

The Transition Institute 1.5

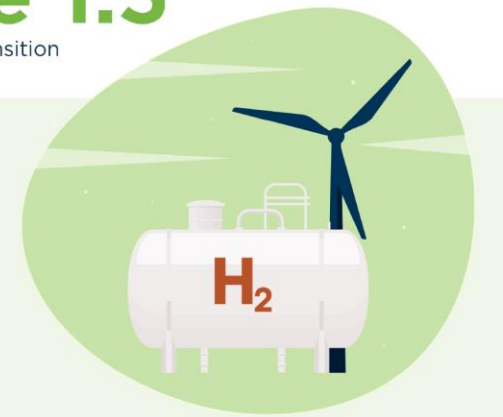
L'ambition d'une véritable transition



SÉMINAIRE TTI.5

SÉANCE 3 :
HYDROGÈNE-ÉNERGIE

JEUDI 19 JANVIER 2023
À 13H30 (EN LIGNE)



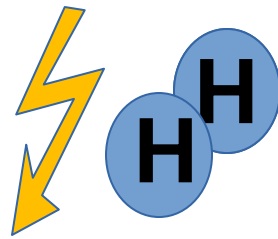
Sureté des structures métalliques vis-à-vis de l'hydrogène

Yazid MADI

MINES Paris – PSL - Centre des Matériaux, CNRS UMR

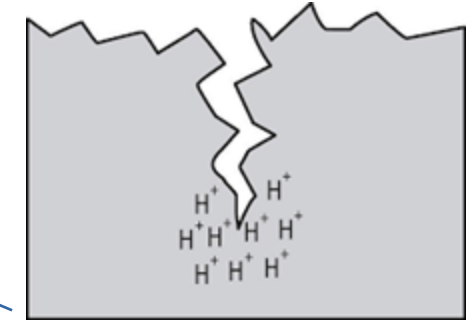
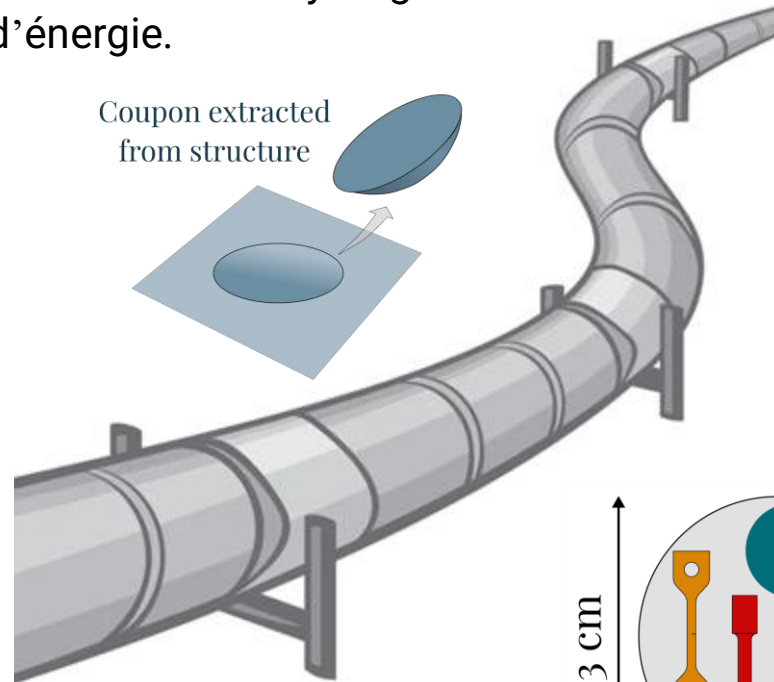


Contexte et enjeux de la chaire



L'hydrogène vert peut être produit avec l'énergie excédentaire d'autres sources renouvelables, comme l'énergie éolienne et le solaire.

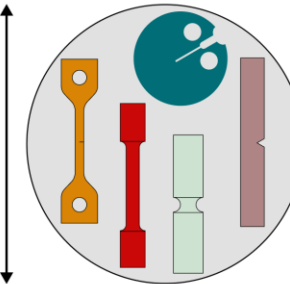
Le transport d'hydrogène à l'aide de canalisations dédiées au gaz naturel déjà existantes (40000 km en France, 50 milliards € d'actif, **80 ans**) est une proposition qui pourrait permettre l'utilisation de l'hydrogène comme source d'énergie.



Effet de la FPH ?



Mesurer les **caractéristiques des matériaux** à partir de **petits prélèvements**

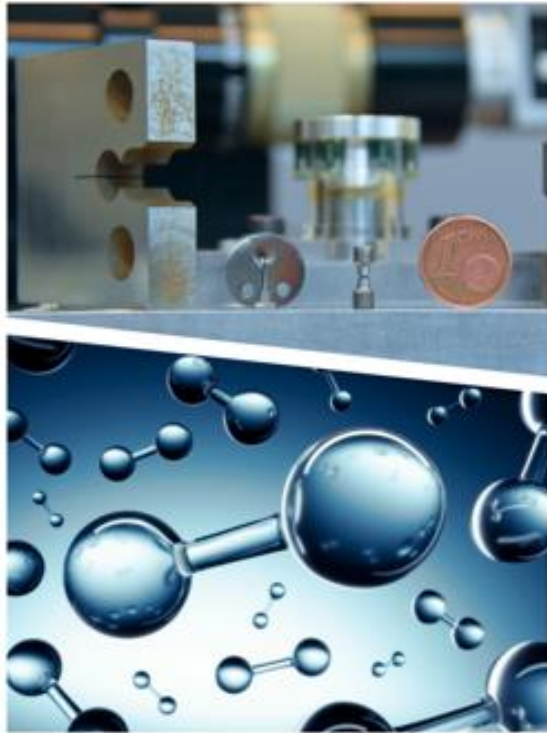


Titulaires de la chaire
Jacques BESSON, Yazid MADI

La fragilisation de l'hydrogène concerne d'autres domaines

- ✓ Stockage dans des conteneurs en acier/composite (Mobilité)
- ✓ Stockage géologique avec liner en acier (discussion avec GéoStock)
- ✓ Les systèmes utilisant l'hydrogène : piles à combustibles, réduction de l'oxyde de Fer (production d'acier sans carbone), ...
- ✓ Transport de l'hydrogène liquide (GTT/Air liquide)
- ✓ Aviation (dans un futur sans doute lointain) : moteur à hydrogène (Airbus/Safran)
- ✓ Production d'hydrogène grâce à des réacteurs nucléaires dédiés (projets à l'arrêt, réacteurs de 4^{ème} génération)

Projet MESSIAH



Mini-Éprouvettes pour le Suivi en Service des structures avec Application au transport d'Hydrogène

Mini-samples for in-service monitoring of structure with application to hydrogen transportation



Objectifs :

- ✓ Développer une procédure de caractérisation mécanique du comportement plastique et à rupture à partir de coupons millimétriques prélevés in situ
- ✓ Étendre cette procédure pour étudier la fragilisation des structures par l'hydrogène
- ✓ Proposer une méthodologie d'analyse des résultats et de transfert vers les éprouvettes standard et les structures.

Les par



➡ Partners



Meso-seggregation in large forged parts.



End-user — gas transportation ($\text{CH}_4 + \text{H}_2$ in existing pipes).



H_2 production, storage and transportation.



Tube producer



Code developer and distributor

➡ PhD students

**Numerical
tools and
POC**



A. El Tuhami Ouazani : Non-local GTN model with remeshing (finished 2022)

C. Belhadj : Testing protocol for mini-specimens — test database (finished 2022)

A. Christal : Master Curve in segregated C–Mn steels (started 2020)

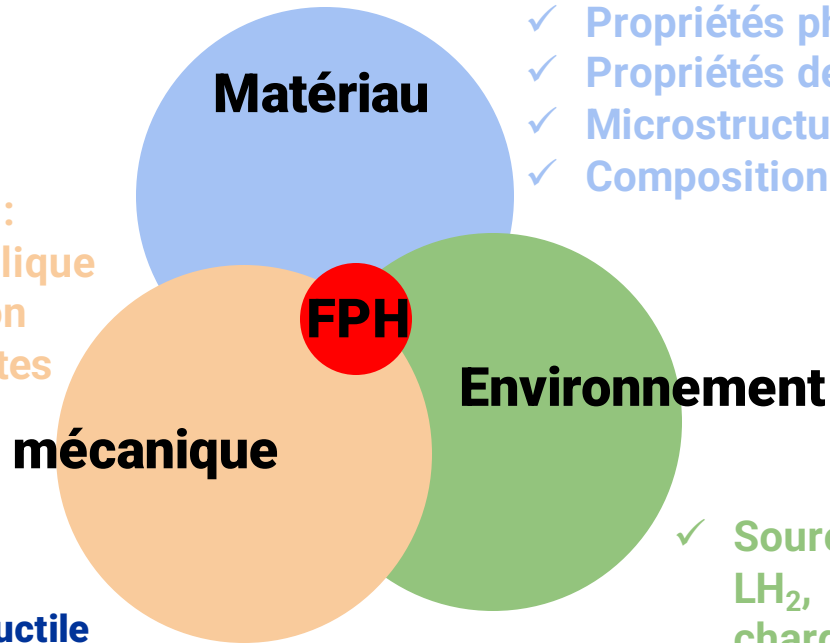
S. Belkacemi : Study of welds in a X52 “vintage” line pipe steel (started 2022)

L. Meirelles Santana : Comparison of “vintage” and “modern” steel (started 2022).

D. Lopes Pinto : FE simulation of the effect of H on plasticity and fracture (started 2022).

Interaction matériaux métalliques et H₂ (FPH)

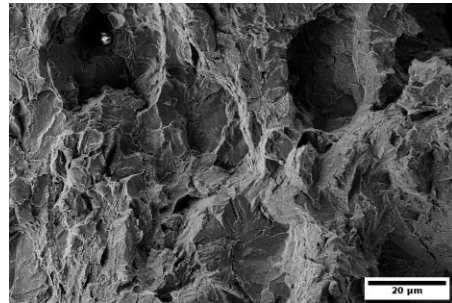
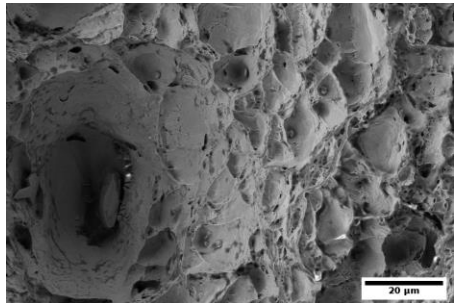
- ✓ Propriétés mécaniques
- ✓ Propriétés physiques
- ✓ Propriétés de transport H
- ✓ Microstructure
- ✓ Composition chimique



- ✓ Chargement : statique, cyclique
- ✓ Concentration des contraintes (fissures, soudures)
- ✓ Pression H₂

