

---

*Étude de la compétition déchirure ductile / rupture fragile : Application à la tenue mécanique des tubes en acier C-Mn et de leurs joints soudés*

*Vincent Le Corre*

*22 Septembre 2006 – CEA-Saclay*

Laboratoire de Mécanique de Lille – École Centrale de Lille

Laboratoire d'Intégrité des Structures et de Normalisation – CEA Saclay



# Problématique générale : l'Intégrité des Structures



Démontrer l'Intégrité d'une Structure



Prouver sa capacité à remplir ses fonctions  
mécaniques :

- pour tous les modes de chargement,
- tout au long de sa durée de fonctionnement



Dans le contexte de la **sûreté nucléaire** :

- rupture d'un composant proscrite
- fonction de **confinement** primordiale

Prise en compte de la présence de **fissures** :

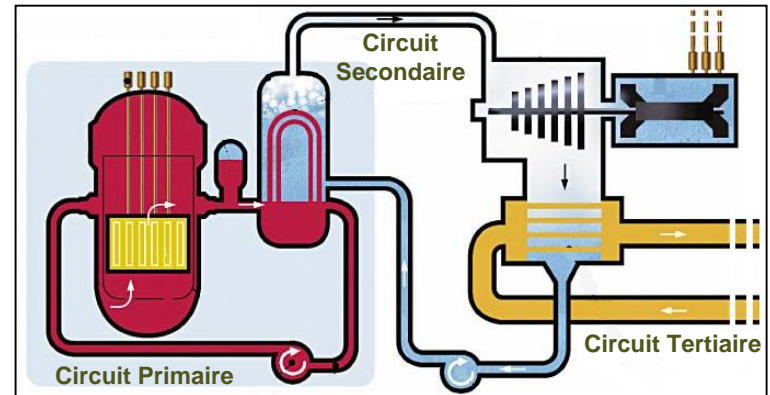
- soit dès la démonstration de sûreté
- soit après une détection de défauts

# Problématique générale : le circuit secondaire

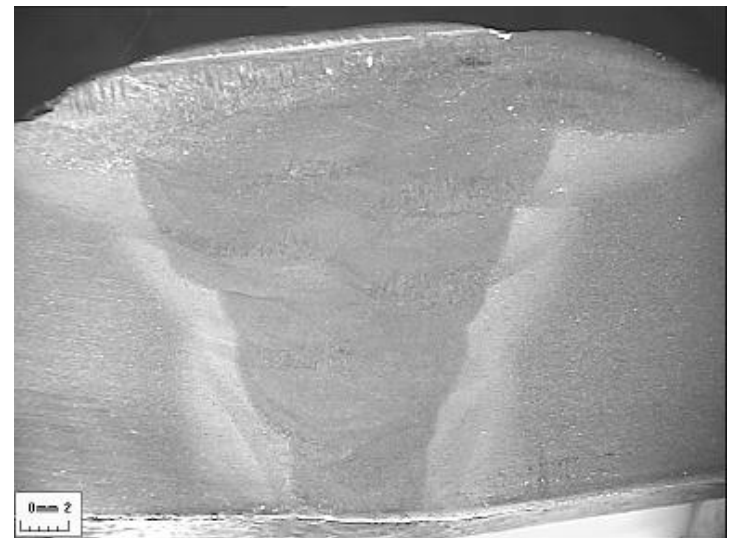
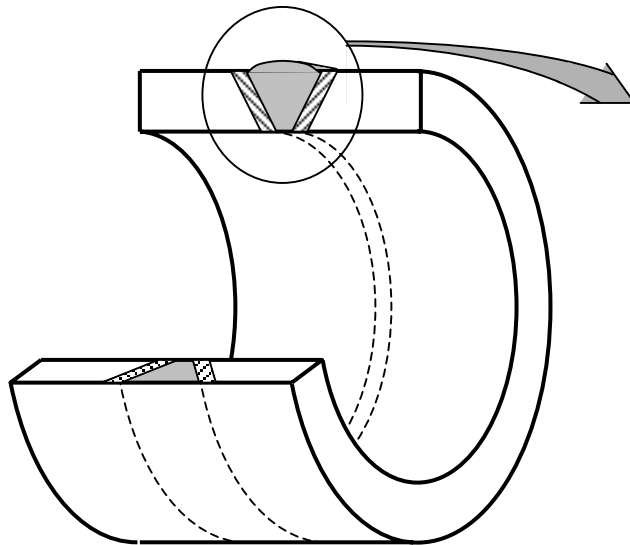
## Évaluation de l'intégrité du circuit secondaire des réacteurs à eau pressurisée



- ✓ Tubes minces, en acier ferritique Carbone-Manganèse
- ✓ Pas d'irradiation
- ✓ Présence de joints soudés circonférentiels, non arasés et non-détensionnés



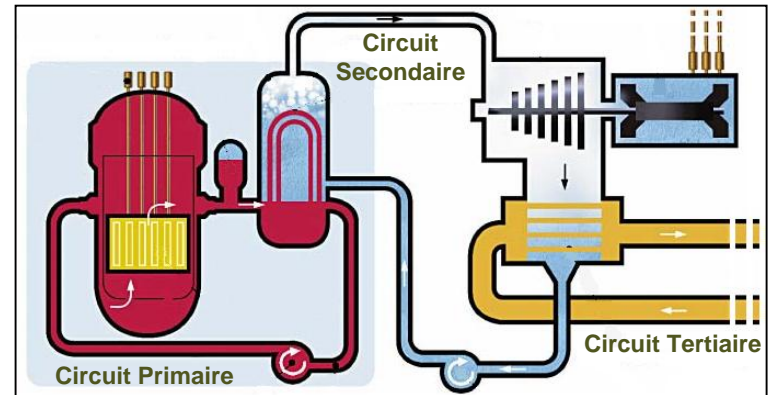
*Schéma d'un réacteur REP*



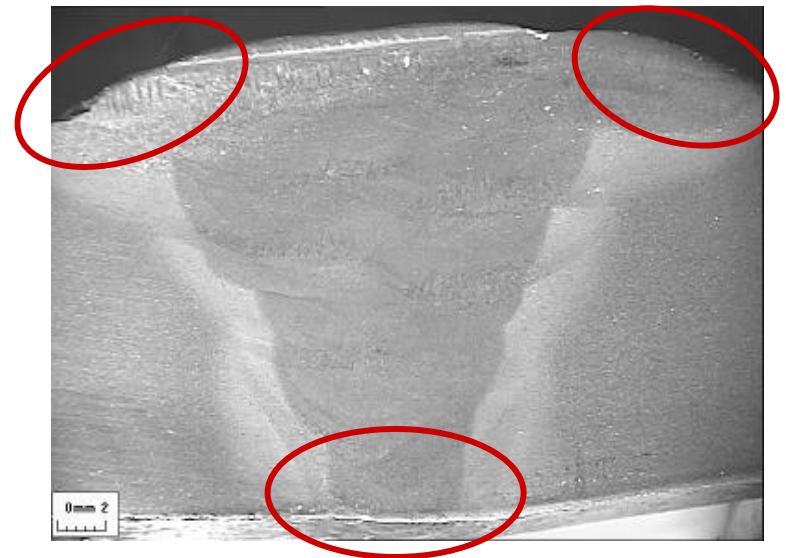
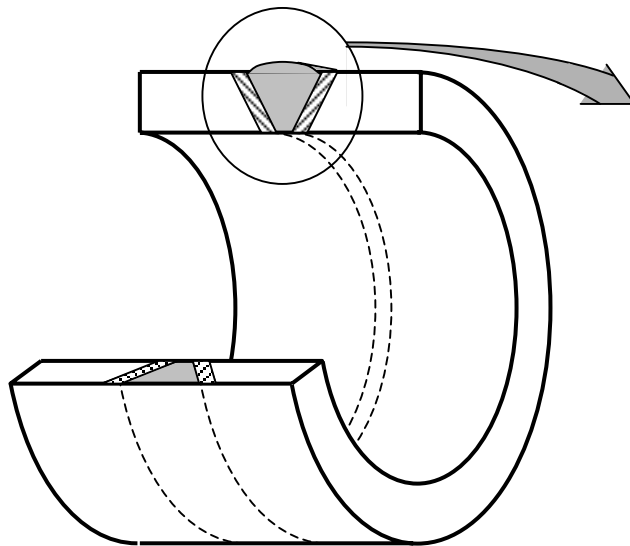
# Problématique générale : le circuit secondaire

## Évaluation de l'intégrité du circuit secondaire des réacteurs à eau pressurisée

- ✓ Tubes minces, en acier ferritique Carbone-Manganèse
- ✓ Pas d'irradiation
- ✓ Présence de joints soudés circonférentiels, non arasés et non-détensionnés

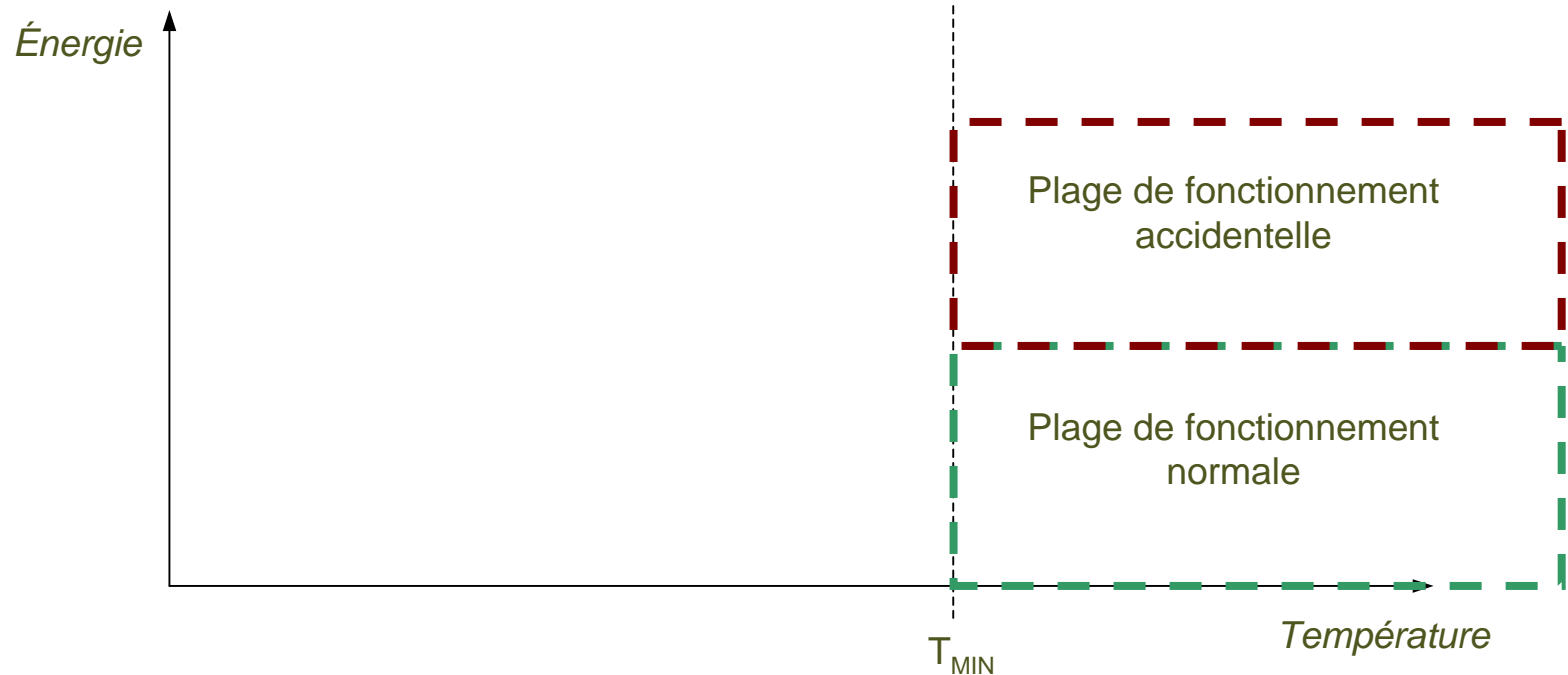


*Schéma d'un réacteur REP*



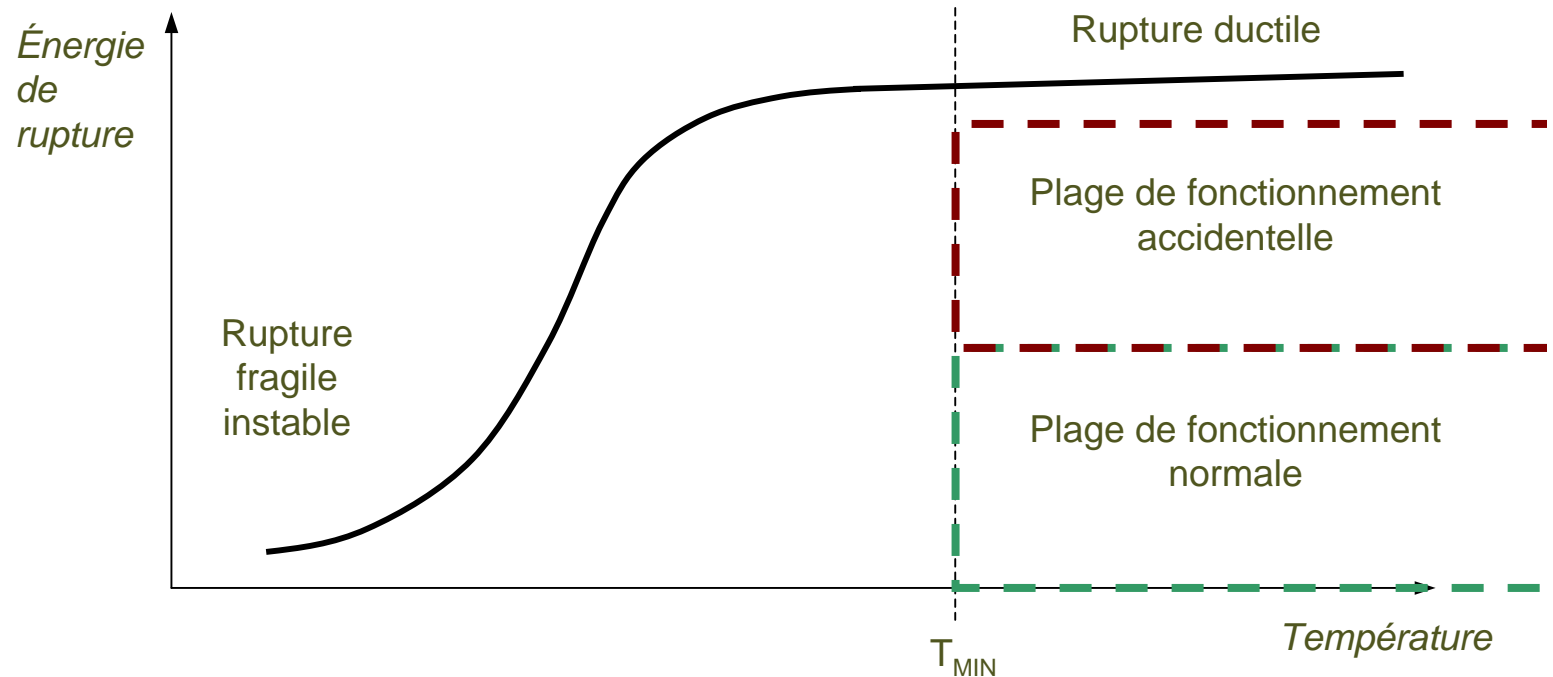
# Problématique générale : le circuit secondaire

- ✓ Température minimale de fonctionnement
- ✓ Chargements de flexion
  - En fonctionnement : vibrations et dilatations d'ensemble => fissures de fatigue
  - Conditions accidentelles (séismes, etc) : Hautes énergies



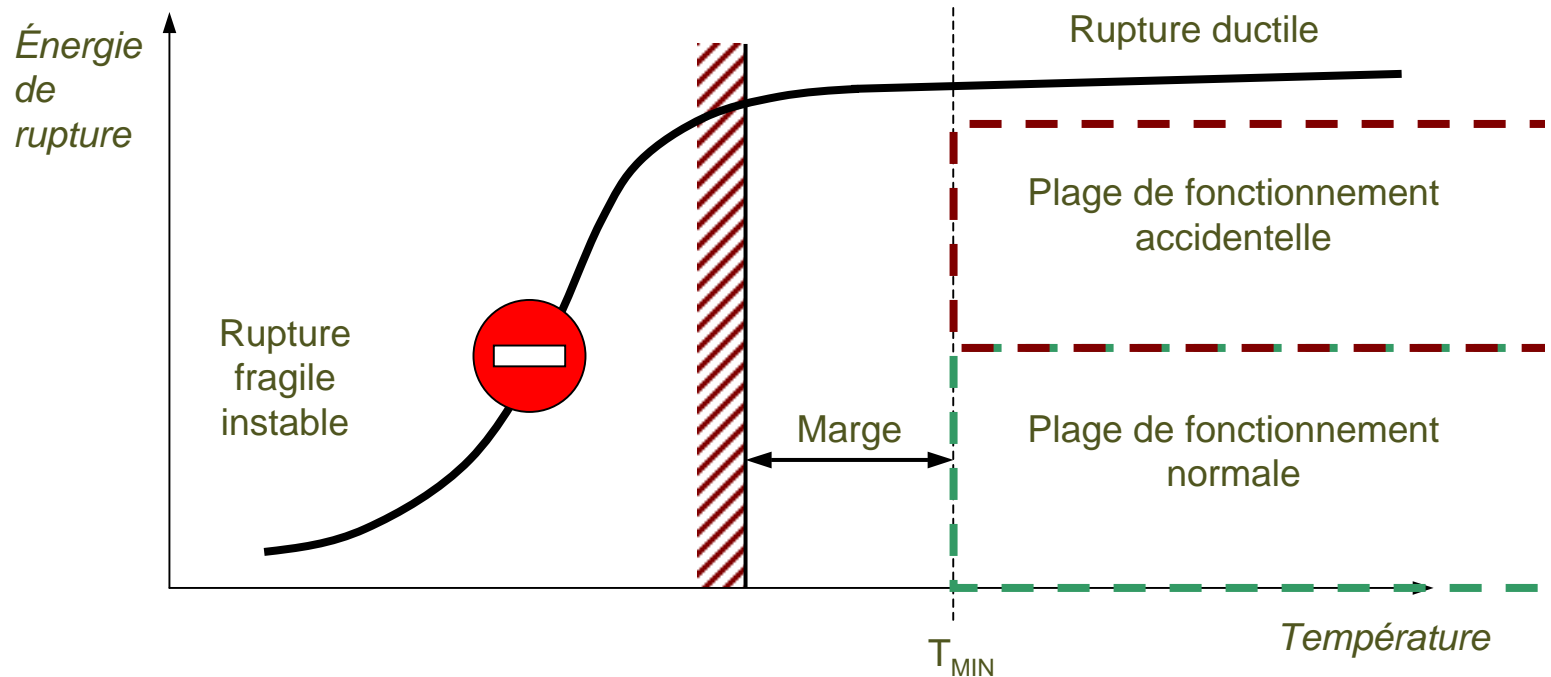
# Problématique générale : le domaine de transition

- ✓ Variation de l'énergie de rupture du matériau : Domaine de transition Fragile/Ductile



# Problématique générale : le domaine de transition

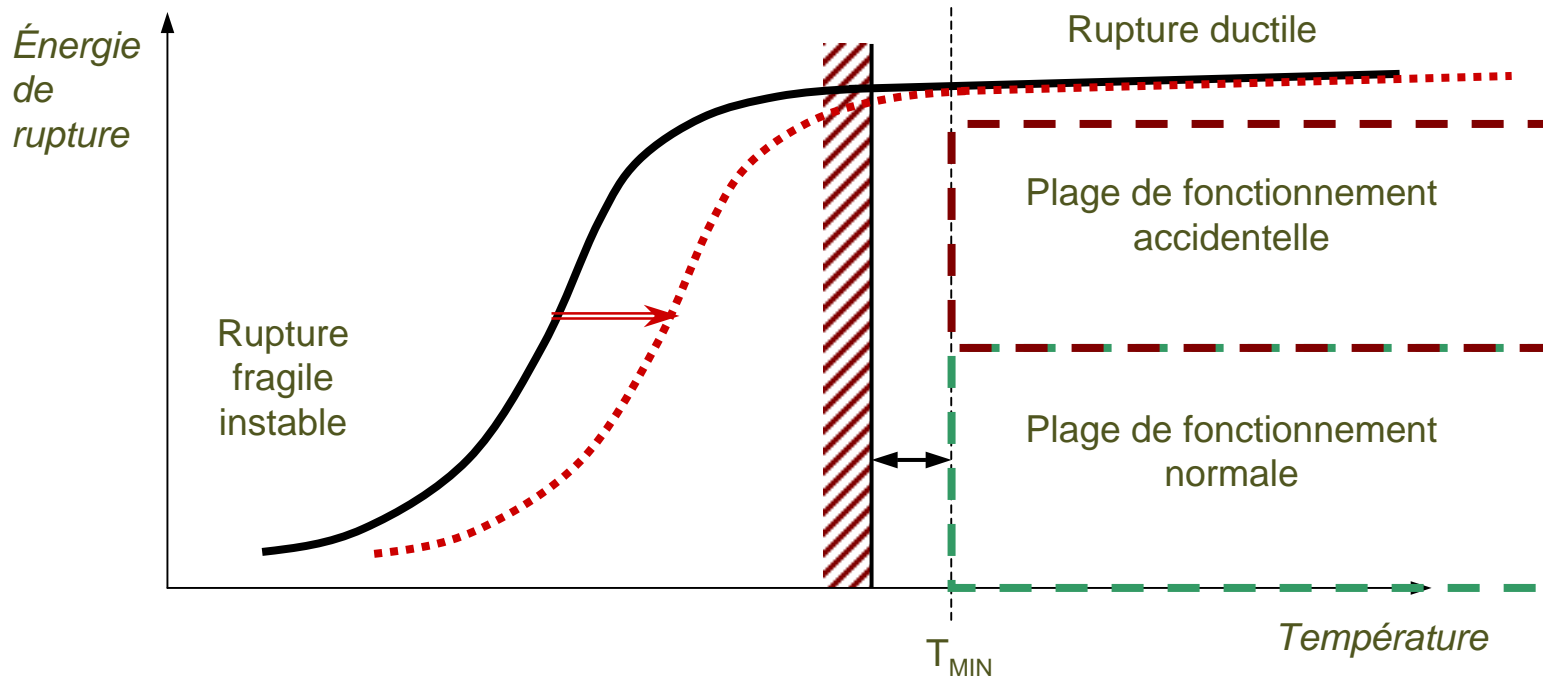
- ✓ Variation de l'énergie de rupture du matériau : Domaine de transition Fragile/Ductile



