

# Outil de Caractérisation Electromagnétique pour acier à haute valeur Ajoutée



# OCEA



# CONTEXTE

- La **qualité de surface** et la **durabilité** des composants en acier haute performance sont d'une importance capitale.

## ➔ Traitement Intentionnel

- ❖ Rendre la surface plus dure



Grenailage

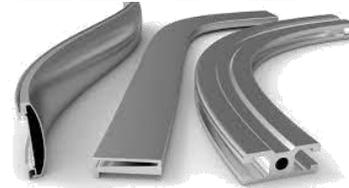


Cémentation -  
Nituration [1]

- ❖ Contrôler les propriétés physiques



Acier électrique



- ❖ Contraintes de surface

## ➔ défaut

- ❖ Corrosion



- ❖ Brûlures de rectification



[1] B. Ducharme, Y.A. Tene Deffo, S. Zhang, G. Sebald, M. Lallart, T. Uchimoto, C. Gallais, O. Ghibaudo, "Carburization depth evaluation from magnetic nondestructive testing," NDT & E Int., 2023.

# LIMITATIONS ACTUELLES – METHODE DE CONTROLE DES TRAITEMENTS DE SURFACE

- Les méthodes traditionnelles CND (classiques, attaque nitale, etc.) ne sont **pas applicables** ou nécessitent des **produits chimiques nocifs**.

**CAUTION  
HAZARDOUS  
WASTE**



Visual testing



Radiography testing



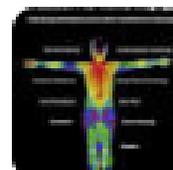
Ultrasonic testing



Magnetic Particle Testing



Liquid penetrant testing

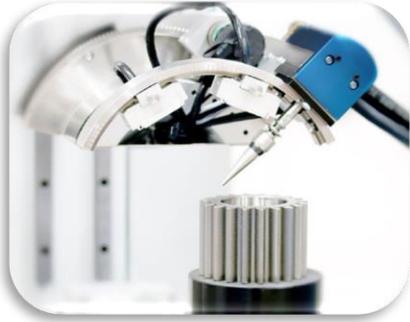


Thermographic methods

# LIMITATIONS ACTUELLES – METHODE DE CONTROLE DES TRAITEMENTS DE SURFACE



<http://ast.stresstechgroup.com>



Les méthodes magnétiques **fonctionnent**.  
Il existe déjà des **équipements industriels**.



Gerd Dobmann  
Universität des Saarlandes

3MA est une technologie mature et un large champ d'applications est donné. Cependant, nous pouvons également trouver des remarques critiques de la part d'utilisateurs industriels. Il s'agit principalement des efforts d'étalonnage et des problèmes de recalibrage.



Problématique d'accessibilité aux données  
de mesures et de leur compréhension  
Besoin de Normalisation



Philip John Withers  
University of Manchester

Les contrôleurs magnétiques CND sont « matures, mais il n'existe pas de théorie unifiée reliant les signaux magnétiques aux paramètres magnétiques de base. À l'heure actuelle, les signaux sont spécifiques à chaque fournisseur d'équipement ».



Rollscan



3MA



NCS Testing Tech



NNT



MAGSTAR

# LIMITATIONS ACTUELLES – METHODE DE CONTROLE DES TRAITEMENTS DE SURFACE

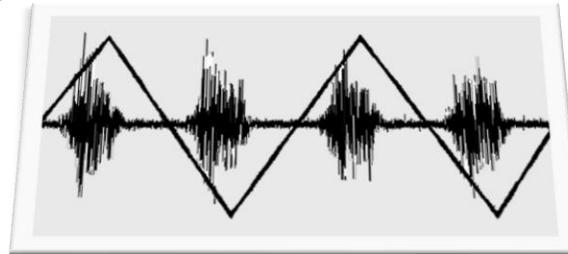
- Efforts d'étalonnage et problèmes de recalibration des équipements existants.



## Echantillons connus

(éventuellement caractérisés de façon destructive)

Exemple : mesure contrainte résiduelle de surface par Diffraction des rayons X (DRX)



Caractérisation expérimentale  
chronophage



Les paramètres ne sont pas transposables



Un petit changement dans les conditions de mesure peut aboutir à des résultats incohérents

