

FRACTOGRAPHIE STATISTIQUE

Rationaliser et digitaliser l'analyse des défaillances
et la caractérisation mécanique des matériaux





Accident ferroviaire de Brétigny-sur-Orge – Juillet 2013



Effondrement partiel du Pont de Morandi, Gênes – août 2018

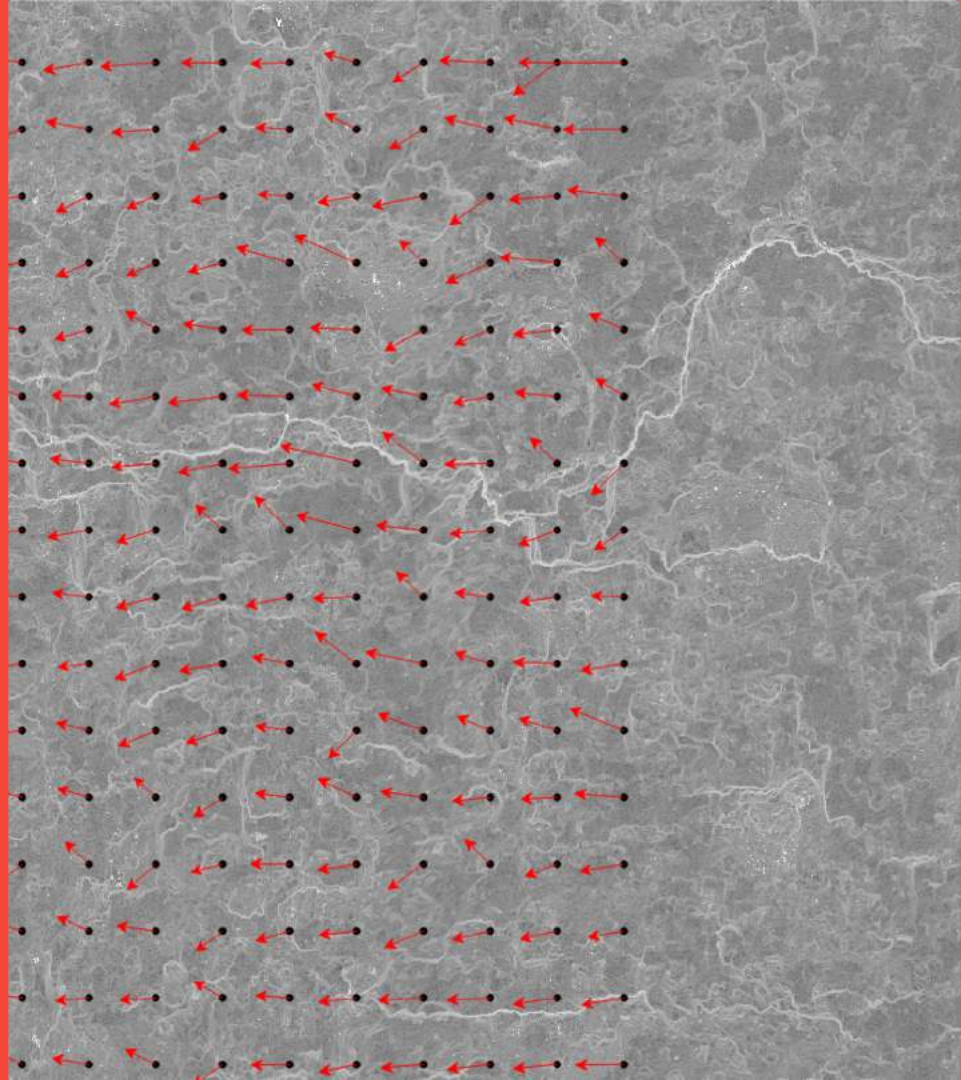
MOTIVATIONS

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

NOTRE SOLUTION

Analyser les faciès de rupture pour

- ⊗ Extraire des informations jusqu'ici inaccessibles sur les causes racines d'une avarie
- ⊗ Simplifier et accélérer la mesure de la tenue mécanique d'un matériau ou d'une pièce

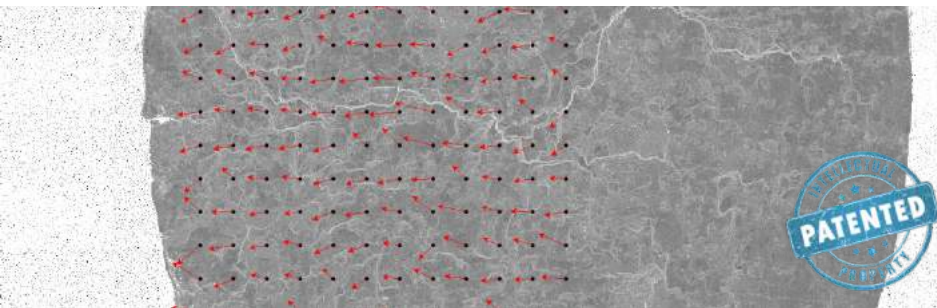


LA FRACTOGRAPHIE STATISTIQUE: LA MÉTHODE ADN DES MATÉRIAUX



Séquençage ADN

Utilisée pour résoudre les affaires criminelles, et de façon plus large, pour caractériser le vivant



Fractographie statistique

Utilisée pour expliquer les défaillances, et de façon plus large, pour caractériser les matériaux

