

# Aspects expérimentaux du contrôle non destructif par courants de Foucault

**Yann Le Bihan**

**Laboratoire de Génie Electrique de Paris**

Gif-sur-Yvette

CNRS UMR 8507 – Supelec – Université Pierre et Marie Curie – Université Paris-Sud 11



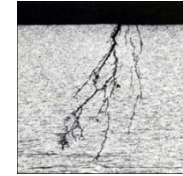
# Plan

- **Contrôle non destructif par courants de Foucault**
  - Contrôle non destructif (CND)
  - CND par courants de Foucault (CF)
- **Dispositif expérimental**
  - Structures de sondes
  - Types d'excitation
  - Instrumentation en régime harmonique
- **Correction des mesures**
  - Comportement en fréquence d'une bobine
  - Prise en compte de la chaîne de mesure
- **Exemple d'application**
  - Correction et étalonnage des mesures
  - Comparaison mesures-simulations
- **Conclusions**

# Le Contrôle non destructif (CND)

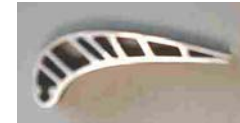
☞ **Caractérisation de l'état d'une pièce ou d'un matériau sans porter atteinte à son intégrité :**

- **détection et caractérisation de défauts**  
(fissure, délaminage...)



Fissuration

- **mesure de paramètres dimensionnels ou constitutifs**  
(épaisseur, état de contraintes...)



Contrôle dimensionnel

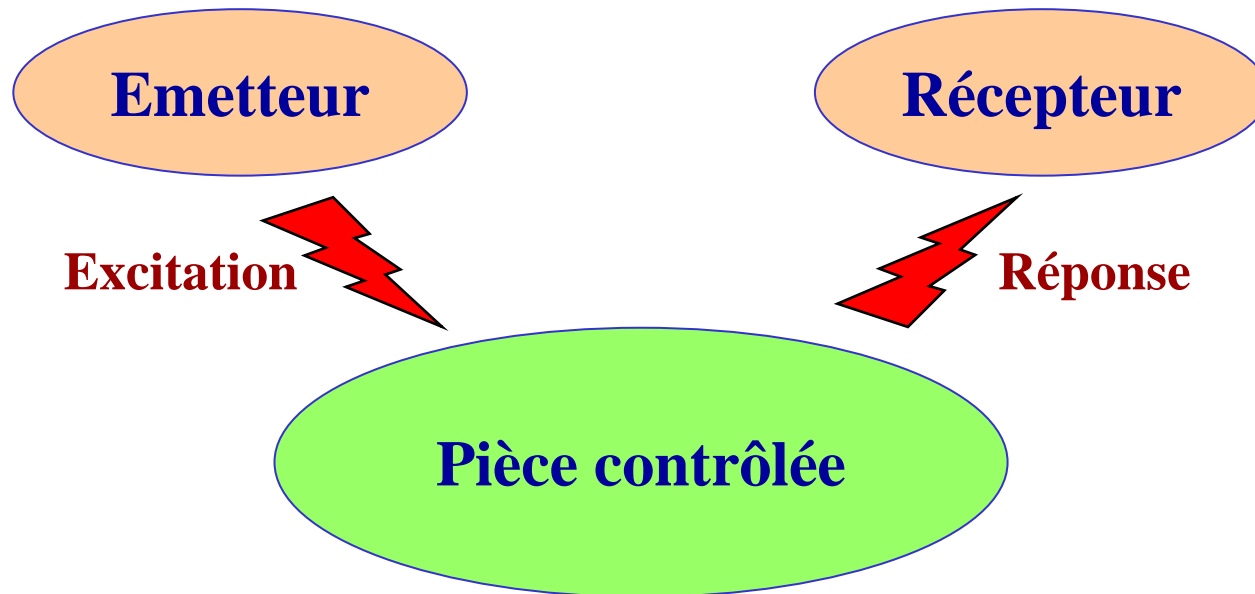
☞ **Répond à des enjeux de sécurité, disponibilité, coûts...**

☞ **Différents domaines d'application : transport, énergie...**



# Principe du CND

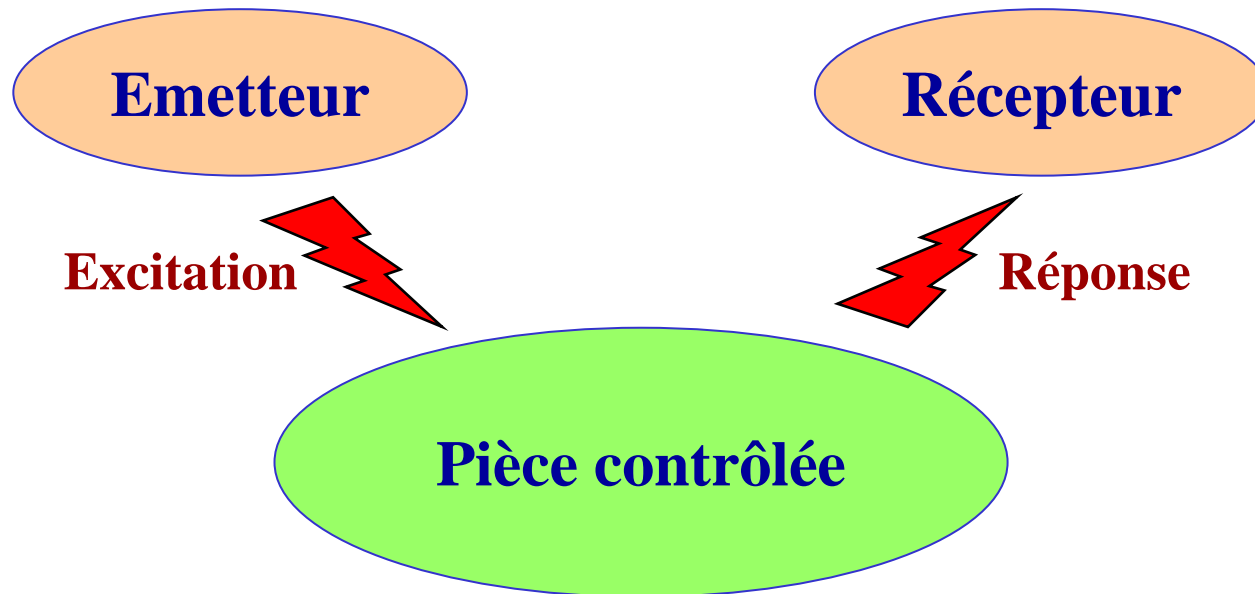
- ☞ Génération par un **émetteur** d'un signal qui est perturbé par la pièce à contrôler
- ☞ un **récepteur** permet de recueillir la réponse due à la pièce



Différentes techniques : ultrasons, radiographie, thermographie, courants de Foucault, micro-ondes, ...

