



Les communautés
d'experts

Journée CND
Détection d'endommagement et suivi en fabrication
Mardi 30 novembre 2021



Évaluation non destructive des propriétés matériaux (Bruit Barkhausen, courants de Foucault, 3MA, ultrasons, etc...)

Henri WALASZEK, Hélène PETITPRÉ



La caractérisation non destructive des matériaux au CETIM

- ▶ Actions de R et D applicative sur le CND de caractérisation des matériaux
 - ▶ Fortes interactions avec les pôles Matériaux métalliques et surfaces et Fatigue
 - ▶ Pilotage par les professions mécaniciennes (Engrenages, roulements, chaudronniers, matériels de TP, moteurs, forges fixations, métaux en feuille..)
- ▶ Exploitation de techniques de Contrôle non destructif (CND), via une calibration
 - ▶ Méthodes électromagnétiques, (non linéaires, mais sans couplant physique , et faible entrefer)
 - ▶ Importance de l'analyse de données
 - ▶ Méthodes ultrasonores au contact ou immersion locale
- ▶ Activité phare CETIM en CND (5 brevets déposés) :
 - ▶ Evaluation de la profondeur de trempe par ultrasons rétrodiffusés (MAGDA)
 - ▶ Contrôle de la taille des grains par analyse spectrale des ultrasons (TRIUS)
 - ▶ Contrôle de l'effort de serrage des assemblages vissés par US sans contact (SERVIS)
 - ▶ Mesure de l'épaisseur de revêtements non ferromagnétiques par résonance US (SIDERUS)
 - ▶ Contrôle non destructif de frettage par voie magnétique

Quelques généralités sur CND pour caractériser les matériaux

Généralités sur la caractérisation par CND

Méthode surfacique	D	C	MET	COM	Méthode volumique	D	C	MET	COM
Visuel, caméra	X		X	X	Radiographie / Tomographie	X		X	X
Ressuage	X		X		Ultrasons	X	X	X	X
Magnétoscopie	X		X		Ondes guidées	X		X	X
ACFM	X		X		Impédance, résonance, Tap-test	X	X	X	X
Courants de Foucault	X	X	X		Méthode globale	D	C	MET	COM
Thermographie infrarouge	X		X	X	Emission acoustique	X		X	X
Bruit ferromagnétique		X	X		Ondes guidées	X		X	X

D = Défectologie , C = Caractérisation, MET = Métallique, COM = Composite

Des méthodes indirectes..

Excitation

Onde électromagnétique, vibration mécanique, champ magnétique, thermique...

Perturbation

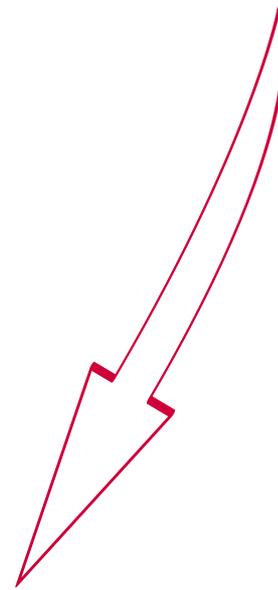
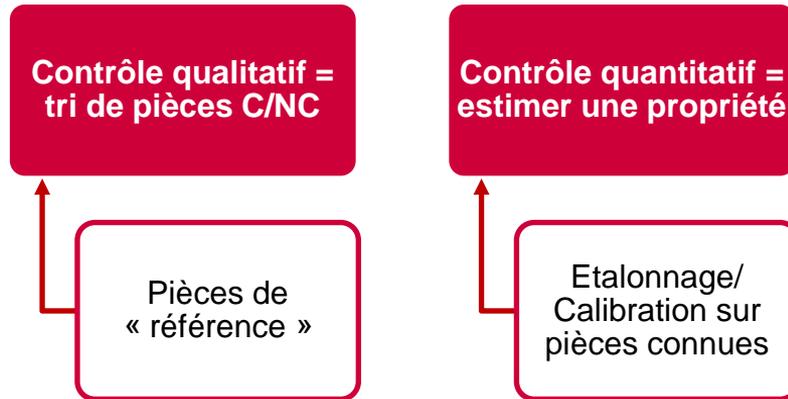
L'anomalie contenue dans la pièce : variation de la microstructure ou des propriétés mécaniques

Révélation / détection

Capteur → signal → image...

