

# Fractographie statistique

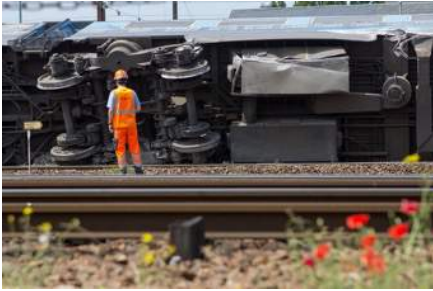
Mettre la science de la donnée au service de l'industrie pour expliquer les défaillances et simplifier la caractérisation des matériaux



Laurent Ponson



# Motivations



Train SNCF à Bretigny-sur-Orge



Pont de Morandi, Gênes

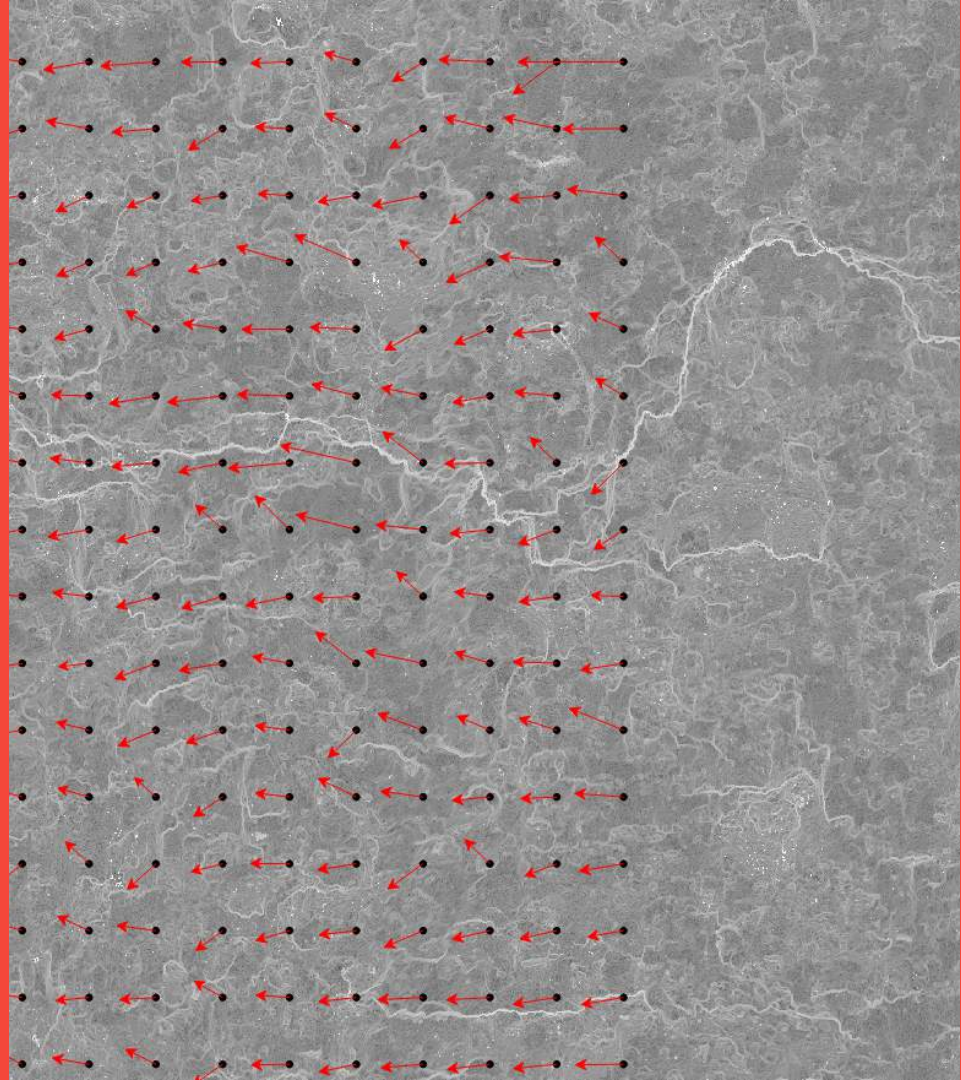
**Les méthodes actuelles ne sont plus à la hauteur des enjeux industriels**

- ★ L'analyse des défaillances se fait à dire d'expert, via une approche qualitative
- ★ Mesurer la tenue mécanique d'une pièce est destructif et couteux

# Fractographie statistique

Analyser les faciès de rupture pour en extraire

- ☒ des informations jusqu'ici inaccessibles sur les causes racine d'une défaillance
- ☒ la tenue mécanique d'un matériau via une procédure simple et rapide
- ☒ Suivre l'évolution des propriétés mécaniques des matériaux au cours du temps