# Principe du CND

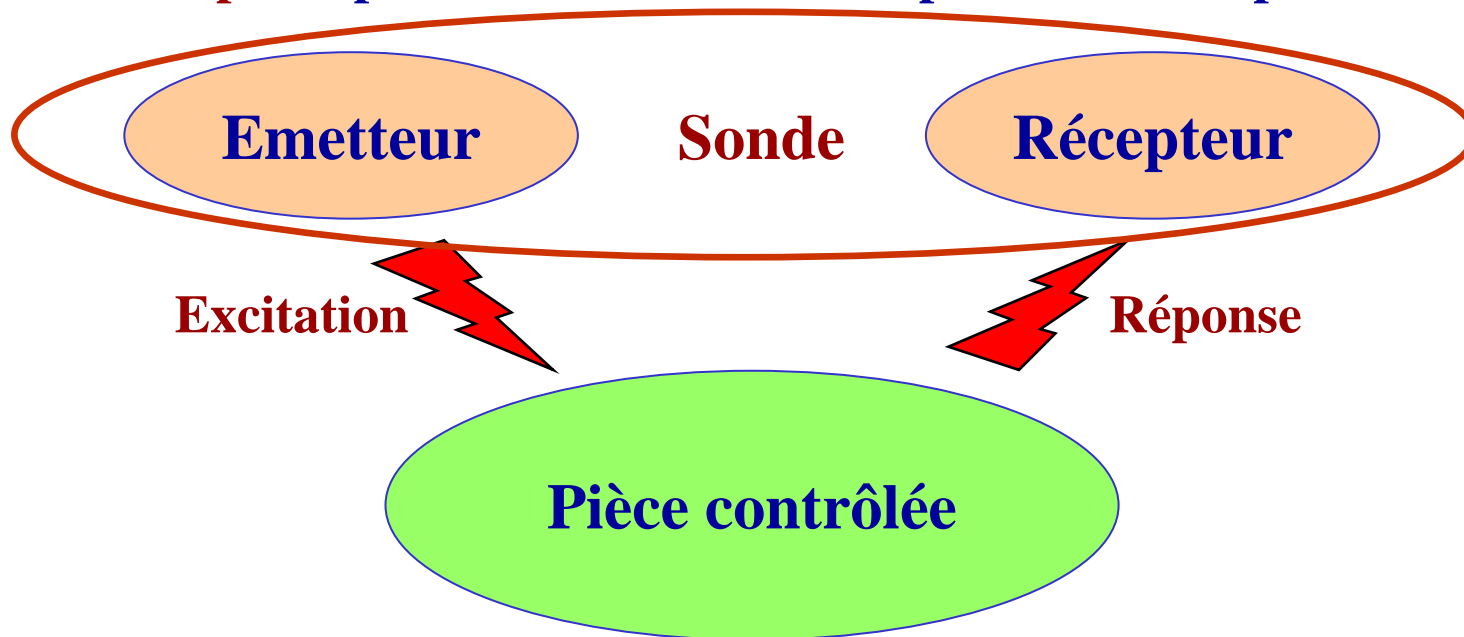
- ☞ Génération par un **émetteur** d'un signal qui est perturbé par la pièce à contrôler
- ☞ un **récepteur** permet de recueillir la réponse due à la pièce



Différentes techniques : ultrasons, radiographie, thermographie, (milieux conducteurs) courants de Foucault, micro-ondes, ...

# Principe du CND

- ☞ Génération par un **émetteur** d'un signal qui est perturbé par la pièce à contrôler
- ☞ un **récepteur** permet de recueillir la réponse due à la pièce



Différentes techniques : ultrasons, radiographie, thermographie,  
(milieux conducteurs) courants de Foucault, micro-ondes, ...

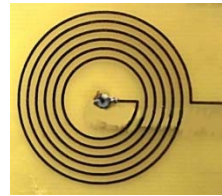
# Technologies pour l'excitation et la réception

**Emetteur :**  
(induction des CF)

- Bobine enroulée



- Bobine gravée



Circuit magnétique

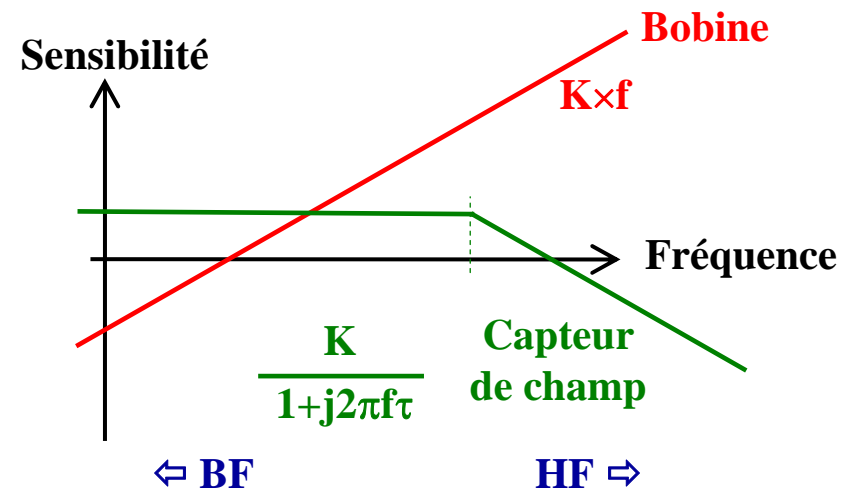


**Récepteur :**

- Bobine  $e = -\frac{d\Phi}{dt}$

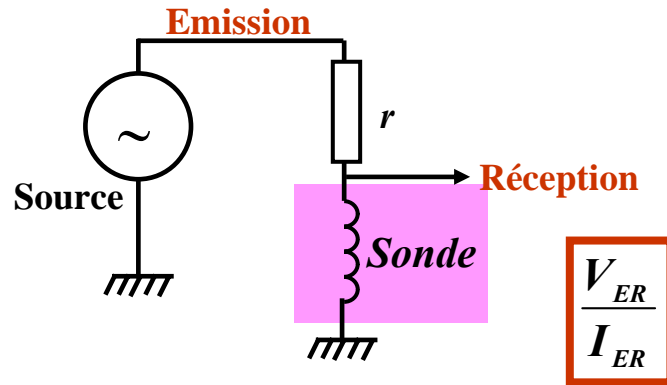
• Capteur de champ  
(directement sensible au champ)

(GMR, GMI, Fluxgate...)