# Problématique générale : le domaine de transition

✓ Variation de l'énergie de rupture du matériau : Domaine de transition Fragile/Ductile

⇒ Fragilisation par *vieillissement* du matériau (ZAT)





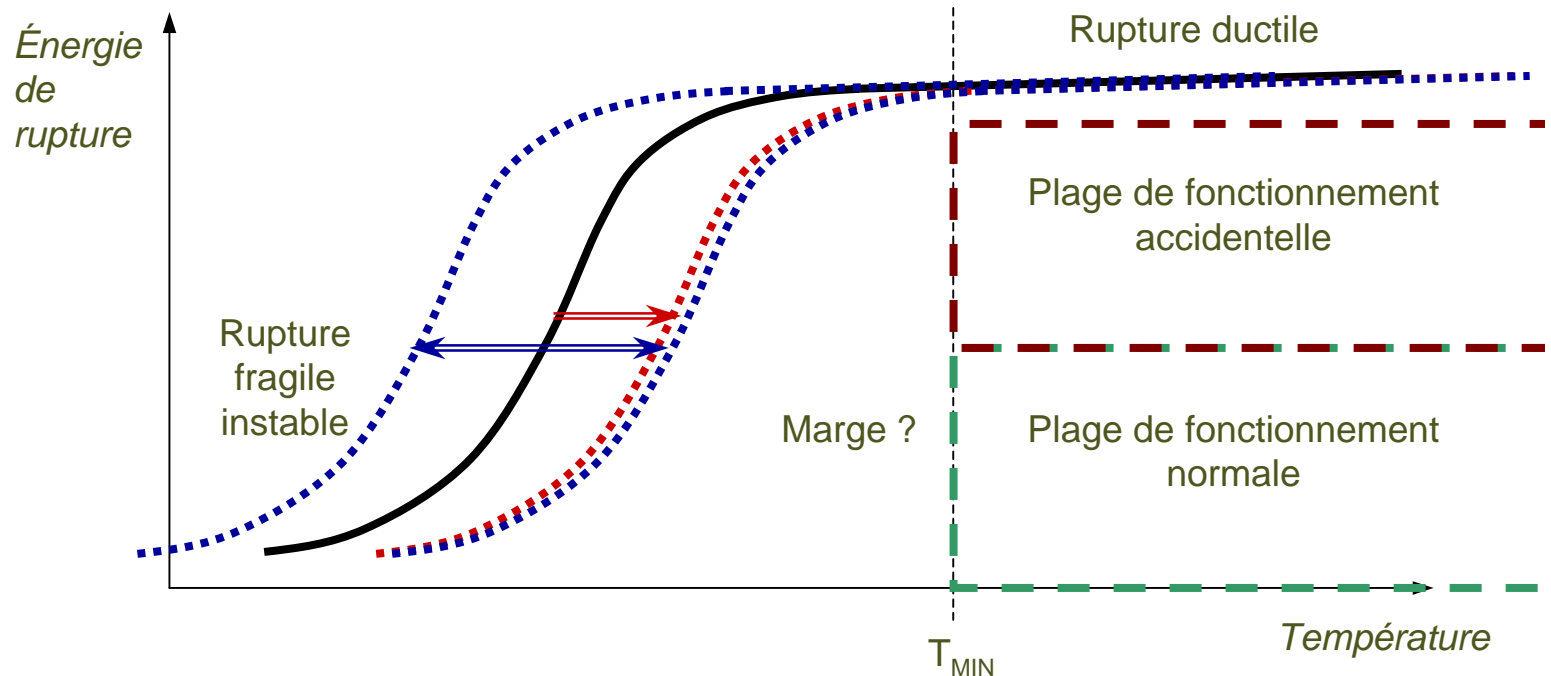
# Problématique générale : le domaine de transition

✓ Variation de l'énergie de rupture du matériau : Domaine de transition Fragile/Ductile

⇒ Fragilisation par *vieillessement* du matériau (ZAT)


⇒ Décalage en température dépendant de la *géométrie* de la structure

(effet du confinement de la plasticité)



- ✓ La compréhension de la compétition rupture fragile / déchirure ductile dans la partie supérieure du domaine de **transition**
  - Très forte dispersion expérimentale
  - Mode de rupture mixte ductile et fragile
  
- ✓ La **transférabilité** des critères de rupture de l'éprouvette à la structure
  - Nécessité de connaître les paramètres intrinsèques au matériau
  - Difficulté d'application des modèles sur les structures complexes
  
- ✓ La caractérisation des **joints soudés** ( Comportement et Rupture )
  - Microstructure et géométrie complexes
    - ⇒ Prélèvement difficiles
    - ⇒ Éprouvettes de faible épaisseur non-normalisées
    - ⇒ Nombre d'essais nécessairement réduit
  - Présence de contraintes résiduelles
  - Influence du vieillissement statique





Proposer une approche permettant de déterminer la température de disparition du clivage sur une structure soudée



- ✓ Préciser la dépendance à la géométrie du domaine de transition dans le cas d'une structure
- ✓ Établir une condition nécessaire à l'apparition de la rupture fragile par clivage
- ✓ Définir une méthode de caractérisation du comportement à rupture des joints soudés de la structure



## I – Développement d'un critère de rupture fragile en contrainte seuil

- Définition d'une contrainte seuil
- Analyse des essais sur éprouvettes fissurées
- Expression simplifiée de la probabilité de rupture

## II – Transférabilité du critère en contrainte seuil

- Influence de la géométrie sur la zone de transition
- Identification des paramètres du critère

## III – Développement d'un essai de rupture sur composant

- Préparation / Déroulement / Interprétation
- Validation de la condition de contrainte seuil

## IV – Méthode de caractérisation des Joints Soudés

- Mise en place de méthodes expérimentales et numériques



# I – Développement d'un critère de rupture fragile en contrainte seuil

# I – Développement d'un critère en contrainte seuil

Objectif : Obtenir un critère autorisant une probabilité de rupture **nulle**

⇒ Nécessité d'utiliser une **contrainte seuil**

Assurer l'applicabilité aux **structures** et aux **joints soudés**

⇒ Identification à partir d'essais **non-normalisés** et **peu nombreux**

Démarche : S'appuyer sur les développements de **l'approche locale** (Beremin)

**Simplifier** l'expression de la probabilité de rupture

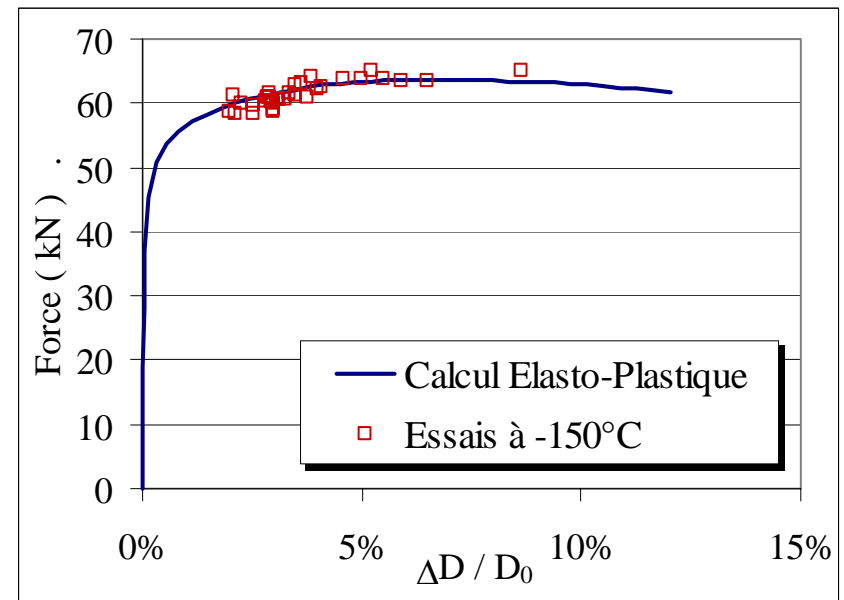
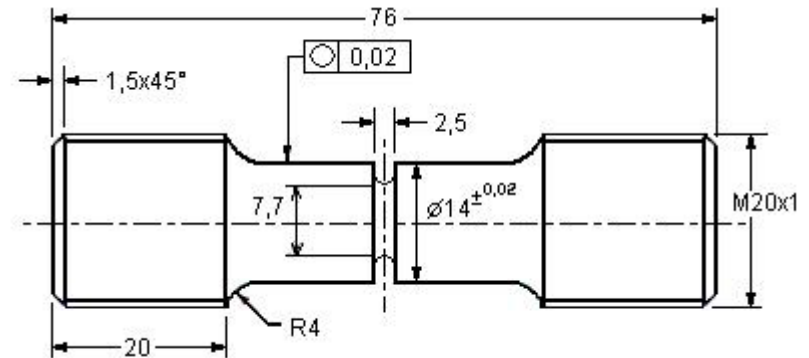
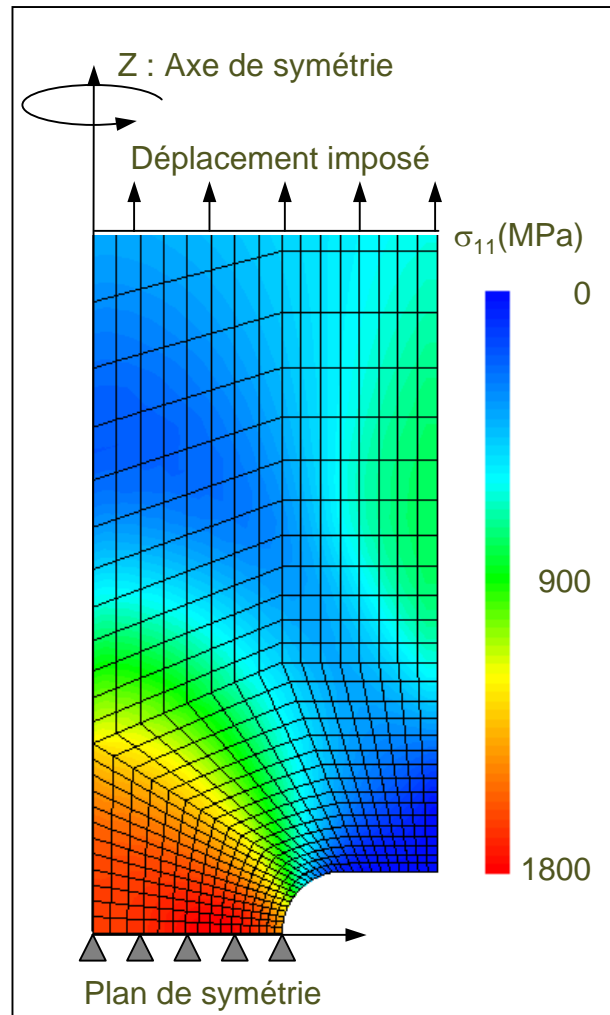
Outil : la base de donnée du projet européen piloté par l'ESIS « *Euro Fracture Toughness Dataset* » sur l'acier ferritique 22NiMoCr37 [Heerens - 02] :

Nb d'essais par T° et Géométrie		Température							
		-150°C	-110°C	-90°C	-60°C	-40°C	-20°C	0°C	20°C
Géométrie	Traction	4		5	4	5	5	4	4
	AE1.6	32							
	CT12.5	31	55	31	62	32	31	32	
	CT25	34		34	34	32	50	41	10
	CT50	30		30	30	30	30	30	30
	CT100			15			15	15	15

*Grille d'essais de la base ESIS*

# I.1 – Définition d'une contrainte seuil

- ✓ Rupture de 32 éprouvettes AE par clivage à  $-150^{\circ}\text{C}$ .
- ✓ Calcul de la contrainte principale maximale à rupture par une modélisation Éléments Finis.



# I.1 – Définition d'une contrainte seuil



✓ Calcul de la probabilité expérimentale :

$$i = \text{rang de } \sigma_{11_i}$$

$$P_{Ri} = (i - 0.5) / N$$

✓ Ajustement d'une distribution de Weibull avec un seuil

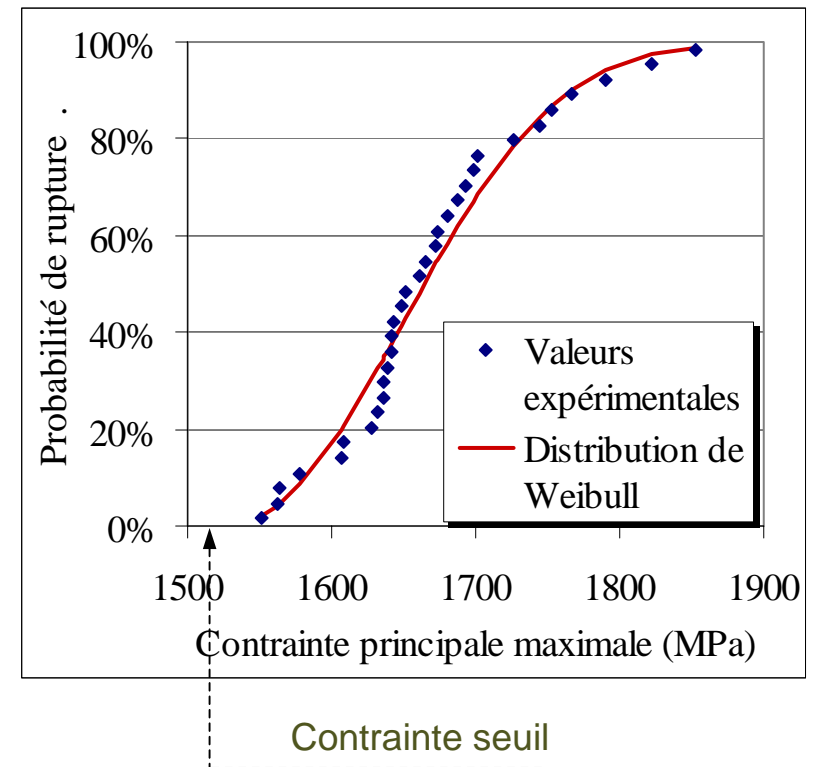
$$P_R = 1 - \exp \left[ \frac{\sigma_{11} - \sigma_{th}}{\sigma_{u\_AE}} \right]^{m_{AE}}$$

avec  $\sigma_{th} = 1520 \text{ MPa}$

$$\sigma_{u\_AE} = 170 \text{ MPa}$$

$$m_{AE} = 2.2$$

$\sigma_{th}$  est proche de la plus basse contrainte à rupture :  $\text{MIN}(\sigma_{11\_MAX}) = 1550 \text{ MPa}$

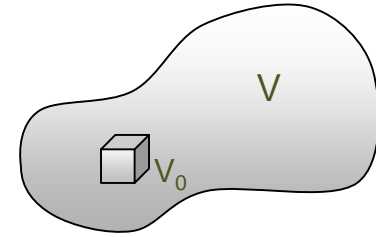




# I.2 – Définition d'un volume seuil



Soit  $V$  un volume composé de  $N$  volumes élémentaires  $V_0$ .



Hypothèse du maillon le plus faible : .....

$$1 - P_R = \prod_{i=1}^{N=V/V_0} (1 - p_{ri})$$

Hypothèse sur  $p_{ri}$  : Constante sur  $V_{th} = V$  ( $\sigma_{11} > \sigma_{th}$ ) .....  
 (Hypothèse de la contrainte seuil)

$$\begin{cases} p_{ri} = p_0 & \text{si } \sigma_{11} > \sigma_{th} \\ p_{ri} = 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

La probabilité de rupture du volume  $V$  est réduite à celle du volume  $V_{th}$  .....

$$1 - P_R = (1 - p_0)^{V_{th}/V_0}$$

$$P_R' = -\ln(1 - P_R) = \frac{1}{V_0} \ln\left(\frac{1}{1 - p_0}\right) \cdot V_{th}$$

Relation linéaire entre le logarithme de la probabilité de rupture et le volume seuil  $V_{th}$  .....

$$P_R' = F \cdot V_{th}$$

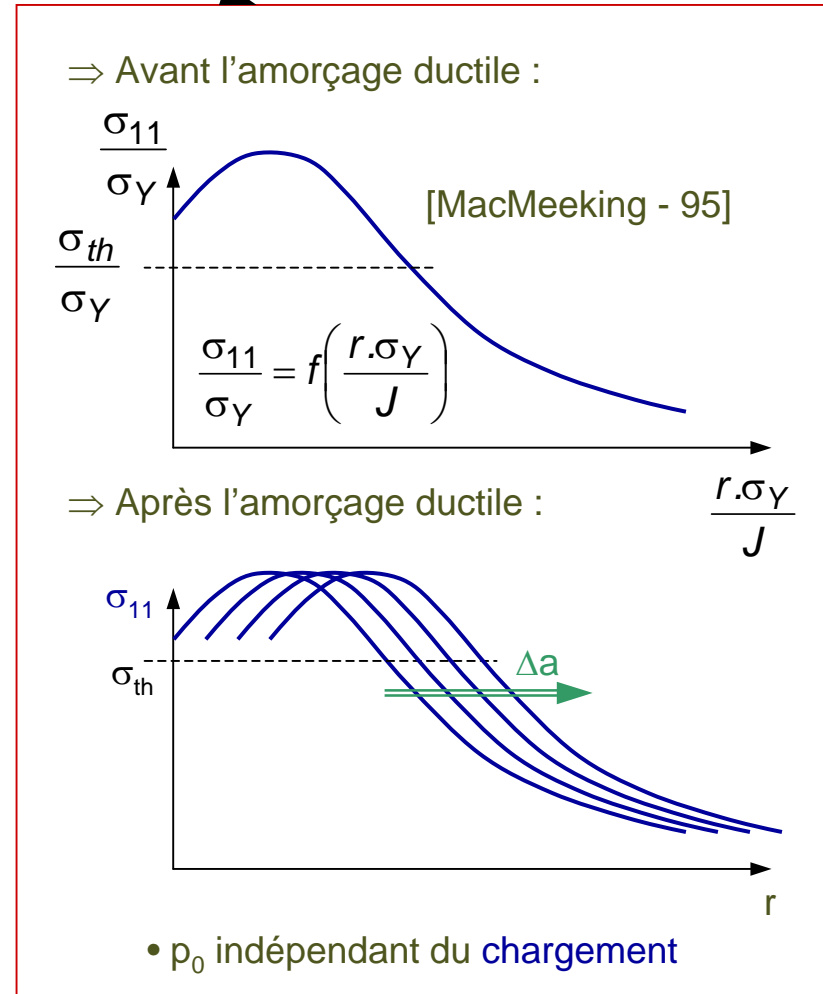
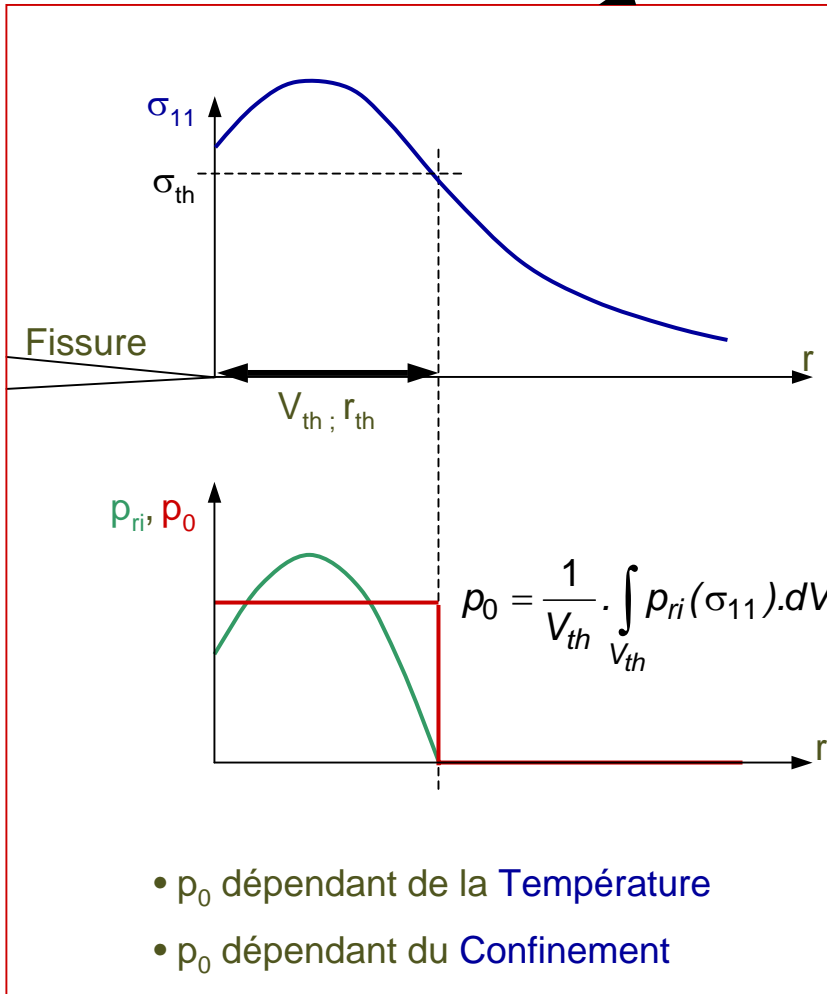
# I.2 – Hypothèse sur $p_{ri}$



