



DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

Méthodes électromagnétiques dans CND

N.Sergeeva-Chollet, CEA LIST, Université Paris-Saclay

Présentation de CEA

Principes de CF

Capteurs

Techniques et applications

CF multi-éléments

Développement sondes multi-éléments

Développement sondes à base de MR

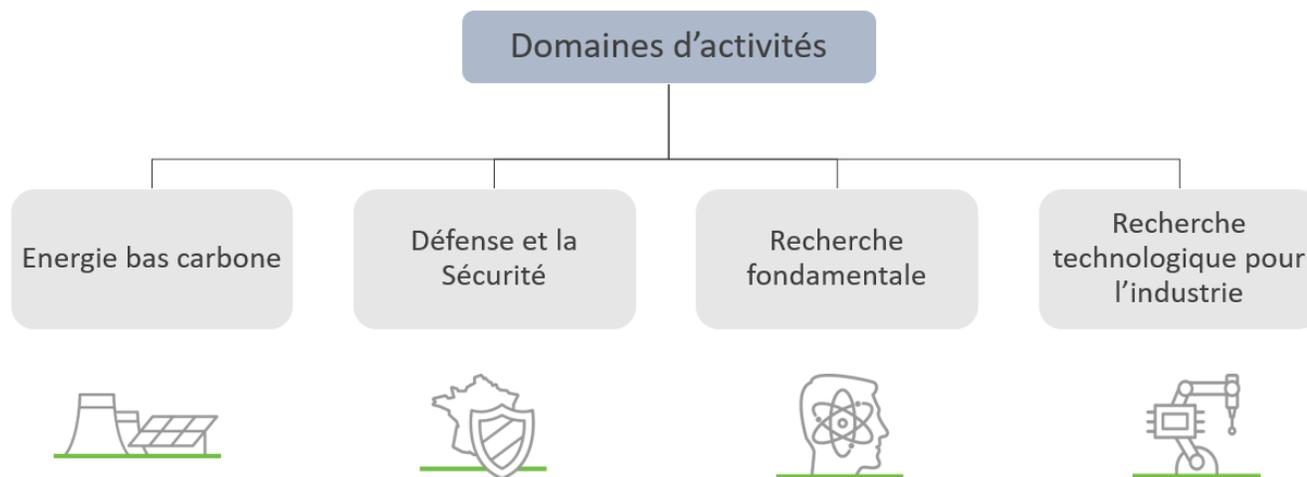
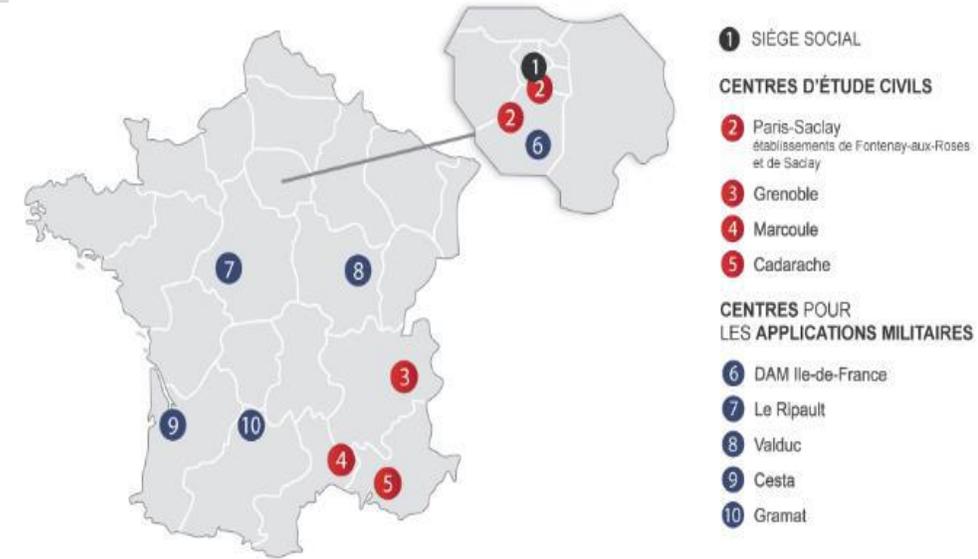
MFL

ACFM

Applications industrielles

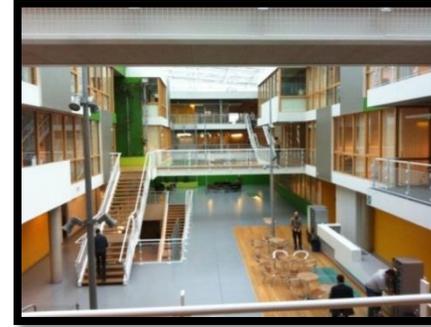
Fabrication Additive

- ❑ CEA : commissariat à l'énergie atomique créé par ordonnance du 18 octobre 1945 par le général de Gaulle
- ❑ 9 centres en France métropolitaine
- ❑ 20 181 personnes dans son effectif total
- ❑ 670 dépôts de brevets prioritaires
- ❑ 5 045 publications scientifiques



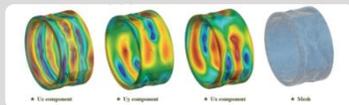
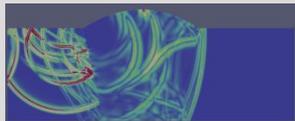
- 80 permanents, 20 doctorants et post-doctorants

depuis 2012



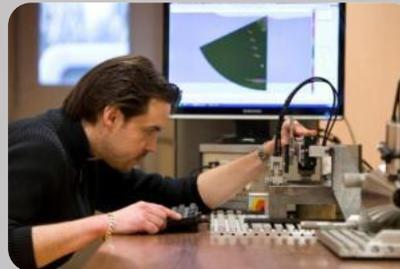
Modélisation, Simulation & Traitement

Modélisation
Imagerie, reconstruction analyse
Outils statistiques



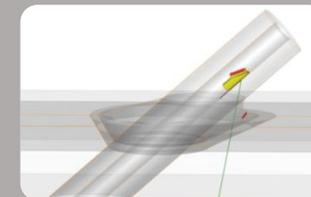
Instrumentation & Capteurs

Nouvelles technologies de Capteurs
Méthodes adaptatives, traitement temps réel
CND robotisé



Méthodes & procédés innovants

Composants complexes (géométrie, matériaux)
Assemblages (soudures, collages, brasures..)
Études POD



Le phénomène des courants induits dits courants de Foucault est découvert par le physicien français Léon Foucault en 1855.

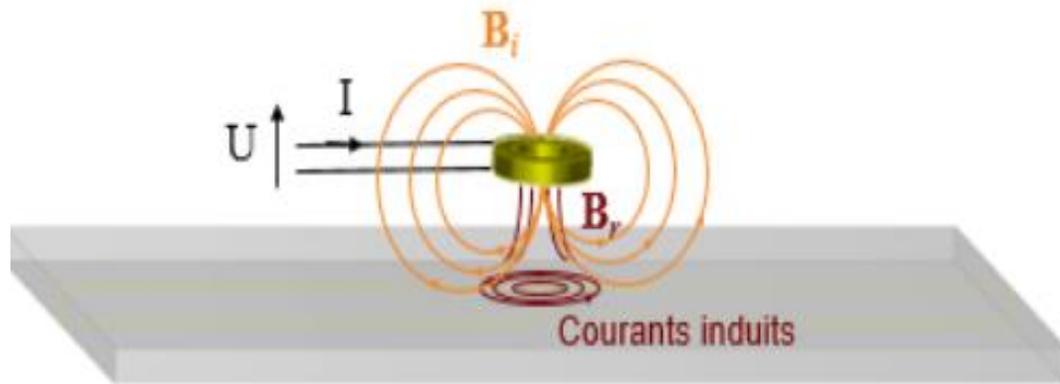
L'expérience de Foucault est basée sur un dispositif constitué d'un disque de cuivre placé entre les deux pôles d'un électro-aimant.

Quand le disque est lancé à toute vitesse, l'alimentation de l'électro-aimant arrête la rotation du disque en quelques secondes. Afin de restituer au disque le mouvement qu'il a perdu, une certaine force doit être appliquée à la manivelle. La résistance éprouvée lors de l'action de la manivelle s'accumule sous forme de chaleur à l'intérieur du corps tournant.

Cette expérience permet de démontrer la présence de courants induits dans tout matériau conducteur en mouvement dans un champ magnétique est appliqué ou dans matériau conducteur placé dans un champ magnétique variable.

Les lignes de courant sont fermées sur elles-mêmes, on parle de boucles.





- Courant d'excitation
- Champ magnétique variable dans le temps
- La tension complexe alternative $\mathbf{u(t)}$ mesurée aux bornes de la bobine dépend du matériau et notamment de :

la conductivité électrique σ ,
la perméabilité magnétique μ ,
la présence ou non d'anomalie

$$Z = jL_0\omega$$

$$Z = R_1 + jL_1\omega$$

$$Z = (R_1 + \Delta R) + j(L_1 + \Delta L)\omega$$

► Plaques à inductions



► Freinage électrique

► Détecteurs de métaux

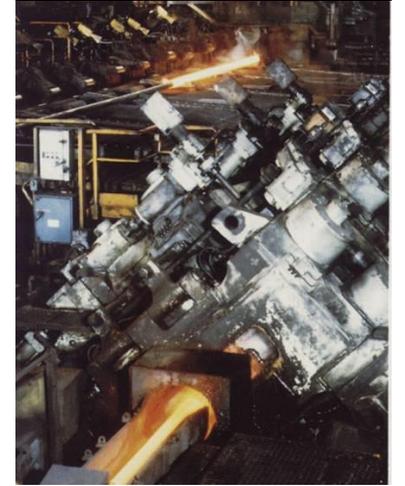


► Portique de détection dans les aéroports

► CND



- Matériau Conducteur
- Technique de contrôle sans contact ni couplant
- Sensibilité aux paramètres géométriques inducteur et pièce
- Sensibilité aux propriétés électriques et magnétiques de la pièce
- Sensibilité à des tout petits défauts
- Courant d'excitation dans l'inducteur
(Régime harmonique ou courants pulsés)



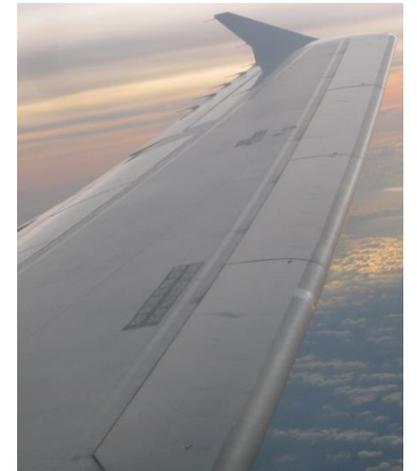
Avantages:

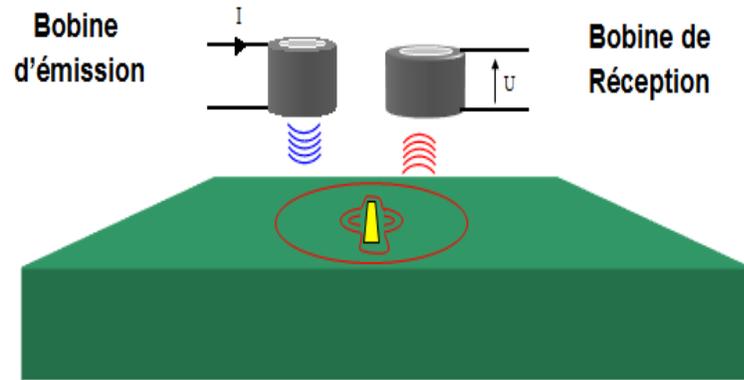
- Haute Sensibilité de détection de petits défauts, (évaluation de la profondeur)
- Défauts débouchants ou situés à faible profondeur (< qq mms)
- Diagnostic rapide et immédiat (contrôle continu de profilés: barres tubes, rubans)
- Équipement léger et portable
- Technique sans couplant et sans contact : vitesse de défilement rapide (5m/s),
- Mesures à haute température (contrôle à chaud des tubes)
- Non polluant