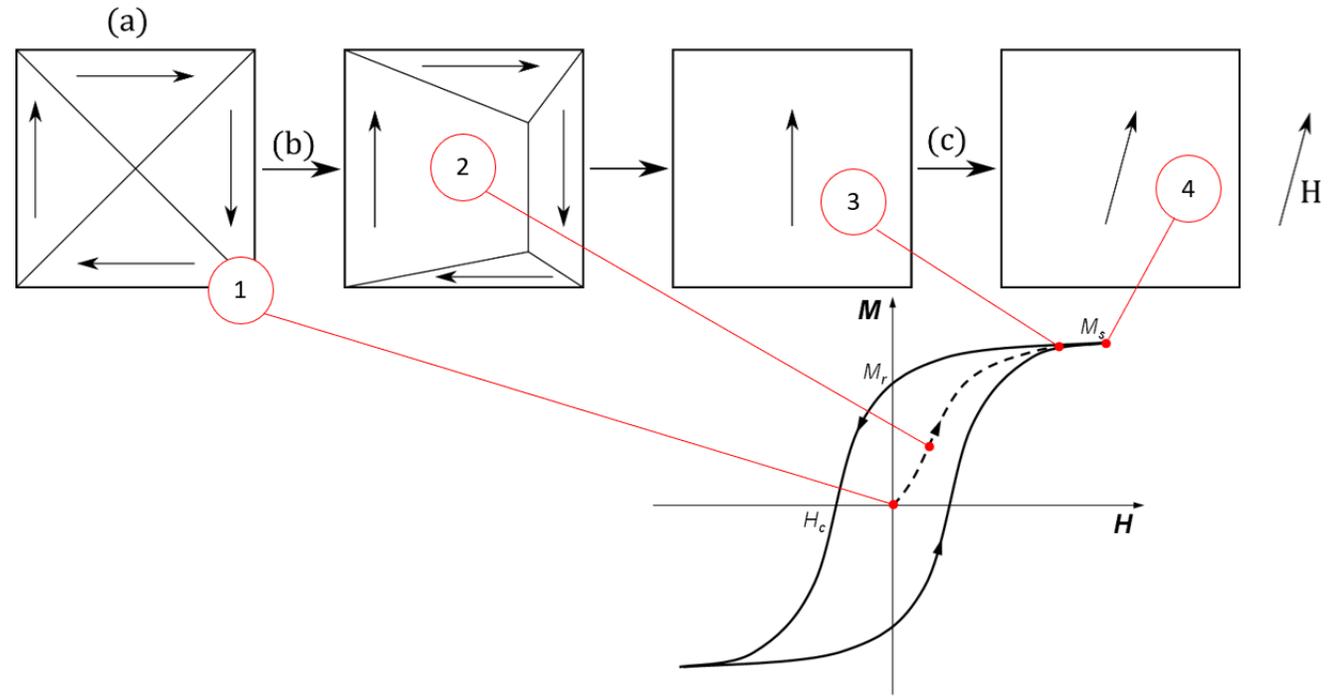


Seuil de  
rejet

# NOTRE SOLUTION: OCEA



- **Approche physique:**

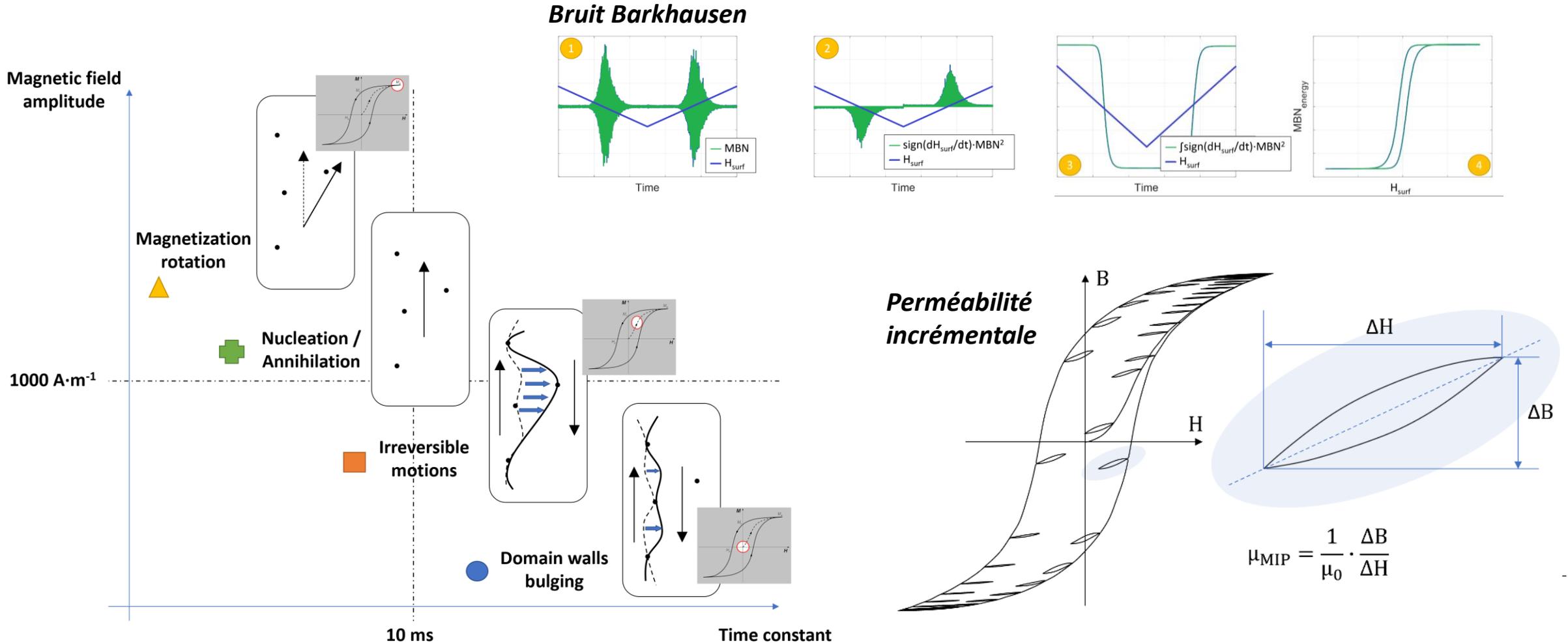


\_ Identification et séparation des **mécanismes d'aimantation** les plus **représentatif** des propriétés cibles.

\_ Ce principe minimise l'influence des conditions de mesures et rend le contrôle plus robuste.

# NOTRE SOLUTION: OCEA

- **Approche physique: on isole les mécanismes d'aimantation** à partir de techniques de mesure spécifique (perméabilité incrémentale, bruit de Barkhausen).



# NOTRE SOLUTION: OCEA

- Approche pragmatique, façon **3MA** étendue au **champ magnétique tournant** :

Measuring Parameter	Description
Re1-Re4	Real parts of EC signals at frequencies 1, 2, 3 and 4.
Im1-Im4	Imaginary parts of EC signals at frequencies 1, 2, 3 and 4.
Mag1-Mag4	Signal magnitudes at frequencies 1, 2, 3 and 4.
Ph1-Ph4	Signal phases at frequencies 1, 2, 3 and 4.