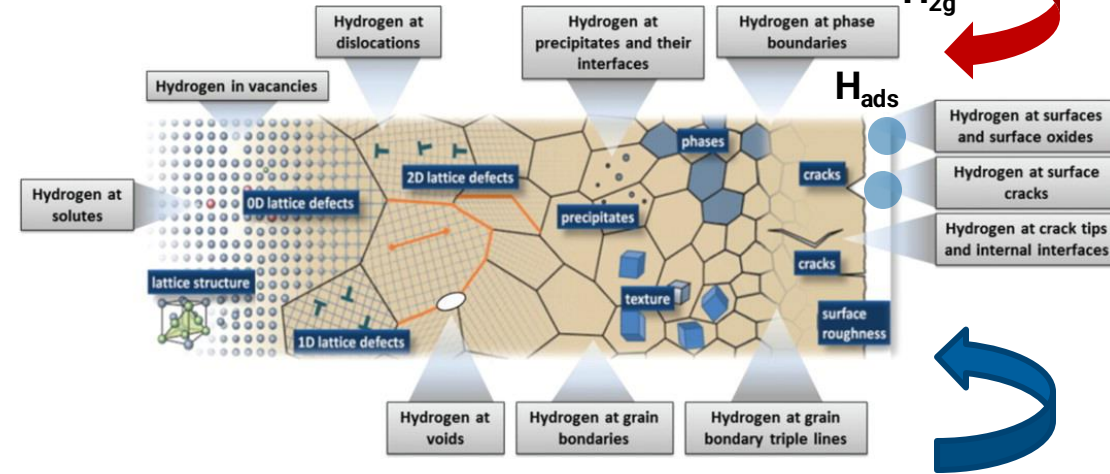
- ✓ Source H : H₂, LH₂, chargement électrolytique
- ✓ Température
- ✓ Teneur en impuretés (O₂, Humidité)

Rupture ductile



Rupture quasi-fragile

Interaction H₂-plasticité impliquant des sites de piégeages et/ou des sites de transport



Koyama et al., Mater. Science and Tech., 2017

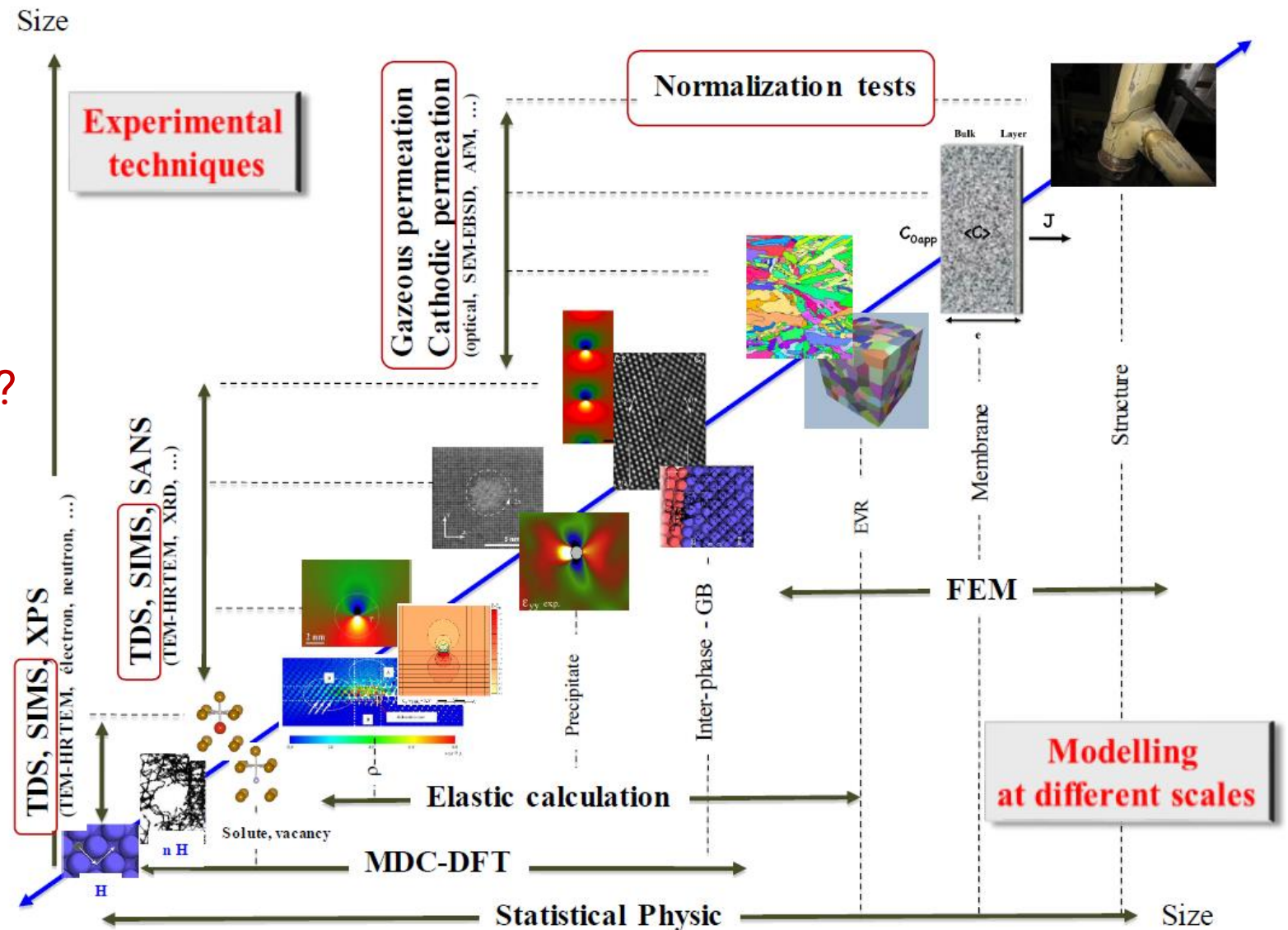
Phénomènes de surface

L'hydrogène se dissocie à la surface du métal

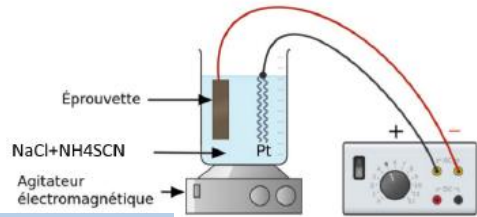
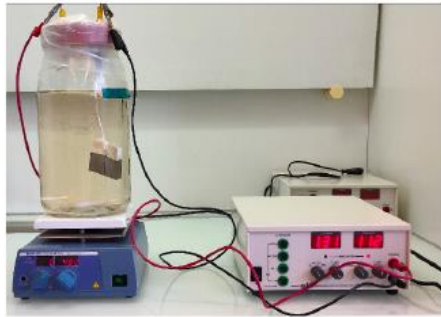
La présence d'une couche d'oxyde peut gêner la dissociation et/ou l'entrée de H_{ads}

Mesure et caractérisation de H dans les matériaux métalliques

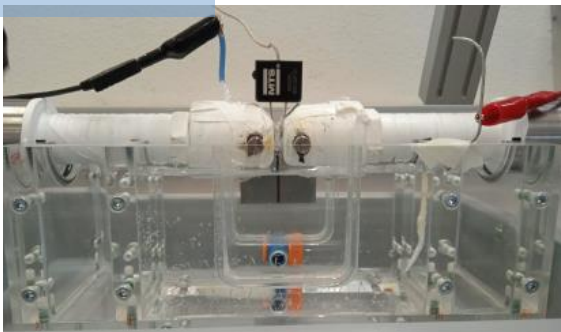
- ✓ Quantifier H ?
- ✓ Qualifier le transport de H ?
- ✓ Localiser H dans la matière ?



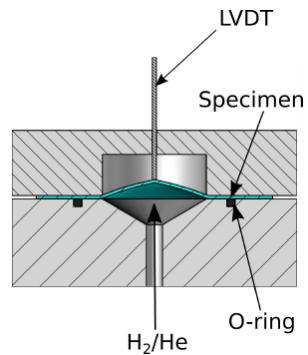
Hydrogen experiments



Electrolytic charging



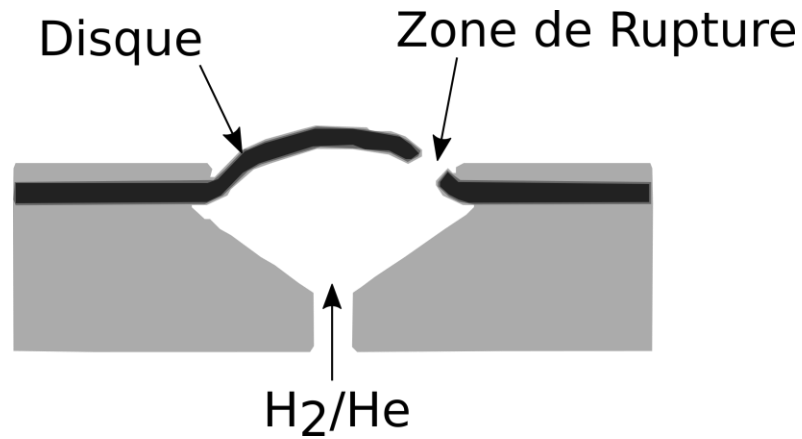
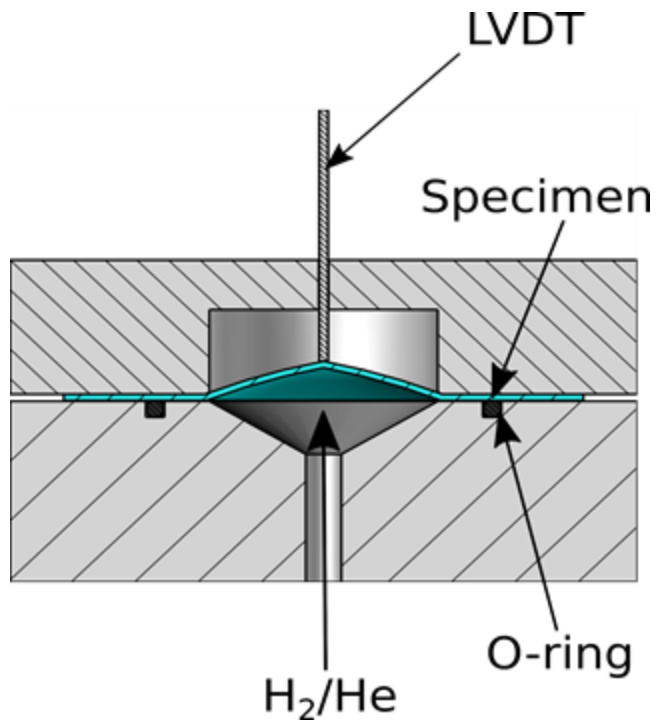
Gaseous charging