Limitations:

- Matériaux conducteurs
- Surface contrôlée accessible par le capteur
- Nécessite l'expertise de l'opérateur (Habilité, Analyse signal)
- Test préalable de l'instrumentation à effectuer sur des échantillons standard de référence
- Profondeur de pénétration limitée Effet de Peau (Atténuation des CF)

- **Tri de pièces par mesures de conductivité et perméabilité**
 - Identification d'un alliage
 - Evaluation d'un traitement thermique du même alliage
 - Détection de surchauffes locales
- **Détection et évaluation de corrosion**
- **Mesures de l'épaisseur d'un revêtement non conducteur**
- **Détection et caractérisation défauts ou anomalies**





Bobine parcourue par un courant, qui produit un champ électromagnétique déterminé par:

Équations de Maxwell

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0$$

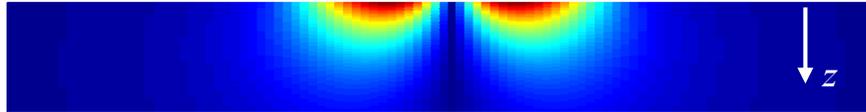
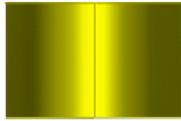
$$\overrightarrow{\operatorname{rot}} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\overrightarrow{\operatorname{rot}} \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

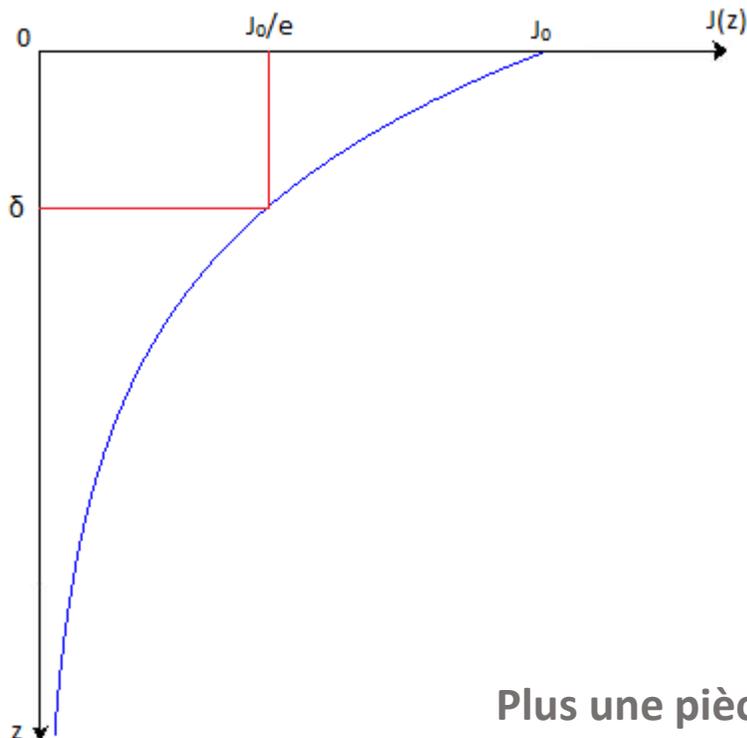
Densité des courants dans le matériau varie en fonction de la profondeur à laquelle ils se trouvent

$$J(z, t) = J_0 e^{-z\sqrt{\pi\mu f\sigma}} \cos(2\pi f t - z\sqrt{\pi\mu f\sigma})$$

L'amplitude de la densité des courants induits varie en fonction de la profondeur



Amplitude des courants induits dans la pièce



« Effet de peau »: les courants induits sont concentrés à la surface du matériau près de la surface de la bobine d'excitation

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

f: fréquence

μ : perméabilité

σ : conductivité

L'épaisseur de peau δ (profondeur de pénétration) caractérise la distance à laquelle la densité des CF a perdu 63 % de son amplitude

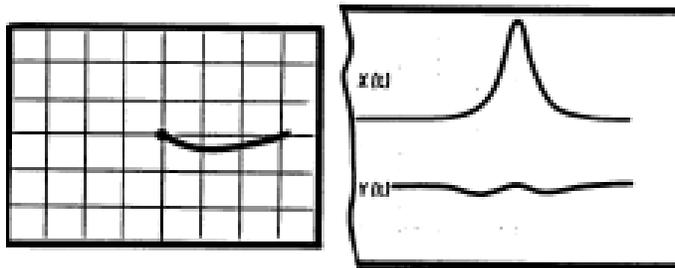
Matériau	σ (MS/m)	μ_r	Fréquence f (kHz)	δ (mm)
Cuivre	58	1	100	0.20
Aluminium pur	35.4	1	100	0.26
Acier Inox 304L	1.39	1	100	1.34
Inconel 600	1.02	1	100	1.57
Fer pur	10	10000	100	0.005
Fer (0.2 C)	10	120	100	0.045

Plus une pièce est conductrice, plus les courants de Foucault seront « restreints » à la surface

Mode absolu

La mesure absolue est caractérisé par la réponse d'un seul récepteur

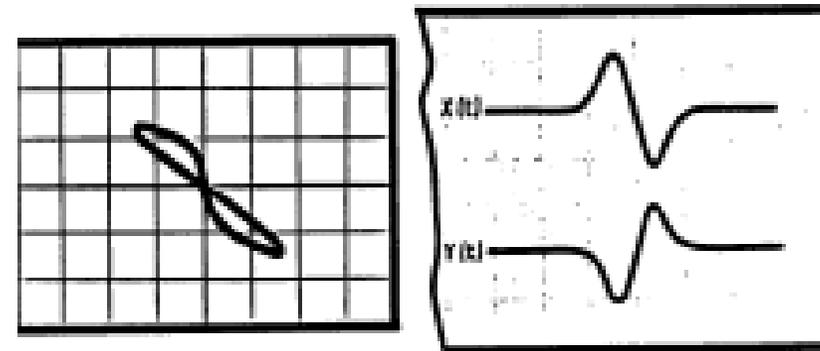
- Adapté à la mesures de paramètre lentement variable, sensible à l'entrefer
- Sensible aux paramètres EM du matériau et à l'épaisseur
- Nécessite une référence ou une compensation par mesures sur étalon



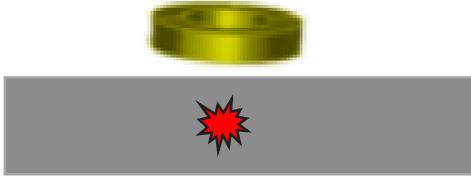
Mode différentielle

La mesure différentielle est construite à partir de la différence entre la réponse de deux capteurs

- Permet s'affranchir de paramètres perturbateurs (σ , μ)
- Moins sensible aux variations d'entrefer



Sondes à fonction double (mode absolu)

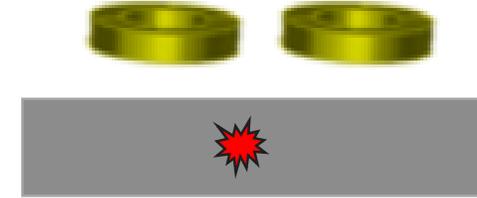


Ce sont des sondes dans lesquelles le même élément réalise les deux fonctions.

La grandeur mesurée est l'impédance de la bobine

Nécessite un autre capteur de référence

Sondes à fonctions séparées (mode E/R séparées)

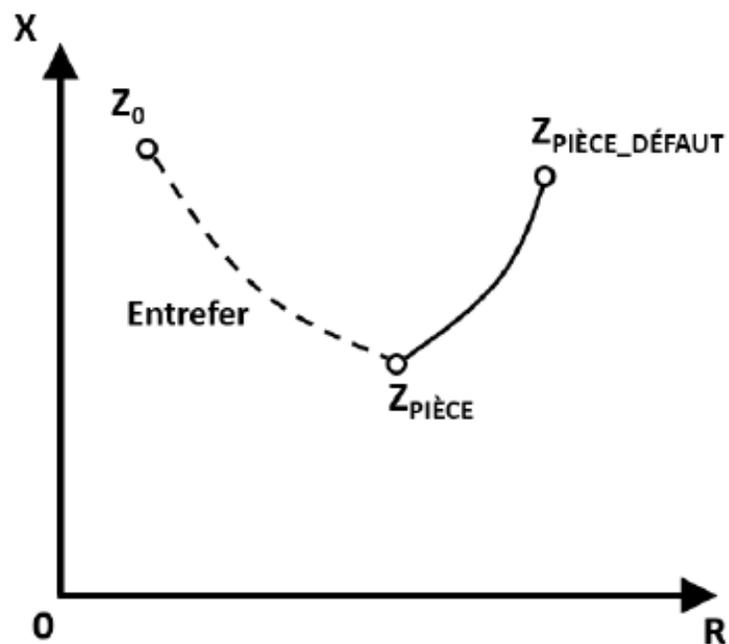
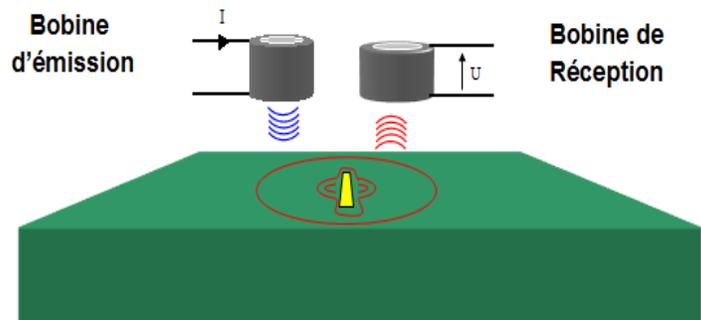


Deux éléments ou groupes d'éléments assurent séparément les deux fonctions.

La grandeur mesurée est force électromotrice aux bornes d'une bobine

Meilleur rapport signal/bruit

Moins sensible aux variations d'entrefer



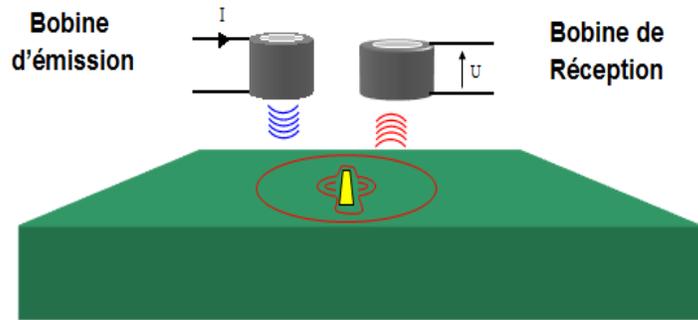
Représentation de l'impédance d'une bobine dans le plan (R,X) permet de représenter les mesures dans le plan complexe.

