

# Introduction aux Contrôles Non Destructifs



Philippe GUY

[philippe.guy@insa-lyon.fr](mailto:philippe.guy@insa-lyon.fr)

LVA - INSA de Lyon

FRANCE

# Définition des Essais Non Destructifs

---

**Les Essais Non Destructifs (END) sont un ensemble de méthodes permettant de caractériser l'état d'intégrité de structures ou de matériaux, sans les dégrader et à différents stades de leur cycle de vie.**

(COFREND)

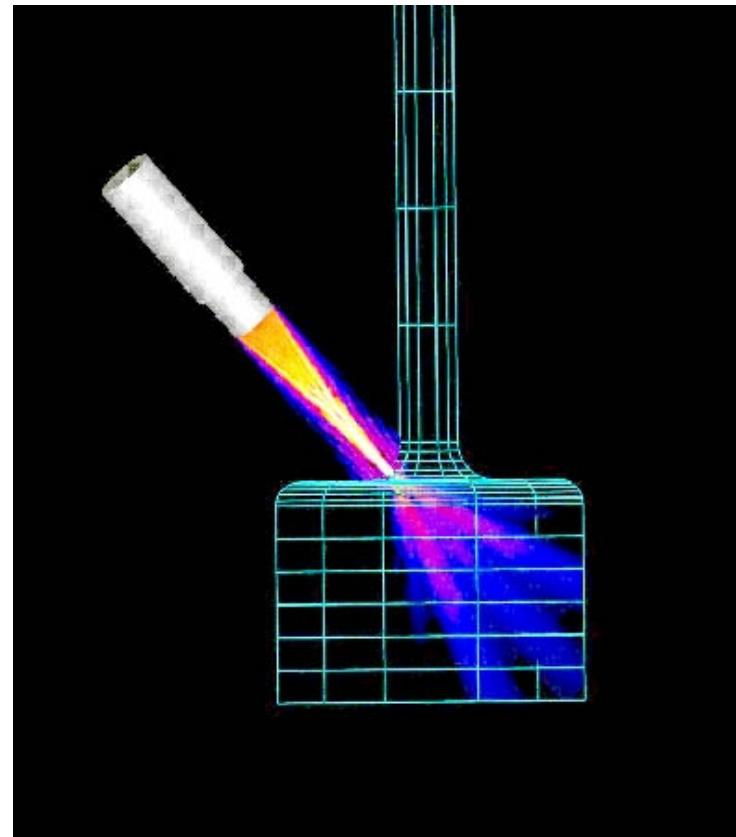


# Définition des Essais Non Destructifs

---

**Ensemble de techniques non invasives pour :**

- ✓ caractériser l'intégrité d'un matériau, d'un composant ou d'une structure
- ✓ mesurer une caractéristique d'un matériau ou d'un objet



**i.e. Contrôler ou mesurer sans endommager,  
à différents stades du cycle de vie d'une structure.**

# Les END pourquoi ?

- Garantir la qualité et la sécurité
- Prévenir les accidents industriels
  - (parfois aspect réglementaire)



Challenger 28/01/86 AF



# Secteurs industriels concernés

---

- Aéronautique
- Automobile
- Ferroviaire
- Agro-alimentaire
- BTP, Génie Civil
- Chaudronnerie
- Construction navale
- Fonderie, forge, métallurgie, sidérurgie
- Mécanique
- Energie, Pétrochimie, nucléaire
- Sidérurgie
- ...

# Quand utilise-t-on les méthodes de END ?

Il existe des applications des END à tous les stades du procédé de production et du cycle de vie d'une structure industrielle.

- Assistance au développement d'un produit
- Tri ou qualification des matières premières
- Suivi ou optimisation du procédé de fabrication
- Vérifier les caractéristiques en regard du CdC
- Vérifier la bonne exécution du procédé comme par exemple le traitement thermique
- Vérifier l'assemblage (soudures, collages ...)
- Maintenance contrôle
- Détection et suivi en service (SHM)

# Méthodes d'END

- Sonnage (Tap Testing)
- Inspection visuelle (VT - Visual Testing)
- Ressuage (PT - Penetrant Testing)
- Magnétoscopie (MT - Magnetic particle Testing)
- Emission acoustique (AT - Acoustic Emission Testing)
- Courants de Foucault (ET – Electromagnetic Testing)
- Ultrasons (UT - Ultrasonic Testing)
- Rayons X (RT - Radiographic Testing)
- Thermographie Infrarouge (TT - Infrared/Thermal Testing)
- Etanchéité (LT - Leak Tightness Testing)
- Micro-ondes
- Microscopie Acoustique
- Interférométrie laser
- Ondes TeraHertz



"© National Railway Museum and SSPL"

# Quelques utilisations des méthodes de END

- Détection et évaluation de défauts
- Localisation de défauts
- Mesures dimensionnelles
- Caractérisation de structures et de microstructures
- Estimation des propriétés mécaniques et physiques
- Mesures de contraintes de déformations et mesures de réponse dynamique
- Tri de matériaux et détermination de la composition chimique
- Détection de fuites



Détection d'une fissure par  
ressuage sous éclairage  
fluorescent

---

# Exemples d'applications courantes des CND

# Inspection de produits bruts

Forgés,  
Emboutis,  
Extrudés,  
etc...

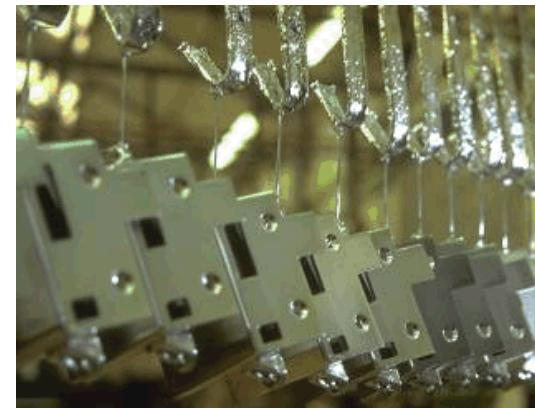


# Inspection pendant la transformation

Usinage  
Soudage  
Polissage  
Traitement thermique  
Laminage  
etc.



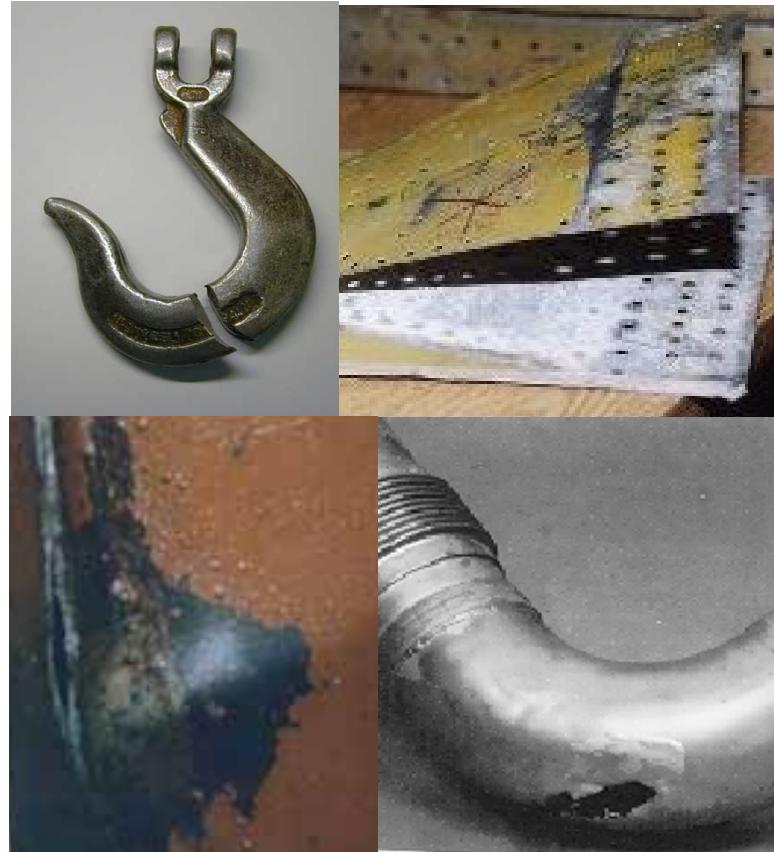
Photo courtesy of  
New Brunswick Community College



# Contrôle d'endommagement en service

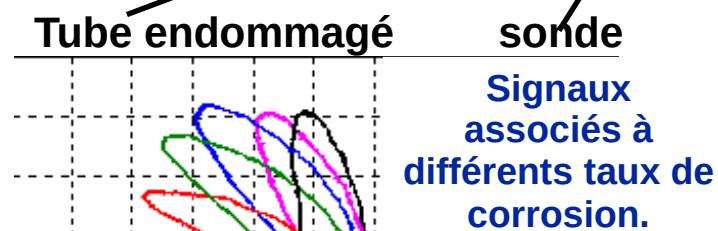
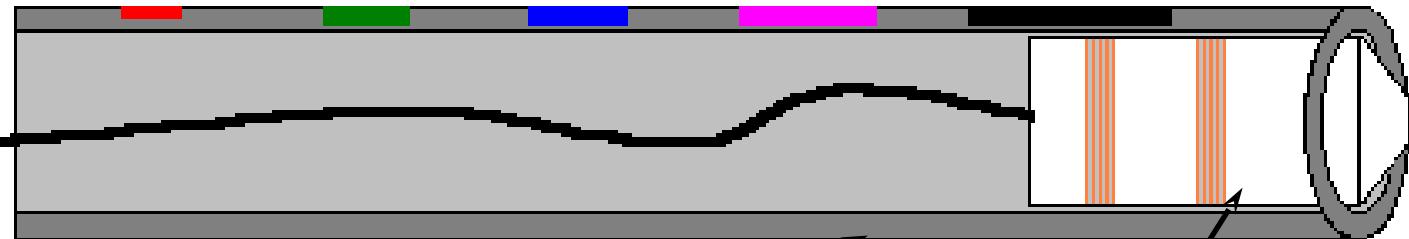
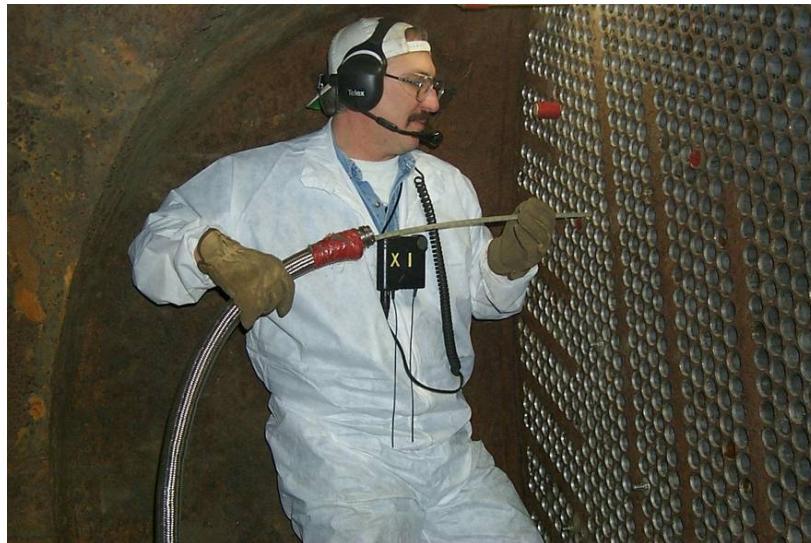
On peut rechercher :

- Fissuration
- Corrosion
- Erosion/Abrasion
- Choc thermique
- Délaminages.
- Rupture de fibres
- ...