# Notre ambition: imposer la fractographie statistique statistique comme le nouveau standard

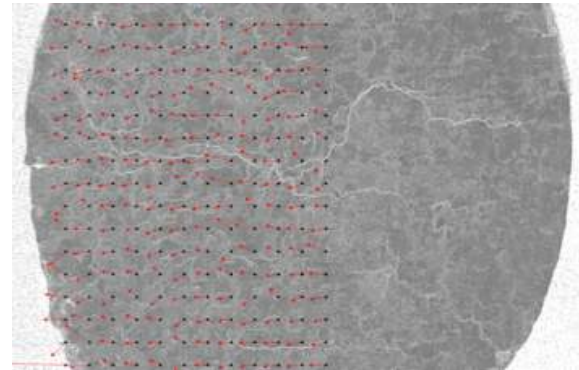
Séquençage ADN

Résoudre les affaire criminelles et caractériser le vivant



Fractographie statistique

Expliquer la rupture et caractériser les matériaux



# Un process simple

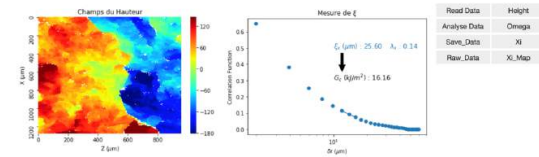
1 - Scan du faciès de rupture



2 - Traitement par algorithmes Tortoise



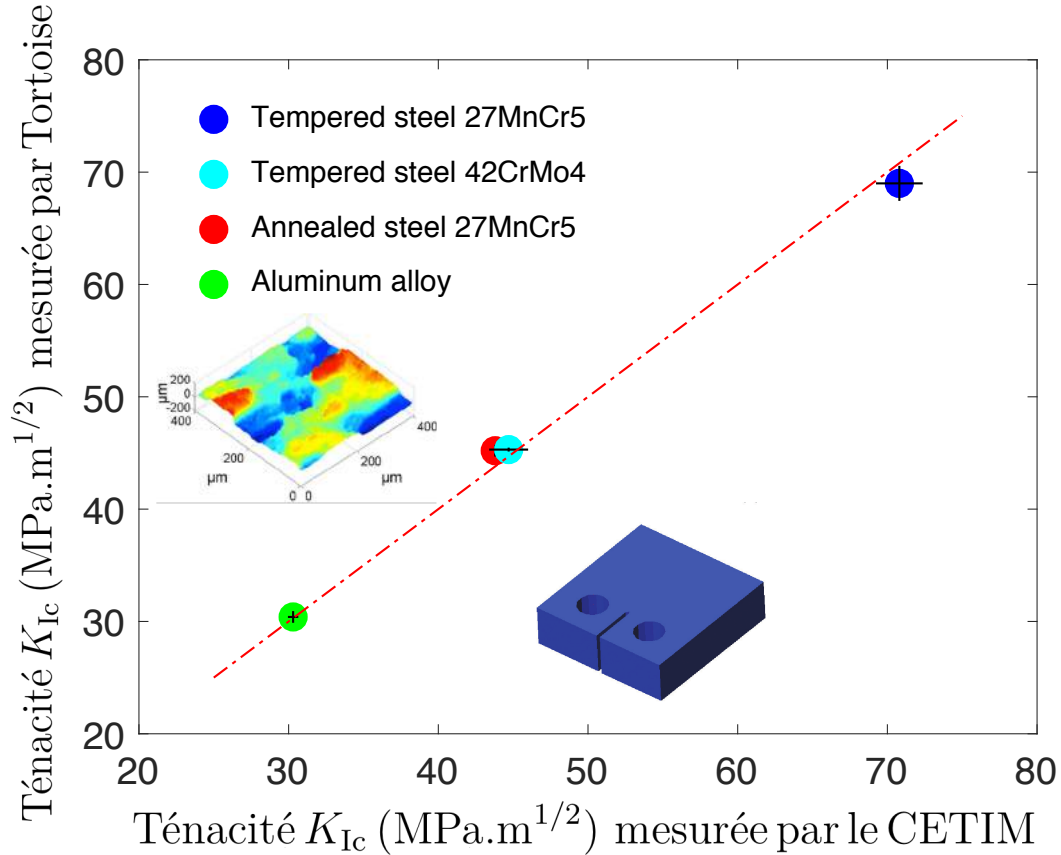
3 - Visualisation des données



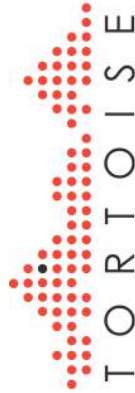
File: /Users/NSR/Desktop/tortoise\_GUI\_Example/Results\_1/report\_sample1.p has been saved  
Figure: /Users/NSR/Desktop/tortoise\_GUI\_Example/Results\_1/figure\_1.png has been saved

