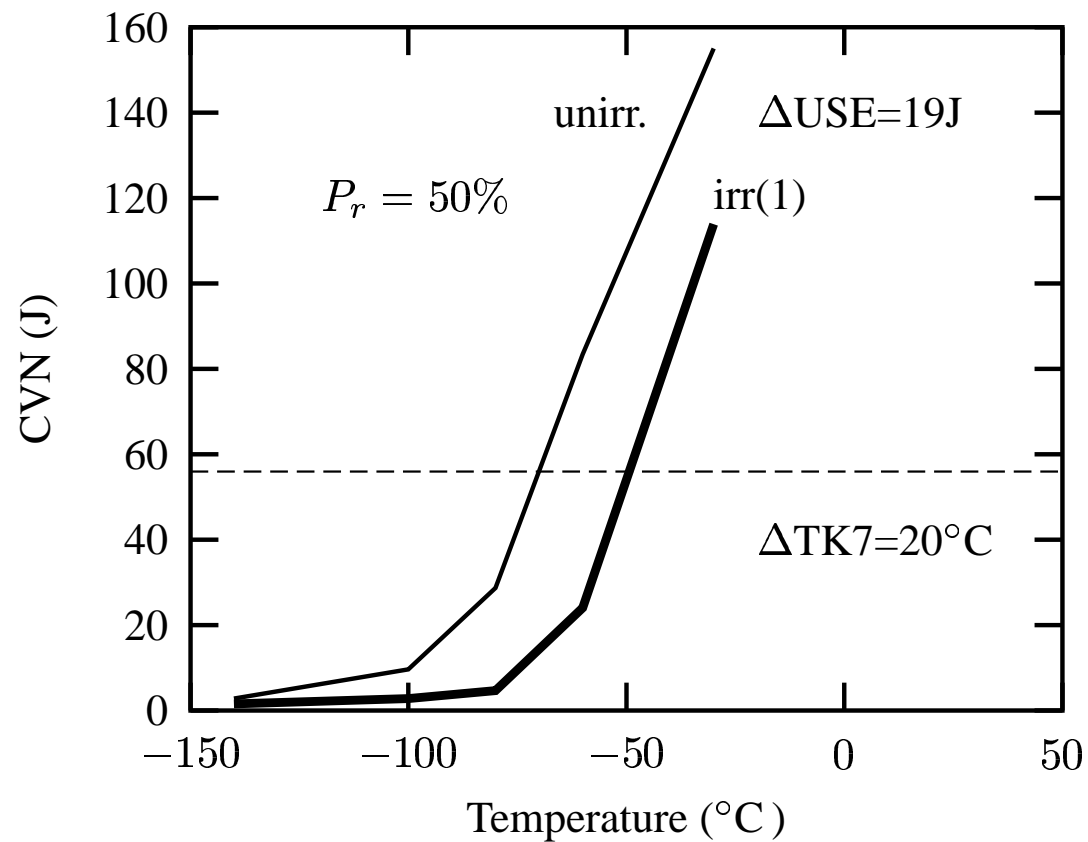
- L'irradiation induit une augmentation de σ_y et R_m