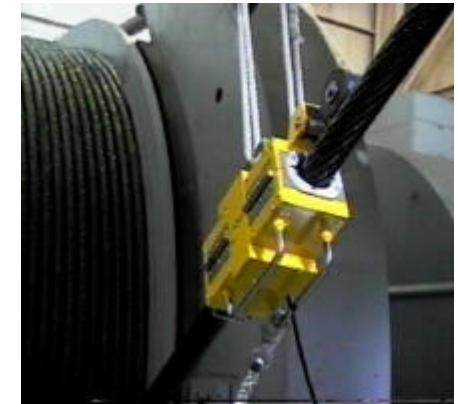
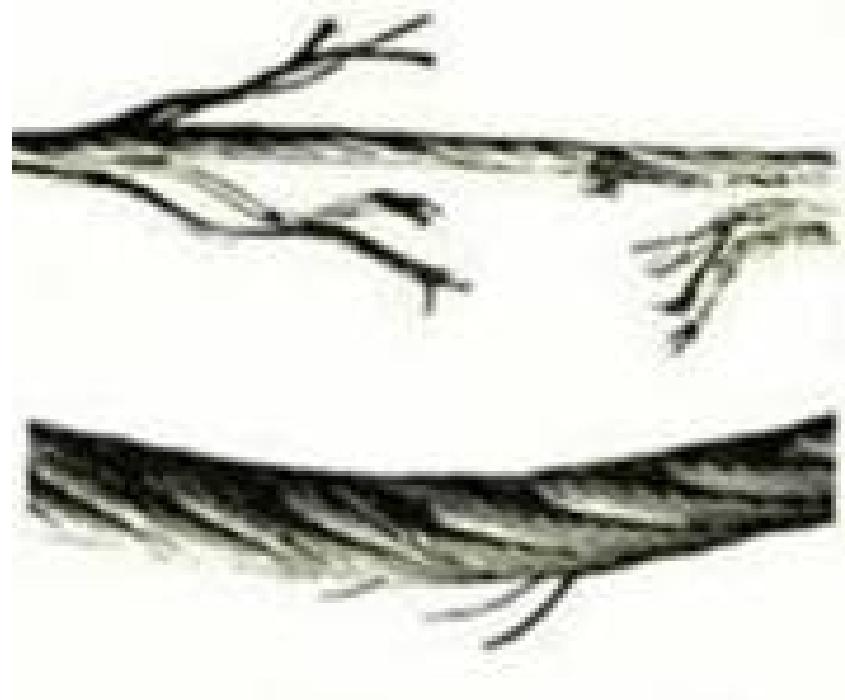
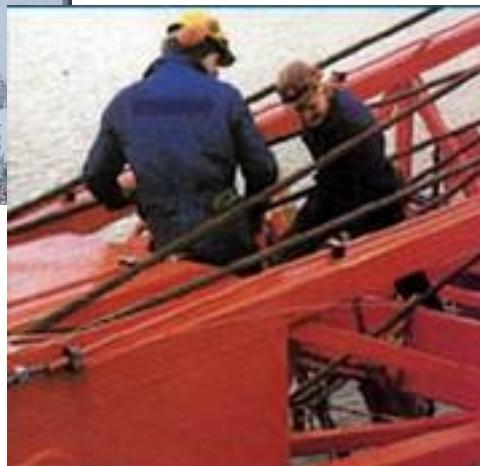
# Contrôle de centrales

Périodiquement des tranches de centrales sont arrêtées pour être inspectées . Des sondes à courants de Foucault sont introduites dans les tubes des échangeurs thermiques pour détecter d'éventuels endommagements dus à la corrosion.



# Inspection de câbles

L'inspection **visuelle** et des méthodes **électromagnétique** sont utilisées pour trouver des fils cassés ou d'autres défauts dans les câbles de remontées mécaniques, d'ascenseurs et autres systèmes de levage.



# Inspection de cuves de stockage

Des mesures US d'amaincissements liés à la corrosion sont recherchés le long des parois de cuves hors-sol grâce à des robots .

Les cuves enterrées sont contrôlées par des caméras montées sur des bras articulés et robotisés.

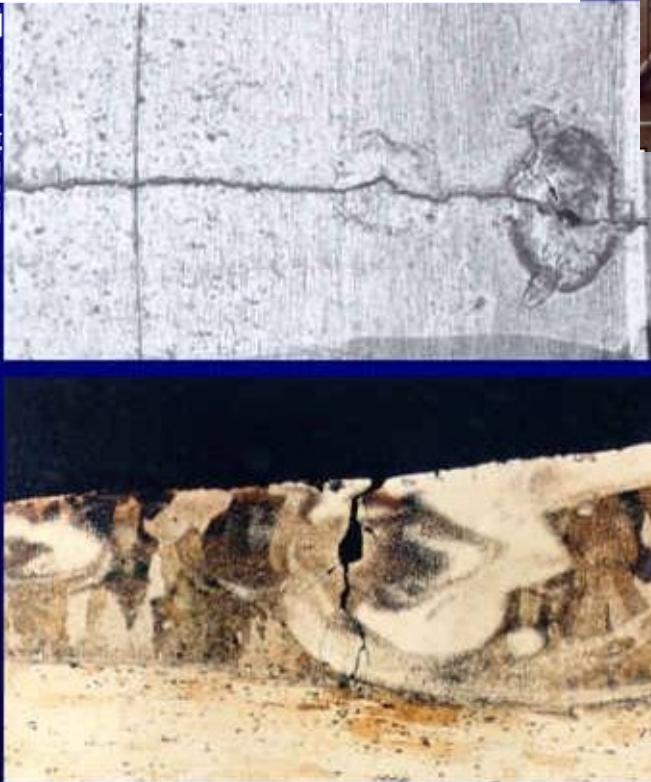
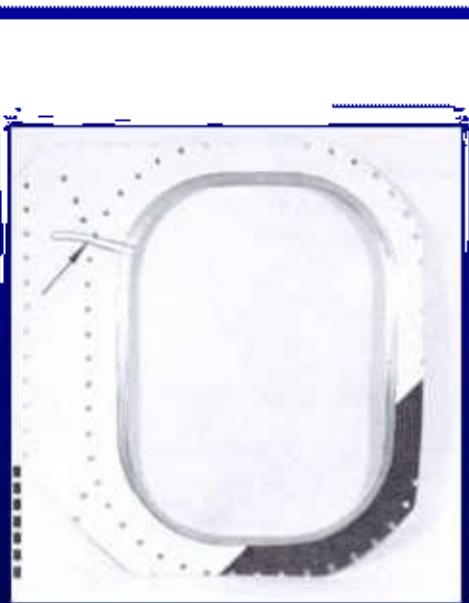


# Contrôle des aéronefs

Les CND sont largement employés au cours de la fabrication des avions

Les CND sont aussi utilisées pour la détection de fissures ou de corrosion sur des avions en service.

Ci-dessous une fissure qui s'est initiée autour d'un impact de foudre.



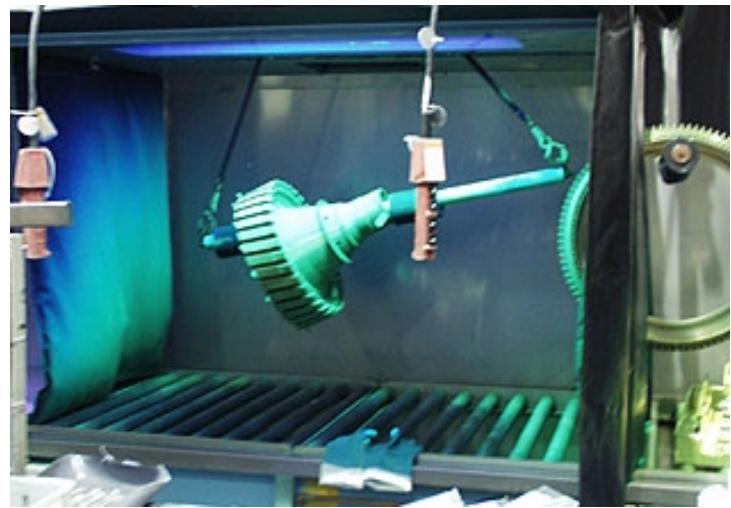
# Contôles de moteurs d'avions



**Les moteurs d'avion sont révisés périodiquement.**

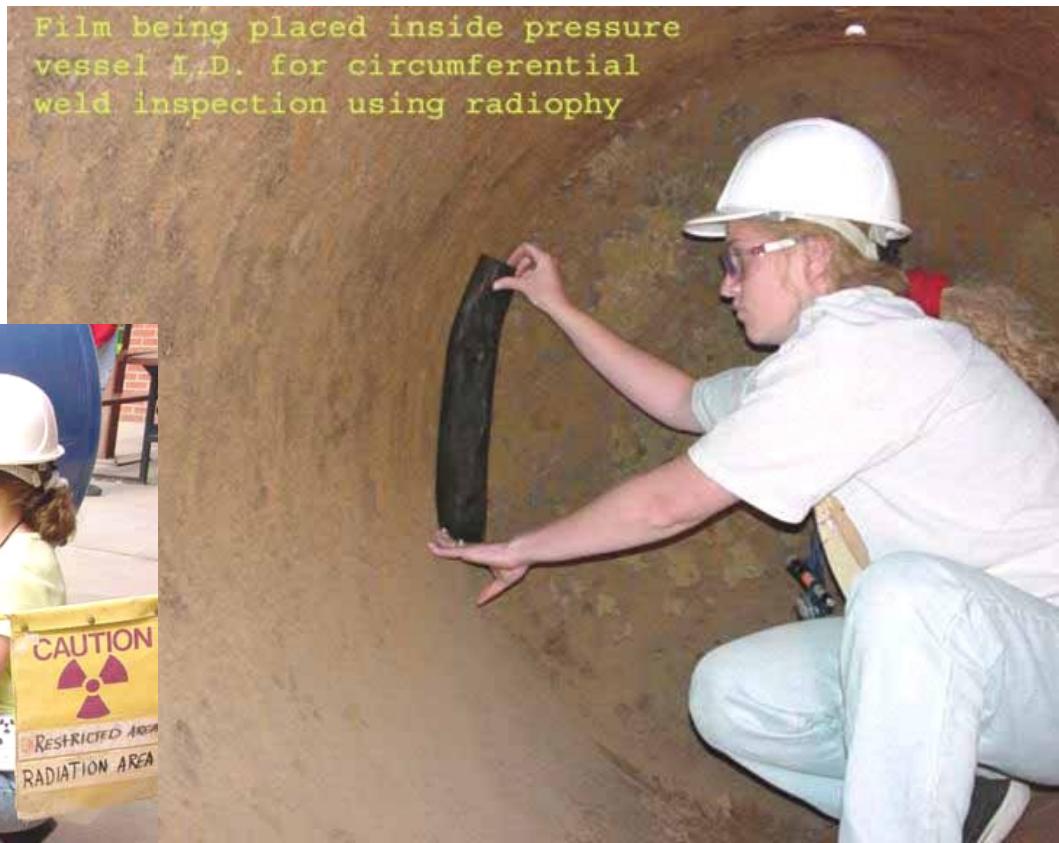
**Ils sont complètement démontés, nettoyés, inspectés puis remontés.**

**Le ressage permet de rechercher des fissures dans la plupart des pièces.**



# Inspection des réservoirs sous pression

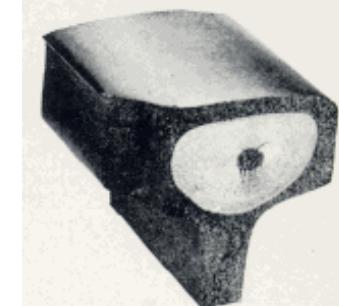
La rupture de réservoirs sous pression peut conduire à une explosion. Pour éviter ce genre de danger, les réservoirs sont inspectés en RX, en US et parfois en EA



# Contrôle de rails

Des wagons spéciaux sont utilisés pour inspecter des centaines de kilomètres de rail afin de détecter des fissures qui pourraient occasionner un déraillement.