CND et Analyses destructives

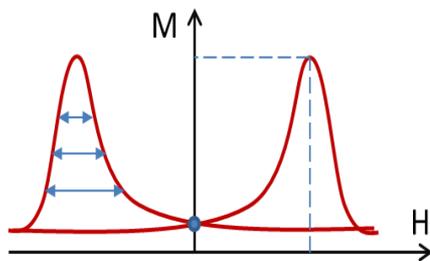
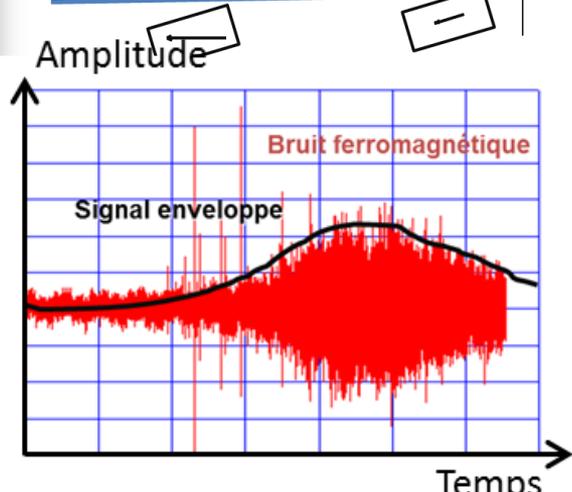
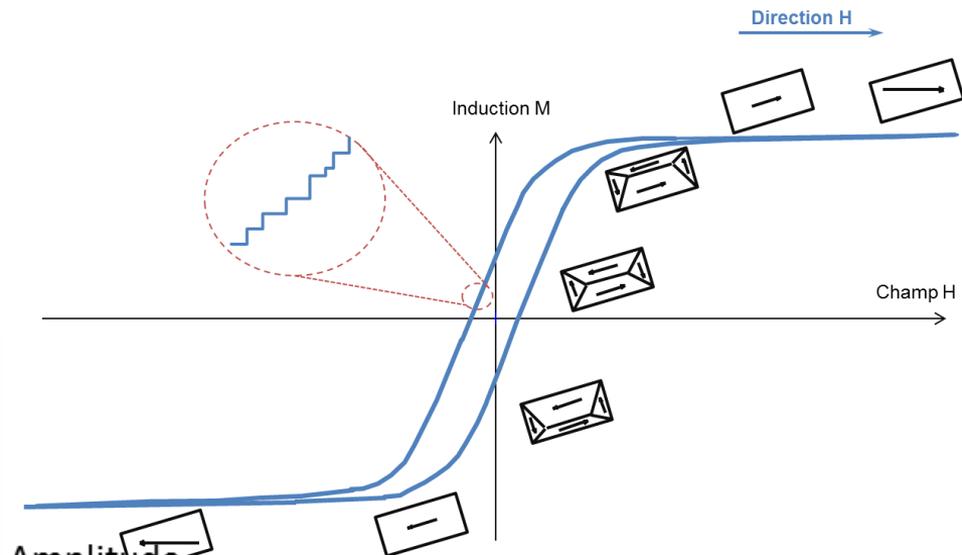
- ▶ Les CND ne doivent pas être confondus avec AD : la mesure est **Indirecte**
- ▶ Les CND détectent les variations de grandeurs physiques (ex. amplitude ou vitesse des US, impédance électrique, perméabilité magnétique...)
- ▶ Ces variations sont corrélées avec :
 - ▶ Dureté
 - ▶ Taille de grains
 - ▶ Écrouissage
 - ▶ Contraintes résiduelles ou appliquées
 - ▶ Épaisseur de traitements thermiques ou de revêtements
 - ▶ Etc...



Méthodes électromagnétiques

Principe du bruit Barkhausen

30.11.2021

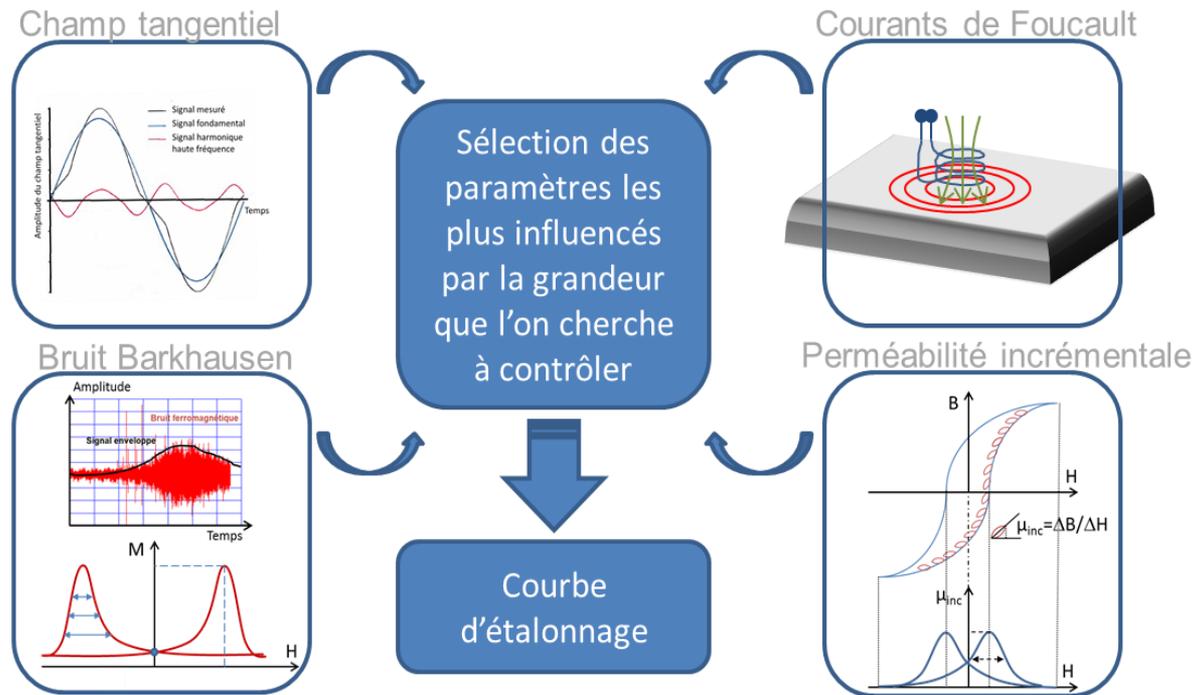


~ 10 paramètres extraits

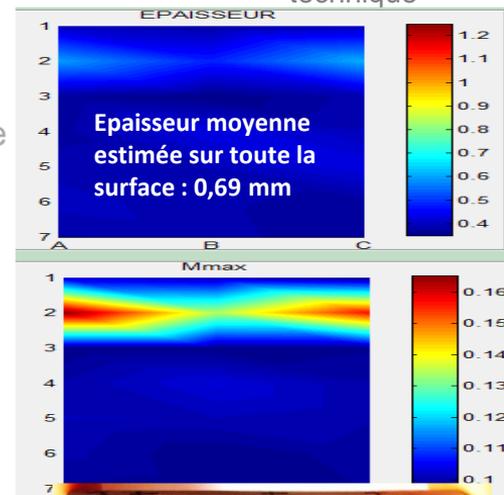
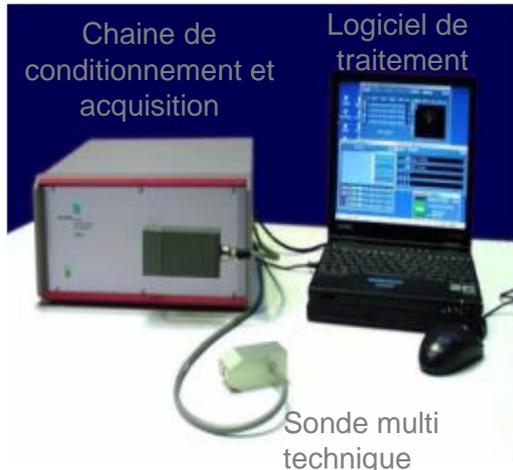