Corrélations entre ϕ , ΔTK7 , ΔUSE et $\Delta\sigma_y$



Hypothèse I : $\sigma_f + \Delta\sigma_y(\phi)$

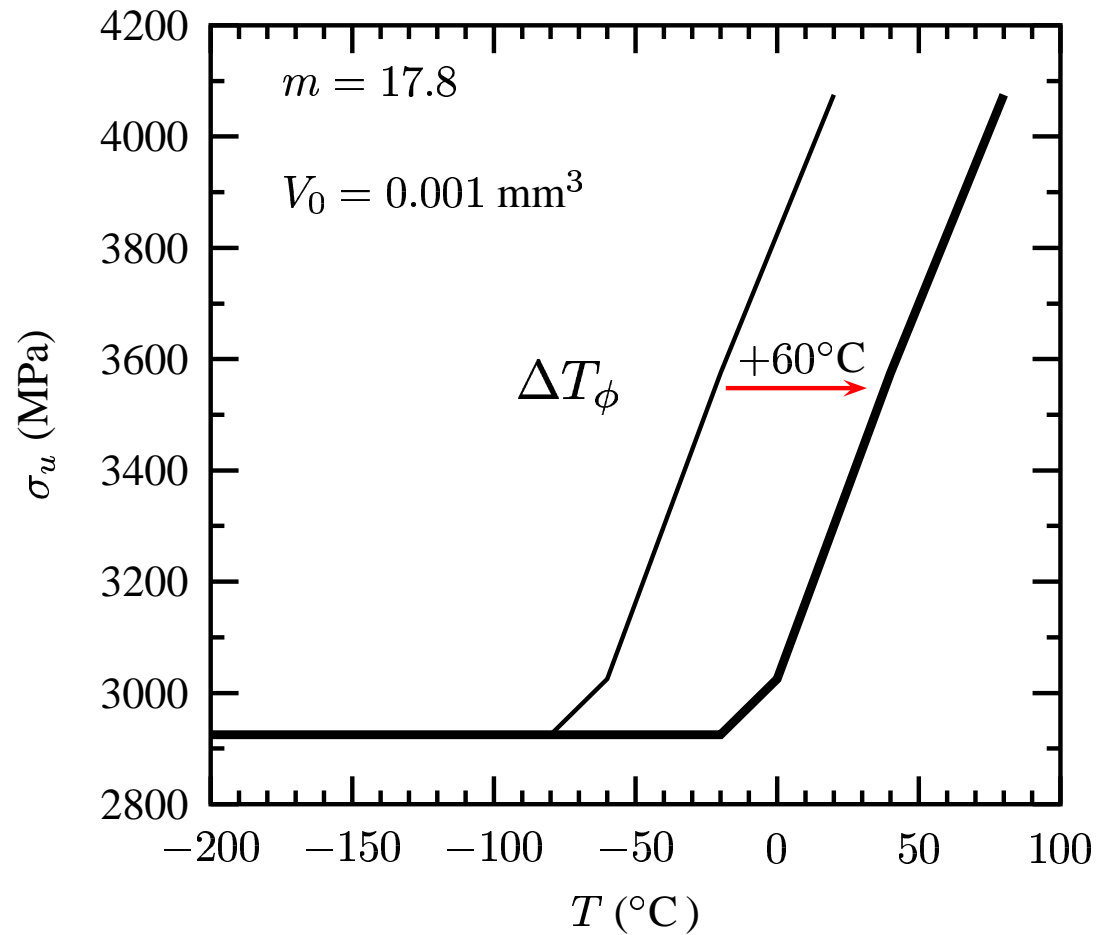
- Calculs avec $\Delta\sigma_y = 87 \text{ MPa}$ ($\Delta\text{TK7}=52^\circ\text{C}$)