UN PROCESS SIMPLE

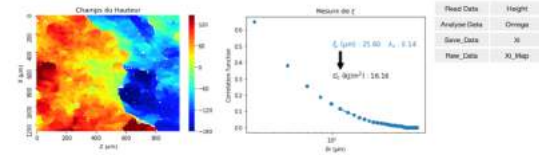
1 - Scan du faciès de rupture



2 - Traitement par algorithmes Tortoise

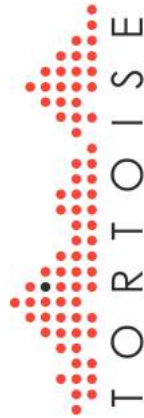


3 - Visualisation des données



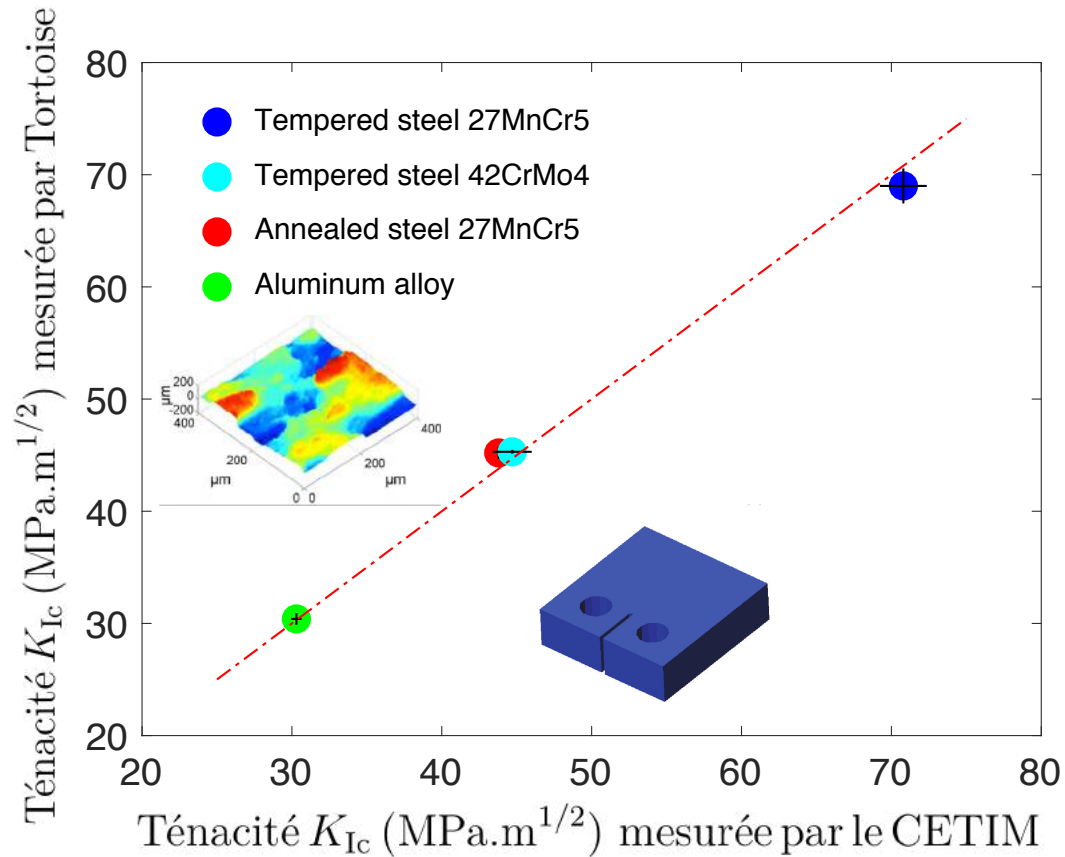
File: /Users/MDR/Desktop/tortoise_OCI_Examples/Results_1/report_sample1.p has been saved
Figure: /Users/MDR/Desktop/tortoise_OCI_Examples/Results_1/figure1.png has been saved

MESURE DE TÉNACITÉ



Comparaison à l'aveugle des résultats des essais mécaniques standards et la méthode Tortoise (rapport d'expertise du CETIM disponible sur demande).

Méthode protégée par brevet.



APPLICATION DE LA TECHNOLOGIE AUX MATÉRIAUX FRAGILES

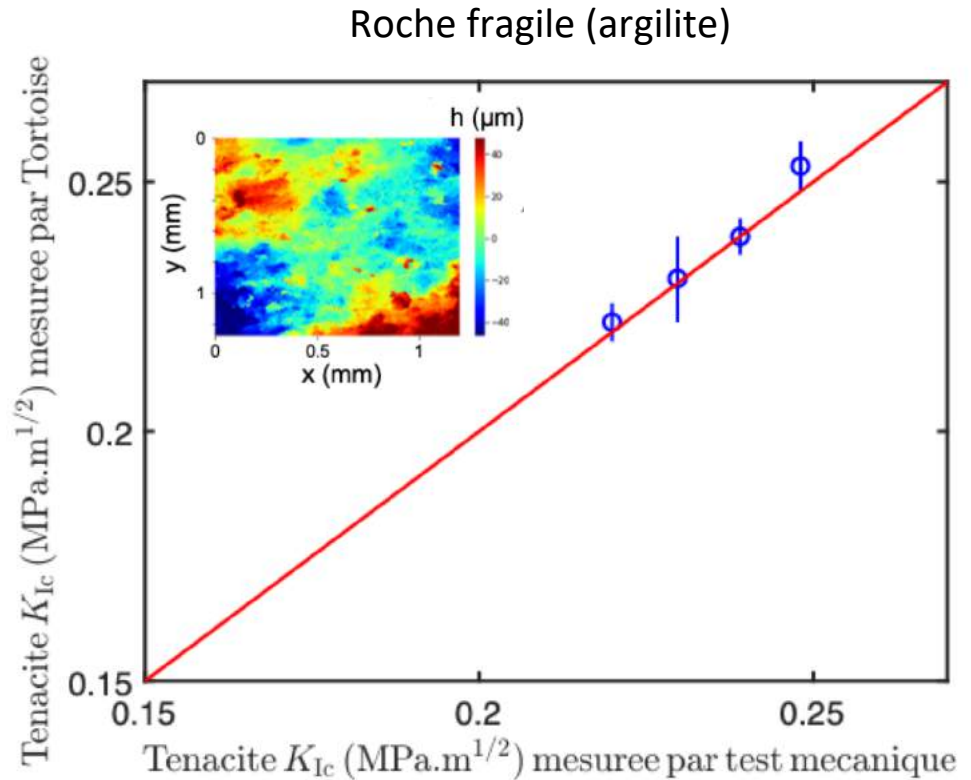
Applicable à une large
gamme de matériaux:

Céramiques

Mortiers, bétons

Roches

T
O
R
T
O
I
S
E

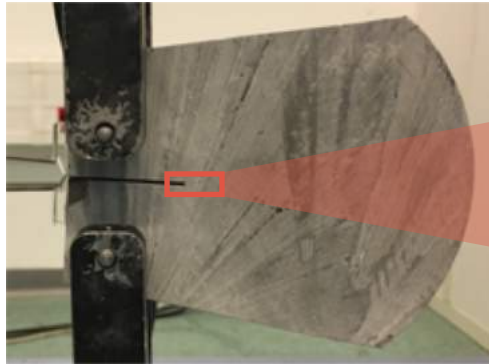


GENÈSE DE LA TECHNOLOGIE

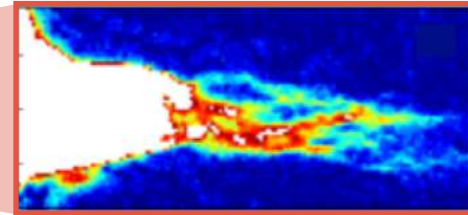
A l'échelle macroscopique

K : Chargement
extérieur

*Energie mécanique
injectée*



A l'échelle microscopique



Pointe de fissure

K_{Ic} : Ténacité

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

Rupture $\longleftrightarrow K = K_{Ic}$

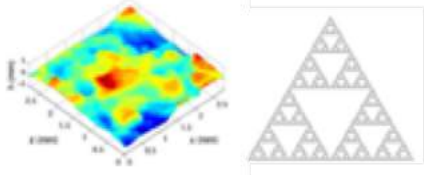
	Verres	Céramiques	Alliages métalliques
K_{Ic} (MPa.m ^{1/2})	≈ 0.5 - 1	≈ 1 - 10	≈ 10 - 100

GENÈSE DE LA TECHNOLOGIE

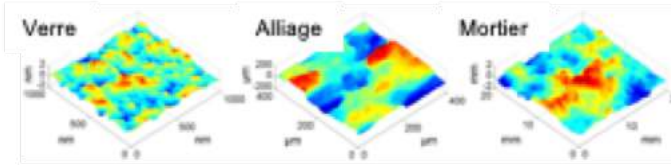


2014: Brevet

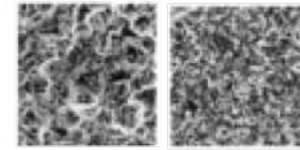
1983: Mandelbrot: des surfaces de rupture fractales...



