

# MESURER LES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES & LA DURÉE DE VIE RÉSIDUELLE DES ÉQUIPEMENTS EN SERVICE

Une solution quasi-non-destructive de caractérisation des matériaux qui donne une seconde vie aux structures



Laurent Ponson  
Fondateur de Tortoise  
& chercheur CNRS à  
Sorbonne Université



# MAÎTRISER & PRÉVENIR LA RUPTURE

*DES OUTILS NUMÉRIQUES PUISSANTS, MAIS DES  
DONNÉES D'ENTRÉE SOUVENT MAL MAÎTRISÉES*

Les modèles numériques visant à s'assurer de la fiabilité et de la durabilité des structures nécessitent la connaissance:

- ✓ des **propriétés mécaniques résiduelles** des matériaux utilisés en service
- ✓ Les **sollicitations réelles** auxquelles ils sont soumises

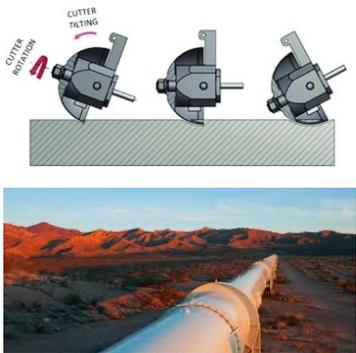
Or, les techniques actuelles de caractérisation sont destructives et ne fournissent aucune information sur les sollicitations.

- **Des avaries en service trop fréquentes**
- **Des installations remplacées trop tôt**
- **Un manque de maîtrise de la fiabilité et de la durabilité des matériaux & des structures**

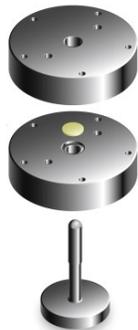


# NOTRE SOLUTION: UN CHECK-UP MÉCANIQUE PAR MICRO-ÉCHANTILLONNAGE & FRACTOGRAPHIE

Micro-échantillonnage  
de la structure  
( $\approx \text{mm}^3$ )



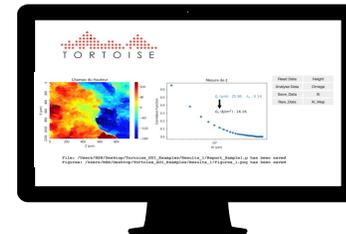
Emboutissage du  
micro-échantillon



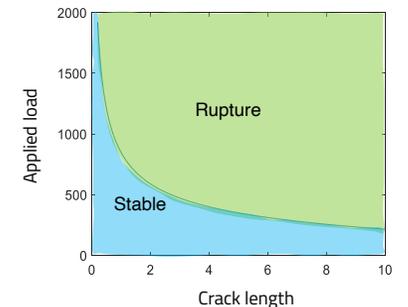
Acquisition du relevé  
topographique de la  
surface de rupture



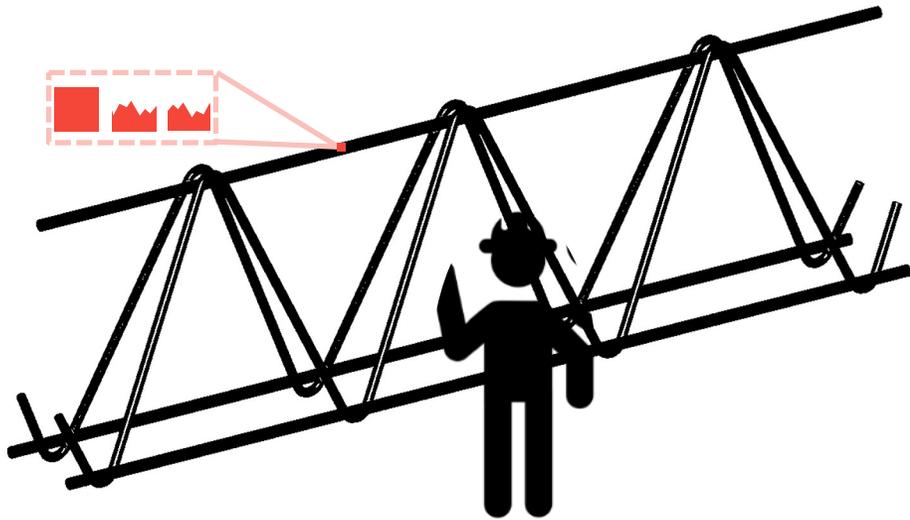
Post processing  
par fractographie  
statistique