Dans le vide, $Z_0 = R_0 + jX_0$

En présence d'une pièce, $Z_{\text{pièce}} = R_{\text{pièce}} + jX_{\text{pièce}}$

En présence d'un défaut, $Z_{\text{pièce_défaut}} = Z_{\text{bobine}} + \Delta Z_{\text{défaut}}$

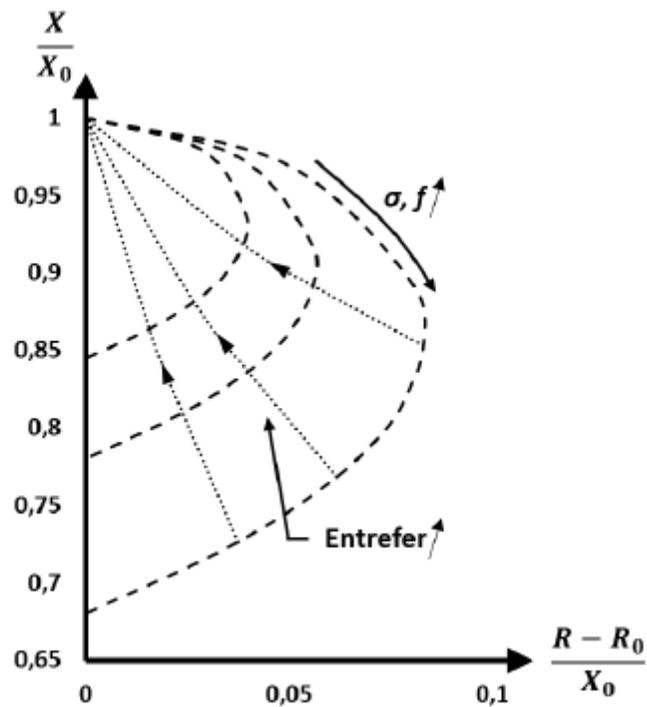
L'affichage du plan (R,X) - courbe de Lissajous



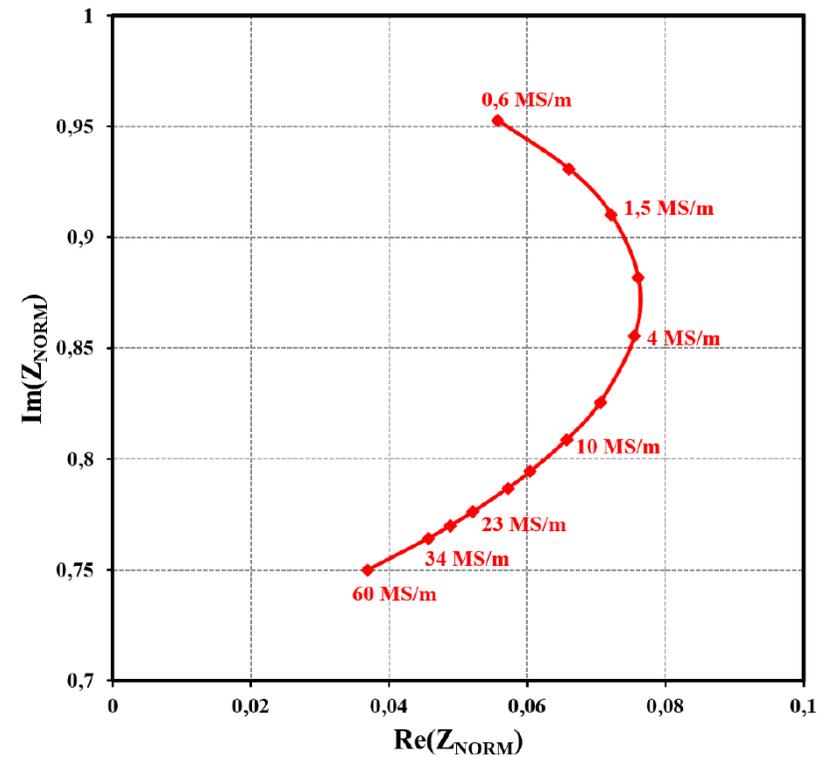
Plan d'impédance normalisé permet de s'affranchir de certaines caractéristiques de la bobine comme, son nombre de spires

$$R_{\text{norm}} = (R_{\text{pièce}} - R_0) / X_0$$

$$X_{\text{norm}} = X_{\text{pièce}} / X_0$$

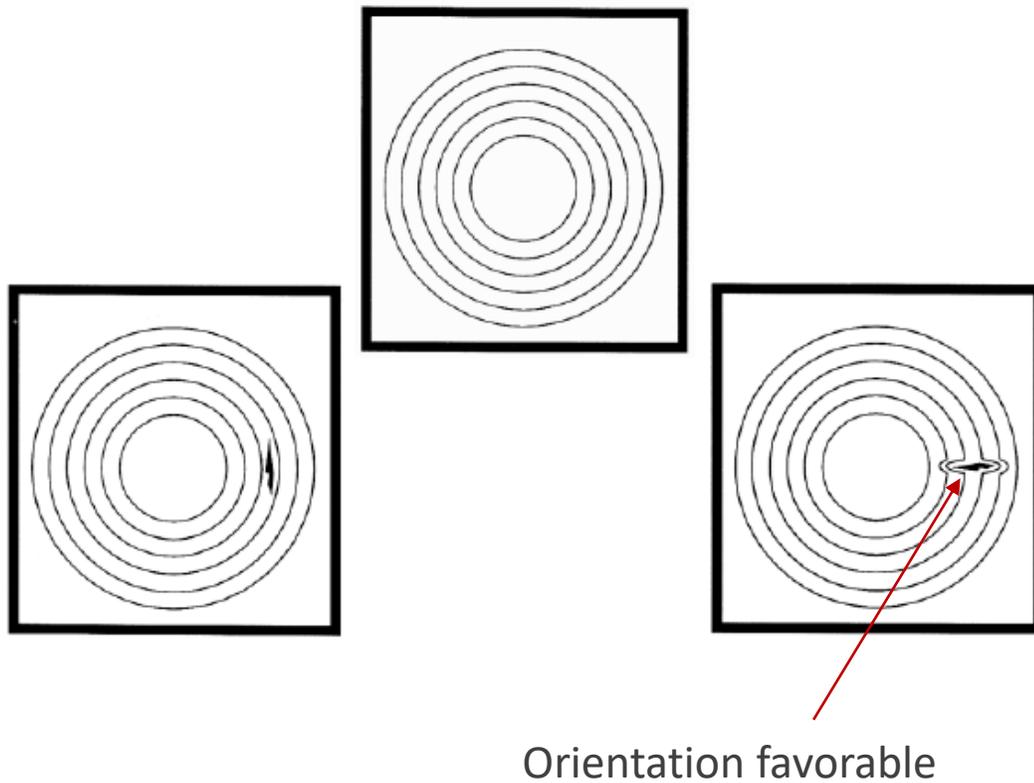


Exemple de plan d'impédance normalisé, cas de matériaux non magnétiques

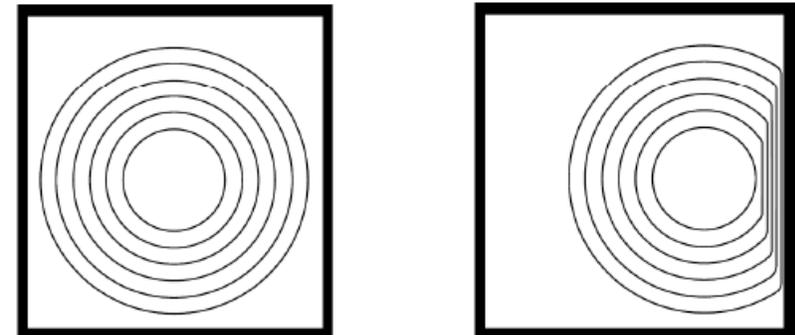


Simulation de l'impédance normalisée, $f=200\text{kHz}$

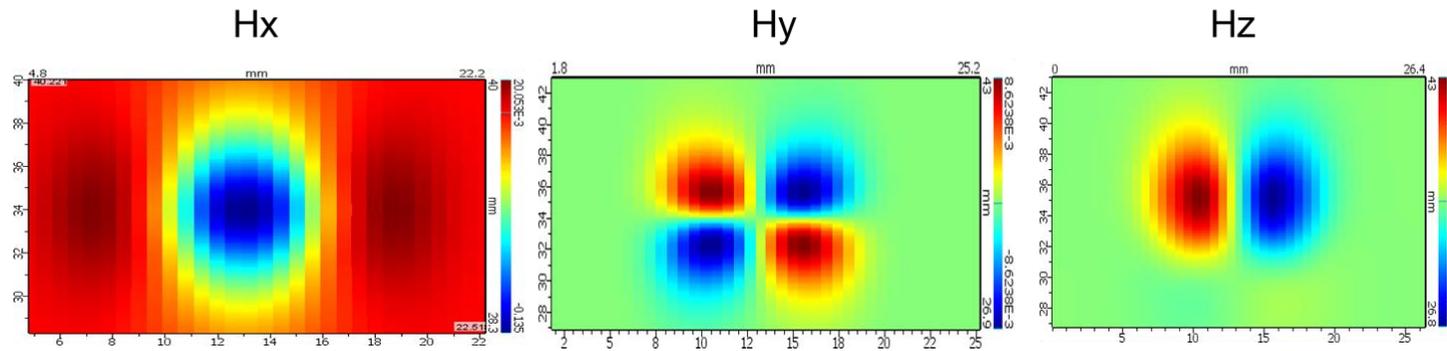
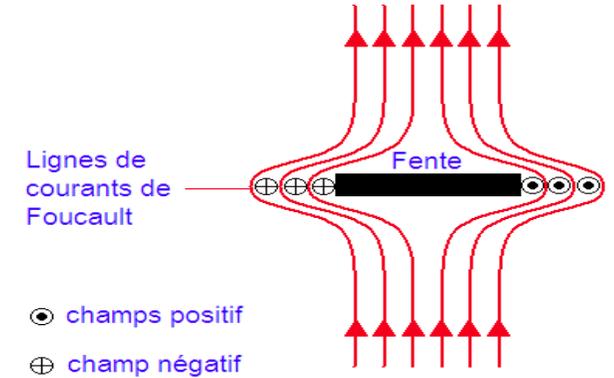
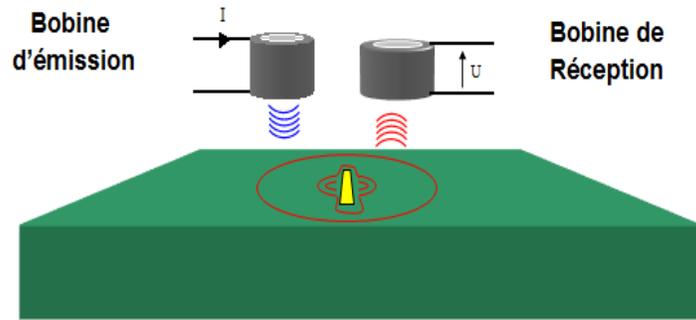
La capacité de détection de défauts (une fissure par exemple) dans un matériau en CND par CF diffère selon le degré de perturbation de la circulation des courants. Idéalement, la circulation des CF doit être perpendiculaire au défaut afin d'obtenir une réponse maximale



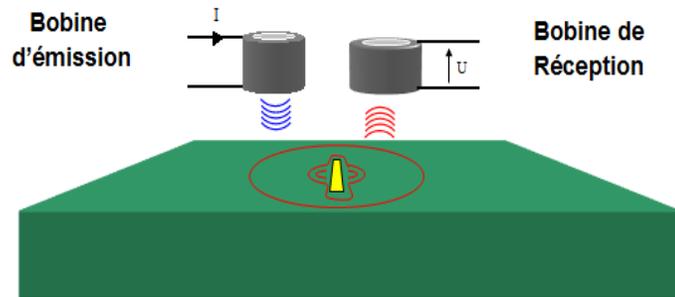
Modification de la circulation des CF due aux bords du matériau



PRINCIPE DE MESURES PAR COURANT DE FOUCAULT EN CND, CARTOGRAPHIE DE PERTURBATIONS DU CHAMP MAGNÉTIQUE CAUSÉES PAR LE DÉFAUT

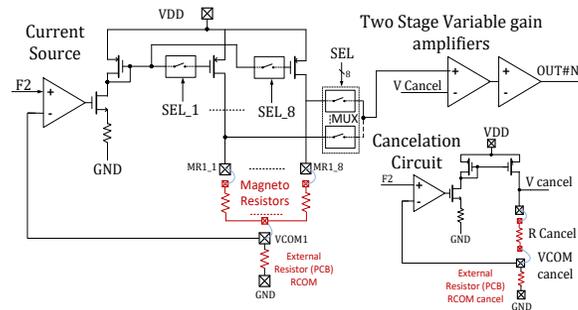


- Utilisations capteurs magnétiques pour mesurer les composantes différentes du champ



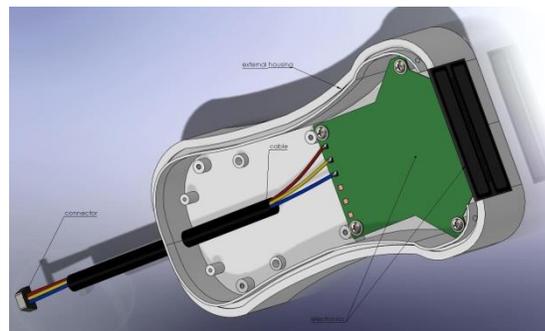
- Le capteur CF

- L'inducteur
- Le récepteur (bobine, GMR, TMR)