1993: Bouchaud
... et indépendantes du matériau



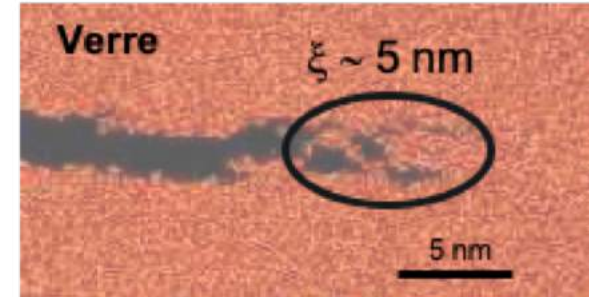
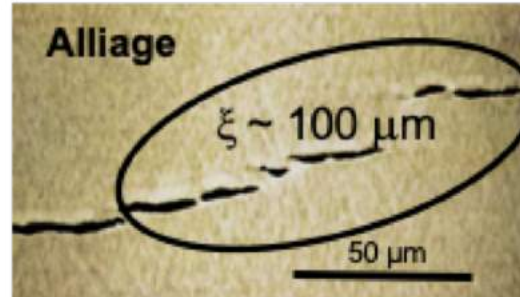
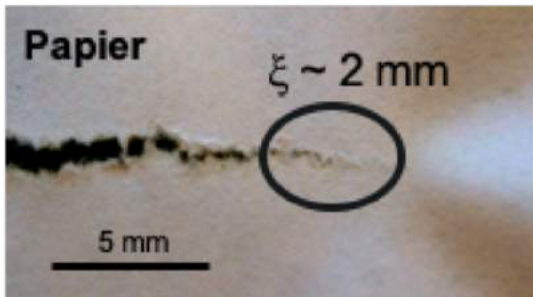
2014: Vernède & Ponson
Structure statistique complète



Alliage Céramique

2017: Relation
entre ξ et K_{Ic}

- ➡ Mise en évidence de l'endommagement
- ➡ Caractérisé par une longueur ξ

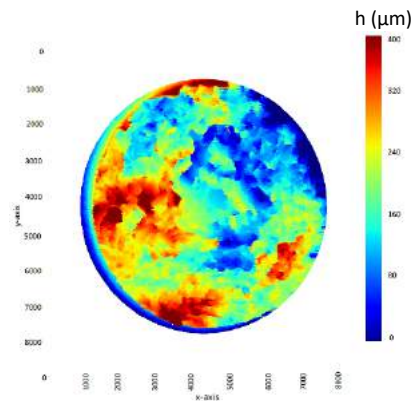


DONNÉES D'ENTRÉE

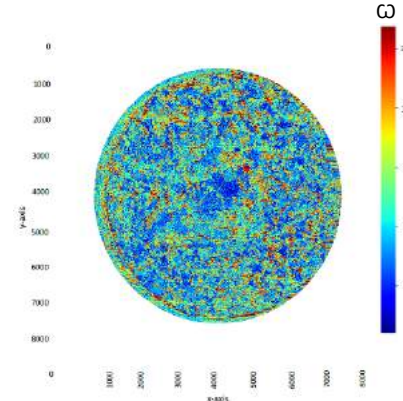
Pièce défailante



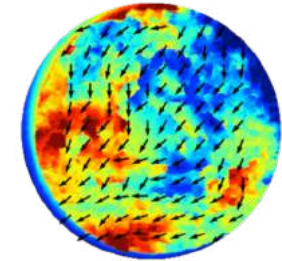
RESULTATS OBTENUS



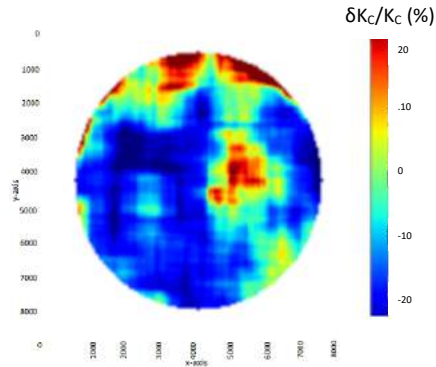
Topographie du faciès de rupture



Champ d'endommagement



Direction locale et sens de propagation de la fissure



Champ de ténacité locale relative

DONNÉES D'ENTRÉE

Pièce défailante



Propriétés élasto-plastiques

Module d'Young (E)
[GPa]

220

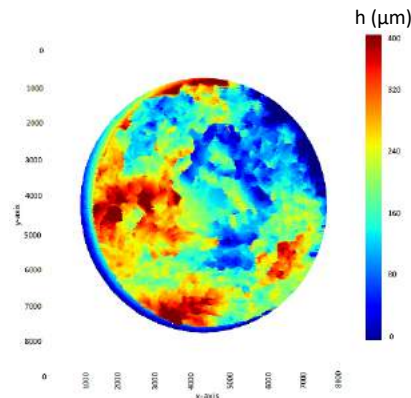
Contrainte élastique (σ_y)
[MPa]