Interprétation des  
données & prédiction de  
la durée de vie résiduelle



# BIOPSIE MÉCANIQUE



*Mesurées par micro-emboutissage*

Propriétés élastoplastiques du matériau

- Module de Young
- Limite élastique
- Loi d'écroutissage

**Est-ce que le matériau répond bien aux attentes ? Ses propriétés ont-elles évoluées ?**



∅8 mm

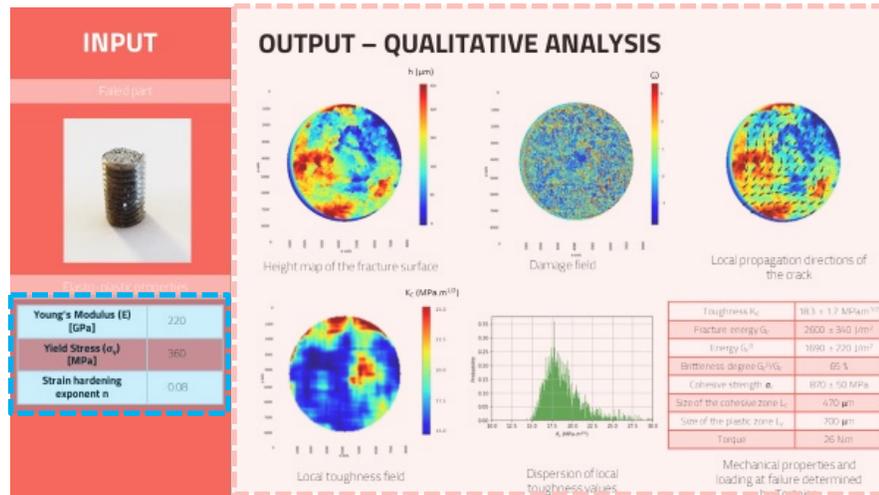


*Mesurées via l'analyse fractographique du micro-échantillon*

Propriétés de rupture du matériau

- Ténacité
- Contrainte seuil à initiation
- Extension aux propriétés de rupture sous environnement (hydrogène, corrosion..), fatigue and haute/basse temp.

**Est-ce que la structure est capable de support les sollicitations externes ? Et pour combien de temps ?**



# CAS D'APPLICATION: PRÉDICTION DE LA DURÉE DE VIE RÉSIDUELLE D'UNE STRUCTURE FISSURÉE

Une fissure est mise en évidence sur un robinet d'une centrale hydraulique. La région fissurée est micro-échantillonnée et analysée :

Analyse de la surface de rupture de la fissure apparue en service

- Mode de fissuration (ici fatigue)
- Amplitude (ici  $\Delta K = 10 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$   $\sigma_{\text{ext}} \approx 400 \text{ MPa}$ ) et nature des sollicitations extérieures