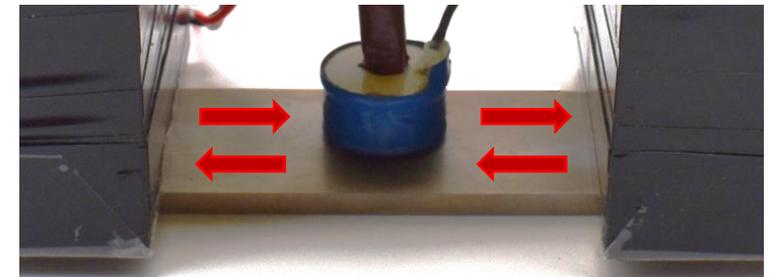
Measuring Parameter	Description
$\mu_{MAX}$	Maximum amplitude
$\mu_{MEAN}$	Amplitude averaged over one magnetization cycle
$\mu_R$	Amplitude at remanence point
$H_{C\mu}$	Coercive magnetic field, derived from Incremental Permeability (magnetic field strength at $\mu = \mu_{MAX}$ )
DH25 $_{\mu}$	Curve width at 25% of $\mu_{MAX}$
DH50 $_{\mu}$	Curve width at 50% of $\mu_{MAX}$
DH75 $_{\mu}$	Curve width at 75% of $\mu_{MAX}$

Measuring Parameter	Description
$M_{MAX}$	Maximum amplitude
$M_{MEAN}$	Amplitude averaged over one magnetization cycle
$M_R$	Amplitude at remanence point
$H_{CM}$	Coercive magnetic field, derived from Barkhausen Noise (magnetic field strength at $M = M_{MAX}$ )
DH25 $_M$	Curve width at 25% of $M_{MAX}$
DH50 $_M$	Curve width at 50% of $M_{MAX}$
DH75 $_M$	Curve width at 75% of $M_{MAX}$

Measuring Parameter	Description
$A_1$	Amplitude of the fundamental wave.
$A_3, A_5, A_7, A_9$	Amplitudes of the 3rd, 5th, 7th and 9th harmonics.
$P_3, P_5, P_7, P_9$	Phases of the 3rd, 5th, 7th and 9th harmonics.
UHS	Sum of all upper harmonics, $UHS = A_3 + A_5 + A_7 + A_9$
K	Distortion factor, $K = 100\% * \sqrt{(A_3^2 + A_5^2 + A_7^2) / A_1^2}$
$H_{CO}$	Coercive magnetic field from harmonic analysis
$H_{ro}$	Harmonic content of the magnetic field strength at zero crossing
$V_{mag}$	Final stage voltage of the electromagnet



**36 informations magnétiques**  
 Obtenues à partir d'une aimantation  
 unidirectionnelle alternative



# NOTRE SOLUTION: OCEA

- Approche pragmatique, façon **3MA** étendue au **champ magnétique tournant** :

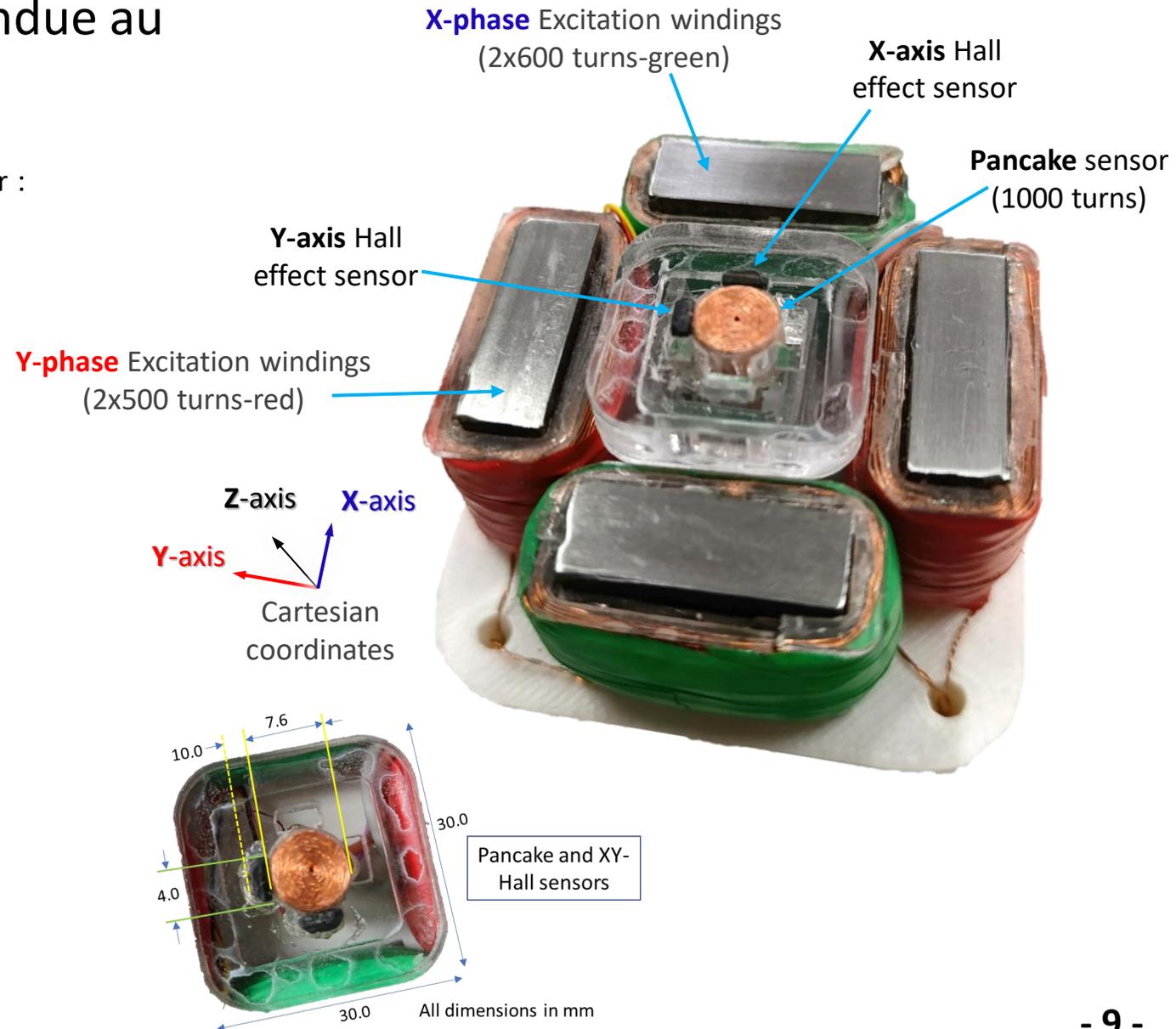
Le nombre d'information magnétique récolté est très supérieur :

- ❖ Alternatif
- ❖ Alternatif pour différents angles d'aimantation (sans déplacement de capteur)
- ❖ Champ magnétique tournant

→ Permet de surmonter les **barrières d'énergie locale** de manière plus efficace, car les directions du champ varient continuellement, facilitant le déplacement et la rotation des parois de Bloch.