360

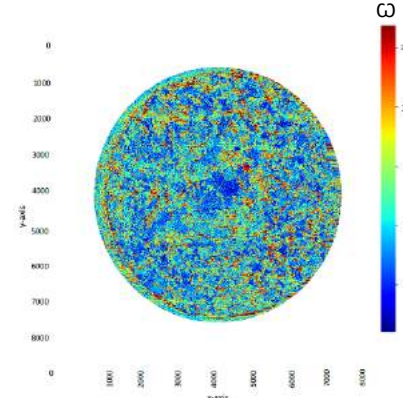
Coefficient d'érouissage
n

0.08

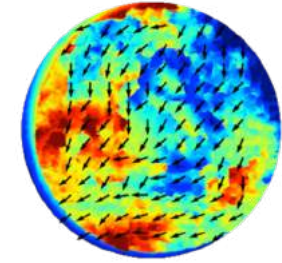
RESULTATS OBTENUS



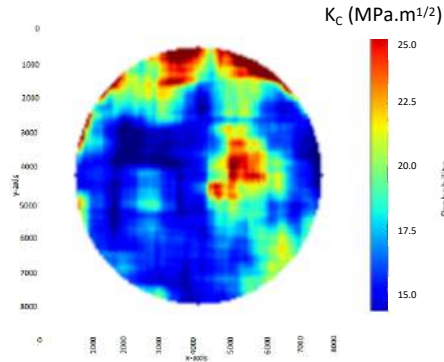
Topographie du faciès de rupture



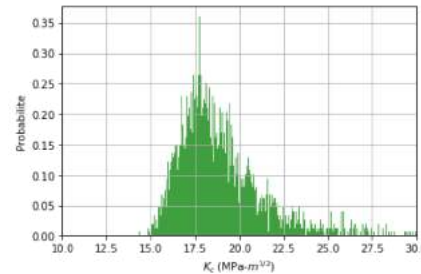
Champ d'endommagement



Direction locale et sens de propagation de la fissure



Champ de ténacité locale



Dispersion des valeurs de ténacité locales

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 G_c^0	$1690 \pm 220 \text{ J/m}^2$
Degré de fragilité G_c^0/G_c	65 %
Contrainte à rupture σ_c	$870 \pm 50 \text{ MPa}$
Taille de la zone cohésive L_c	470 μm
Taille de la zone plastique L_y	700 μm
Couple à rupture	26 N.m

Propriétés mécaniques et chargement à rupture déterminés par Tortoise

DONNÉES D'ENTRÉE

Pièce défailante



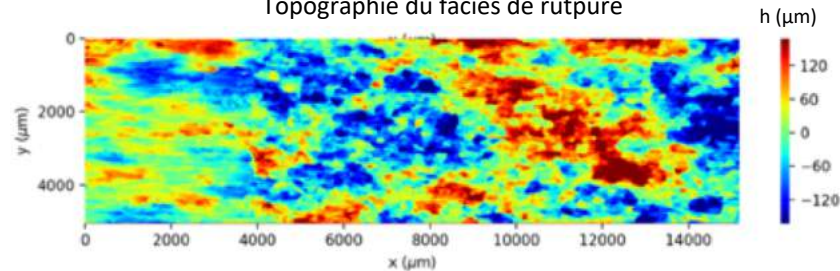
Propriétés élasto-plastiques*

Module d'Young (E) [GPa]	71
Contrainte élastique (σ_y) [MPa]	480
Coefficient d'érouissage n	0.11

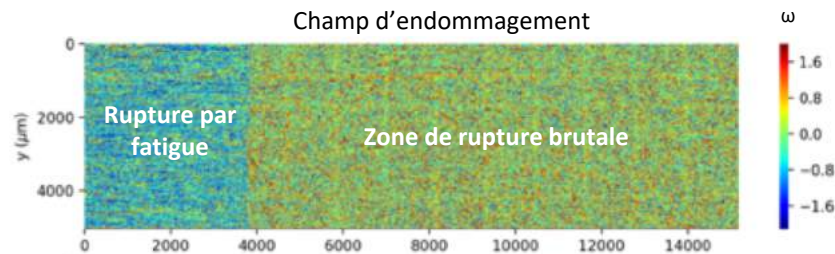
* Mesurées par Tortoise par macro-indentation

RESULTATS OBTENUS

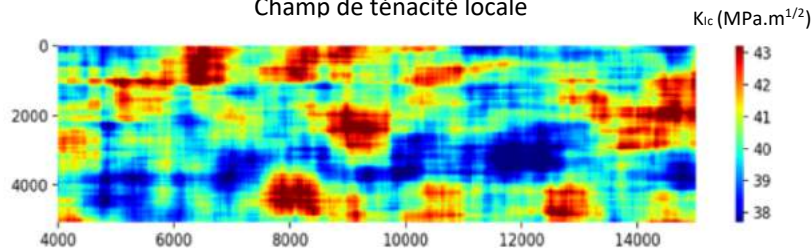
Topographie du faciès de rupture



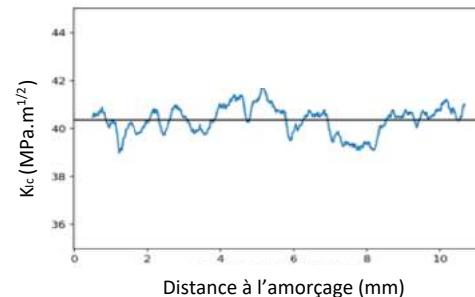
Champ d'endommagement



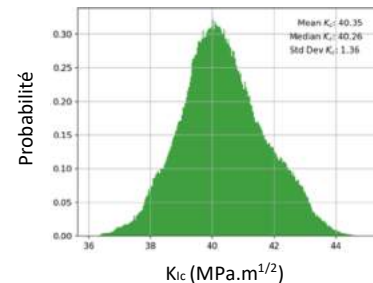
Champ de ténacité locale



Variation de ténacité avec la distance à l'amorçage



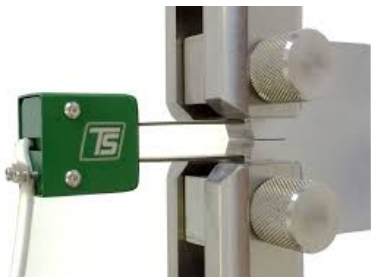
Dispersion des valeurs de K_{Ic}



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 σ_c	$1370 \pm 50 \text{ MPa}$
Taille zone cohésive L_c	210 μm
Taille zone plastique L_y	760 μm

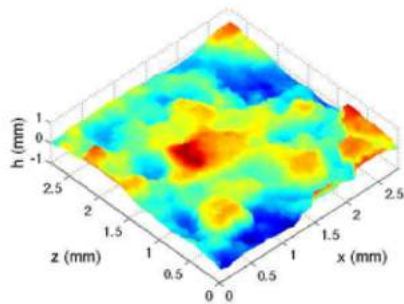
Propriétés mécaniques et chargement à rupture déterminés par Tortoise