CF ou US



# Contrôle des ponts

**La corrosion les fissures et d'autres endommagements peuvent affecter les performances des ponts.**

**L'effondrement du Silver Bridge en 1967 a fait 47 victimes.**

**Tous les deux ans environ, les ponts sont inspectés visuellement.**

**Certains ponts sont équipés de capteurs d'émission acoustique qui écoutent le bruit provenant de la croissance de fissures (viaduc de Millau par ex.)**

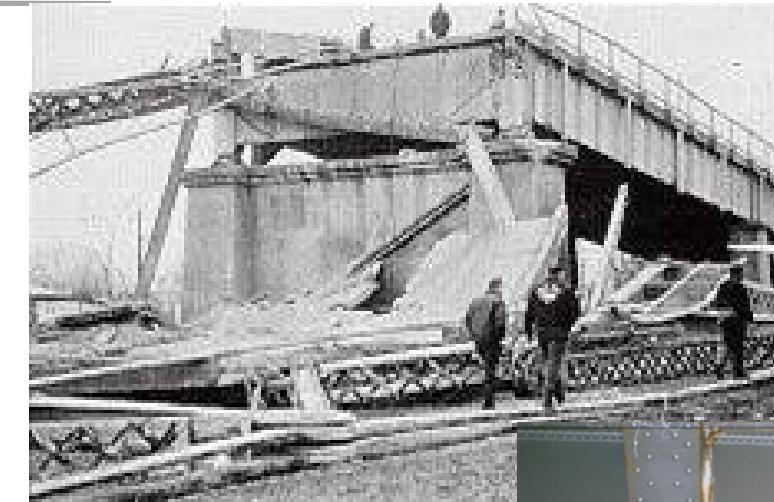


Photo Courtesy of Physical Acoustics Corporations

# Inspection des pipelines

**Les CND sont utilisés pour le contrôle des pipelines pour prévenir les fuites. L'inspection visuelle, les RX et les méthodes magnétiques sont des méthodes souvent utilisées.**



**Magnétoscopie.** Cet appareil appelé "pig" est introduit dans le pipeline et collecte des données sur l'état de santé de la conduite au fur et à mesure de sa progression. Il est propulsé par le fluide transporté dans le pipe.



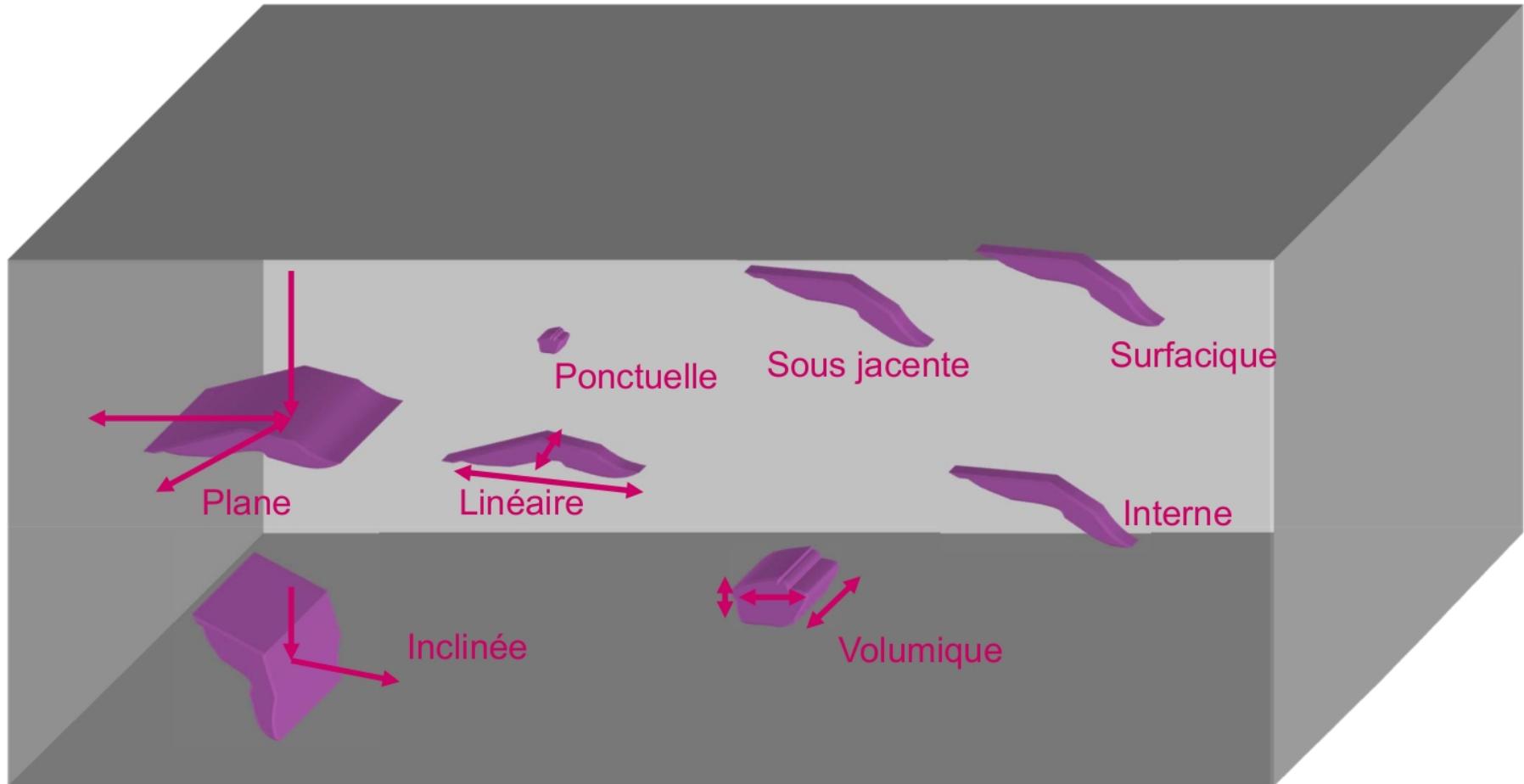
Photo Courtesy of Inuktun

**Système robotisé d'inspection visuelle.**



Photo Courtesy of Yxlon International

# Défectologie : forme et position des défauts



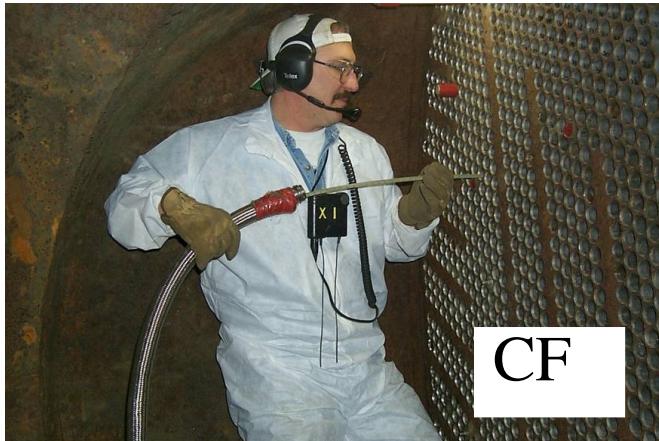
# Méthodes surfaciques et méthodes volumiques

---

Surfacique	Volumique
Ressuage	Rayonnements ionisants
Inspection Visuelle	Ultrasons
Magnétoscopie	Emission acoustique
Courants de Foucault	Terahertz
Thermographie Infra-rouge	

# Les 7 méthodes de CND les plus répandues

- Contrôle visuel
- Ressuage
- Magnétoscopie (Démo)
- Emission Acoustique
- Courants de Foucault
- Ultrasons (Cours, TD, TP)
- Rayons X (Cours, TD, TP)



# L'inspection visuelle



**La plus basique et la plus répandue des méthodes de contrôle.**

Analyse des variations de réflectivité d'une pièce soumise à un éclairage en lumière visible.

Outils : endoscopes, loupes, verres, miroirs grossissants...

Des systèmes video portables équipés de zooms permettent l'inspection de grandes cuves de stockages, de citernes ou de canalisations



Des robots permettent l'observation en milieu hostile ou difficile d'accès, ( conduites d'air, pipelines, zones irradiées, réacteurs chimiques ...)



# L'inspection visuelle

---



**Avantages :**

- Coût
- Milieu hostile
- Automatisation

**Inconvénients :**

- Surfacique
- Souvent qualitatif

# Ressuage (Penetrant liquid Testing)

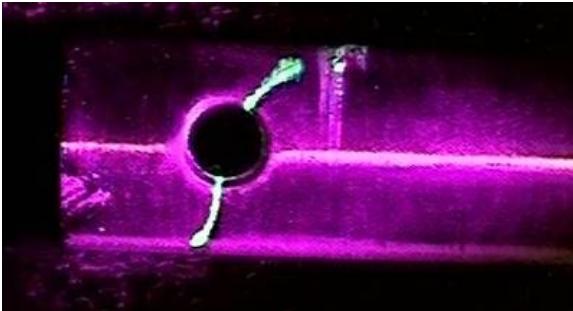
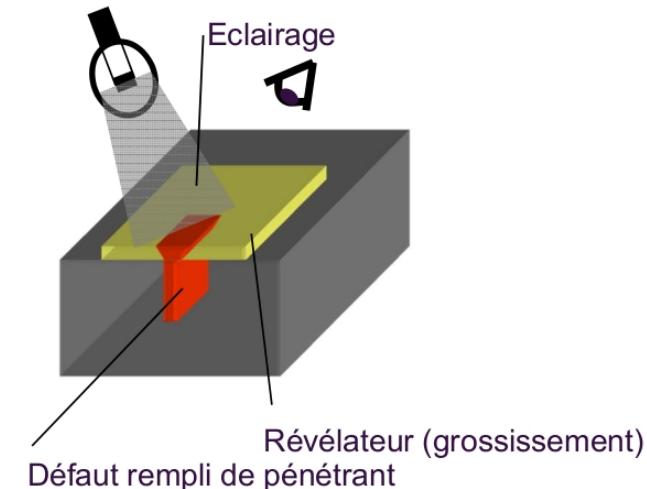
Un liquide à fort pouvoir mouillant est appliqué sur la surface de la pièce. Il faut un certain temps pour qu'il s'infiltre dans les **défauts débouchants**

L'excès de liquide est éliminé de la surface de la pièce (rinçage à l'eau).