*Les domaines de Weiss interagissent entre eux par des forces magnétiques et élastiques. Sous champ tournant, ces interactions sont observées dans différentes configurations, révélant des phénomènes de couplage difficilement accessibles avec un champ magnétique mono axial*

Le fonctionnement en mode dégradé façon 3MA est immédiat





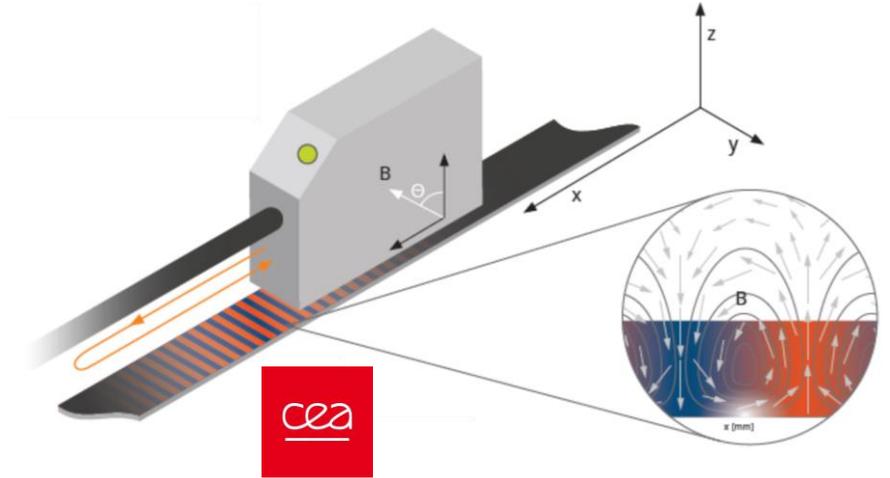
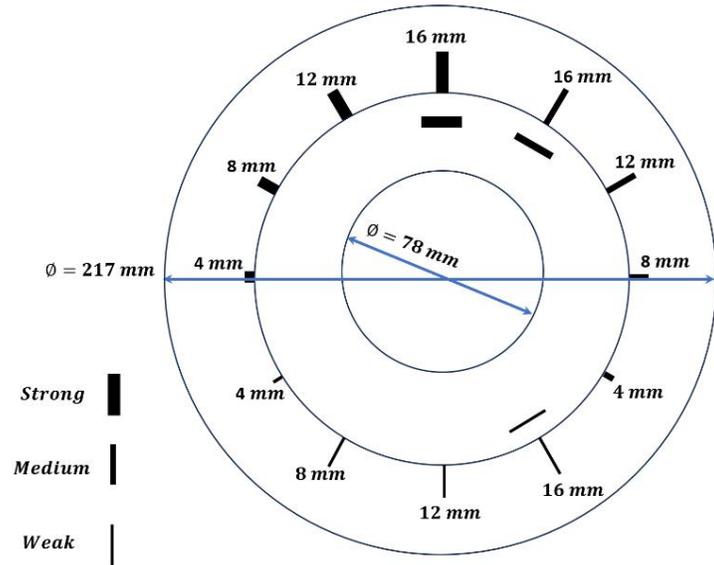
**Cas d'étude, exemple  
d'utilisation d'OCEA**

**OCEA**

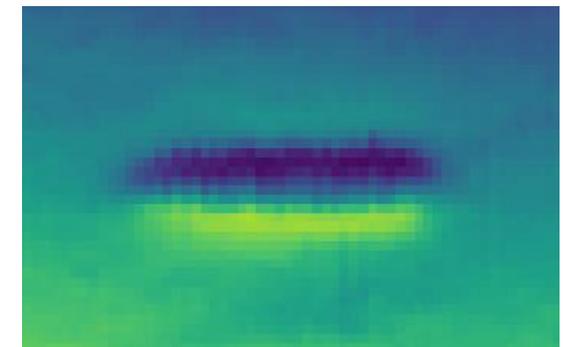


# OCEA – Cas des brûlures de rectification, ségrégation et défauts débouchants

- Mesure par flux de fuite:



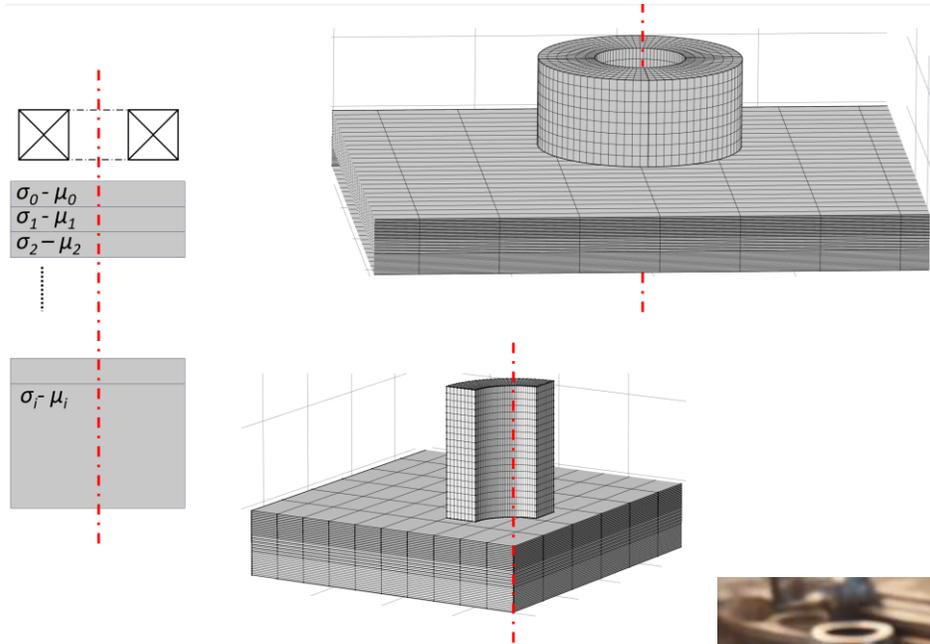
Imagerie magnétique par centre NV



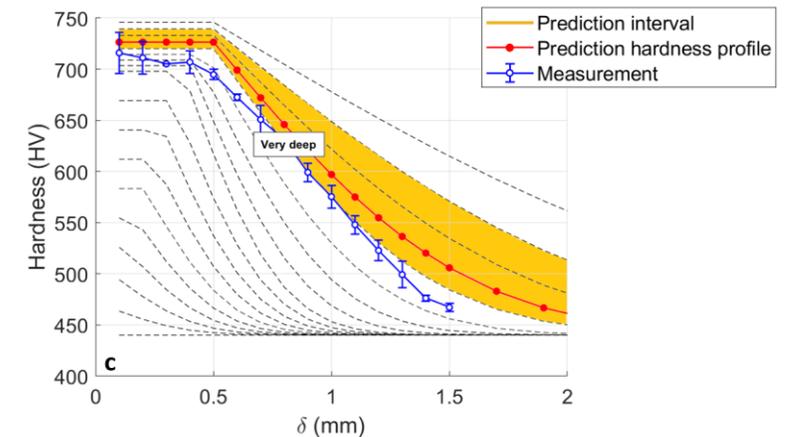
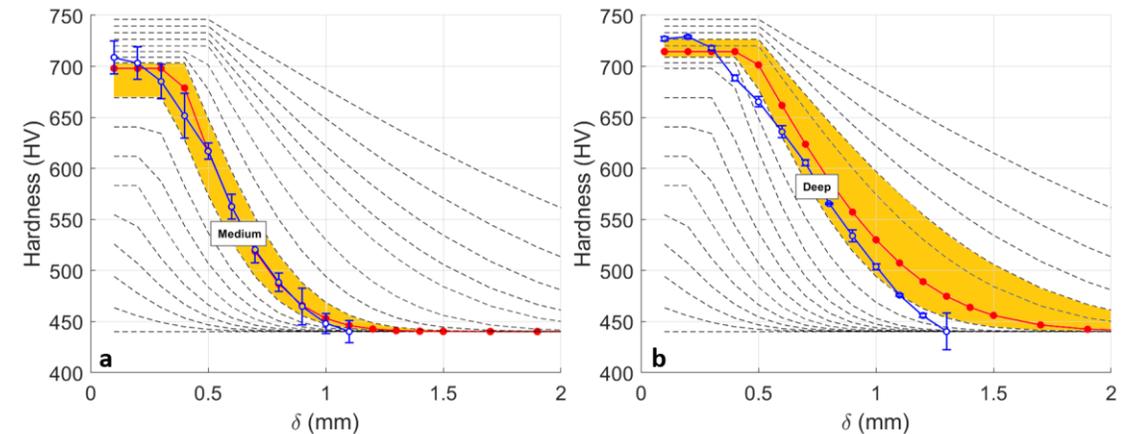
**OCEA** inclut des trames de magnétorésistances, et s'adapte au système Kwan-tek d'instrumentation Centre NV.

# OCEA – Cas des traitements de surface profond (cémentation)

- **OCEA** peut faire de la perméabilité incrémentale basse fréquence et renvoyer des informations magnétiques profondes.
- **OCEA** inclut des outils de modélisation pour relier les grandeurs électriques mesurées, magnétiques et mécaniques

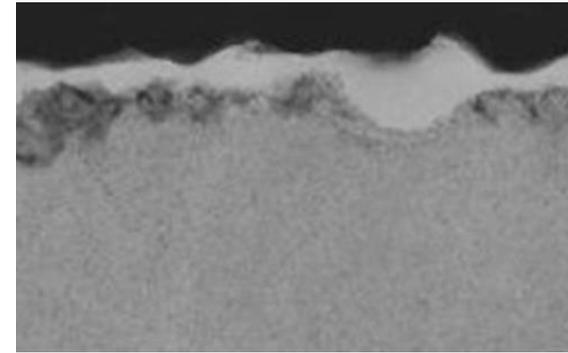


*Profils de dureté*

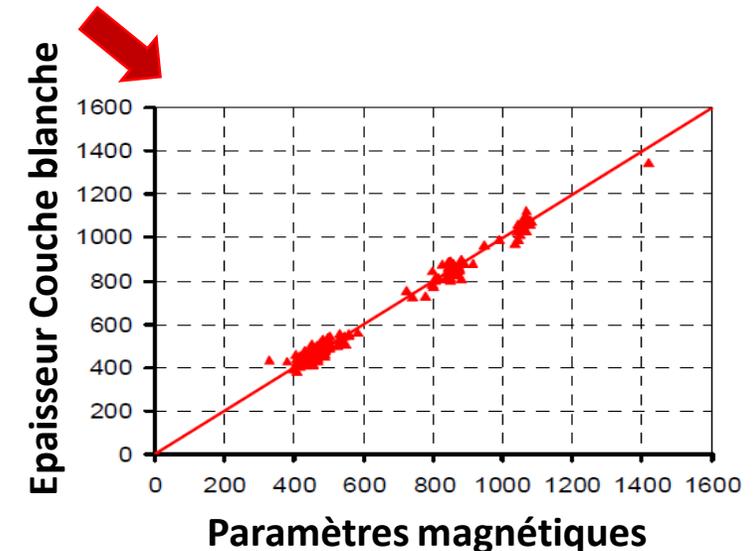


# OCEA – Cas des traitements de proche surface (nitruration, couche blanche)

- L'approche combinée d'**OCEA** permet d'établir des corrélations entre les grandes quantités d'information magnétique récoltées et les informations mécaniques obtenues à partir de caractérisation au préalable sur des échantillons maîtrisés.