Different methods of charging

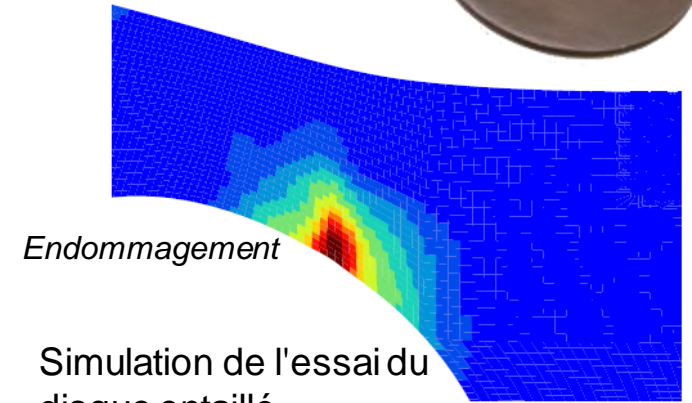
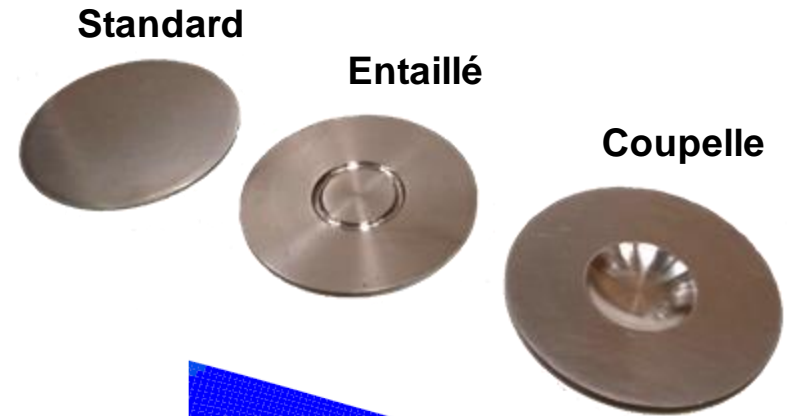
1. Mechanical testing under gas pressure (in-situ) : MINES (**Subsize**), GRTgaz (Standard), Air liquide (Disc)
2. Electrolytic charging then mechanical testing (ex-situ) : MINES (standard)
3. Hydrogen electrolytic concurrent charging technique (in-situ) : MINES (standard)

Essais de rupture de disques



Cependant, le disque rompt souvent dans la zone de serrage.

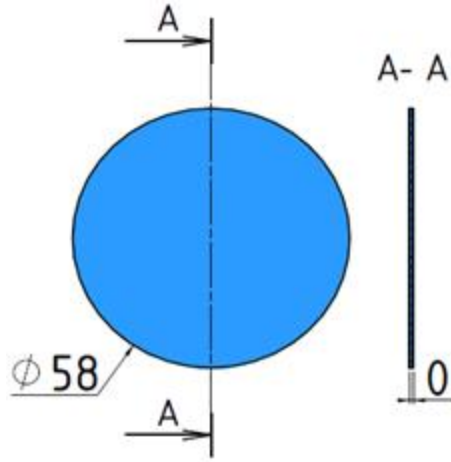
Internship S. Kemkang
PhD L. Meirelles-Santana



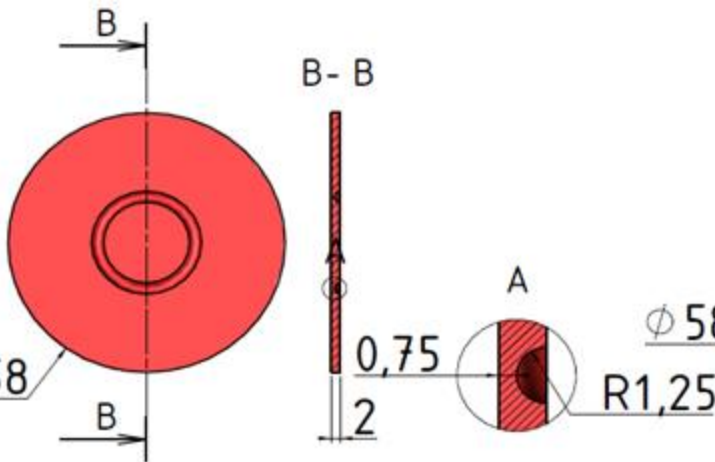
La norme ISO 11114-4 utilise un test de disque pressurisé pour sélectionner les matériaux métalliques résistant à la fragilisation par l'hydrogène.

Repenser la géométrie du disque pour contrôler l'emplacement de la rupture et avoir un index de fragilisation comparable le disque standard