Un révélateur (poudre) attire le fluide hors du défaut et le répand sur la surface où il peut être vu.

On termine par une **inspection visuelle**.

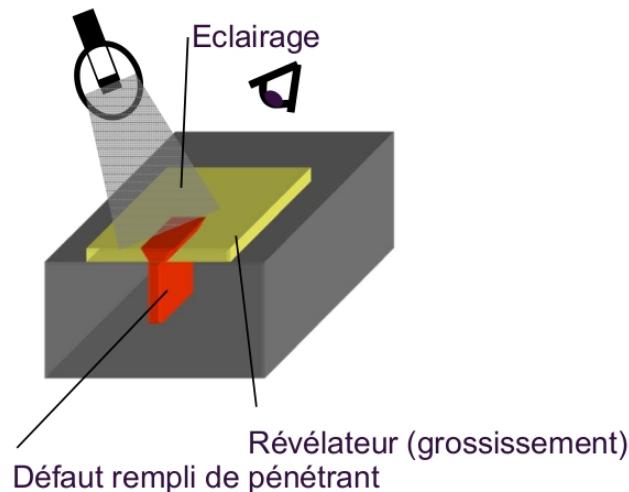
Le liquide est souvent chargé par un colorant fluorescent et l'inspection est réalisée sous une lampe UV pour augmenter la sensibilité.



# Ressuage (Penetrant liquid Testing)

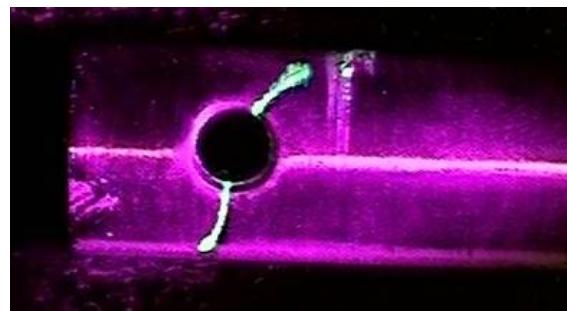
## Avantages :

- Coût
- Facilité de mise en oeuvre
- Automatisation



## Inconvénients :

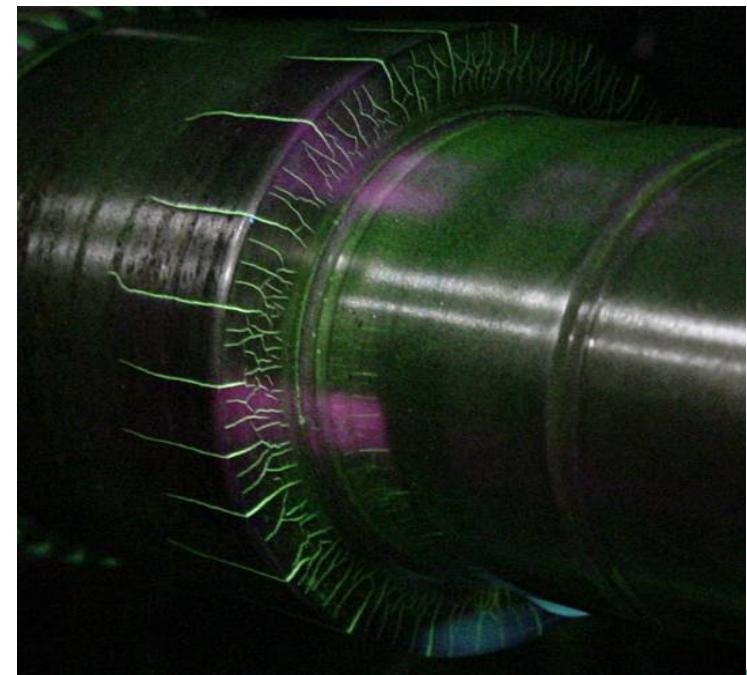
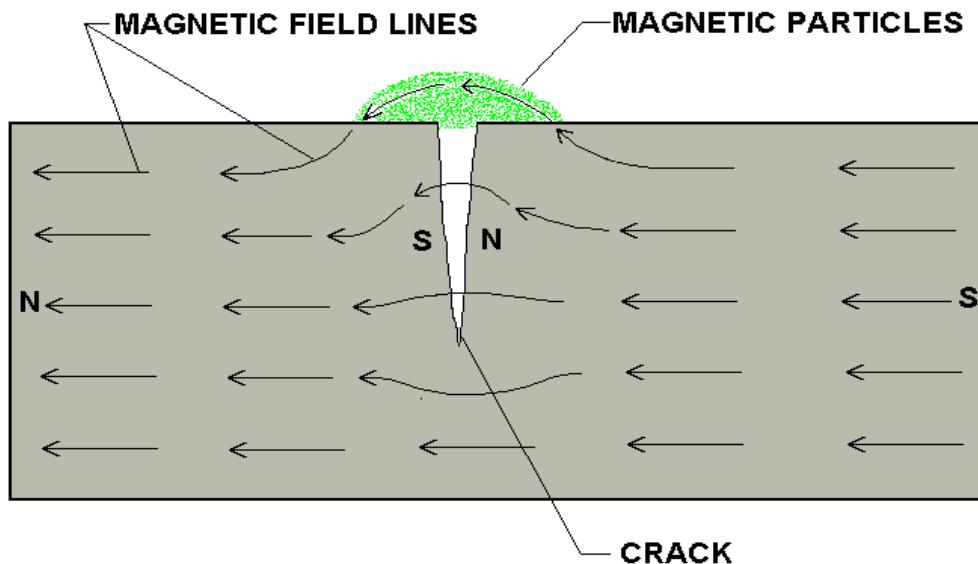
- Surfacique
- Interprétation compliquée
- Polluant



# Magnétoscopie

Un fluide coloré chargé de limaille de fer très fine est appliqué sur la surface de la pièce. La pièce est magnétisée. Les particules sont attirées dans les zones où se produisent des fuites de flux magnétiques. Elles vont s'agglutiner pour former une indication visible directement sur la discontinuité (fissure **débouchante ou pas**). Cette **indication** sera observée sous une lumière adaptée en fonction du colorant utilisé (lumière naturelle, UV ...)

NB : Seules les fissures perpendiculaires aux lignes de champ magnétique provoquent des fuites de champ.



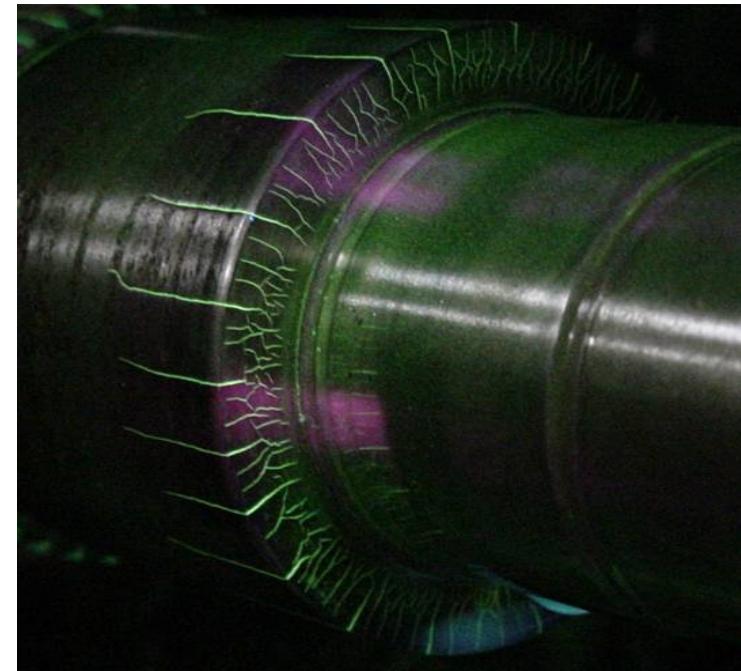
# Magnétoscopie

**Avantages :**

- Coût
- Rapidité
- Matériel robuste
- Méthode grand champ (objets de grande taille)

**Inconvénients :**

- Matériaux ferromagnétiques
- Surfacique
- Polluant



# Les différentes techniques de magnétisation:

---

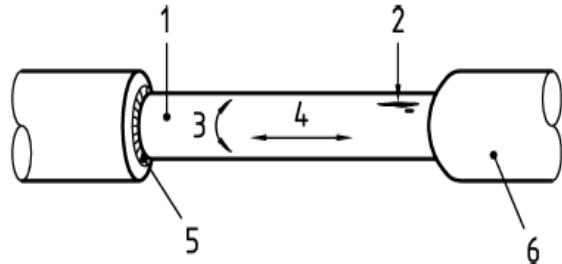
Par passage de courant électrique dans la pièce :

- Passage axial de courant
- Passage de courant entre électrodes
- Passage de courant induit

Par passage de flux magnétique dans la pièce :

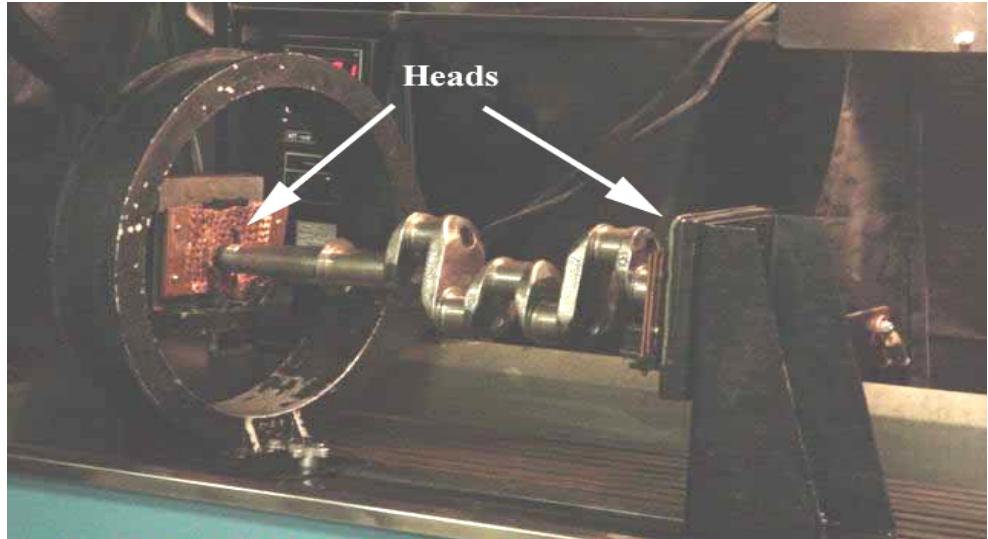
- Conducteur central
- Conducteur adjacent
- Electroaimant
- Spire, bobine, solénoïde