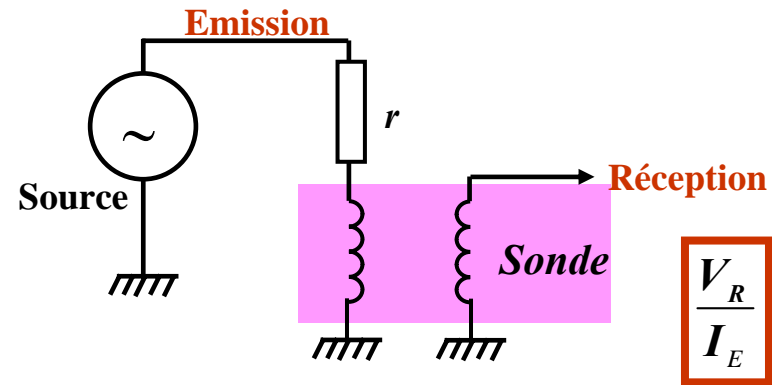


# Différents types de sondes

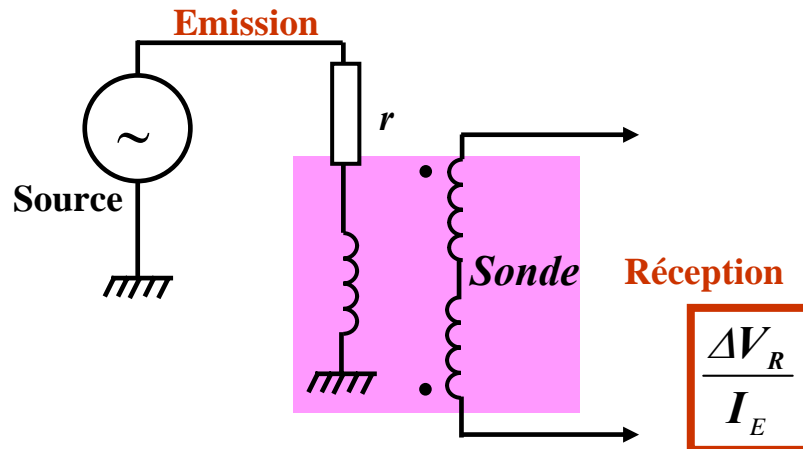
à fonction double absolue



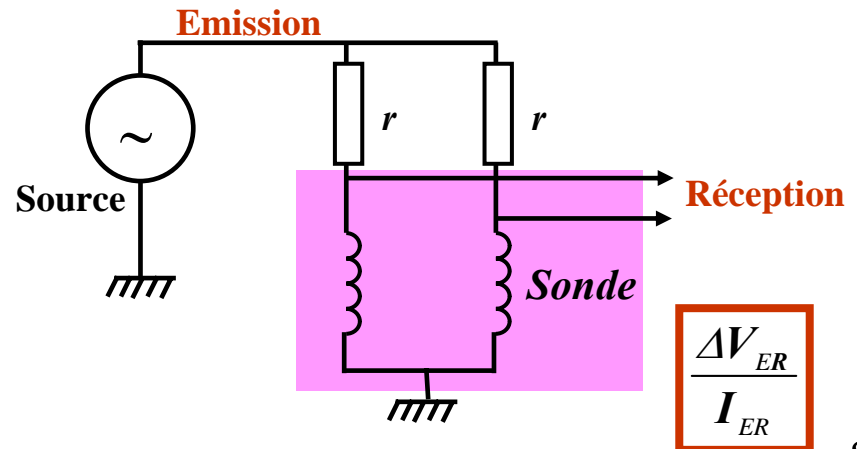
à fonctions séparées absolue



à fonctions séparées différentielle



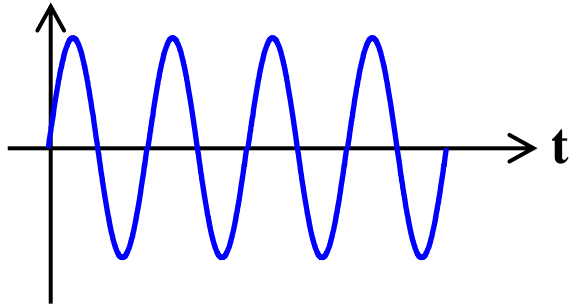
à fonction double différentielle (pont)





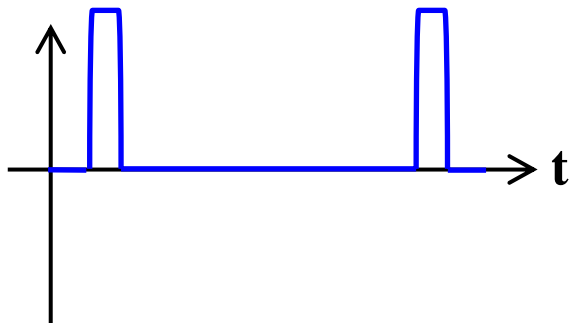
# Types d'excitation

**Harmonique** : source (V ou I) sinusoïdale (100 Hz < fréquence < 10 MHz)



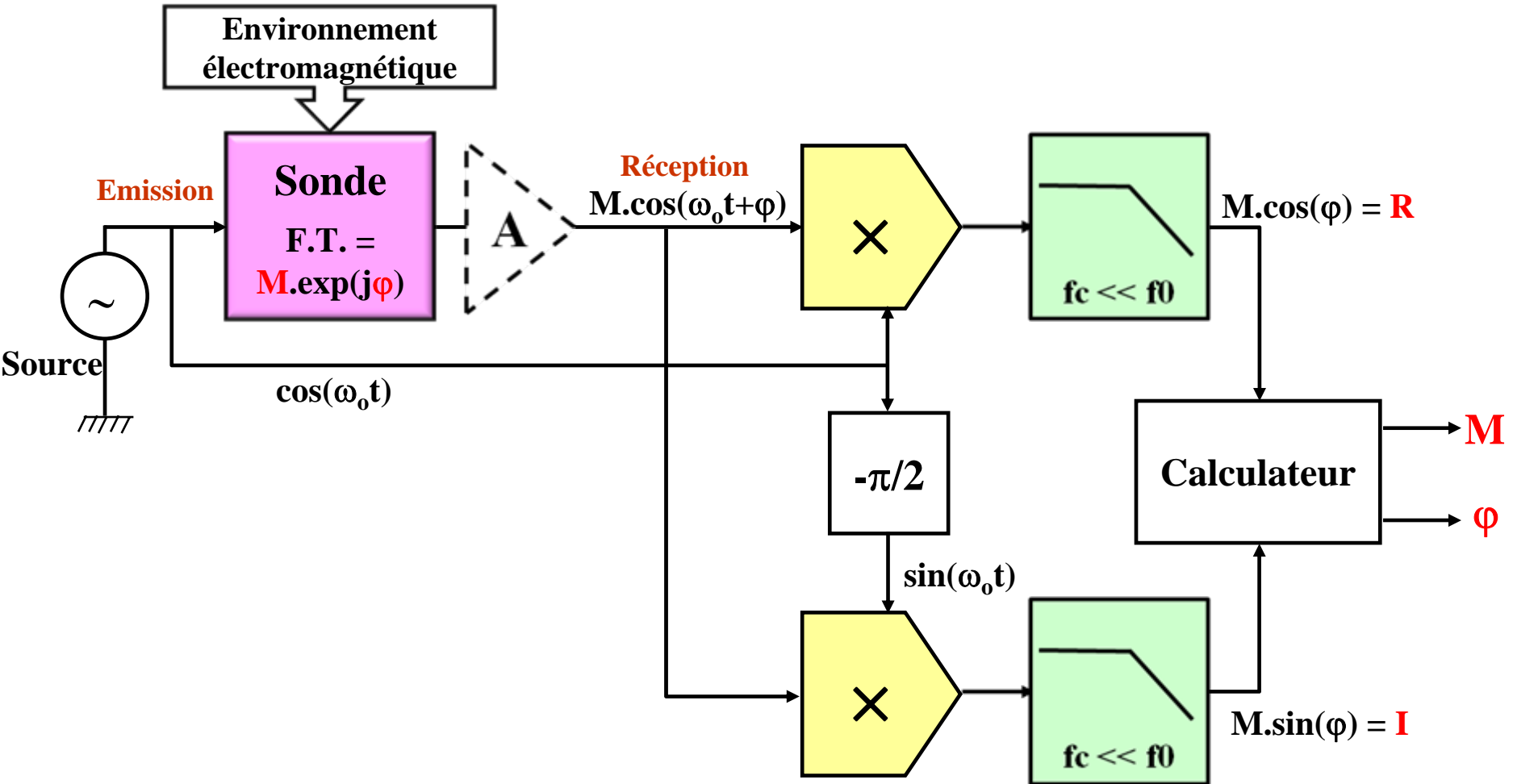
- excitation et réception assez simples à réaliser
- possibilité de faire du multifréquence (séquentiel ou parallèle)
- le plus courant

**Pulsée** : source (V ou I) impulsionnelle (impulsion : carré, sinus...)



- spectre très riche en fréquence
- excitation et réception plus complexe à réaliser
- moins répandu

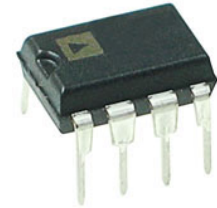
# Détection synchrone (régime harmonique)



# Instrumentation en régime harmonique

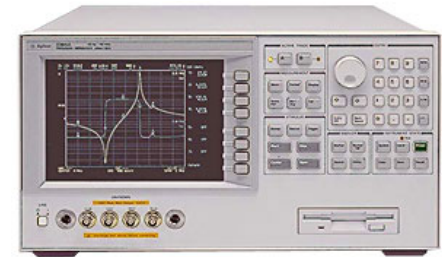
## Détection synchrone : Réalisation

Réalisation analogique ou mixte



Multiplieur analogique, ampli-op, oscillateur, conditionneur LVDT ...

