

Quantification d'incertitudes de la température de transition ductile-fragile T_0 d'acier de cuve de réacteurs à partir d'essais de ténacités expérimentaux et numériques

Journée du GST « Mécanique et Incertain », 19 Octobre 2023

A. Quintin^{1,2,4} (anthony.quintin@cea.fr) R. Chocat¹ T. Petit² C. Mattrand³ J-M. Bourinet⁴

¹Université Paris-Saclay, CEA, Service de Génie Logiciel pour la Simulation, Gif-sur-Yvette, France

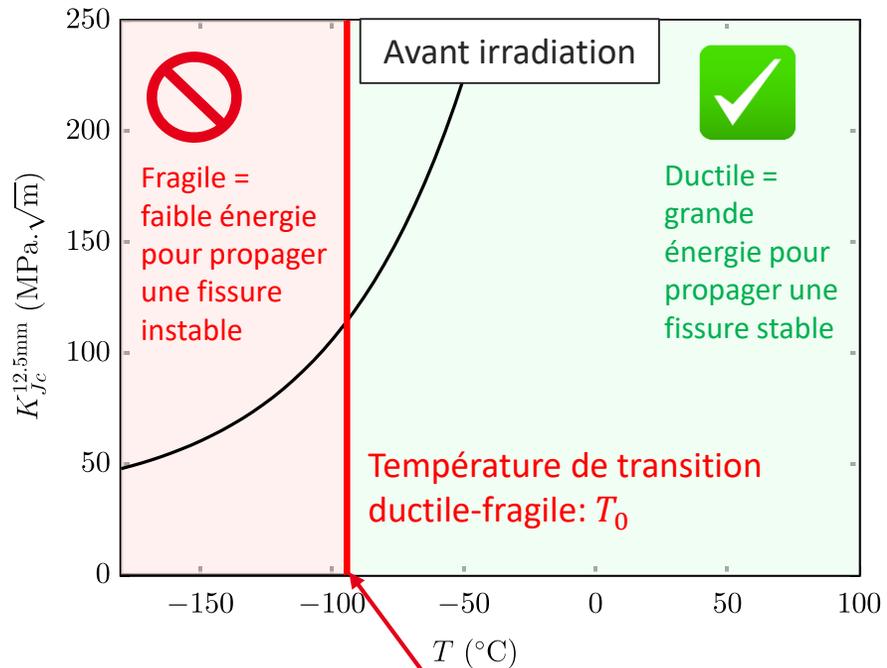
²Université Paris-Saclay, CEA, Service d'Etude des Matériaux Irradiés, Gif-sur-Yvette, France

³UCA, Clermont Auvergne INP, CNRS, Institut Pascal, 63000 Clermont-Ferrand, France

⁴UCA, Clermont Auvergne INP, CNRS, LIMOS, 63000 Clermont-Ferrand, France, France



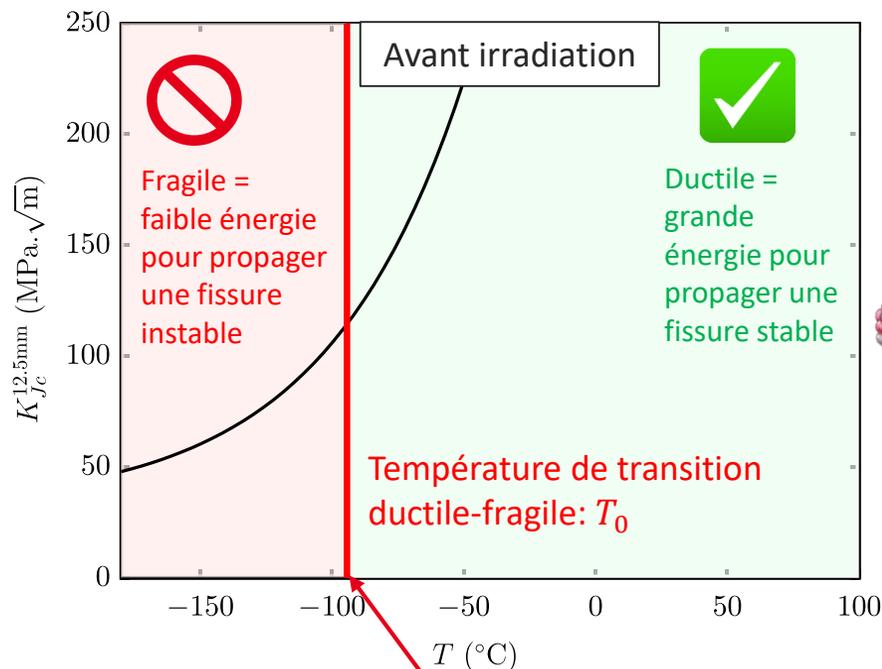
- La cuve d'un réacteur à eau sous pression est une structure critique de sûreté et irremplaçable dans une centrale nucléaire
- Nécessité de surveiller l'évolution du domaine fragile de l'acier de cuve pour prévenir le scénario de rupture instable et brutale (en cas de potentielles présences de fissures)



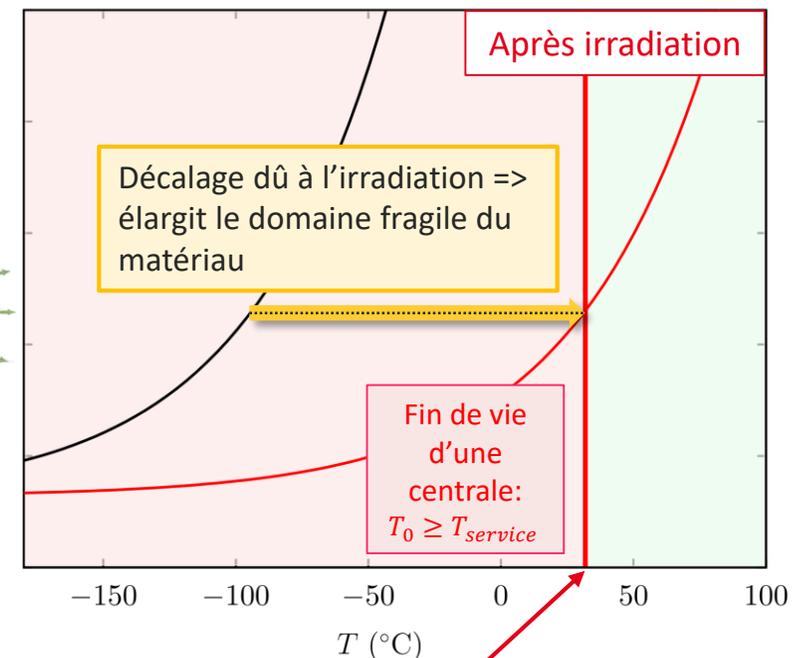
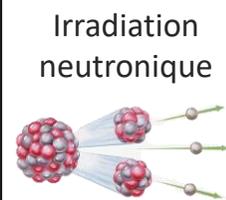
Acier de cuve non irradié: $T_0 \approx -93$ °C



- La cuve d'un réacteur à eau sous pression est une structure critique de sûreté et irremplaçable dans une centrale nucléaire
- Nécessité de surveiller l'évolution du domaine fragile de l'acier de cuve pour prévenir le scénario de rupture instable et brutale (en cas de potentielles présences de fissures)



Acier de cuve non irradié: $T_0 \approx -93$ °C



60 années d'acier irradié: $T_0 \approx 33$ °C [T. Petit, 2023]

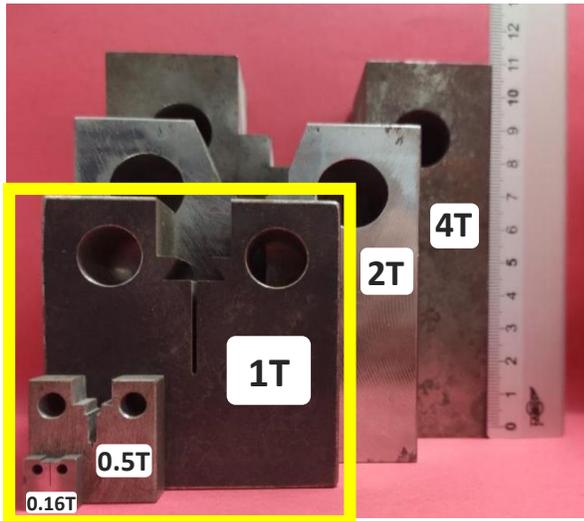
➤ Evaluer la température de transition ductile-fragile T_0 d'acier 16MND5



➤ Méthodologie de la Master Curve [ASTM E1921] :

- Modèle statistique décrivant la dispersion de la ténacité K_{Jc} en fonction de la température T à partir de la température de transition ductile-fragile T_0 uniquement
- Essais de ténacité sur des éprouvettes CT préfissurées d'acier de cuve, à une ou plusieurs températures T
- Géométries homothétiques:

Référence	1T	(25.4 mm)
Géométrie Réduite	0.5T	(12.5 mm)
Nouvelle mini-CT	0.16T	(4 mm)

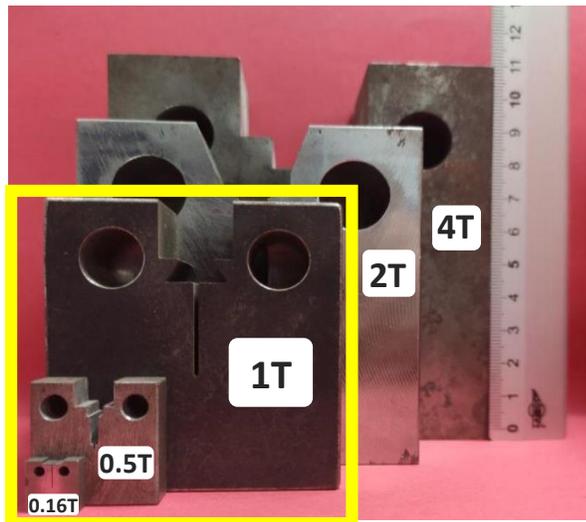




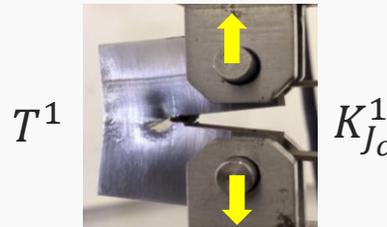
➤ Méthodologie de la Master Curve [ASTM E1921] :

- Modèle statistique décrivant la dispersion de la ténacité K_{Jc} en fonction de la température T à partir de la température de transition ductile-fragile T_0 uniquement
- Essais de ténacité sur des éprouvettes CT préfissurées d'acier de cuve, à une ou plusieurs températures T
- Géométries homothétiques:

Référence	1T	(25.4 mm)
Géométrie Réduite	0.5T	(12.5 mm)
Nouvelle mini-CT	0.16T	(4 mm)