# Passage de courant électrique dans la pièce



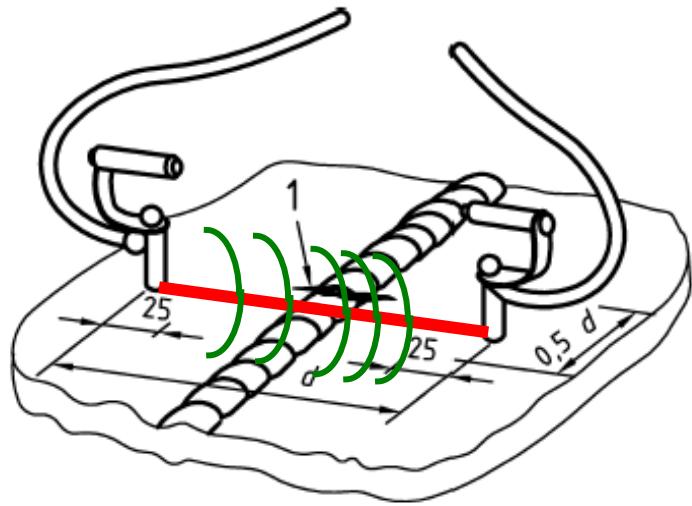
## Légende

- 1 Pièce
- 2 Discontinuité
- 3 Flux
- 4 Courant
- 5 Pièce de contact
- 6 Tête de contact



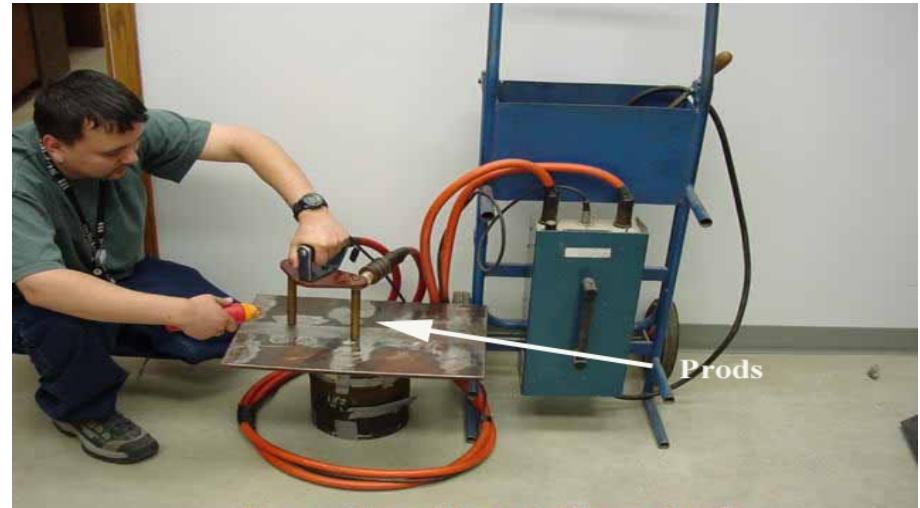
## Passage axial de courant

# Passage de courant électrique dans la pièce



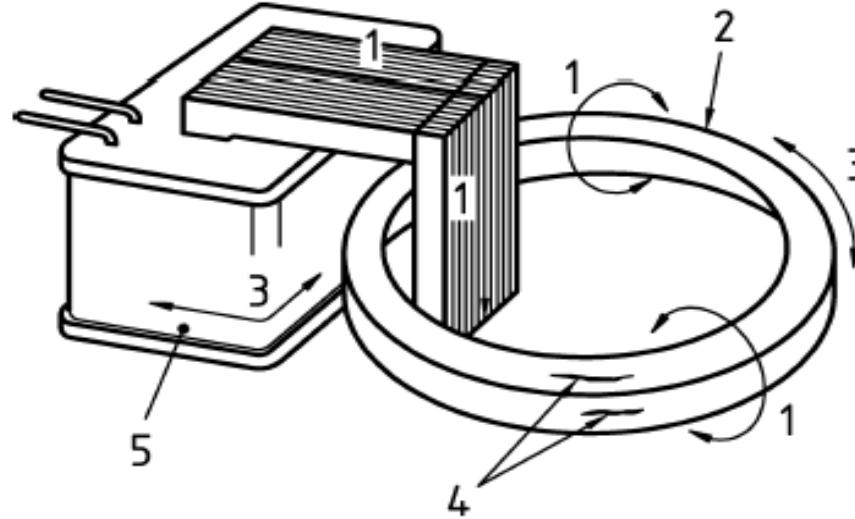
Légende

1 Discontinuité



## Passage de courant entre électrodes

# Passage de courant électrique dans la pièce



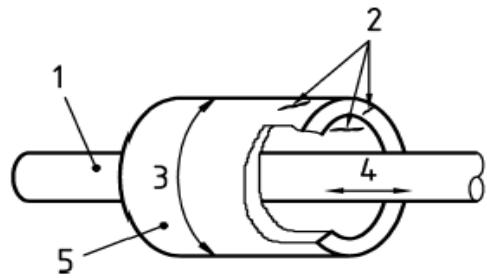
## Légende

- 1 Flux
- 2 Pièce
- 3 Courant
- 4 Discontinuités
- 5 Cellule primaire du transformateur

## Passage de courant induit

# Passage de champ magnétique dans la pièce

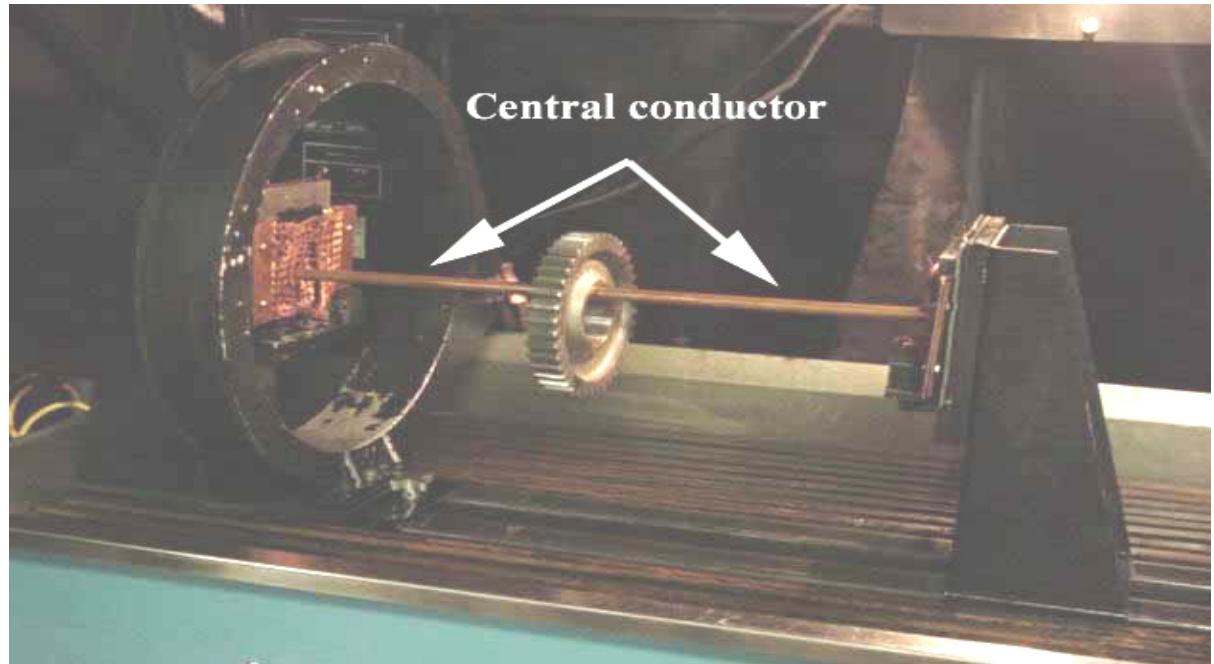
Figure 3 - Passage de courant entre électrodes



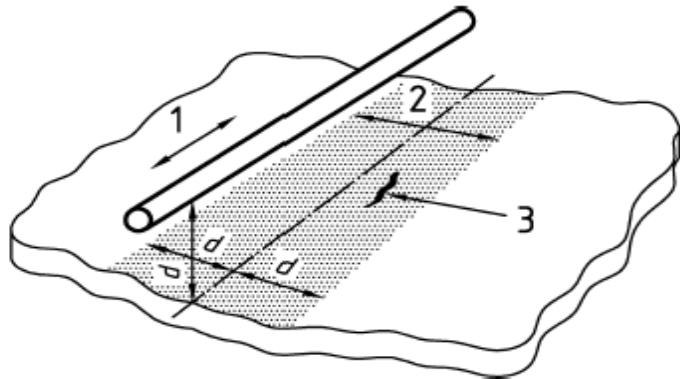
## Légende

- 1 Barre isolée
- 2 Discontinuités
- 3 Flux
- 4 Courant
- 5 Pièce

Conducteur central

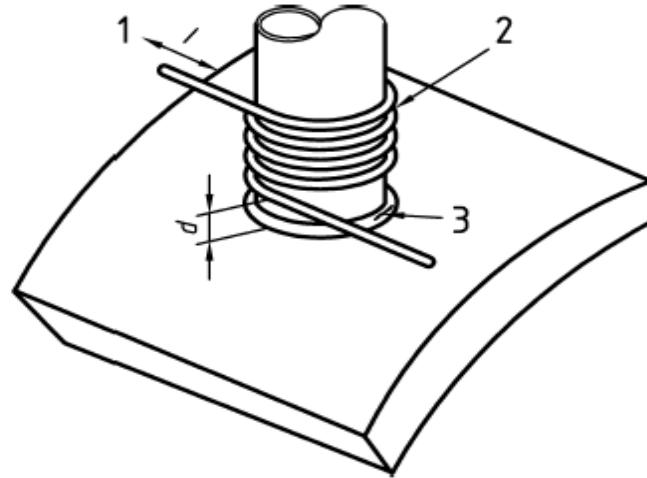


# Passage de champ magnétique dans la pièce



## Légende

- 1 Courant
- 2 Flux
- 3 Discontinuité

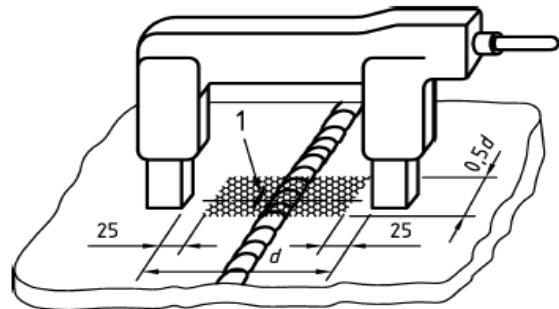


## Légende

- 1 Courant
- 2 N tours
- 3 Direction de la discontinuité

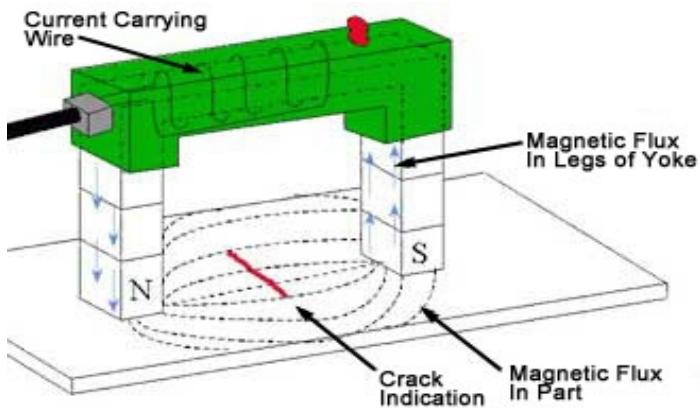
Conducteur adjacent ( câble ou bobine )