Appareil CF ou analyseur BF



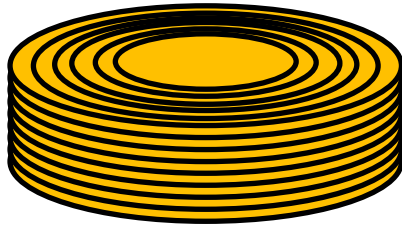
Réalisation numérique

Conversion analogique → numérique  
puis traitement numérique du signal



# Comportement d'une bobine

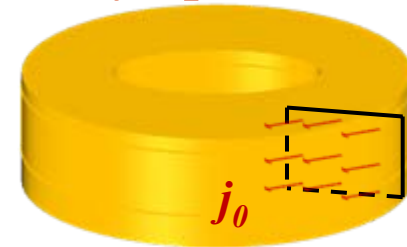
## Réalité



N spires  
Courant I

- Bobine de N spires (uniformément distribuées)
- Fils de cuivre  $\Rightarrow$  **Résistance**
- couplages capacitifs interspires, entre spires et environnement  
 $\Rightarrow$  **Capacité**

## Modélisation (analytique, MEF...)



$$j_0 = \frac{NI}{S_{bob}}$$

- Densité de courant uniforme dans la section de la bobine
- milieu non conducteur (pas d'effet de peau)
- modélisation magnétodynamique (pas d'effet capacitifs)

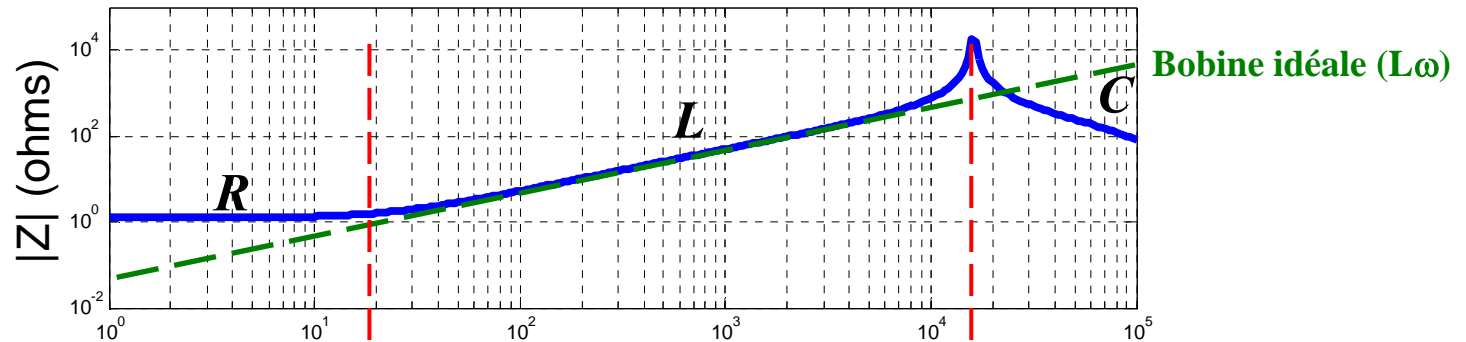
# Réponse en fréquence

Exemple :

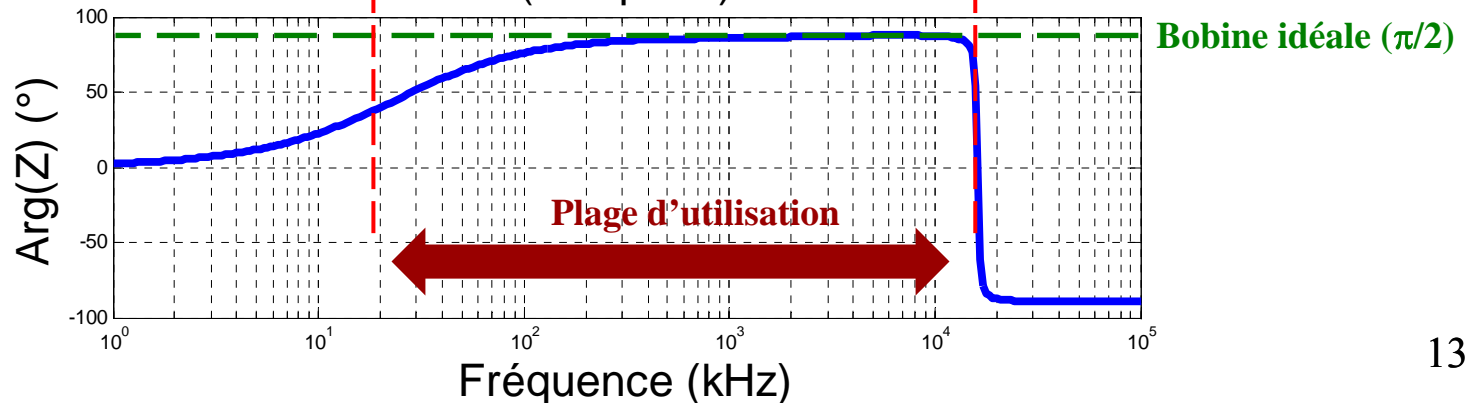


Nombre de spires	Hauteur (mm)	Rayon externe (mm)	Rayon interne (mm)
33	1.45	4.34	2.42

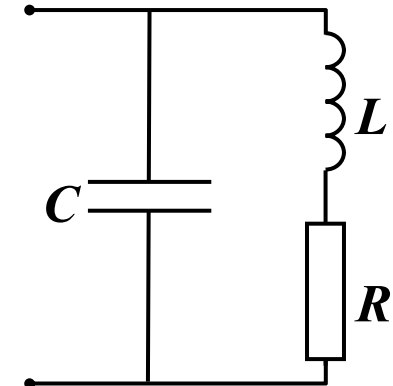
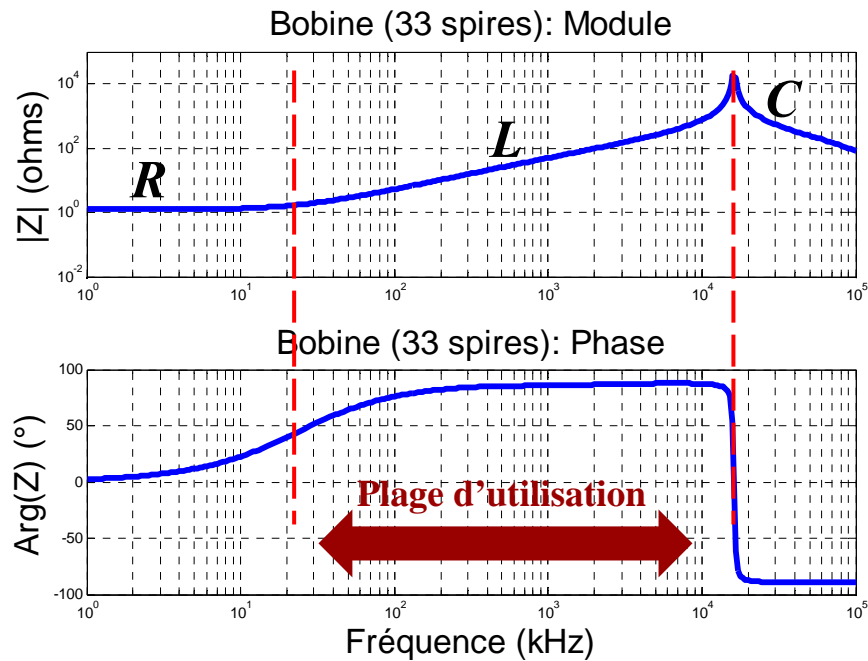
Bobine (33 spires): Module