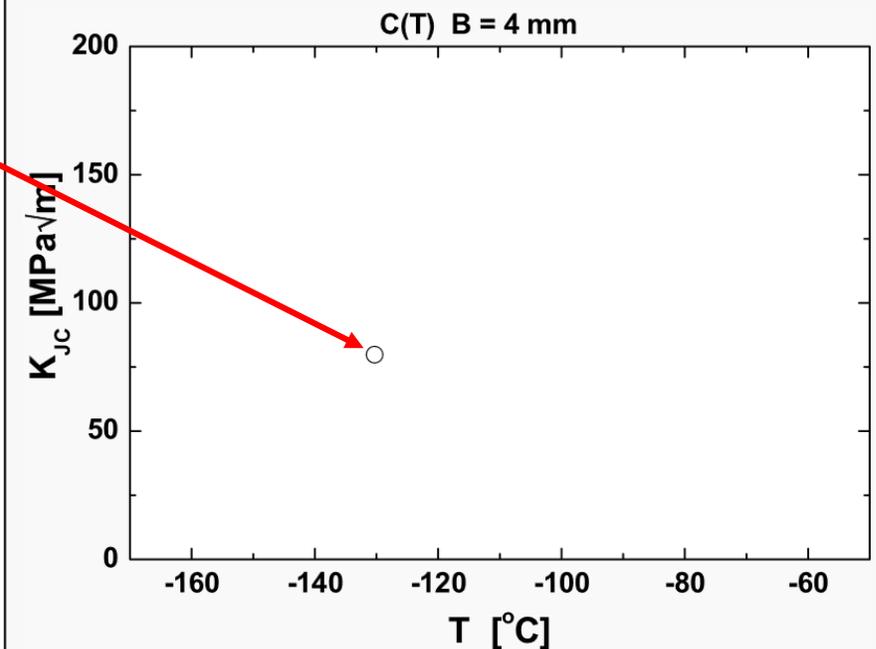


Campagne d'essais de ténacité



*1 essai de ténacité \approx 1 journée

Evaluation de T_0 par Master Curve

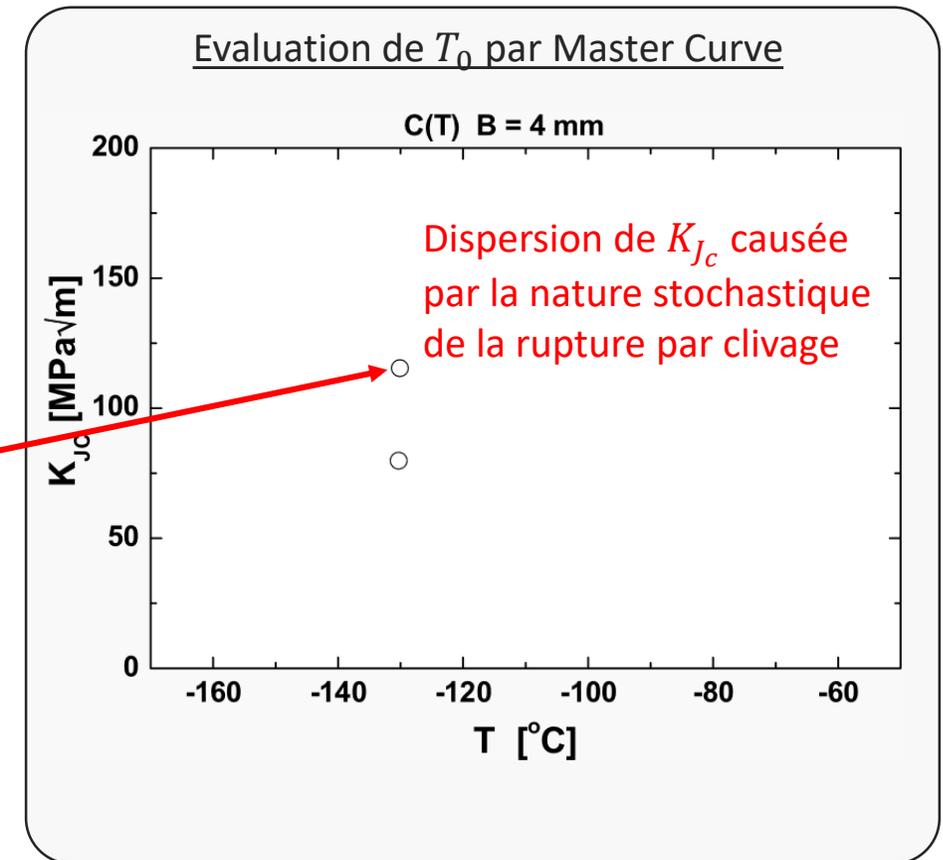
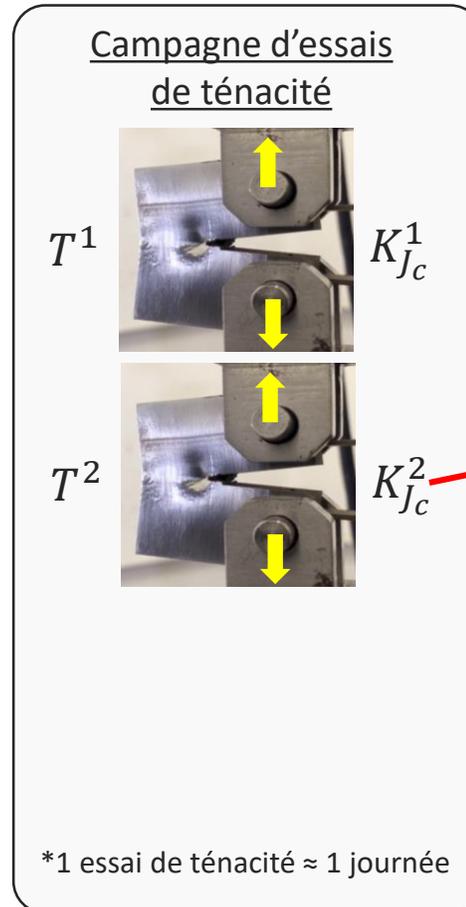
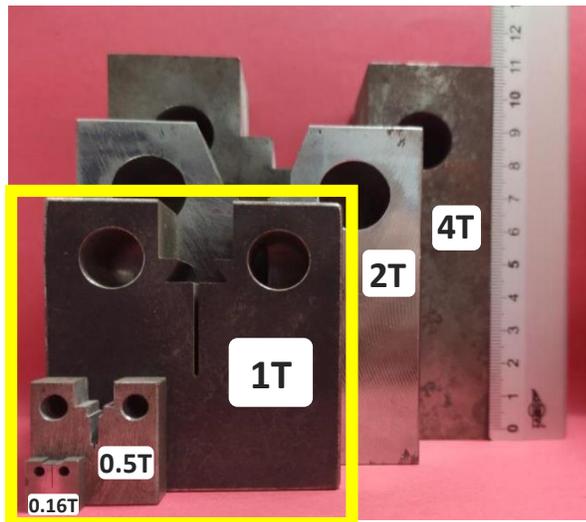




➤ Méthodologie de la Master Curve [ASTM E1921] :

- Modèle statistique décrivant la dispersion de la ténacité K_{Jc} en fonction de la température T à partir de la température de transition ductile-fragile T_0 uniquement
- Essais de ténacité sur des éprouvettes CT préfiessurées d'acier de cuve, à une ou plusieurs températures T
- Géométries homothétiques:

Référence	1T	(25.4 mm)
Géométrie Réduite	0.5T	(12.5 mm)
Nouvelle mini-CT	0.16T	(4 mm)

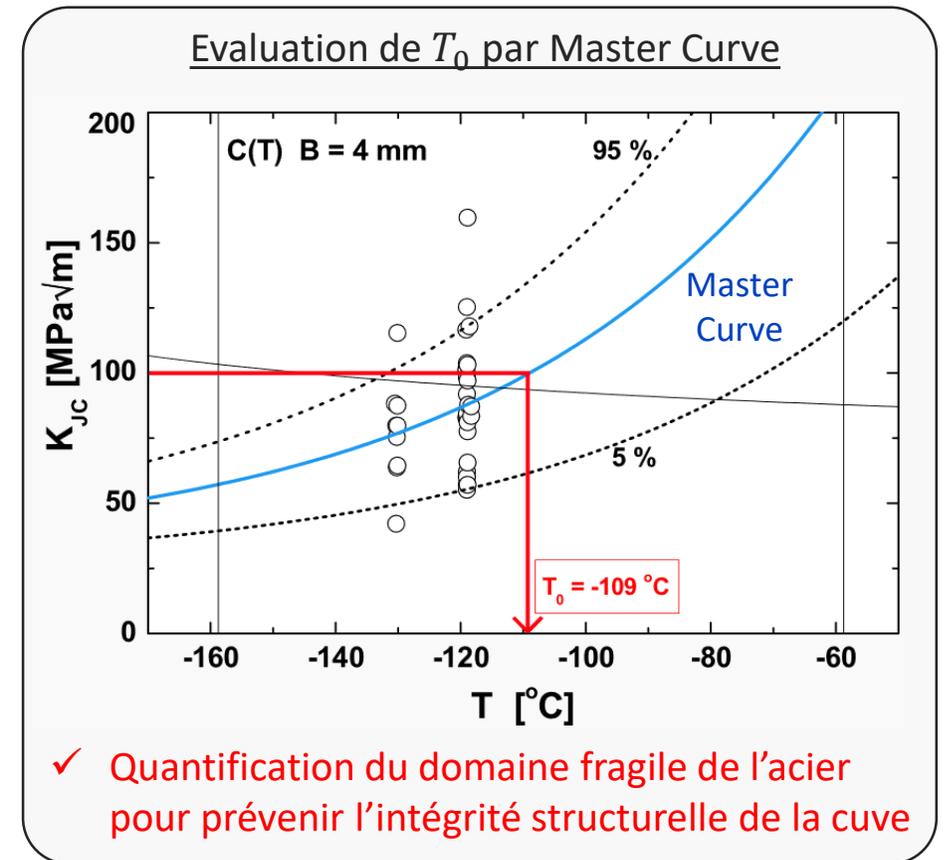
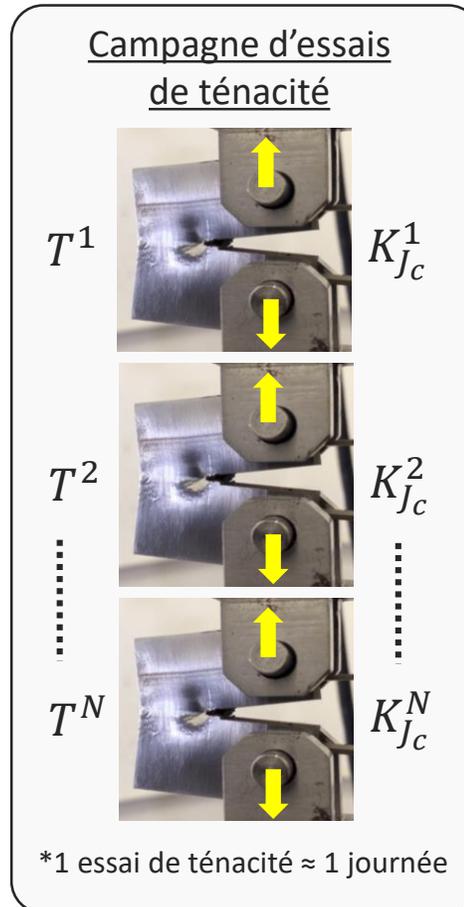
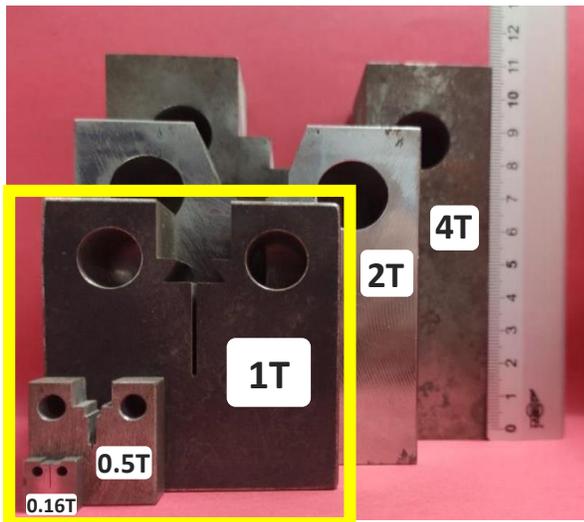




➤ Méthodologie de la Master Curve [ASTM E1921] :

- Modèle statistique décrivant la dispersion de la ténacité K_{Jc} en fonction de la température T à partir de la température de transition ductile-fragile T_0 uniquement
- Essais de ténacité sur des éprouvettes CT pré-fissurées d'acier de cuve, à une ou plusieurs températures T
- Géométries homothétiques:

Référence	1T	(25.4 mm)
Géométrie Réduite	0.5T	(12.5 mm)
Nouvelle mini-CT	0.16T	(4 mm)

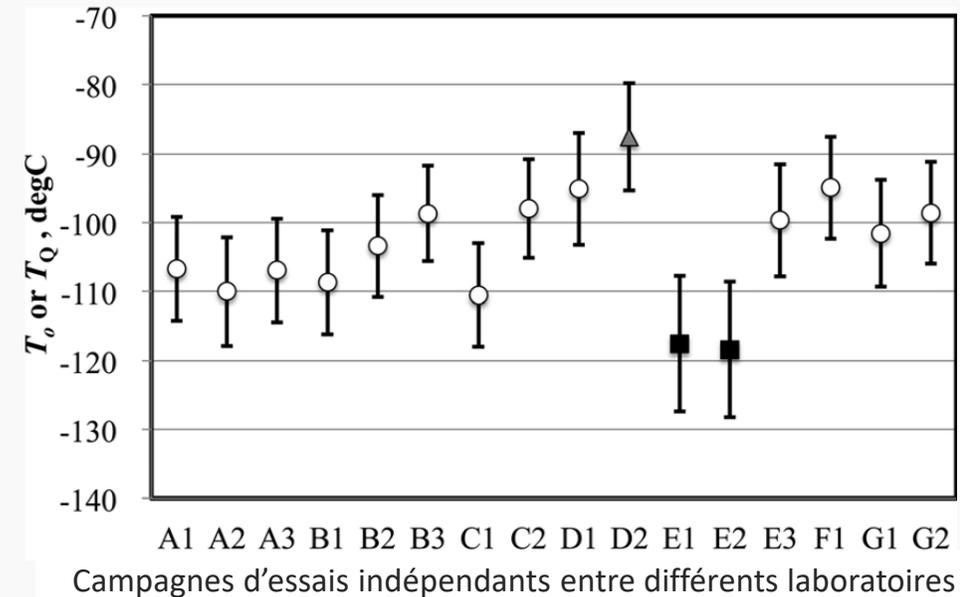




➤ Beaucoup de paramètres influent sur l'estimation de T_0 lors d'une campagne d'essais :

- Matrice expérimentale d'essai (pilotable) :
 - Taille d'éprouvette CT
 - Nombre d'échantillons disponibles (limité)
 - Température(s) d'essais
- Défauts de fabrications (incertitudes) :
 - Côtes géométriques d'usinage
 - Forme du front de préfissure par fatigue
- Autres sources d'hétérogénéités: propriétés intrinsèques matériau (durcissement, ségrégations, défauts, ...)