➔ **Nature et amplitude des sollicitations**

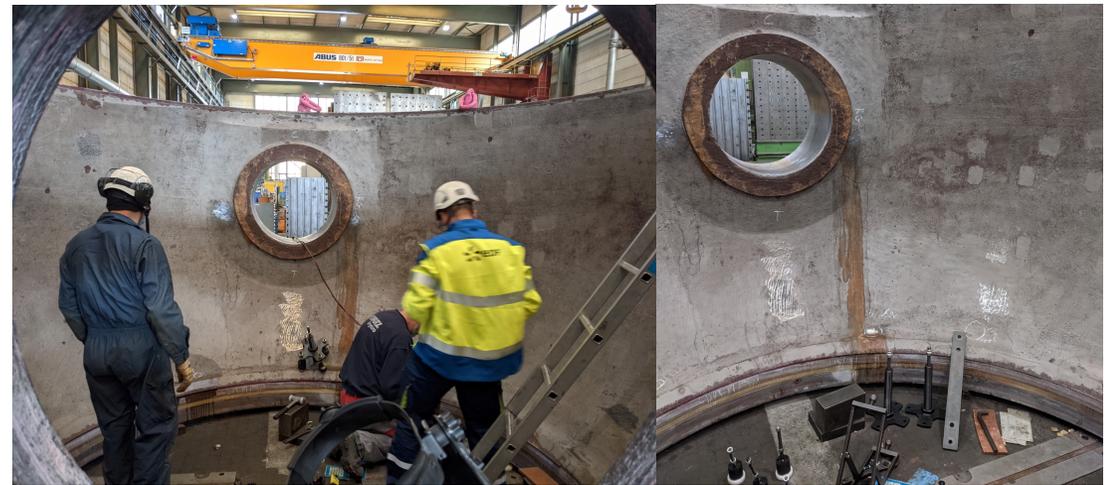
Caractérisation matière par micro-emboutissage & fractographie

- Ténacité du matériau  $K_c \approx 80 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$

➔ **Propriétés de rupture du matériau**

Prédiction de la durée de vie résiduelle par mécanique de la rupture

- ➔ Longueur critique de fissure à rupture
- ➔ **Durée de vie résiduelle > 50 ans**



Echantillon extrait sur la structure

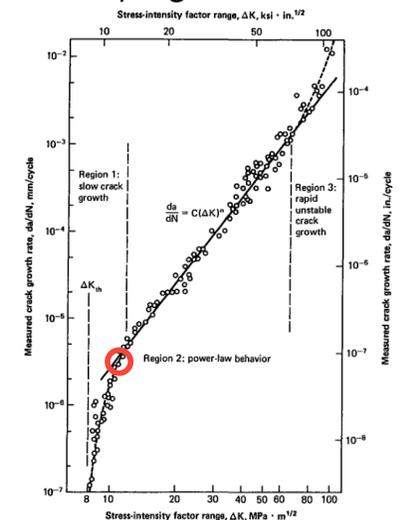
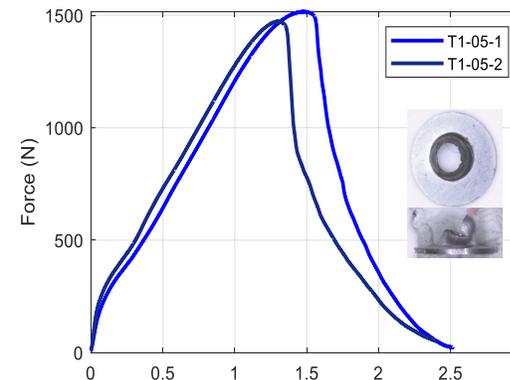


Surface de rupture de la fissure



Loi de fatigue du matériau

Réponse force-déplacement du micro-emboutissage



**Merci**

Tortoise

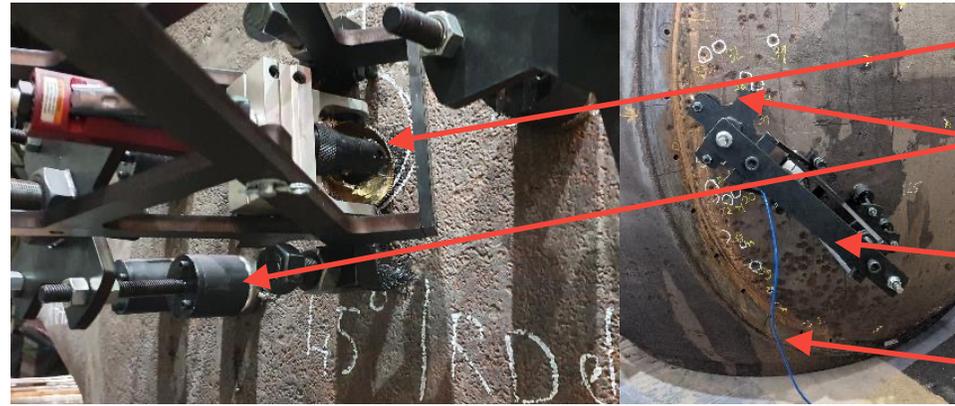
[contact@tortoise.io](mailto:contact@tortoise.io)

