

OCEA



Outils de Caractérisation Electromagnétique pour Aciers

Sonde multi-modale et IA pour l'évaluation non destructive de l'acier

L'ENJEU

La microstructure de surface contient les signes précurseurs des futures défaillances

C'est là que se lisent les variations annonçant la dégradation — bien avant qu'une fissure n'apparaisse.

LE MANQUE

Les CND classiques détectent les défauts — pas leurs causes

Ultrasons, courants de Foucault, ressuage : excellents pour la fissure déclarée. Insensibles aux évolutions microstructurales qui la précèdent.

De la microstructure saine au défaut macroscopique



ÉTAPE 1

Matériau sain

État initial

Microstructure homogène — grains organisés, dislocations basses, contraintes maîtrisées.



ÉTAPE 2

Fragilisation invisible

← OCEA agit ici

Réorientation des grains, accumulation de dislocations, transformations de phase locales sous contraintes ou variations chimiques.



ÉTAPE 3

Défaut macroscopique

Trop tard

Fissure, écaillage, brûlure — détectables par US, CF ou ressuage. La pièce doit être réparée ou rebutée.

Évolution dans le temps / sous sollicitation mécanique ou chimique

OCEA — une nouvelle approche CND pour détecter la signature magnétique de la microstructure, avant que le défaut ne devienne visible

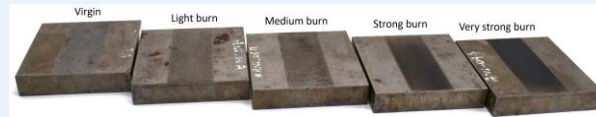
Limites des systèmes existants

✗ Excitation unidirectionnelle

Les systèmes 3MA et Rollscan reposent sur un yoke en U qui n'explore qu'une direction à la fois.

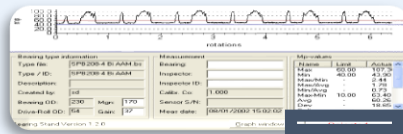
✗ Information magnétique limitée

Difficulté à séparer les effets corrélés : contraintes vs dureté vs texture vs phases.



✗ Calibration coûteuse

Campagnes expérimentales lourdes pour chaque application, résultats peu généralisables.



✗ Sondes mono-physiques

Une sonde par méthode (CF, MBN, ultrasons)
— multiplication des passes de mesure.

Enjeux industriels

✓ Contraintes résiduelles

Indispensables à maîtriser sur pièces critiques (aéronautique, automobile, énergie).

✓ Caractérisation des traitements chimiques et mécaniques

Cémentation, nituration, induction : profondeur effective, dureté, profil.

✓ Détection des brûlures, micro fissuration

Effet de la rectification, usinage sur les pièces— défaut critique.

✓ Suivi en ligne, mesures sans contact

Contrôle 100 % en production sans détérioration ni démontage.

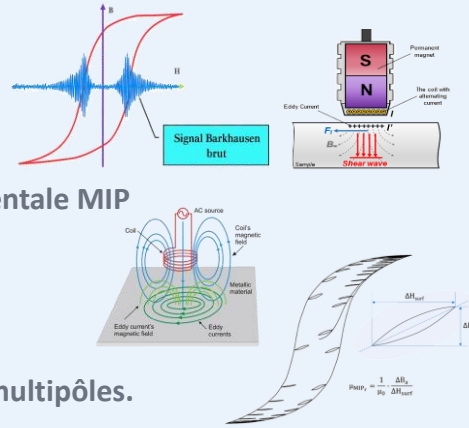
OCEA répond à ces enjeux par une approche multi-modale, multi-mode et instrumentée par IA

OCEA combine en une sonde unique quatre techniques de CND électromagnétiques sous trois modes d'excitation, avec un logiciel dédié, complété par un traitement IA permettant d'extraire des indicateurs et de les corrélérer

MULTI-PHYSIQUE

4 méthodes intégrées

- Perméabilité Magnétique Incrémentale MIP
- Bruit Barkhausen MBN
- Courants de Foucault EC
- Ultrason EMAT
- → Le tout dans une seule sonde multipôles.



MULTI-MODE

3 excitations

Uni-axiale, biaxiale et rotationnelle — accès aux mécanismes 90° et 180° des parois de domaines.

INSTRUMENTATION

Baie multi-canaux

8 voies synchrones, 1 MHz, lock-in intégré, filtres analogiques dédiés.

INTELLIGENCE

IA embarquée

Plus de 10 indicateurs physiques par mesure, modèles de régression supervisée.

Démarche du projet

1

Capture

Acquisition synchrone multi-voies sur la pièce

2

Extraction

Calcul des indicateurs physiquement interprétables

3

Apprentissage IA

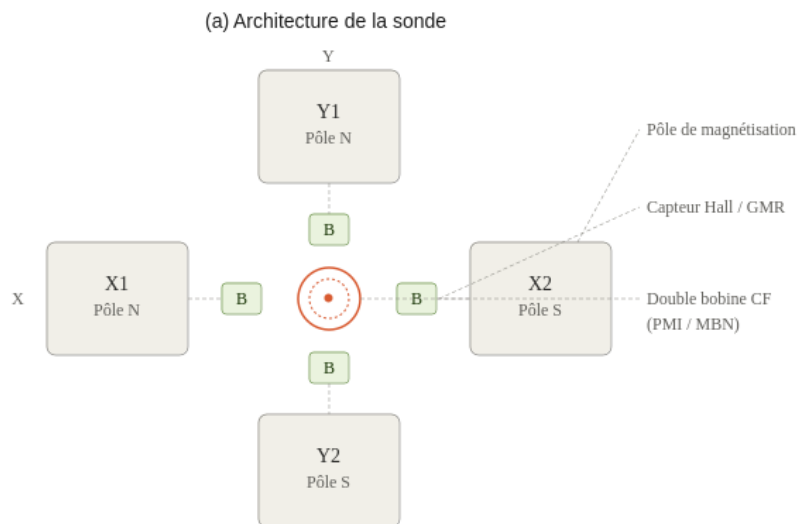
Modèles entraînés sur éprouvettes étalonnées

4

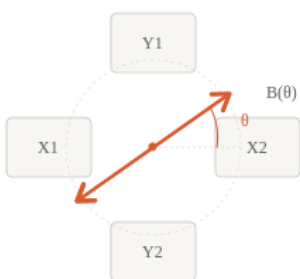
Estimation par le modèle

Estimation quantitative en temps réel avec la base référence développée Aide au diagnostic

De l'acquisition à la décision : une chaîne complète intégrée

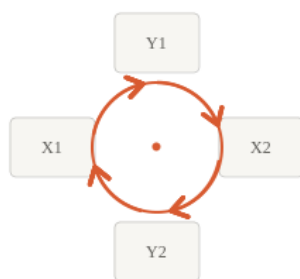


(b) Mode uni-axial orientable



Champ orientable de 0° à 180°
pilotage des courants X / Y

(c) Mode rotationnel



Champ tournant à pulsation ω
 $i_{X} = \sin(\omega t)$, $i_{Y} = \sin(\omega t + \pi/2)$

Pôles de magnétisation
 Capteurs de champ magnétique
 Double bobine CF

Caractéristiques techniques

| | |
|---------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ARCHITECTURE | Yoke à 4 pôles X1, X2, Y1, Y2 Champ magnétique DC ou AC (0,05 à 200Hz) |
| EXCITATION | 0 à 20 kA/m en surface de la pièce |
| CAPTEURS | 4 sondes Champ magnétique (Effet Hall ou réseau de GMR) + ensemble bobines CF émetteur/récepteur |
| FRÉQUENCE CF | 1 kHz à 100 kHz (skin depth modulable) |
| MBN | Préampli faible bruit + filtre passe-bande 10–500 kHz |
| EMAT | Bobines HF intégrées sous polarisation DC |