MIEUX CARACTÉRISER LES MATÉRIAUX, PLUS SIMPLEMENT

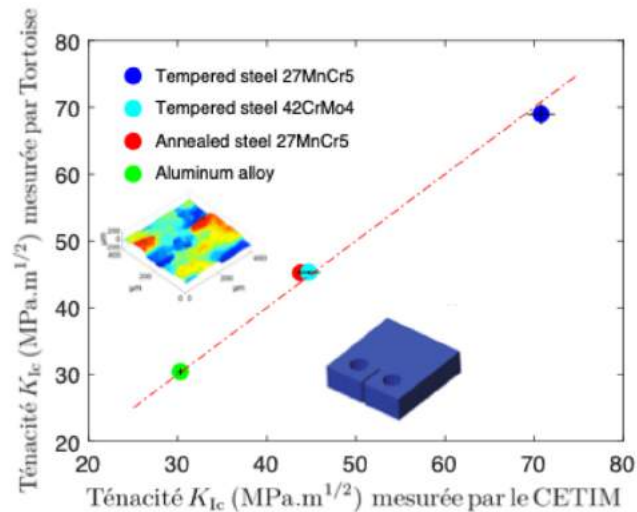


Test instrumenté sur éprouvette entaillée

- Ténacité moyenne



TORTOISE



cetim 50
Vers le futur

Fractographie statistique

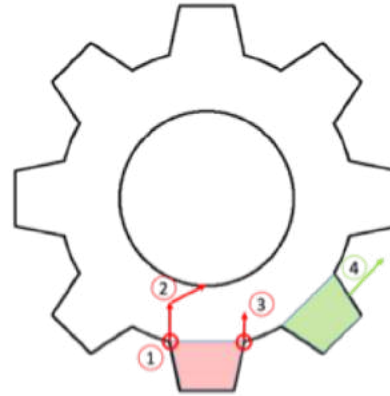
- Ténacité moyenne
 - ➔ Petites pièces, conditions extrêmes
- Champ de ténacité (quantification des variations locales ...)
 - ➔ « Microscope aux propriétés de rupture »
- Autres propriétés : contrainte limite à rupture, déformation limite, loi cohésive ...
 - ➔ Prédire l'amorçage, calibrer les modèles....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

UN CAS D'USAGE EN ANALYSE DE DEFAILLANCE

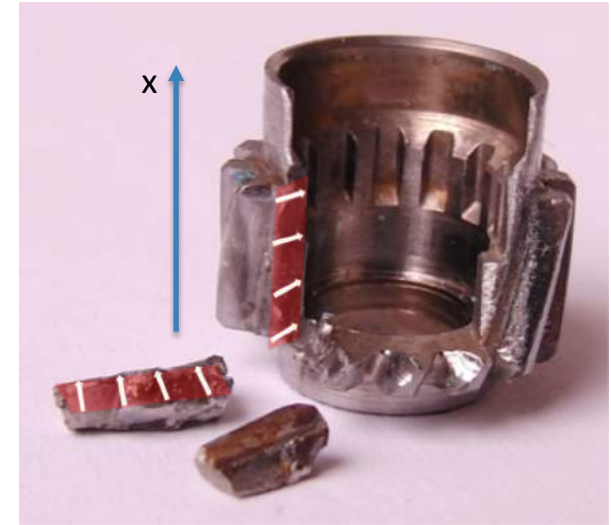
Client envoie le scan des faciès de rupture à Tortoise qui réalise les analyses:

- Zone d'amorçage
- Direction et sens de propagation
 - ➔ Scénario de défaillance
- Champ de ténacité (hétérogénéités matériau)
 - ➔ Mise en évidence d'hétérogénéités
- Ténacité moyenne: $53 \text{ MPa.m}^{1/2}$
- 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

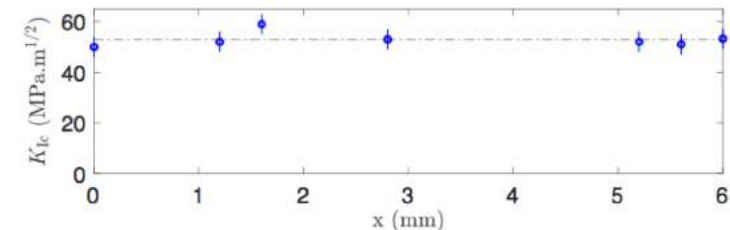
Vue de dessus



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



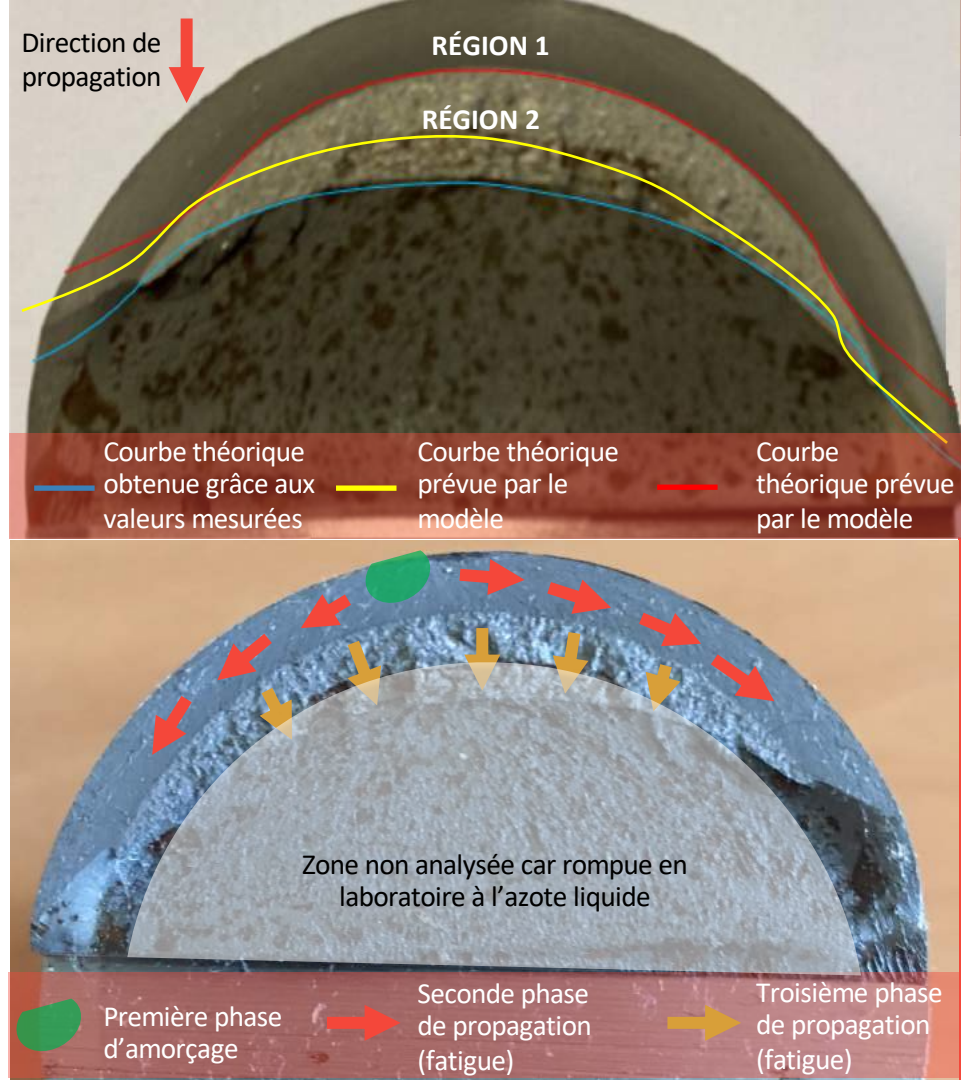
Profil de ténacité



UN CAS D'USAGE EN ANALYSE DE DEFAILLANCE

Une barre de levage d'un engin de manutention, composé de deux matériaux, avec des limites élastiques différentes, a été rompu en flexion en laboratoire puis confié à Tortoise :