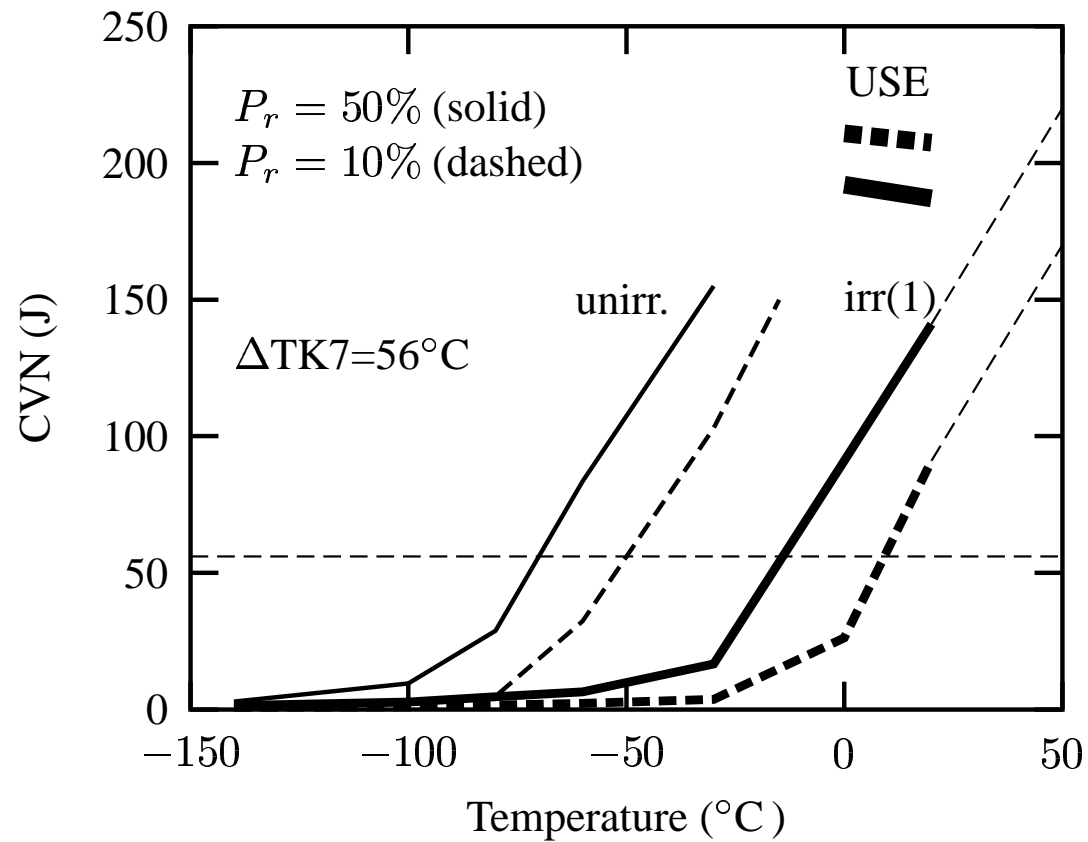
- Les contraintes sont plus élevées : la rupture fragile est favorisée (effet sous estimé)
- USE augmente

Hypothèse II : $\sigma_f + \Delta\sigma_y(\phi)$ et $\sigma_u(\phi)$

- L'irradiation modifie les propriétés de plasticité et de rupture fragile
- Ajustement de $\sigma_u(T, \phi)$