Principe de fonctionnement du 3MA

4 mesures dans une même sonde



De chaque mesure, une dizaine de paramètres sont extraits



Contrôle de la profondeur de cémentation par 3MA

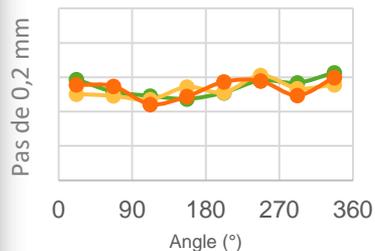
Évaluation de la profondeur de cémentation

Essais sur site de production à l'aide d'une Cellule Robotique Flexible de Contrôle (CRFC)

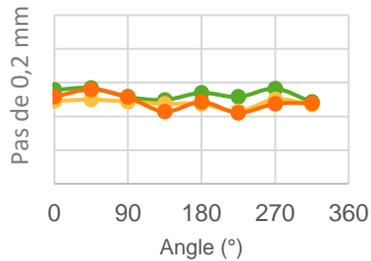
- ▶ Composants de transmission de géométrie complexe, issues de la production
- ▶ Amélioration de la répétabilité grâce à la CRFC
- ▶ Analyse sur position de la pièce dans le four



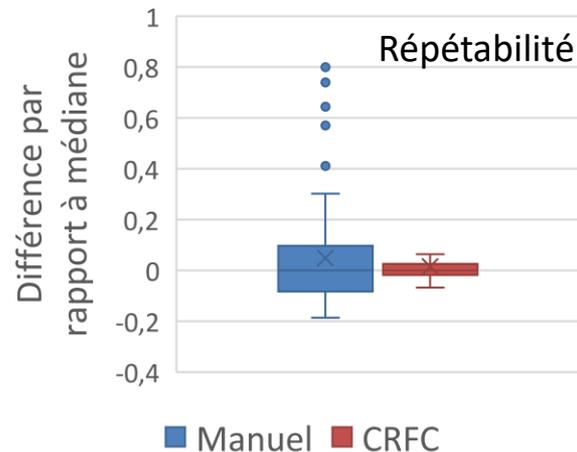
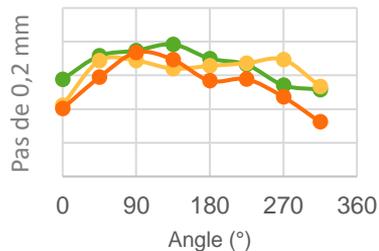
Haut du four



Centre du four



Bas du four



Évaluation de la profondeur de cémentation

Essais étalés dans le temps

- ▶ Pièces cylindriques
 - ▶ Cémentées (non mesurables destructivement)
 - ▶ Cémentées/trempées (filiation de microdureté possible)
- ▶ Réglages et étalonnage 3MA faits en 2019 sur pièces issues du centre du four
- ▶ Essais par 3MA effectués en 2021 sur pièces prélevées près du bord du four
 - ▶ Légère dégradation de la justesse et fidélité de mesure

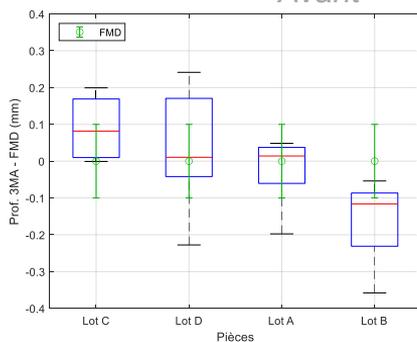


Cémentées trempées

Justesse: $< \pm 0,3 \text{ mm}$ $< \pm 0,1 \text{ mm}$

Fidélité : $< \pm 0,4 \text{ mm}$ $< \pm 0,1 \text{ mm}$

Avant

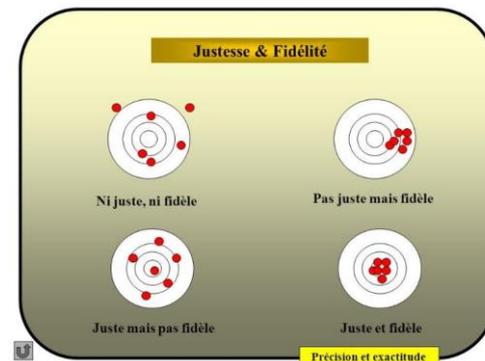
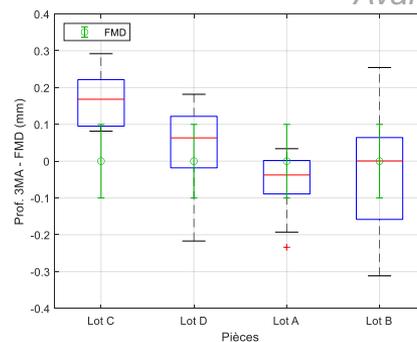


Cémentées

Justesse: $< \pm 0,3 \text{ mm}$ $< \pm 0,1 \text{ mm}$

Fidélité : $< \pm 0,4 \text{ mm}$ $< \pm 0,1 \text{ mm}$

Avant



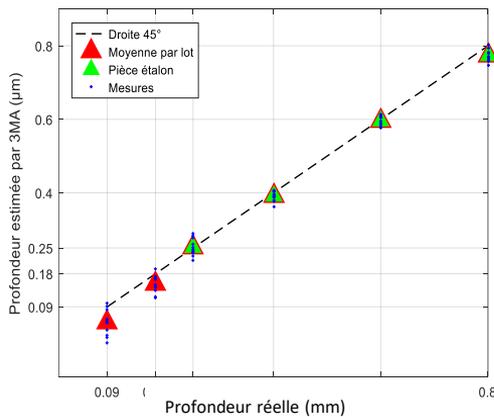
Contrôle de la profondeur de nitruration par 3MA