Valeurs de T_0 dispersées entre différentes campagnes d'essais



- **Comment quantifier indépendamment l'impact de ces paramètres pilotables et incertains sur T_0 ?**



Étape A: Spécification du problème

Variables d'entrées

Déterministes:

- Taille de l'éprouvette CT

Incertaines:

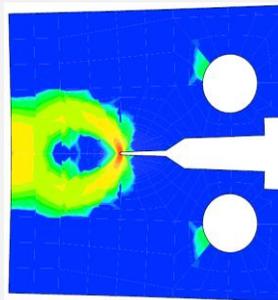
- Défauts d'usinage
- Forme de la préfissure

Pilotables:

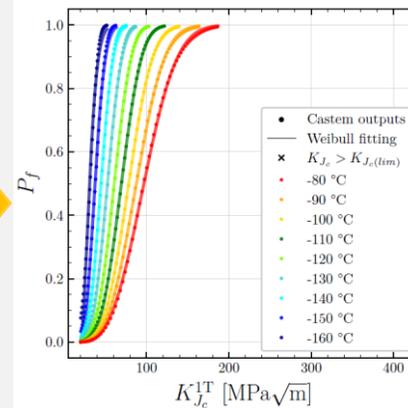
- Matrice de campagne expérimentale:
Nombre d'échantillons,
températures d'essais

Modèle numérique de campagnes d'essais de ténacité

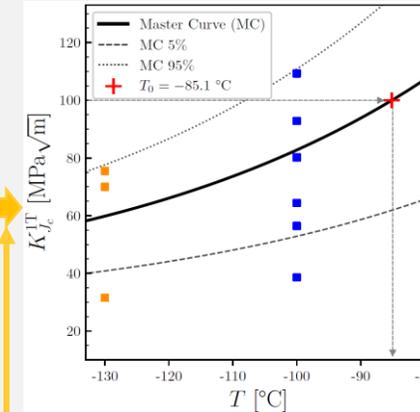
Essai de ténacité



Identification de la loi de Weibull de la ténacité



Génération de campagnes d'essais

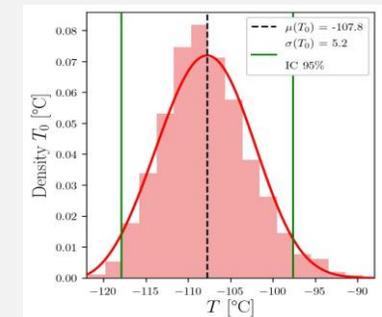


Variable d'intérêt

Température de transition ductile-fragile: T_0

Quantités d'intérêt

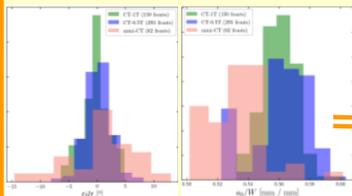
- Moyenne, variance
- Intervalles de confiance



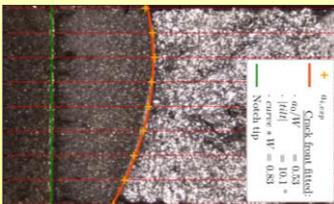


Étape B:
Quantification
des sources
d'incertitudes

Modélisation par des distributions de probabilités



Méthodes directes, statistiques



Étape A: Spécification du problème

Variables d'entrées

Déterministes:

- Taille de l'éprouvette CT

Incertaines:

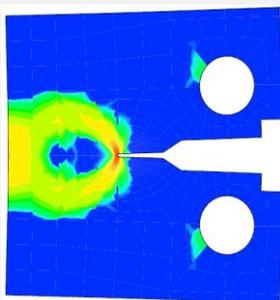
- Défauts d'usinage
- Forme de la préfissure

Pilotables:

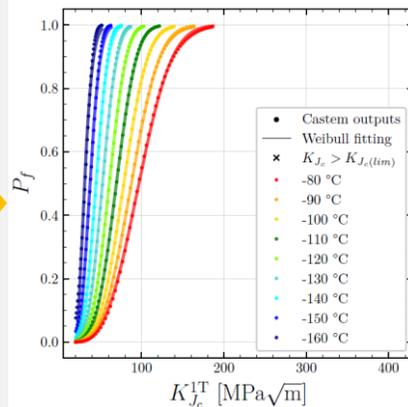
- Matrice de campagne expérimentale: Nombre d'échantillons, températures d'essais

Modèle numérique de campagnes d'essais de ténacité

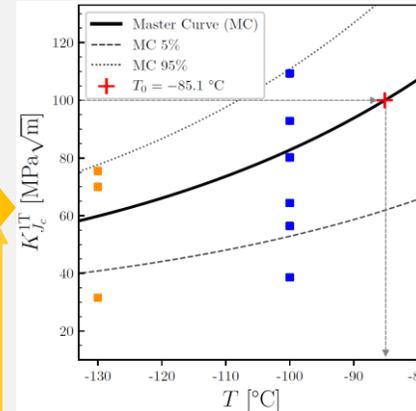
Essai de ténacité



Identification de la loi de Weibull de la ténacité



Génération de campagnes d'essais

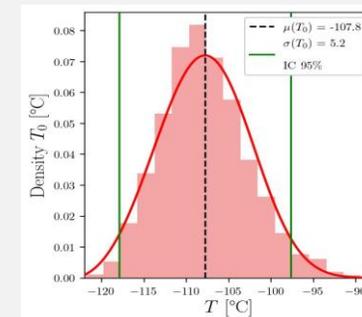


Variable d'intérêt

Température de transition ductile-fragile: T_0

Quantités d'intérêt

- Moyenne, variance
- Intervalles de confiance



Étape C' : Analyse de sensibilité

Étape B' : Calibration, Validation, Optimisation

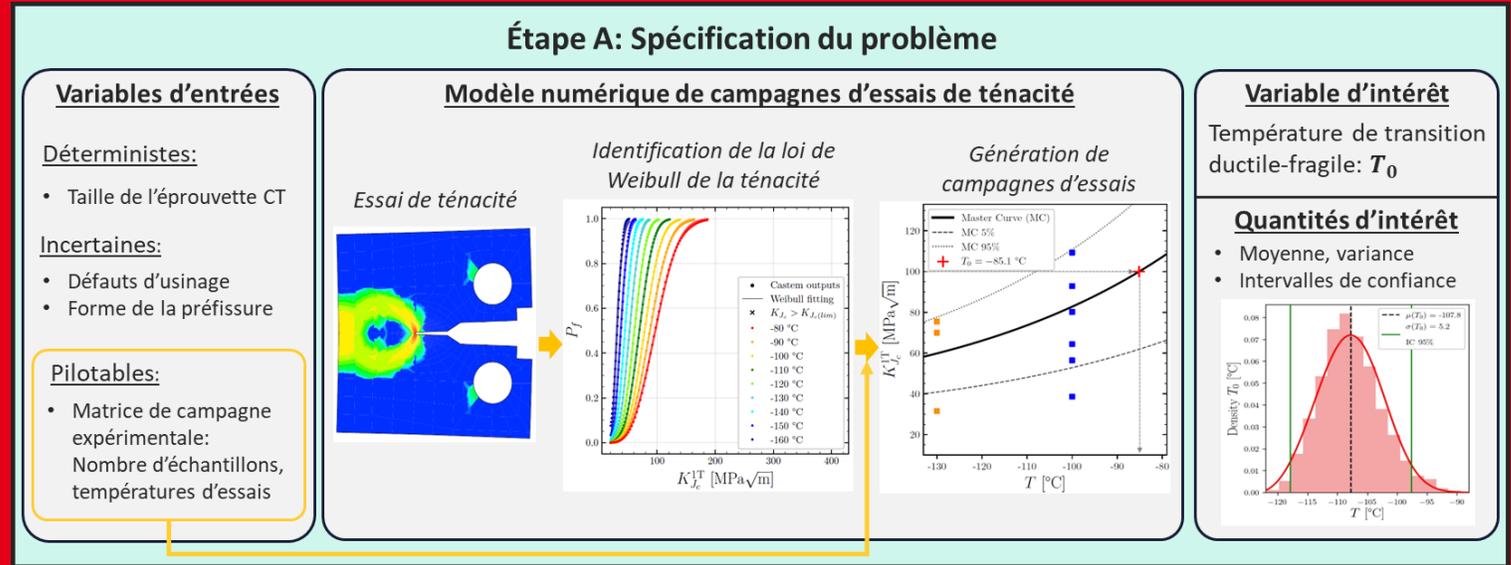
Quantification d'incertitude de la température de transition ductile-fragile T_0 d'acier de cuve de réacteur à partir d'essais de ténacités expérimentaux et numériques