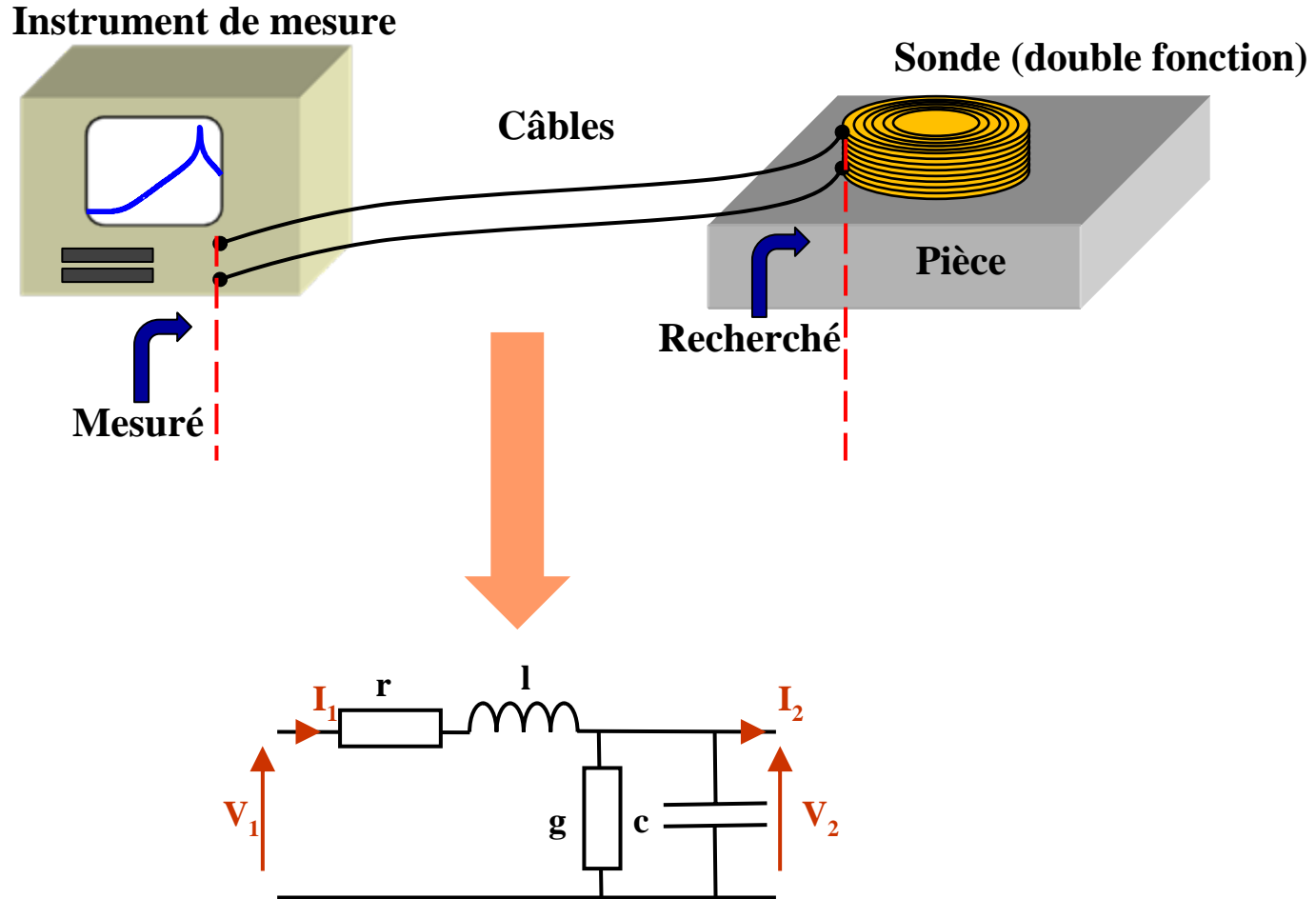
Bobine (33 spires): Phase



# Modèle équivalent (simplifié)

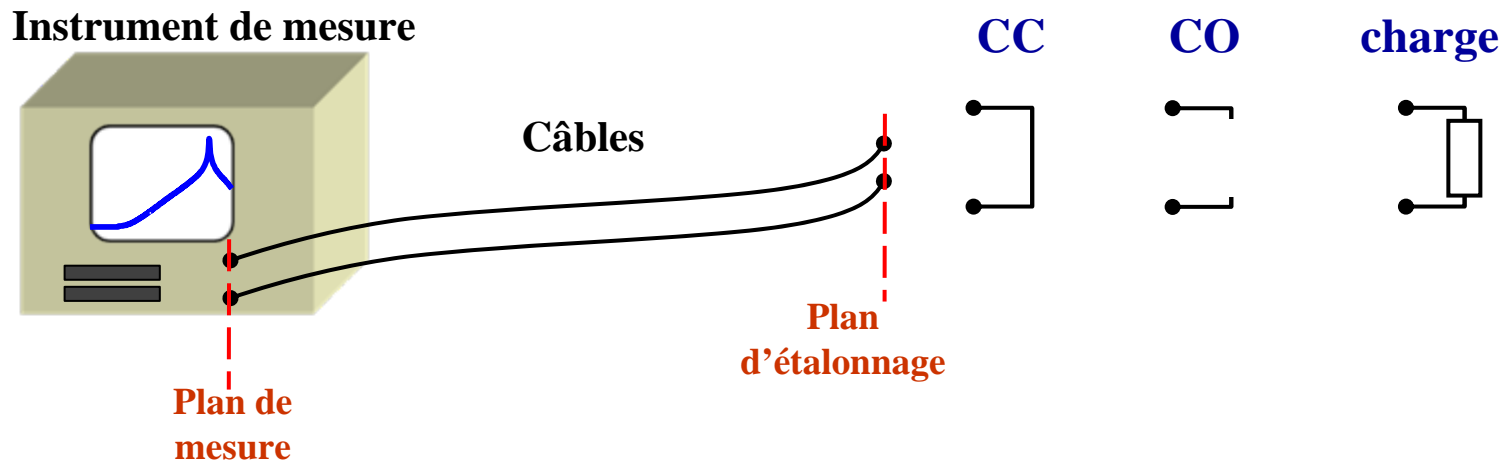


# Influence des câbles et de la connectique



# Correction des mesures

**Etalonnage** : présentation d'étalons



⇒ Nécessité de disposer d'étalons et de pouvoir les présenter dans le plan d'étalonnage

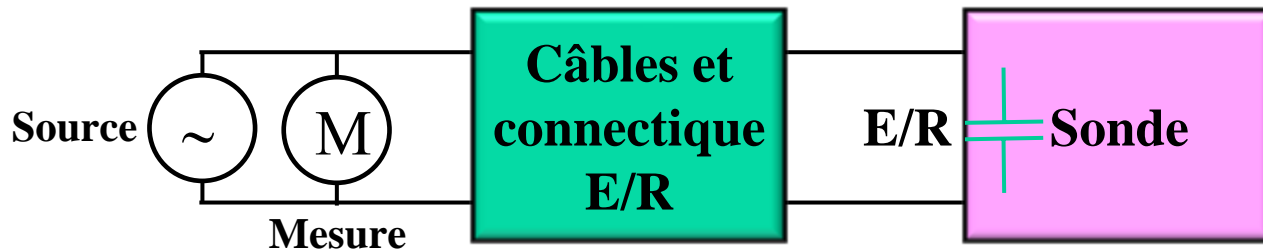
**Compensation** : Détermination de lois de correction sans utilisation d'étalons et sans ouvrir le circuit

⇒ Extrémité des câbles non accessibles, étalons indisponibles, prise en compte effet capacitif bobine ...