Évaluation de la profondeur de nitruration

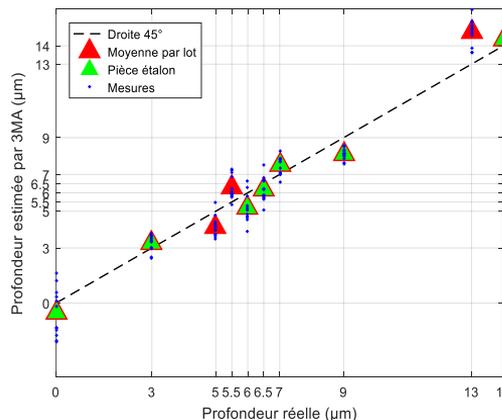


- ▶ Deux lots de pièces fournies par un industriel
 - ▶ Lot 1 : 6 épaisseurs diffusion \neq , 3 pièces / e, soit 18 pièce → *mesure de l'épaisseur de diffusion et combinaison*
 - ▶ Lot 2 : à e diffusion constante, 3 à 5 niveaux de compacité de la couche de combinaison \neq , 2 pièces / niveau, soit 14 pièces → *caractérisation de la compacité de la couche de combinaison*

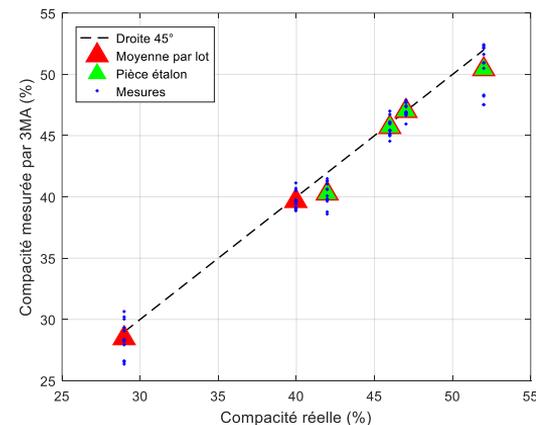
Profondeur de diffusion



Profondeur de combinaison



Taux de compacité dans la couche combinaison



Principales conclusions

- ▶ Qualité des estimations :
- ▶ Une mesure pour 3 caractéristiques à contrôler
- ▶ Un étalonnage pour \neq procédés de traitement
- ▶ Apprentissage enrichi au cours du temps

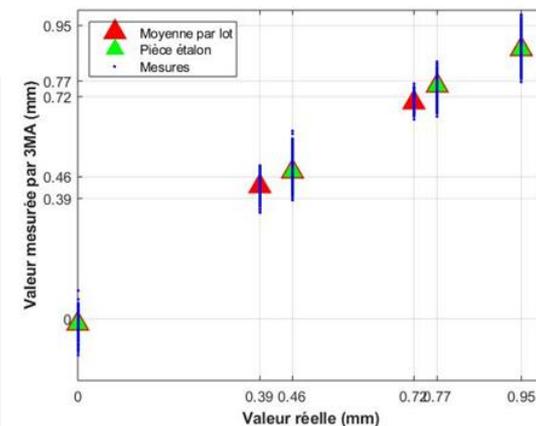
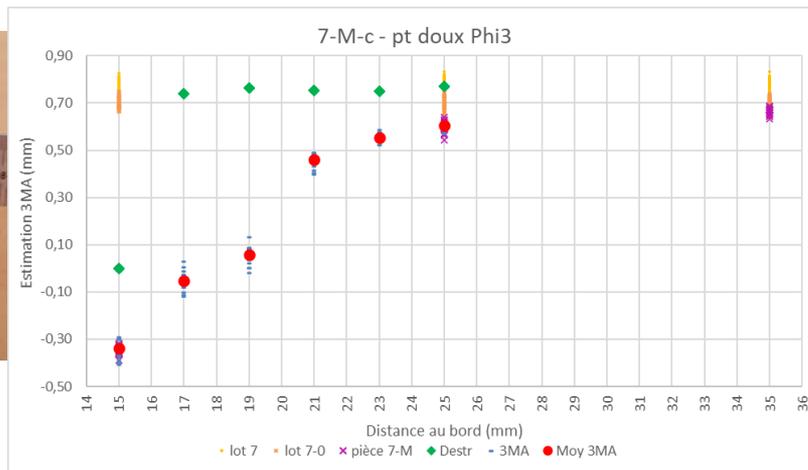
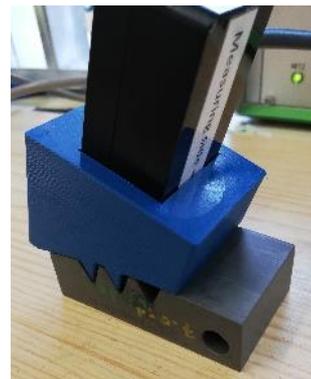


Caractéristiques	Justesse	Fidélité
E diffusion (mm)	$\pm 0,06$	$\pm 0,1$
E combinaison (μm)	$\pm 1,8$	± 3
Compacité %	$\pm 2\%$	4%

Évaluation de profondeur de couche de diffusion

Essais sur témoin de pignons en nitruration profonde (avec détection des points doux)