1. Contexte

2. Modèle EF d'essais de ténacité

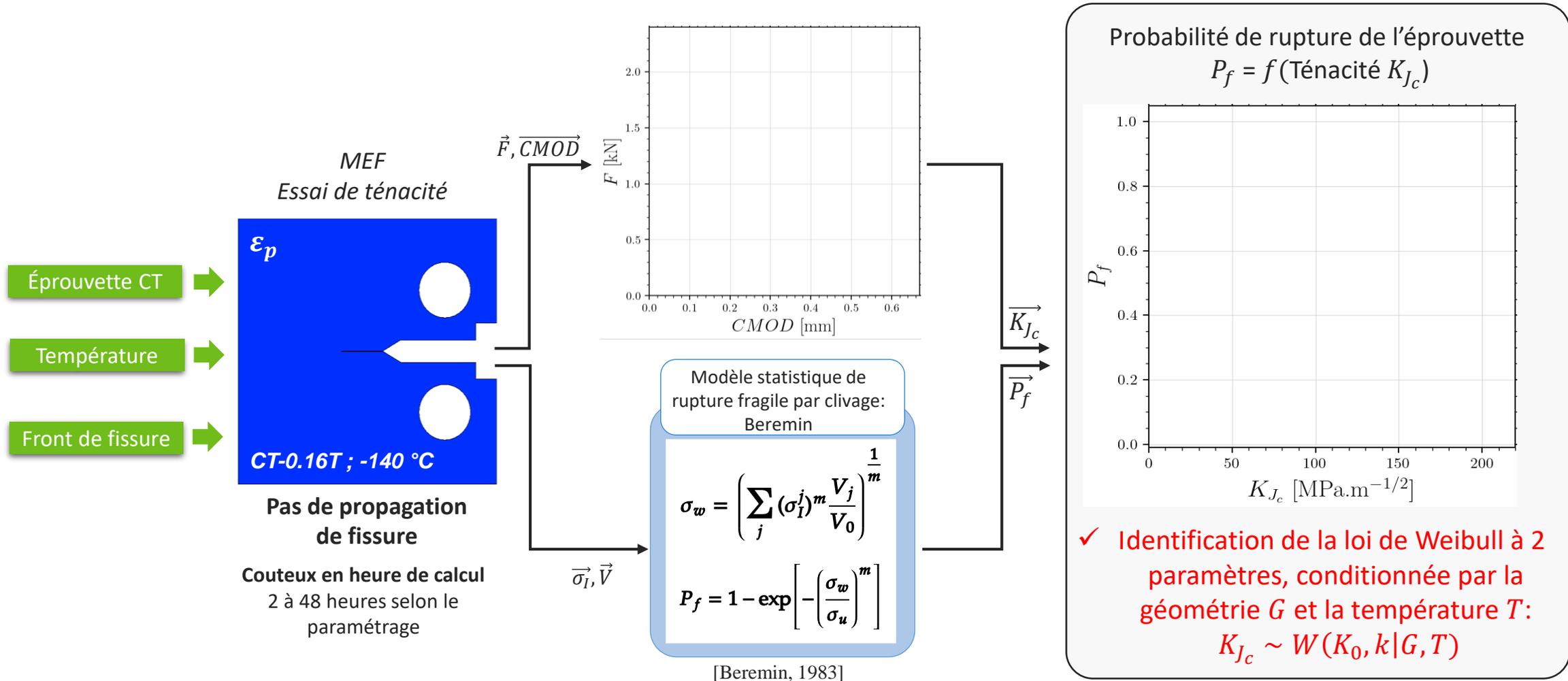
3. Analyses de sensibilité

4. Conclusion



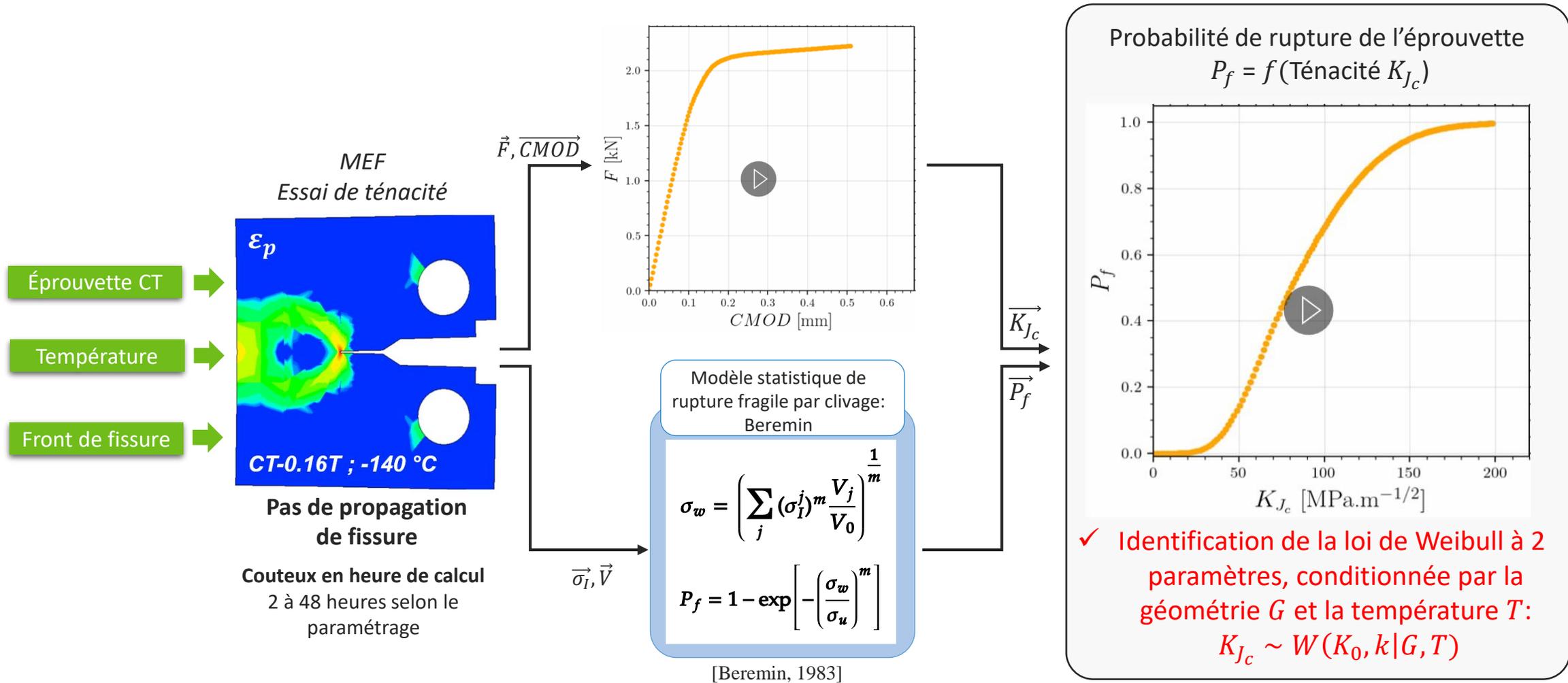


➤ Exemple d'un essai de ténacité numérique





➤ Exemple d'un essai de ténacité numérique

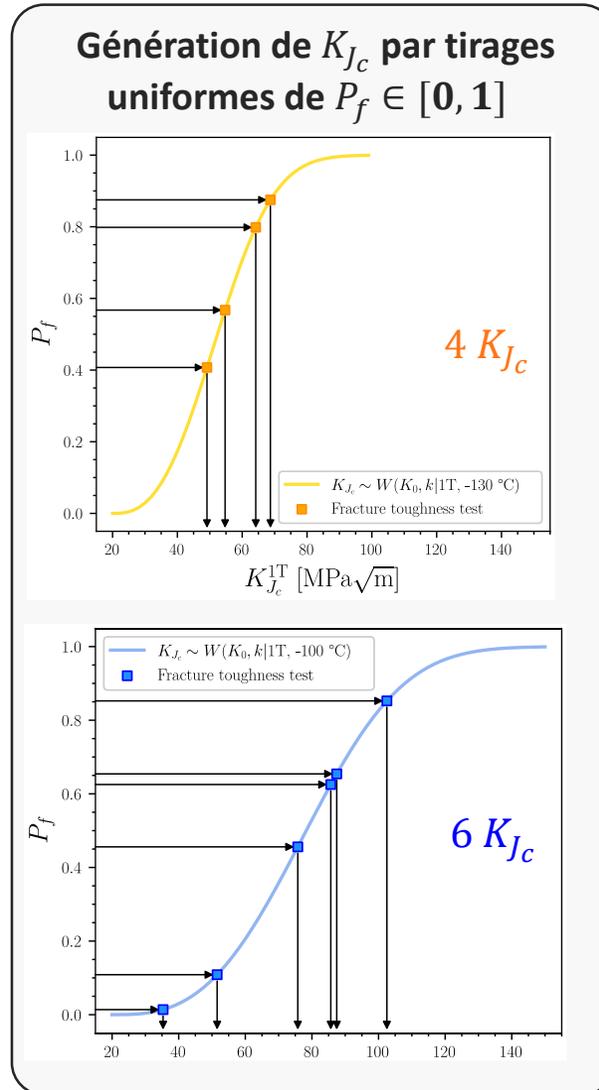




➤ Exemple d'une campagne numérique d'essais de ténacité

Variable d'entrée :
Matrice
expérimentale

$N_{essais} = 4$
CT-1T
 $T = -130\text{ °C}$



$N_{essais} = 6$
CT-1T
 $T = -100\text{ °C}$

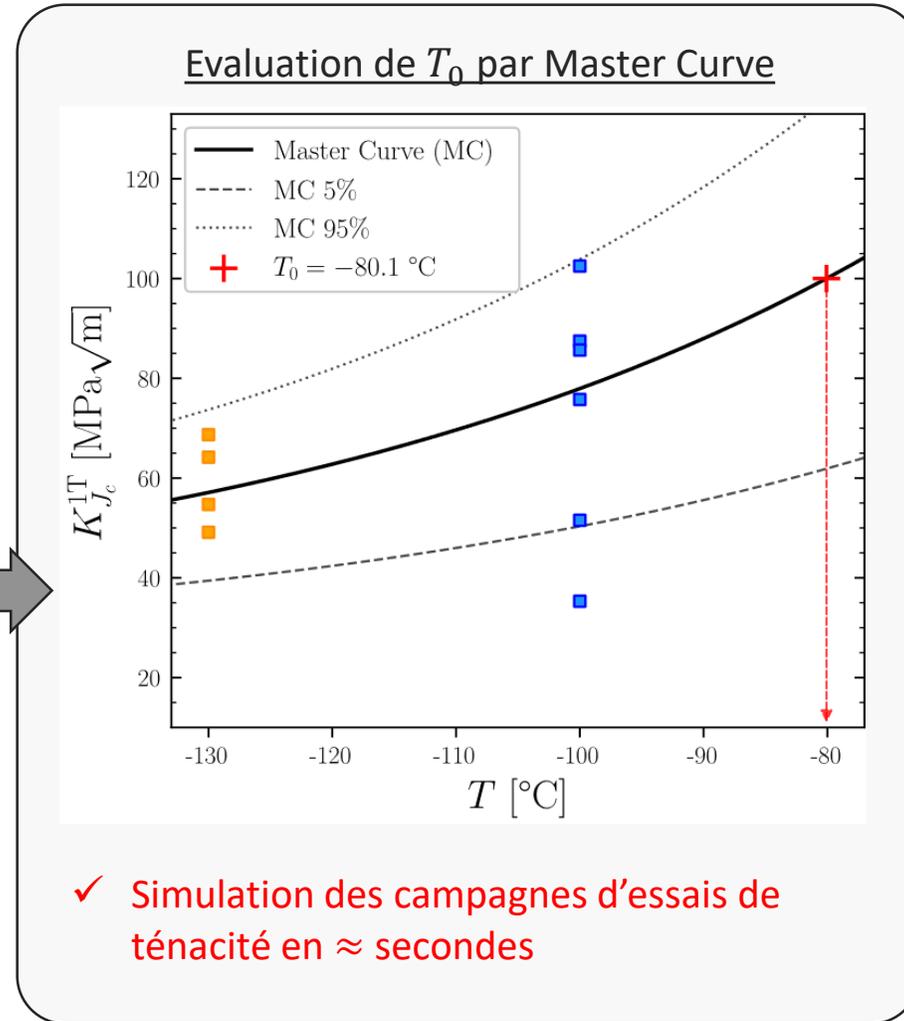
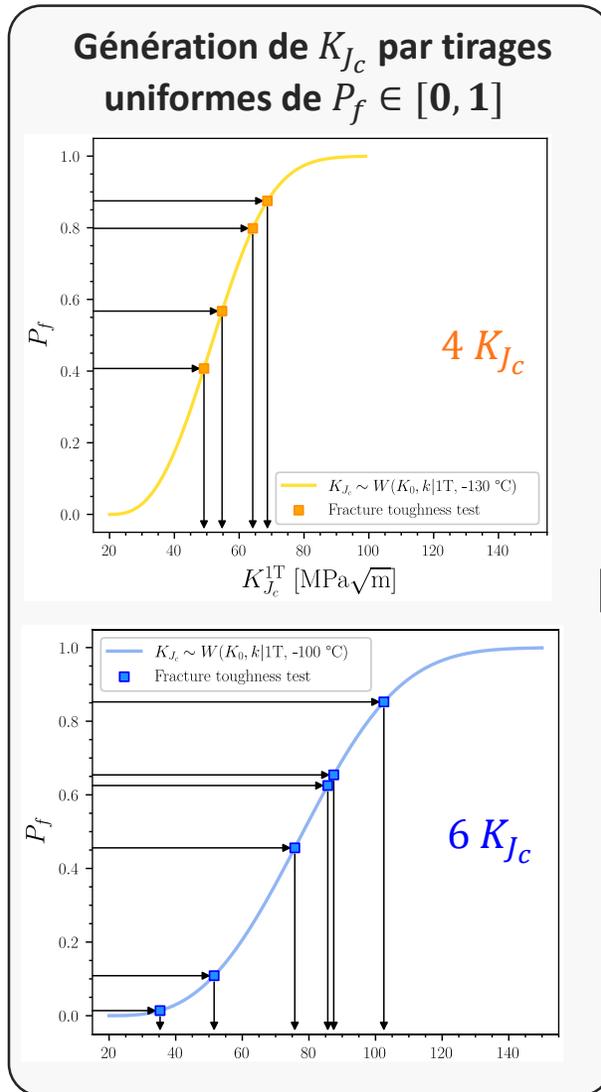




➤ Exemple d'une campagne numérique d'essais de ténacité

Variable d'entrée :
Matrice
expérimentale

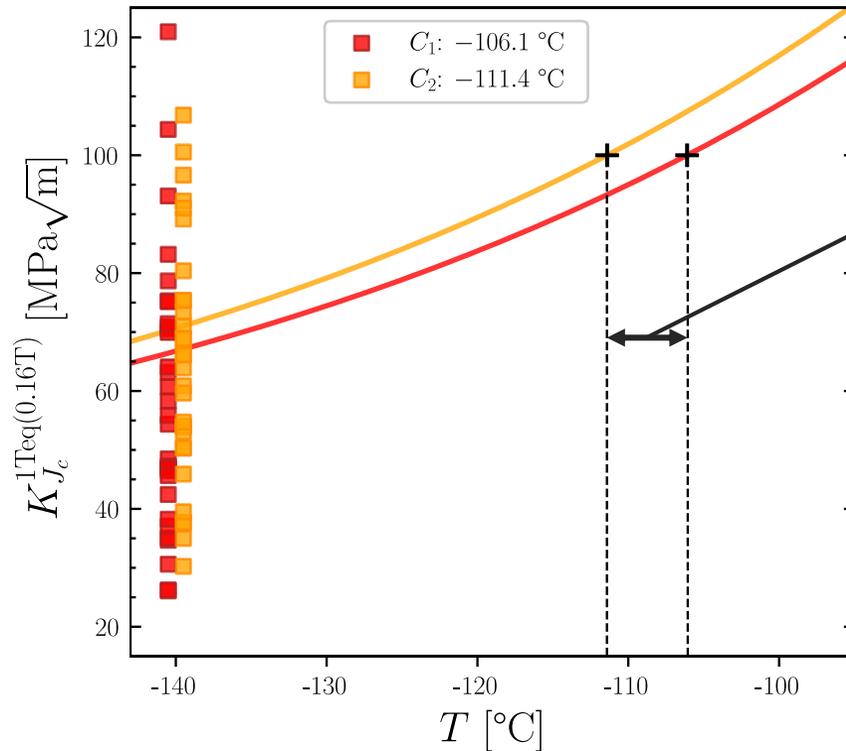
$N_{essais} = 4$
CT-1T
 $T = -130\text{ °C}$





➤ Méthodologie proposée pour quantifier les quantités d'intérêt de la variable T_0 :

- Matrice expérimentale d'essai: - Mini-CT (4 mm d'épaisseur)
 - 30 essais (nombre d'échantillons couramment disponibles en laboratoire)
 - Température = -140 °C