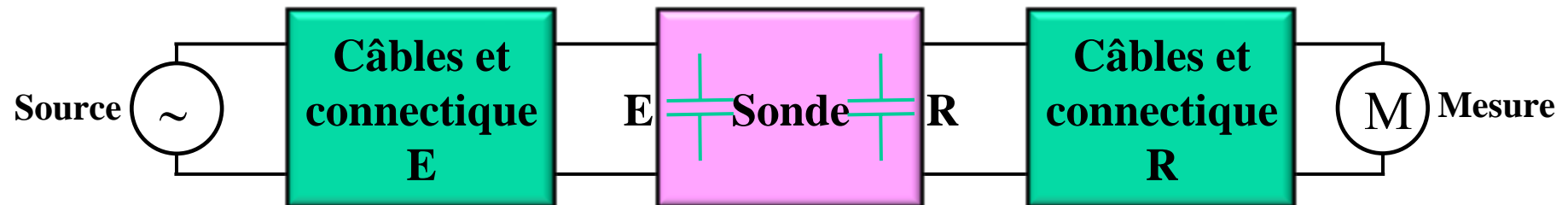


# Correction des mesures

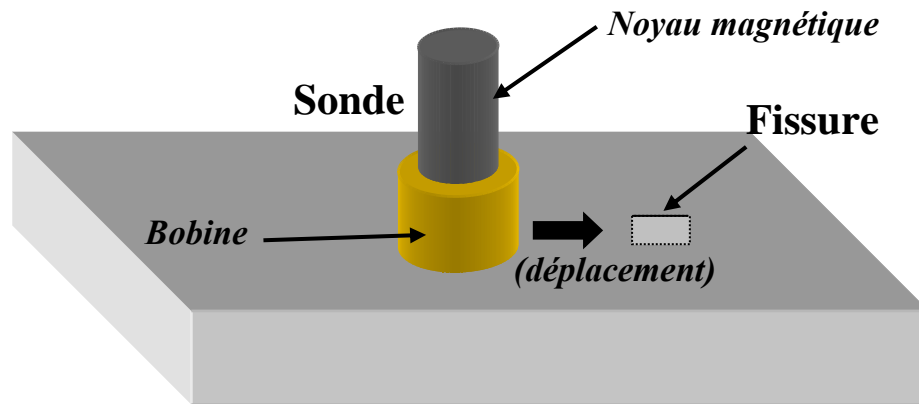
**Sonde à double fonction :**



**Sonde à fonctions séparées :**



# Contrôle de petits défauts



## Paramètres de la sonde :

Diamètre noyau:	0.8 mm
Hauteur noyau :	4 mm
Diamètre externe bobine :	1.2 mm
Hauteur bobine :	1.4 mm
Nombre de spires :	110

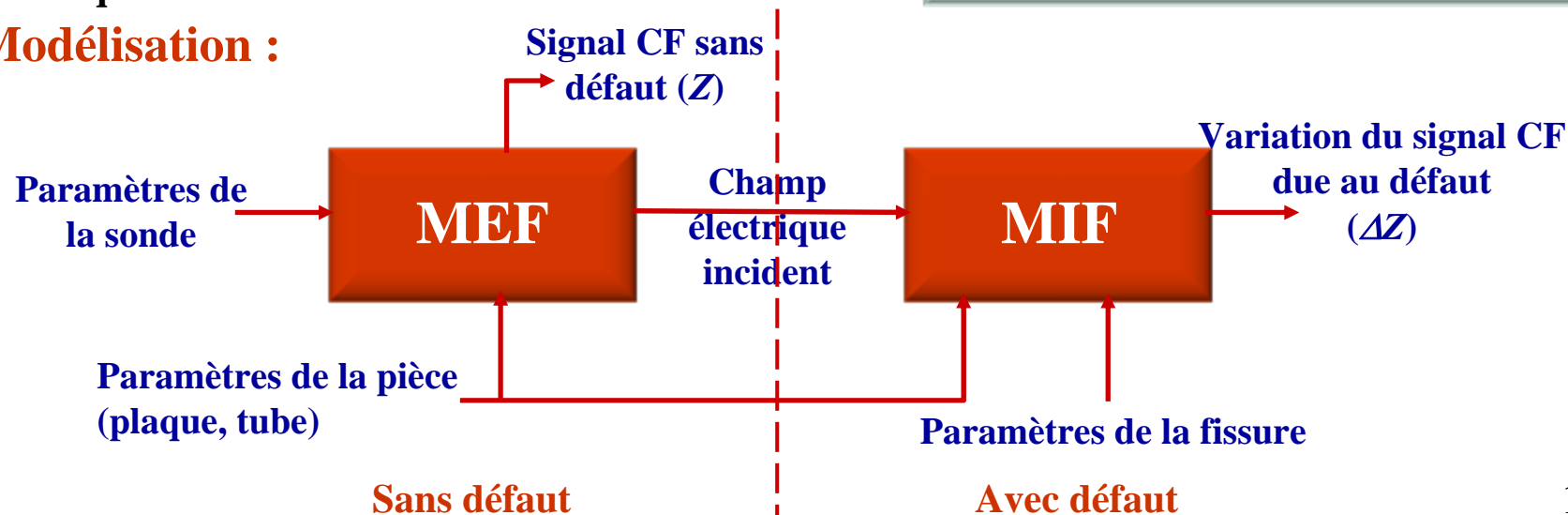
## Paramètres de la pièce :

Conductivité :	0.76 MS/m
épaisseur :	3 mm

☞ **Grandeur de sortie : impédance de la bobine**

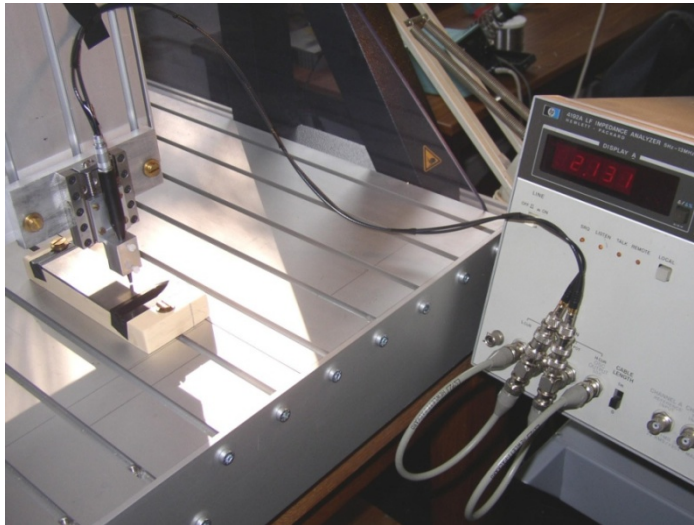
☞ **Fréquence : 2 MHz**

## Modélisation :



# Validation expérimentale

**Dispositif expérimental**



## Dispositif expérimental :

- Sonde CF
- Analyseur d'impédance 4192A
- Robot 3 axes
- Cale avec défauts étalons

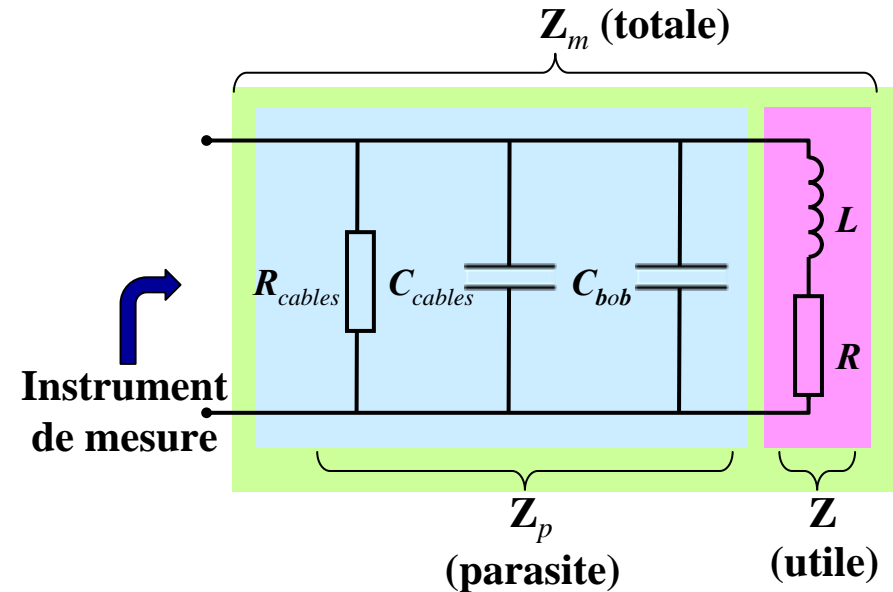
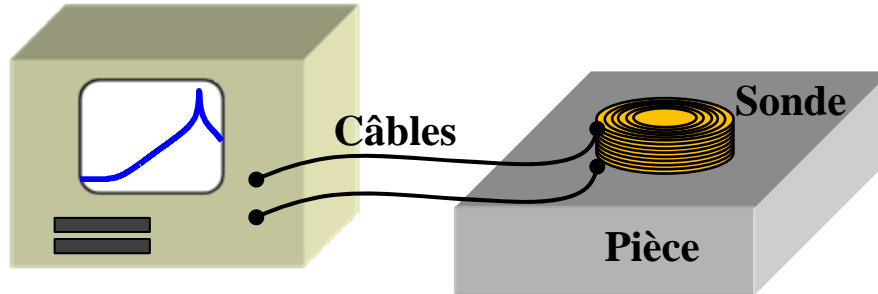
## Défauts :