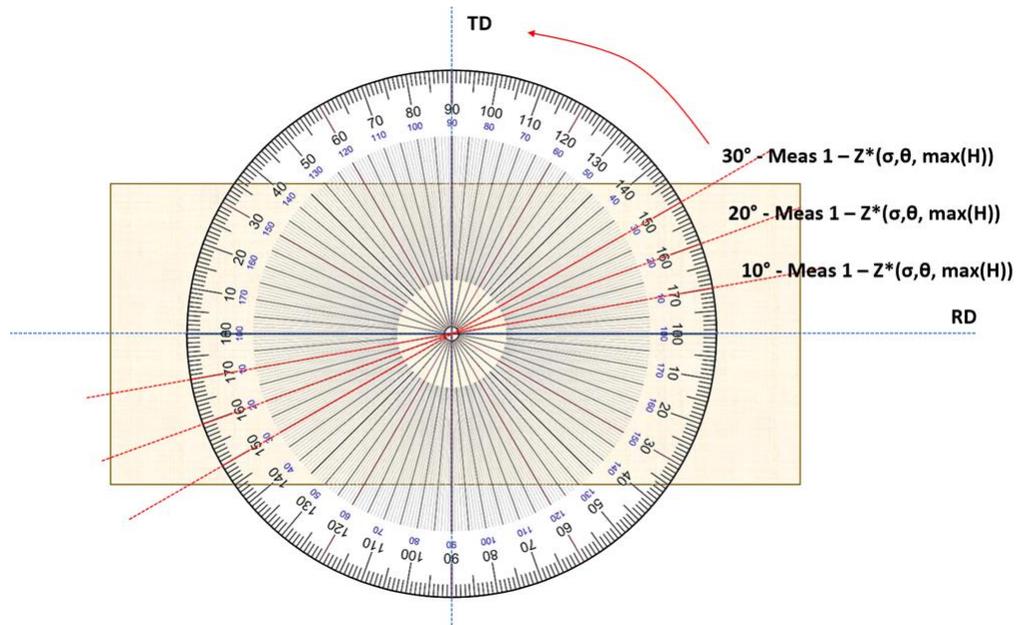


Couche blanche  
(Niture de Fer)



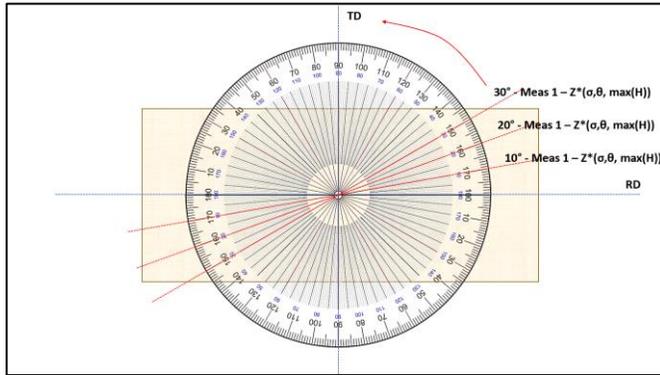
# OCEA – Cas des contraintes résiduelles

- **OCEA** peut faire de la perméabilité incrémentale sous champ tournant large amplitude basse vitesse.
- Les domaines magnétiques ont disparu ce qui offre une lecture plus directe des contraintes mécaniques

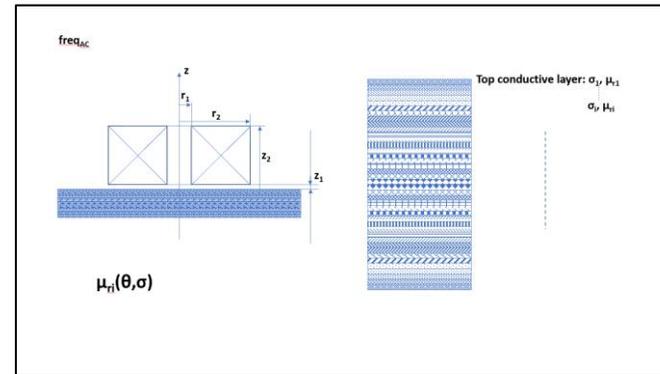


# OCEA – Cas des contraintes résiduelles

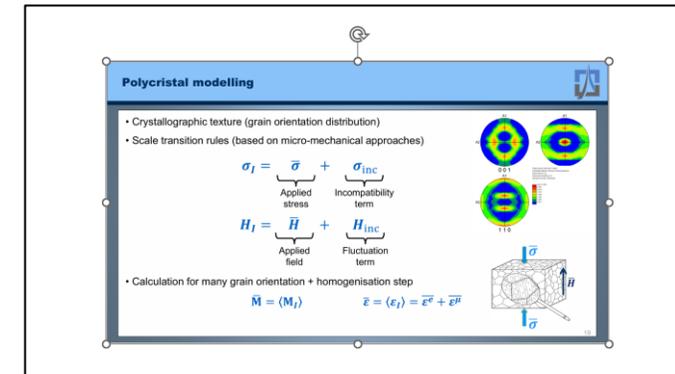
- **OCEA** à travers ces partenariats académiques intègre des outils de modélisation permettant d'établir faire le lien entre les grandeurs électriques mesurées et les grandeurs mécaniques ciblent.