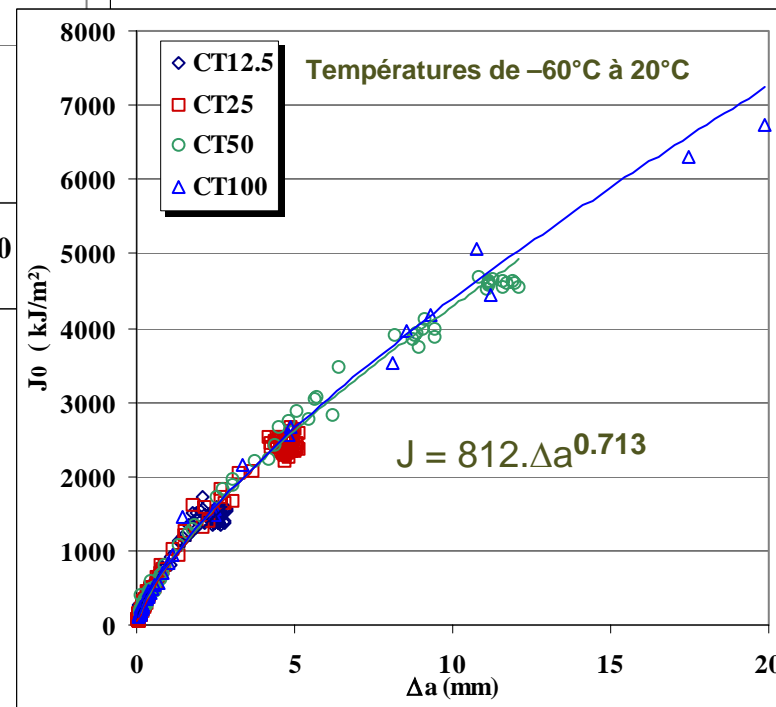
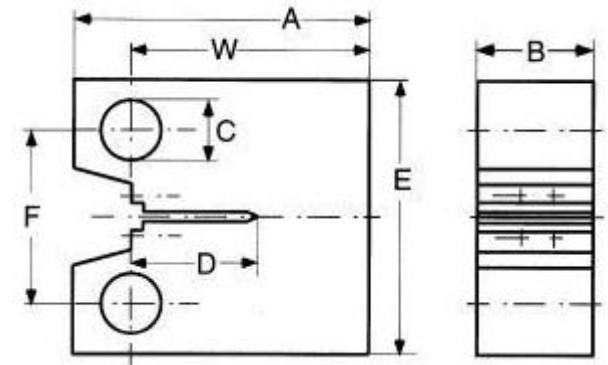
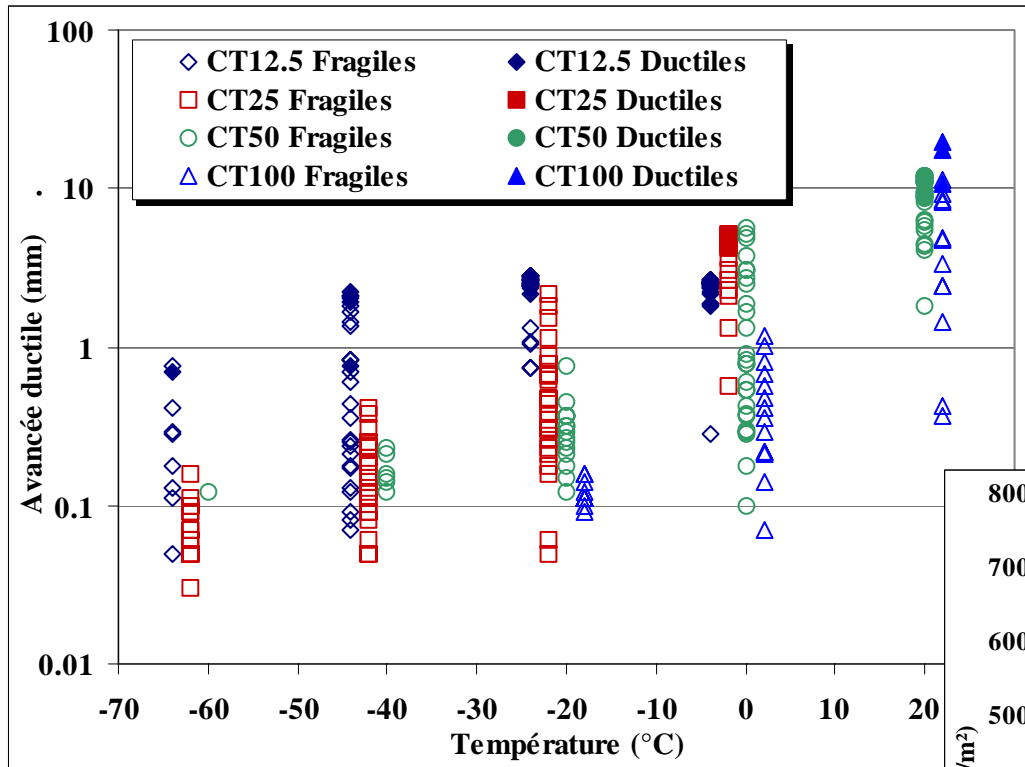
## Hypothèse sur $p_{ri}$

*Spatialement*

*Temporellement*



# 1.2 – Analyse des essais sur éprouvettes CT



$$J_0 = \frac{\eta \cdot U}{B \cdot (W - a_0)}$$

$$\eta = 2 + 0.522 \cdot \left(1 - \frac{a_0}{W}\right)$$

## I.2 – Analyse des essais sur éprouvettes CT

✓ Modélisation par Éléments Finis  
nécessaire au calcul de  $V_{th}$

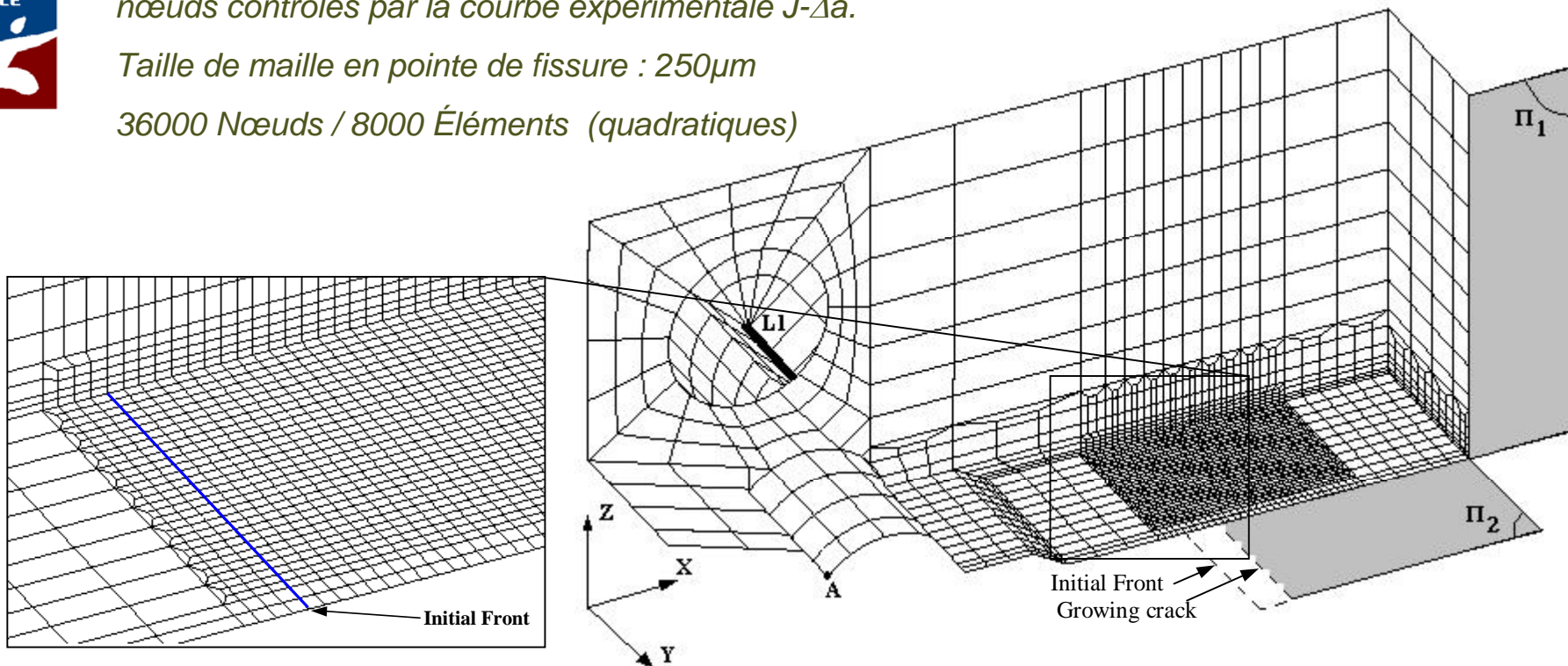
Modèle élasto-plastique isotrope

La déchirure est simulée par des relâchements de nœuds contrôlés par la courbe expérimentale  $J-\Delta a$ .

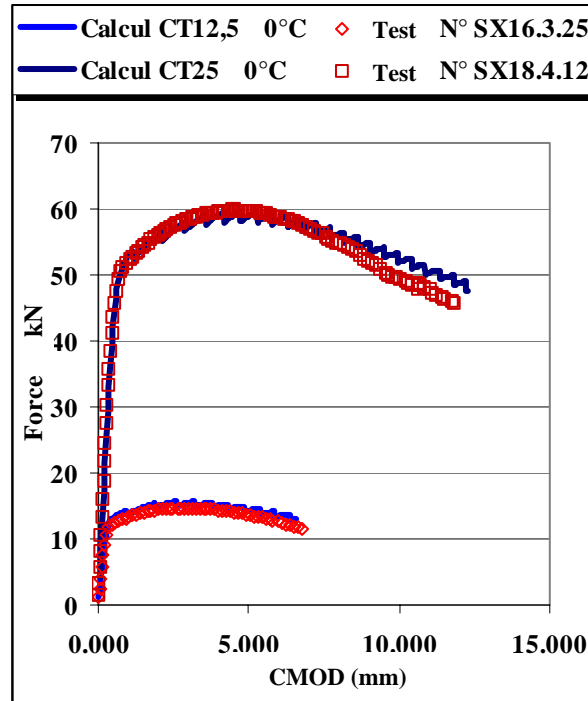
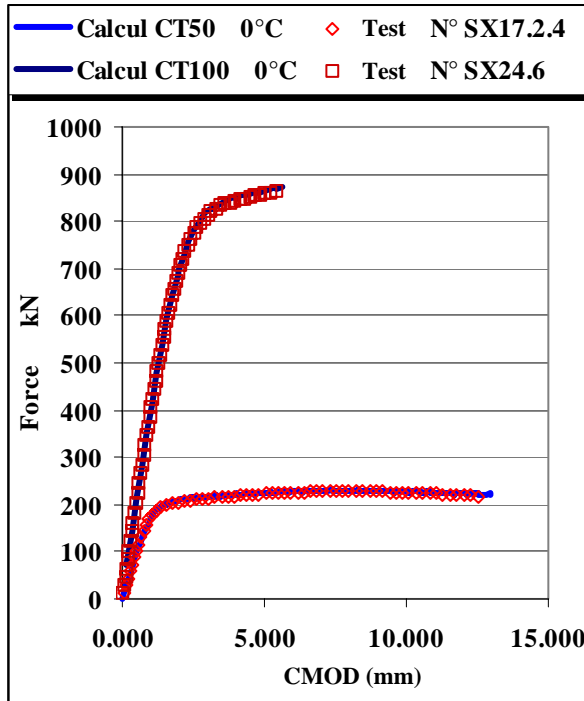
Taille de maille en pointe de fissure :  $250\mu\text{m}$

36000 Nœuds / 8000 Éléments (quadratiques)

	-90°C	-60°C	-40°C	-20°C	0°C	20°C
CT12.5	31	62	32	31	32	
CT25	34	34	32	50	41	10
CT50	30	30	30	30	30	30
CT100	15			15	15	15

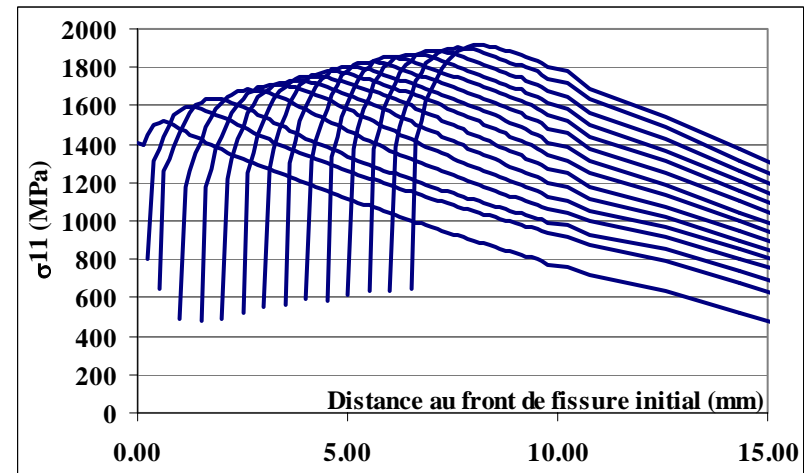


# I.2 – Analyse des essais sur éprouvettes CT



*Comportements globaux des 4 géométries.*

*Contrainte principale en avant de la pointe de fissure initiale en cours de déchirure ductile sur une éprouvette CT50 à 20°C*



## I.2 – Analyse des essais sur éprouvettes CT

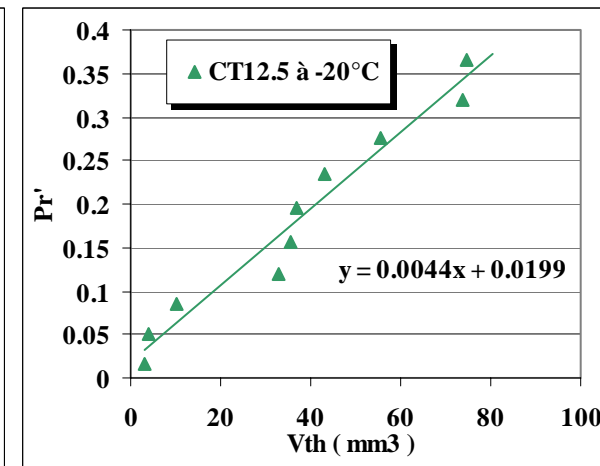
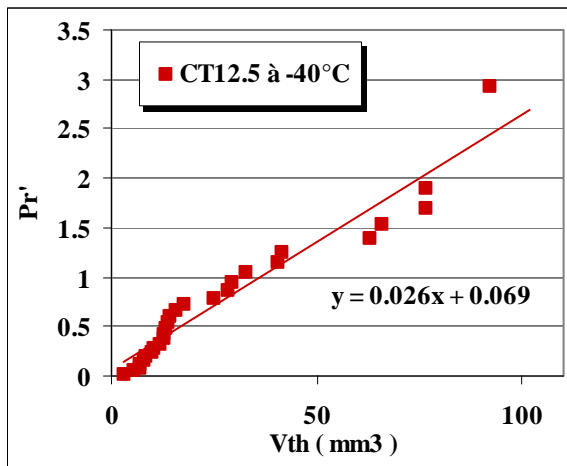
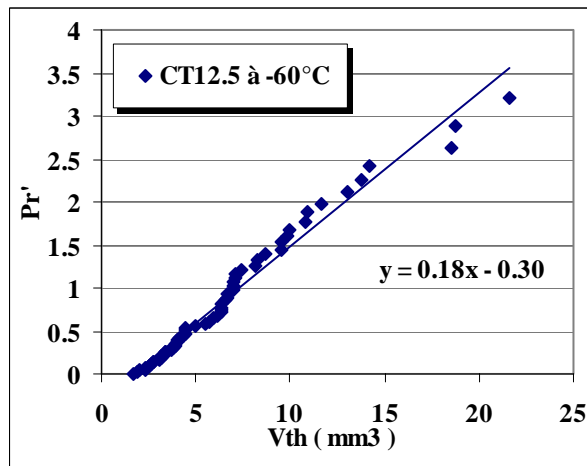
- Évaluation de  $V_{th}$  :
  - à la rupture pour les éprouvettes ductiles / fragiles
  - à la fin de l'essai pour les éprouvettes ductiles
- Classement des éprouvettes à  $V_{th}$  croissant pour chaque série (Géométrie ; Température)
- Probabilité de rupture expérimentale de chaque éprouvette :

$$Pr_i = \frac{i - 0.5}{N_i}$$

avec  $i$  = rang de l'éprouvette

$N_i = N$  - nombre d'éprouvettes ductiles avec un  $V_{th}$  final inférieur au  $V_{th}$  de l'éprouvette de rang  $i$ .

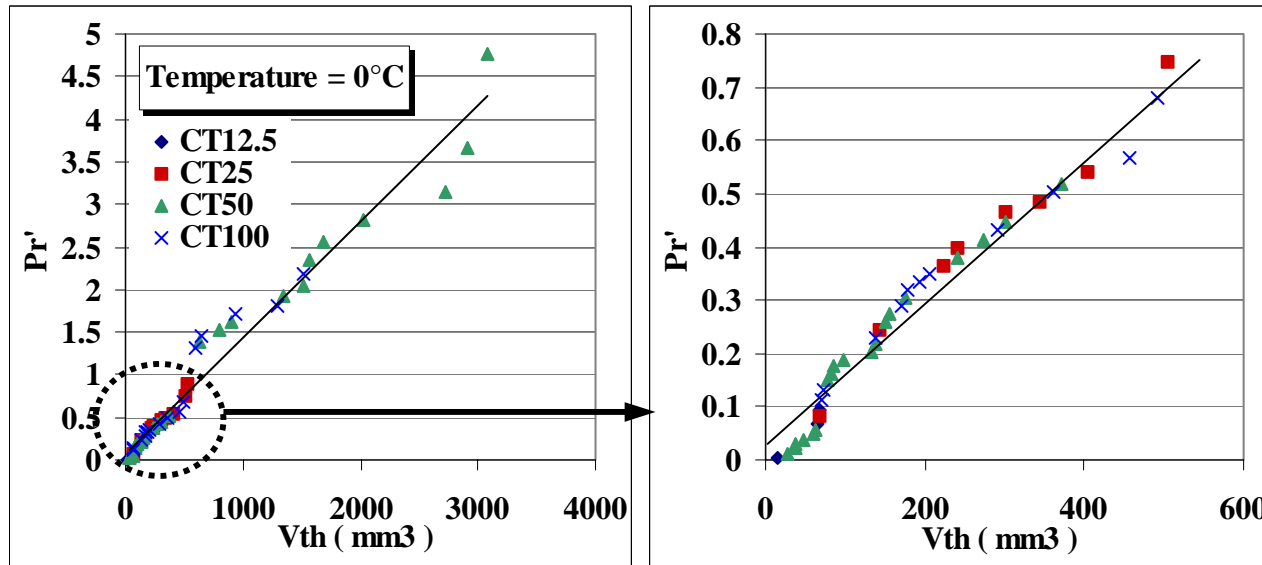
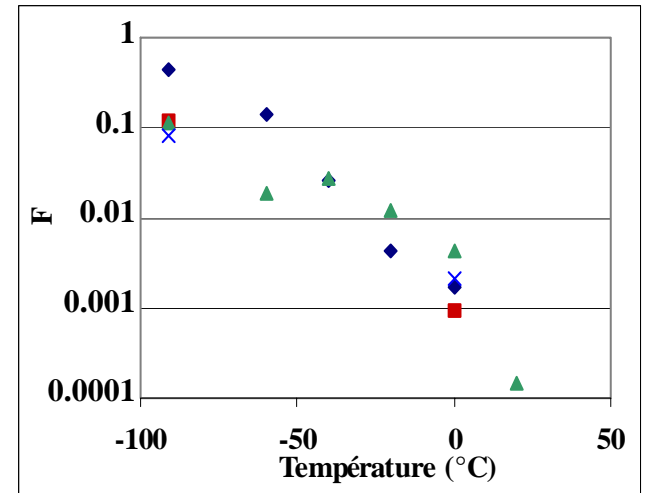
✓ Confirmation de la relation linéaire entre  $P_R'$  et  $V_{th}$



$P_r'(V_{th})$  pour les éprouvettes CT12.5 de -60°C à -20°C

## I.2 – Analyse des essais sur éprouvettes CT

- ✓ F évolue fortement avec la **température**.
- ✓ F semble indépendant de la **taille** des CT.
  - ⇒ A 0°C, les 4 géométries peuvent être réunies dans une même série.
- ✓  $V_{th}$  est un paramètre pertinent vis-à-vis de la probabilité de rupture.