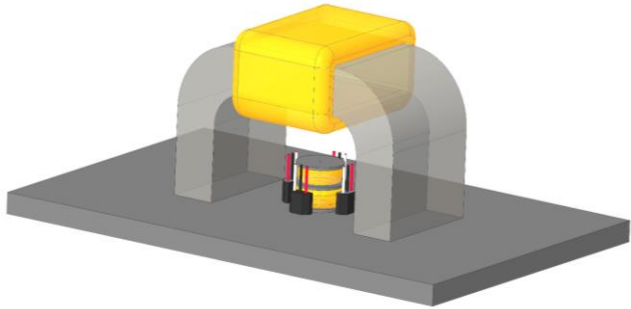
Principe

- ❖ Un unique inducteur génère le champ uniaxial, biaxial ou tournant
- ❖ Les capteurs Hall ou réseau GMR mesurent le champ effectif H_{XY} en surface
- ❖ La bobine CF la perméabilité et le bruit Barkhausen,
- ❖ L'EMAT exploite la polarisation DC et génère une onde mécanique au sein du matériau

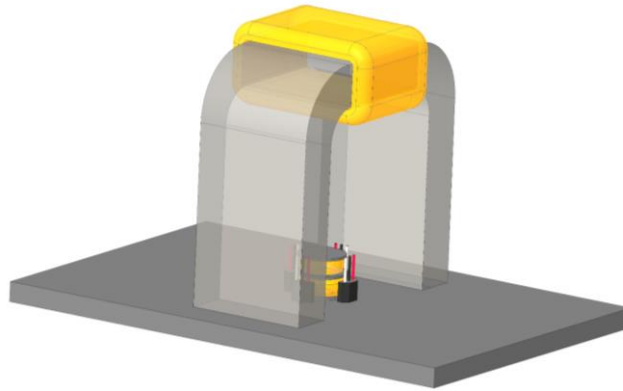
Les 3 modes d'excitation

Choisir la trajectoire du champ pour explorer la microstructure magnétique

A. Uniaxiale: axe parallèle

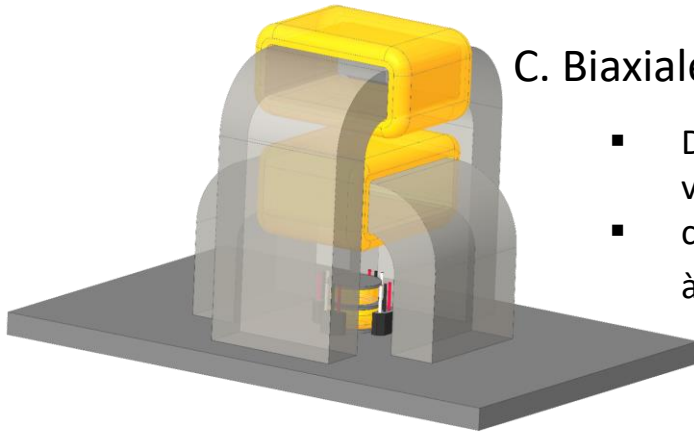


B. Uniaxiale: axe perpendiculaire

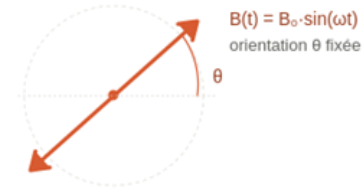


C. Biaxiale:

- Déphasage ou amplitude variable
- champ tournant (déphasage à 90 degré)

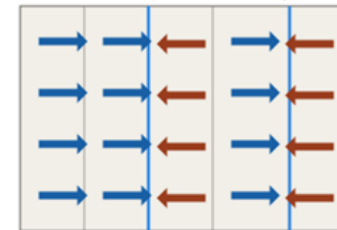


(a) Excitation uni-axiale orientable



Champ pulsé selon une direction

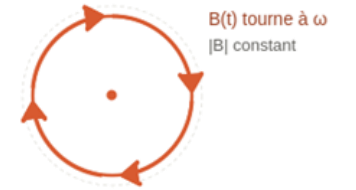
Mécanismes activés dans la matière



Mouvements de parois 180° dominants

les parois se déplacent, les domaines basculent ↔

(b) Excitation rotationnelle



Champ tournant à pulsation ω

Mécanismes activés dans la matière



Rotation cohérente des moments

+ parois 90° activées (sensibles à la contrainte)