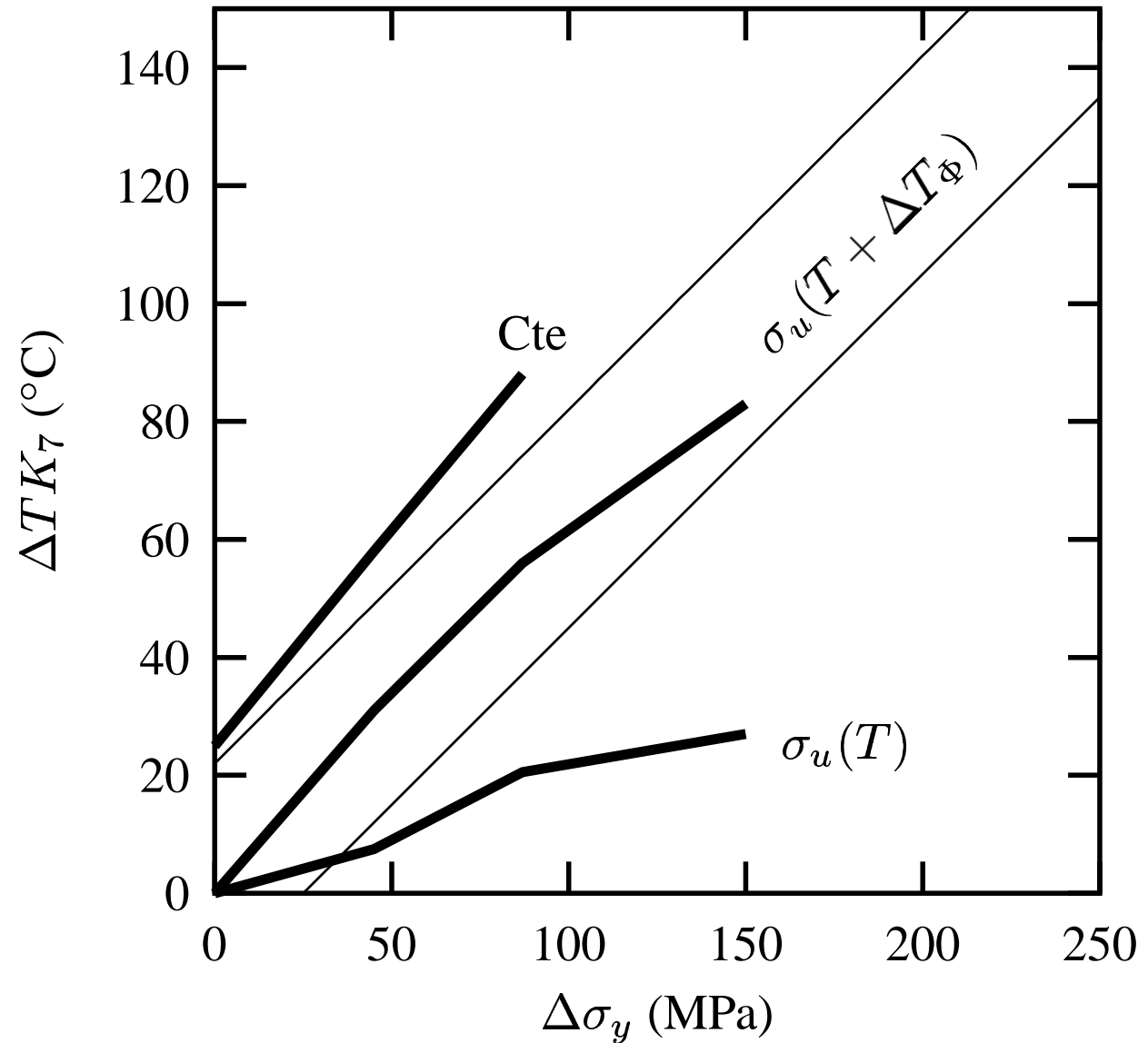
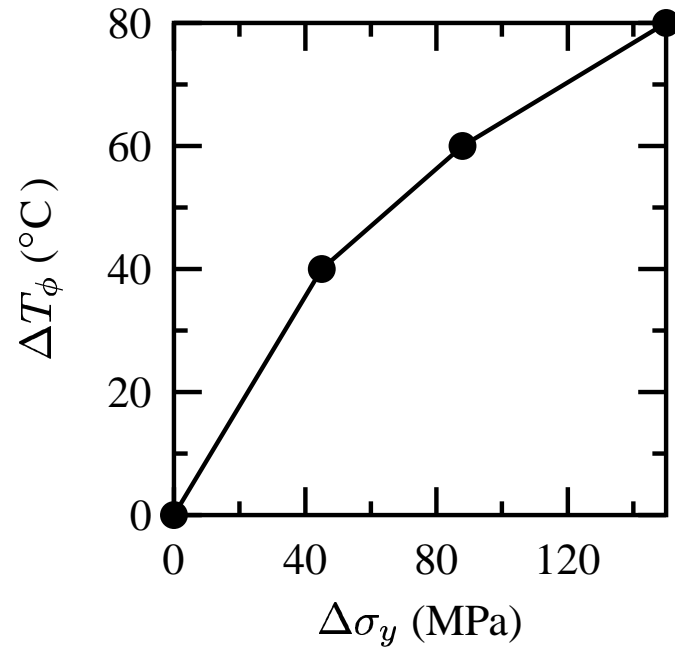


Hypothèse II : résultats



- USE diminue car il y a de la rupture fragile résiduelle à l'ambiante

Ajustement de ΔT_ϕ



Conclusions

- L'essai Charpy est un essai complexe où interviennent de nombreux phénomènes physiques
- La modélisation complète de l'essai demande de représenter tous les phénomènes (ici on a négligé : l'inertie, le diffusion de la température)
- Application aux matériaux des cuves de REP : autres matériaux
- L'outil numérique peut être utilisé pour des études de sensibilité : effet de vitesse, effet de taille de l'éprouvette, effet du rayon de l'impacteur
- L'outil numérique peut être utilisé pour analyser les résultats d'essais Charpy (exemple matériaux irradiés) pour en extraire des données matériaux pertinentes : comportement, rupture fragile, rupture ductile