# Application de la technologie aux alliages

TORTOISE

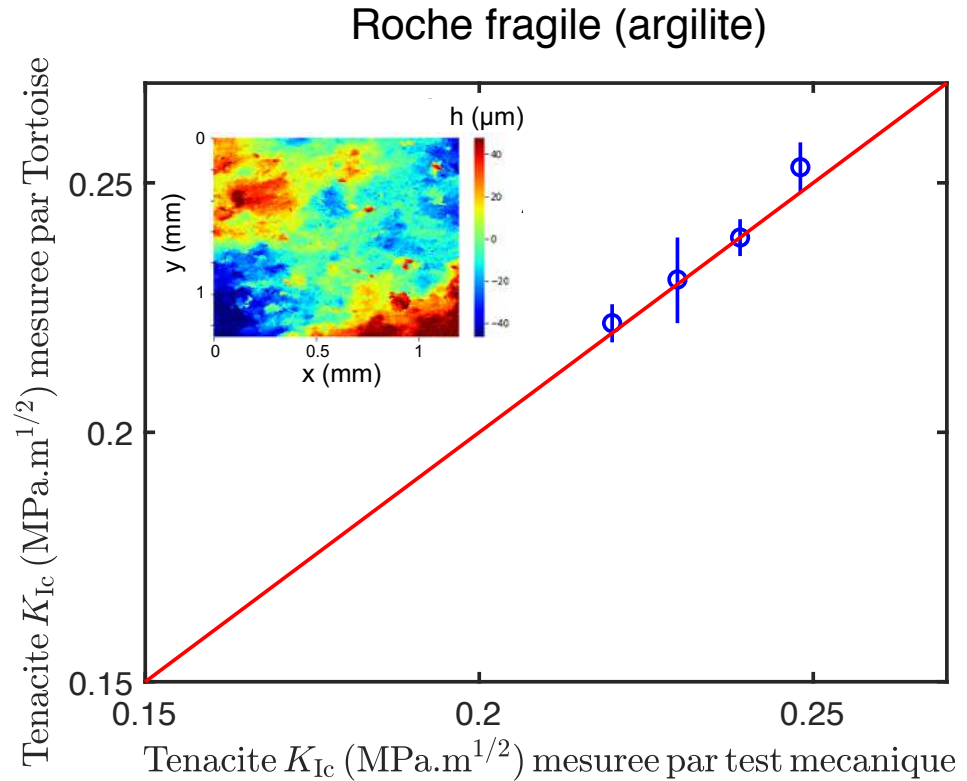


# Application de la technologie aux matériaux fragiles



Applicable à une large  
gamme de matériaux:

- Céramiques
- Mortiers, bétons
- Roches

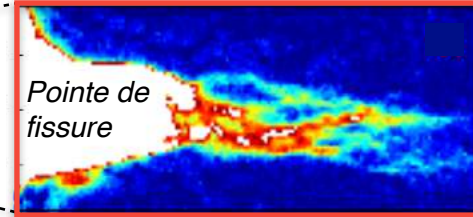
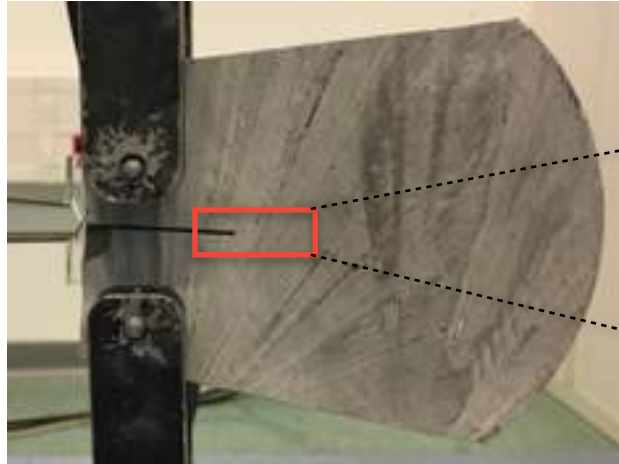


# Genèse de la technologie: d'une découverte scientifique majeure à une technologie de rupture

A l'échelle  
macroscopique

**K** : Chargement  
extérieur

*Energie  
mécanique  
injectée*



A l'échelle  
microscopique

**K<sub>Ic</sub>** : Ténacité

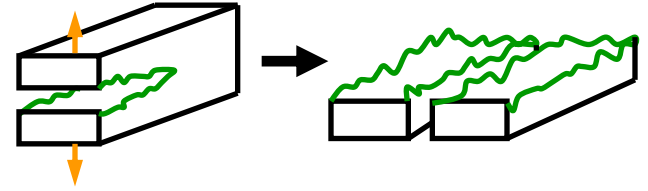
*Taux d'énergie  
dissipée:  
caractérise la  
résistance d'un  
matériau*