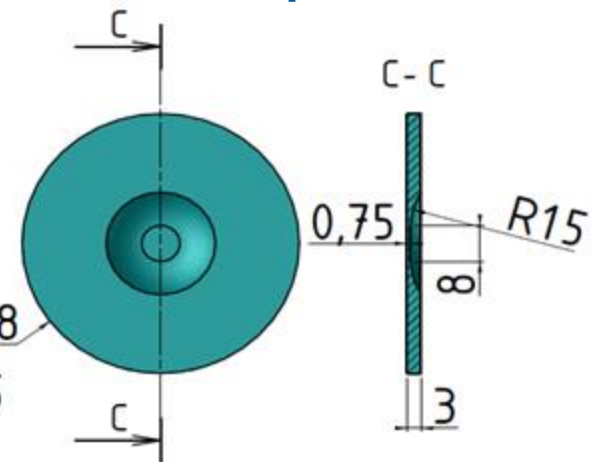
Standard



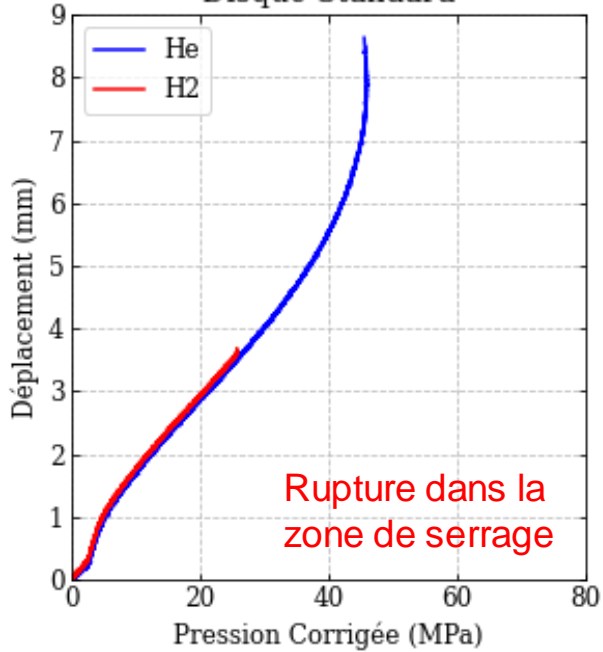
Entaillé



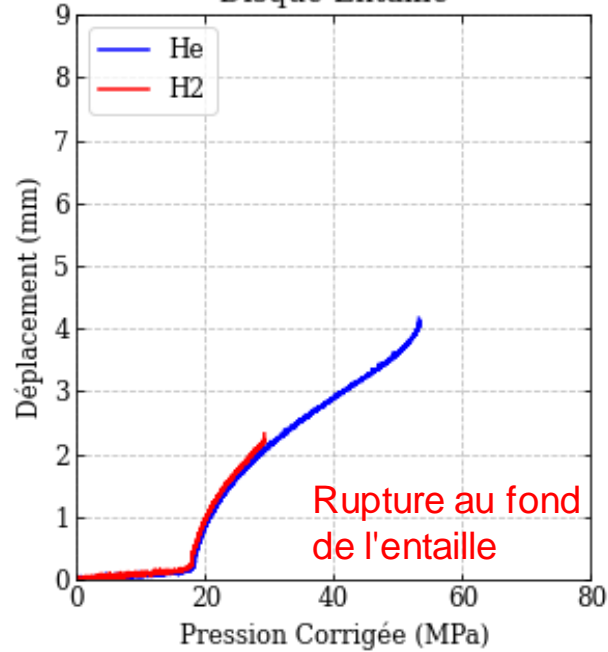
Coupelle



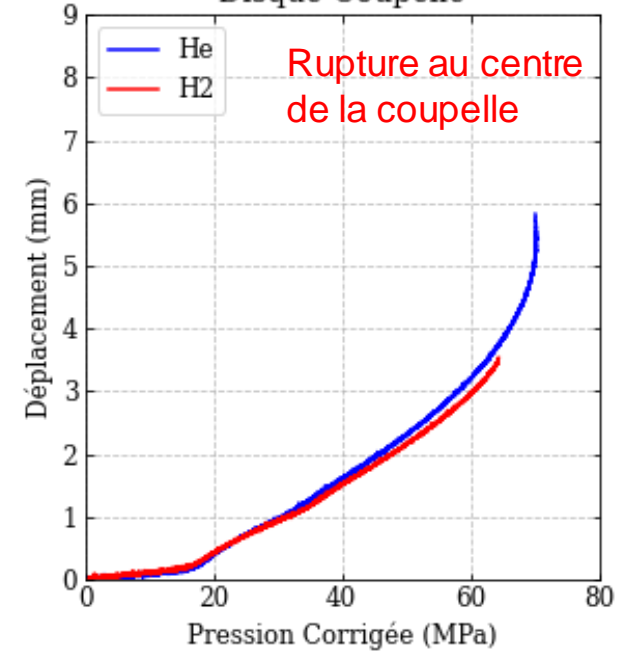
Disque Standard



Disque Entaillé

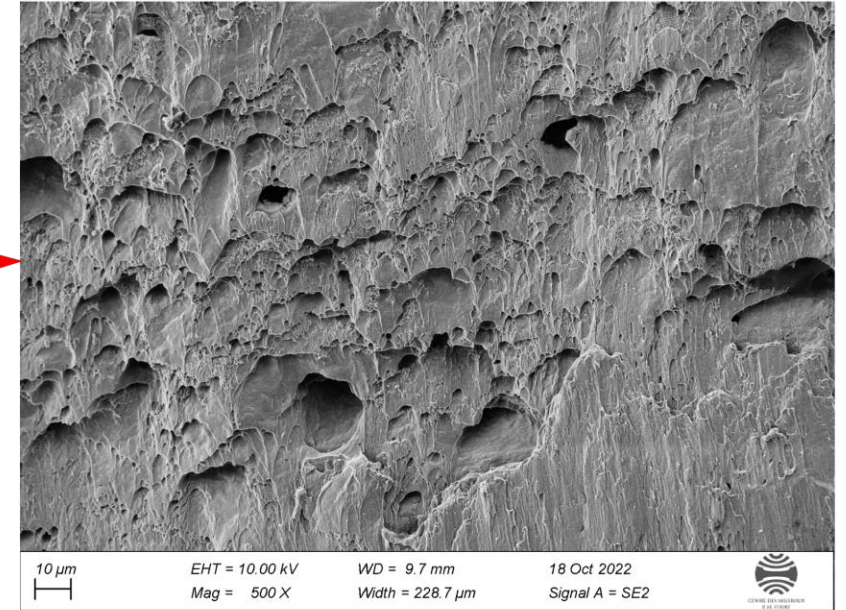
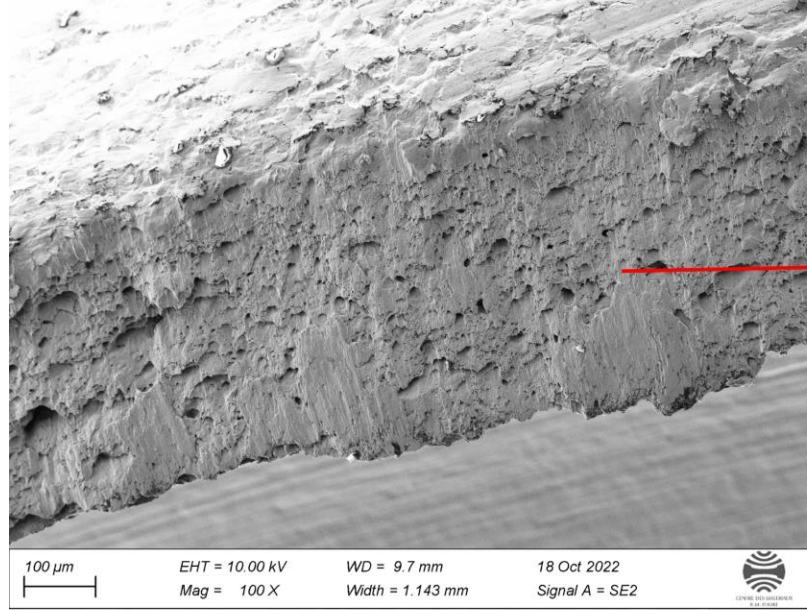


Disque Coupelle

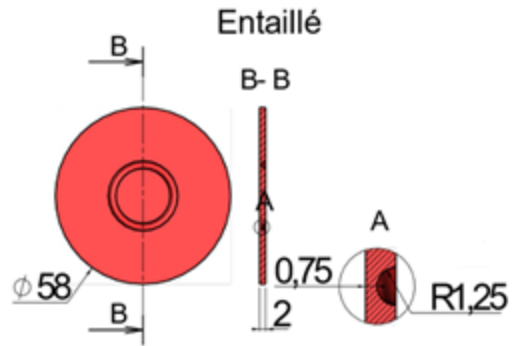
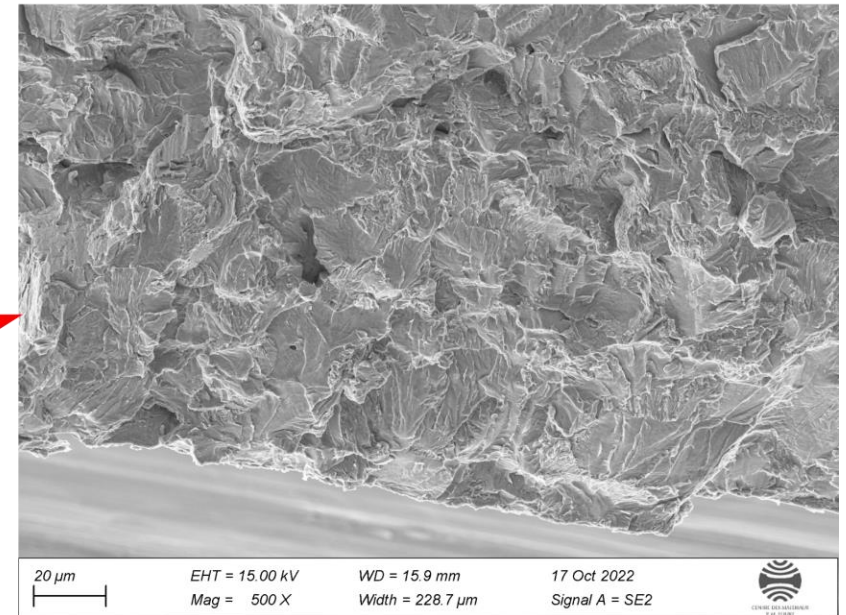
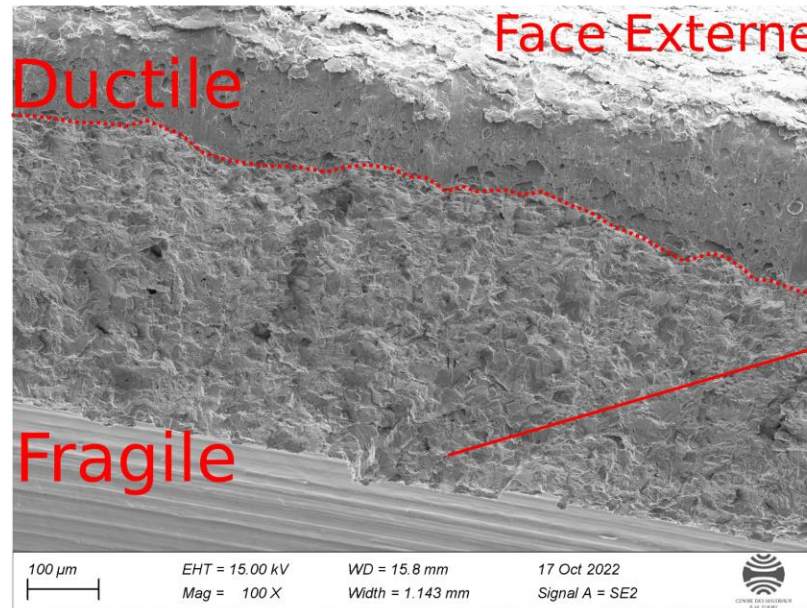


Matériau Moderne - Helium vs Hydrogène

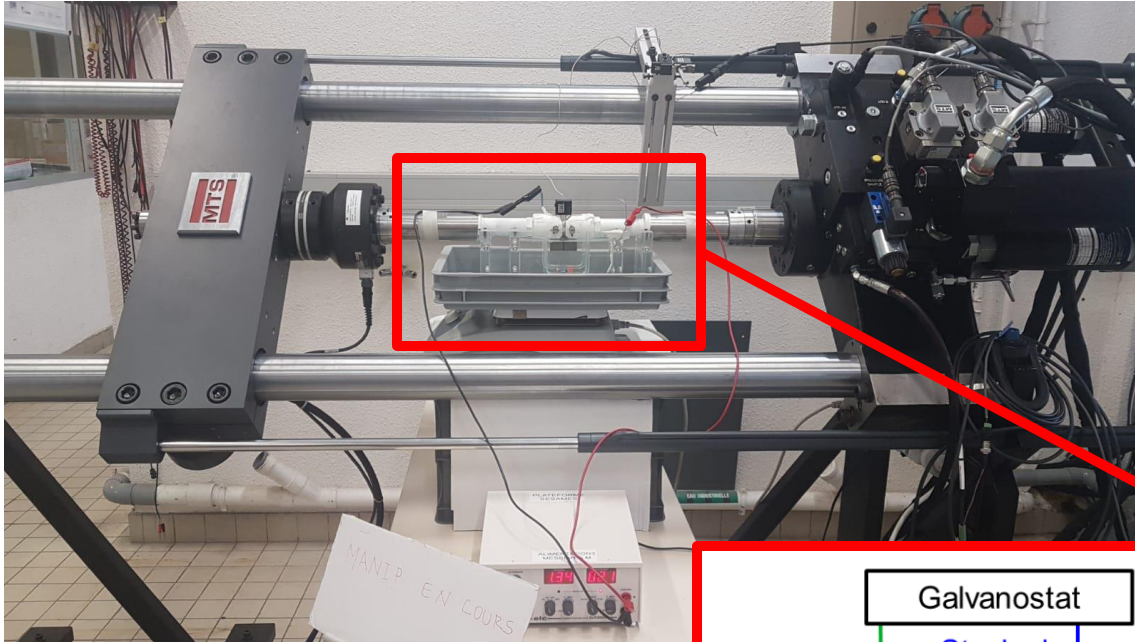
He



H₂

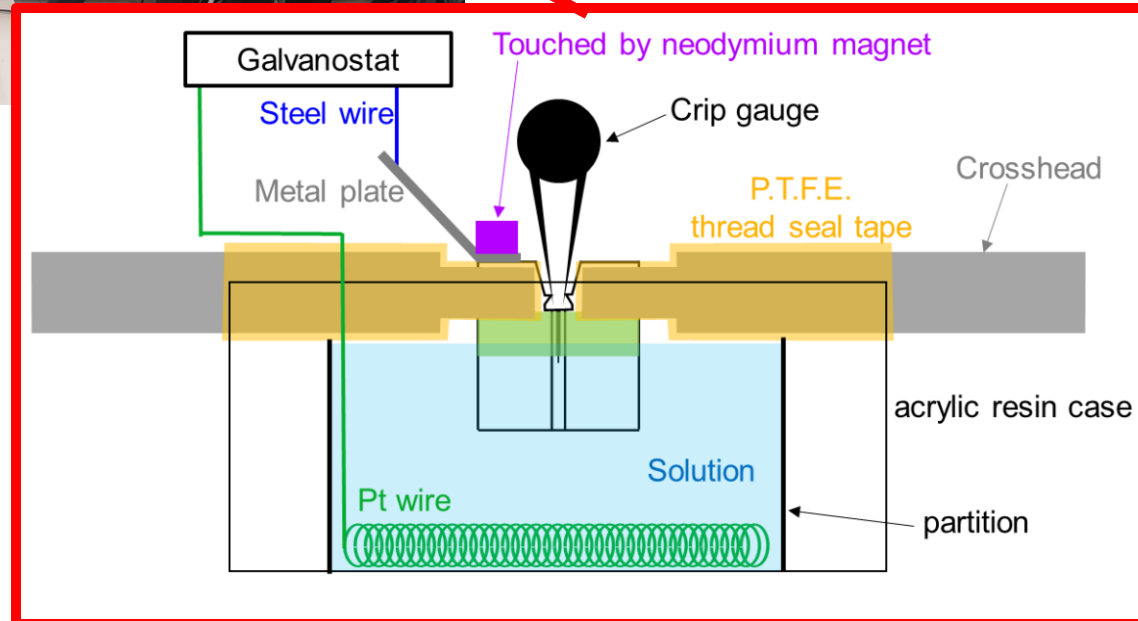


In-situ electrolytical hydrogen charging experiments (CMAT)