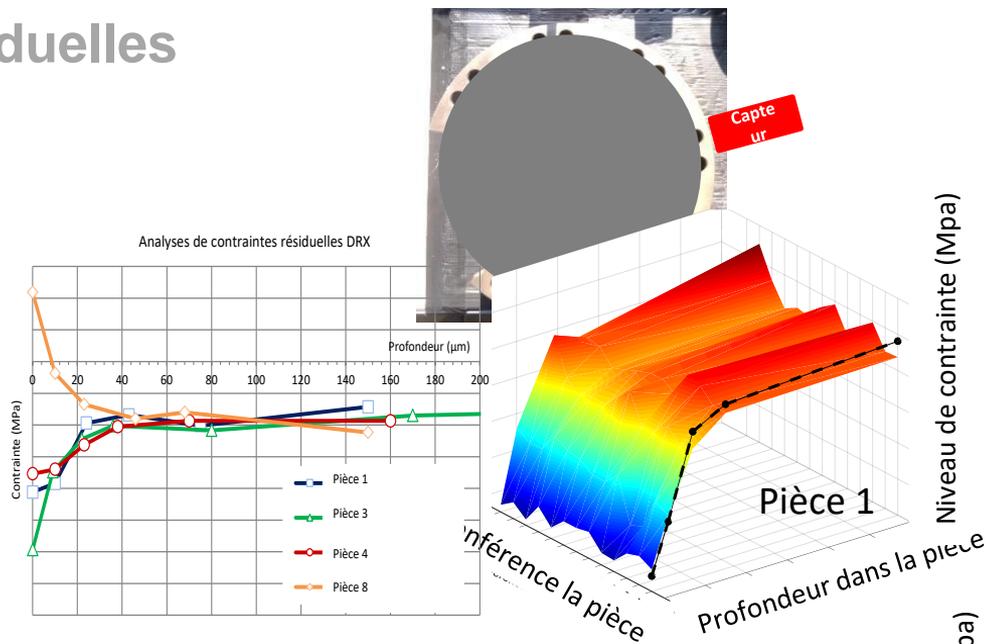
- ▶ Couche de diffusion : justesse $\pm 0,1$ mm et fidélité $\pm 0,11$ mm dans la plage 0,4 et 1 mm
- ▶ Points doux de qqs mm détectables jusqu'à une distance de 2 x diamètre avec la sonde utilisée



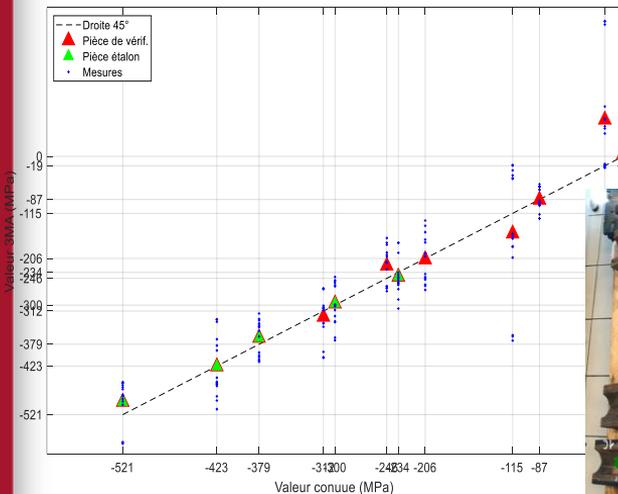
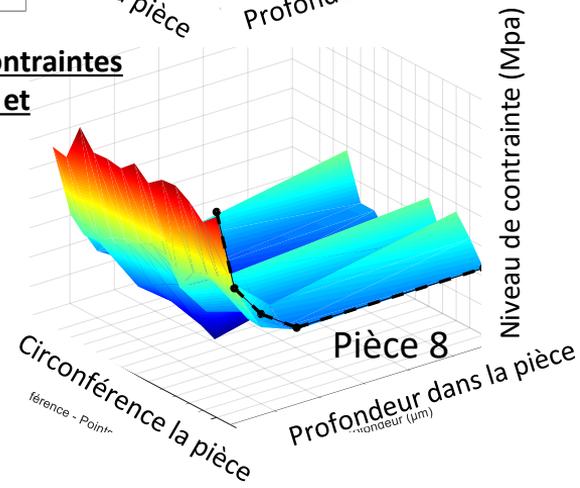
Caractérisation des contraintes résiduelles

Évaluation de contraintes résiduelles

- ▶ **Cas 1 : pièces cylindriques de transmission, cémentées et rectifiées**
 - ▶ 4 profils de contraintes résiduelles différents après \neq traitement de surface
- ▶ **Cas 2 : morceaux de couronne d'orientation trempée + revenu dans la masse**
 - ▶ 4 niveaux de contraintes \neq après trempé + \neq revenu
- ▶ **Globalement : justesse = 50 Mpa et fidélité 100 MPa**



Cas 1 : Profils de contraintes après cémentation et rectification



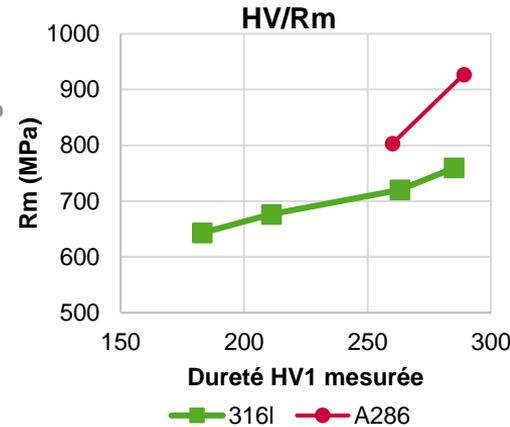
Cas 2 : σ_R surface après trempé – revenu dans la masse

Évaluation du niveau d'écrouissage sur aciers inoxydables

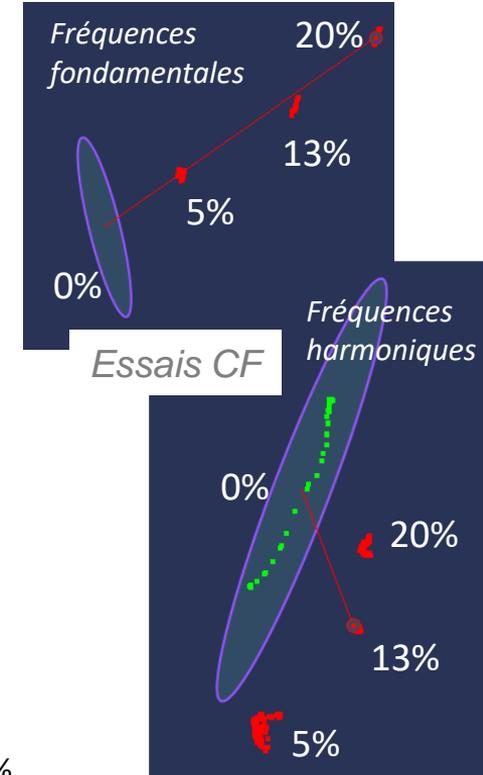
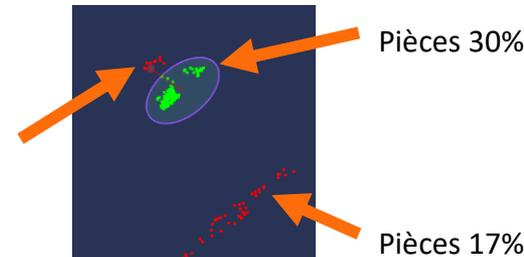
Effet de l'écrouissage sur caractéristiques mécaniques et réponses CND (aciers inoxydables)