Rupture  $\longleftrightarrow$   $K = K_{Ic}$

	Verres	Céramiques	Alliages métalliques
<b>K<sub>Ic</sub></b> (MPa.m <sup>1/2</sup> )	≈ 0.5 - 1	≈ 1 - 10	≈ 10 - 100

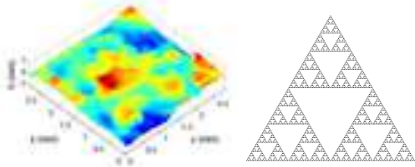


# Genèse de la technologie

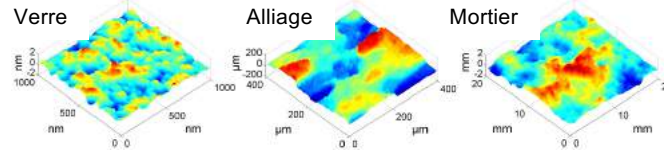


2014: Brevet

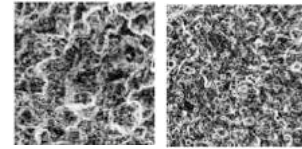
1983: Mandelbrot: des surfaces de rupture fractales...



1993: Bouchaud ... et indépendantes du matériau



2014: Vernède & Ponson Structure statistique complète

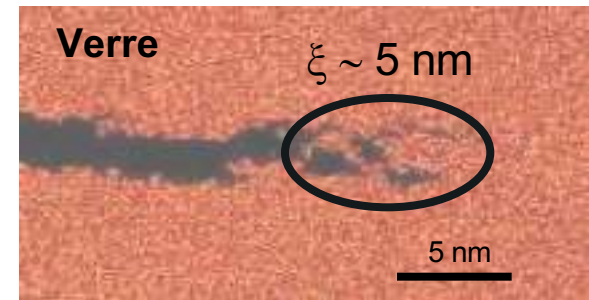
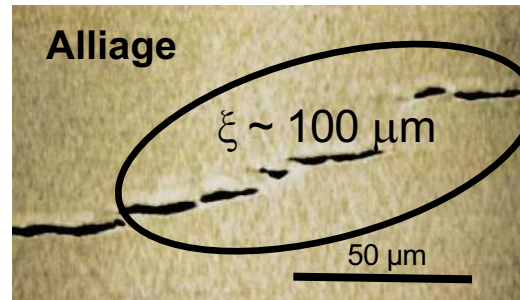
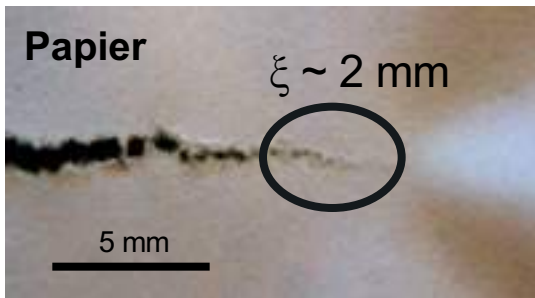


Alliage Céramique

2017: Relation entre  $\xi$  et  $K_{Ic}$

→ Mise en évidence de l'endommagement

→ Caractérisé par une longueur  $\xi$

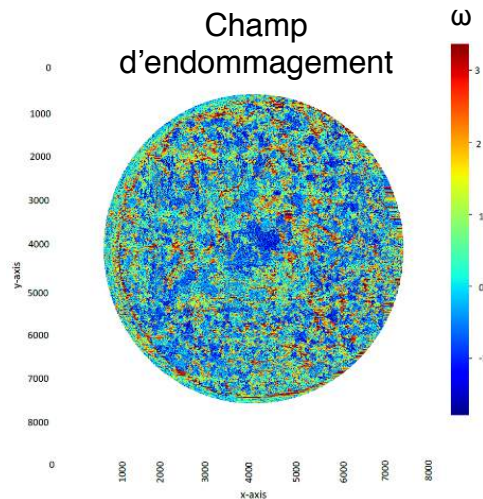
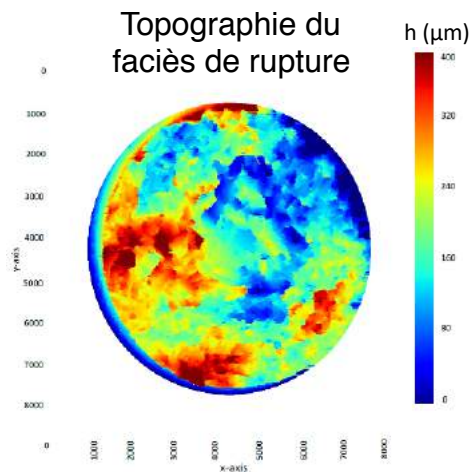