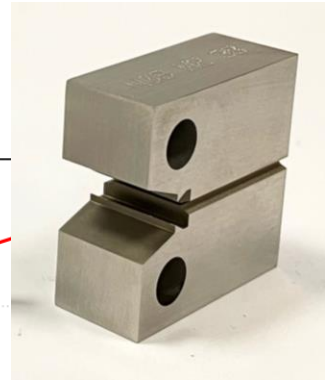
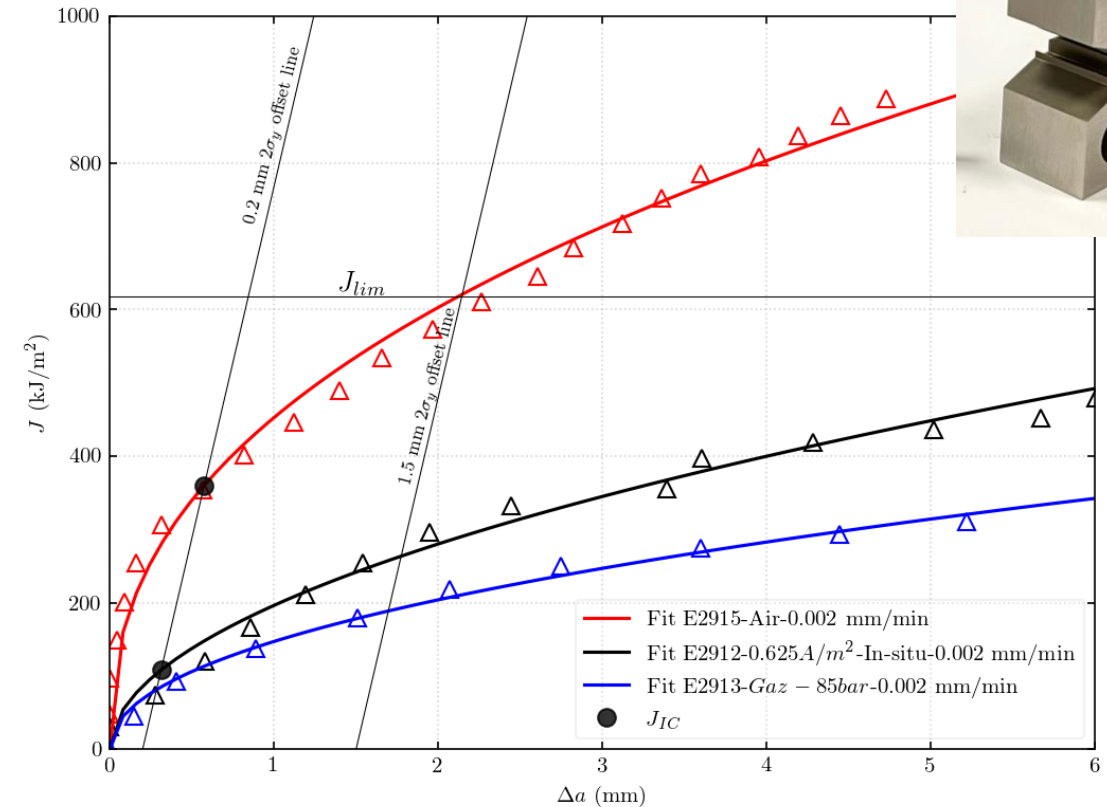
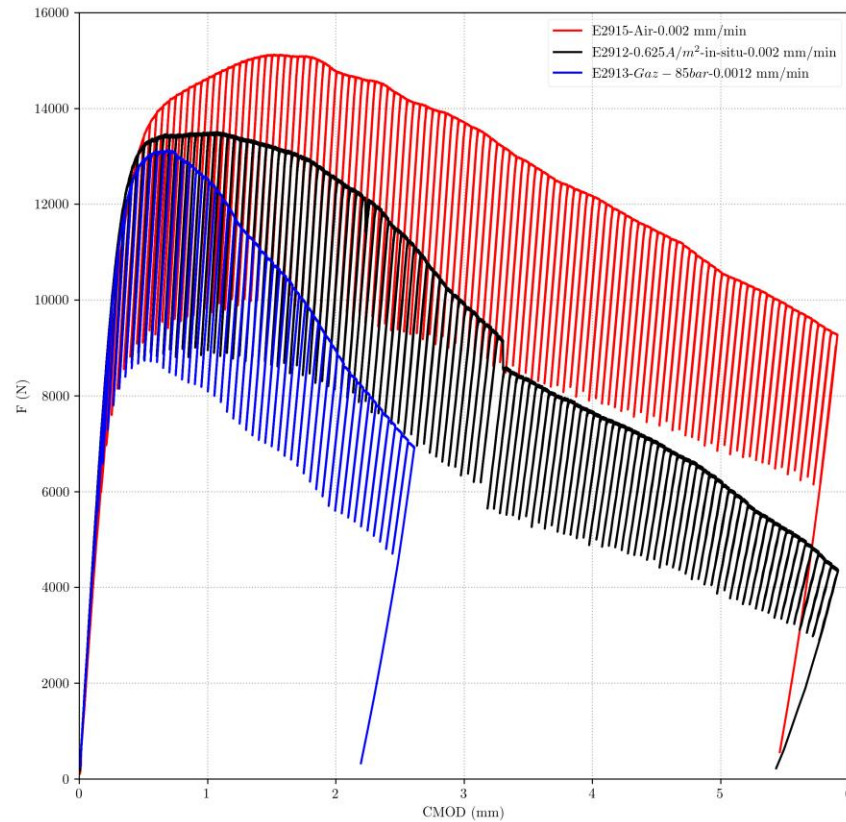
- ❑ Horizontal machine: **Clip Gauge outside the solution**
- ❑ Toughness testing
- ❑ Small rate (1-2 $\mu\text{m}/\text{min}$)
- ❑ Hydrogen concurrent charging technique: pre-charging time before testing
- ❑ **Propagation crack inside the aqueous solution**

Internship D. Degbe & Ing. V. Farrugia
PhD L. Meirelles-Santana



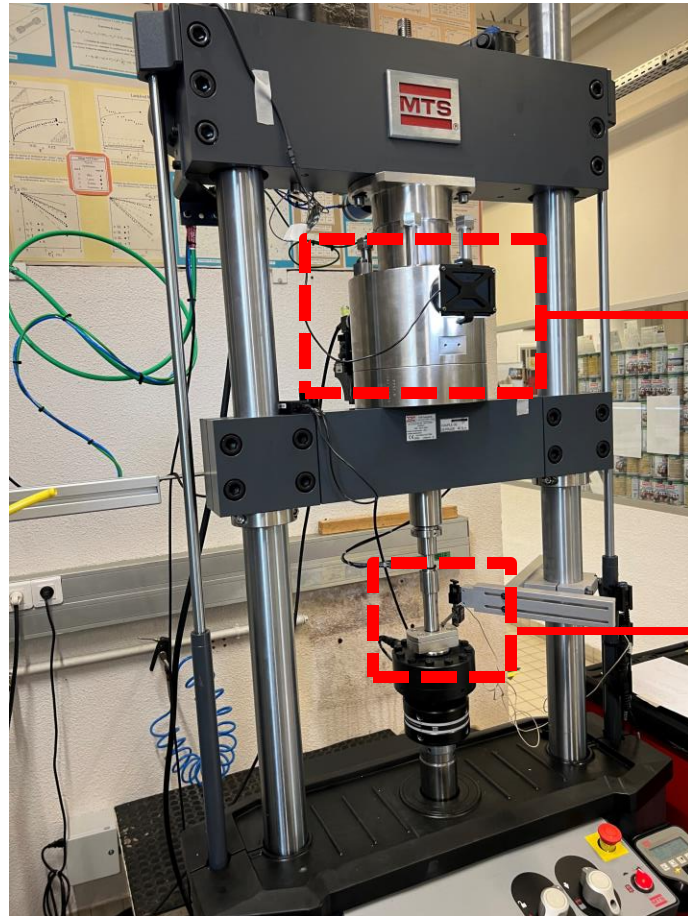
Toughness testing on “standard” CT

X52 « vintage » pipeline steel

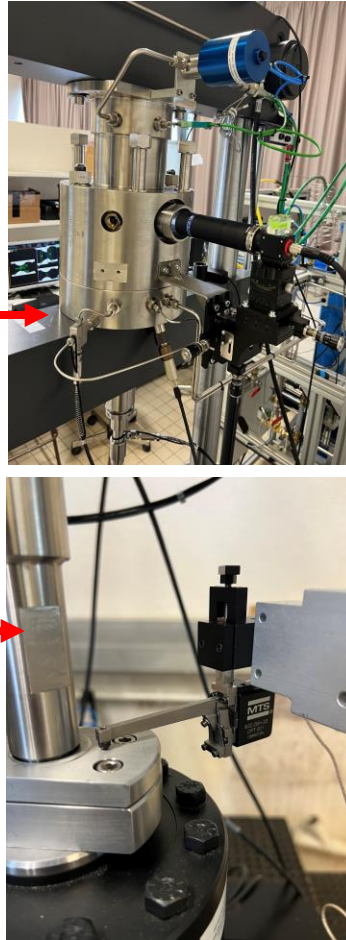


- A strong HE effect is observed on F-CMOD and J- Δa crack curves for both hydrogen charging methods.

Mini-samples and H₂ Gaseous experiments (CMAT)