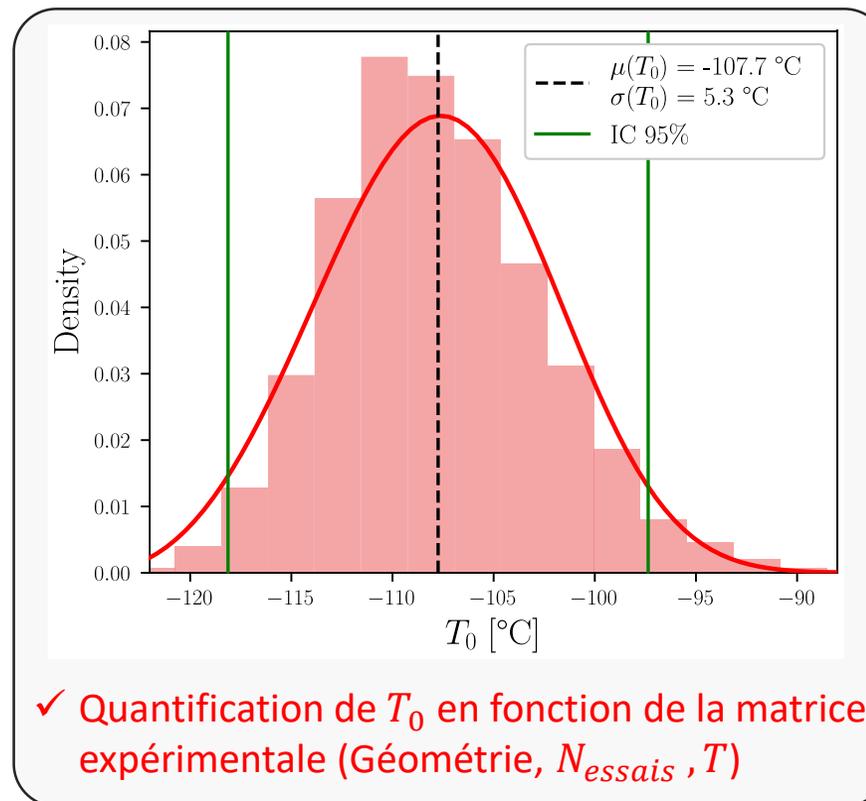


Différents T_0 liés par la dispersion des K_{Jc} entre les campagnes d'essais C_i



➤ Méthodologie proposée pour quantifier les quantités d'intérêt de la variable T_0 :

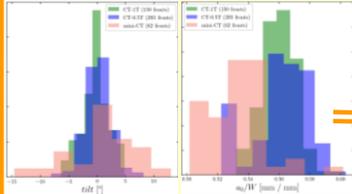
- Matrice expérimentale d'essai: - Mini-CT (4 mm d'épaisseur)
 - 30 essais (nombre d'échantillons couramment disponibles en laboratoire)
 - Température = -140 °C
- Simulation de 5000 campagnes d'essais indépendantes pour assurer la convergence de l'estimateur T_0



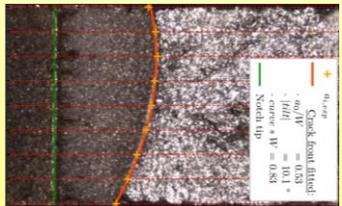


Étape B: Quantification des sources d'incertitudes

Modélisation par des distributions de probabilités



Méthodes directes, statistiques



Variables d'entrées

Déterministes:

- Taille de l'éprouvette CT

Incertaines:

- Défauts d'usinage
- Forme de la préfissure

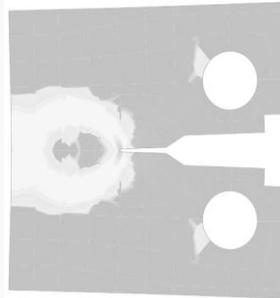
Pilotables:

- Matrice de campagne expérimentale: Nombre d'échantillons, températures d'essais

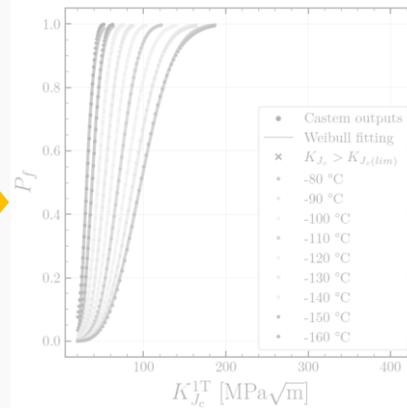
Étape A: Spécification du problème

Modèle numérique de campagnes d'essais de ténacité

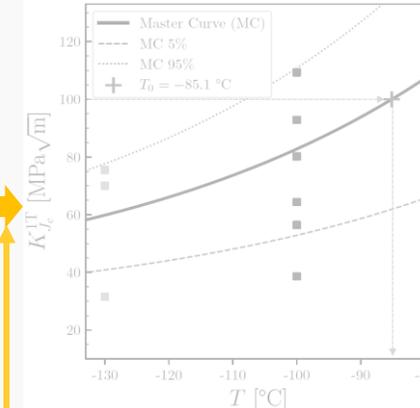
Essai de ténacité



Identification de la loi de Weibull de la ténacité



Génération de campagnes d'essais

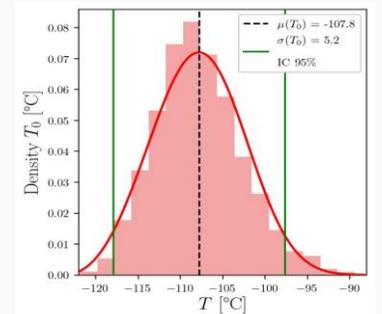


Variable d'intérêt

Température de transition ductile-fragile: T_0

Quantités d'intérêt

- Moyenne, variance
- Intervalles de confiance



Étape C' : Analyse de sensibilité

Étape B' : Calibration, Validation, Optimisation

Extrait et modifié à partir de De Rocquigny et al. (2008)

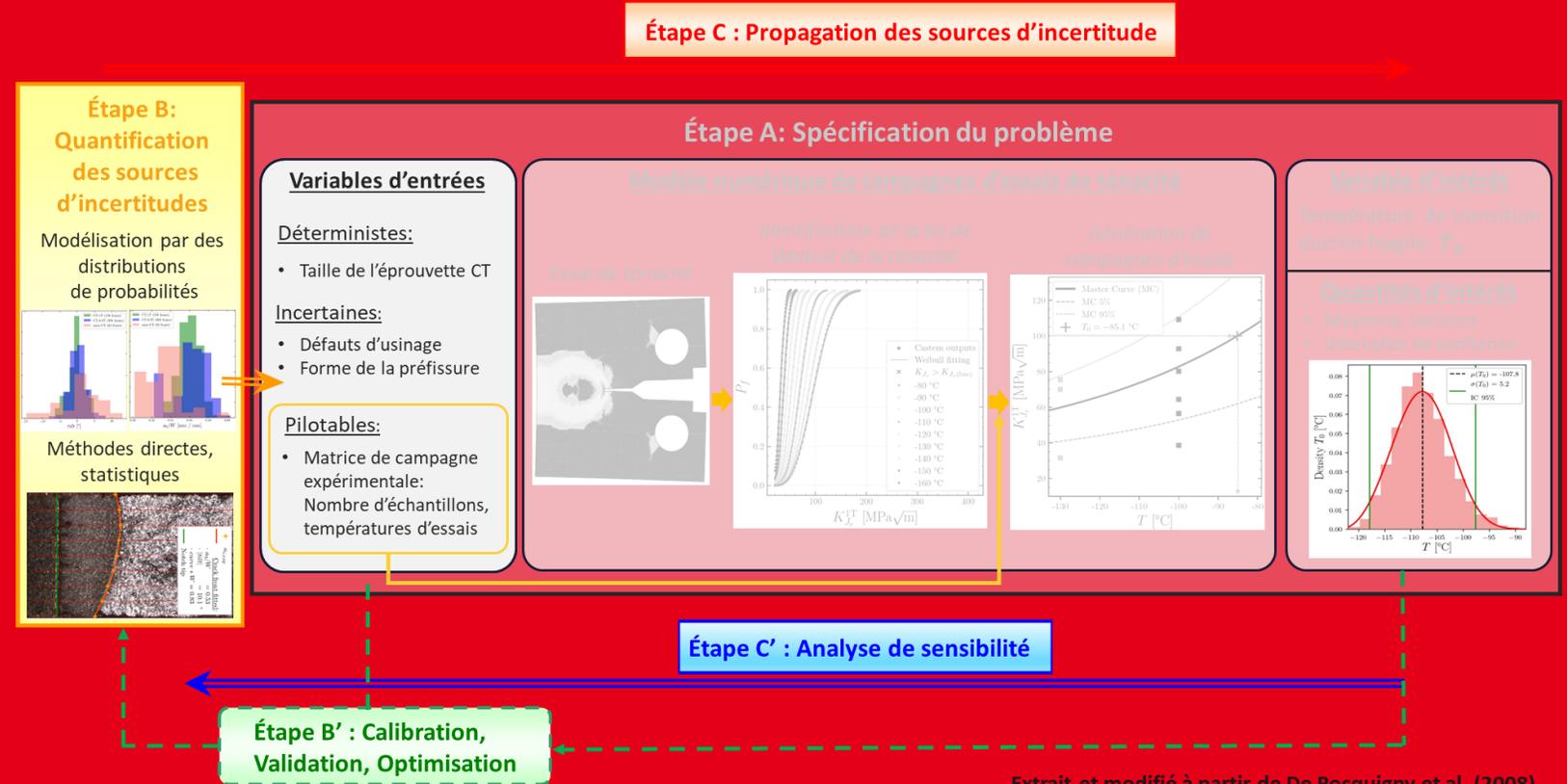
Quantification d'incertitude de la température de transition ductile-fragile T_0 d'acier de cuve de réacteur à partir d'essais de ténacités expérimentaux et numériques

1. Contexte

2. Modèle EF d'essais de ténacité

3. Analyses de sensibilité

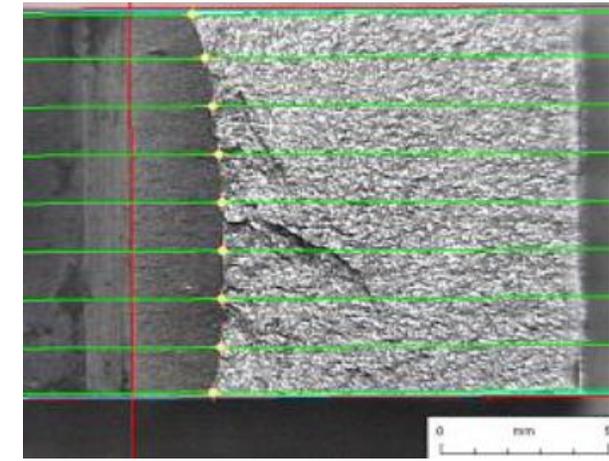
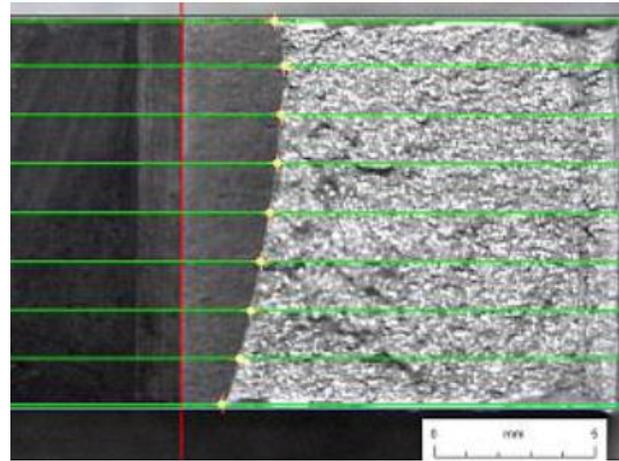
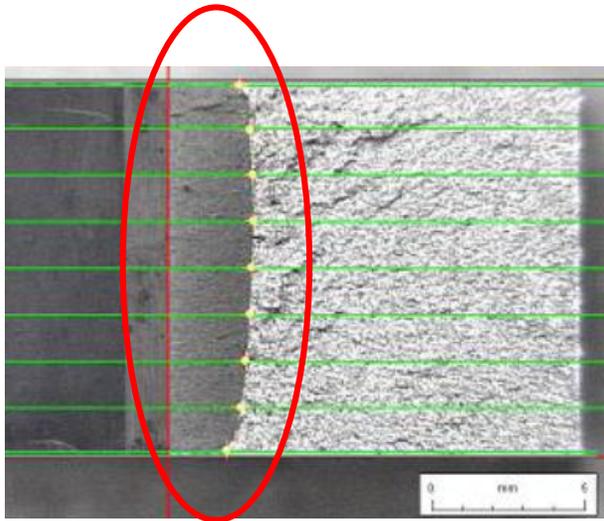
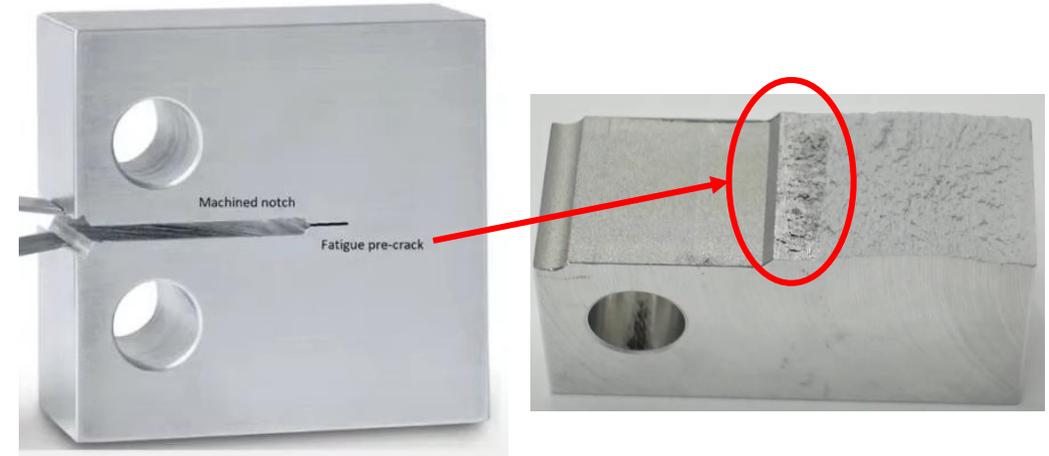
4. Conclusion