$P_r'(V_{th})$  pour toutes les éprouvettes à 0°C

# I.3 – Expression de la fonction de sensibilité F

D'après l'hypothèse sur  $p_0$  :

$$F = -\frac{1}{V_0} \cdot \text{Ln}(1 - p_0)$$

Selon les essais sur éprouvettes AE :

$$-\text{Ln}(1 - P_R) = \left( \frac{\sigma_{11} - \sigma_{th}}{\sigma_{u\_AE}} \right)^{m_{AE}}$$

Par analogie, l'expression suivante est proposée :

$$F(\sigma_Y) = \frac{1}{V_0} \cdot \left( \frac{\sigma_Y - \sigma_{Y0}}{\sigma_{u\_CT}} \right)^{m_{CT}}$$

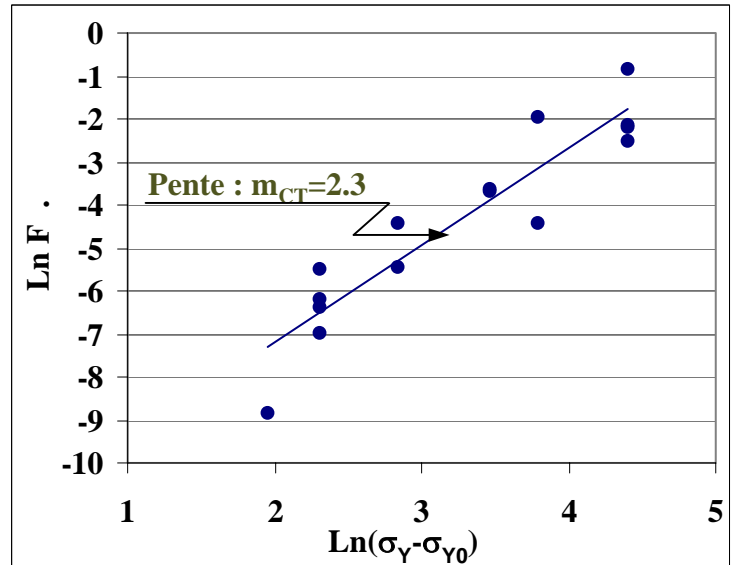
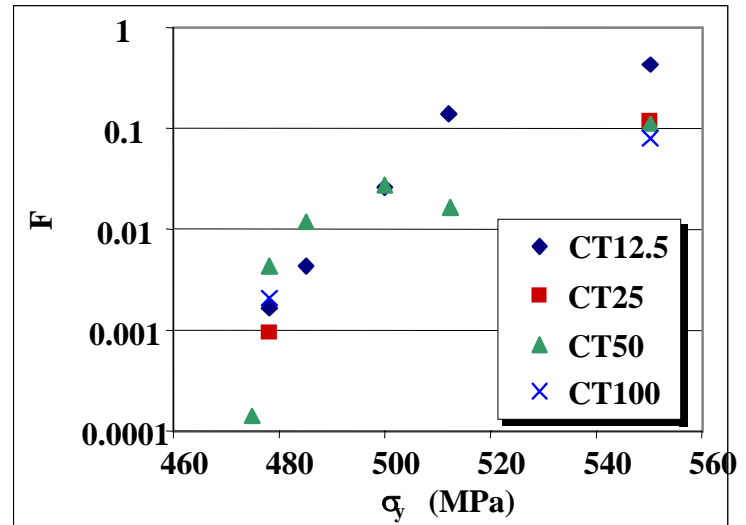
avec :

$$\sigma_{Y0} = 468 \text{ MPa} = \sigma_Y(T=20^\circ\text{C})$$

$$\sigma_{u\_CT} \cdot V_0^{1/m} = 156 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{3/m}$$

$$m_{CT} = 2.3$$

$$m_{CT} = m_{AE} \sim 2.3$$

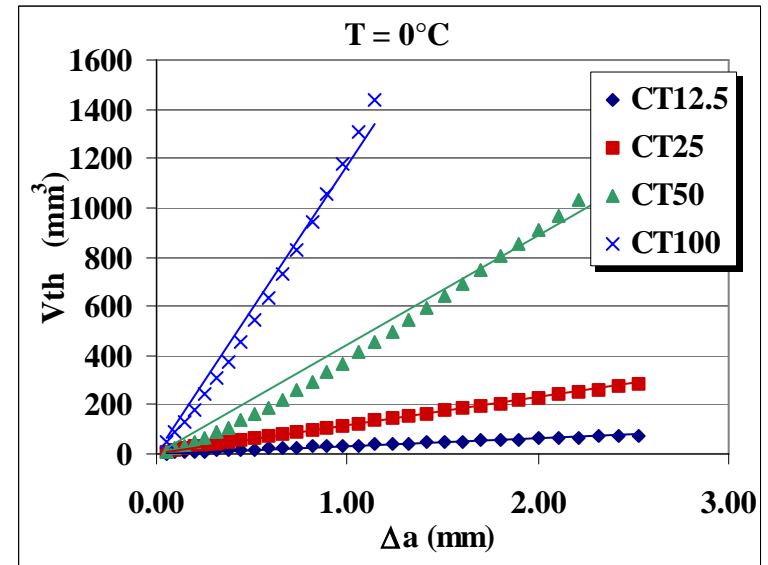




## I.3 – Expression du volume seuil $V_{th}$

### Données numériques

✓  $V_{th}$  est proportionnel à  $\Delta a$

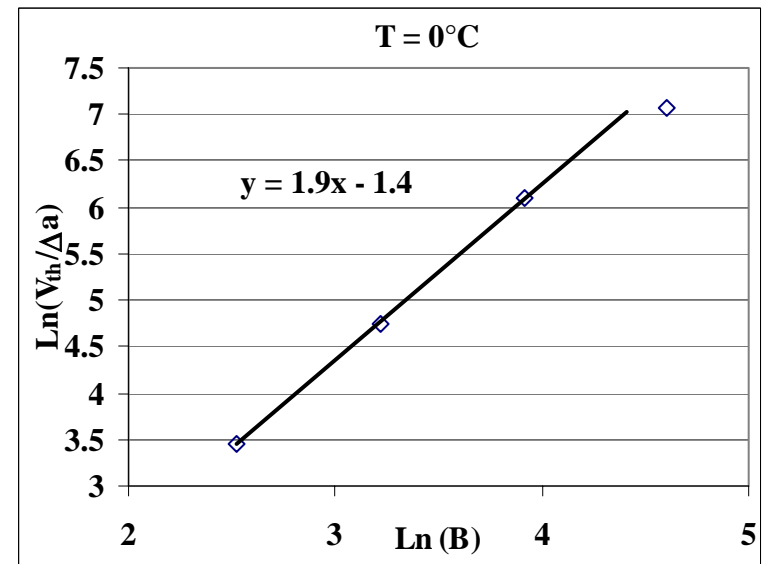
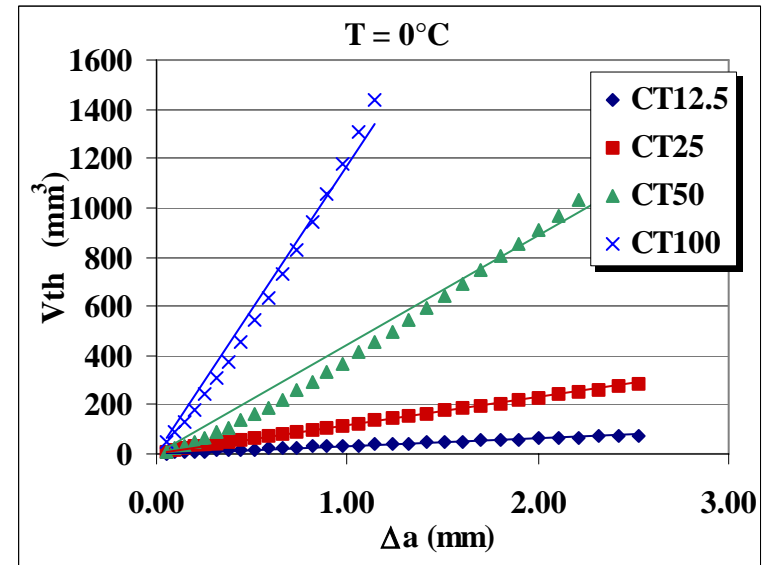


# I.3 – Expression du volume seuil $V_{th}$

## Données numériques

✓  $V_{th}$  est proportionnel à  $\Delta a$

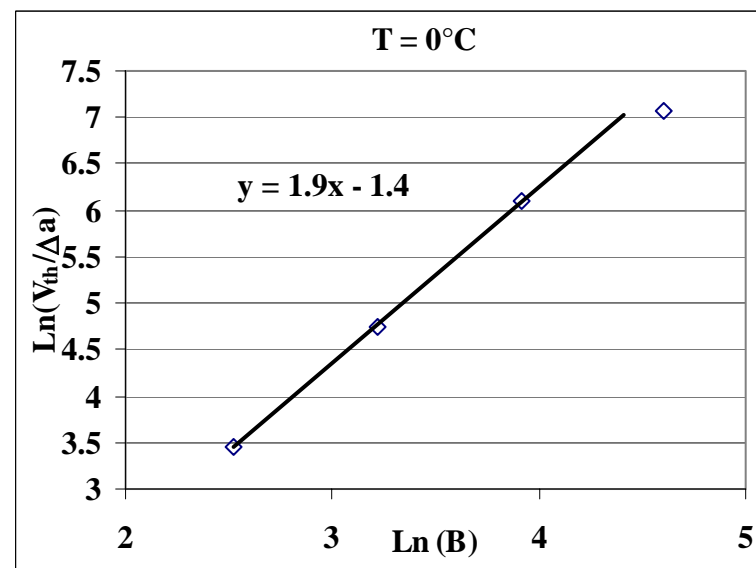
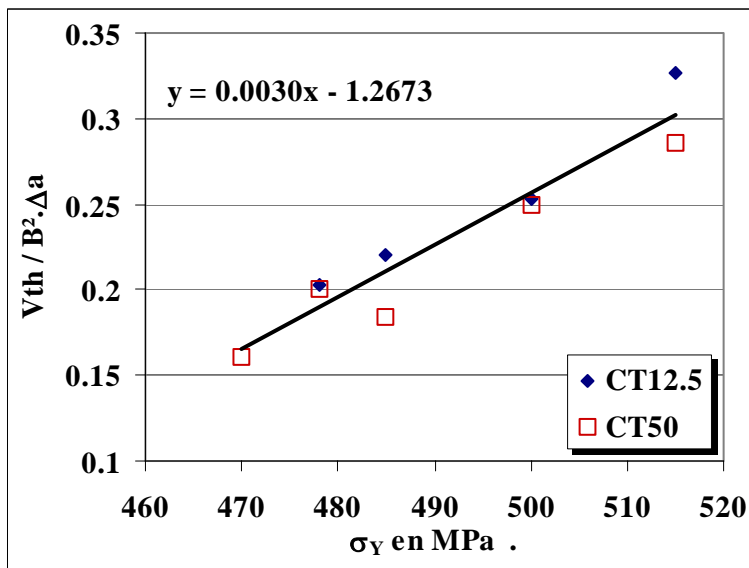
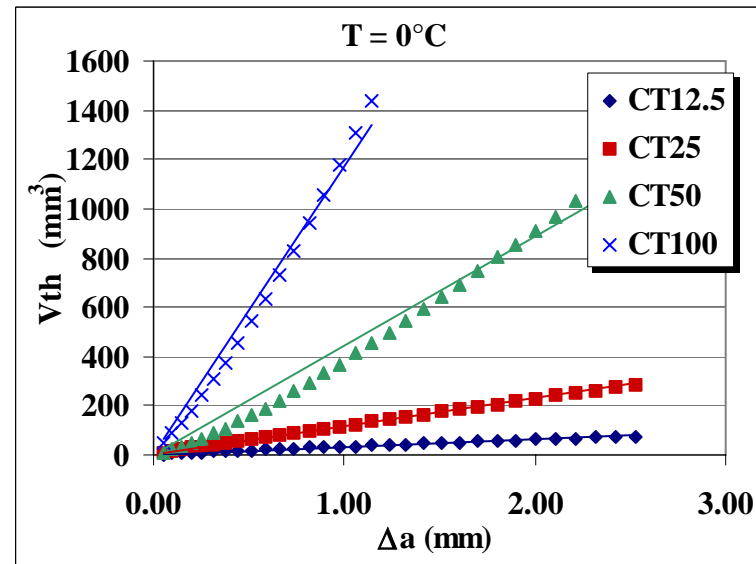
✓  $V_{th}$  est proportionnel à  $B^2$



# I.3 – Expression du volume seuil $V_{th}$

## Données numériques

- ✓  $V_{th}$  est proportionnel à  $\Delta a$
- ✓  $V_{th}$  est proportionnel à  $B^2$
- ✓  $V_{th}$  évolue linéairement avec la limite d'élasticité  $\sigma_Y$



# I – Énoncé du critère

La probabilité de rupture fragile d'une éprouvette fissurée sollicitée dans la partie supérieure du domaine de transition fragile/ductile est donnée par :

$$Pr = 1 - \exp[-F \cdot V_{th}] \quad \text{avec} \quad V_{th} \propto \sigma_Y \cdot B^2 \cdot \Delta a$$
$$\text{et} \quad F = \frac{1}{V_0} \cdot \left( \frac{\sigma_Y - \sigma_{Y0}}{\sigma_{u\_CT}} \right)^m$$

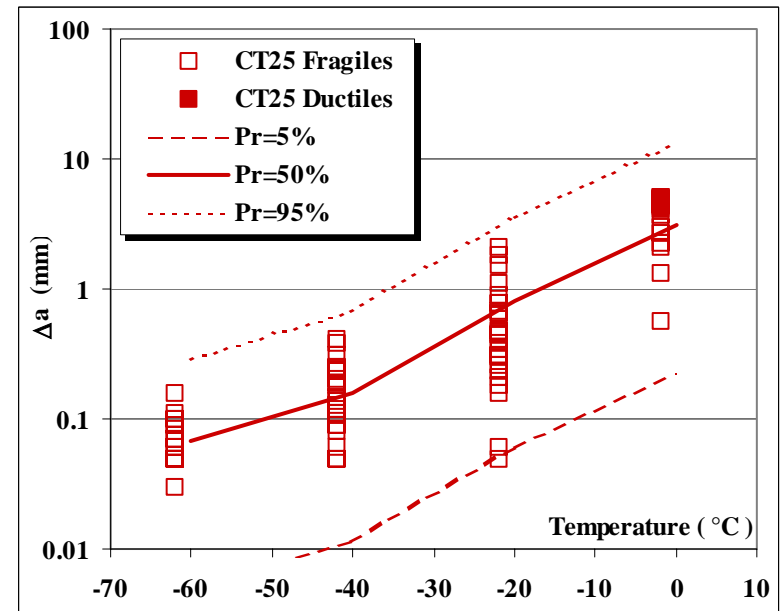
$V_{th}$  est le paramètre de chargement, il inclut :

- L'effet d'échelle ( $B^2$ )
- L'influence de l'avancée de fissure ductile.

F inclut :

- Les propriétés « matériau »
- L'effet de confinement

L'effet de la température est présent à la fois dans  $V_{th}$  et dans F (via  $\sigma_Y$ )



CT25 de -60°C à 0°C

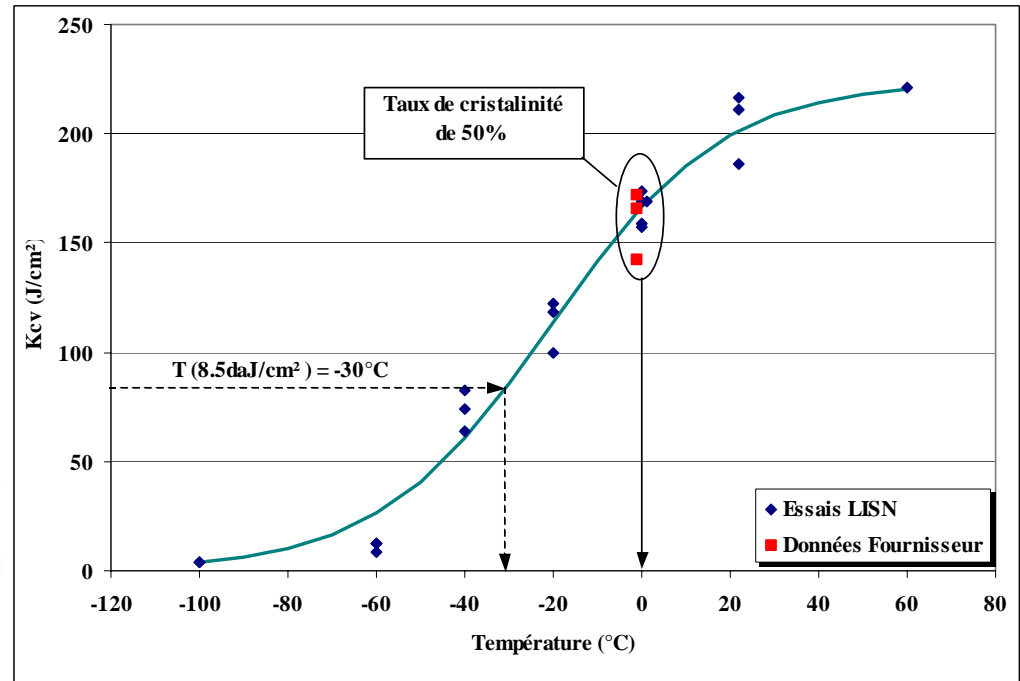
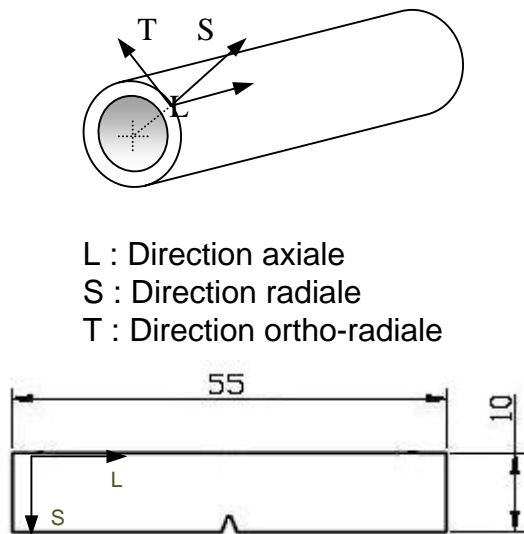