+33 1 44 27 37 94

# NOTRE PROCESS D'EXTRACTION



*Part before application of the scoop sampling*

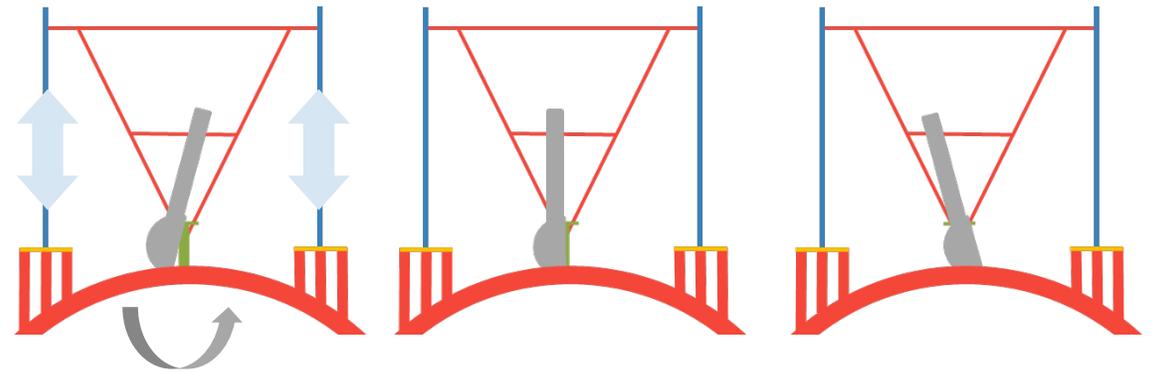


- Cup « shaped » blade
- Magnets
- Metallic frame
- Compressed air

*Picture of the set up on the part during extraction*



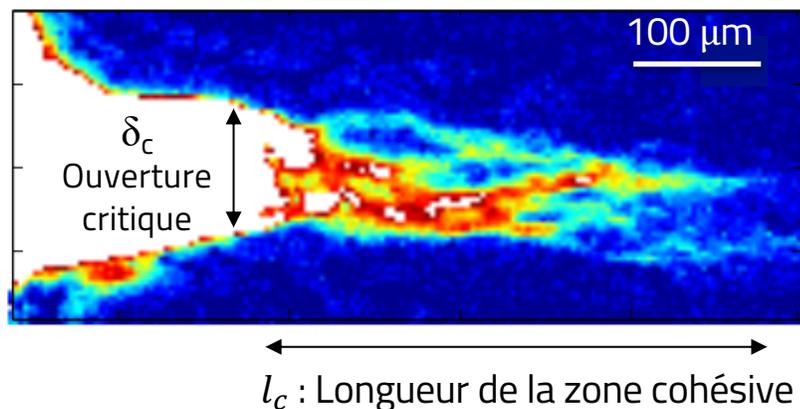
*Picture of the 8 magnet used to fix the frame (left). The frame is then set up on it to start the sampling*



*Once set up, the depth cut of the scoop sampler can be adjusted by moving up and down the frame. Machine is powered up with compressed air and its grinder moved as a pendulum to perform the cut at the surface*

# FRACTOGRAPHIE STATISTIQUE FONDEMENTS SCIENTIFIQUES

Zone endommagée en pointe d'une fissure au cours de sa propagation



La fractographie statistique permet de mesurer localement les deux longueurs  $\xi$  et  $\lambda$  par un traitement statistique de la rugosité du faciès produit par la fissuration, et ainsi déterminer les deux paramètres [1,2]:

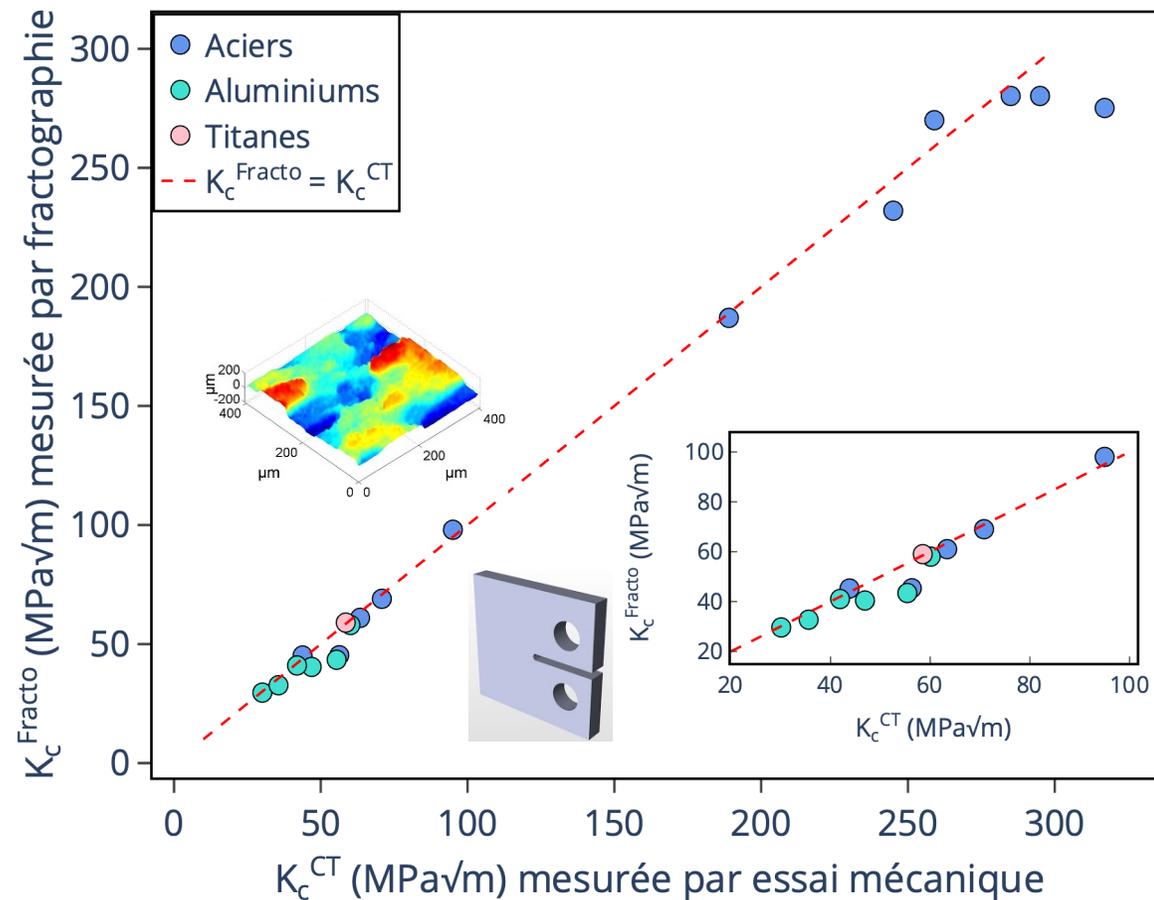
$$\xi \approx \delta_c \quad \lambda \approx l_c$$

Modélisation à l'échelle continue par une approche de type zone cohésive



Ténacité  $K_c$  et amplitude  $\Delta K$  des cycles de fatigue [6]