# Données d'entrée

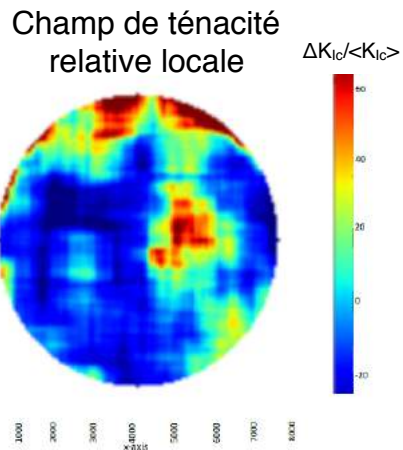
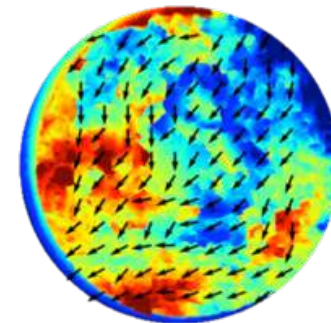


Échantillon rompu de manière fortuite ou délibérée

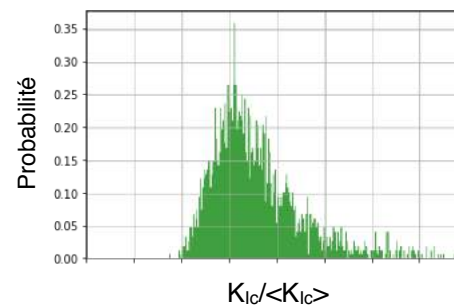
# Informations produites



Direction locale et sens de propagation de la fissure



Dispersion des valeurs de ténacité relative locale



# Données d'entrée



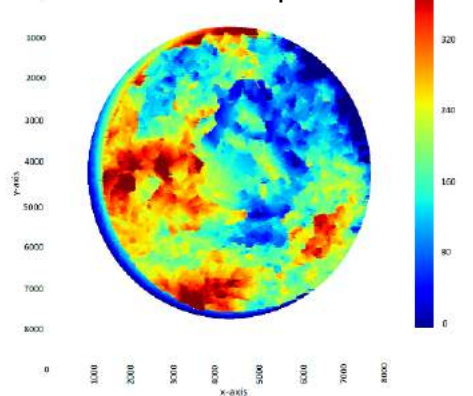
Échantillon rompu de manière fortuite ou délibérée

Propriétés élasto-plastiques

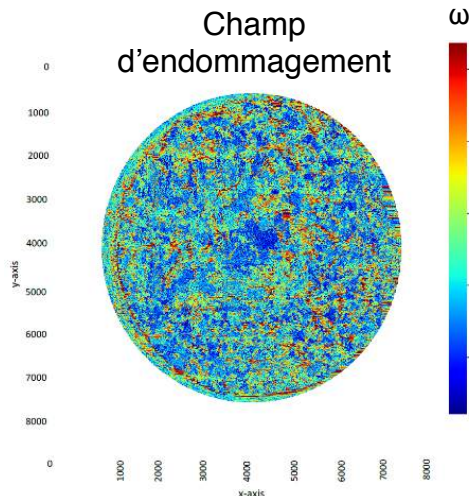
Module de Young	200 GPa
Limite élastique	360 MPa
Coefficient d'écroutissement	0.08

# Informations produites

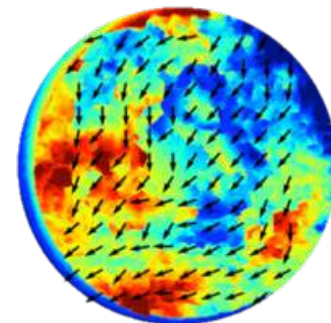
Topographie du faciès de rupture



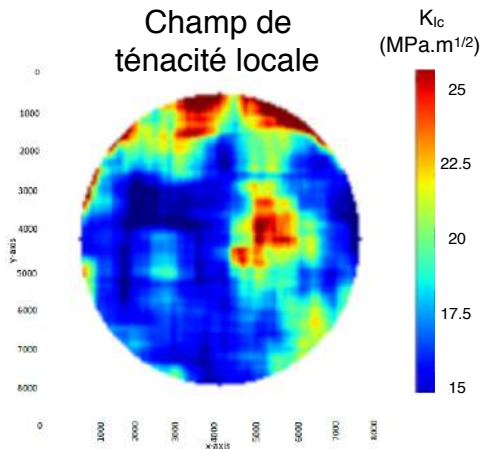
Champ d'endommagement



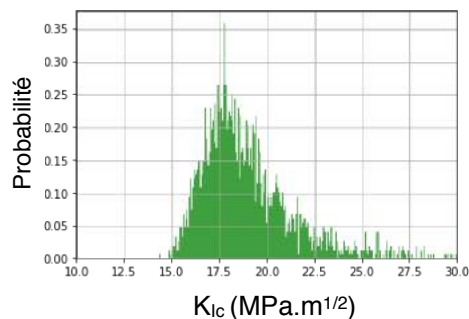
Direction locale et sens de propagation de la fissure