➤ Etude des formes des fronts de préfissure sur la valeur de T_0 :

- Les éprouvettes CT sont préfissurées par fatigue pour évaluer le facteur d'intensité de contrainte lorsqu'une fissure est déjà amorcée
- La préfissuration génère différentes formes de préfissures non-uniformes (aléatoire)





➤ Etude des formes des fronts de préfissure sur la valeur de T_0 :

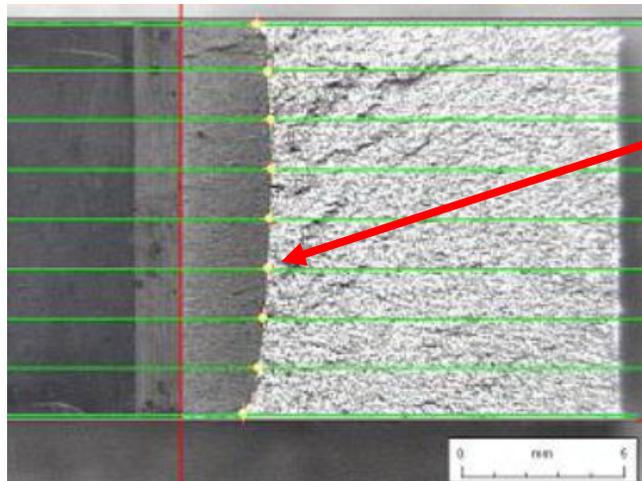
- Critère de tolérance sur la rectitude du front de préfissure imposée par la norme ASTM E19-21

$$\max|a_0 - a_i| \leq 0.1[(W - a_0)B]^{0.5} \quad \text{Avec } a_0 \text{ la longueur moyenne de préfissure et } a_i \text{ la longueur d'un des 9 points mesurés}$$

- Le critère peut-il être relâché ? Peut-on garder une proportion d'éprouvettes hors critère pour économiser de la matière ?

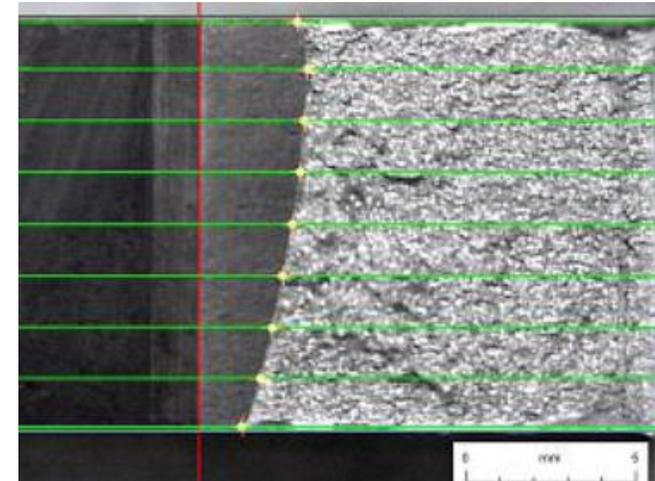
- 1) Définir une fonction paramétrée qui généralise les formes de front de préfissure
- 2) Quantifier les effets des formes sur la valeur estimée de T_0

✓ Critère du front valide



$a_{i=1} \sim 9$

∅ Critère du front invalide



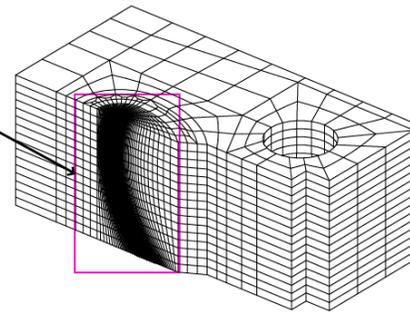
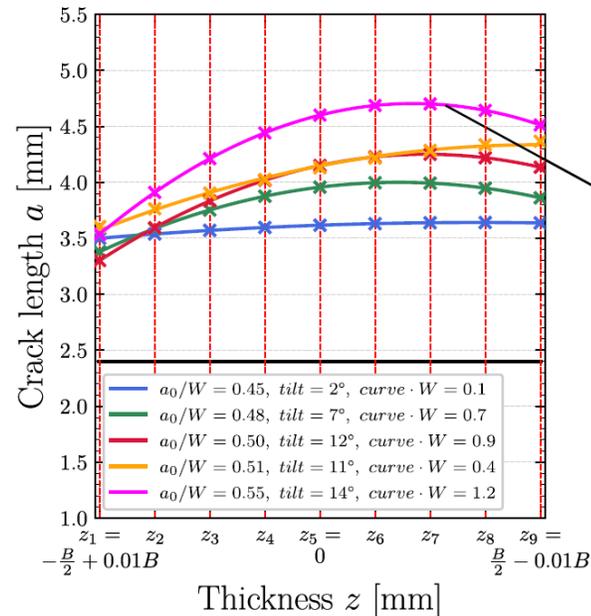


➤ Etude des formes des fronts de préfissure sur la valeur de T_0

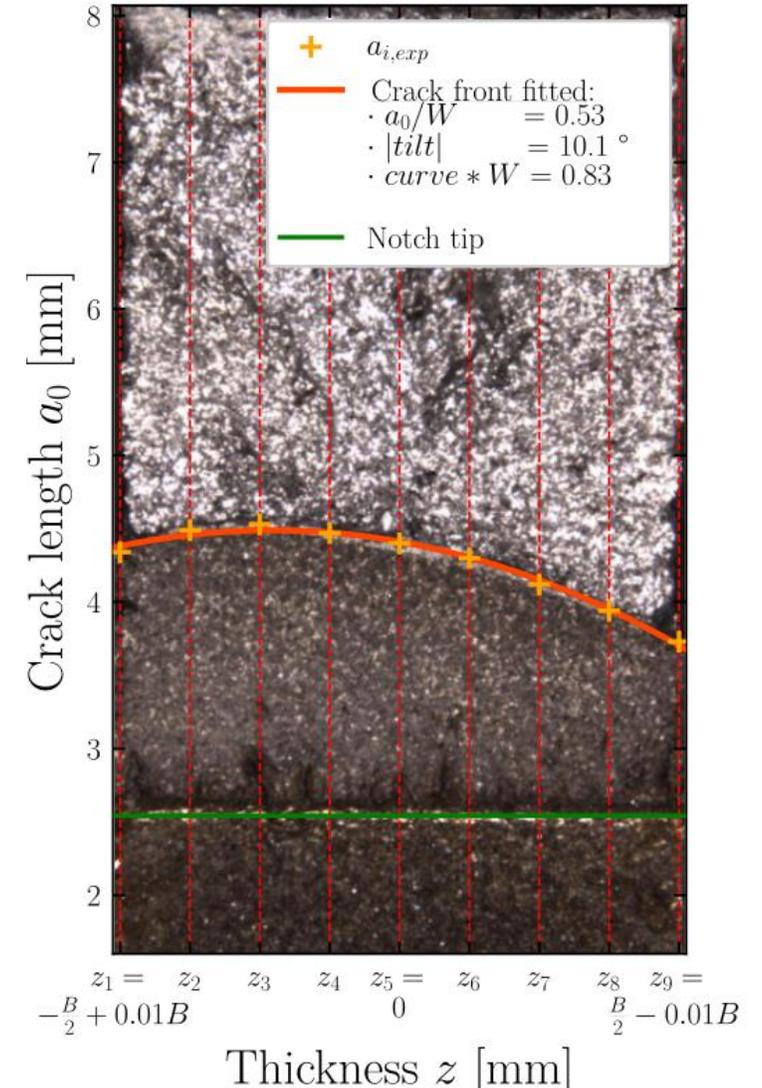
- Formule de front généralisé par 3 paramètres incertains $\theta = (a_0, \text{tilt}, \text{curve})$

$$a_\theta(z) = a_0 + \tan(\text{tilt}) \cdot z + \left(\frac{\text{curve}}{3}\right) \left(\frac{B}{2}\right)^2 - \text{curve} \cdot z^2 \quad \text{avec } z \in \left[-\frac{B}{2}, \frac{B}{2}\right]$$

- Générer des fronts de fissures aléatoires dans le modèle EF pour identifier l'impact de θ sur la valeur estimée de T_0
- Identifier θ par moindres carrés avec les données expérimentales a_i



- $a_0/W \sim U[0.45, 0.55]$
- $|\text{tilt}| \sim U[0, 14]^\circ$
- $\text{curve} \cdot W \sim U[0, 1.2]$



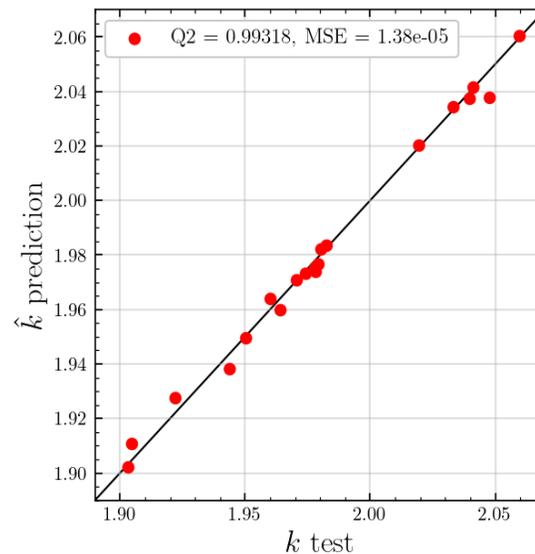
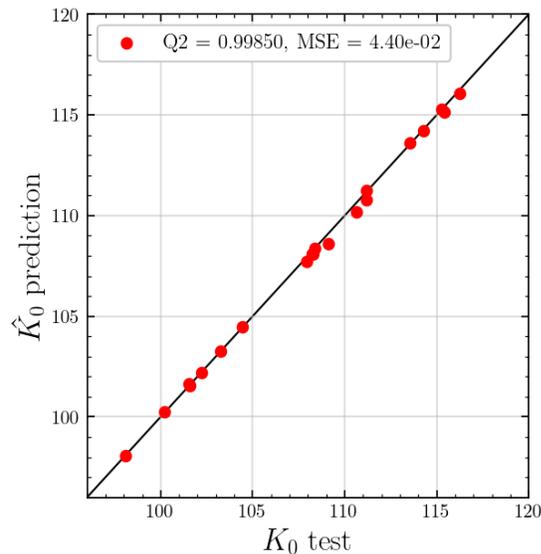


➤ Etude des formes des fronts de préfissure sur la valeur de T_0 :

- Simulations 3D trop coûteuses pour étudier l'ensemble des configurations \Rightarrow Recours à un métamodèle
- 2 Processus Gaussiens pour estimer les 2 paramètres de Weibull de K_{Jc} associés à la forme du front $\theta = (a_0, tilt, curve)$:

$$\begin{cases} \widehat{K}_0(\mathbf{x}) \sim GP_1(m_1(\mathbf{x}), ker_1(\mathbf{x}, \mathbf{x}')) \\ \widehat{k}(\mathbf{x}) \sim GP_2(m_2(\mathbf{x}), ker_2(\mathbf{x}, \mathbf{x}')) \end{cases} \text{ Avec } m_i \text{ fonction moyenne à tendance linéaire et } ker_i \text{ fonction de corrélation Matern5/2}$$

- 40 simulations d'entraînements planifiés par LHS maximin
- 20 simulations d'essais pour valider le modèle