Essais CF sur 2 lots de pièces écrouies

- ▶ Pièces en acier inox austénitique 316L hypertrempées (exempte d'écrouissage)
 - ▶ 3 niveaux de déformation (5, 13 et 20% d'allongement) créés par essais de traction interrompus
- ▶ Pièces tréfilées en A286 (Phi13mm) avec 2 taux de réduction 17 et 30%
 - ▶ 2 états écrouis complexes



Effets de bord sur pièces 30% ne se confondent pas avec les 17%

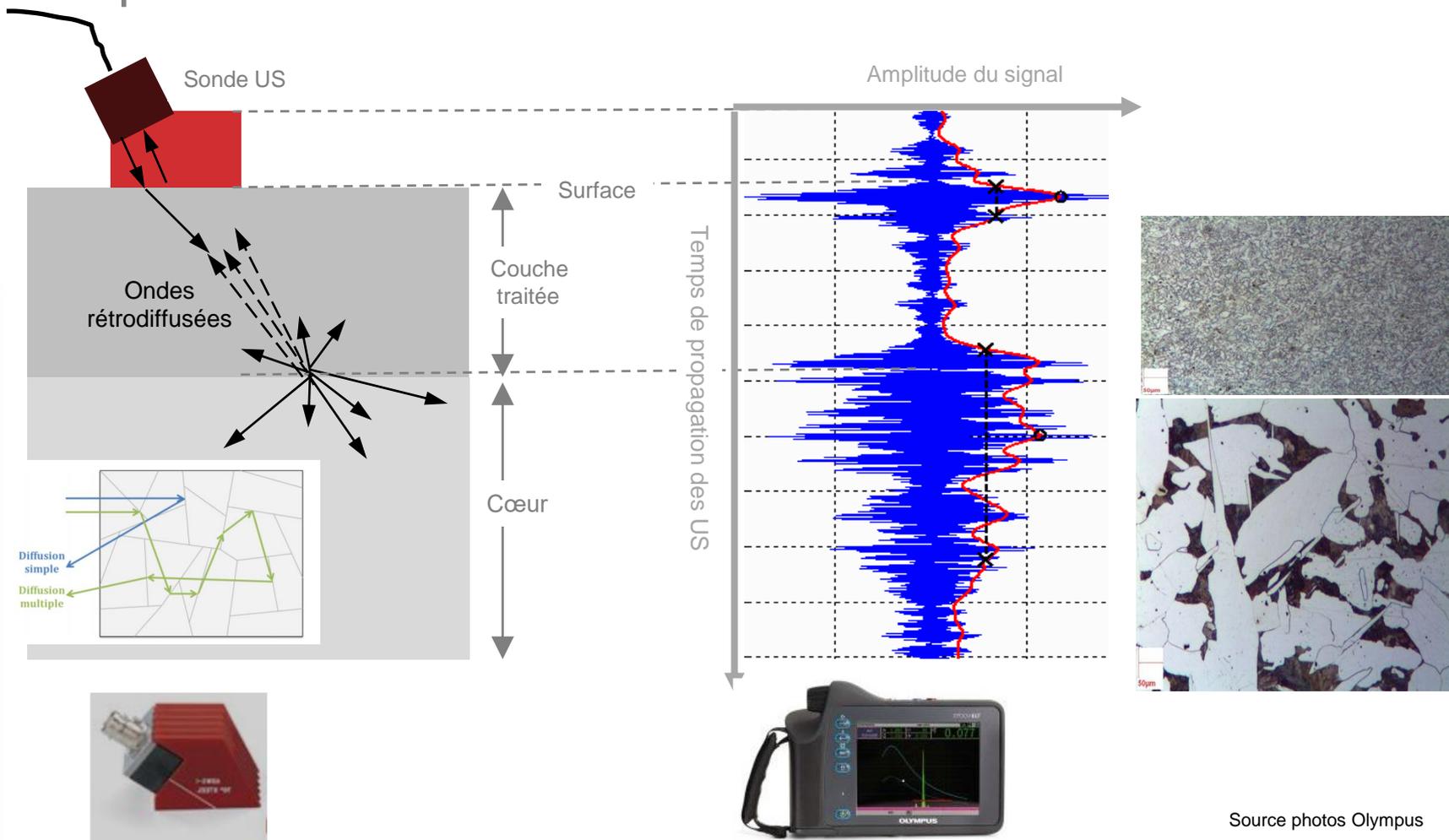


Essais US OS



Contrôle de la profondeur de trempe superficielle par les ultrasons rétrodiffusés

Principe des US rétrodiffusés

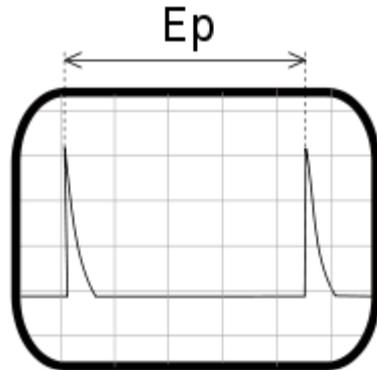
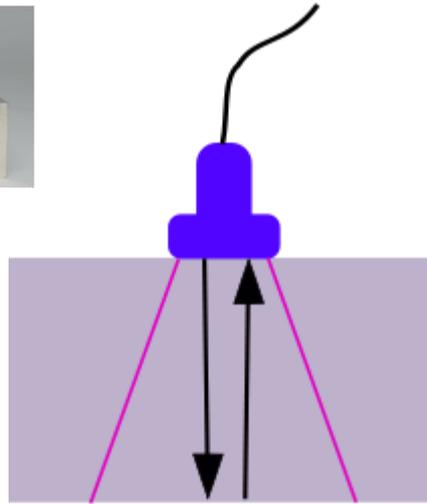
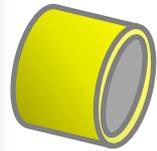