15 entailles distribuées selon :

- 5 longueurs : 800  $\mu\text{m}$ , 600  $\mu\text{m}$ , 400  $\mu\text{m}$ , 200  $\mu\text{m}$ , 100  $\mu\text{m}$
- 3 profondeurs : 400  $\mu\text{m}$ , 200  $\mu\text{m}$ , 100  $\mu\text{m}$
- Ouverture : 100  $\mu\text{m}$

# Correction des effets capacitifs

Instrument de mesure



Hypothèse :  $R_0$  et  $L_0$  (résistance et inductance à vide) identiques en BF qu'à la fréquence de travail ( $f = 2$  MHz).

❶ Détermination de  $R_0$  et  $L_0$  par une mesure BF à vide ( $R_{\text{cables}} \gg R_0$ )

❷ Mesure de l'impédance  $Z_m$  de la sonde à vide à  $f = 2$  MHz

❸  $Y_m = Y_p + Y_0$  on en déduit :  $Y_p = Y_m - Y_0$  ( $Y_0^{-1} = Z_0 = R_0 + jL_0\omega$ )

⇒ Loi de correction :  $Y_{\text{corrigé}} = Y_{\text{mesuré}} - Y_p$

Effet de la correction :  
10% sur  $R$ , 5% sur  $L$

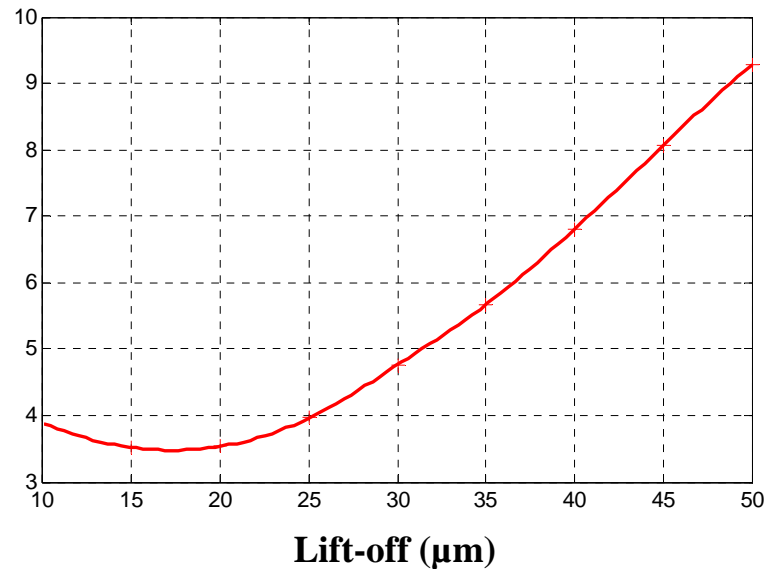
# Estimation du lift-off (distance sonde-pièce)

- La conductivité est bien connue (mesurée)
- La valeur du lift-off est imparfaitement connue

⇒ Estimation par minimisation de l'écart entre expérimentation et calcul pour le cas d'une pièce sans défaut

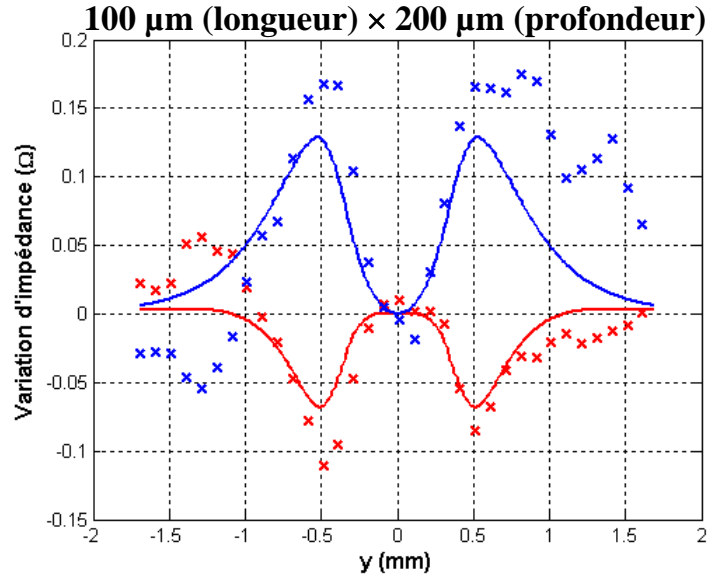
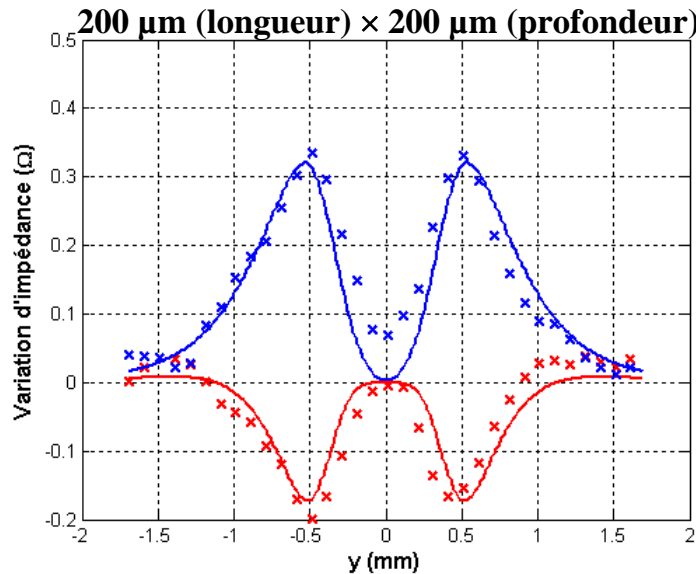
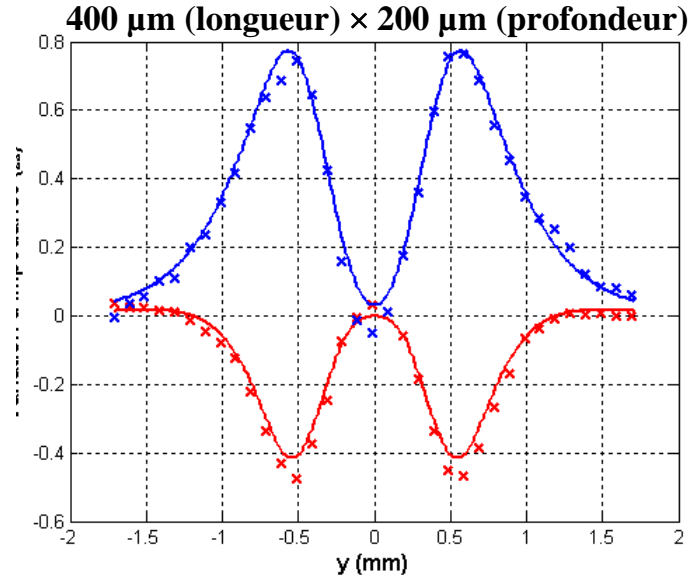
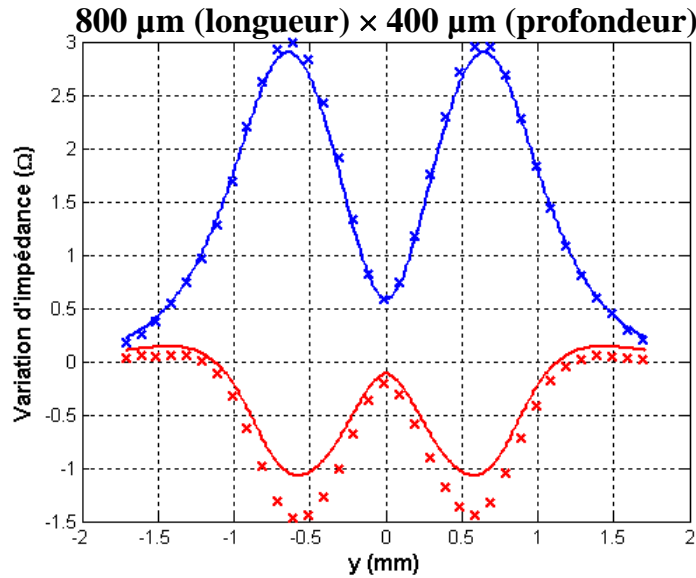
$$\left| \frac{\Delta Z_{exp} - \Delta Z_{calc}}{\Delta Z_{calc}} \right| (\%)$$