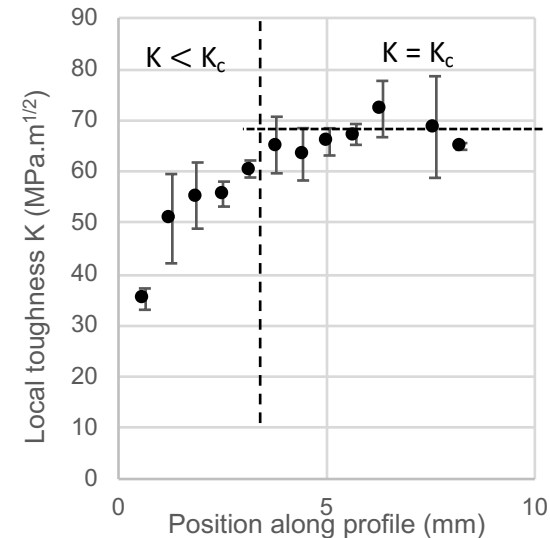
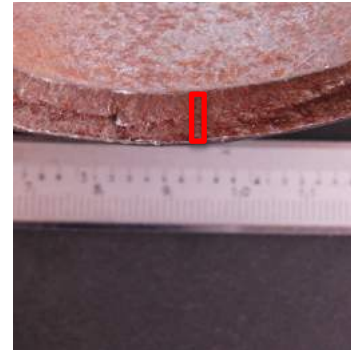
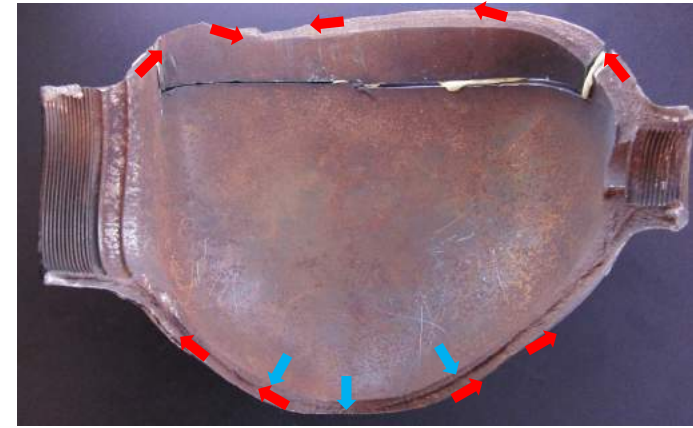
- Détermination du scénario de la rupture (amorçage, propagation en couche, puis au cœur) et de l'évolution du front de fissure
- Détermination des propriétés de rupture de chacune des phases
- Calibration et validation d'un modèle permettant de prédire la résistance à rupture en fonction des paramètres géométriques (épaisseur de la couche externe) et matériaux (ténacité de chaque phase)
- Proposition d'un nouveau design permettant l'amélioration de la tenue mécanique de 30%



UN CAS D'USAGE DE DEFAILLANCE D'UN RESERVOIR SOUS PRESSION

Un amortisseur de pompe a explosé sur site. La pièce analysée par Tortoise a permis de tirer les conclusions suivantes :

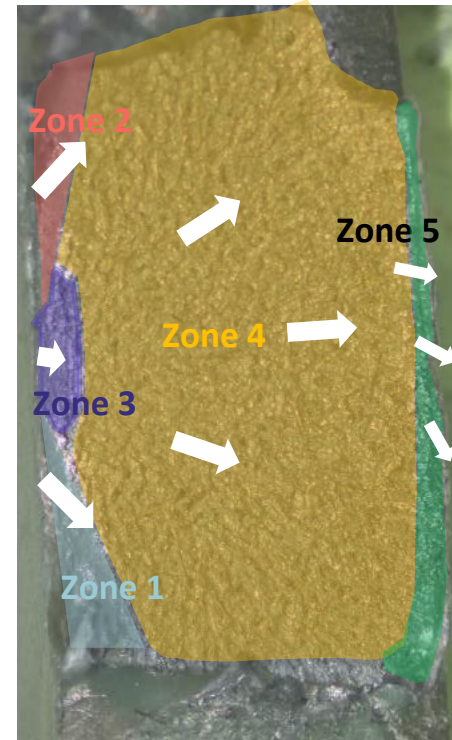
- Amorçage côté intérieur et propagation lente perpendiculairement au bord sur 4 mm par corrosion sous-contrainte
- Fissuration rapide du ligament parallèlement aux bords
- Initiation de deux autres fissures sur le côté opposé de la pièce
- Niveau de chargement mesuré sur le faciès ($64 \text{ MPa.m}^{1/2}$) conforme aux performances attendues du matériau et incompatible avec la pression interne appliquée (100 bar).
- ➔ Déformation de la pièce (par instabilité structurelle) antérieure à la fissuration
- ➔ Mise en évidence d'un défaut géométrique à l'origine de l'instabilité produit lors de la fabrication



UN CAS D'USAGE DE **DEFAILLANCE D'UNE** **PIECE POLYMERE** EN DEVELOPPEMENT

Le liner en PE d'un reservoir à hydrogène a rompu lors d'un test de fatigue (chargement cyclique). La pièce, qui s'est fissurée au niveau du connecteur a été envoyé à Tortoise afin d'effectuer une analyse de défaillance. Après analyse du champ de hauteur du faciès de rupture :

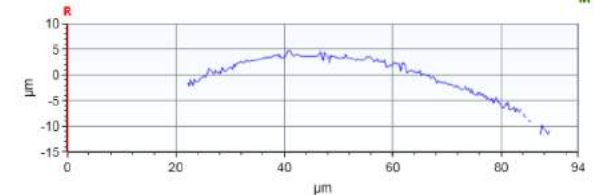
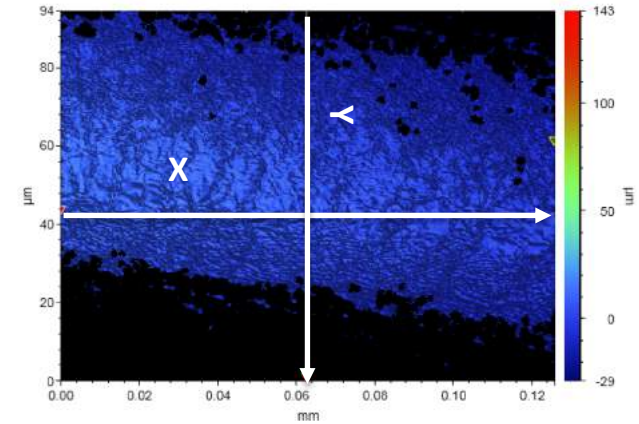
- 5 zones ont été identifiées :
 - **Zone 3** : zone d'initiation de la fissure
 - **Zone 1 et 2** : deux zones de cisaillement sur les côtés de la **Zone 3**
 - **Zone 4** : zone de propagation lente de la fissure
 - **Zone 5** : fin de la fissure avec un arrachement
- La mesure du chargement appliqué au moment de l'amorçage (60MPa) et de la chronologie de la défaillance (rupture lente 10^{-8} m/s puis rapide 1 m/s) ont permis de revisiter le design et augmenter le nombre de cycles à rupture.