UNIAXIAL

Axe paramétrable

Mouvements de parois 180° dominants

BIAXIAL

Trajectoire elliptique du champ magnétique

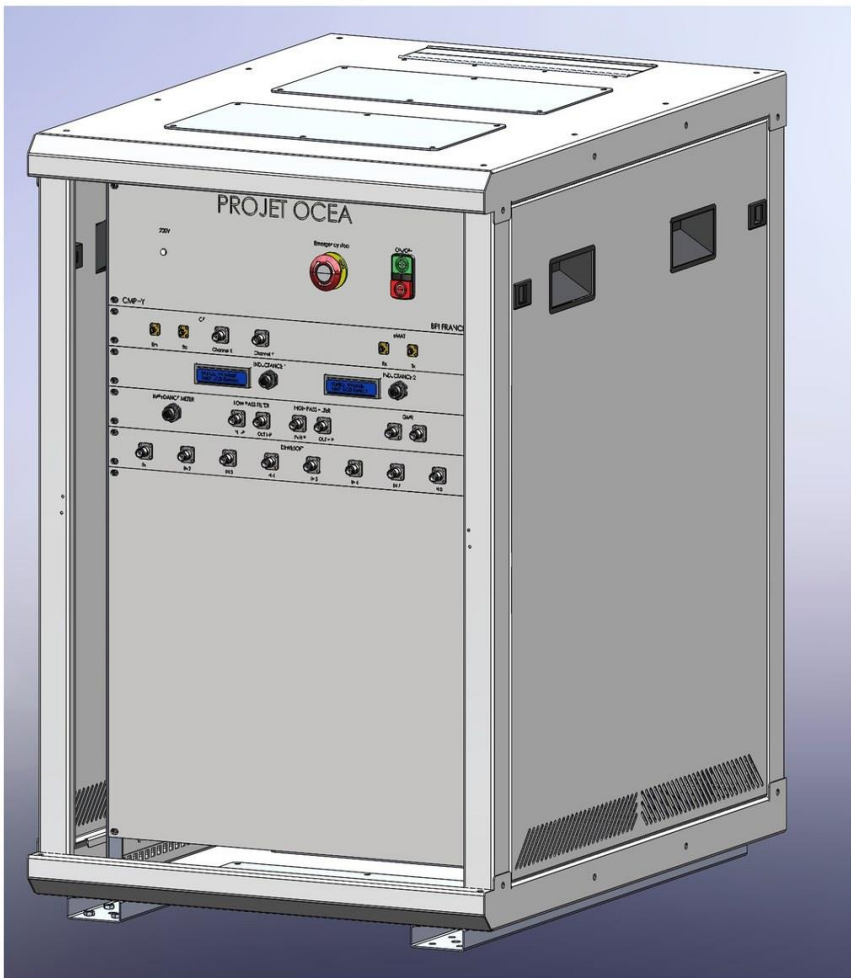
Exploration multidirectionnelle

ROTATIONNEL

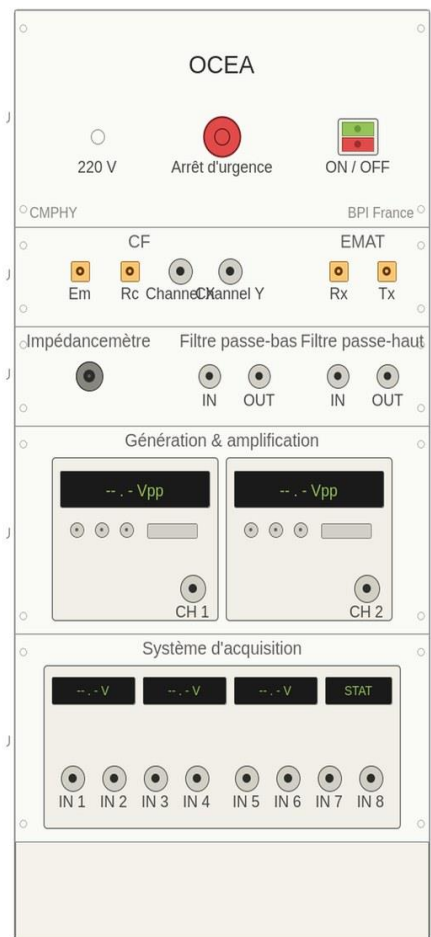
Champ tournant à 90°

Activation des parois 90° et rotation cohérente

(a) Vue intégrée



(b) Vue schématique



Composants principaux

- 1 **Générateurs**
Double AFG cohérent : signaux X et Y déphasables (0–360°)
- 2 **Amplificateurs**
2 ampli AC haute puissance pour bobines d'excitation
- 3 **Lock-In intégré**
Détection synchrone $Re(V)$ / $Im(V)$ sur la porteuse CF
- 4 **Carte Ultrason EMAT**
Pulse 0-400V / travail en Pulse Echo ou Emetteur + Récepteur séparés
- 5 **Préampli + Filtres MBN**
Conditionnement analogique du bruit Barkhausen
- 6 **Acquisition**
8 voies synchrones, jusqu'à 1 MHz, 24 bits
- 7 **Pilotage**
PC embarqué, IHM dédiée, exécution des modèles IA

Principe

Superposition d'un champ AC haute fréquence sur un champ DC quasi-statique.

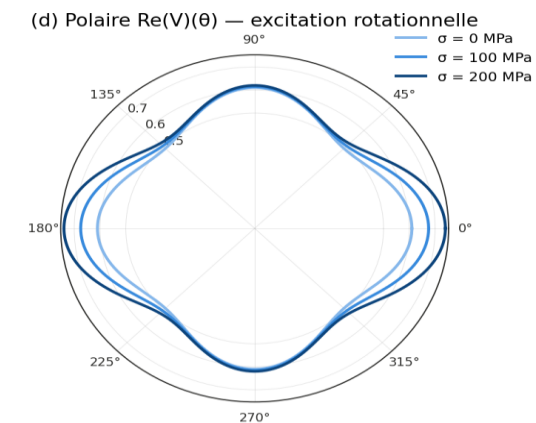
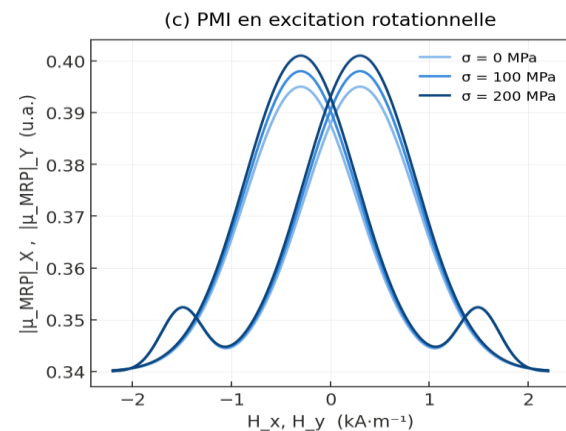
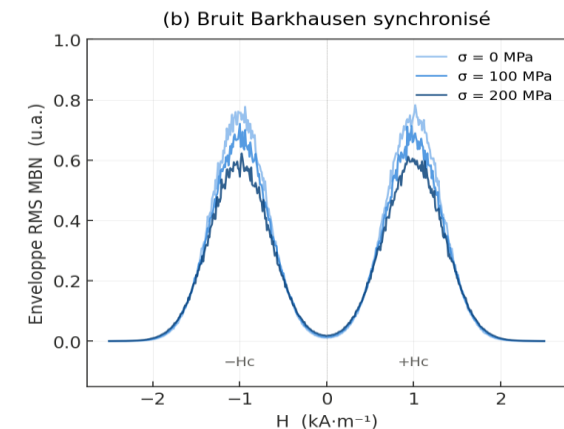
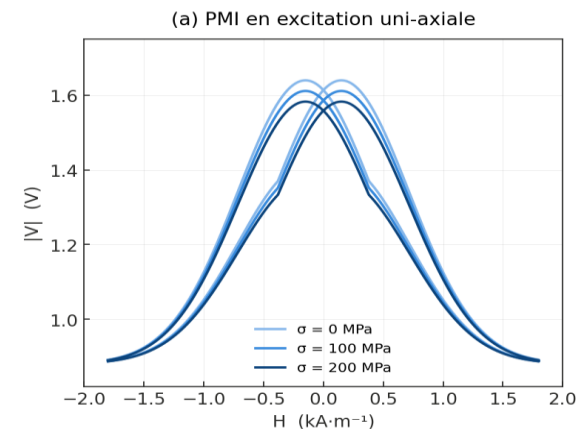
Le rapport $\Delta B/\Delta H$ mesuré dans la bobine de courants de Foucault donne accès à la perméabilité incrémentale μ_{MIP} en chaque point du cycle d'aimantation.

Sensible à :

- Densité de dislocations
- Taille des grains
- Phases dures (martensite, carbures)
- Contraintes résiduelles

Signature MIP

Forme « papillon » caractéristique en uniaxial — deux dômes qui se croisent en biaxial



Principe

Lorsque le champ d'aimantation s'inverse, les parois de domaines franchissent les sites d'ancrage par sauts discrets.

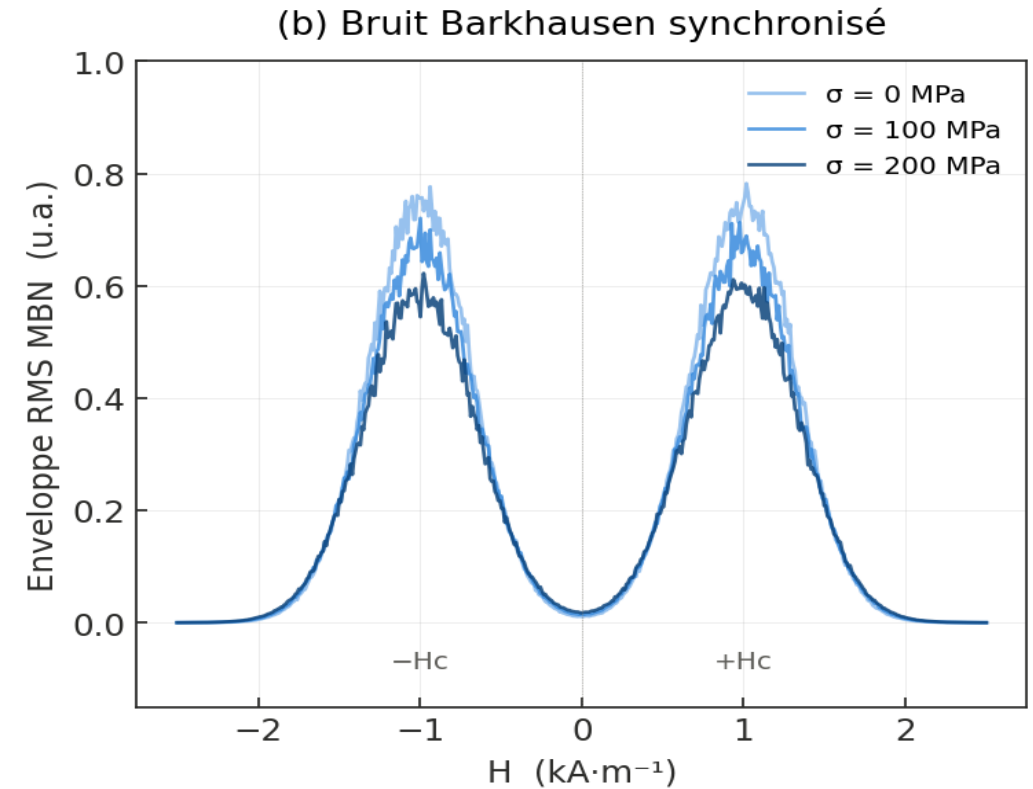
Ces sauts induisent des impulsions électromagnétiques HF (10–500 kHz) captées par une bobine dédiée de la sonde OCEA.