- L'électronique embarquée

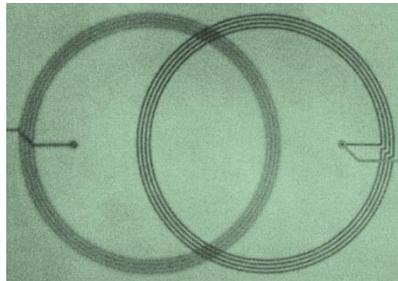
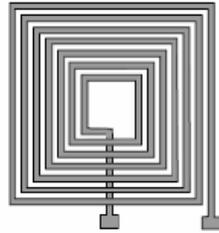
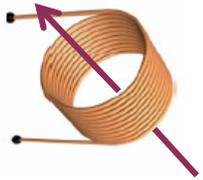
- Amplification
- Filtrage
- Le multiplexage



- Packaging

- Le corps de sonde et la connexion

- Capteurs inductifs (bobinages)



Avantages

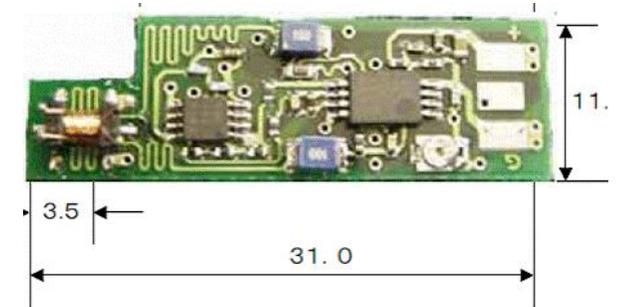
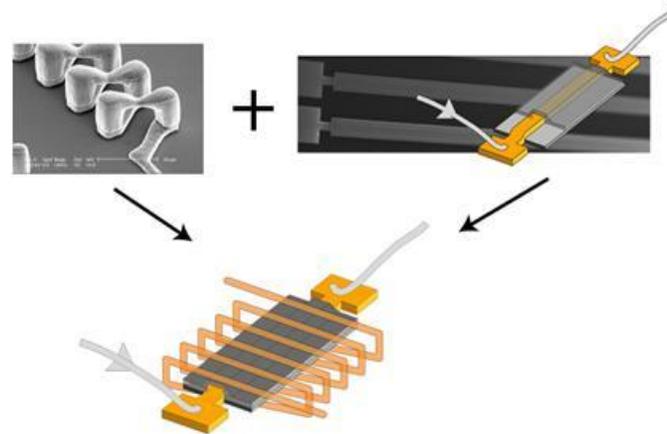
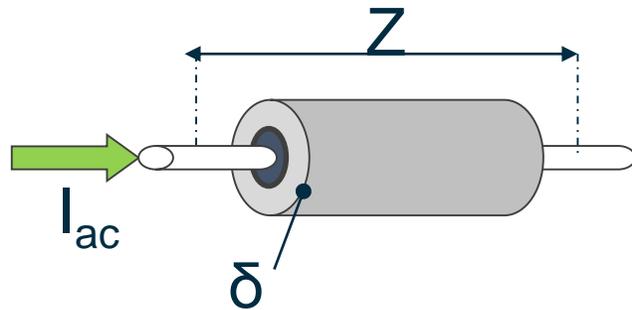
- Possibilité de capteur multi-élément avec changement de fonctions pour les éléments
- Facilité de mise en œuvre

Limitations

- diminution de l'amplitude utile en basses fréquences.

$$e = -N \frac{d\phi}{dt}$$

- GMI

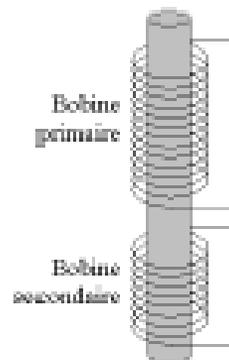


GMI AICHI

Variation de champ magnétique → Variation d'impédance

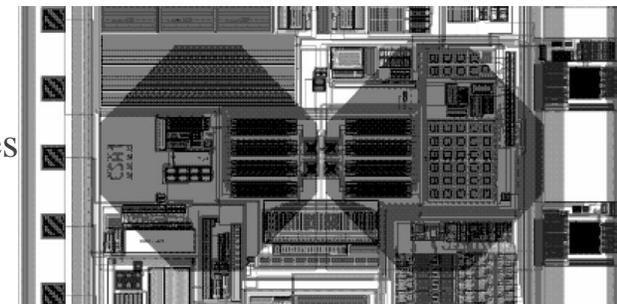
- Fluxgate

Les fluxgates ont été développés vers 1928, initialement pour la fabrication des compas de divers systèmes de navigation. Ils sont composés d'au moins un noyau magnétique de très haute perméabilité



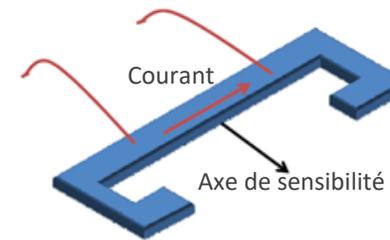
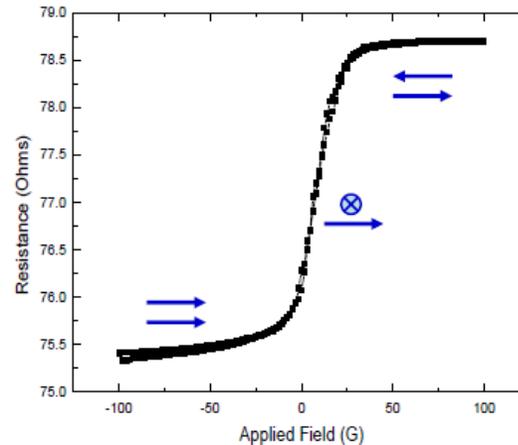
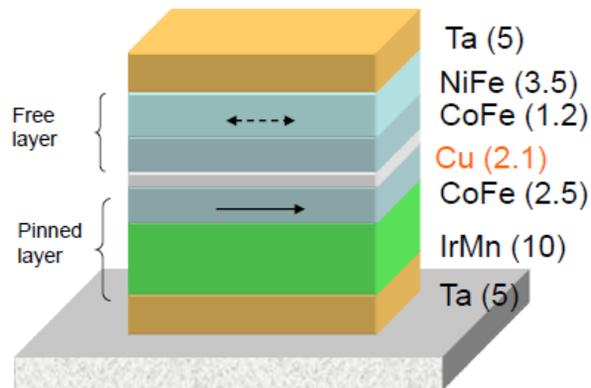
- Effet Hall

Ces capteurs sont intégrés dans des puces qui sont constituées d'un barreau à effet Hall et de concentrateurs de flux.



Technologie d'un capteur GMR

Prix Nobel 2007 (A. Fert and P. Grünberg)

Vanne de spinYoke

R=200Ω

I=10mA

MR 10%

Géométrie d'1 élément

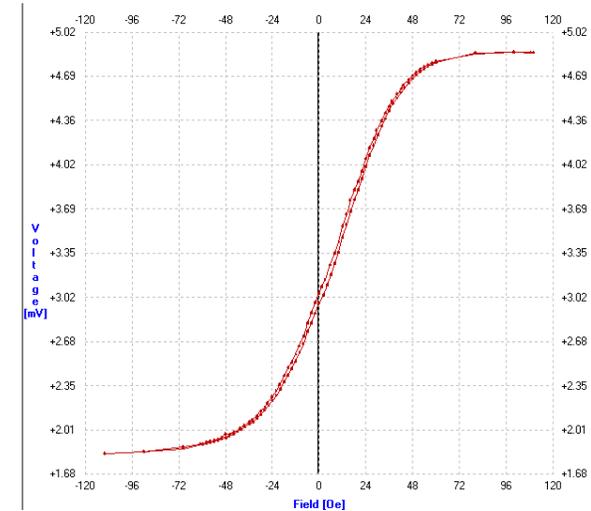
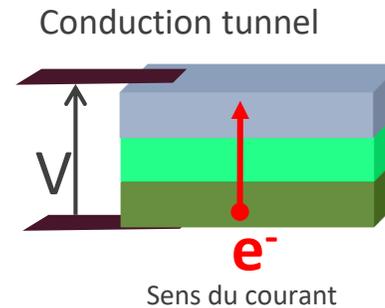
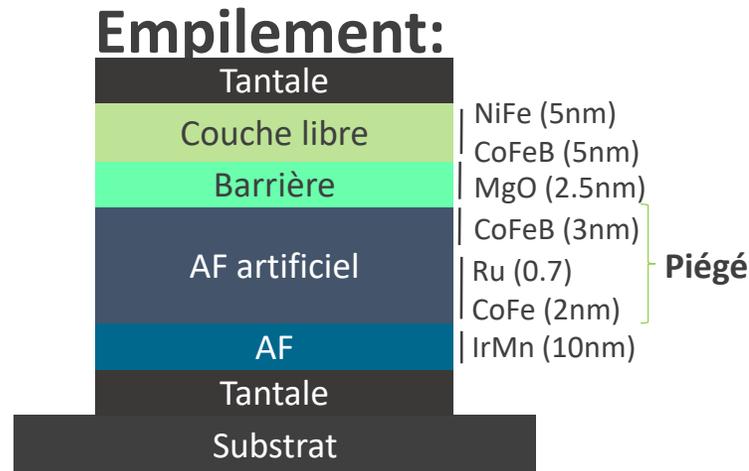
GMR : empilement de couches minces magnétiques

- Couches avec aimantation fixée
- Couches avec aimantation variable en fonction du H extérieur

Variation de champ magnétique → Variation de résistance

On cherche à travailler dans la zone linéaire pour éviter la saturation

Technologie d'un capteur TMR



Variation de champ magnétique → Variation de résistance

On cherche à travailler dans la zone linéaire pour éviter la saturation

TMR : empilement de couches minces

- Couches magnétiques
- Couche d'isolant
- Couches avec aimantation variable en fonction du H extérieur

+

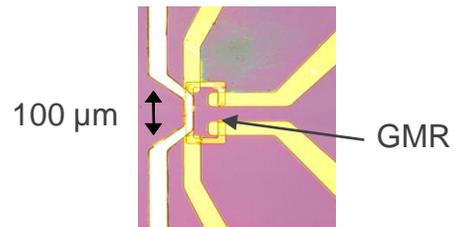
- Grande MR
- Faible puissance consommée

-

- Bruit en BF
- Résistance élevée

▪ Multi-éléments

- GMR = petit taille (longueur ~ 100µm)

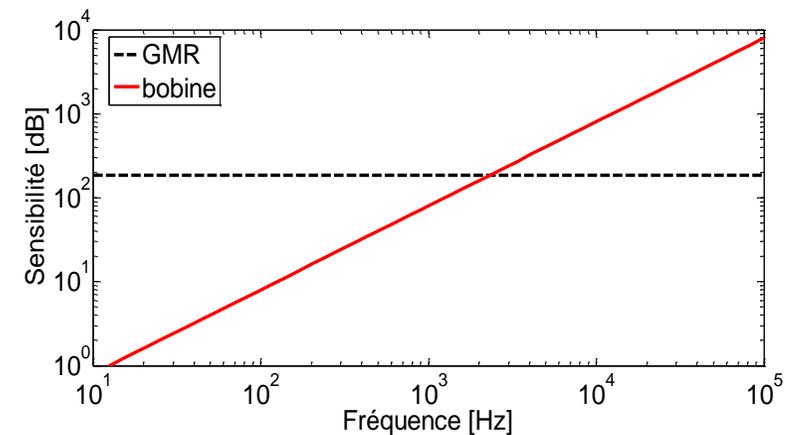


➤ Détection de petits défauts surfaciques

- multi-éléments
→ inspection rapide
- taille réduite
→ haute résolution spatiale