## II – Transférabilité du critère en contrainte seuil, Identification sur le matériau TU42 C

## II.1 – Présentation du matériau

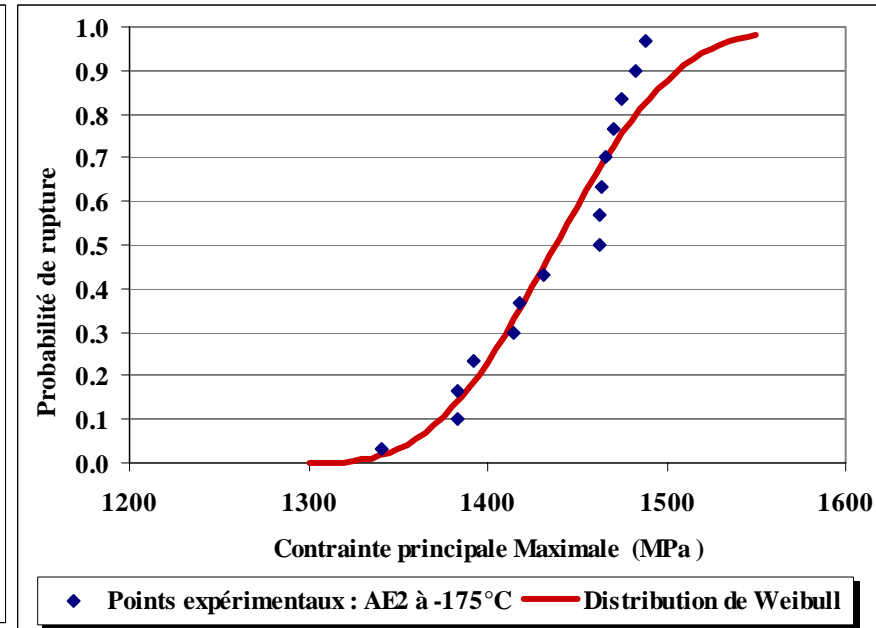
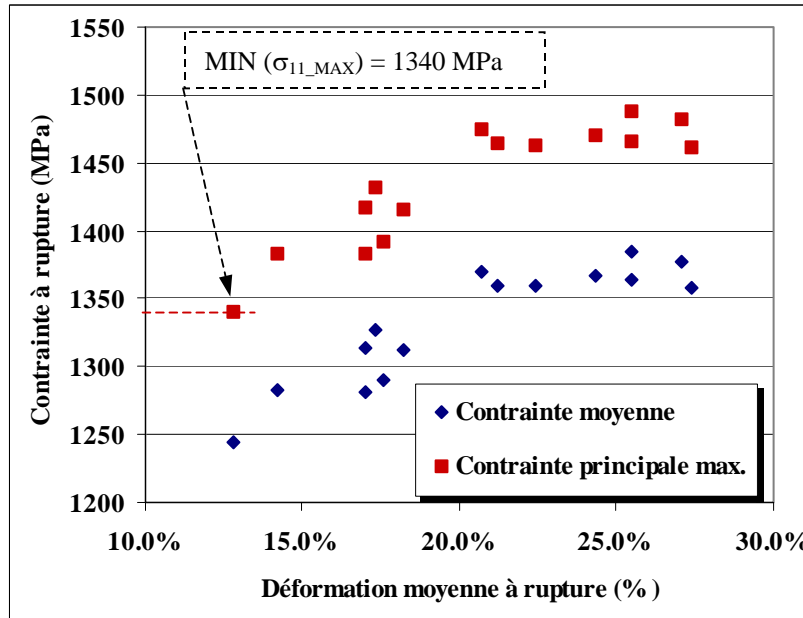
Tube en acier C-Mn « TU42 C » de diamètre ext. 219.1 mm, Épaisseur 16 mm

Élément	C	Si	Mn	P	S	Cu	Sn	Fe
% massique	0.19	0.19	0.77	0.013	0.006	0.02	0.003	Balance



## II.2 – Détermination de la contrainte seuil du TU42 C

✓ 15 Essais sont réalisés sur éprouvettes AE2 à  $-175^{\circ}\text{C}$



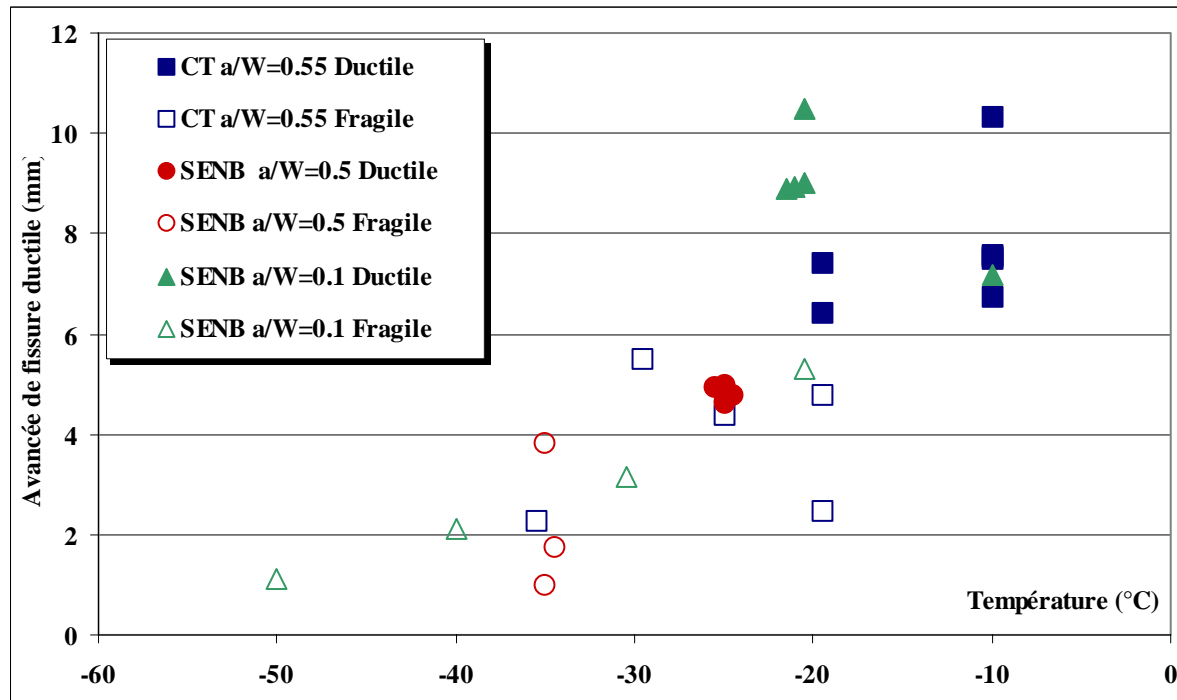
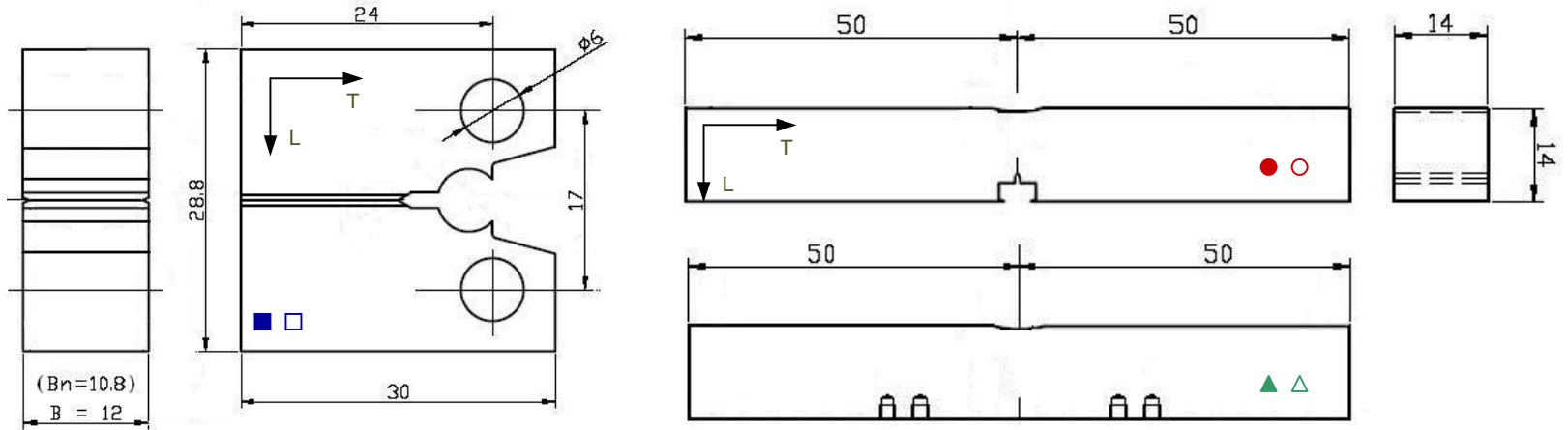
- ✓ Les contraintes principales maximales à rupture sont évaluées via une modélisation par EF.
- ✓ Une distribution de Weibull à 3 paramètres des contraintes à rupture est difficile à identifier.

La contrainte seuil est obtenue à partir des plus basses contraintes à rupture.

$$\Rightarrow \sigma_{th} = 1300 \text{ MPa}$$

$$\Rightarrow m = 3.0$$

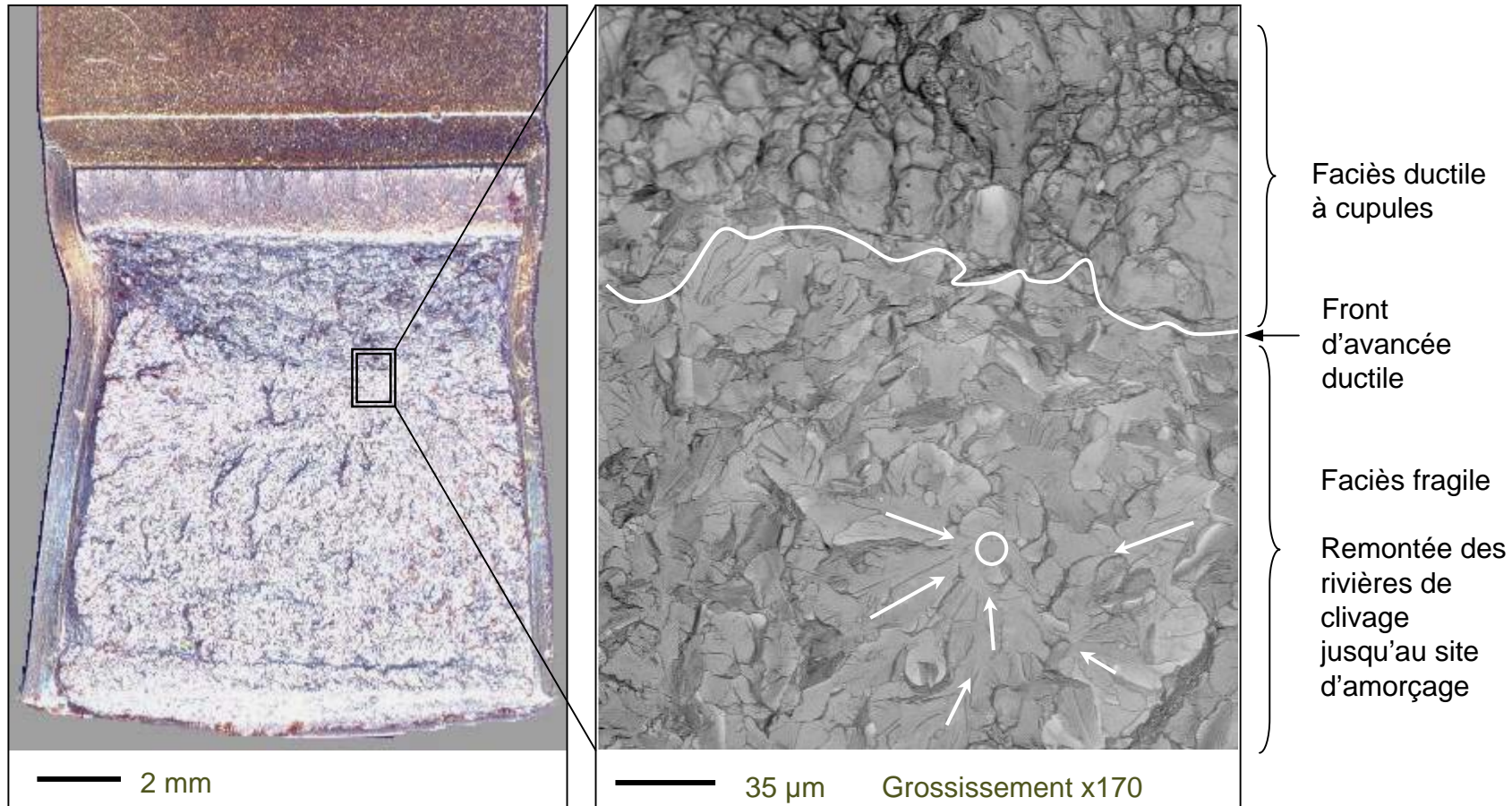
## II.3 – Domaine de Transition sur éprouvettes CT et SENB





## II.3 – Domaine de Transition sur éprouvettes CT et SENB

Faciès de rupture observés au MEB

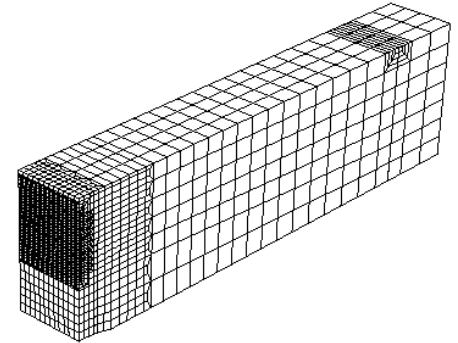


- ✓ Aucune particule détectée aux alentours du site d'amorçage du clivage
- ✓ Mécanisme d'amorçage vraisemblablement induit par la déformation plastique

## II.4 – Identification des paramètres du critère

$$\checkmark \quad -\text{Ln}(1 - P_R) = F \cdot V_{th} \quad F = \frac{1}{V_0} \cdot \left( \frac{\sigma_Y - \sigma_{Y0}}{\sigma_{u\_CT}} \right)^m$$

✓ Calcul des  $V_{th}$  par EF



✓ Hypothèse :

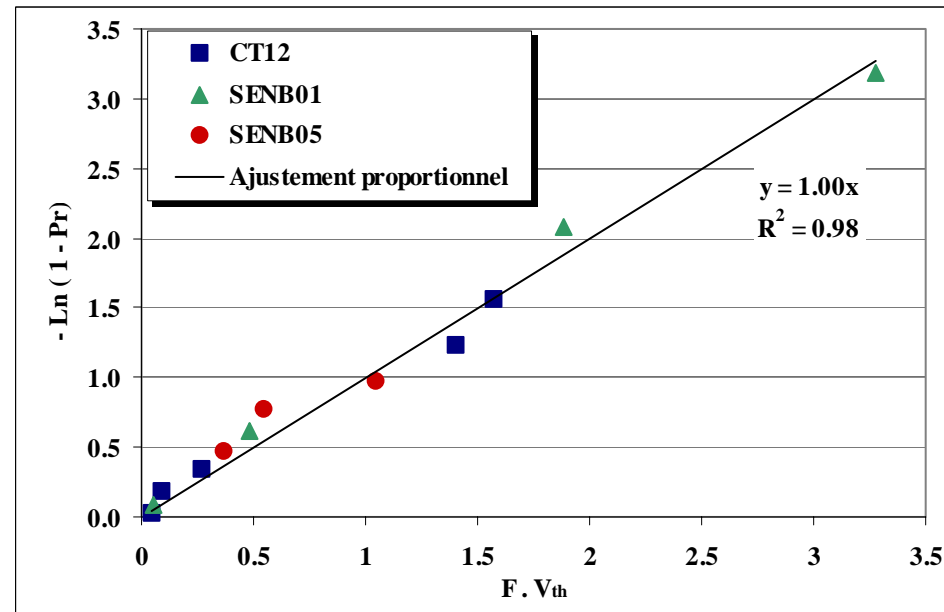
$\sigma_{Y0}$  traduit l'influence de la géométrie dans F

$\sigma_{Y0}$  est la limite d'élasticité à la température de disparition du clivage (F=0)

✓ Classement des éprouvettes par ordre de «  $F \cdot V_{th}$  » croissant

✓ Probabilité de rupture expérimentale itérative  $Pr_i = \frac{i - 0.5}{N_i}$

✓ Le paramètre  $\sigma_u \cdot V_0^{1/m}$  est identifié :  
 $\sigma_u V_0^{1/m} = 58,7 \text{ MPa mm}^{3/m}$



## II– Transférabilité du critère en contrainte seuil

✓  $\sigma_{Y0}$  quantifie l'influence du confinement.

Difficulté d'identification :

- expérimentalement : température de disparition du clivage
- numériquement

$$\alpha = \frac{\sigma_{11\_MAX}}{\sigma_Y} \quad ; \quad \sigma_{Y0} = \frac{\sigma_{th}}{\alpha}$$

✓ Forte sensibilité de  $F$  à  $\sigma_{Y0}$  : difficulté supplémentaire / cohérent avec les essais ...

✓  $V_{th}$  : paramètre de chargement

✓ Identification de  $\sigma_{th}$  à partir d'essais à très basse température sur éprouvettes AE

- Extrapolation de la distribution expérimentale à une probabilité nulle

✓  $\sigma_{th}$  dépassée sans apparition du clivage

- $\sigma_{11\_MAX} > \sigma_{th}$  Condition nécessaire / non-suffisante
- Influence de la plasticité et/ou de la triaxialité sur  $\sigma_{th}$

## II– Transférabilité du critère en contrainte seuil

✓  $\sigma_{Y0}$  quantifie l'influence du confinement.

Difficulté d'identification :

- expérimentalement : température de disparition du clivage
- numériquement

$$\alpha = \frac{\sigma_{11\_MAX}}{\sigma_Y}, \quad \sigma_{Y0} = \frac{\sigma_{th}}{\alpha}$$

✓ Forte sensibilité de  $F$  à  $\sigma_{Y0}$  : difficulté supplémentaire / cohérent avec les essais ...

✓  $V_{th}$  : paramètre de chargement

✓ Identification de  $\sigma_{th}$  à partir d'essais à très basse température sur éprouvettes AE

- Extrapolation de la distribution expérimentale à une probabilité nulle

✓  $\sigma_{th}$  dépassée sans apparition du clivage

- $\sigma_{11\_MAX} > \sigma_{th}$  Condition nécessaire / non-suffisante
- Influence de la plasticité et/ou de la triaxialité sur  $\sigma_{th}$

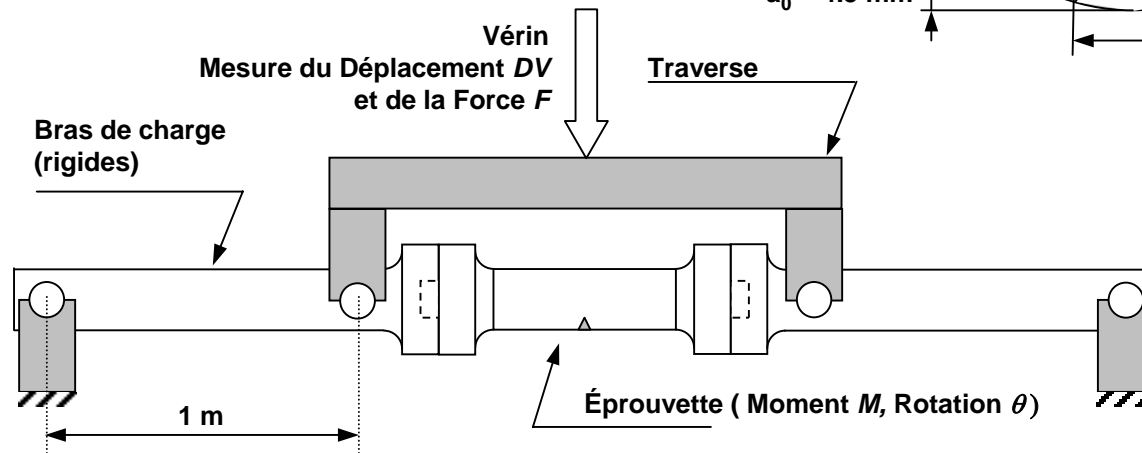
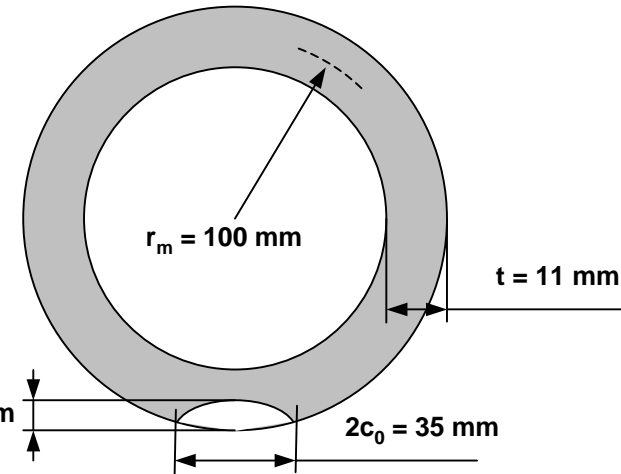


## III – Développement d'un Essai de Rupture sur Composant

# III.1 – Dimensionnement de l'essai sur composant

## Géométrie et chargement :

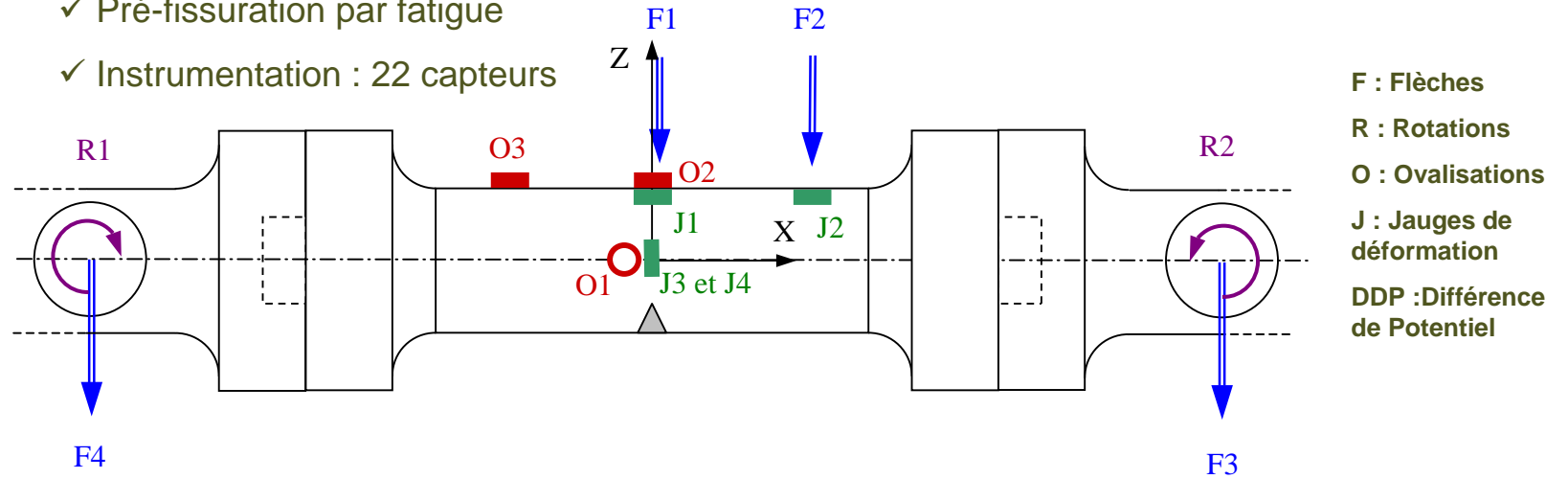
- ✓ Tube mince ;
- ✓ contenant une fissure semi-elliptique, circumférentielle, peu profonde, débouchant en peau externe ;
- ✓ sous chargement de flexion pure, obtenu entre les appuis d'un montage de flexion 4-points.