Indicateurs extraits :

- Amplitude crête V_{pp}
- Énergie spectrale intégrée
- Position des paquets $\pm H_c$
- Contenu harmonique

Enveloppe RMS du signal MBN

Deux paquets d'activité centrés sur $\pm H_c$ — sensibilité élevée aux contraintes



Plan d'impédance multi-fréquence

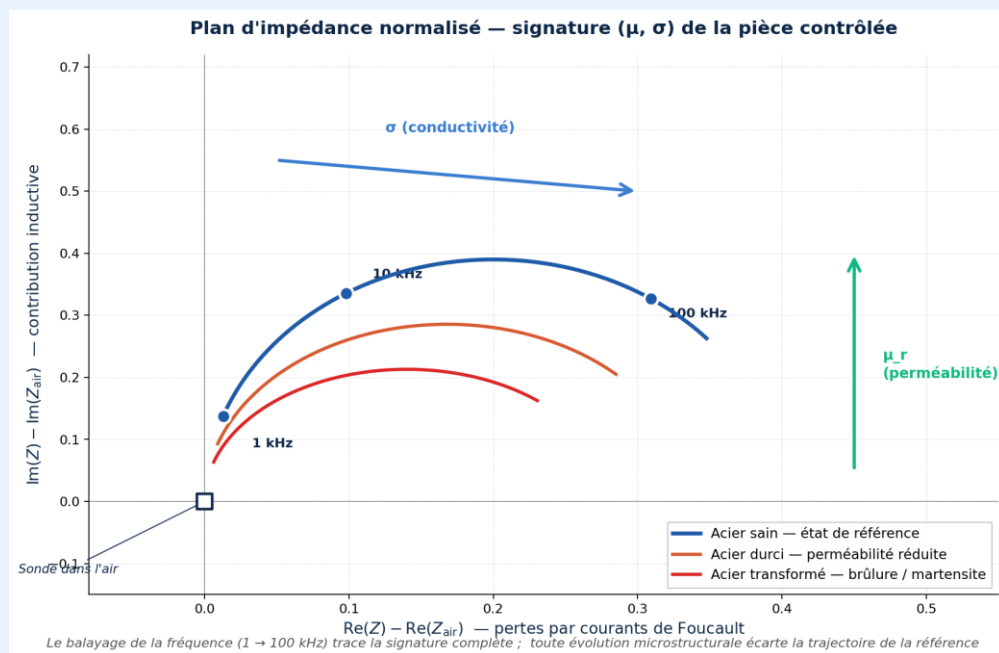
Sondage multi-profondeur par effet de peau

Principe

Balayage fréquentiel de la bobine CF entre 1 et 100 kHz, avec ou sans champ DC superposé.

Chaque fréquence sonde une profondeur δ donnée :

$$\delta = 1 / \sqrt{\pi f \mu \sigma}$$



Effet de peau

100 kHz — δ surface

10 kHz — δ moyenne

1 kHz — δ profonde

Pièce en acier

Indicateurs extraits du plan d'impédance

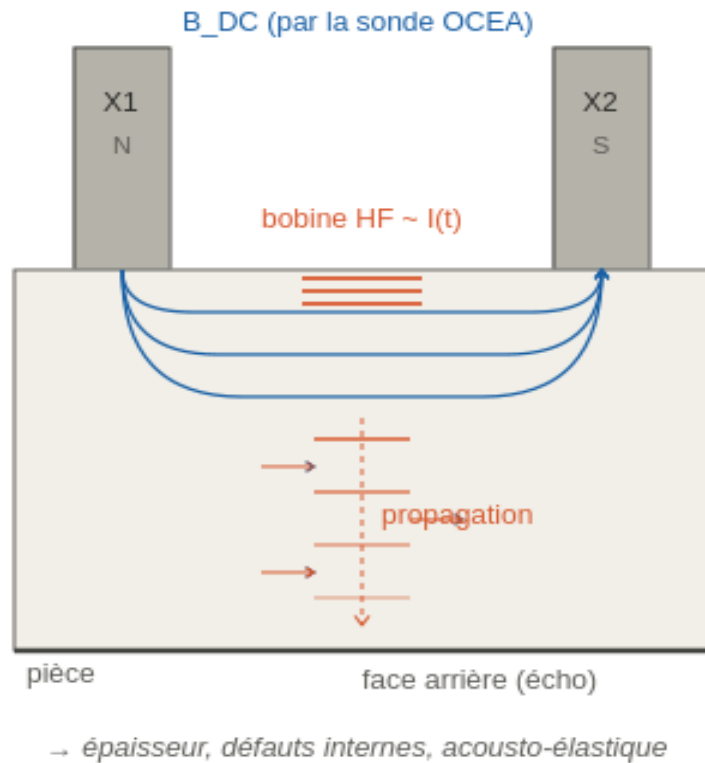
- ▶ Trajectoire complète $Re(Z) / Im(Z)$
- ▶ Pente locale de la trajectoire
- ▶ Fréquences de coupure caractéristiques
- ▶ Distance à la courbe de référence

EMAT — Ondes ultrasonores sans contact

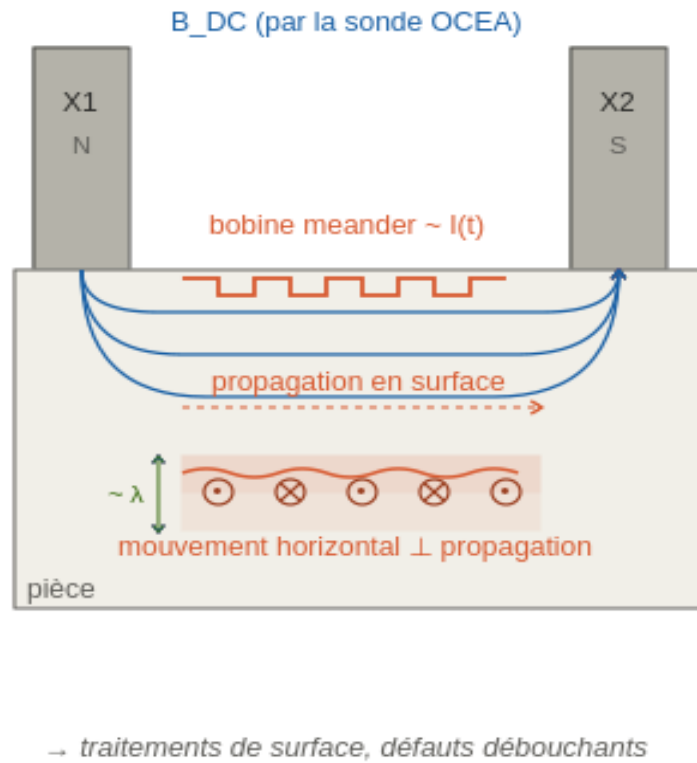
Génération directe par couplage électromagnétique

La sonde OCEA utilise sa propre polarisation DC pour générer des ondes ultrasonores sans contact ni couplant — une innovation par rapport aux EMAT classiques à aimant permanent NdFeB.