Mesure électrique



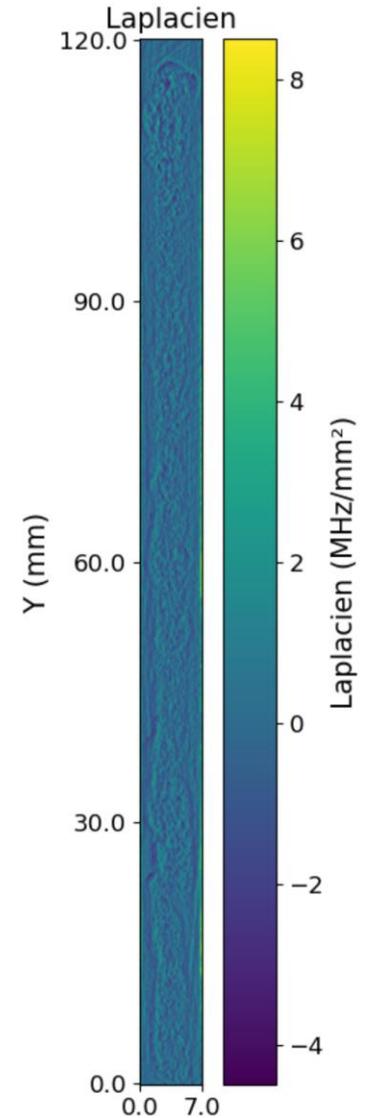
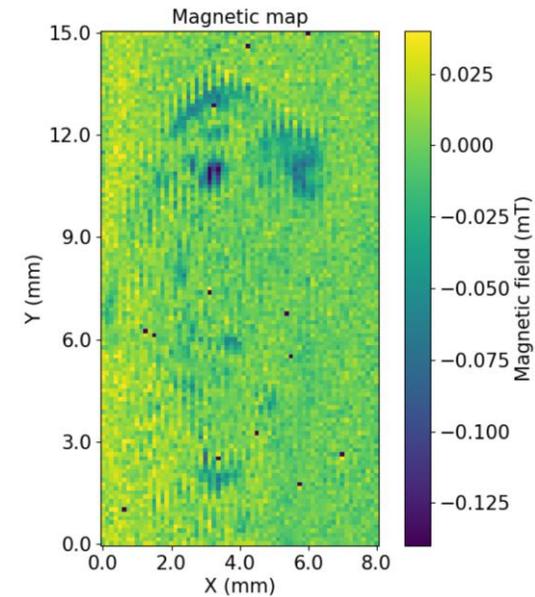
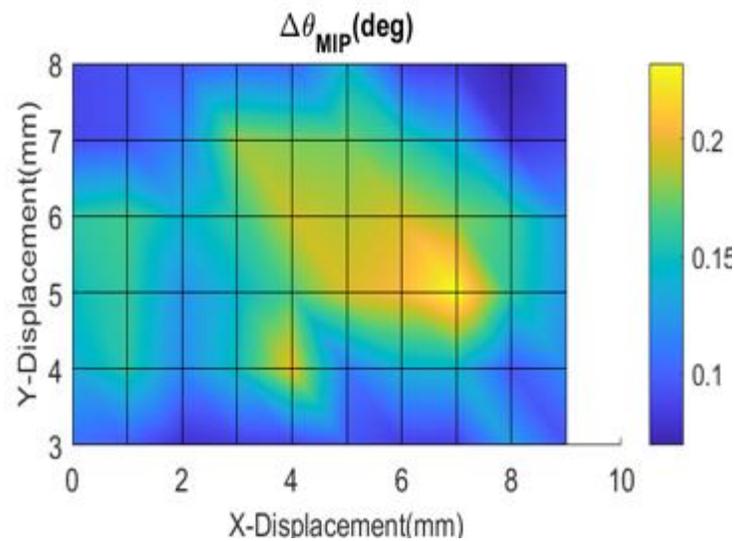
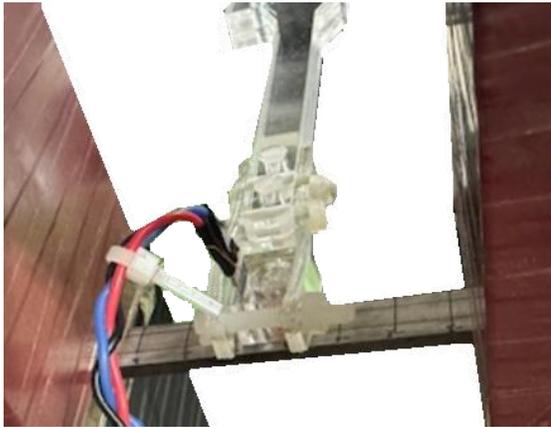
Evaluation des grandeurs magnétiques



Estimation des contraintes mécaniques

# OCEA – Observation de traces martensitiques dans des aciers austénitiques

## Application: Stockage de l'hydrogène





## Planning projet / Système Industriel Final

**OCEA**

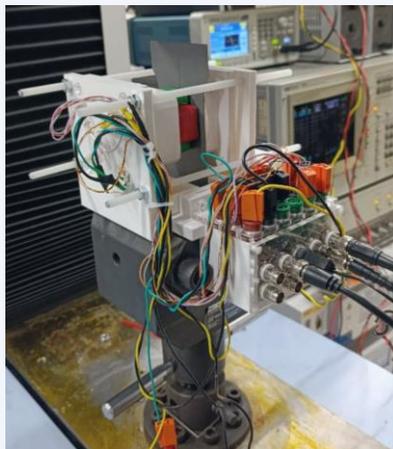




**Intégration dans un système industriel compact**

**Utilisation laboratoire, atelier et en extérieur**

**Système abordable pour techniciens et ingénieurs formés**




**INSA LGEF**

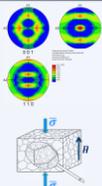
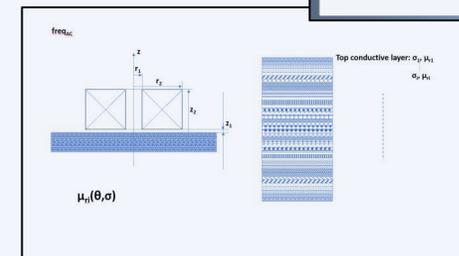
**Polycrystal modelling**

- Crystallographic texture (grain orientation distribution)
- Scale transition rules (based on micro-mechanical approaches)

$$\sigma_I = \underbrace{\bar{\sigma}}_{\text{Applied stress}} + \underbrace{\sigma_{\text{inc}}}_{\text{Incompatibility term}}$$

$$H_I = \underbrace{\bar{H}}_{\text{Applied field}} + \underbrace{H_{\text{inc}}}_{\text{Fluctuation term}}$$