# Passage de champ magnétique dans la pièce

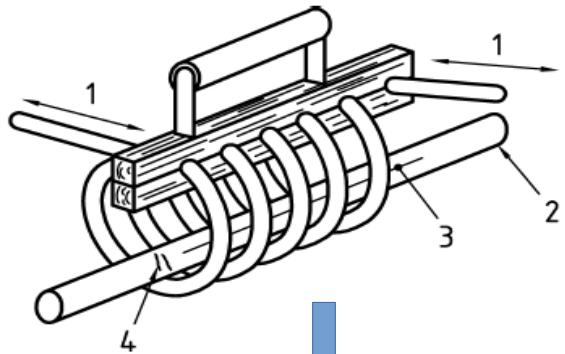


Légende

1 Discontinuité

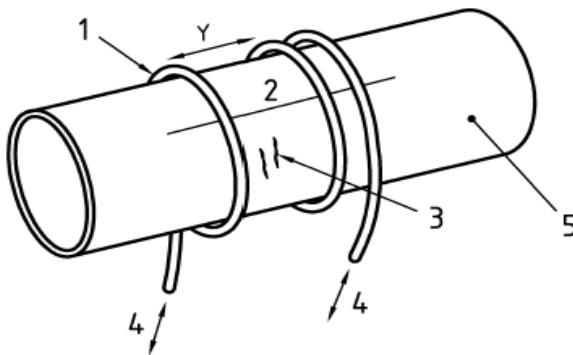


# Passage de champ magnétique dans la pièce



Légende

- 1 Courant
- 2 Pièce à contrôler
- 3 Flux
- 4 Discontinuité

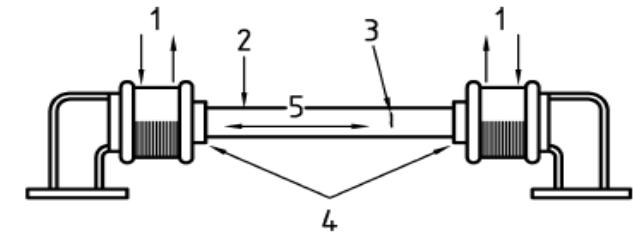


Légende

- 1 Câble isolé
- 2 Flux
- 3 Discontinuité
- 4 Courant
- 5 Pièce à contrôler

Bobine plate

Solénoïde

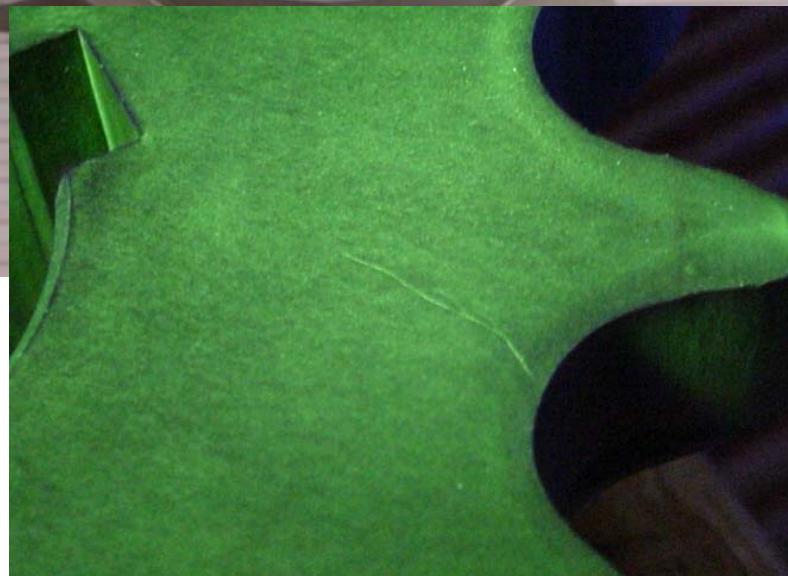
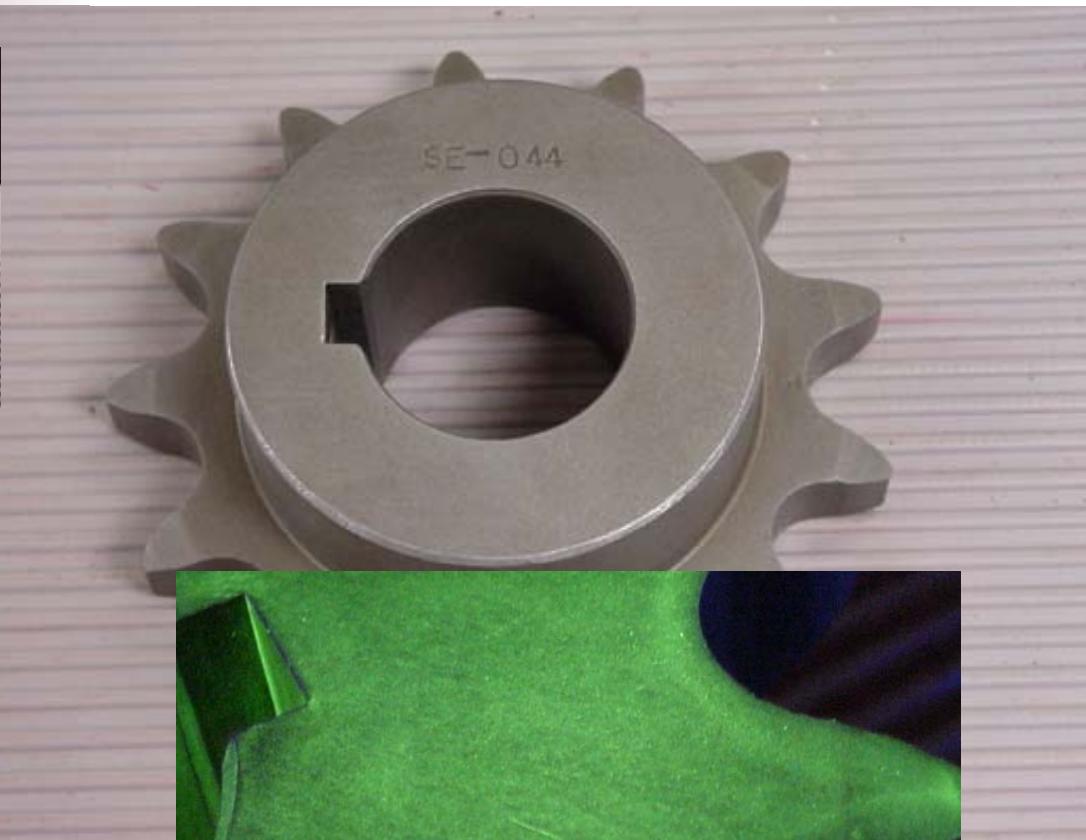


Légende

- 1 Courant
- 2 Pièce à contrôler
- 3 Discontinuité
- 4 Pièce polaire
- 5 Flux



# Détection de fissures par magnétoscopie



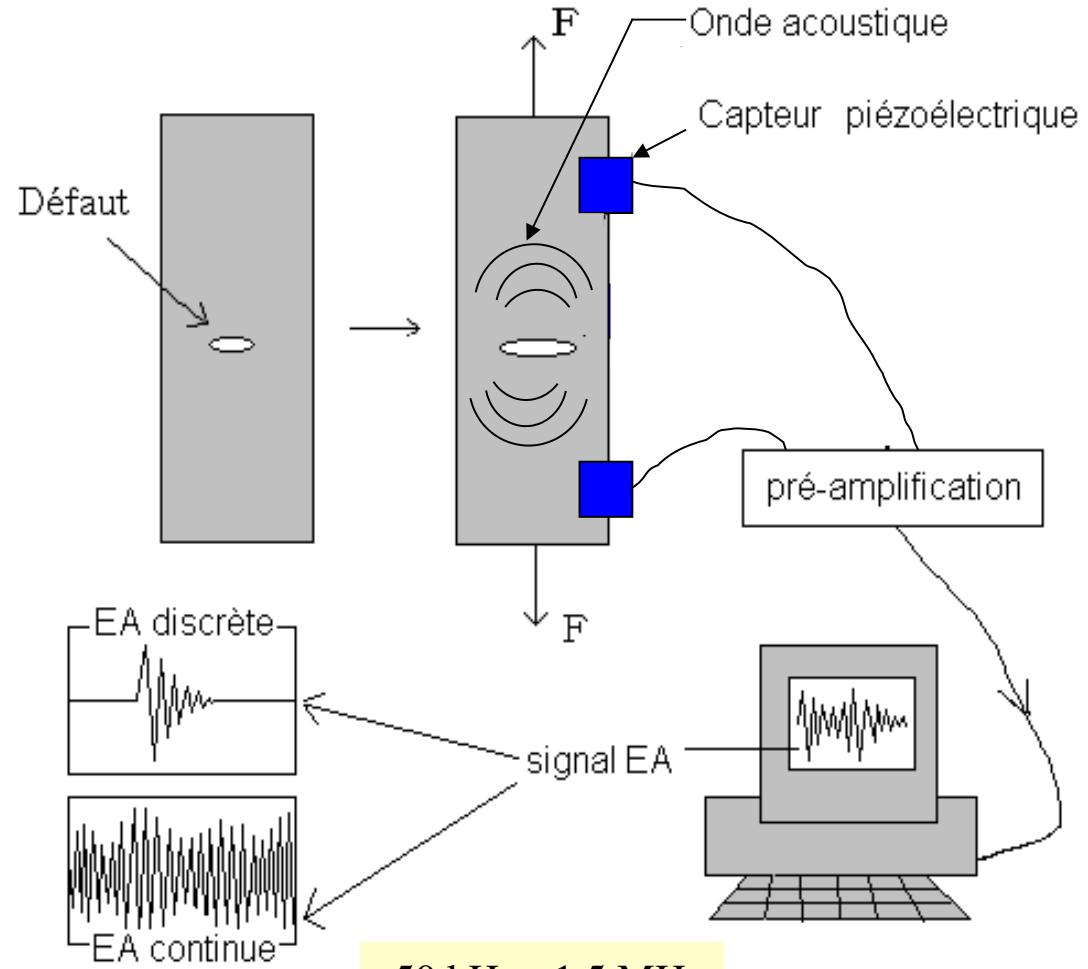
# Emission Acoustique

## Phénomène physique

matériau sous contrainte => libération d'énergie => création onde acoustique (US)

### Mécanismes sources d'EA

- Déformation plastique
- Transformation de phase
- Rupture d'inclusions
- Microfissuration
- Propagation des fissures
- Rupture des fibres
- Fissuration de la matrice
- Ruptures d'interfaces
- Délaminage
- Corrosion Caverneuse ou par piqûre
- Frottements
- Impacts mécaniques
- Fuites (liquide ou gaz)
- cavitation