- ✓ Épaisseur du tube et taille du défaut choisies de manière à :
  - respecter les capacités du banc de flexion
  - amorcer la déchirure ductile avant la ruine par plasticité généralisée du tube
  - ne pas dépasser  $\sigma_{th}$  avant l'amorçage ductile

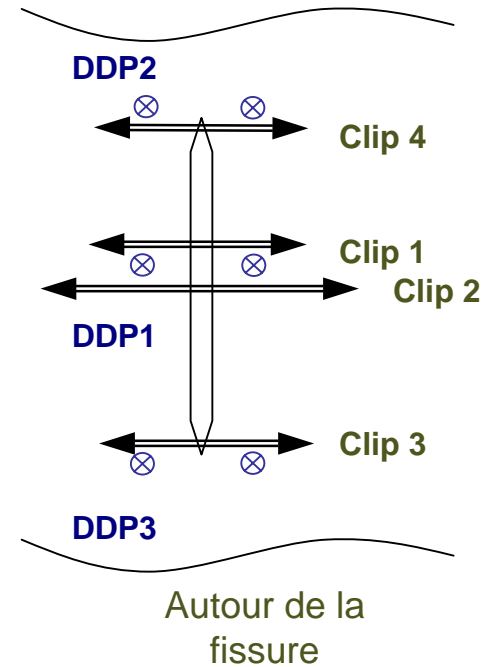
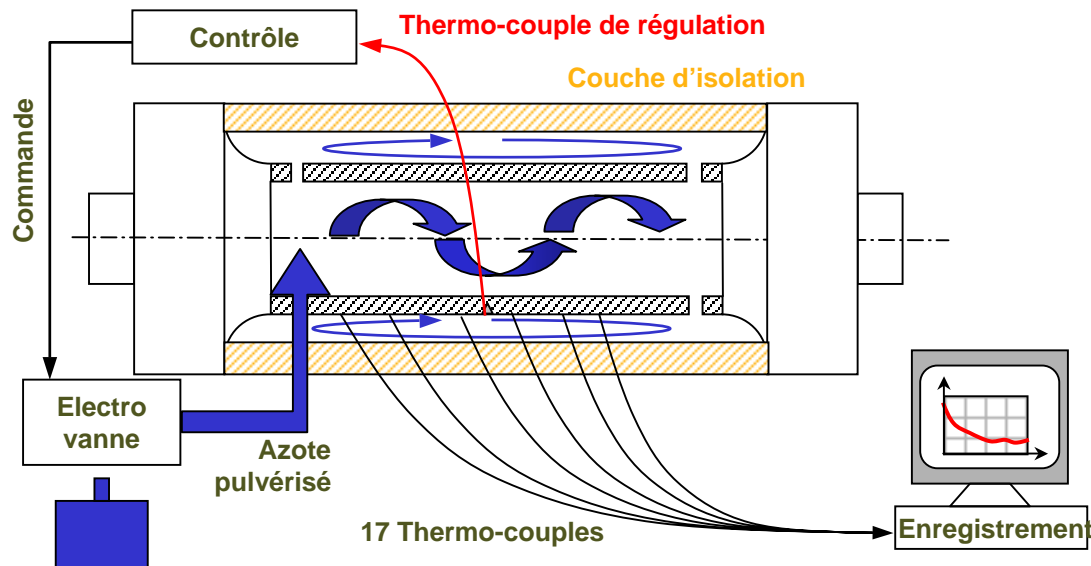
# III.2 – Instrumentation et Refroidissement

- ✓ Pré-fissuration par fatigue
- ✓ Instrumentation : 22 capteurs



F : Flèches  
 R : Rotations  
 O : Ovalisations  
 J : Jauges de déformation  
 DDP : Différence de Potentiel

- ✓ Technique de refroidissement





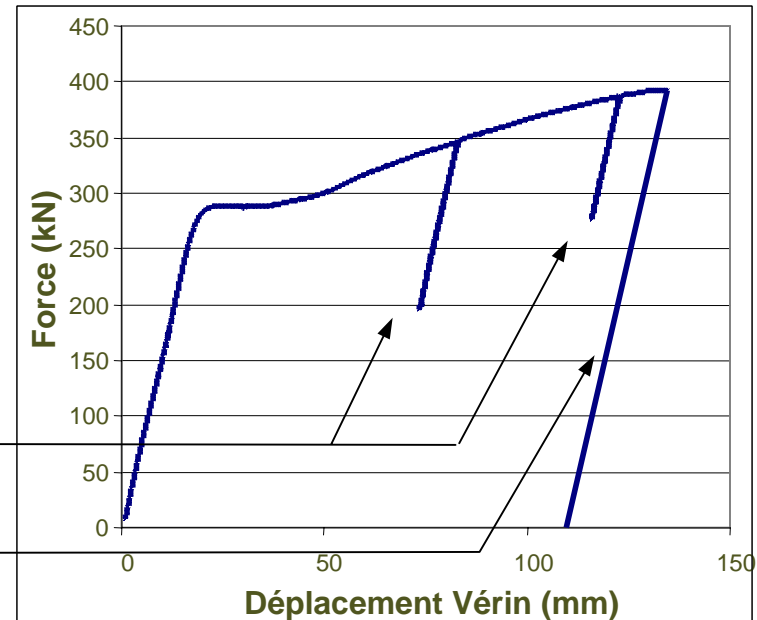
### III.3 – Déroulement de l'essai

✓ Température : -50°C autour de la fissure



✓ Séquences de décharges partielles pour la mesure de la complaisance élastique

✓ Rupture fragile après large plastification

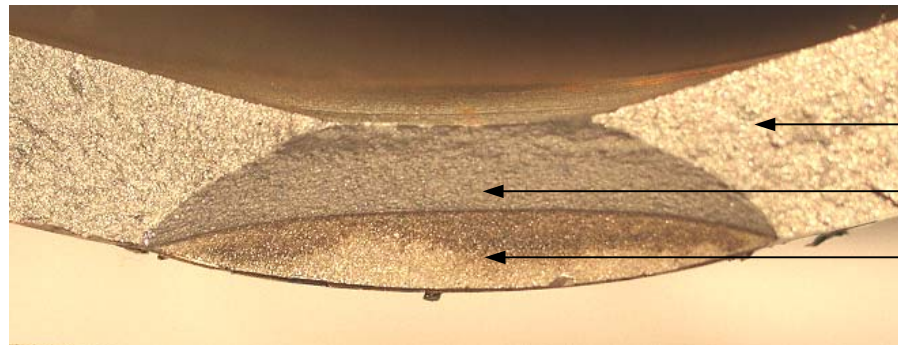




### III.4 – Dépouillement de l'essai : Faciès de rupture



- ✓ Fissure de fatigue conforme aux prédictions  
 $(a_0; 2.c_0) = (4.50 ; 35.25)$
- ✓ **Déchirure ductile** symétrique, de forme elliptique, sans propagation de surface
- ✓ Striction importante
- ✓ **Rupture fragile après percement**
- ✓ Trajectoire symétrique de la fissure fragile



- 3 – Rupture fragile
- 2 – Déchirure ductile (avec striction)
- 1 – Fissure de fatigue

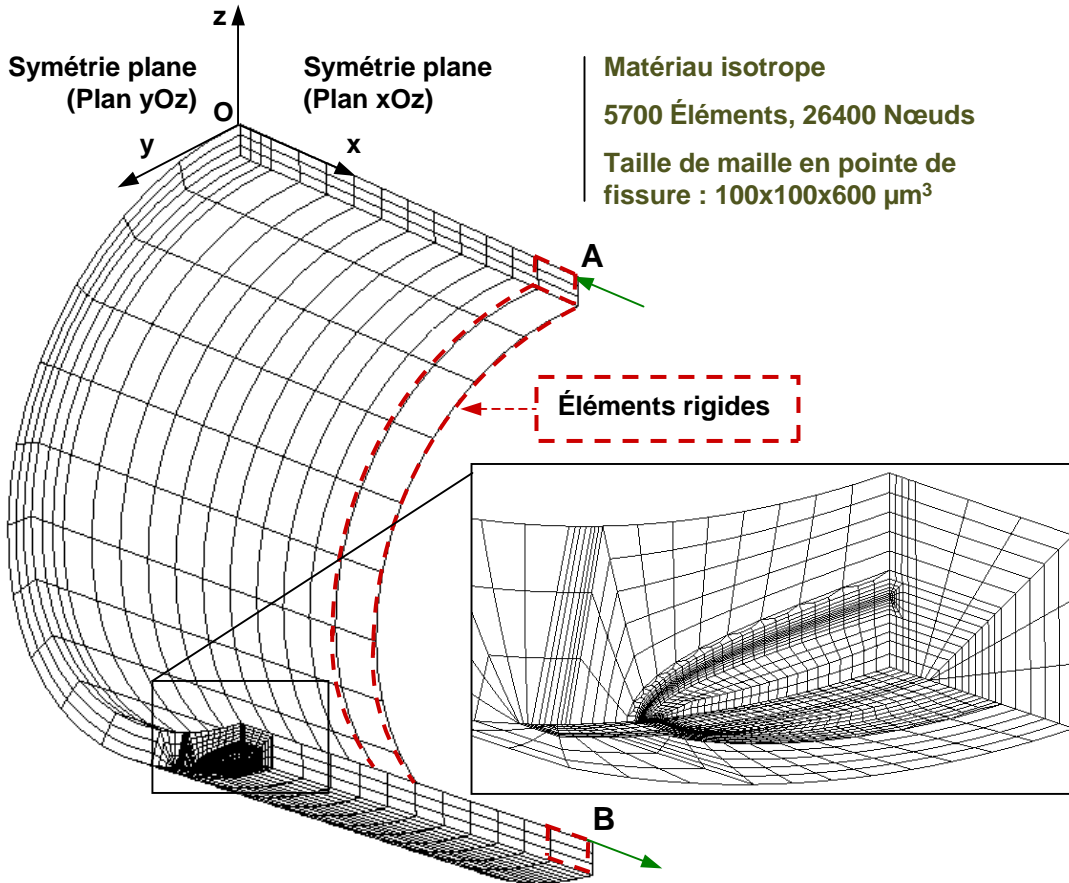
10 mm

- ✓ **Déchirure ductile** beaucoup plus importante que sur les éprouvettes à cette température  
*[ 1 mm de déchirure ductile avant rupture fragile sur SENB ( $a/W = 0.1$ ) à  $-50^{\circ}\text{C}$  ]*

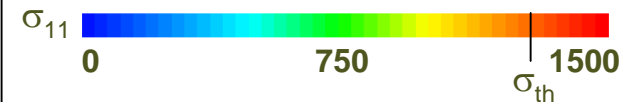
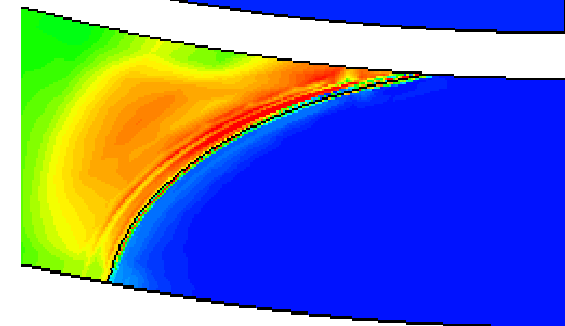
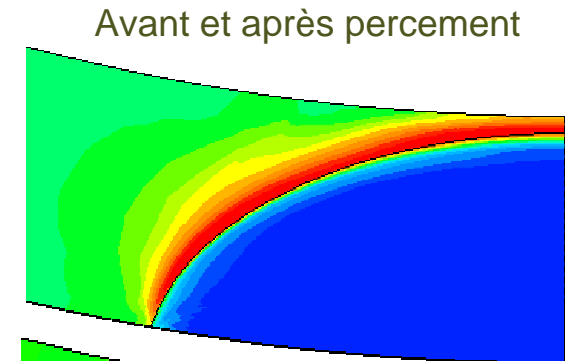
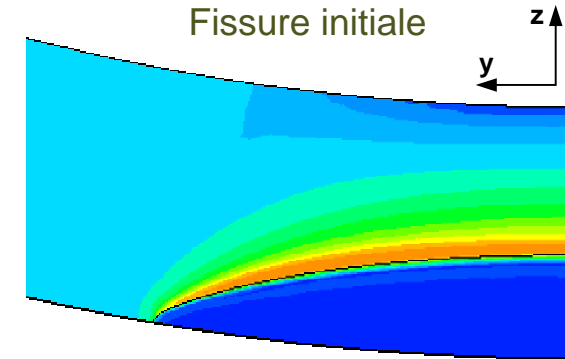
# III.5 – Évolution des contraintes

## Modélisation de l'essai

⇒  $V_{th}$  s'est largement étendu au moment du percement



Matériau isotrope  
5700 Éléments, 26400 Nœuds  
Taille de maille en pointe de fissure :  $100 \times 100 \times 600 \mu\text{m}^3$



Déplacement relatif imposé sur les points A et B parallèlement à l'axe Ox

# III – Développement d'un Essai de Rupture sur Composant

## Essai démonstratif :

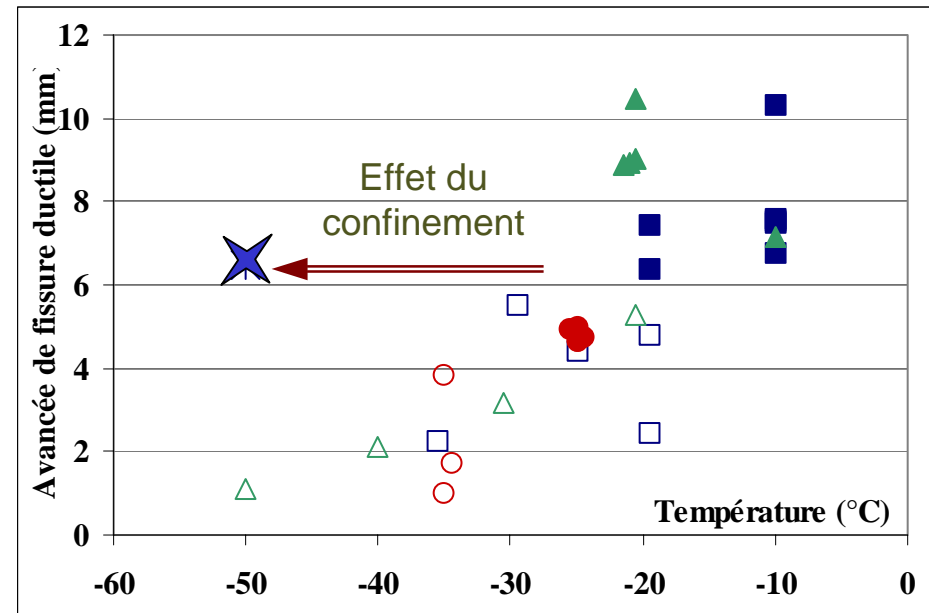
✓ Décalage du domaine de transition fragile/ductile par rapport aux éprouvettes de laboratoire :

À  $-50^{\circ}\text{C}$  :

1 mm de déchirure sur une éprouvette SENB ( $a/W=0.1$ )

6.5 mm de déchirure sur le tube

✓ Absence du risque de rupture fragile à  $-50^{\circ}\text{C}$  avant l'amorçage ductile



## Essai de validation du critère :

- ✓ La condition de contrainte seuil permet d'estimer de manière simple une température de disparition du clivage
- ✓ Le décalage de la transition est dû au faible confinement de plasticité rencontré dans le cas des structures minces
- ✓ La modification importante de  $V_{th}$  est à l'origine de la rupture fragile après percement



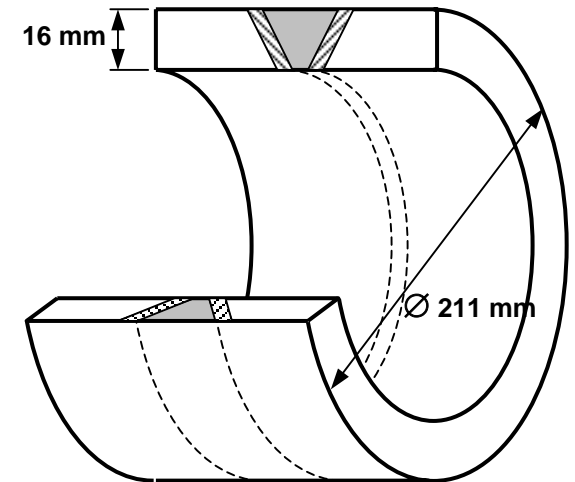
## IV – Méthode de caractérisation des Joints Soudés

# IV – Méthode de caractérisation des Joints Soudés

Objectif : Caractériser le joint soudé de la structure.

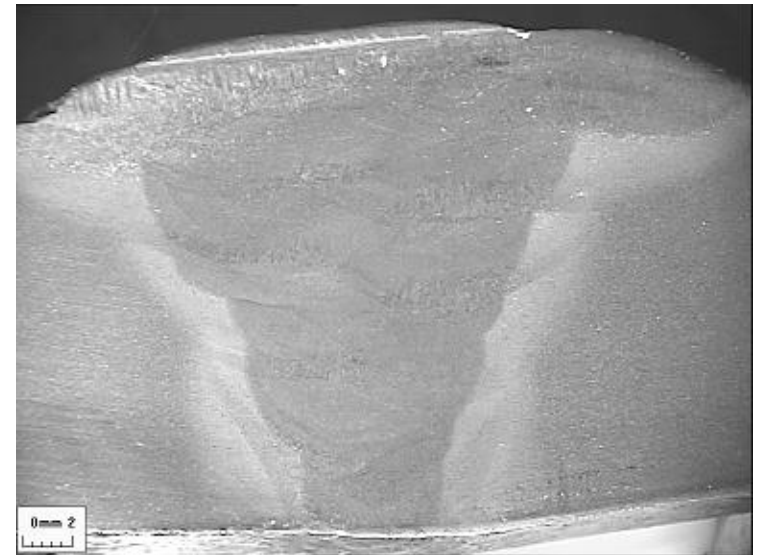
Il s'agit d'un joint circonférentiel en V, en 10 passes :

- ✓ Géométrie complexe,
- ✓ Présence de contraintes résiduelles,
- ✓ Influence du vieillissement statique,
- ✓ Hétérogénéité microstructurale, ...