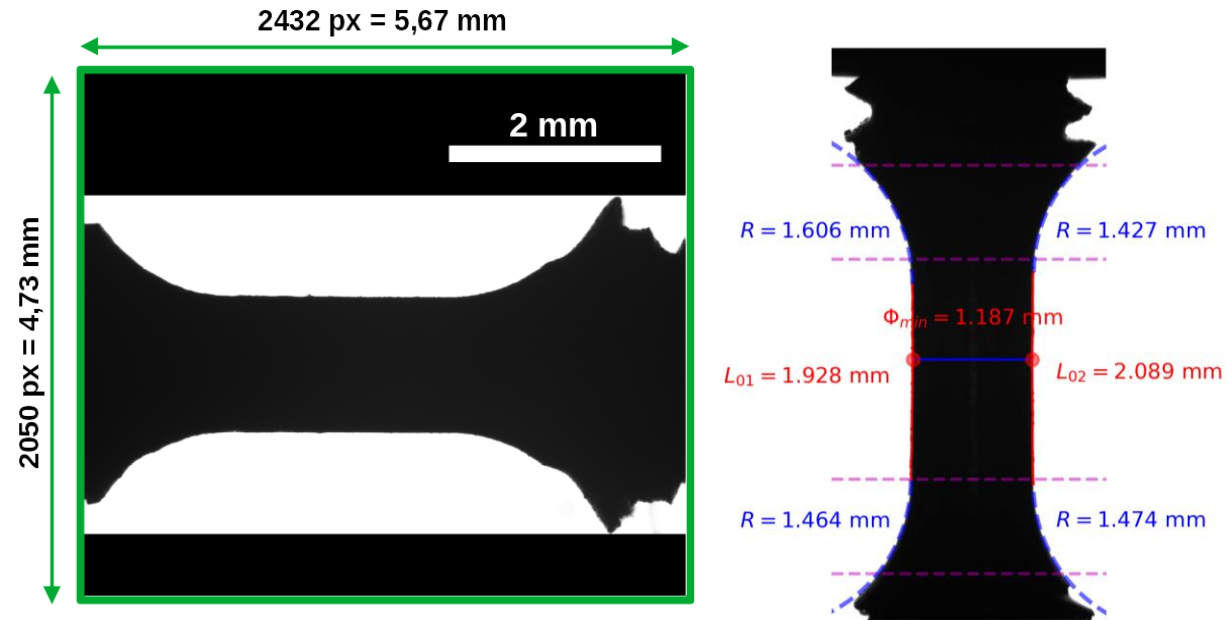


Gas pressurized tensile machine
Currently being built/tested



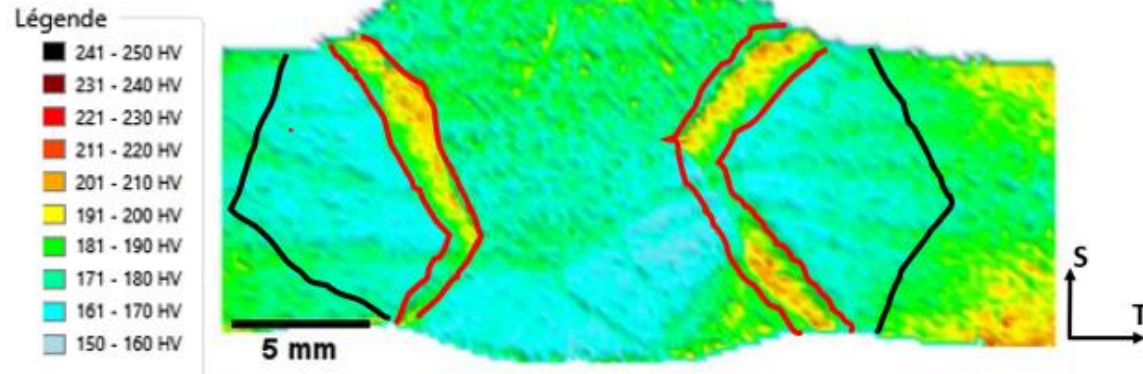
Internship E. Lenud
PhD S. Belkacemi

Field of view and specimen metrology



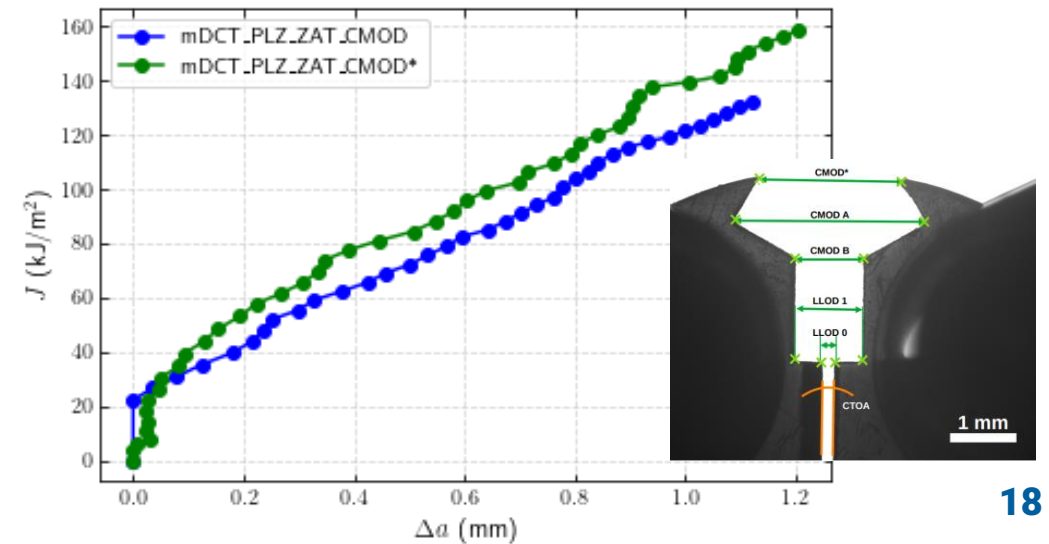
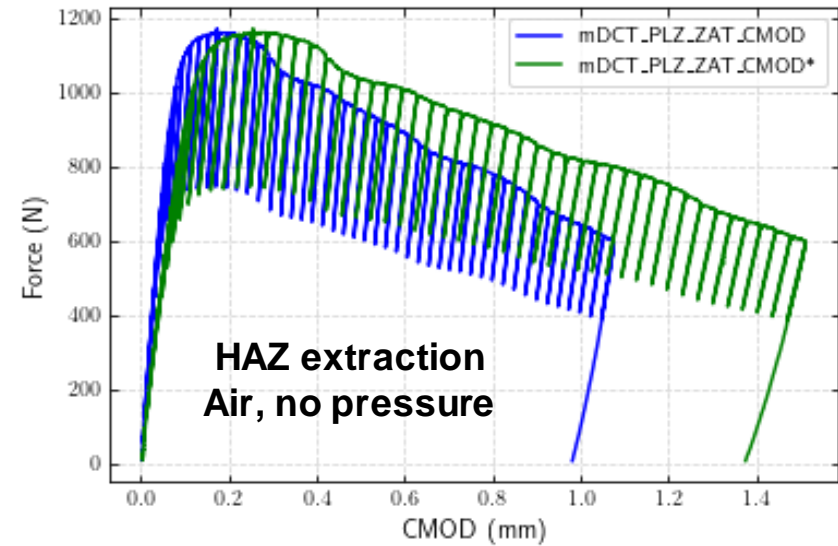
- Small rate (0,3 $\mu\text{m}/\text{min}$)
- Small pressurized chamber (up to 250 bar)
- No need for a specific atex environnement
- Load cell: 5kN
- Sapphire windows
- Optical extensometers using shadow images**

First result using optical control extensometer

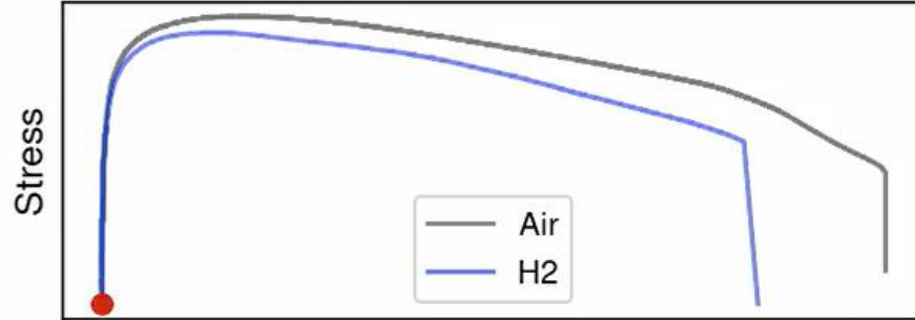


PhD S. Belkacemi,
Internship R. Kavege

RICE GRTgaz
Research & Innovation
Center for Energy

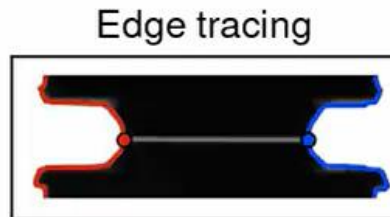


First H2 gas test at CMAT today!