(a) Onde transversale volumique



(b) Onde SH de surface



3 indicateurs extraits

Temps de vol

Vitesse → contraintes (effet acousto-élastique)

Amplitude

Atténuation → microstructure et défauts

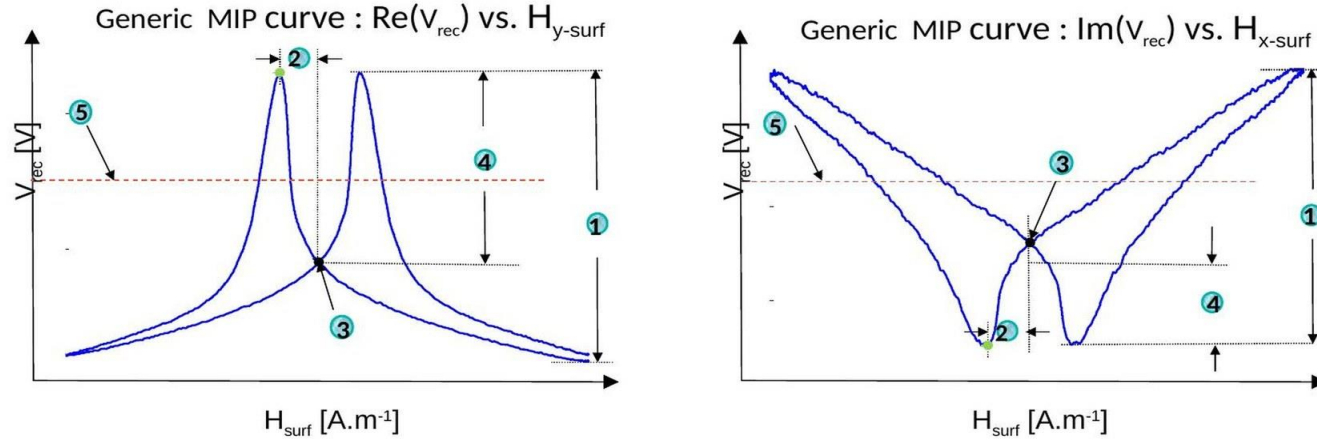
FFT

Dispersion et signature spectrale

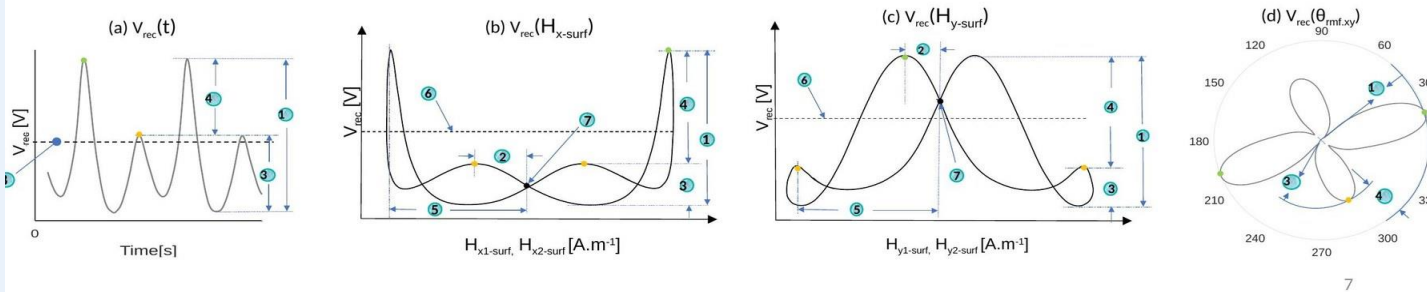
Indicateurs extraits

Des grandeurs scalaires lisibles directement sur les signatures magnétiques

(a) Excitation uni-axiale



(b) Excitation biaxiale



Les 9 indicateurs

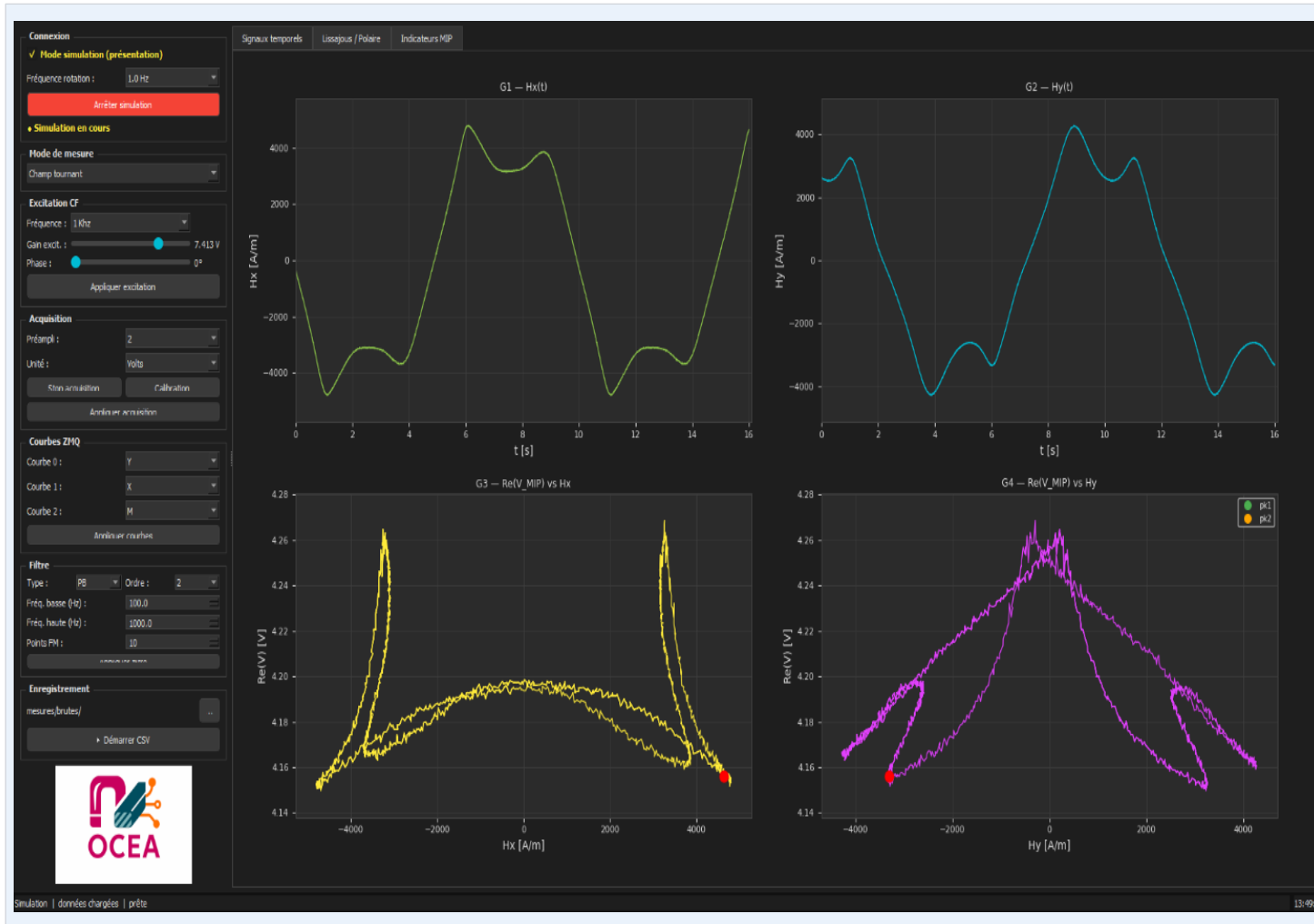
DÈS L'UNI-AXIAL

- 1 $\Delta(V_{\text{rec}})$ — amplitude crête-à-crête
- 2 Coercive point H_c
- 3 Remanence $\text{rem}(V_{\text{rec}})$
- 4 $\text{Mean}(V_{\text{rec}})$ — valeur moyenne
- 5 $\text{pk2} - \min(V_{\text{rec}})$