▪ Sensibilité à basse fréquence

- La sensibilité ne dépend pas de la fréquence

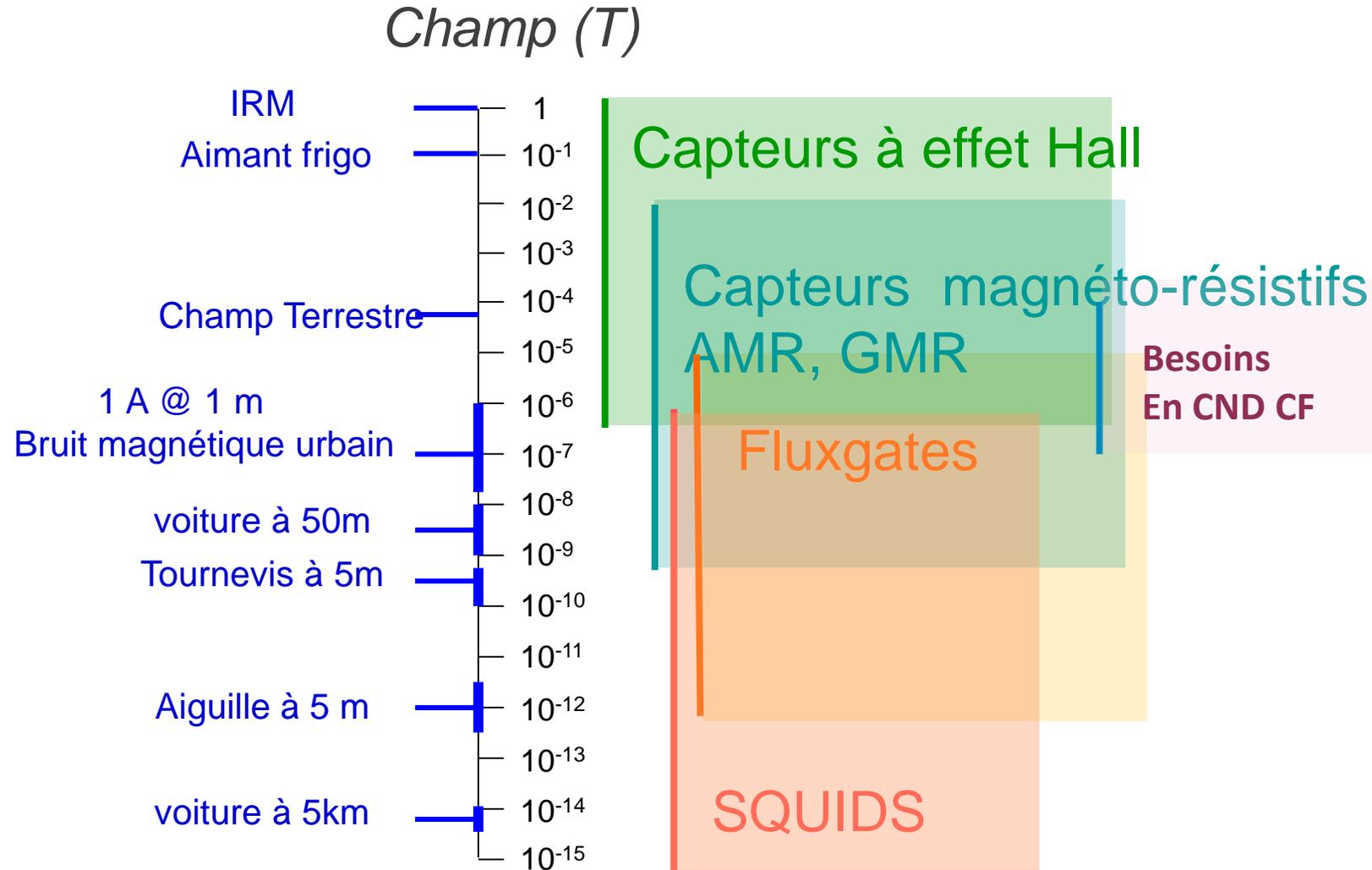


➤ Détection de défauts enterrés

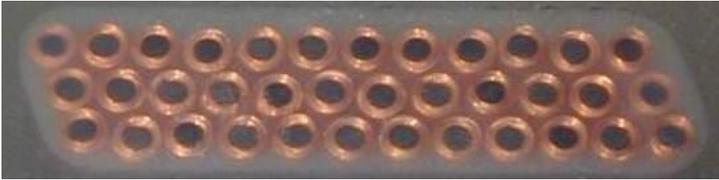
Effet de peau:

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

Inversement proportionnel à la fréquence =>
basse fréquence -> forte profondeur

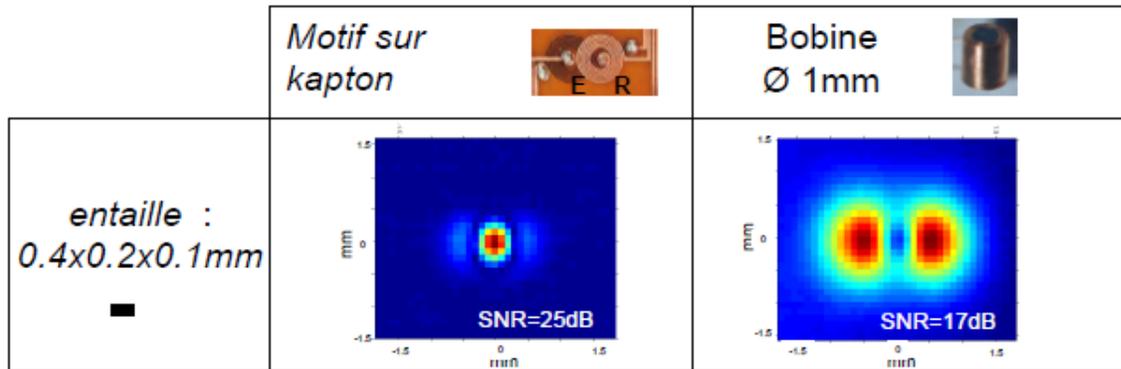


Sondes multi-éléments avec les bobines volumiques

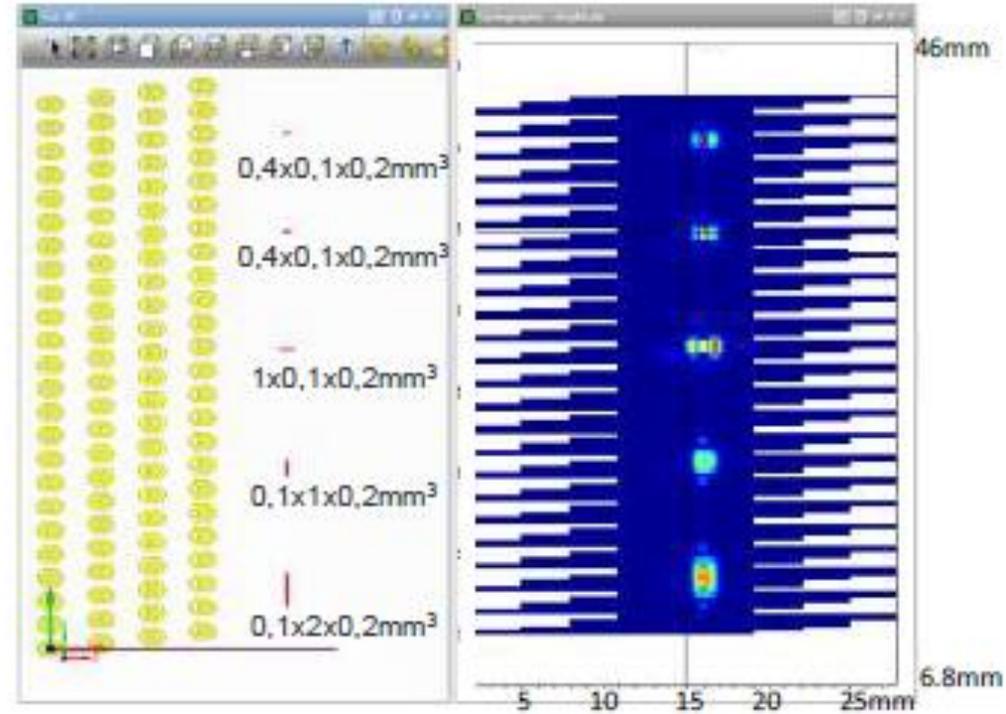
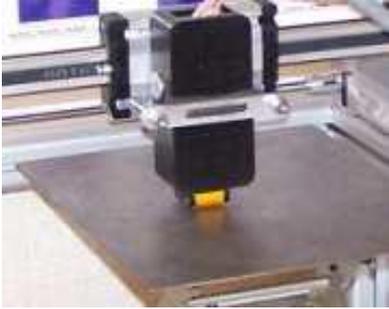


Bobines rigides

Sondes multi-éléments avec les bobines gravés sur kapton

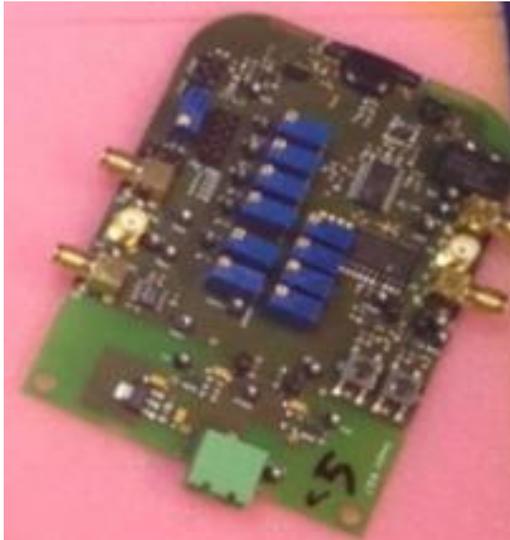
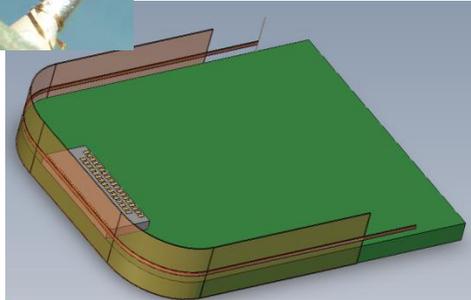
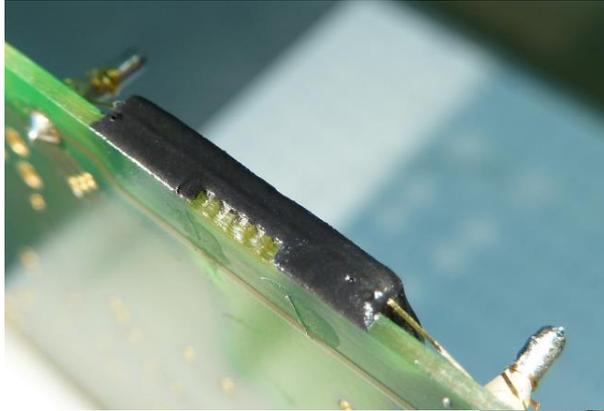


- Meilleur rapport signal-sur-bruit, meilleure résolution
- Bonne détection de petits défauts débouchants
- Film souple : réduction du bruit due aux variations de la distance (capteur-cible)