Technologie des capteurs ultrasonores : mono et multiéléments

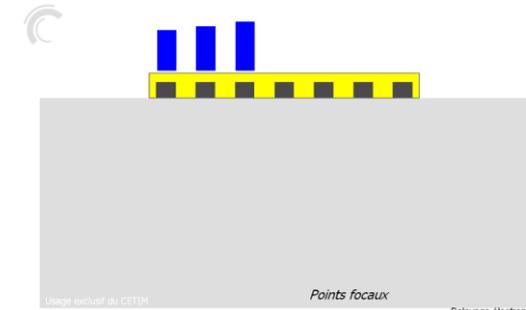
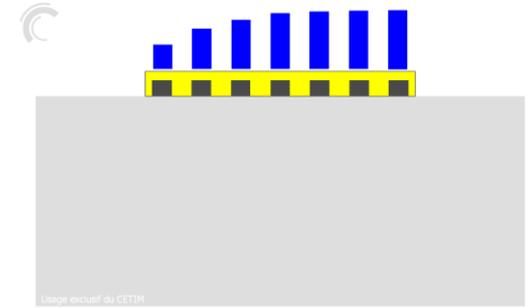
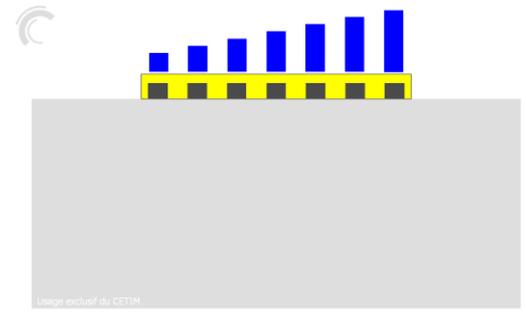
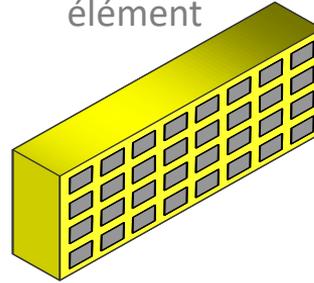
30.11.2021



Capteur mono élément



Capteur multi élément

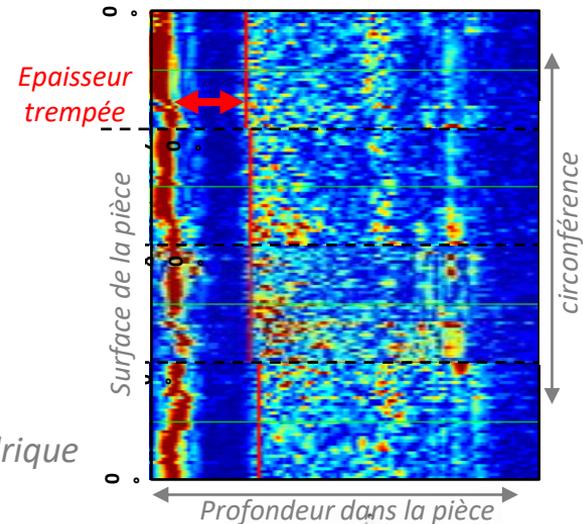
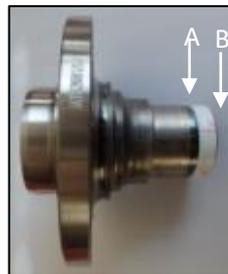


Source photos Olympus

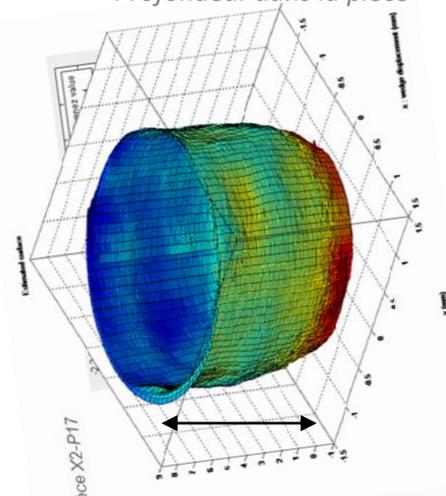
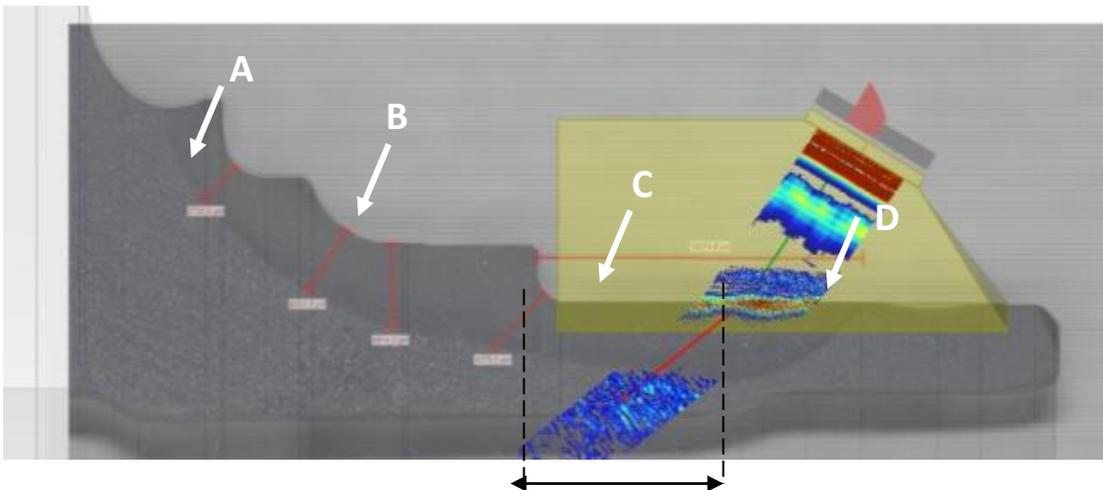
Cas des éléments de roulement en acier non allié, trempé par induction