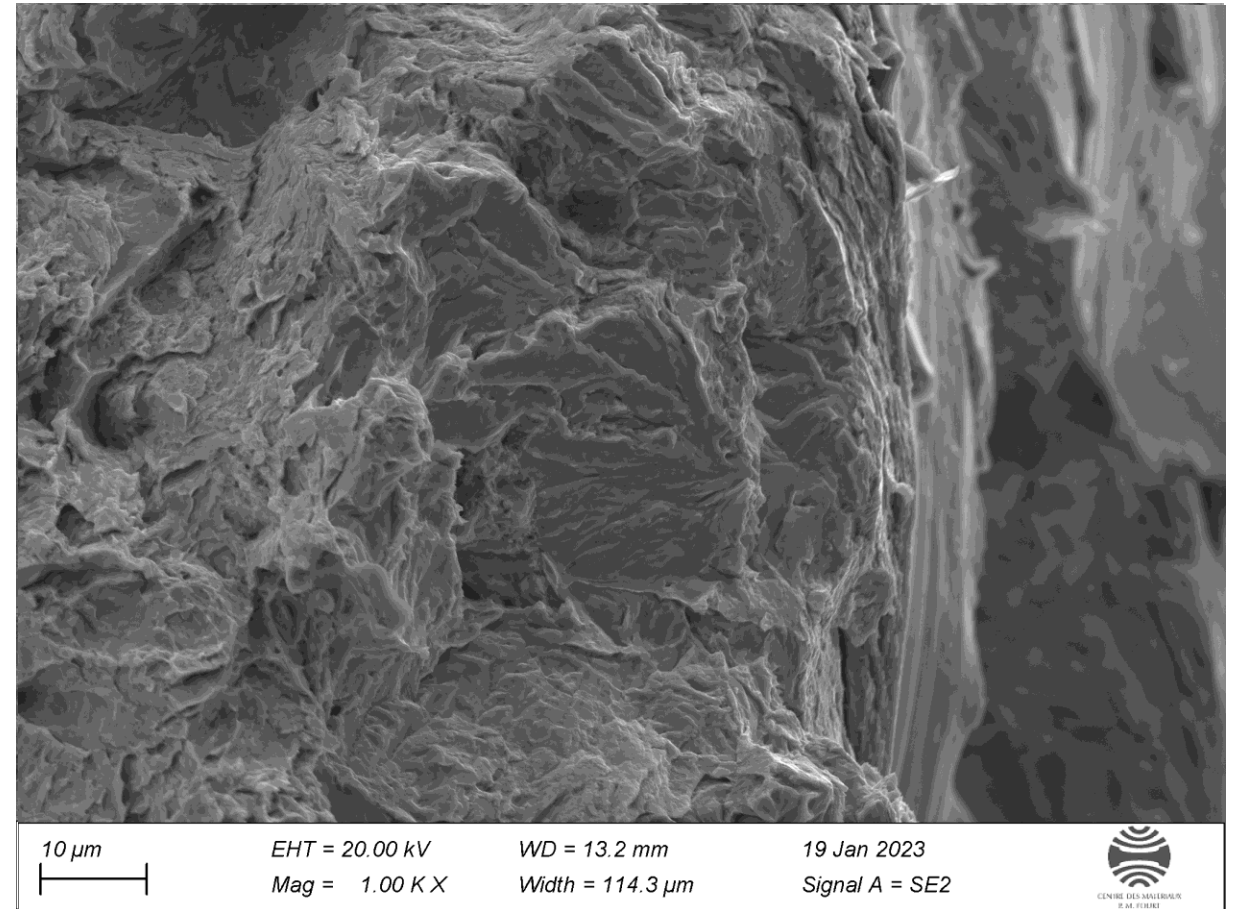
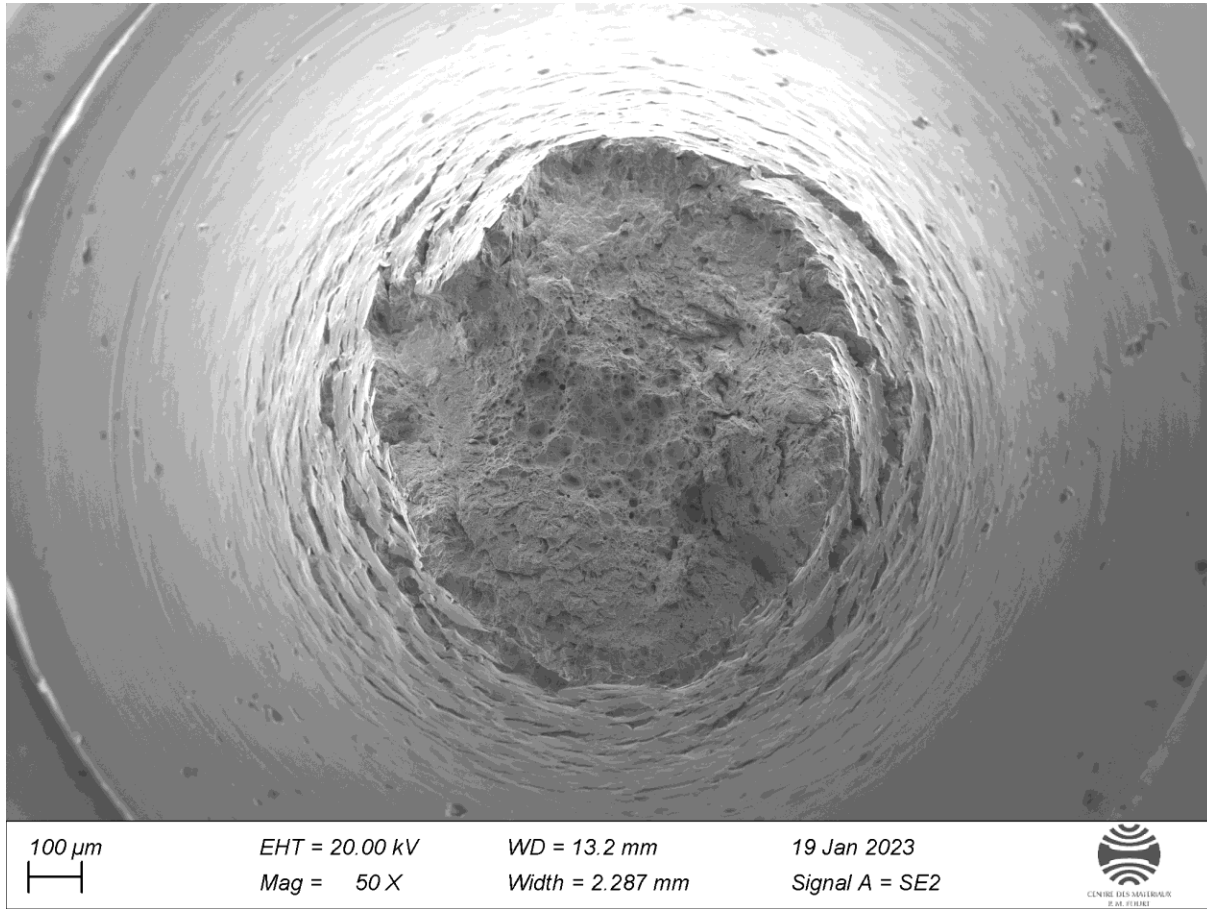


Radial contraction of the minimum cross-section

Focus on the left notch

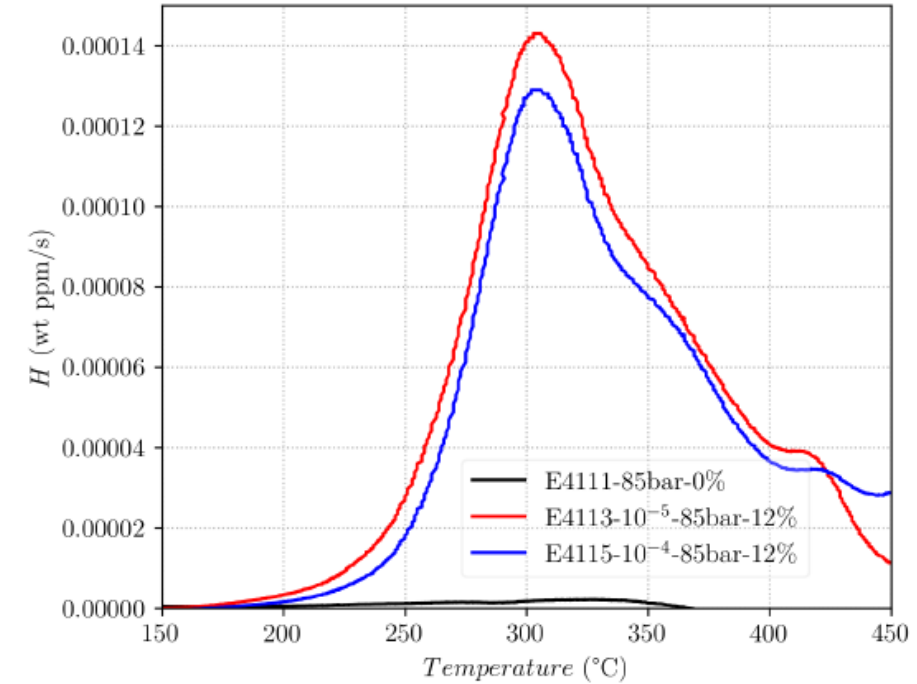
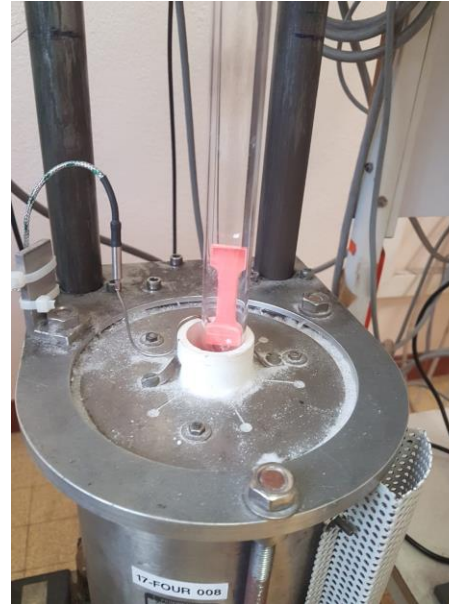
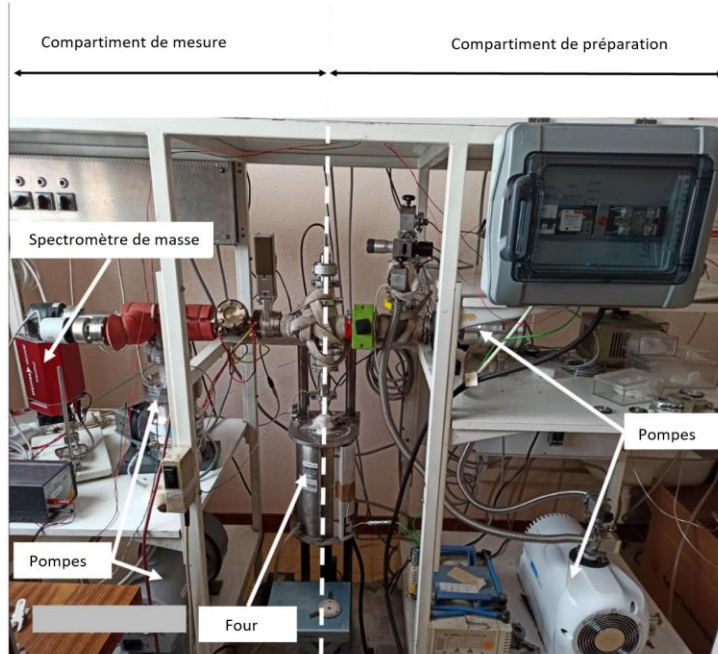


First H2 gaz test at CMAT today!



Teneur en H en environnement gaz → Mesures TDS

Collaboration
F. Christien

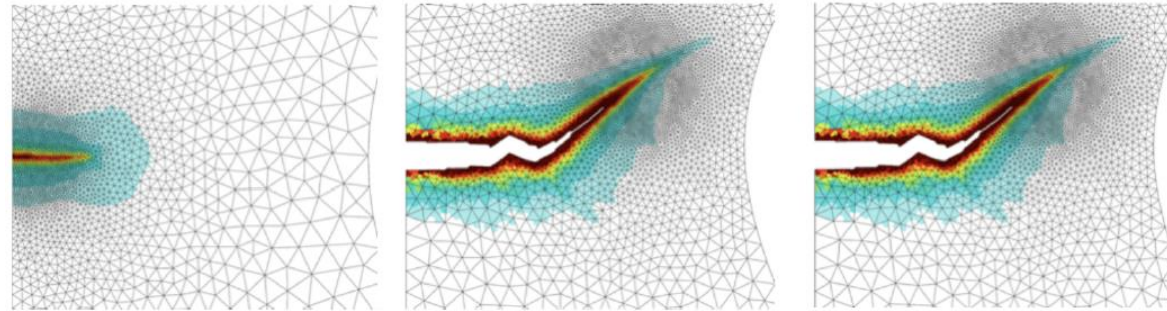


Eprouvettes	Vitesse (s ⁻¹) / Conditions	Teneur en H ₂ (wt. ppm)
E4114	10 ⁻⁴ , Air	Référence
E4111	Sans traction, Pression gaz, 85 bar	4 × 10 ⁻⁶
E4113	10 ⁻⁵ , Pression gaz, 85bar	0.090
E4115	10 ⁻⁴ , Pression gaz 85bar	0.081

Simuler des essais et les interpréter !