NÉCESSITENT LE BIAxIAL

- 6 $\max(\text{pk1} - \text{pk2})$
- 7 $\text{pk1} - \text{rem}(V_{\text{rec}})$
- 8 $\text{pk2} - \text{rem}(V_{\text{rec}})$
- 9 H_{surf} at pk2

9 indicateurs scalaires lisibles, interprétables physiquement, extraits automatiquement



Fonctionnalités clés

PILOTAGE & ACQUISITION

- 1 Configuration des modes d'excitation
- 2 Réglage CF : fréquence, gain, phase
- 3 Acquisition 8 voies synchrones
- 4 Filtrage analogique & numérique
- 5 Enregistrement CSV / export brut

VISUALISATION & ANALYSE

- 6 Signaux temporels H_X / H_Y
- 7 Signatures MIP en temps réel
- 8 Lissajous, vue polaire, indicateurs
- 9 Interopérable Python / MATLAB

Une plateforme logicielle ouverte, du pilotage matériel à l'analyse des signatures

Connexion

Mode simulation (présentation)

IP RPI 1 : 192.168.1.122

Connecter

• Déconnecté

Mode de mesure

Champ tournant

Excitation CF

Fréquence : 1 KHz

Gain excit. : 7.413 V

Phase : 0°

Appliquer excitation

Acquisition

Préampli : 2

Unité : Volts

Stop acquisition Calibration

Annuler acquisition

Courbes ZMQ

Courbe 0 : Y

Courbe 1 : X

Courbe 2 : M

Annuler courbes

Filtre

Type : PB Ordre : 2

Fréq. basse (Hz) : 100.0

Fréq. haute (Hz) : 1000.0

Points FM : 10

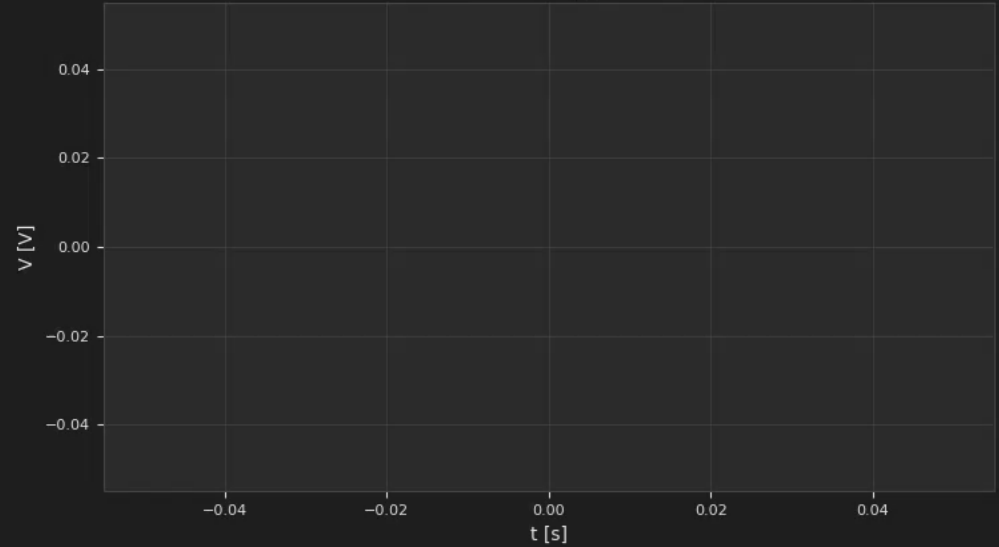
Enregistrement

mesures/brutes/

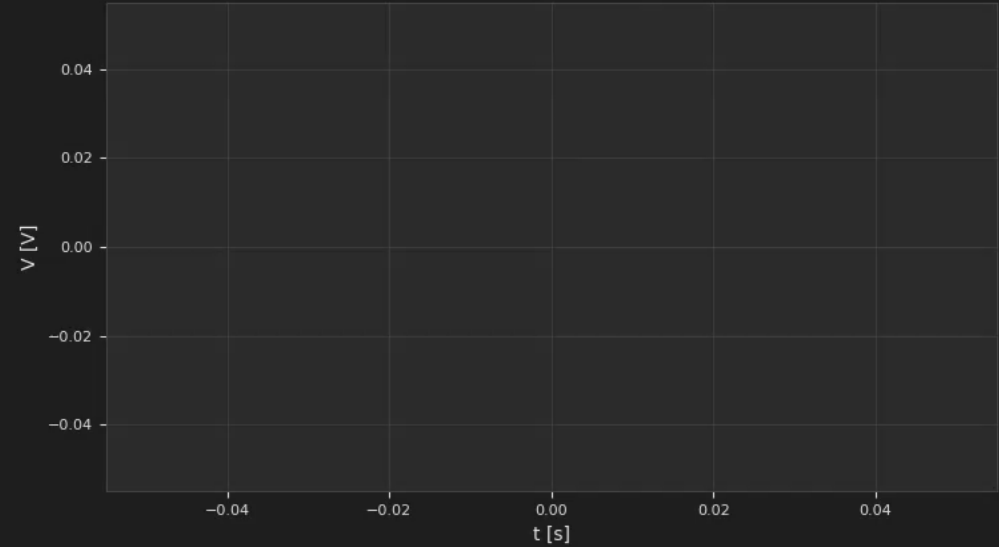
Démarrer CSV

Signaux temporels Lissajous / Polaire Indicateurs MIP

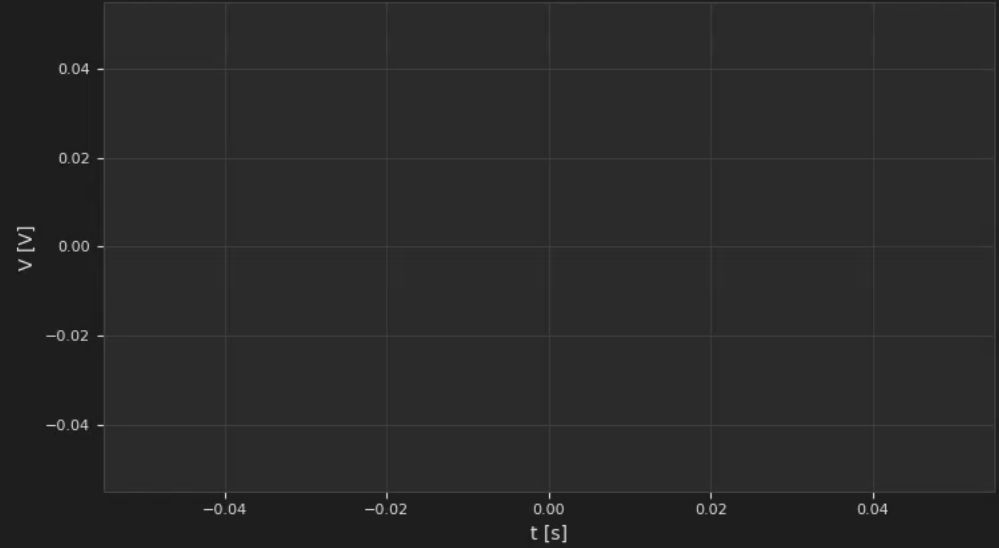
G1 — Hall H_surf(t)