Sonde mono : Epaisseur de la couche trempée suivant une circonférence

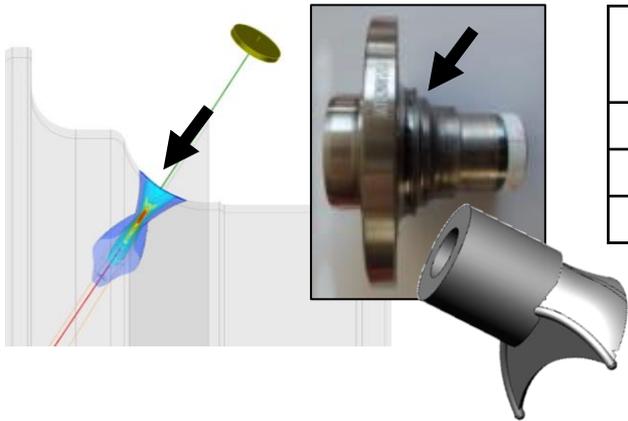
zone	Profondeur en mm mesurée par Microdureté Vickers (HV1)	Profondeur en mm mesurée par système Magda
A	1,93	2
B	3,36	3,1
C	5,18	5,2
D	1,79	2,2



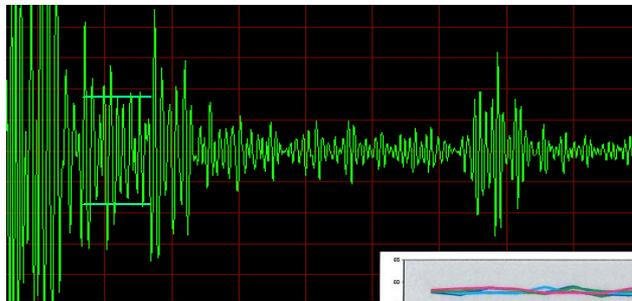
Sonde multi : Epaisseur de la couche trempée sur toute la surface partie cylindrique



Exemple des résultats dans la phase 2 : géométrie + complexe et profondeur + élevée (> 6mm)

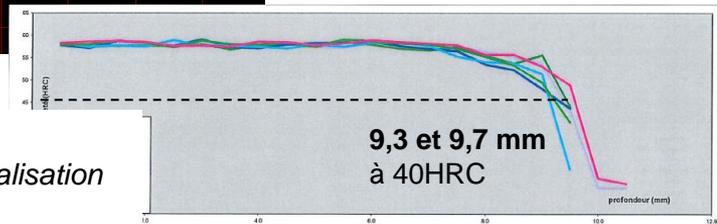


Pièce	Profondeur en mm mesurée par Micro-dureté Vickers (HV1)	Profondeur en mm mesurée par système Magda
A	2,5	2,6
B	3,2	3,3
C	4,2	3,9



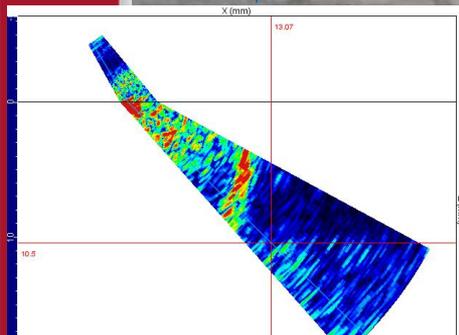
Sonde mono-élément

- Immersion
- Fréquence 10MHz
- Profondeur estimée : **10,5 mm**



Sonde multiélément

- Balayage électronique (linéaire et/ou sectoriel), focalisation électronique
- Fréquence 15 MHz, filtre BP 12 à 18 MHz
- Echos rétrodiffusés : profondeur estimée **10,5 à 10,6 mm**



Validation sur site // analyses destructives

► Objectif visé

- Améliorer le prototype actuel sur cas complexes (géométrie, forte profondeur, matériaux hétérogènes)
- Développer, puis valider le prototype industriel

► Cas étudiés

- Complexité géométrique : moyeux, arbres, alésage,
- Profondeurs > 10 mm
- Fonte

► Avancement

- Sur certains, tests faits, en attente de confirmation par analyses destructives
- Sur d'autres, améliorations en cours, support sonde pour immersion locale, diminuer la fréquence
- **Recherche d'un partenaire pour réaliser le prototype industriel → commercialisation**



Conclusions et perspectives

► Sujets actuellement en cours et tendances (1)

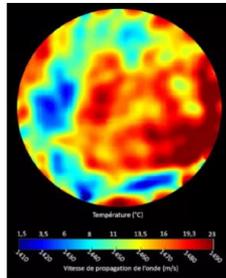
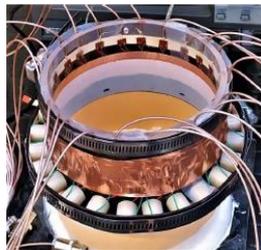
Méthodes électromagnétiques

- Détecter le taux d'austénites résiduelles, les réseaux de carbure, l'oxydation interne
- Miniaturiser les sondes électromagnétiques pour des géométries de pièces complexes (l'alésage interne de faible diamètre, le fond des dentures...)
- Réaliser un démonstrateur ; une cellule de contrôle flexible et **automatisée** pour le contrôle en série
- Proposer un traitement de données multi-paramètre pour les mesures BB
- Automatiser l'analyse statistique des données pour la rendre plus fiable et rapide

► Sujets actuellement en cours et tendances (2)

Ultrasons

- Développer un prototype industriel sur le contrôle de la trempe superficielle par US rétrodiffusés en vue de sa mise sur le marché
- Exploitation des ondes de surface via l'utilisation des US sans contact (laser, EMAT, etc) pour le contrôle de la microstructure et des contraintes
- Exploitation des techniques de reconstruction tomographique ultrasonore pour la caractérisation interne des propriétés mécaniques des composants mécaniques (projet)



Merci de votre attention



Osez le futur