- Calculation for many grain orientation + homogenisation step

$$M = (M_i) \quad \bar{\varepsilon} = \langle \varepsilon_i \rangle = \bar{\varepsilon}^d + \bar{\varepsilon}^p$$



# OCEA – Structuration du système

## Tête de mesure EM intégrant :

### Sonde caractérisation magnétique B-H



- ❖ Mesure Perméabilité magnétique incrémentale
- ❖ Mesure Bruit Barkhausen
- ❖ Tracé Cycle B-H localisé
- ❖ Fréquence : 0,01Hz à 200Hz
- ❖ Champ magnétique mono axial fixe, orientable ou champ tournant à fréquence réglable
- ❖ **Type et taille de sonde à façon fonction des applications**

### Sonde courant de Foucault BF

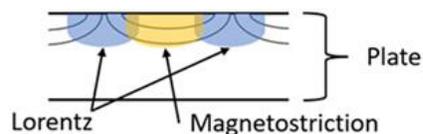
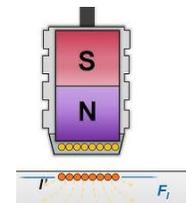


- ❖ Mesure du plan d'Impédance électrique
- ❖ Suivi R X Y Phase en temps réel
- ❖ Balayage en fréquence : 10Hz à 10MHz

### Sonde EMAT



- ❖ Onde US Transversale dans l'épaisseur
- ❖ Onde US Guidées SH – Lamb
- ❖ Fréquence 0,5MHz à 10MHz



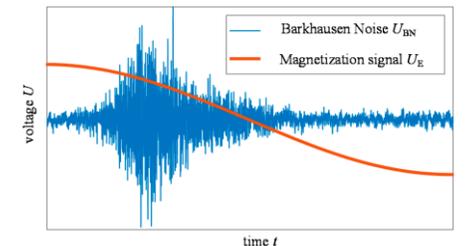
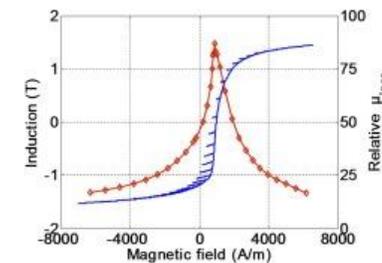
## Baie de mesure unique :



### Electronique sous forme de modules

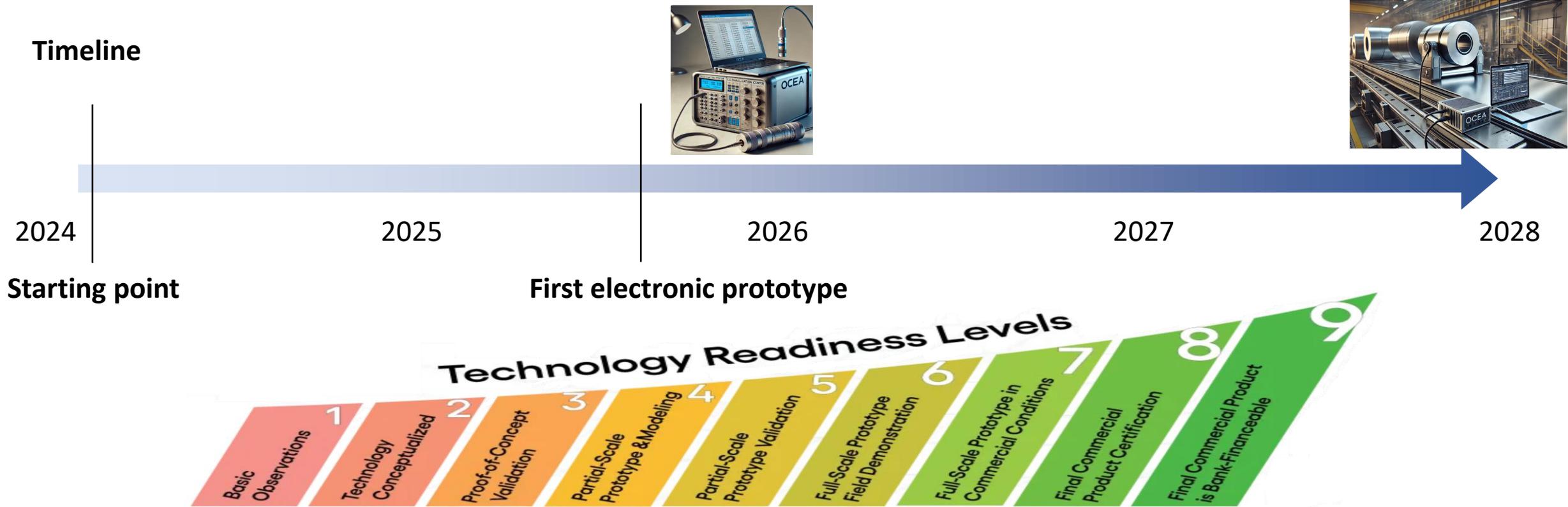
- ❖ Générateurs pour inducteurs
- ❖ Station d'acquisition 16Bits - 15MS/s – 4 à 16voies
- ❖ Lock-in Amplifier Detection
- ❖ EMAT Pulser 1000V

## Logiciel d'exploitation Open Access :

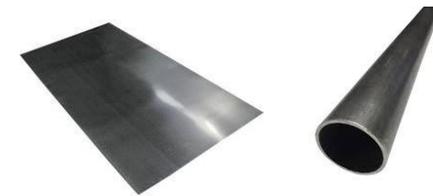


- ❖ Module de mesures, enregistrement et gestions des données
- ❖ Module de modélisation et corrélation de données
- ❖ Module de calibration, configuration des voies de mesures
- ❖ Drivers pour récupération des données, mode développeur
- ❖ Possibilité créer des modèles à partir de datas sets

# OCEA – Planning



- Participation Industriel, Laboratoire, Centre technique avec mise à disposition de pièces d'essais, maquettes



- Journée Technique à CMPHY 2026/2027