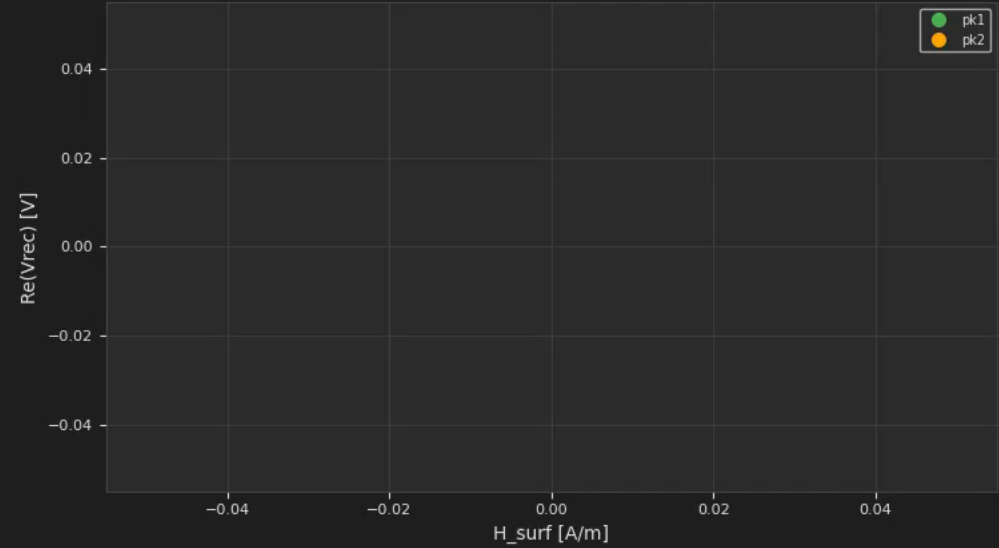
G2 — Re(Vrec)(t)



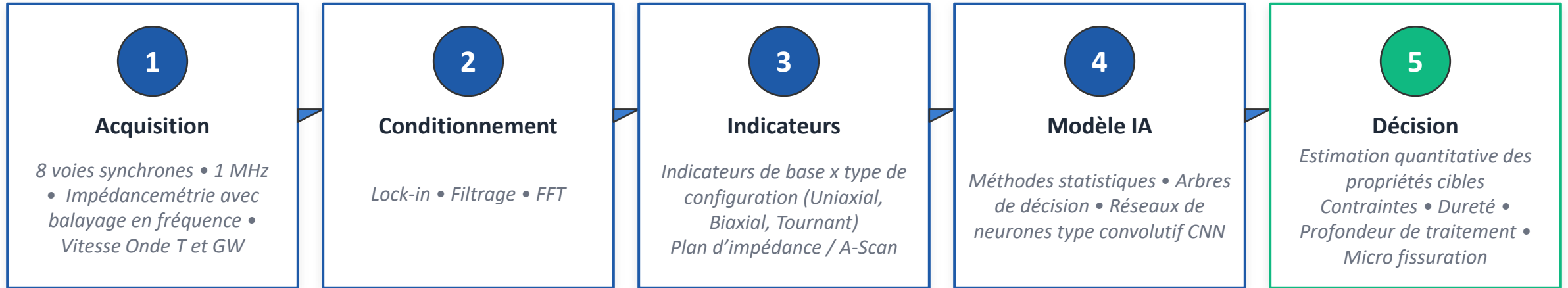
G3 — Im(Vrec)(t)



G4 — Re(Vrec) vs H_surf



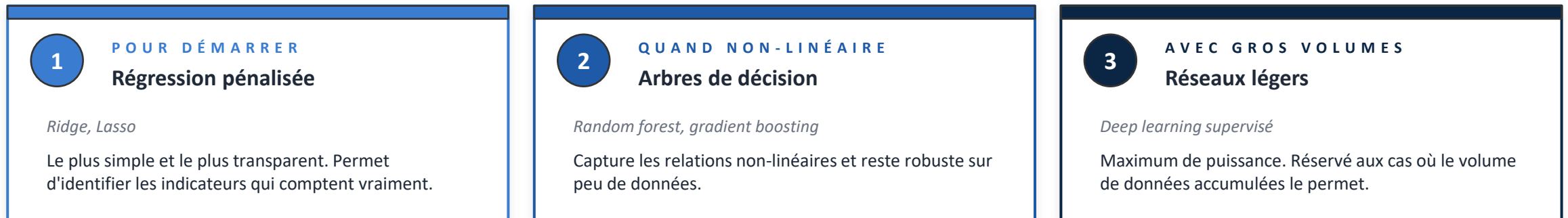
L'IA OCEA repose sur l'extraction préalable d'indicateurs physiques avant tout modèle statistique, pour préserver l'interprétabilité.



Modèles évalués — du simple au complexe

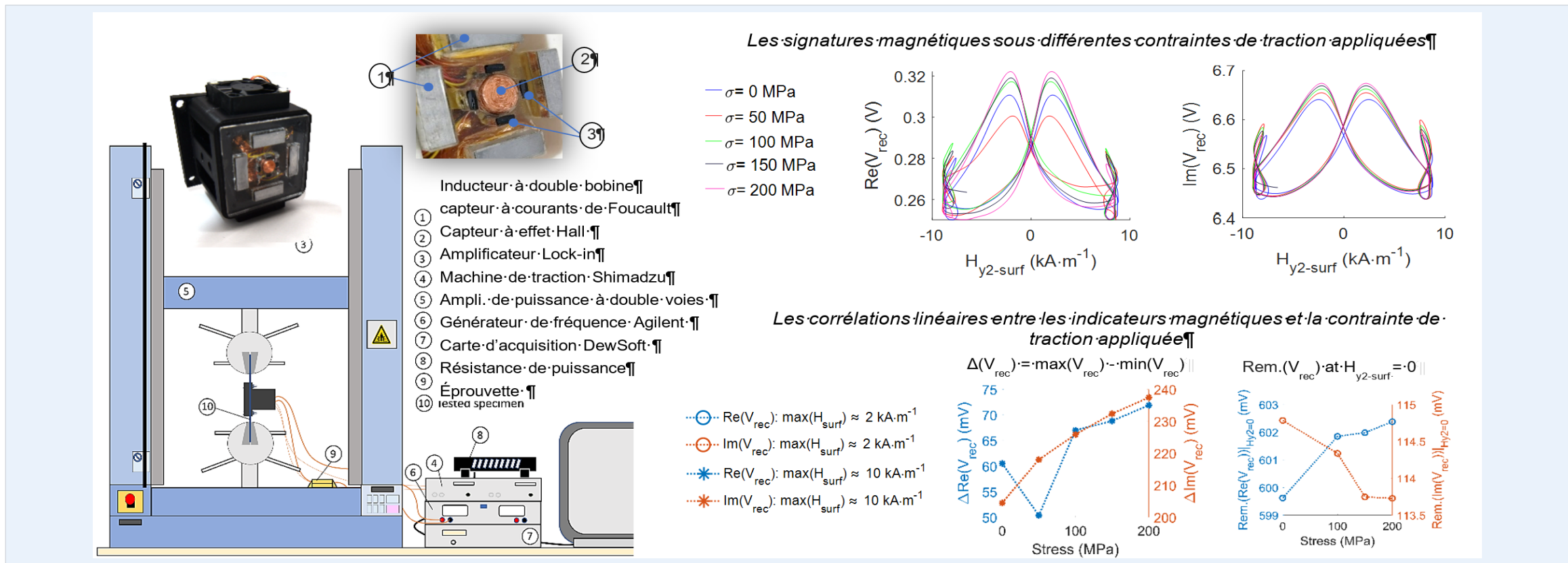
Complexité ↑

Données requises ↑



Cas d'application — Contraintes résiduelles

Mesure rotationnelle sur éprouvette sollicitée en traction



PROTOCOLE

Traction 0 → 200 MPa

Éprouvette acier sollicitée par paliers de 50 MPa, mode rotationnel basse fréquence.

OBSERVATION

Signatures qui évoluent

Les courbes Re et Im se déforment de manière monotone et reproductible avec la contrainte.

RÉSULTAT

Corrélations linéaires

Plusieurs indicateurs MIP varient linéairement avec la contrainte — calibration possible.