- ❑ Modèles intégrant **plasticité, endommagement et couplage avec l'hydrogène**
- ❑ **Modèles non locaux** à « longueurs internes » pour prendre en compte les effets d'échelles et réaliser

des calculs fiables



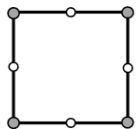
PhD A. El Tuhami Ouazani



TRANSVALOR

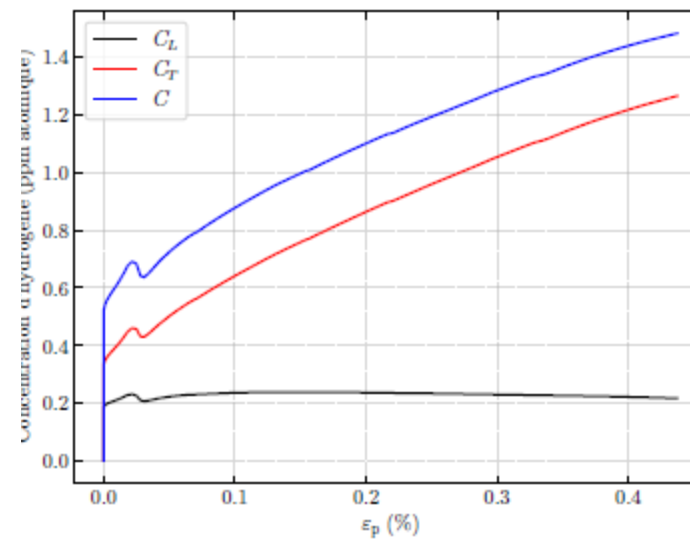
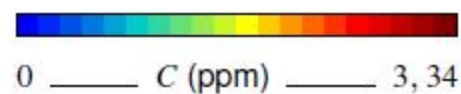
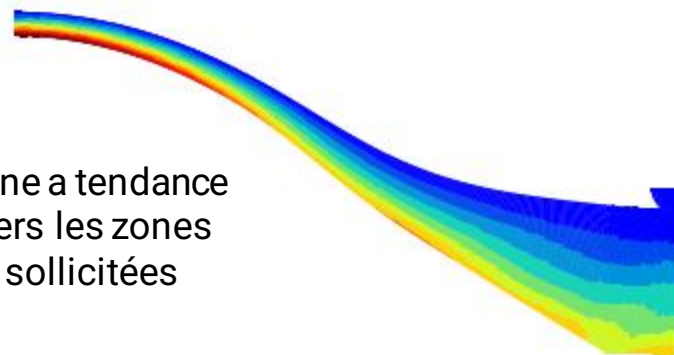
PhD D. Lopes-Pinto

❑ **Éléments multi-champs**



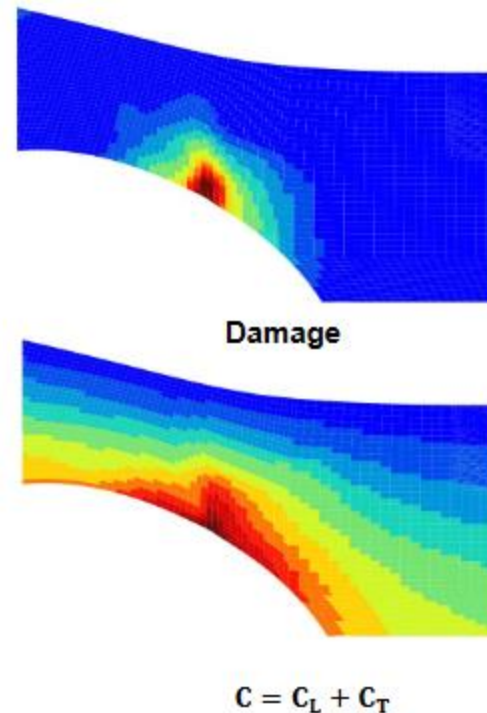
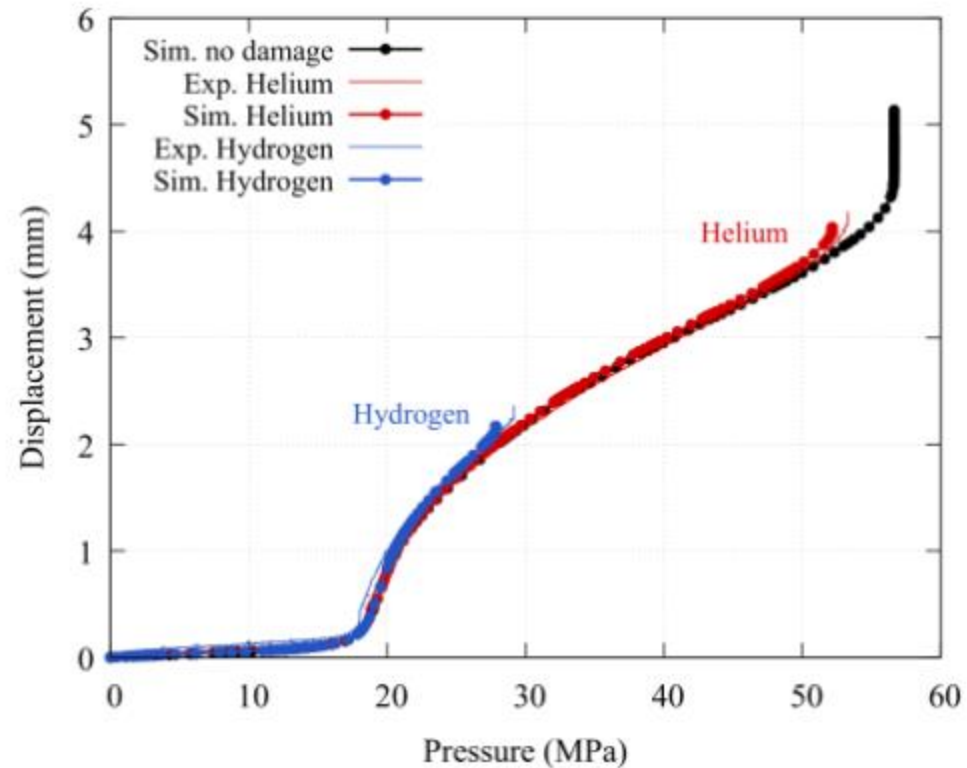
- $\underline{u}, P, \theta, C_L, \bar{\omega}, \bar{\kappa}$
- \underline{u}

L'hydrogène a tendance à migrer vers les zones fortement sollicitées



Simuler des essais et les interpréter !

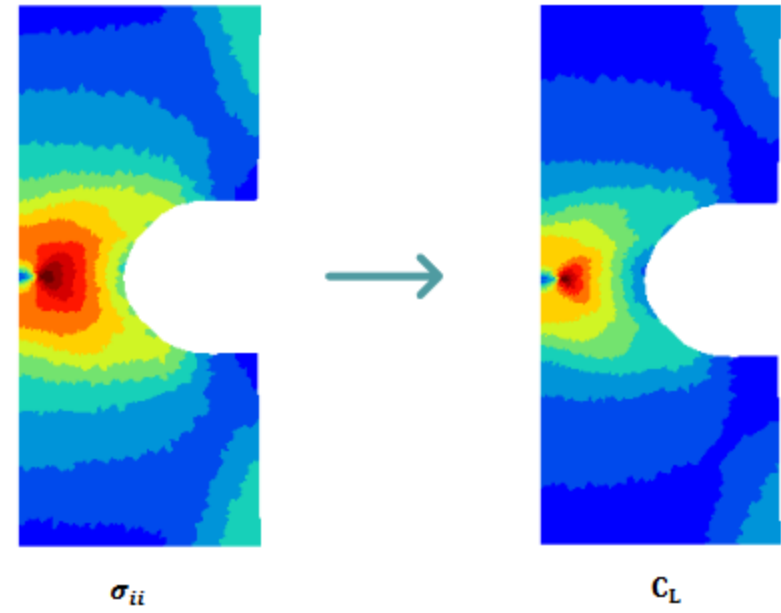
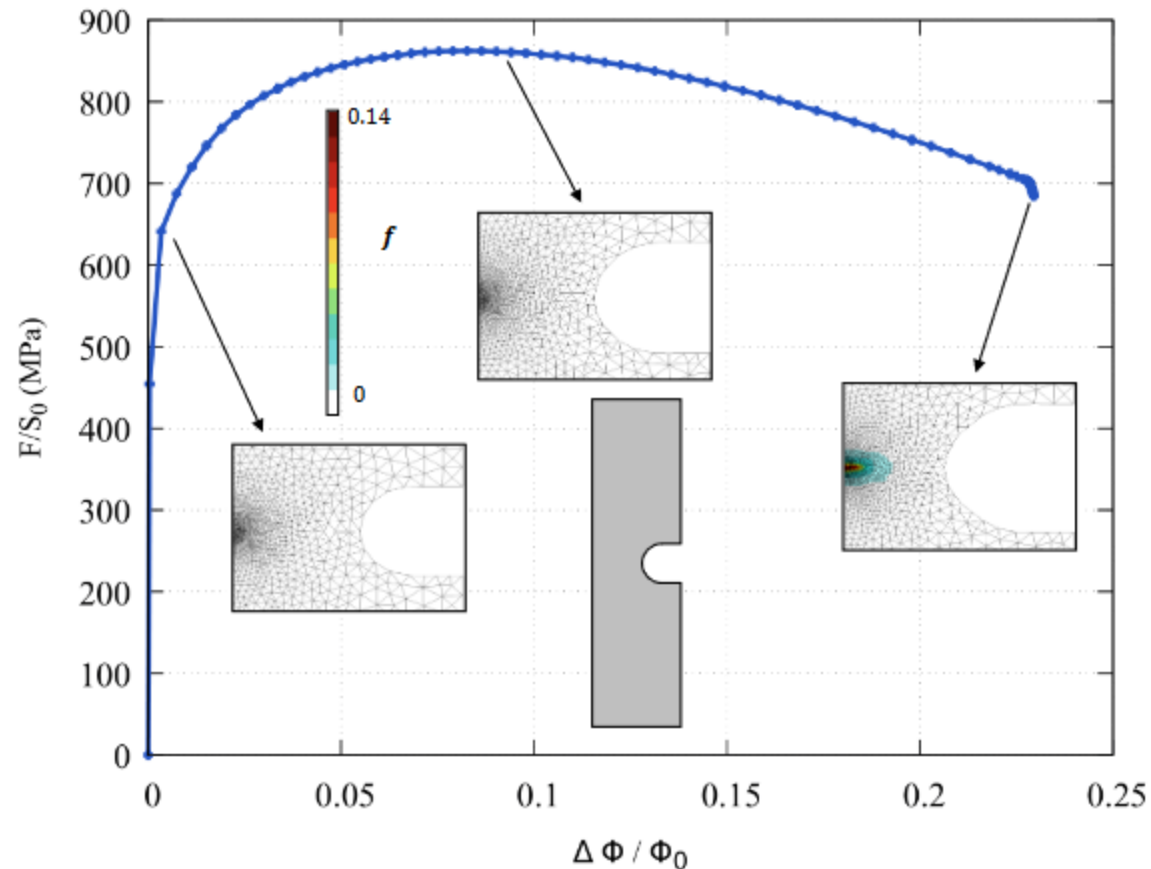
■ Modelling of hydrogen embrittlement: notched disk test



- Acceleration of void nucleation causes earlier fail
- Higher hydrogen concentration in damaged areas

Simuler des essais et les interpréter !

- **Hydrogen diffusion and remeshing:**



- **Next step:** extend to remeshing for long crack propagation with hydrogen diffusion



Merci, questions ?

yazid.madi@minesparis.psl.eu