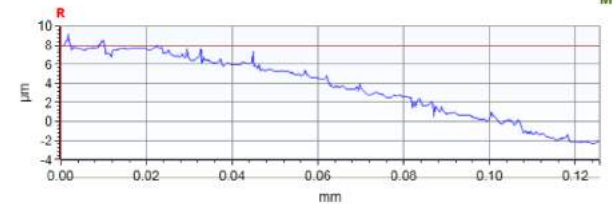
UN CAS D'USAGE DE DEFAILLANCE DE MATIERE ORGANIQUE

Un client cherche à comprendre l'origine des fourches des cheveux afin de concevoir de nouveaux shampoings

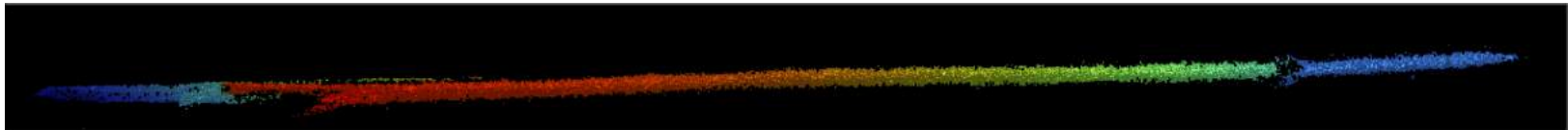
- Mise en place de moyens d'essais adaptés permettant le scan de la surface de rupture des cheveux (diamètre de 50 microns)
- Identification de la zone d'amorçage de la fissure
- Détection de la direction et du sens de propagation de la fissure
- Estimation des vitesses de fissuration et de la durée de formation d'une fourche (plusieurs mois)
- Détermination des causes racine à l'origine de la fissuration
- Développement de solutions permettant de retarder amorçage et propagation de la fissure à l'origine des fourches



Profil des hauteurs le long de l'axe X



Profil des hauteurs le long de l'axe Y



D'AUTRES EXEMPLES D'APPLICATIONS



▪ Caractérisation matériau

- Définition du $\frac{\Delta K}{\Delta K}$ sur un échantillon d'essai
- Mesure du K_{Ic} , K_{Jc} et CTOD sur éprouvettes entaillées de traction ou de résilience
- Mesure de ténacité sur un câble après un essai de fatigue

▪ Matériaux non métallique ou en conditions extrêmes

- Mesure de ténacité sur matériau irradié ou fragilisé par hydrogène
- Analyse de défaillance et caractérisation de roches argilite
- Analyse de défaillance sur cheveux
- Mesure de ténacité sur céramique,

matériau CuAg

▪ Analyse de défaillance

- Analyse de défaillance sur
 - éprouvette submillimétrique (feuillard)
 - une vis rompue en fatigue
 - un barreau (à limite élastique hétérogène) rompu en flexion
 - un foret d'exploration pétrolière
 - un bogie rompu lors d'un essai de développement
 - sur le flambage d'une plaque en milieu cryogénique
 - un tuyau sous pression

- Analyse de défaillance sur DM ?
Caractérisation matière ? ...