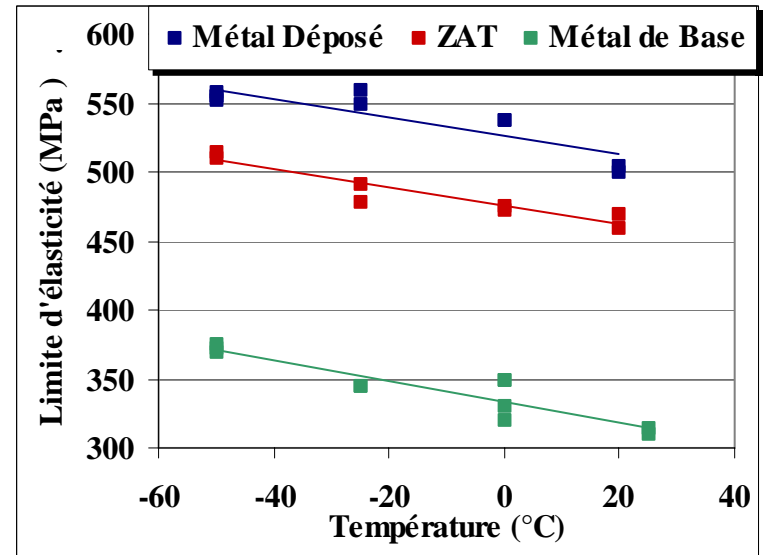
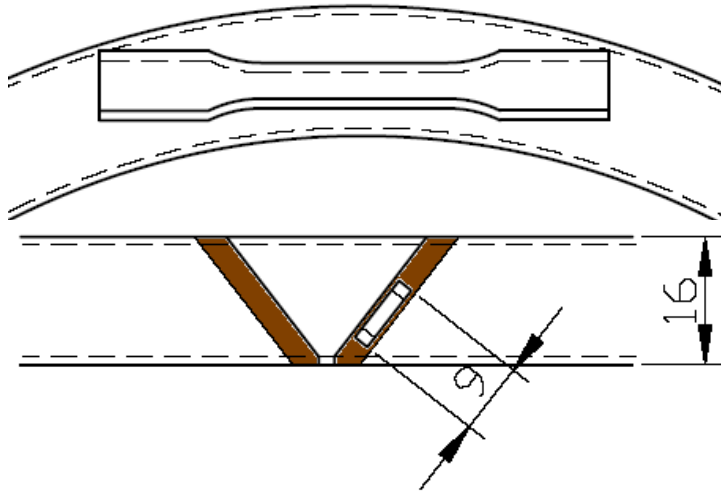
Caractérisations réalisées sur la ZAT :

- ✓ Identifications des microstructures
- ✓ Cartographie de micro-dureté
- ✓ Comportement en traction simple
- ✓ Résistance à la déchirure ductile
- ✓ Rupture dans la partie supérieure du domaine de transition Fragile/Ductile

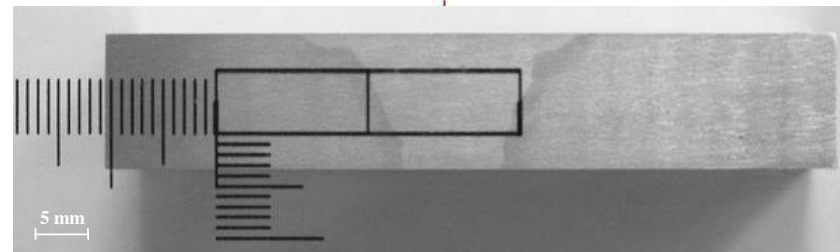
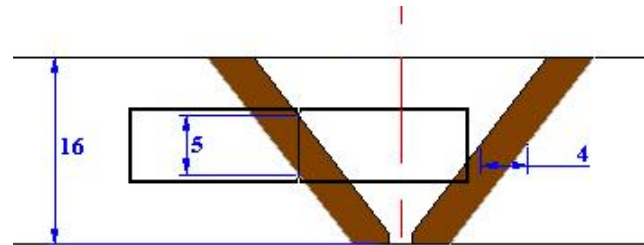
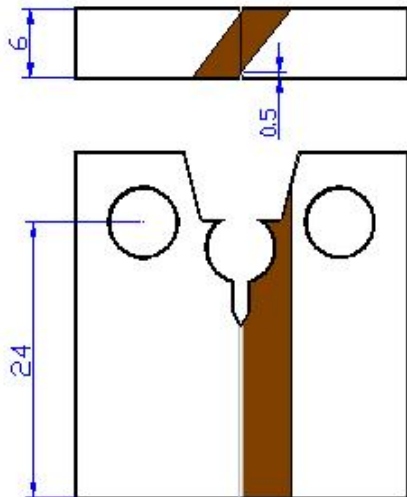


# IV.1 – Méthode de prélèvement par blocs successifs

Prélèvement d'éprouvettes de traction plates

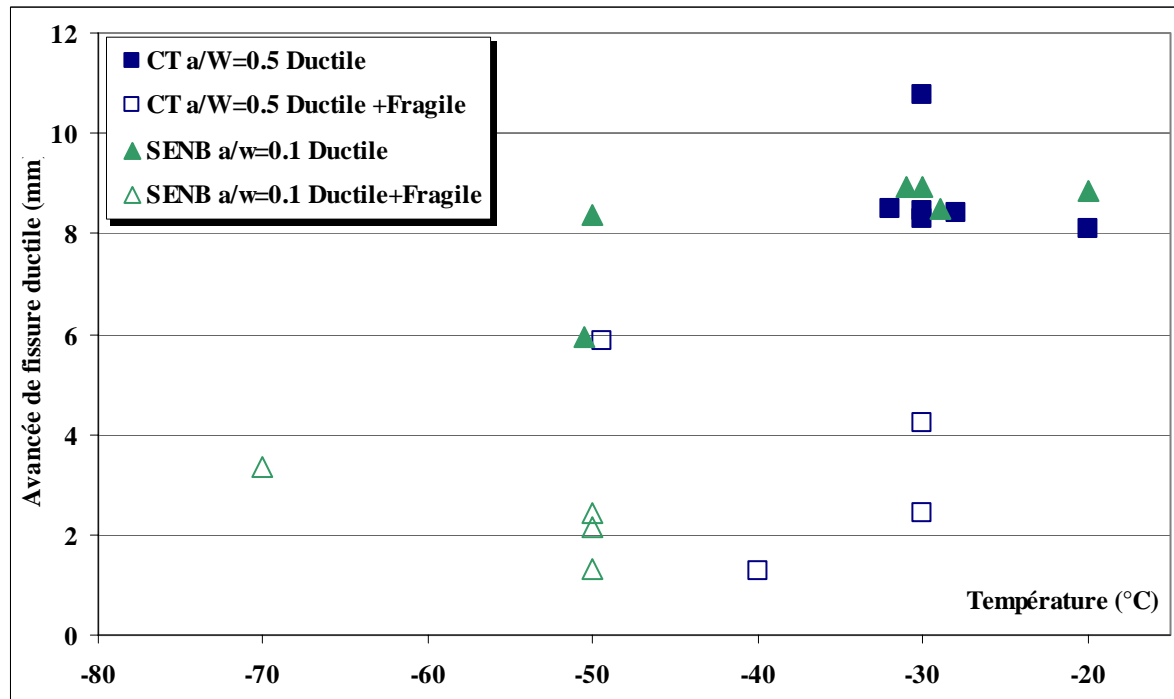


Prélèvement d'éprouvettes CT et SENB avec entaille dans la ZAT uniquement



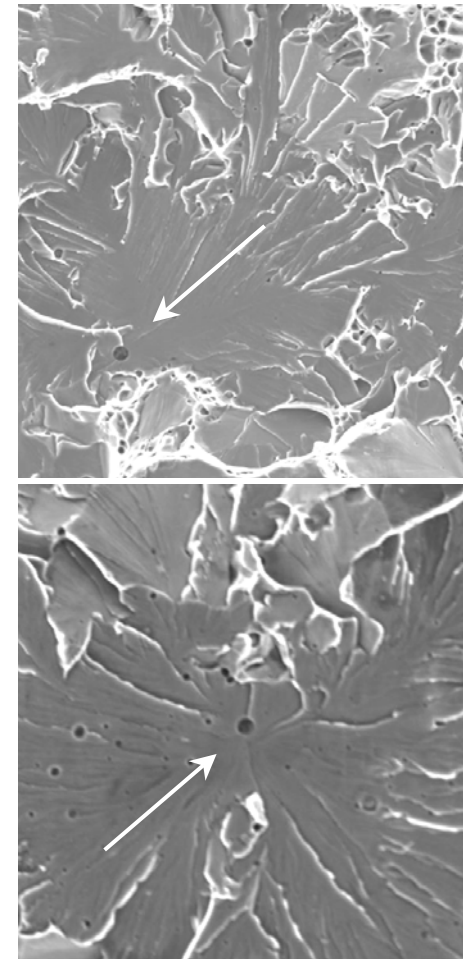
## IV.2 – Étude expérimentale de la Transition Fragile/Ductile

- ✓ Évaluation de la température d'apparition du clivage sur éprouvettes CT et SENB(a/W=0.1)
- ✓ Observations MEB des sites d'amorçage du clivage



⇒ Très forte dispersion dans les comportements à rupture

⇒ Détection d'inclusions sphériques micrométriques au site d'amorçage du clivage pour les 2 éprouvettes ayant montré le moins de déchirure.



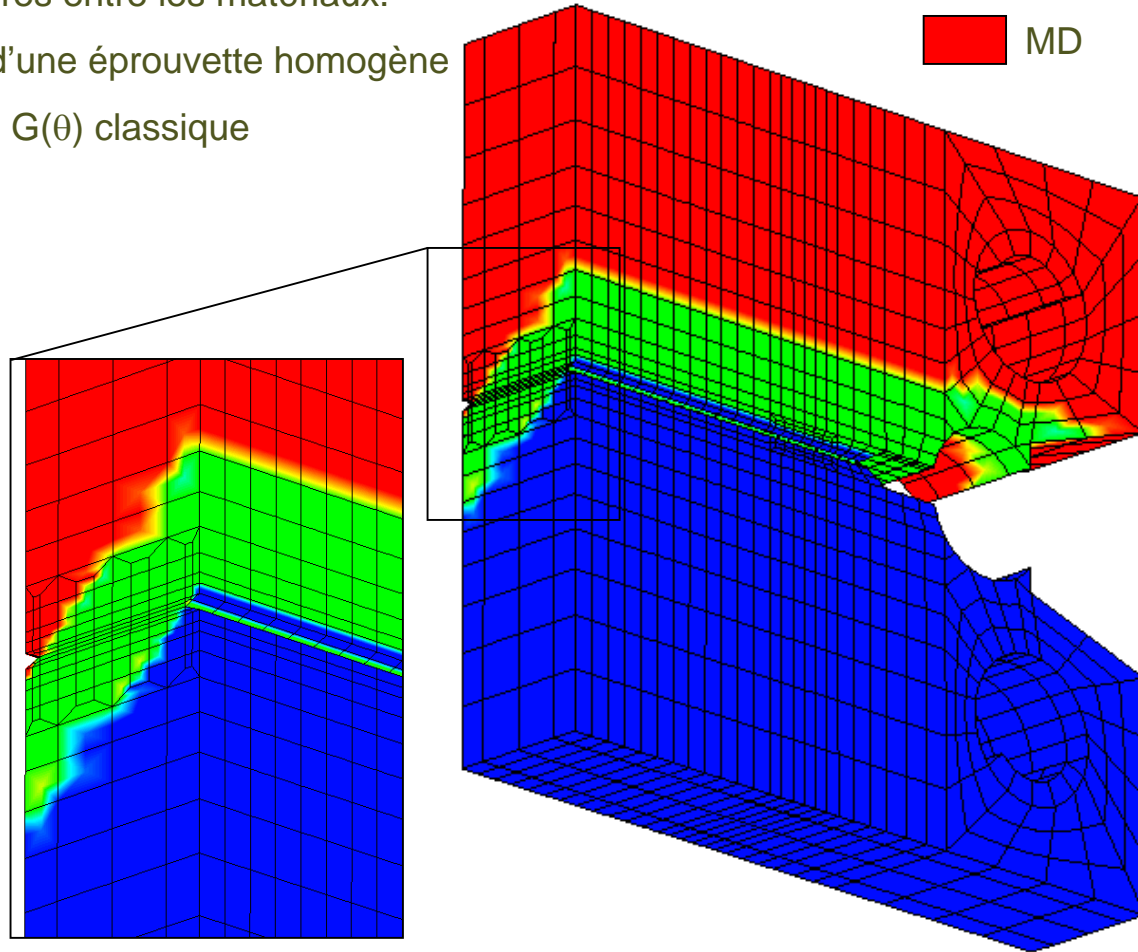
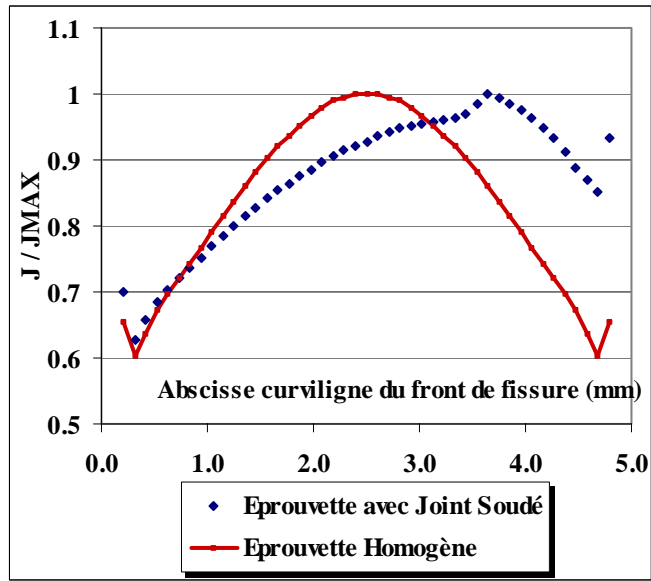


## IV.3 – Modélisation numérique des essais sur CT

Les lois de comportement (MB, ZAT et MD) utilisées sont fonction d'une **variable interne** représentant les 3 secteurs.



- ⇒ Inutile de mailler les frontières entre les matériaux.
- ⇒ Maillage identique à celui d'une éprouvette homogène
- ⇒ Calcul de J par la méthode  $G(\theta)$  classique





## IV – Méthode de caractérisation des Joints Soudés

- ✓ Démonstration de la **faisabilité** des essais de **caractérisation** d'un joint soudé de structure
  - Prélèvement d'éprouvette mince non-normalisées
  - Caractérisation du comportement mécanique moyen
  - Caractérisation du comportement à rupture de la zone la plus faible

- ✓ Mise en évidence d'un mécanisme de rupture différent de celui du métal de base

- ✓ Démonstration de la **faisabilité** de la **modélisation numérique** des ces essais
  - Maillage simplifié
  - Calcul de J





## Conclusions & Perspectives

# Conclusions Générales

## Développement d'un critère de rupture fragile dans la transition Fragile/Ductile

⇒  $\sigma_{th} > \sigma_{11\_MAX}$  : **condition nécessaire** au clivage

✓ Définition « statistique » de  $\sigma_{th}$  à partir d'essais sur éprouvettes AE

⇒  $Pr = 1 - \exp(-F \cdot V_{th})$

✓  $V_{th}$  est le paramètre de **chargement**, il inclut :

- L'influence de l'avancée de fissure ductile.
- L'effet d'échelle

✓ F inclut :

- Les propriétés « **matériau** » :  $m, \sigma_{u\_CT}, V_0$
- L'effet du **confinement** :  $\sigma_{Y0}$

✓ L'effet de la **température** est présent dans  $V_{th}$  et dans F via  $\sigma_Y$ .

⇒  $\sigma_{th}$  dépassée sans apparition du clivage

✓  $\sigma_{11\_MAX} > \sigma_{th}$  Condition nécessaire / non-suffisante

✓ Influence de la **plasticité** et/ou de la **triaxialité** sur  $\sigma_{th}$



# Conclusions Générales

## Essai de rupture sur Composant :

⇒ Essai **démonstratif** :

- ✓ Mise en évidence du décalage du domaine de transition fragile/ductile par rapport aux éprouvettes de laboratoire

⇒ Essai de **validation** du critère :

- ✓ La condition de contrainte seuil permet d'estimer de manière simple une température de disparition du clivage
- ✓ Le décalage de la transition est dû au faible confinement de plasticité rencontré dans le cas des structures minces
- ✓ La modification importante de  $V_{th}$  est à l'origine de la rupture fragile après percement

## Méthode de caractérisation des joints soudés :

⇒ Démonstration de la **faisabilité** des essais de **caractérisation** d'un joint soudé de structure

⇒ Démonstration de la **faisabilité** de la **modélisation numérique** des ces essais



# Perspectives immédiates

Influence de la **plasticité** et/ou de la **triaxialité** sur  $\sigma_{th}$  :

⇒ Essais sur éprouvettes AE sur un matériau pré-écroui

Dépendance de la fonction F à la **géométrie** et/ou à la **triaxialité** :

⇒ Étude des essais de la base ESIS sur d'autres géométries (SENB, Éprouvette en croix)

⇒ Essais sur éprouvettes SENT sur l'acier TU42 C

Interprétation numérique de l'essai sur le tube :

⇒ Mieux reproduire le **comportement global** de l'essai en complétant le modèle

⇒ Préciser l'évolution du **volume seuil** en cours de déchirure et au percement

Second essai sur tube sans soudure :

⇒ Confirmer les premiers résultats avec une meilleure maîtrise des conditions expérimentales.

Étude des joints soudés :

⇒ Identifier les paramètres du modèle, la **contrainte seuil** en premier lieu

⇒ Réaliser un essai de rupture sur un tube soudé

⇒ Évaluer l'**influence du joint soudé** sur la tenue mécanique de la structure.



# Perspectives à long terme

✓ Multiplier les applications du modèle sur d'autres matériaux

⇒ Acier de cuve

✓ Étendre le modèle à l'ensemble de la zone transition

✓ Établir une méthode simplifiée d'application

⇒ Formules analytiques de calcul de  $V_{th}$

✓ Essais sur tube (avec ou sans soudure) sous chargement biaxial

⇒ Flexion + Pression

✓ Quantifier l'influence des contraintes résiduelles

⇒ Mesures par diffraction neutronique



---

*Étude de la compétition déchirure ductile / rupture fragile : Application à la tenue mécanique des tubes en acier C-Mn et de leurs joints soudés*

*Vincent Le Corre*

*22 Septembre 2006 – CEA-Saclay*

Laboratoire de Mécanique de Lille – École Centrale de Lille

Laboratoire d'Intégrité des Structures et de Normalisation – CEA Saclay



## Hypothèse sur $p_{ri}$

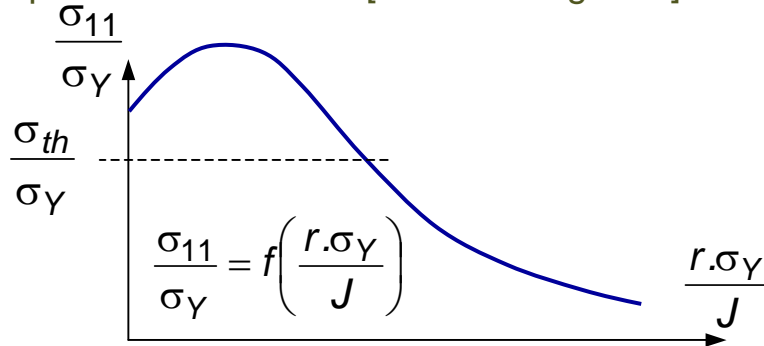
$p_0$  est la moyenne des  $p_{ri}$  sur  $V_{th}$  .....

$$p_0 = \frac{1}{V_{th}} \cdot \int_{V_{th}} p_{ri}(\sigma) \cdot dV$$

Cas 1D .....

$$p_0 = \frac{1}{r_{th}} \cdot \int_0^{r_{th}} p_{ri}(\sigma_{11}) \cdot dr$$

Champs de contrainte de [MacMeeking – 95]

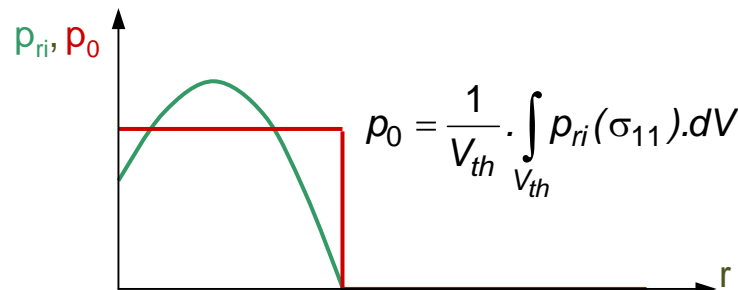


$$\rho = \frac{r \cdot \sigma_Y}{J}$$

$$p_0 = \frac{1}{r_{th}} \cdot \frac{J}{\sigma_Y} \cdot \int_0^{\rho_{th}} p_{ri}(\sigma_Y \cdot f(\rho)) \cdot d\rho$$