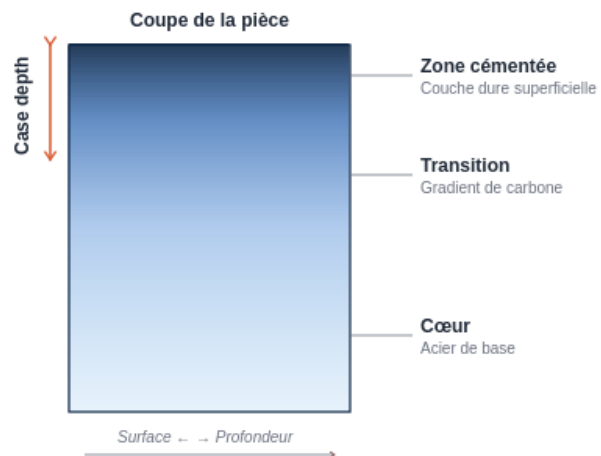
La signature magnétique évolue avec la contrainte — fondement d'une mesure quantitative non destructive

Autres cas d'application

Trois familles de problématiques industrielles ciblées

DURETÉ & TRAITEMENTS

Cémentation, nitruration, induction



Profondeur effective de la couche traitée et profil de dureté à partir des indicateurs MIP multi-fréquence.

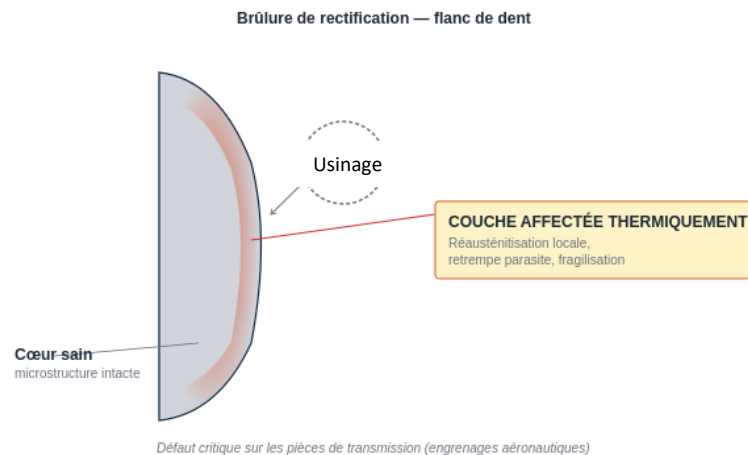
Profondeur visée 0,5 – 4 mm

Référence destructive

DRX, microdureté Vickers

BRÛLURES DE RECTIFICATION

Pièces de transmission



Détection des couches superficielles affectées thermiquement — défaut critique pour les engrenages aéronautiques.

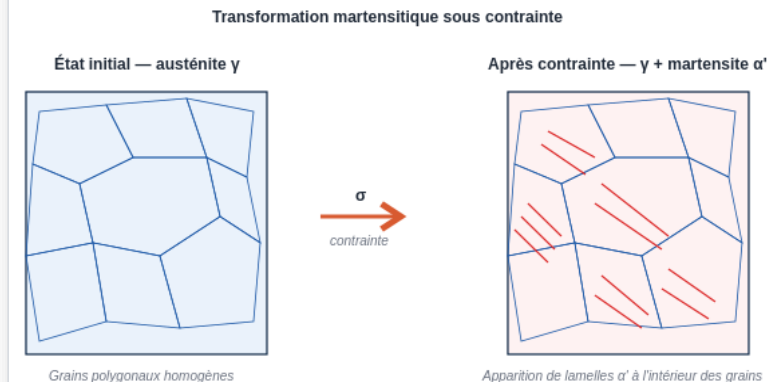
Sensibilité visée ≈ 50µm

Référence destructive

Attaque chimique Nital

MARTENSITE & PHASES

Aciers austénitiques



Aciers austénitiques (AISI 304/316) — transformation invisible en surface

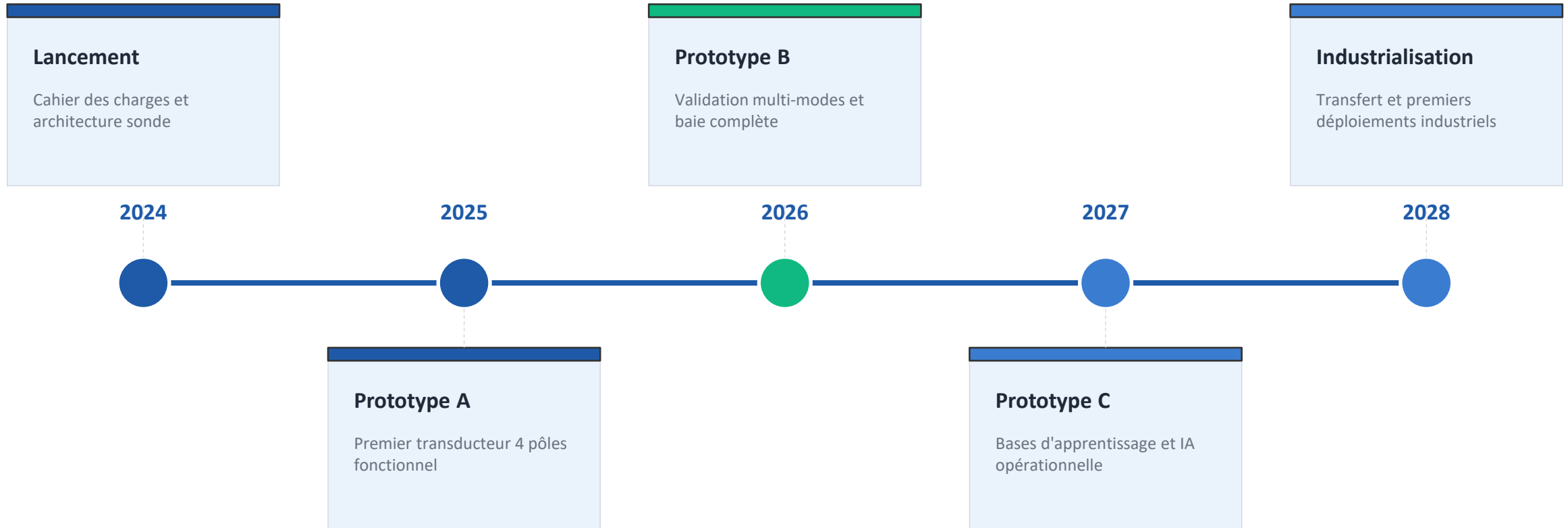
Estimation du taux de transformation martensitique sous sollicitation mécanique (AISI 304L, structures cryogéniques).

Plage visée 0 – 30% vol

Référence destructive

MEB, EBSD

Une approche unifiée pour caractériser, sans destruction, les évolutions microstructurales liées au procédé ou au service



Trois axes structurants

Axe 1 — Plateforme matérielle — Sonde multipôles + baie de mesure intégrée

Axe 2 — Multi-méthodes — MIP, MBN, CF multi-fréquence, EMAT

Axe 3 — Plateforme IA — Indicateurs, modèles, validation industrielle

Et si vous étiez partenaire d'OCEA ?



Étalons, éprouvettes industrielles, retours terrain — vos cas d'application enrichissent la base d'apprentissage.

DÉMONSTRATION

Présentation de la sonde et de la baie OCEA sur site, avec essais sur vos pièces de référence.

ÉVALUATION

Étude de faisabilité personnalisée pour évaluer la pertinence sur votre application industrielle.

CO-DÉVELOPPEMENT

Adaptation de la chaîne d'acquisition et des modèles à vos contraintes spécifiques.

CONTACT

CMPhy — 32 allée Maria Chambefort, 71530 VIREY LE GRAND
contact@cmphy.fr • +33 3 85 47 47 20 • www.cmphy.fr

PARTENAIRES

ELyT MaX IRL3757 — CNRS / INSA Lyon / Centrale Lyon
Universités Tohoku & Lyon 1