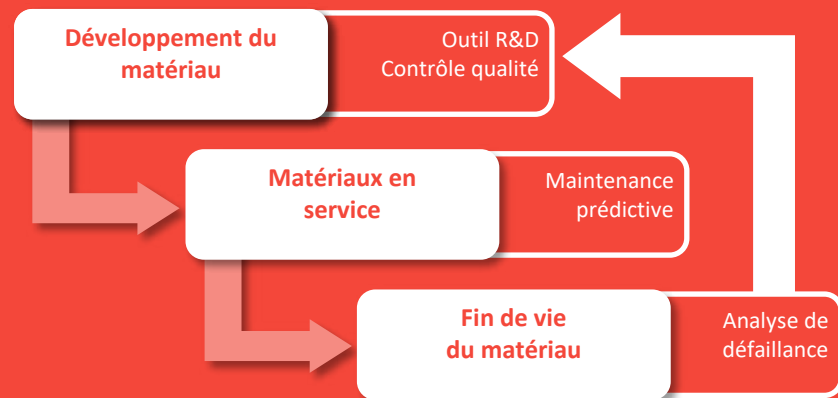
L'ORÉAL



HALLIBURTON



UN MOYEN DE CARACTÉRISATION PUISSANT ET AGILE



Outil de R&D et contrôle qualité

Améliorer les performances des matériaux



Maintenance prédictive

Mesurer la résistance résiduelle des matériaux



Analyse de défaillance

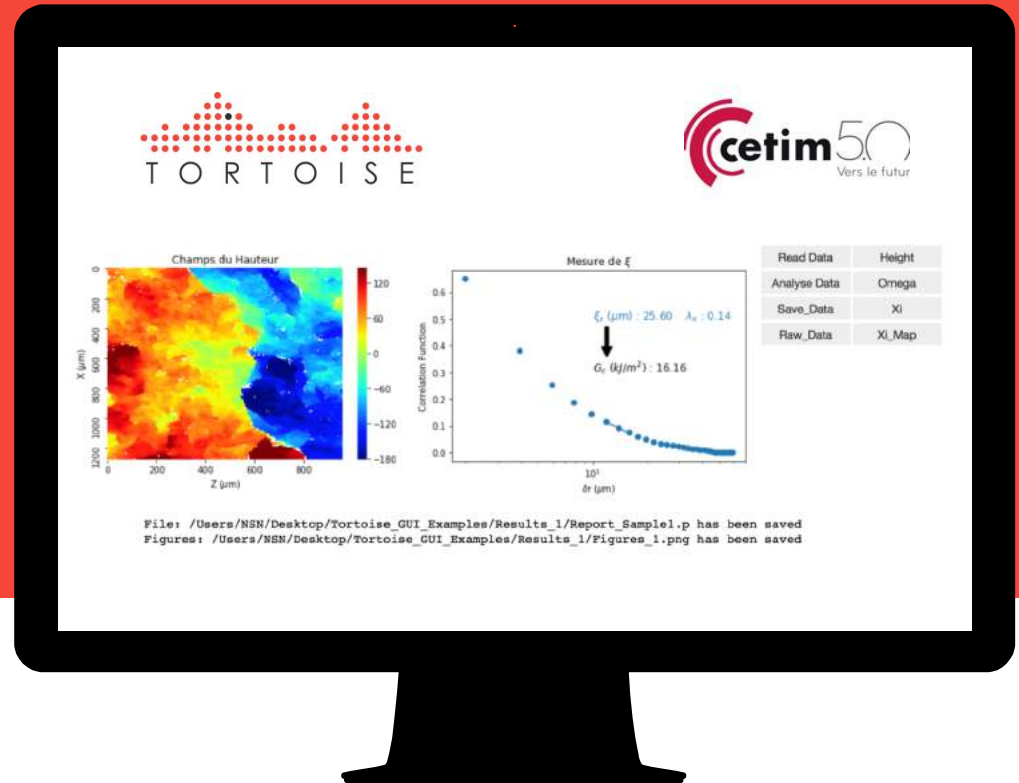
Expliquer la rupture des matériaux



UN ACCÈS SIMPLE

Plateforme SaaS multi-matériaux et multi-usages pour

- Analyser et expliquer les défaillances
- Caractériser les matériaux
- Constituer une base de données sur les matériaux et leurs défaillances

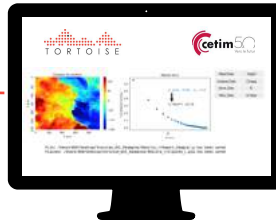


CANAUX D'ACCÈS À LA TECHNOLOGIE

Via de la prestation
de service



Via notre logiciel



framatome



Merci

Laurent Ponson
laurent.ponson@tortoise.io
+33 6 84 10 75 16

QUEL PROFILOMÈTRE ?

Pas de préparation d'échantillons nécessaire (surface de scan doit être dégagée...) et non destructif

Différents profilomètres adaptés aux différentes utilisations

Interférométrie et confocal - Bruker

- ▶ $< 2 \mu\text{m}$
- ▶ Surfaces moyennes ou petites
- ▶ Acquisition précise



Nanovea JR25
Confocal



Bruker Contour GT-K
Interférométrie

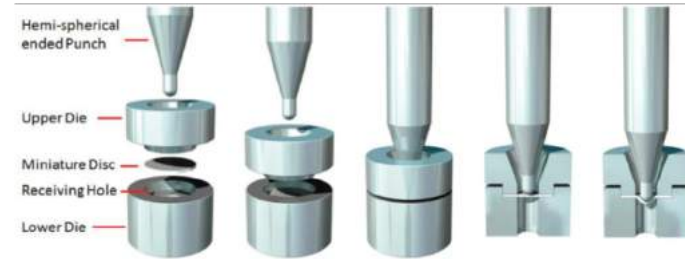
Variation focale - Alicona

- ▶ $\sim 5 \mu\text{m}$
- ▶ Surfaces moyennes ou grandes
- ▶ Acquisition rapide

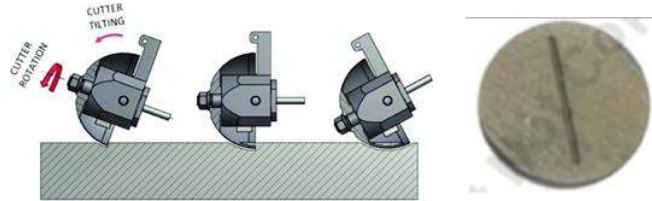


Alicona InfiniteFocus SL
Variations focales

MAINTENANCE PREDICTIVE SUR MICRO ECHANTILLON



Bruchhausen, M., Altstadt, E., Austin, T., Dymacek, P., Holmström, S., Jeffs, S., Lacalle, R., Lancaster, R., Matocha, K., Petzova, J. 2018. European standard on small punch testing of metallic materials. *Ubiquity Proceedings*, 1(S1): 11 DOI: <https://doi.org/10.5334/uproc.11>

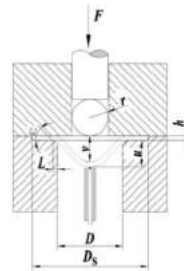


Etape #1:

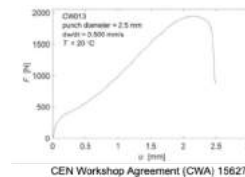
Prélèvement d'un échantillon millimétrique sur pièce en service (scoop system) et préparation d'une micro-éprouvette

Etape #2: Rupture de la micro-éprouvette par emboutissement

Test mécanique instrumenté

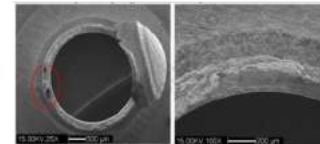


Courbe force déplacement



Propriétés élasto-plastiques
(E , σ_y , n)
par modélisation du punch test

Façies de rupture



Propriétés de rupture
(K_{Ic} , G_c , σ_c ...)
par fractographie statistique



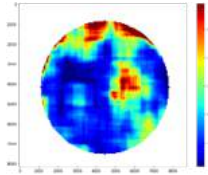
Remarque: Méthode adaptée à la détermination des propriétés de rupture à haute température, sous irradiation... car basée sur un test non-instrumenté

Etape #3: Détermination des propriétés mécaniques

APPLICATIONS EN MAINTENANCE PREDICTIVE

Détermination de la nocivité des défauts

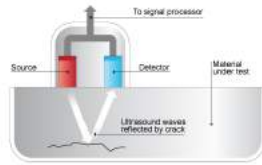
Ténacité



Caractérisation des propriétés à rupture dans les conditions réelles de la structure



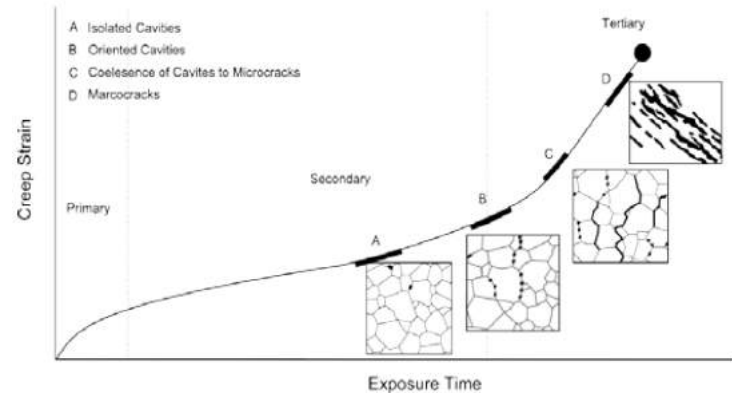
Prédiction de l'évolution des fissures et évaluation de leur nocivité pour la structure



Détection des fissures et mesure de leur taille par ultrason



Vers une alternative quantitative à la méthode des répliques



Détermination du niveau de vieillissement (et donc de la durée de vie résiduelle) à partir de la mesure des propriétés mécaniques