Champ de ténacité locale



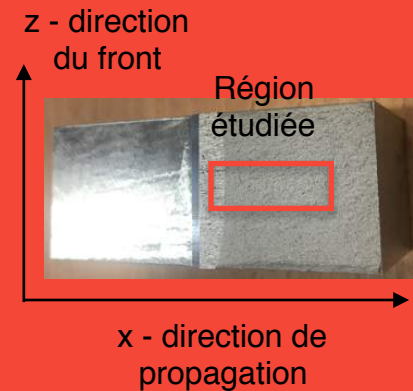
Dispersion des valeurs de ténacité locale



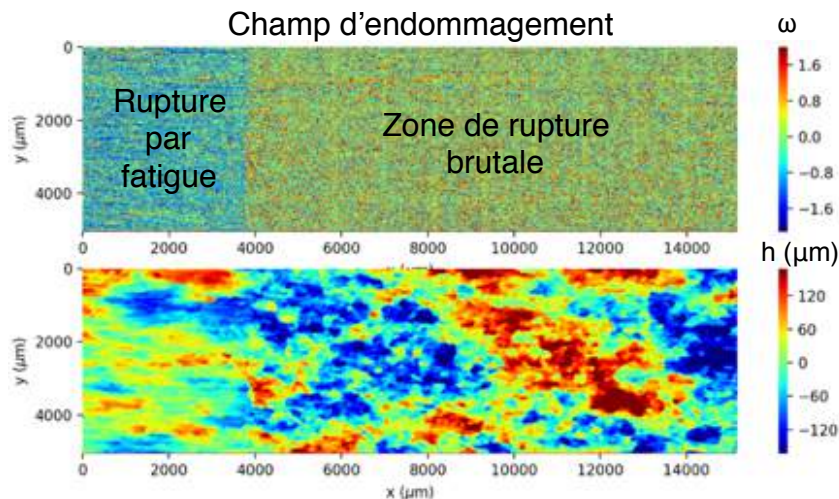
Propriétés à rupture et chargement

Ténacité $K_{Ic}$	$18.3 \pm 1.7 \text{ MPa.m}^{1/2}$
Energie de rupture $G_c$	$2600 \pm 340 \text{ J/m}^2$
Energie de cohésion $G_{c0}$	$1690 \pm 220 \text{ J/m}^2$
Degré de fragilité $G_{c0}/G_c$	65 %
Contrainte à rupture $\sigma_c$	$870 \pm 50 \text{ MPa}$
Taille zone cohésive $L_c$	$470 \text{ } \mu\text{m}$
Taille zone plastique $L_y$	$700 \text{ } \mu\text{m}$
Couple à rupture	$26 \text{ N.m}$