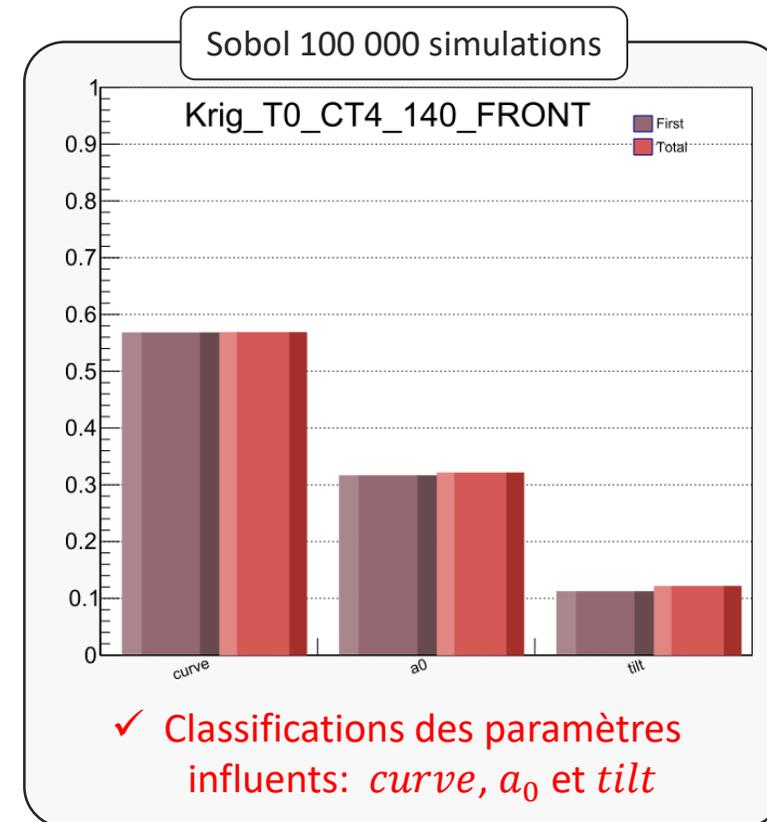
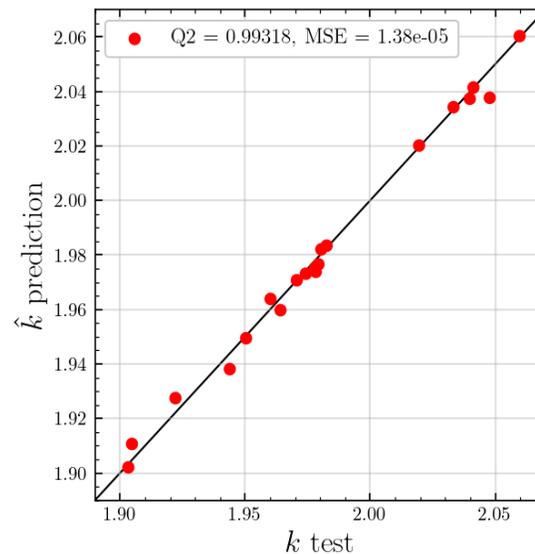
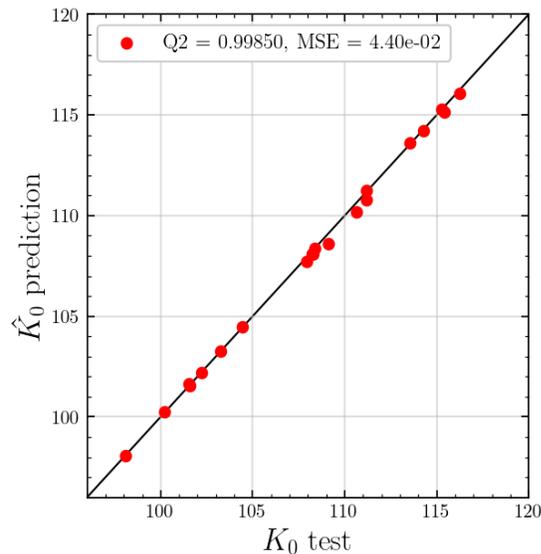


➤ Etude des formes des fronts de préfissure sur la valeur de T_0 :

- Simulations 3D trop coûteuses pour étudier l'ensemble des configurations \Rightarrow Recours à un métamodèle
- 2 Processus Gaussiens pour estimer les 2 paramètres de Weibull de K_{Jc} associés à la forme du front $\theta = (a_0, tilt, curve)$:

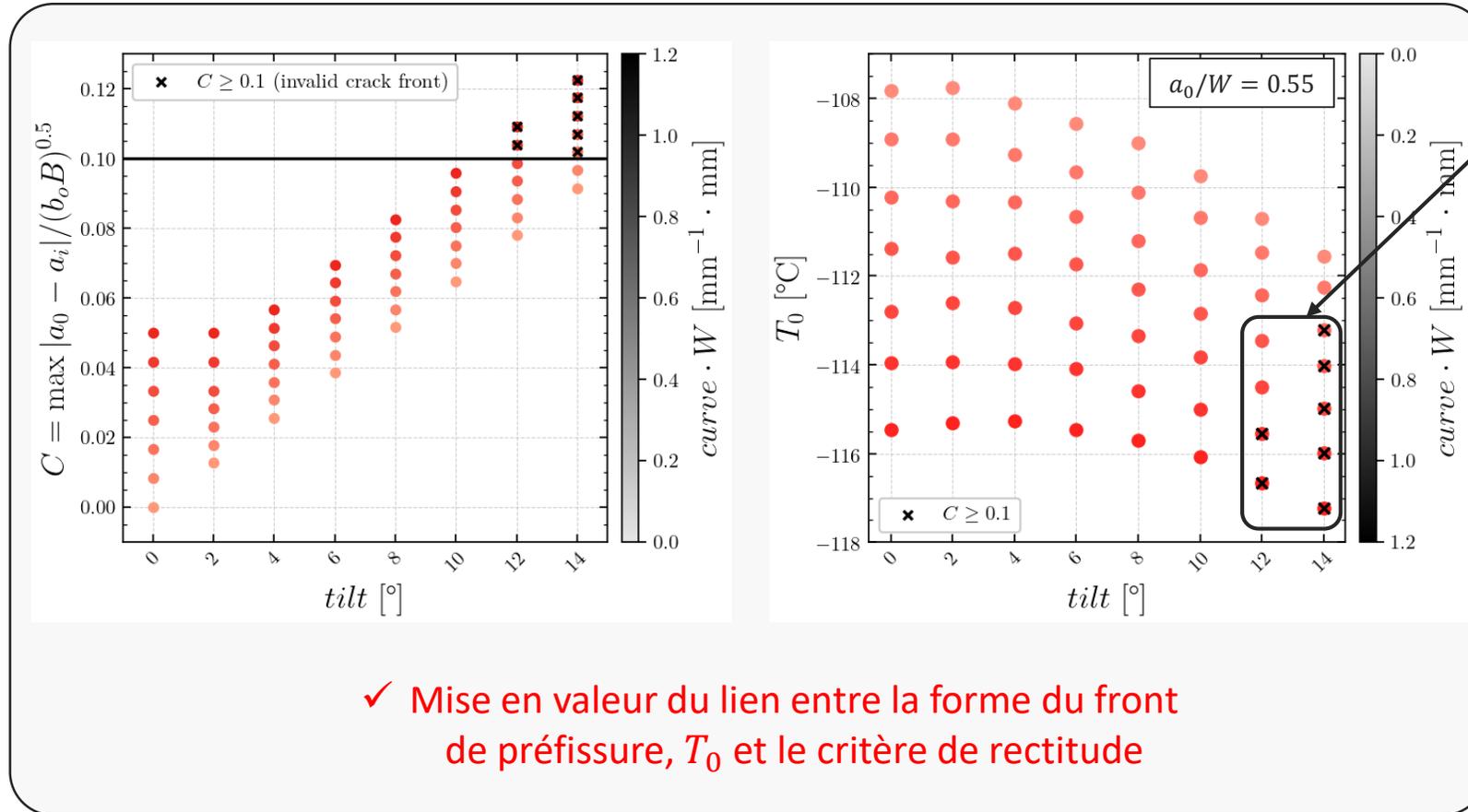
$$\begin{cases} \widehat{K}_0(\mathbf{x}) \sim GP_1(m_1(\mathbf{x}), ker_1(\mathbf{x}, \mathbf{x}')) \\ \widehat{k}(\mathbf{x}) \sim GP_2(m_2(\mathbf{x}), ker_2(\mathbf{x}, \mathbf{x}')) \end{cases} \text{ Avec } m_i \text{ fonction moyenne à tendance linéaire et } ker_i \text{ fonction de corrélation Matern5/2}$$

- 40 simulations d'entrainements planifiés par LHS maximin
- 20 simulations d'essais pour valider le modèle





➤ Etude des formes des fronts de préfissure sur la valeur de T_0 :

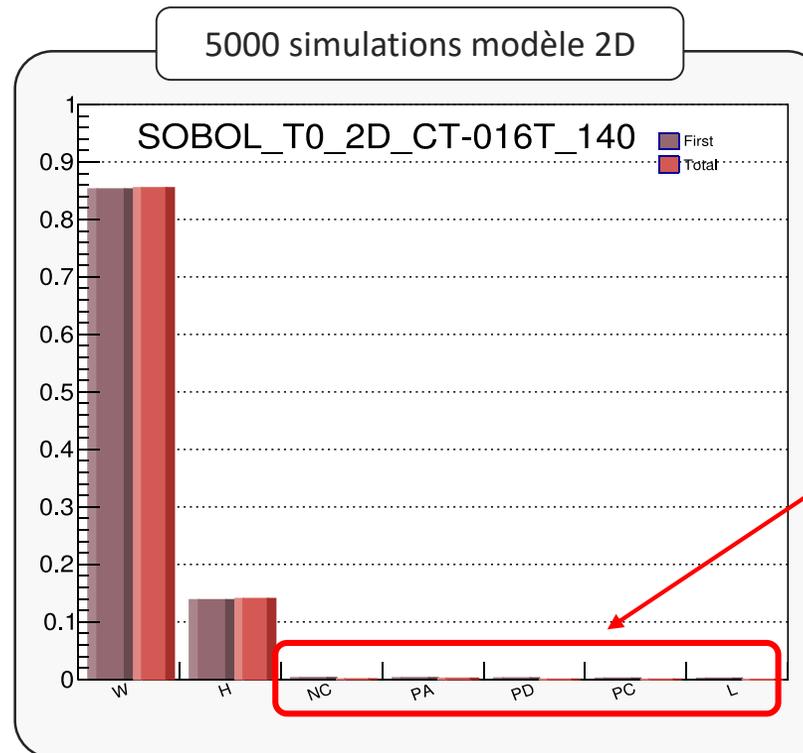
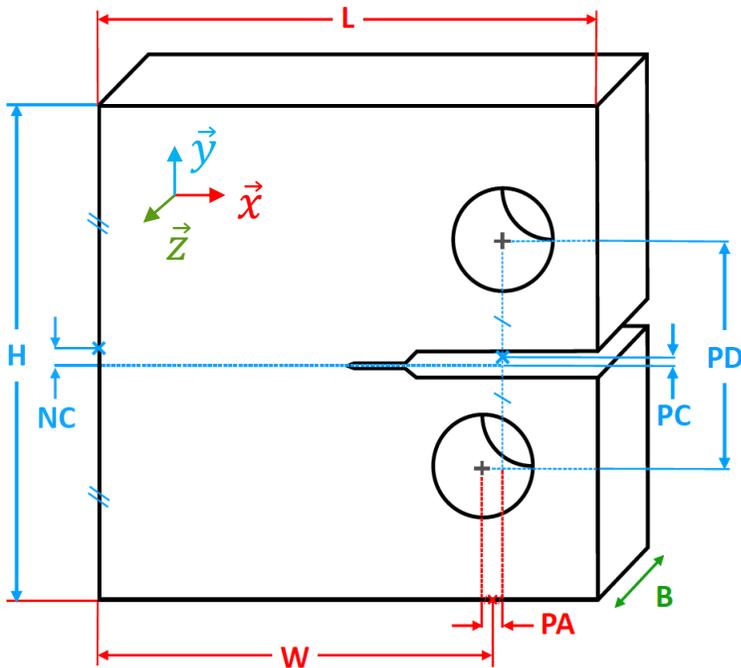


Certaines configurations invalides ont le même T_0 que des configurations valides:
Proposition de modification du critère



➤ Effet des défauts d'usinages sur T_0 :

- Intervalle de tolérance (IT) imposé par la norme sur toutes les dimensions : ± 0.1 mm (mini-CT)
 - ↳ Que faire des éprouvettes hors IT? L'IT est-elle trop restrictive ?
- 8 paramètres géométriques étudiés
- Défauts générés dans le modèle EF par loi uniforme jusqu'à $\pm 3 \cdot IT$ autour des valeurs nominales

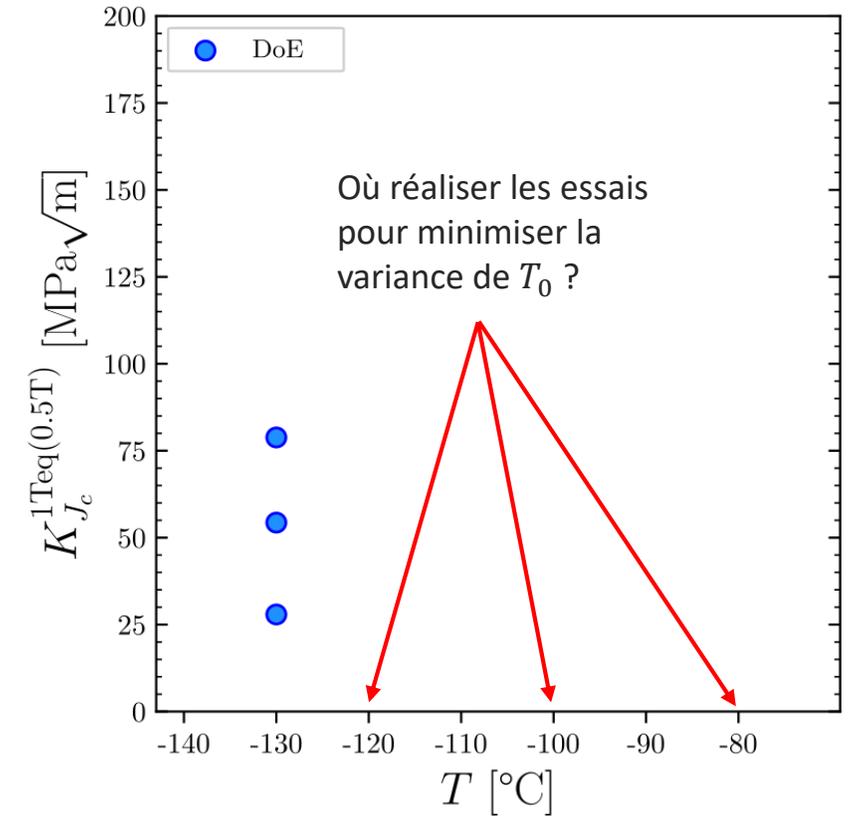


✓ 5 paramètres sans influence sur la variation de T_0 ⇒ relâchement de la norme sur ces géométries

PERSPECTIVES

Objectif : A partir d'un nombre d'échantillon fixé, développer un algorithme générant le plan d'expérience séquentiel optimal en température pour estimer T_0 avec le moins d'incertitudes

- Quelle température choisir à chaque essai afin d'optimiser la qualité de l'estimation de T_0 ?