La moyenne  $p_0$  sur  $V_{th}$  est indépendante du chargement

$$p_0 = \frac{1}{\rho_{th}} \cdot I_{th}(\rho)$$





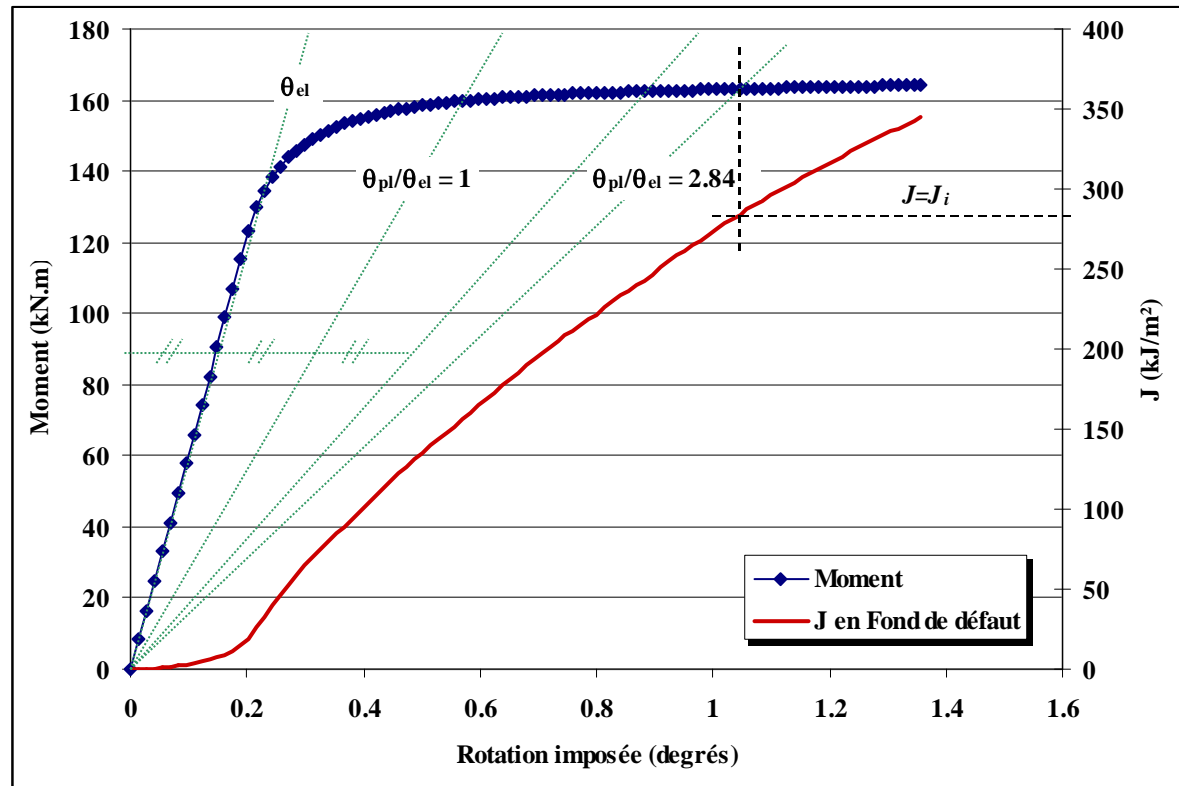
# Annexes – Dimensionnement de l'essai sur composant

Toutes les conditions sont remplies pour :

$$t = 11 \text{ mm}$$

et

$$a_0 = 4 \text{ mm}$$



$$J_i = 285 \text{ kJ/m}^2$$

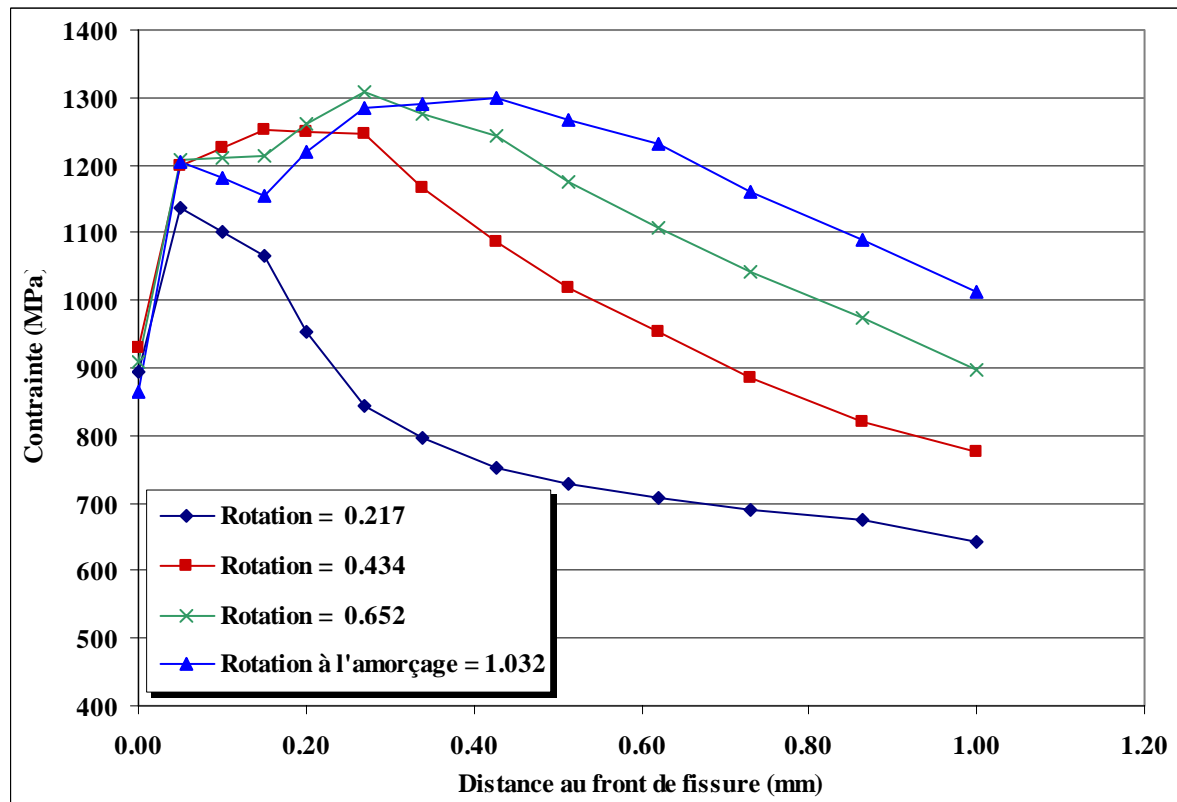
# Annexes – Dimensionnement de l'essai sur composant

Toutes les conditions sont remplies pour :

$t = 11 \text{ mm}$

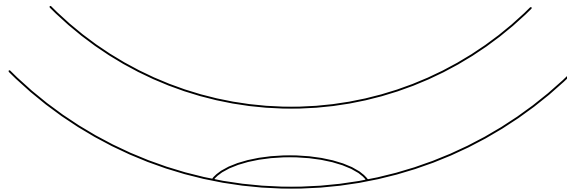
et

$a_0 = 4 \text{ mm}$

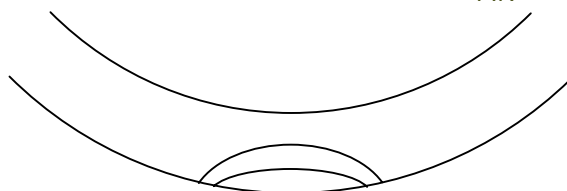


# Annexes – Préparation de la maquette d'essai

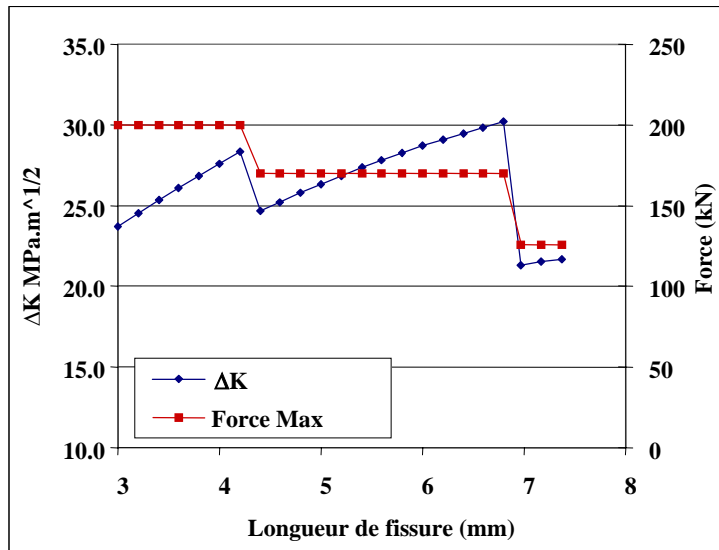
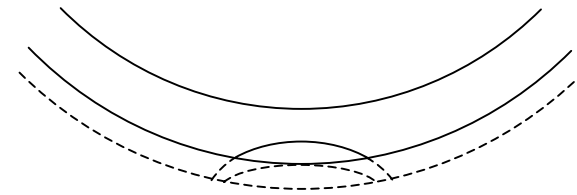
1/ Entaille mécanique (R < 0.1 mm)



2/ Pré-fissure de fatigue.  $\Delta K_{FIN} = 22 \text{ MPa.m}^{1/2}$



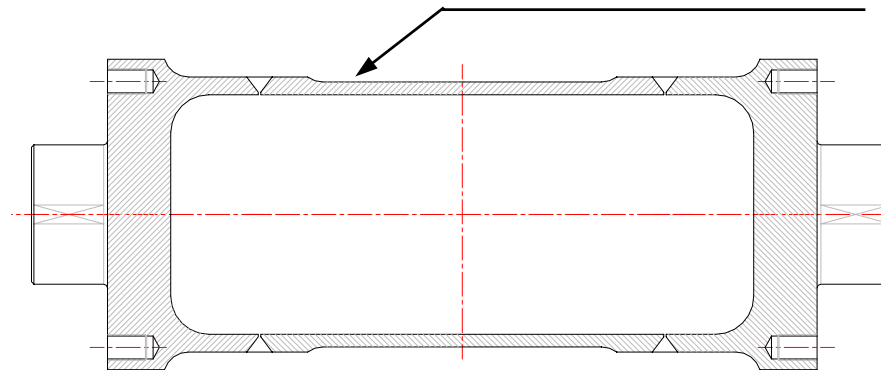
3/ Usinage de réduction diamétrale pour garder uniquement une fissure peu profonde



Géométrie finale

Diam.ext. : 211 mm

Épaisseur : 11 mm

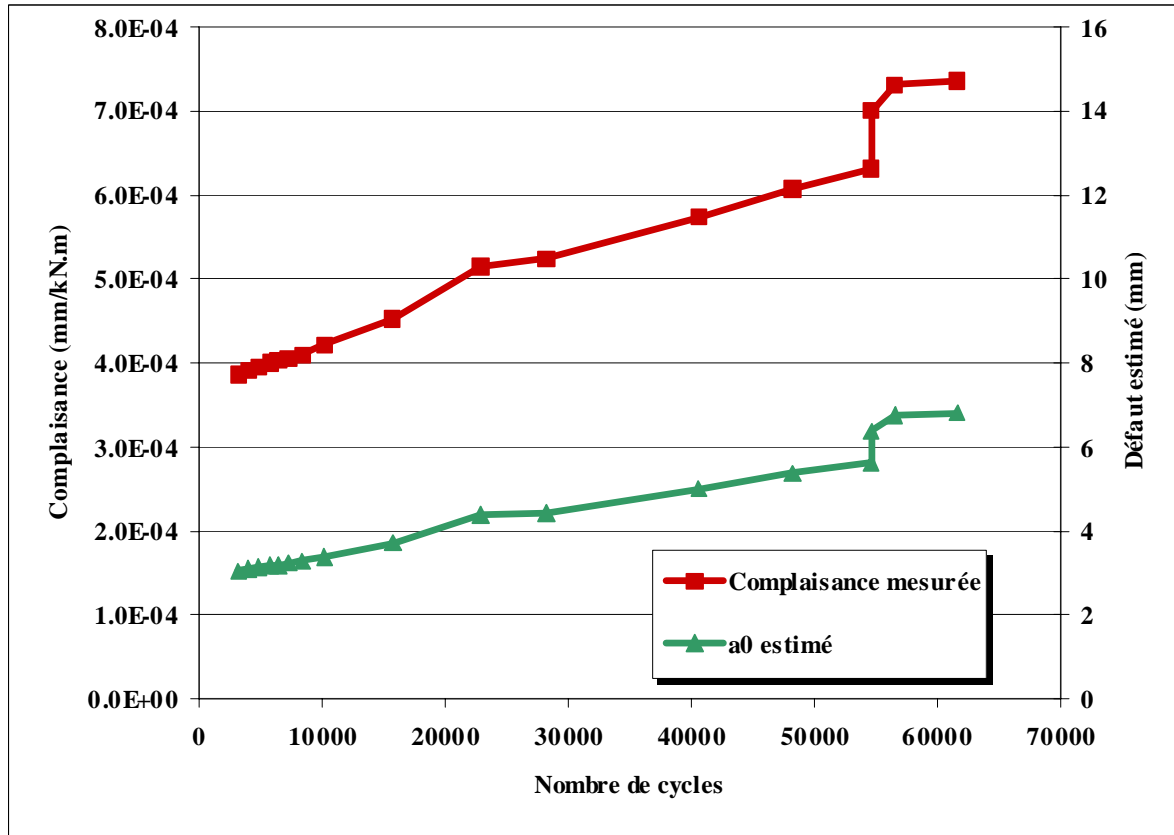


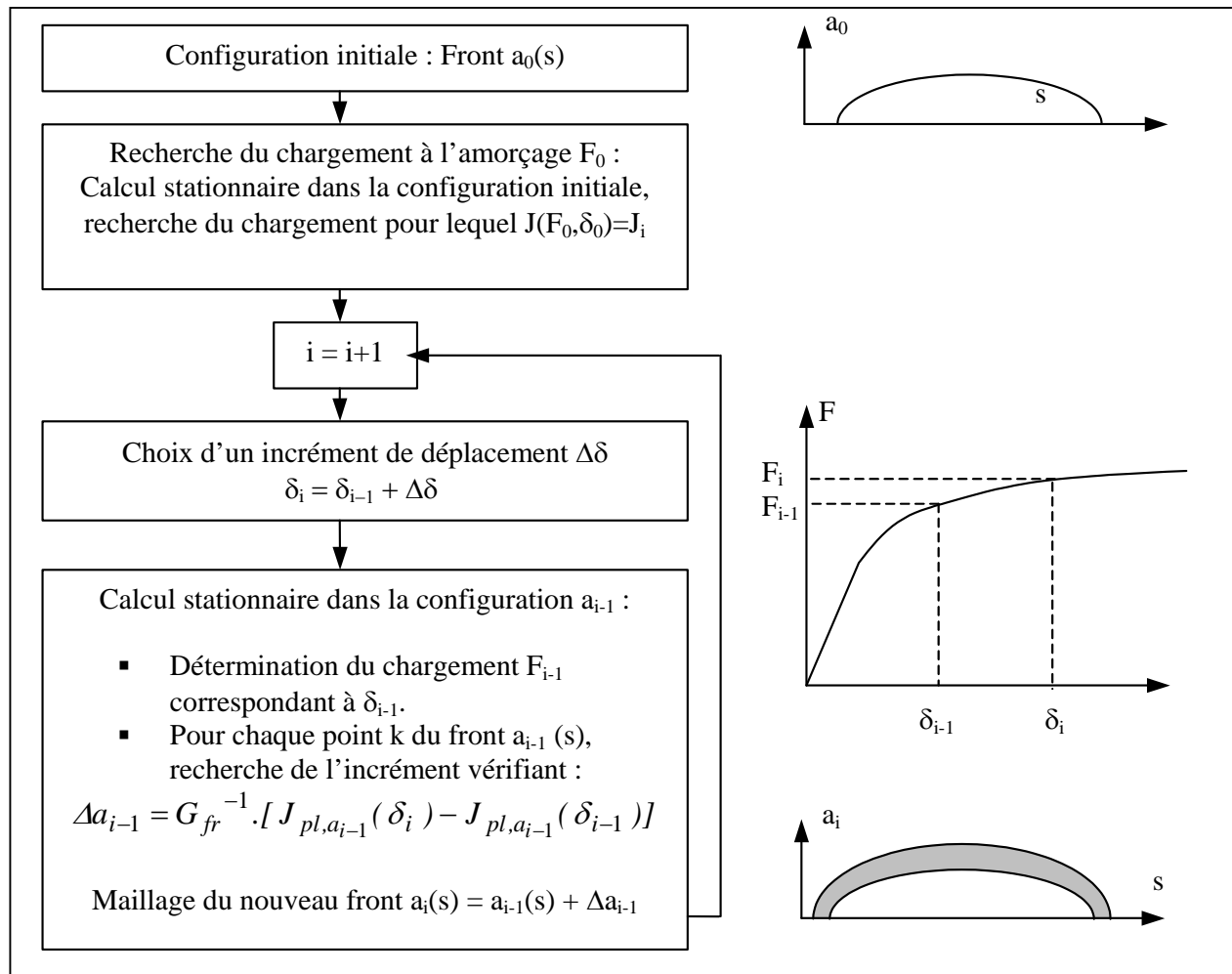
Fissure obtenue pour l'essai de rupture :

Profondeur : 4.5 mm

Longueur de surface : 35 mm

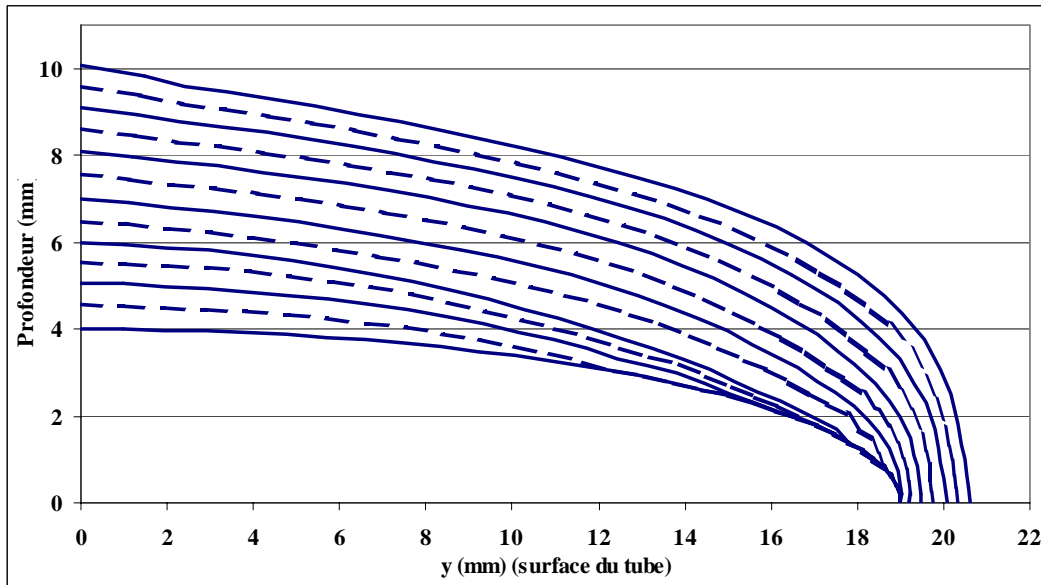
# Annexes – Suivi de la préfissuration



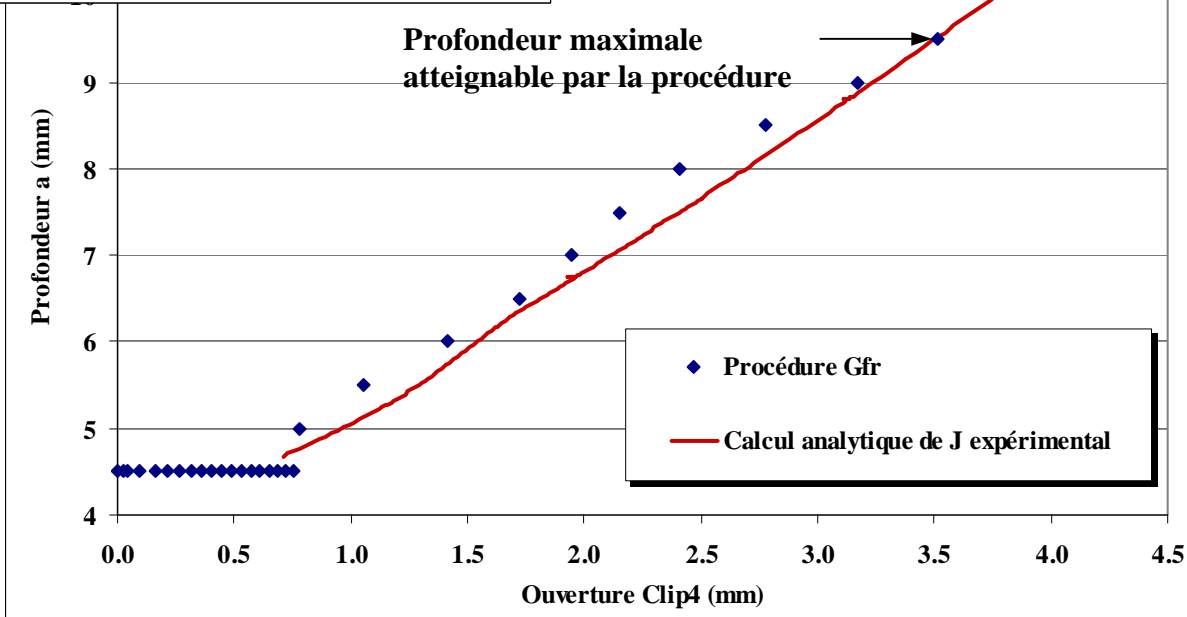


Algorithme d'application de la procédure  $G_{fr}$  pour une fissure bidimensionnelle

# Annexes – Prédiction de la déchirure ductile



Sous-estimation de la profondeur en fin d'essai (au percement)



# Annexes : Calcul de $V_{th}$ , Maillage

Modélisation de l'essai sur tube

Maillage de propagation par relâchement de nœuds