Comparaison à l'aveugle des valeurs de ténacité  $K_c$  obtenues par fractographie et par essai mécanique [3]

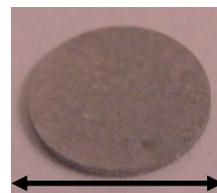
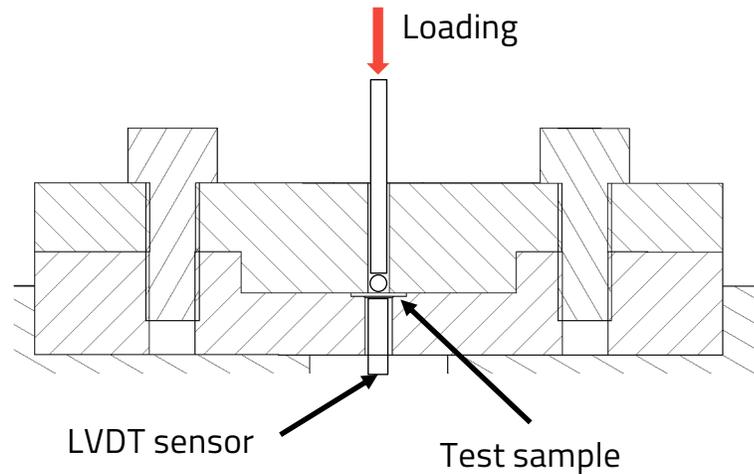


## Références bibliographiques:

- [1] S. Vernède & L. Ponson, [Procédé de caractérisation du mécanisme de fissuration d'un matériau à partir de sa surface de rupture](#), Brevet **149525** (2014).
- [2] N. Auvray, N. Negi, S. Trancart & L. Ponson et al., [L'analyse statistique des faciès de rupture: la science de la donnée au service de l'analyse de défaillance](#), *Contrôle & mesure* **459** (2019)
- [3] [Fractographie statistique & essais mécaniques](#) – Etude comparée, *Rapport d'expertise CETIM CET0147440* (2018).
- [4] Welsch, G., Boyer, R., & Collings, E. W. (Eds.). (1993). *Materials properties handbook: titanium alloys*. ASM international.
- [5] [Analyses d'avarie d'une pièce en TA6V par fractographie statistique](#) – *Rapport d'expertise Tortoise & Safran TP181*.
- [6] [Détermination du chargement à rupture par fractographie statistique: Etude comparée avec des essais mécaniques](#).

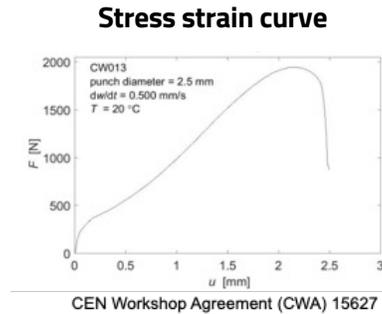
# LE MICRO-EMBOUTISSAGE

- Micro punch test are performed according to the european standard EN 10371:2021



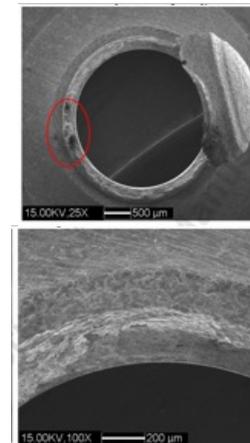
Ø8 mm

t = 0.5mm or t = 0.9mm



**Elasto plastic properties**  
( $E$ ,  $\sigma_y$ ,  $n$ )  
through virtual test by finite elements

**Fracture surface**



**Fracture properties**  
( $K_{Ic}$ ,  $G_c$ ,  $\sigma_c...$ )  
through statistical fractography



[1] CWA 15627:2007 D/E/F, 2007. CEN Workshop Agreement "Small Punch Test Method for Metallic Materials".  
[2] M. Bruchhausen et al. European standard on small punch testing of metallic materials. Ubiquity Proceedings, 1(S1): 11, 2018