PERSPECTIVES

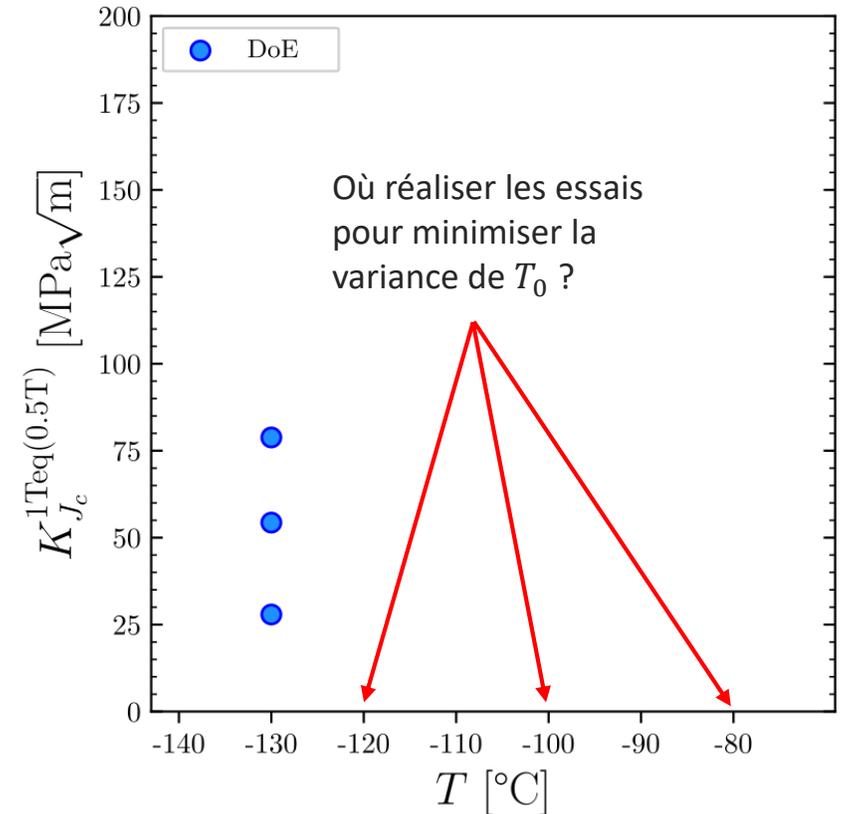
Objectif : A partir d'un nombre d'échantillon fixé, développer un algorithme générant le plan d'expérience séquentiel optimal en température pour estimer T_0 avec le moins d'incertitudes

- Quelle température choisir à chaque essai afin d'optimiser la qualité de l'estimation de T_0 ?

1^{ère} étude réalisée par EDF [Chu MAI, 2020] :

- Approche bayésienne actualisant la loi de distribution de T_0 par essai
- Utilisation de fonctions d'utilités pour estimer la température d'essai optimale (qualité d'estimation de T_0 + validité de l'essai par rapport aux critères de la norme)

↳ Méthodologie obtenue similaire à la stratégie actuelle proposée par la norme: choisir la température d'essai proche/ou idéalement supérieure à la valeur de T_0 mesuré à la fin de chaque essai

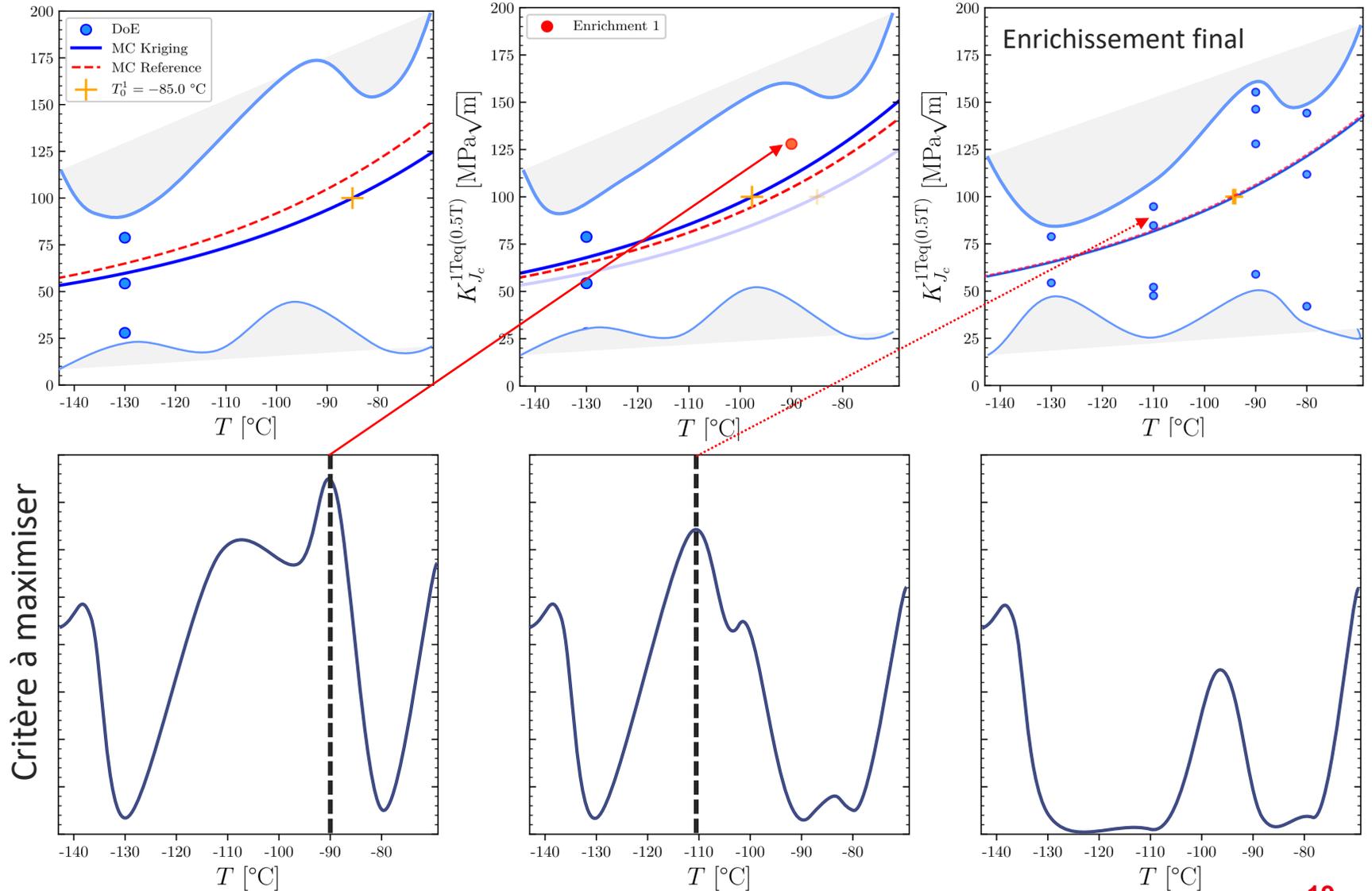


PERSPECTIVES

Schéma dessiné pour illustration d'idée

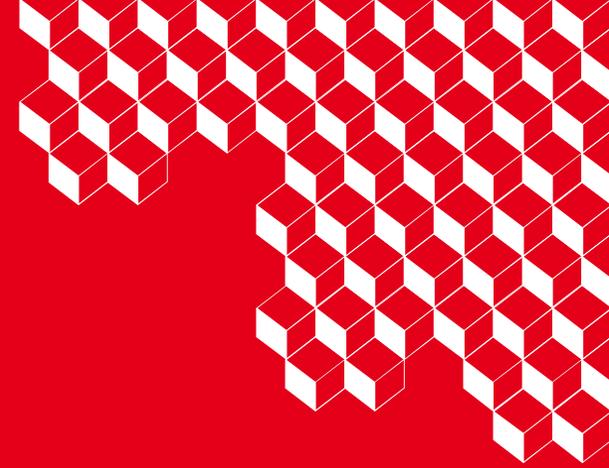
Stratégie de krigeage itératif

- Estimation de la Master Curve par Processus Gaussien non interpolant
- Critère d'amélioration pour estimer T_0
⇒ principe d'EGO





- Modèle par EF quantifiant la température de transition ductile-fragile T_0 représentative de l'acier 16MND5 non-irradié, en fonction de la matrice expérimentale d'essais
- Fourniture d'une formule analytique permettant aux expérimentateurs d'identifier les paramètres des fronts de préfissure et de quantifier son influence sur T_0
- Le critère de validité de la norme sur la rectitude du front ne semble pas universel: proposition de modification
- Identification de 5 paramètres géométriques sans influence sur la variation de T_0 permettant un relâchement de la norme sur ces derniers



Merci !
Avez-vous des questions?

Anthony Quintin

anthony.quintin@cea.fr

References

- K. Wallin, Irradiation damage effects on the fracture toughness transition curve shape for reactor pressure vessel steels, International Journal of Pressure Vessels and Piping, Volume 55, Issue 1, 1993,
- ASTM E1921-19a, Standard Test Method for Determination of Reference Temperature T₀ for Ferritic Steels in the Transition Range, 2019
- K. Wallin, Planman, T., Valo, M. and Rintamaa, R., (2004b), "Applicability of miniature size bend specimens to determine the Master Curve reference temperature T₀", VTT Manufacturing Technology, Finland
- K. Wallin, The scatter in K_{IC} results, Engineering Fracture Mechanics, Volume 19, Issue 6, 1984,
- K. Wallin, The size effect in K_{IC} results, Engineering Fracture Mechanics, Volume 22, Issue 1, 1985,
- Tobit et al, Fracture toughness evaluation of reactor pressure vessel steels by master curve method using miniature compact tension specimens, 2015, Journal of Pressure Vessel Technology}
- F.M. Beremin, A local criterion for cleavage fracture of a nuclear pressure vessel steel Metallurgical Transactions, 1983
- W. Weibull, A Statistical Distribution Function of Wide Applicability, volume 73, Journal of Applied Mechanics, 1951
- R.M. McMeeking, Finite deformation analysis of crack-tip opening in elastic-plastic materials and implications for fracture, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Volume 25, Issue 5, 1977
- B. Iooss, A Review on Global Sensitivity Analysis Methods, Uncertainty Management in Simulation-Optimization of Complex Systems: Algorithms and Applications", Springer, 2015
- S. Lindqvist, J. Kuutti, Sensitivity of the Master Curve reference temperature T₀ to the crack front curvature, Theoretical and Applied Fracture Mechanics, Volume 122, 2022,

Algorithm 1: Evaluation of T_0 by random sampling with multi-T.

Data: N_{sample} ; \mathbf{T} ; $N_{sample/T}$

for j in \mathbf{T} **do**

$$\mathbf{P}_f = [P_f^1, \dots, P_f^{N_{sample/T}}] \sim U[0.01; 0.99]$$

$$K_{J_c} = K_{min} + (K_{0_j} - K_{min}) [-\ln(1 - \mathbf{P}_f)]^{\frac{1}{k_j}}$$

for $u = 1 : N_{sample/T}$ **do**

if $K_{J_c}^u \geq K_{J_c(lim)}$ **then**

$$| \quad K_{J_c}^u = K_{J_c(lim)} \text{ (10.2.2 Data Censoring);}$$

end

$$\delta = [\delta_1, \dots, \delta_u], \text{ where } \delta_u = \begin{cases} 0, & \text{if } K_{J_c}^u \text{ is a censored value} \\ 1, & \text{otherwise} \end{cases}$$

end

$$K_{J_c}^{1T(eq)} = 20 + (K_{J_c} - 20) \left(\frac{B^{CT}}{B^{1T}} \right)^{\frac{1}{4}} \text{ (10.2.3 Size Correction of } K_{J_c} \text{ Data)}$$

end

Solve : Iterative procedure (10.2.4 Calculation of Provisional T_0) :

$$\sum_{i=1}^{N_{sample}} \delta_i \frac{\exp[0.019(T_i - T_0)]}{11 + 77 \exp[0.019(T_i - T_0)]} - \sum_{i=1}^{N_{sample}} \frac{(K_{J_c}^{1T(eq)} - 20)^4 \exp[0.019(T_i - T_0)]}{(11 + 77 \exp[0.019(T_i - T_0)])^5} = 0$$

Result: T_0

if $T_0 \in [T_i \pm 50^\circ C]$ **then**

 | T_0 valid

end