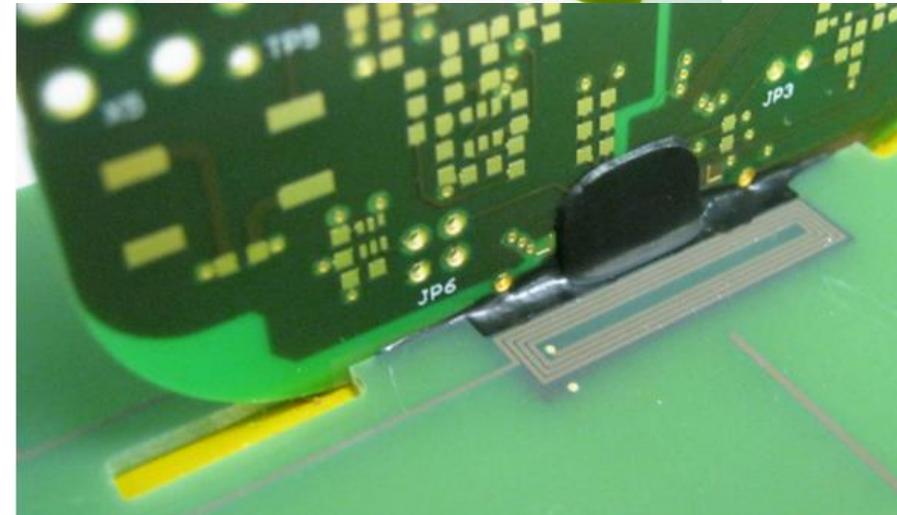
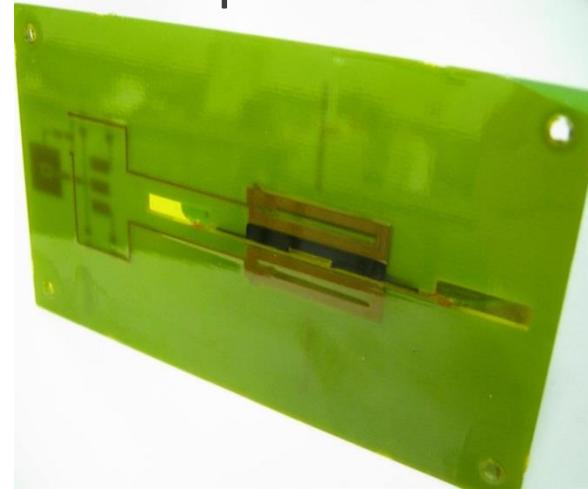


- Bonnes performances de la technologie micro-bobine
- Fréquence de travail ~1MHz
- Adaptables pour les géométries complexes
- Applications: aéronautique

Sonde pour défauts superficiels

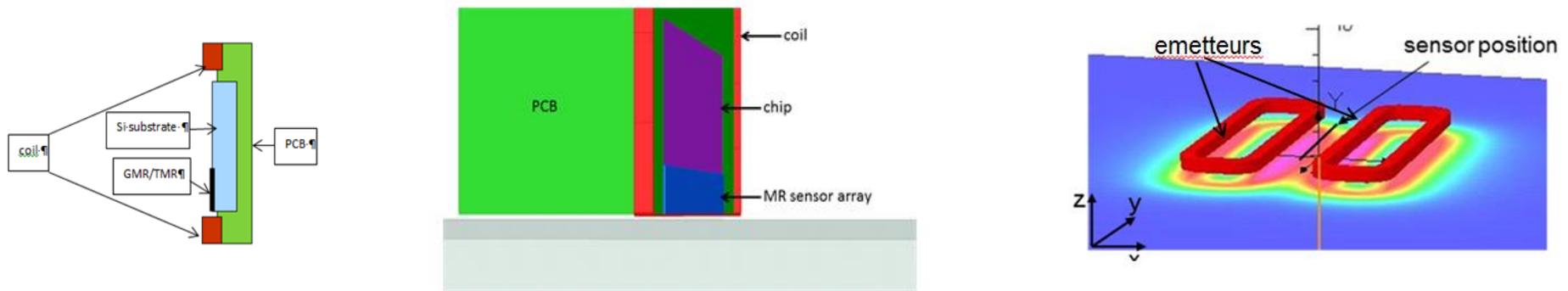


Sonde pour défauts enterrés



- Optimisation de la géométrie des capteurs par simulation OPERA , COMSOL, CIVA

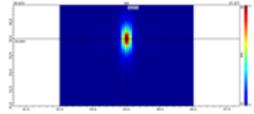
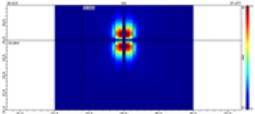
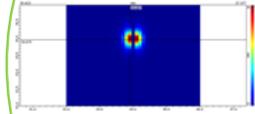
Multiéléments => Inducteur de type nappe (bobine rectangulaire)



Quel axe choisir pour la GMR ?

Ox : forte sensibilité mais
risque de saturation
Oy : peut mieux faire
Oz : meilleur compromis

Couplage direct entre émetteur et
récepteur

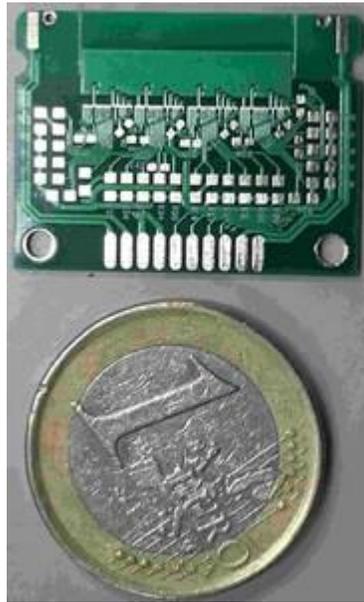
Sensitivity axis	Ox	Oy	Oz
Signature (module)	1 lobe 	4 lobes 	2 lobes 
Magnetic field	626 nT	112 nT	357 nT
Coupling/signal	412	0	0

Exemple : défaut
surfacique de
120 μ m

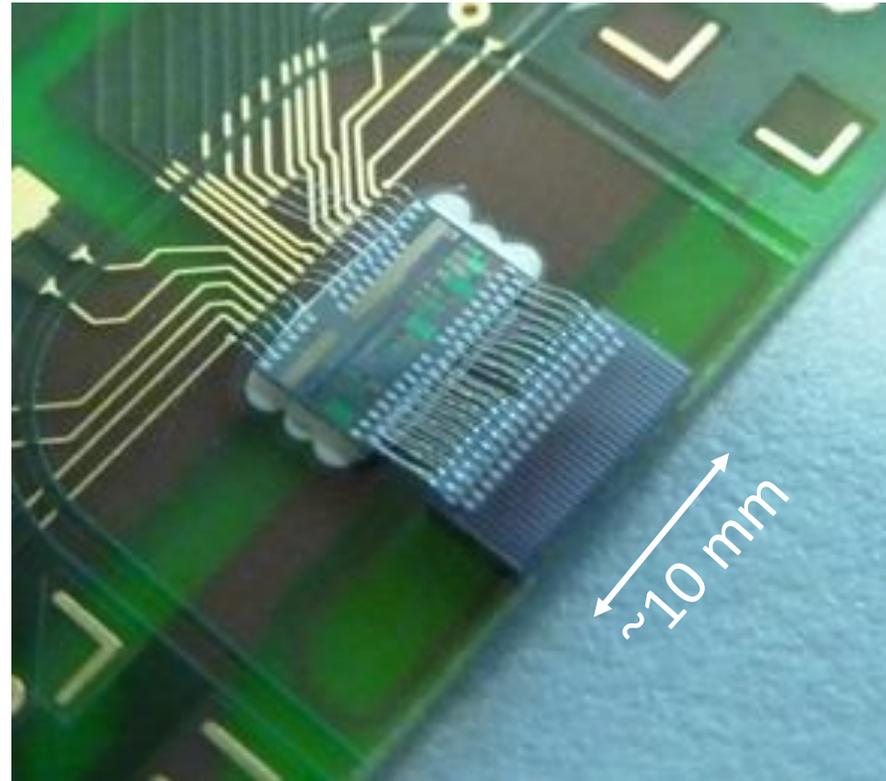
NOTE : En simulation, GMR et TMR sont considérés comme ponctuels et définis par leur sensibilité

ASIC : application specific interated circuit (circuit intégré spécifique)

Objectif: diminuer les dimensions de l'électronique proche capteur

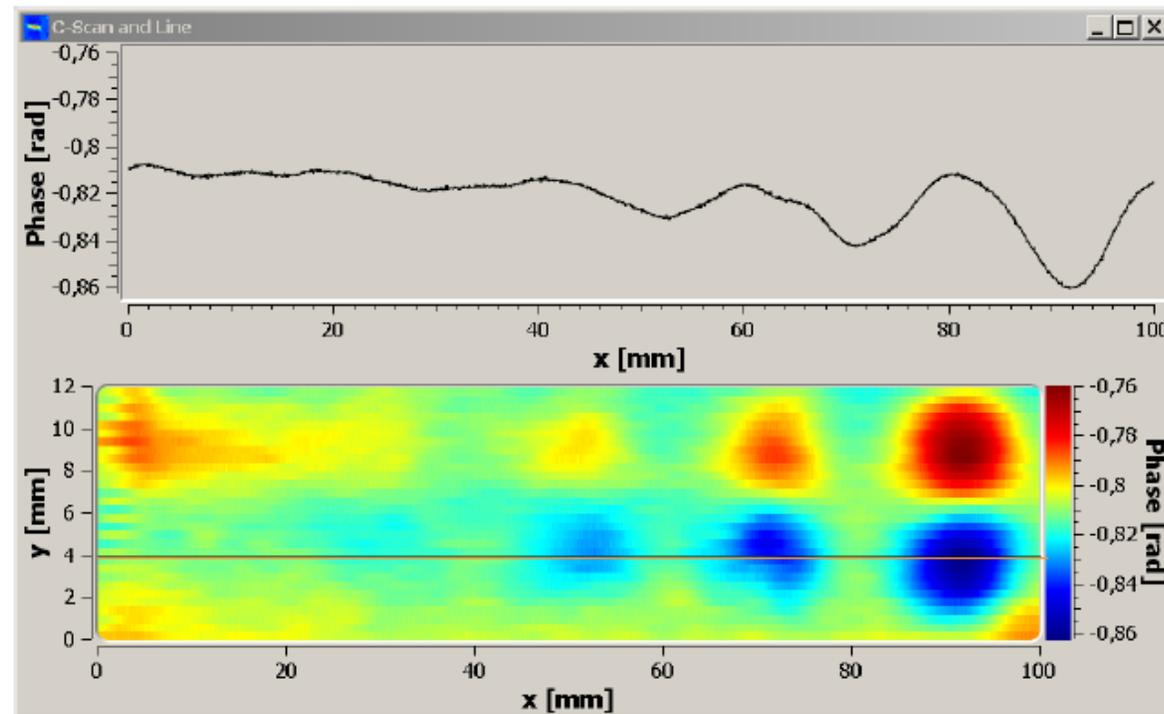
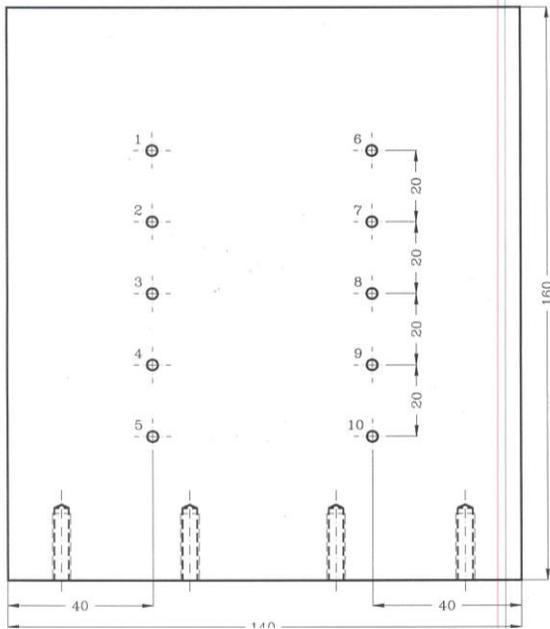


128 TMR et 4 ASIC



4 ASIC pour 32 capteurs MR

► DÉFAUTS ENTERRÉS DANS AL



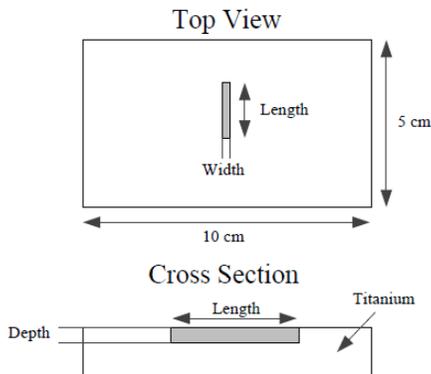
ligament [mm] 8.88 7.83 6.83 5.72 4.73

- Défauts détectables jusqu'à 6.8 mm de ligament
- Résultats comparables avec les sondes conventionnelles
- Application: aéronautiques