50 kHz - 1.5 MHz

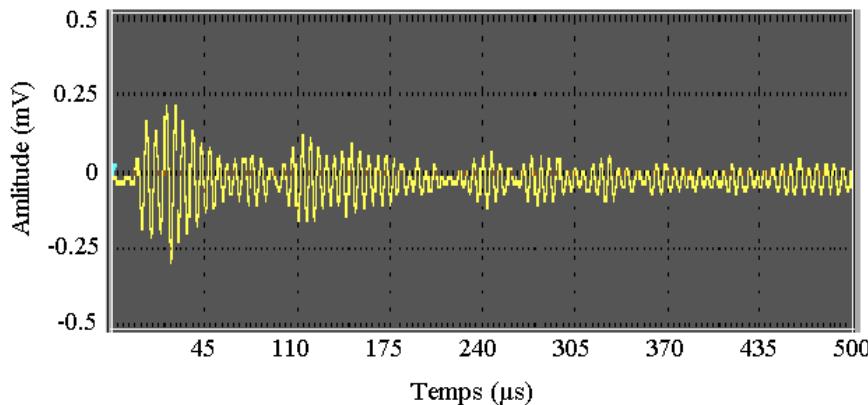
# Deux types d 'émission acoustique

Les sources sont très nombreuses  
dans le temps

Le signal résultant a l 'allure  
d 'un bruit

Phénomène quasi-stationnaire à  
l'échelle  
de la seconde

EA continue



Les sources sont peu nombreuses

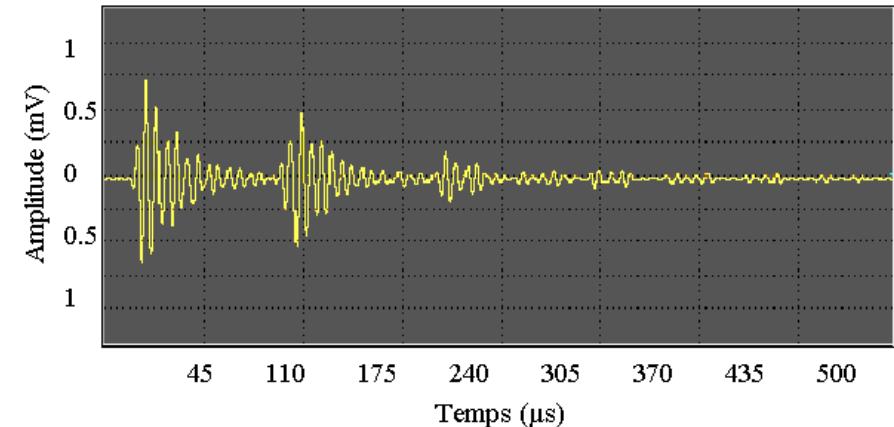
Libération d 'énergie importante  
et localisée dans le temps

Signal de type impulsionnel  
(capteur large bande)

Ondes sinusoïdales amorties  
(capteur résonnant)

EA par salves ou  
discrète

Principale forme d 'EA exploitée



# Deux types d'émission acoustique

## Avantages

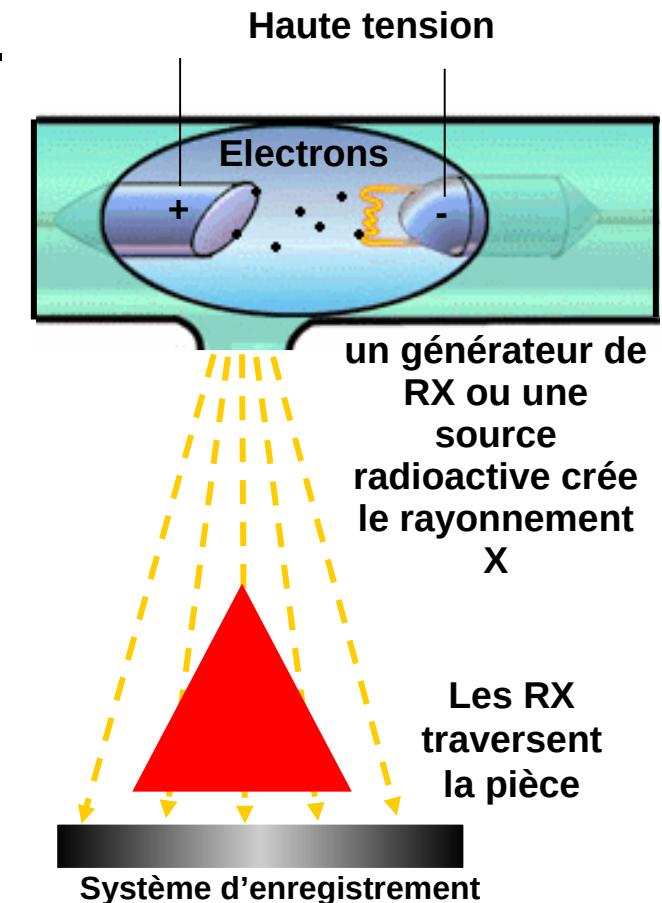
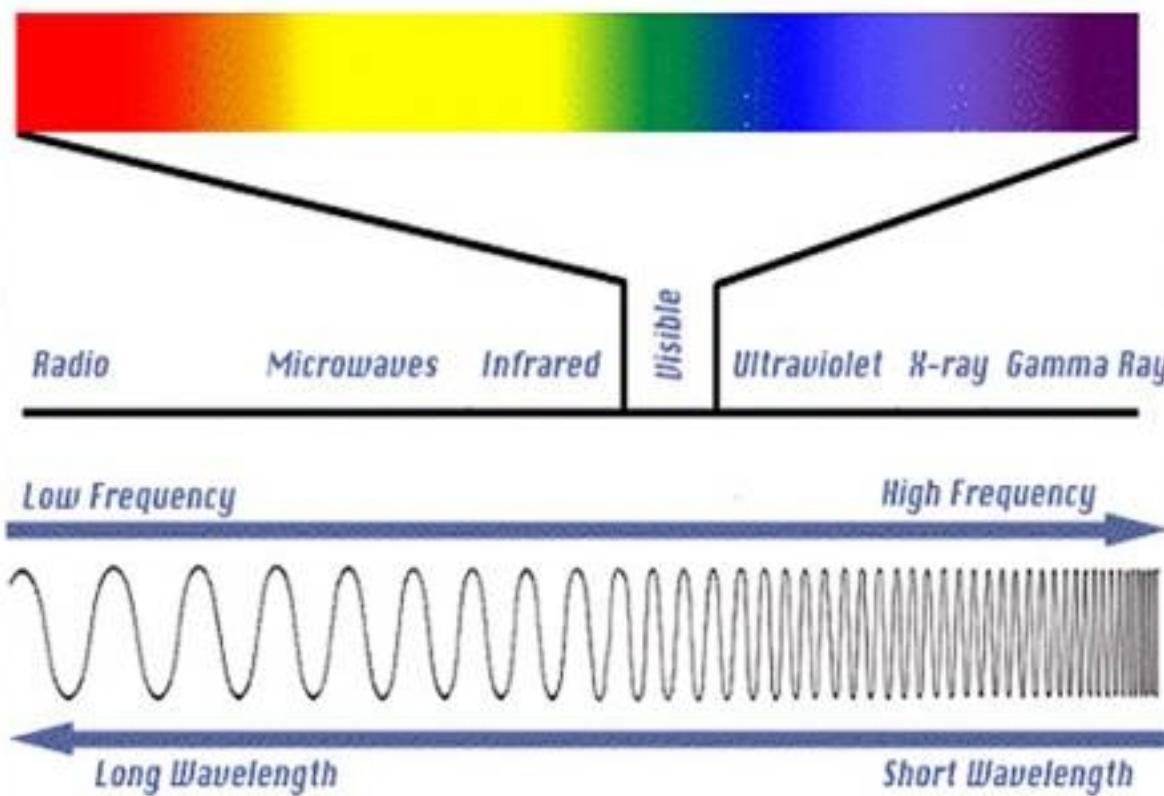
- Evaluation en temps réel
- Technique passive
- Suivi en continu
- Grande sensibilité
- Le contrôle global de la structure (**volumique**)
- La détection et localisation des défauts évolutifs (locale)**
- Le contrôle des structures en service
- Application des méthodes de reconnaissance de formes
- Le diagnostic de la sévérité de l'endommagement

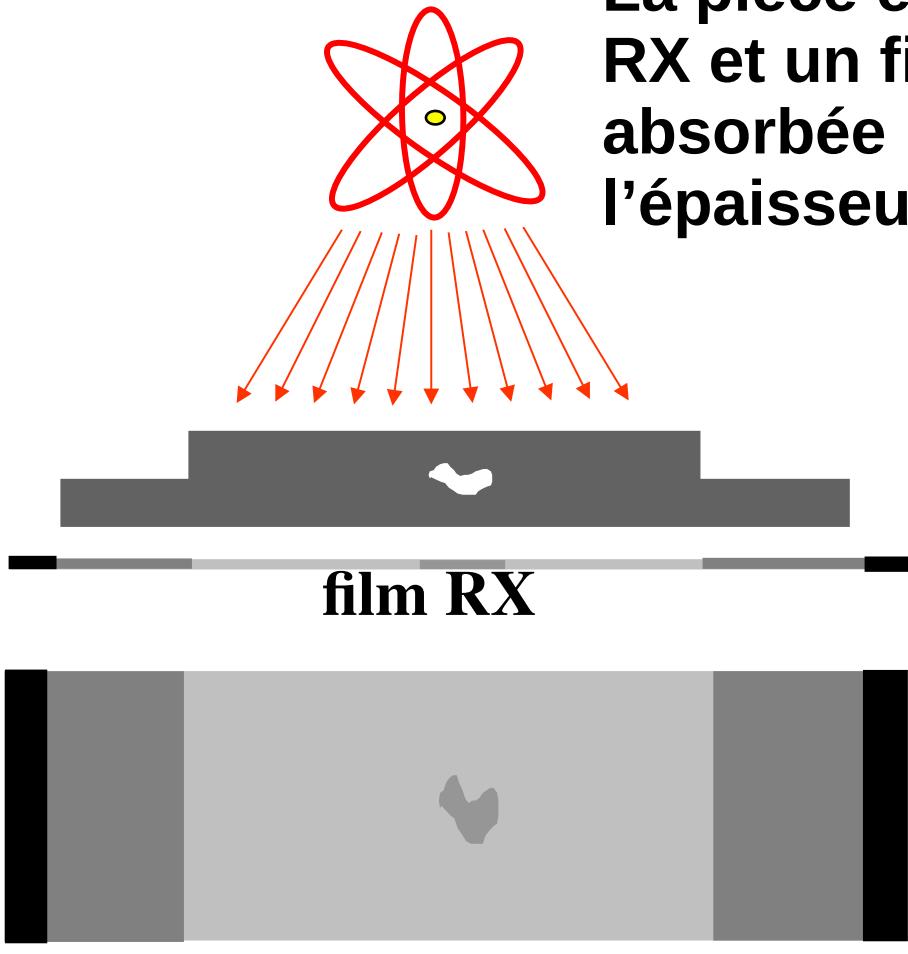
## Inconvénients

- Discrimination entre le bruit et le signal EA
- Nécessité d'une expérience
- Comportement du matériau doit être connu
- Corrélation quantitative limitée à l'expérience présente
- Défauts passifs non détectés**
- Solution difficilement généralisable

# Rayons X

Les radiations utilisées en radiographie sont des ondes électromagnétiques de beaucoup plus haute énergie (courtes longueurs d'ondes) que la lumière visible. Ces radiations sont produites par un générateur de RX ou par une source radioactive.