( $\Delta Z$  dû à la présence de la pièce)



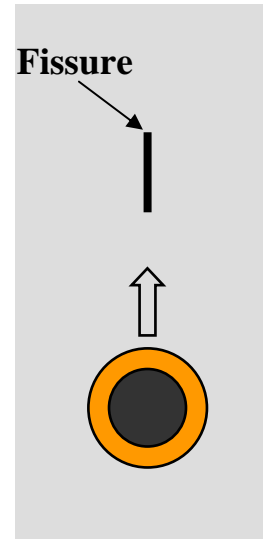
⇒ Lift-off estimé à 17 μm

# Comparaison calcul/expérimentation



– : Calcul  
 × : Mesures

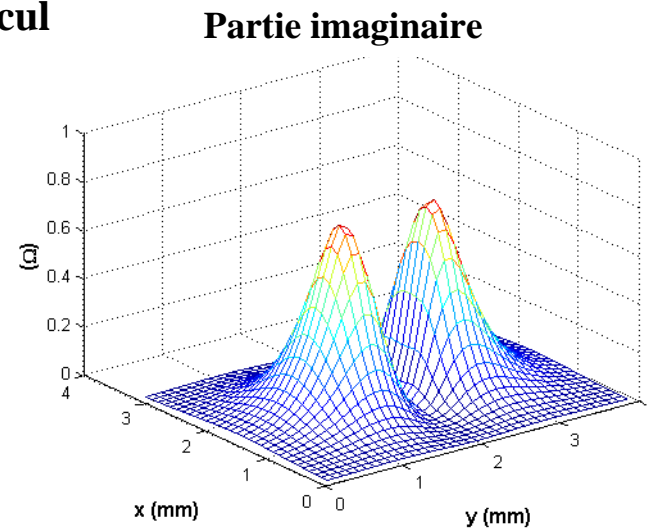
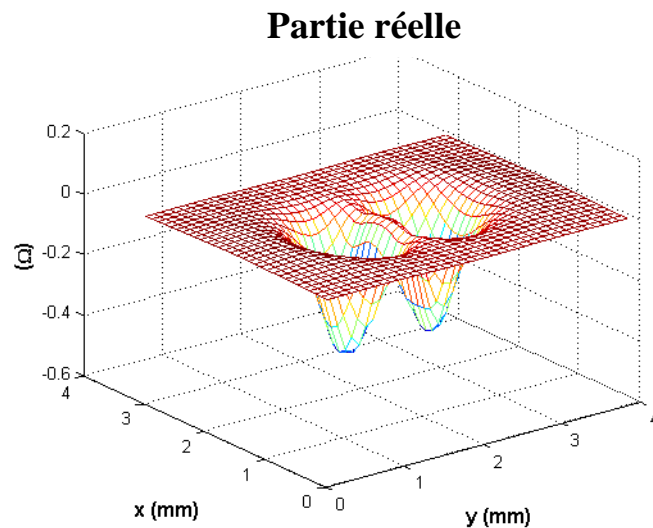
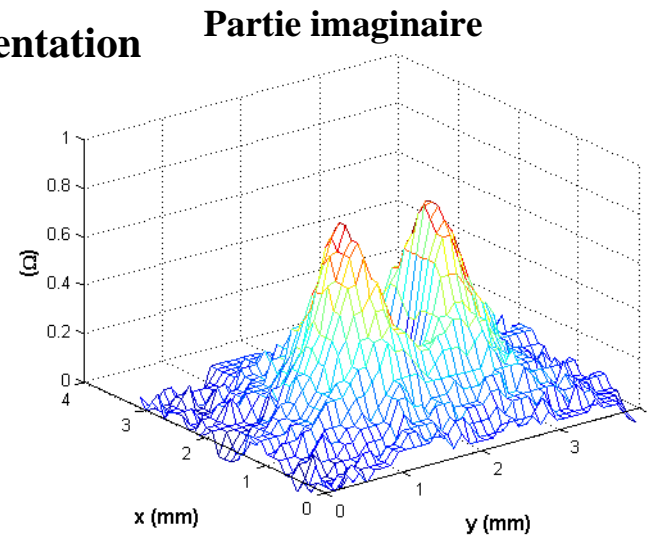
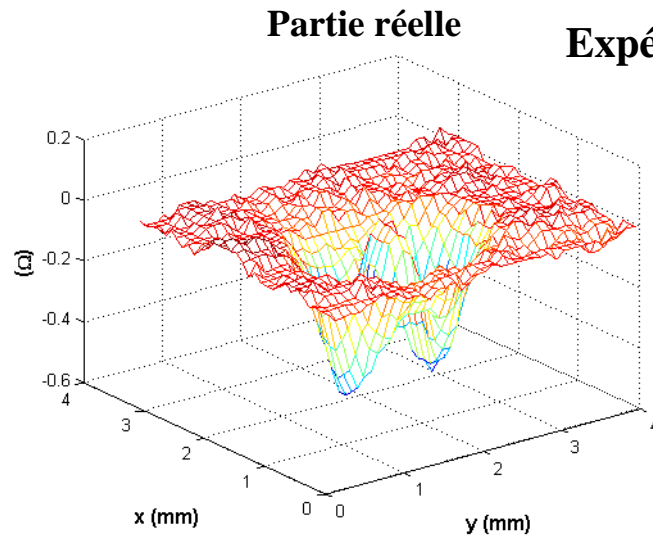
Partie  
 Imaginaire  
 Partie réelle



$|Z_i| = 500 \Omega$

# Comparaison calcul/expérimentation

Entaille : 400  $\mu\text{m}$  (longueur)  $\times$  200  $\mu\text{m}$  (profondeur)



# Conclusions

- **La technique et l'instrumentation CF reposent sur un principe simple**
- **Différentes structures de sondes mais un même principe de mesure**
- **Différences modèle / réalité (effets capacitifs...)**
- **Il peut être nécessaire de mettre en œuvre des procédures de correction des mesures**



*Merci pour votre attention*