TMR elements: length = $60\mu\text{m}$

Gain: 40 dB

f: 2MHz

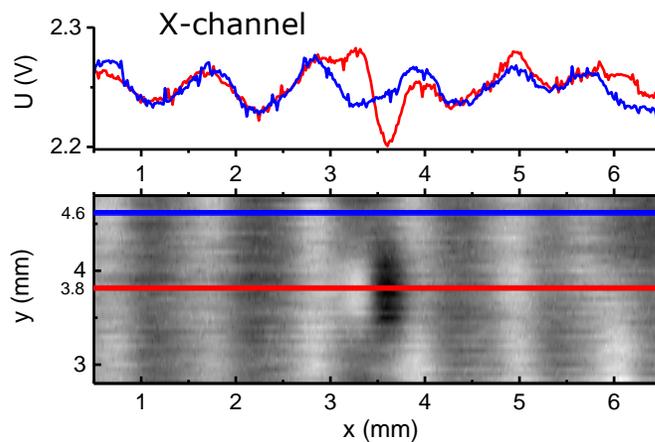


Ti ($\sigma = 0.60 \text{ MS/m}$)

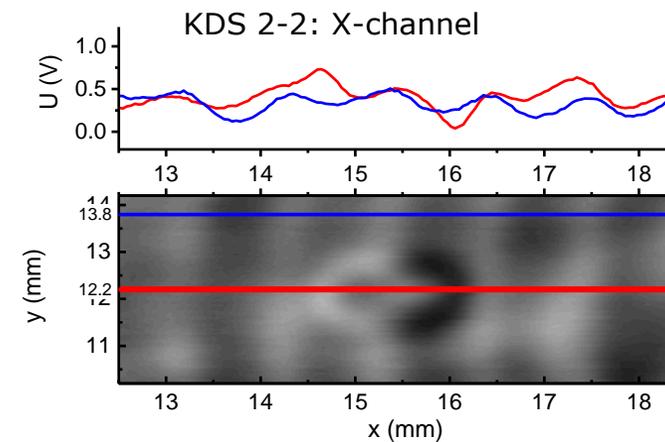
Defect:

$$l \times w \times d = 600 \times 100 \times 50 \mu\text{m}^3$$

MR-based ET

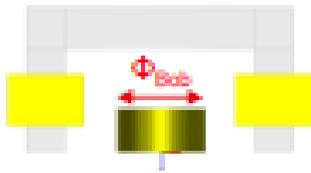
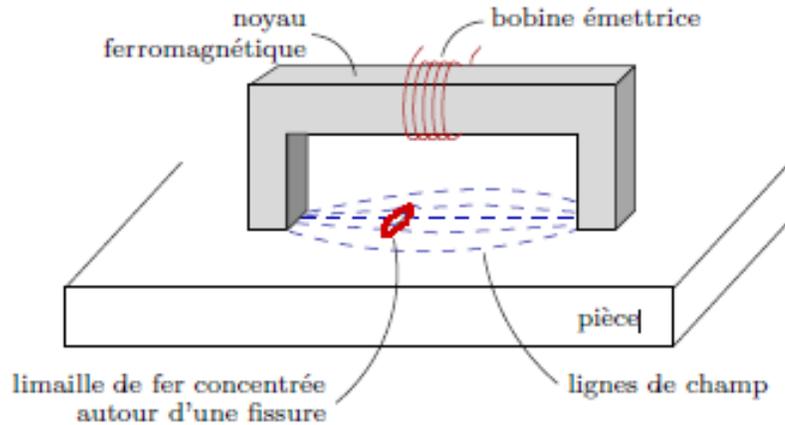


conventional ET



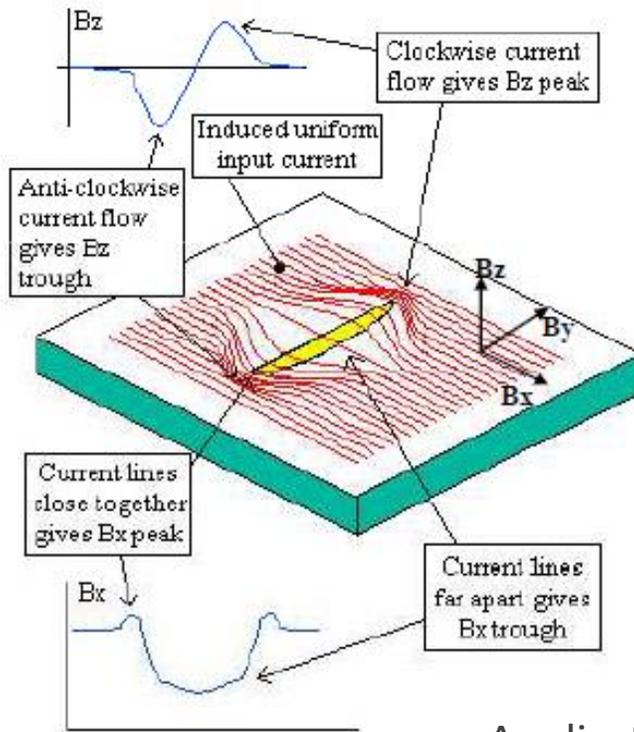
- Résolution spatiale meilleure avec le capteur TMR
- Application: aéronautique

MFL – magnetic flux leakage



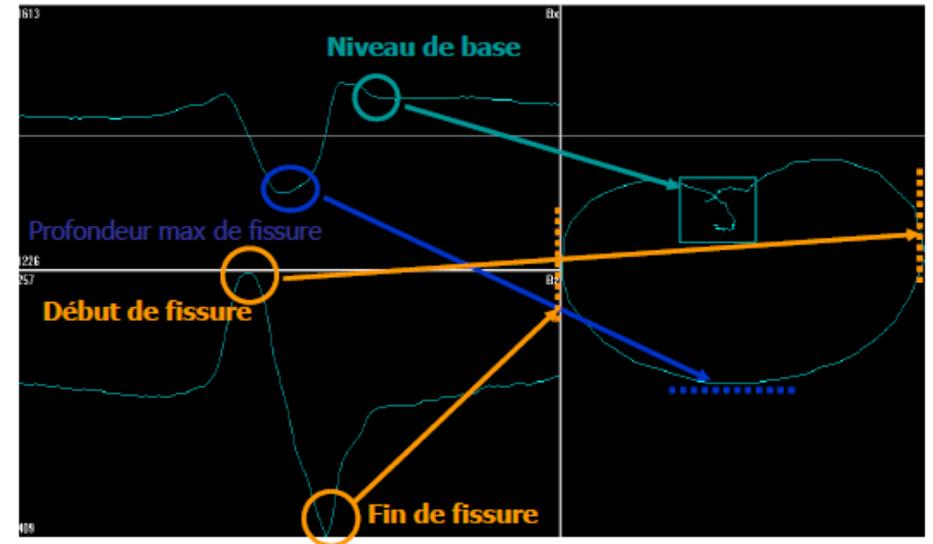
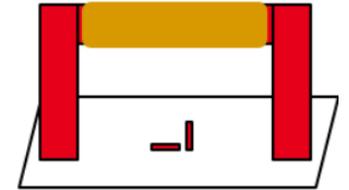
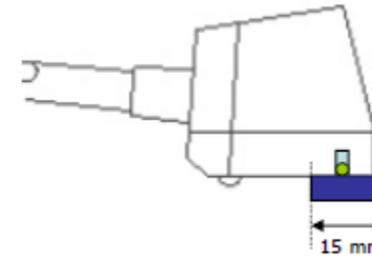
- Le contrôle par flux de fuite magnétique consiste à soumettre la pièce ou une partie de celle-ci à un champ magnétique constant
- Aimant puissant est utilisé
- Les sondes MFL intègrent un détecteur magnétique placé entre les pôles de l'aimant où il peut détecter le champ de fuite
- Des flux de fuite magnétique sont engendrés localement.
- Le CND par flux de fuite magnétique n'est utilisable que pour les matériaux ferromagnétiques.
- Détection de corrosion et piqûres

ACFM – Alternating current field measurement

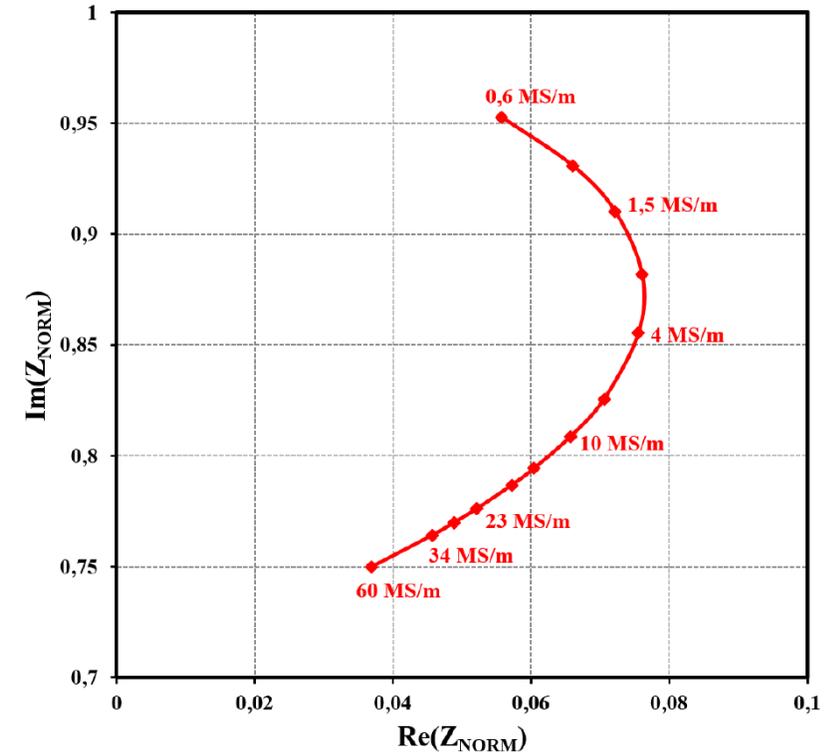


Application:

- détection et le dimensionnement en longueur et en profondeur de défaut plan débouchant
- contrôle de soudure ferromagnétiques à travers le revêtement

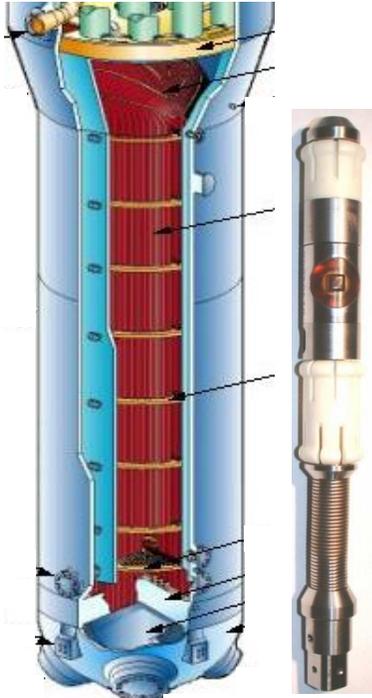


<https://youtu.be/2A0c0C7CZSE>

Simulation de l'impédance normalisée, $f=200\text{kHz}$

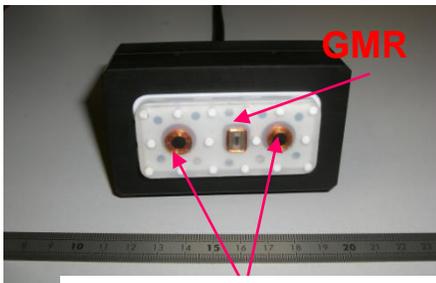
- Identification des alliages
- Le traitement thermique d'alliages métalliques influence leur propriétés (résistance, dureté)
- Le traitement peut être vérifiée par courants de Foucault par mesures de conductivité