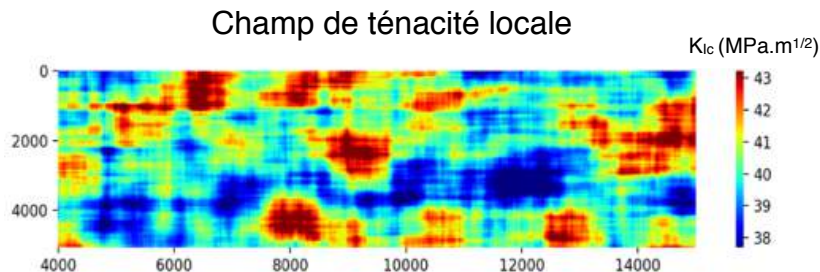
# Données d'entrée



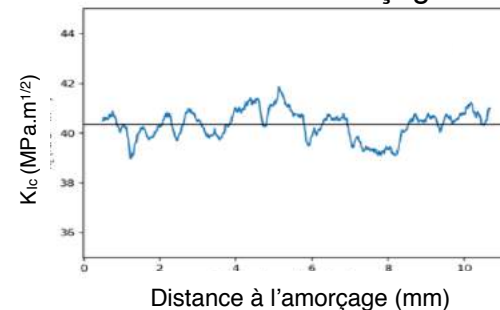
# Informations produites



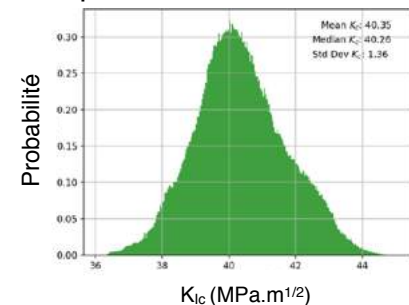
Topographie du faciès de rupture



Variation de ténacité avec la distance à l'amorçage



Dispersion des valeurs de  $K_{Ic}$



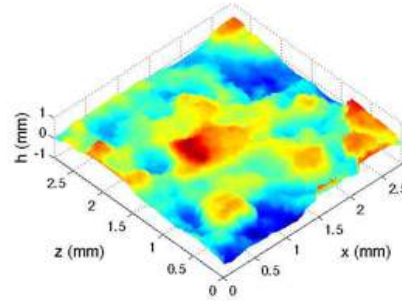
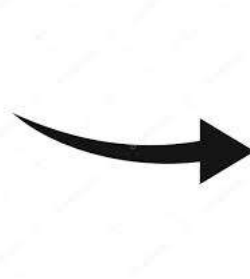
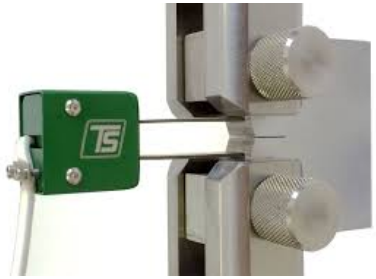
## Propriétés élasto-plastiques

Module de Young	71 GPa
Limite élastique	480 MPa
Coefficient d'écroutissage	0.11

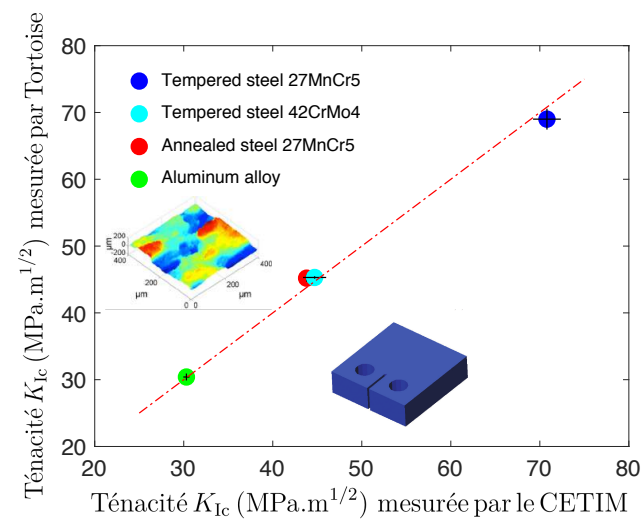
Mesurées par indentation

Ténacité $K_{Ic}$	$39.5 \pm 2.3 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$
Energie de rupture $G_c$	$21.4 \pm 1.6 \text{ kJ/m}^2$
Energie de cohésion $G_{c0}$	$12.1 \pm 0.9 \text{ kJ/m}^2$
Degré de fragilité $G_{c0}/G_c$	57 %
Contrainte à rupture $\sigma_c$	$1370 \pm 50 \text{ MPa}$
Taille zone cohésive $L_c$	210 $\mu\text{m}$
Taille zone plastique $L_y$	760 $\mu\text{m}$

# Intérêt technologique: Mieux caractériser les matériaux, plus simplement



TORTOISE



**cetim** 50  
Vers le futur

## Test instrumenté sur éprouvette entaillé

- Ténacité moyenne

## Fractographie statistique

*Informations similaires, mais obtenues plus simplement:*

- Ténacité moyenne → Petites pièces, conditions extrêmes...

*Informations nouvelles:*

- Champ de ténacité (quantification des variations locales...)  
→ « Microscope aux propriétés de rupture »
- Autres propriétés: contrainte limite à rupture, déformation limite, loi cohésive...  
→ Prédire l'amorçage, calibrer les modèles...
- Relation entre propriété mécanique et caractéristique microstructurales  
→ Outil de compréhension au service de la R&D

Engrenage sur pièce pour l'aéronautique  
rompu pendant la phase d'essai

## Un cas d'usage en analyse de défaillance

Client envoie le scan des faciès de rupture à Tortoise qui réalise les analyses

- Direction et sens de propagation des fissures

→ Scénario de la défaillance

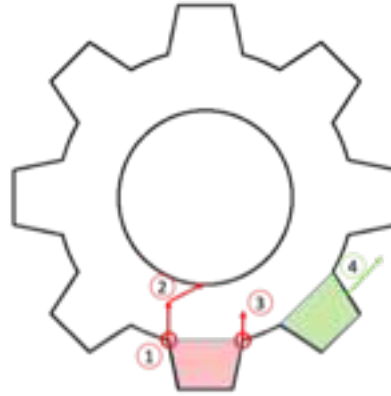
- Champ de ténacité (hétérogénéité matériaux)

→ Mise en évidence d'hétérogénéités

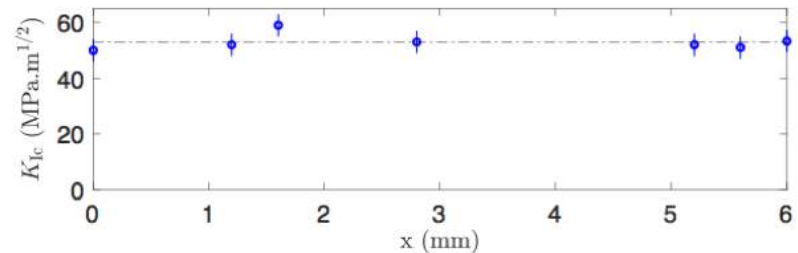
- Ténacité moyenne: 53 MPa.m<sup>1/2</sup>
- Contrainte seuil d'amorçage: 3.7 GPa
- Couple à rupture: 20 N.m (mesuré à 18 N.m par le client)