Nucléaire



Tubes générateur de vapeur

Défauts en surface de soudures

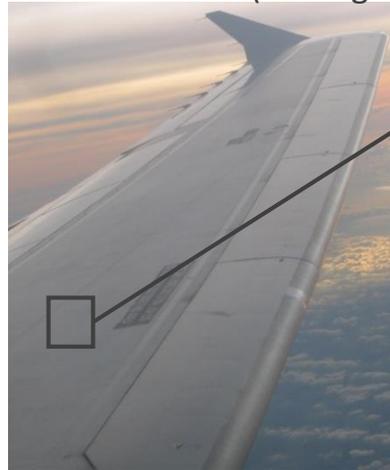


Emission : bobinages

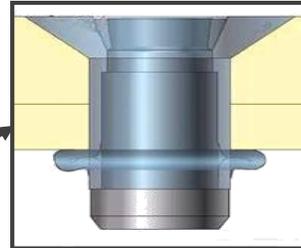
Aéronautique

Structures rivetées

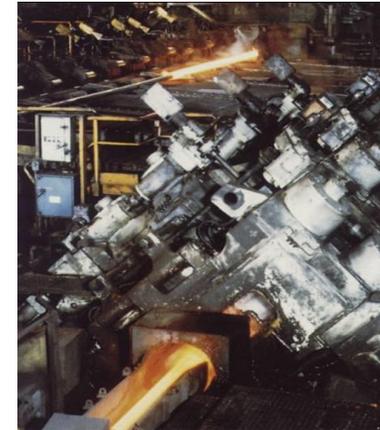
(fuselage)



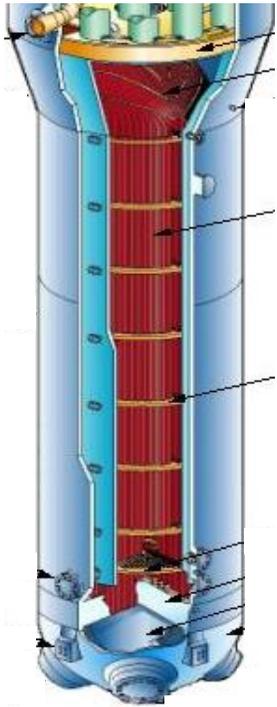
Fabricant de tubes

Contrôle en fabrication
(produits chauds)

Corrosion sous peinture



Nucléaire



Tubes générateur de vapeur

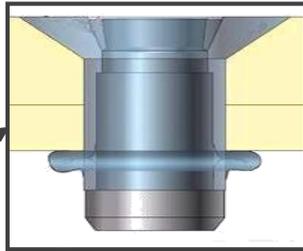
Sonde axiale



2 bobinages, 3 fréquences
1 mode absolu, 3 modes
différentiels
Contrôle rapide 500 mm/s

Aéronautique

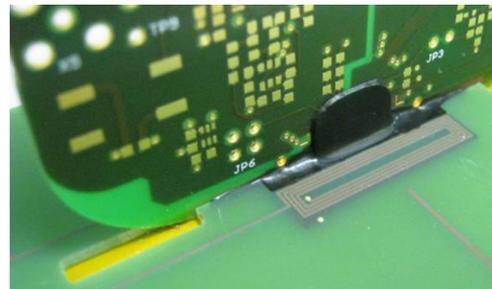
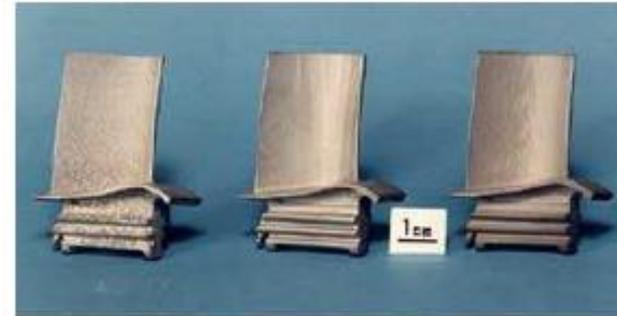
Structures rivetées
(fuselage)



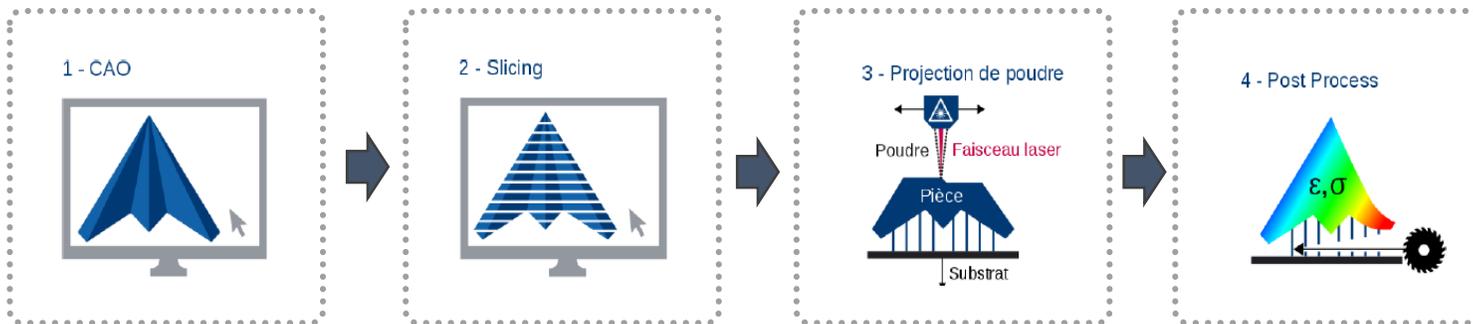
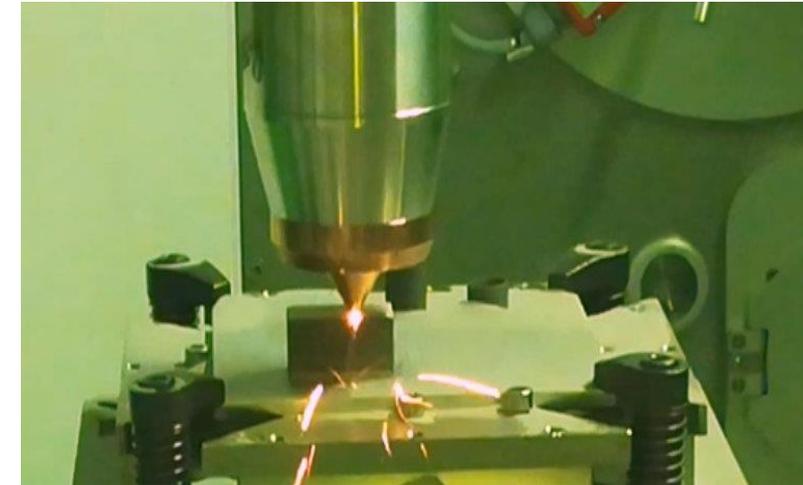
Corrosion sous peinture



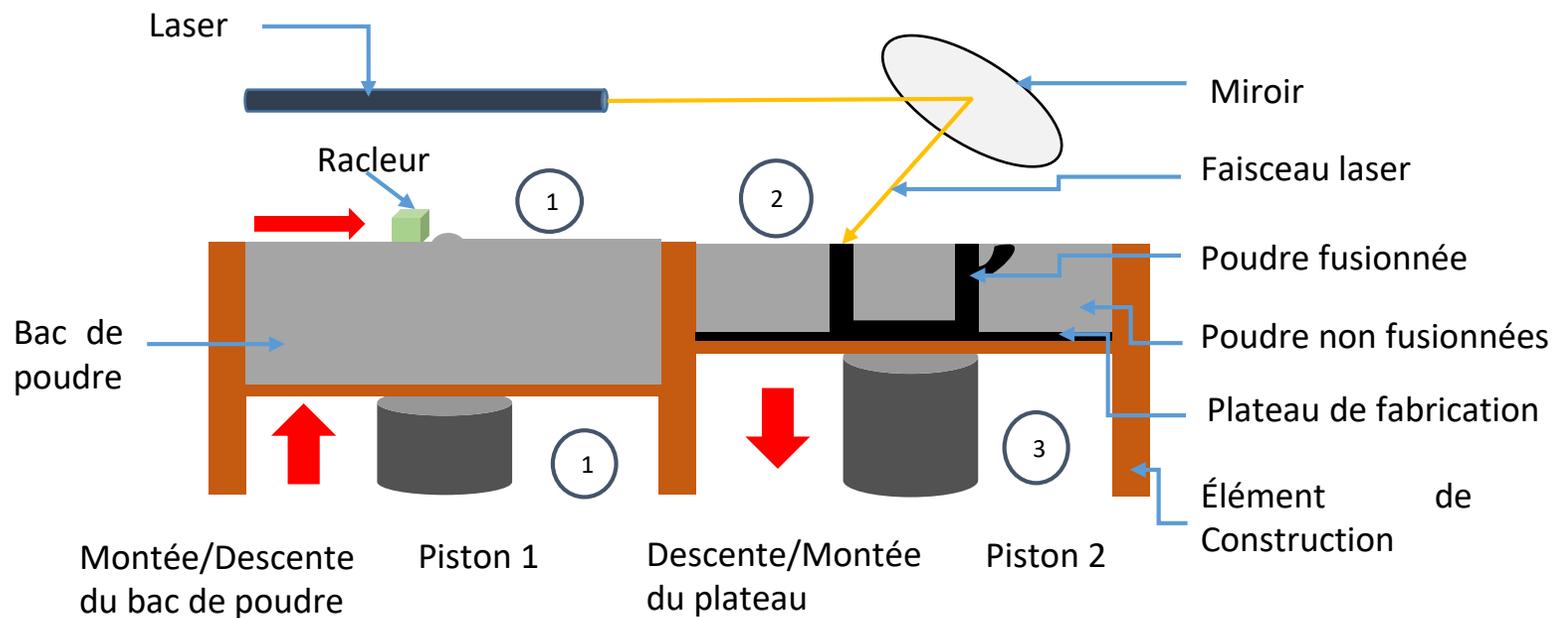
Aubes de turbines contrôle de géométries complexes et accès difficiles, petits défauts à détecter



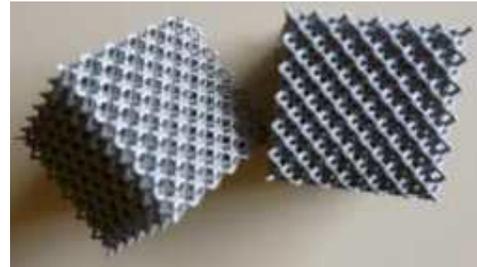
- Dans le milieu industriel (avions, trains, nucléaire), les techniques de fabrication « classiques » : forgeage, moulage
- Nouvelle technique (« imprimantes 3d ») : fabrication additive
 - avantages : itération de conception rapide, moins de matière consommée, possibilité de fabriquer des pièces à la demande
- Matériaux : polymères et poudres métalliques
- Famille de procédés : dépôt d'un fil, fusion d'un lit de poudre
- Au DISC, on s'intéresse particulièrement aux procédés de fusion laser sur lit de poudre, qui permettent de fabriquer couche par couche par ajout de matière un objet physique à partir d'un objet numérique :



Procédé Selective Laser Melting (SLM)



- 1 Dépôt de la 1^{ère} couche.
Le piston 1 monte d'une épaisseur de la poudre et le racleur va étaler la poudre du bac au plateau
- 2 Le faisceau du laser fond la poudre sélectionnée
- 3 Le plateau de fabrication descend de quelques micron pour qu'une nouvelle couche soit déposé.



- Projets sur différents axes, notamment quelles méthodes de contrôles embarquées dans les machines « in-process » et pour le contrôle de fabrication
- Contrôle de qualité

- Le site de la COFREND <http://www.cofrend.com>
Confédération Française pour les Essais Non Destructifs
- Le site de l'ASNT <http://www.asnt.org>
American Society for NDT
- Le site CIVA (CEA LIST) <http://www-civa.cea.fr>
- Le site *EXTENDE* <http://www.extende.com>
(distributeur de CIVA)
- Le site *NDT.NET* <http://www.ndtnet.com>
(Base documentaire CND, publis, blogs,