→ Détermine les causes racine et guide le redimensionnement

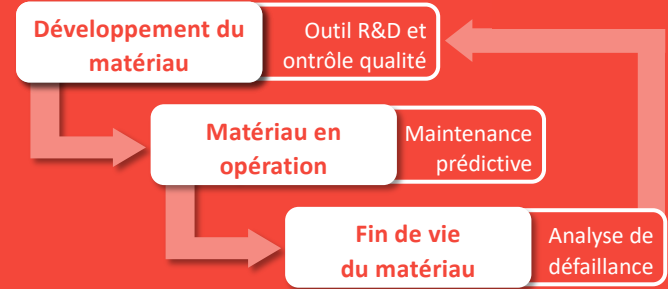
Vue de dessus



Profil de ténacité



# Des applications tout au long de la vie des matériaux



## Outil de R&D et contrôle qualité

Améliorer les  
performances des  
matériaux



## Maintenance prédictive

Mesurer la résistance  
résiduelle des  
matériaux



## Analyse de défaillance

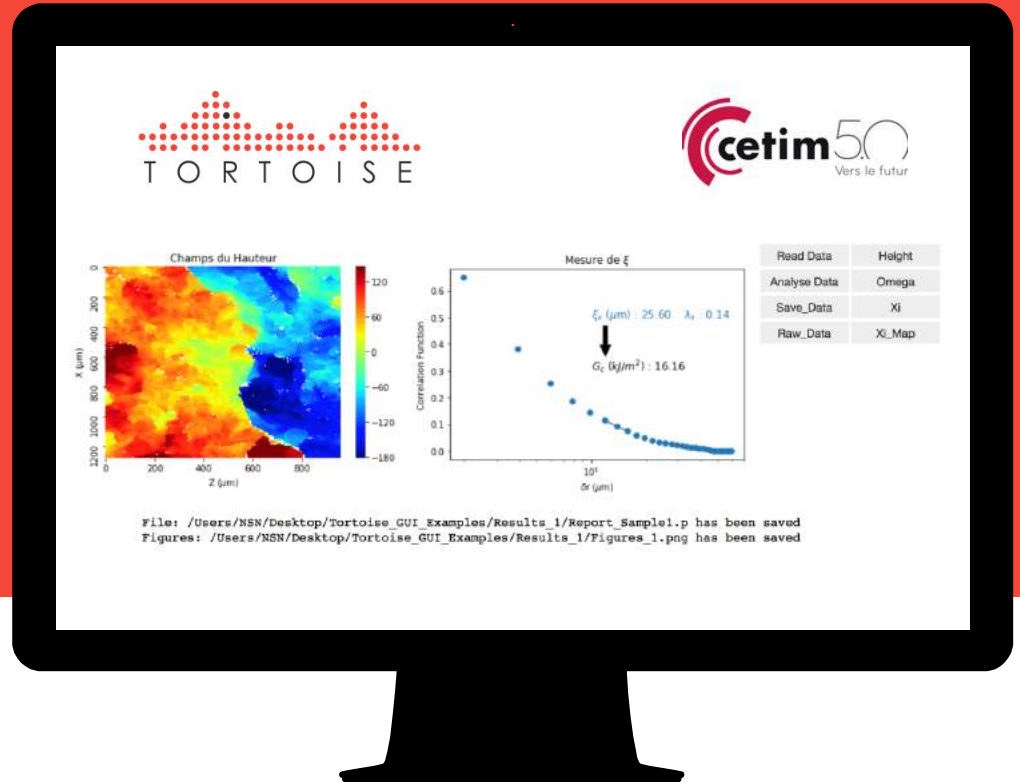
Expliquer la rupture  
des matériaux



# Un accès simple

Plateforme SaaS multi-matériaux et multi-usages pour

- Analyser et expliquer les défaillances
- Caractériser les matériaux
- Constituer une base de données mise à profit pour prédire les défaillances et guider le choix des matériaux



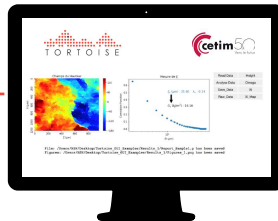


# Canaux d'accès à la technologie

Via de la prestation  
de service



Via notre logiciel



**Merci**

Laurent Ponson

[laurent.ponson@tortoise.io](mailto:laurent.ponson@tortoise.io)

+33 6 84 10 75 16