**La pièce est placée entre une source RX et un film. La quantité de radiation absorbée par la pièce augmente avec l'épaisseur et la densité de celle-ci**

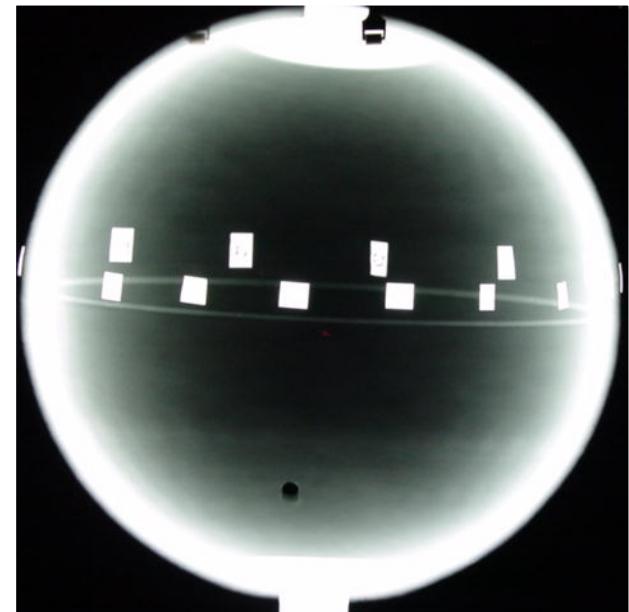
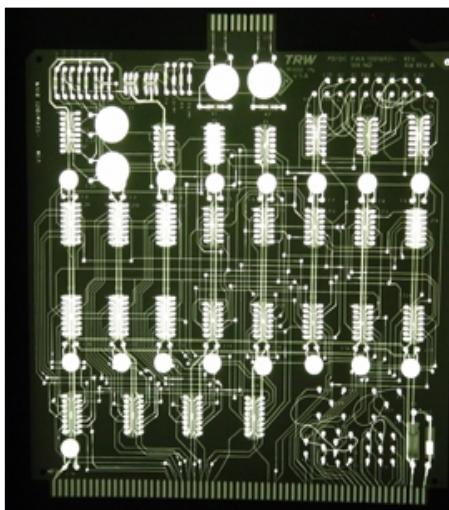
**L'opacité du film (densité) varie avec la quantité de radiation reçue à travers la pièce**

= faible exposition

= forte exposition

Vue de dessus du film développé

# Images RX



## Avantages :

- Tous matériaux
- Volumique
- automatisable

## Inconvénients :

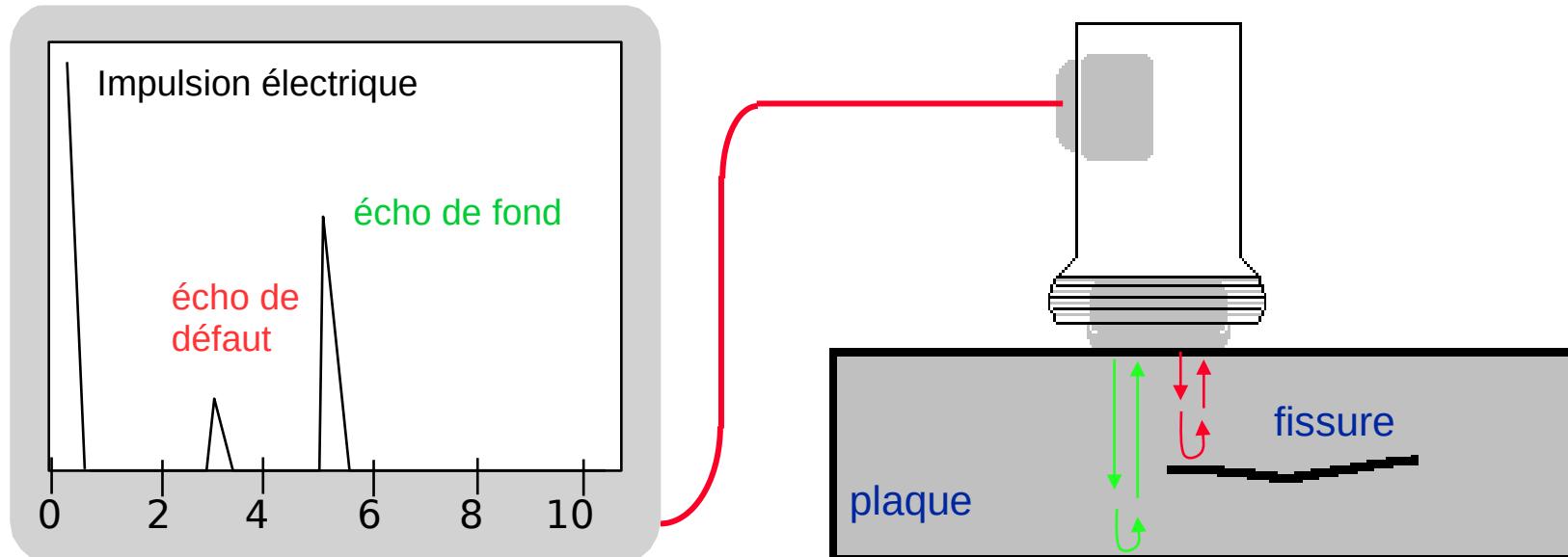
- Coût
- Interprétation difficile
- Dangereux

# Contrôle ultrasonore

## Mode échographique ou (Pulse-Echo)

Un faisceau d'ultrasons est injecté dans une pièce. Il est réfléchi par le fond et par les défauts.

Les échos réfléchis sont visualisés en fonction du temps et l'opérateur peut visualiser une coupe de la pièce mettant en évidence la profondeur d'éventuels défauts ayant réfléchi les US.



# Imagerie Ultrasonore Echographie

Des images en haute résolution sont obtenues en représentant l'amplitude ou le temps de vol d'échos US grâce à un système de balayage assisté par ordinateur

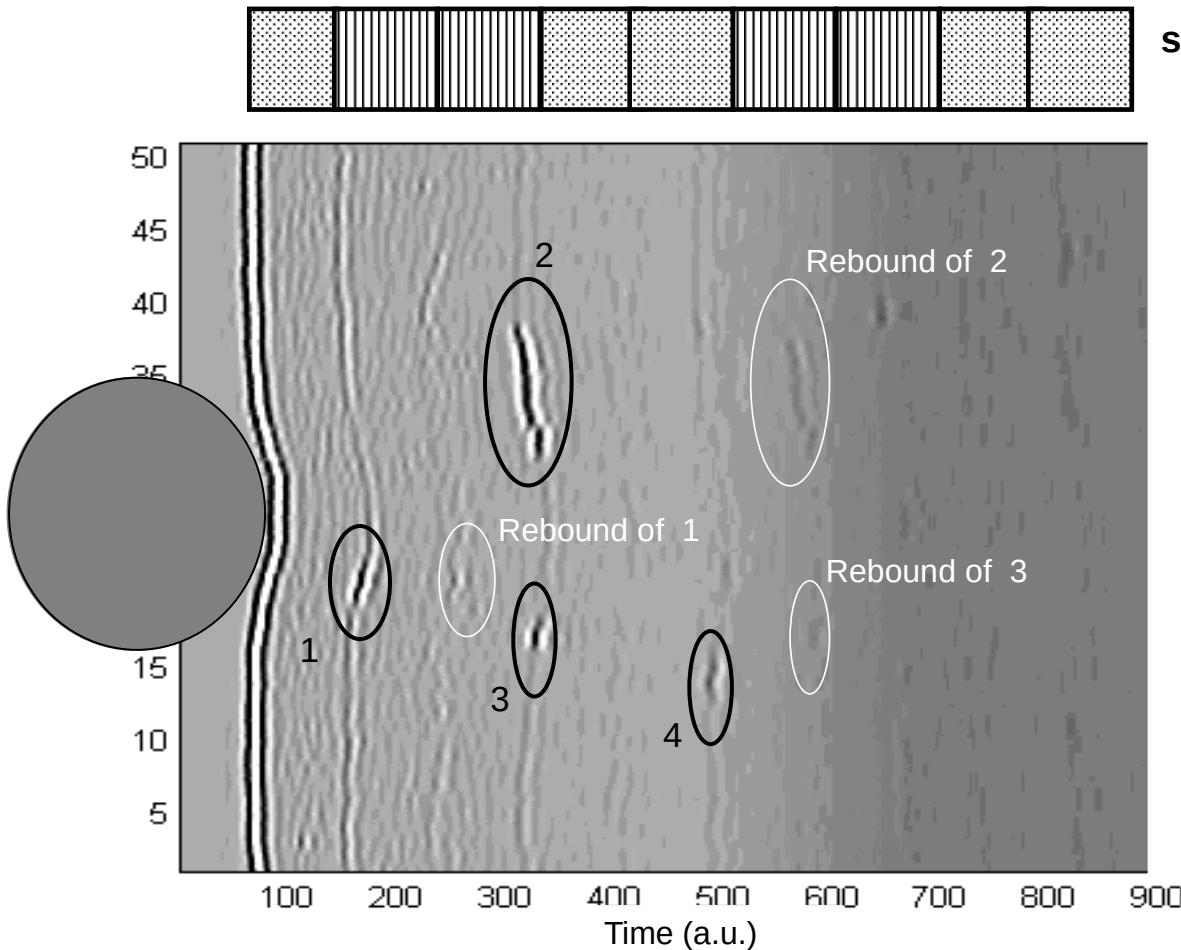


Image obtenue à l'aide de l'écho réfléchi par la surface d'une pièce de monnaie

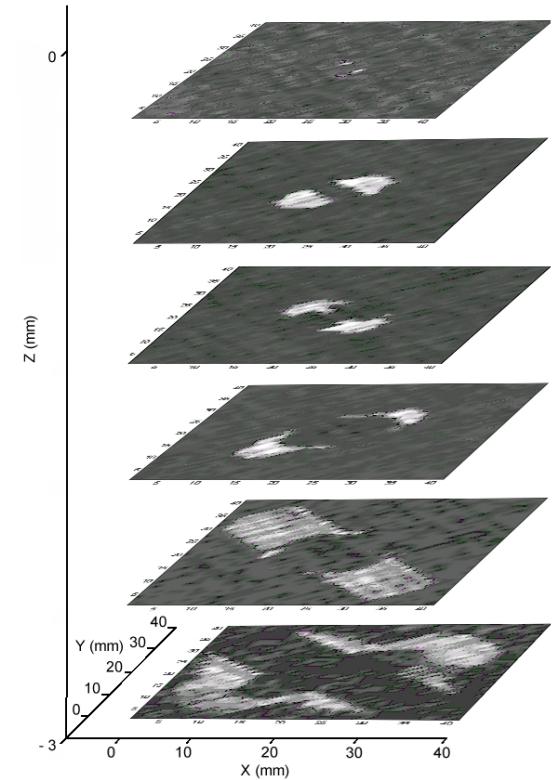


Image obtenue à l'aide de l'écho réfléchi par le côté pile d'une pièce de monnaie inspectée du côté face

# Imagerie Ultrasonore



sequence d'empilement



## Endommagement d'un composite (CFRP)

## Avantages :

- Tous matériaux
- Volumique
- Forte profondeur de pénétration
- Matériel portable
- Automatisable

## Inconvénients :

- Contact/couplant
- Interprétation difficile

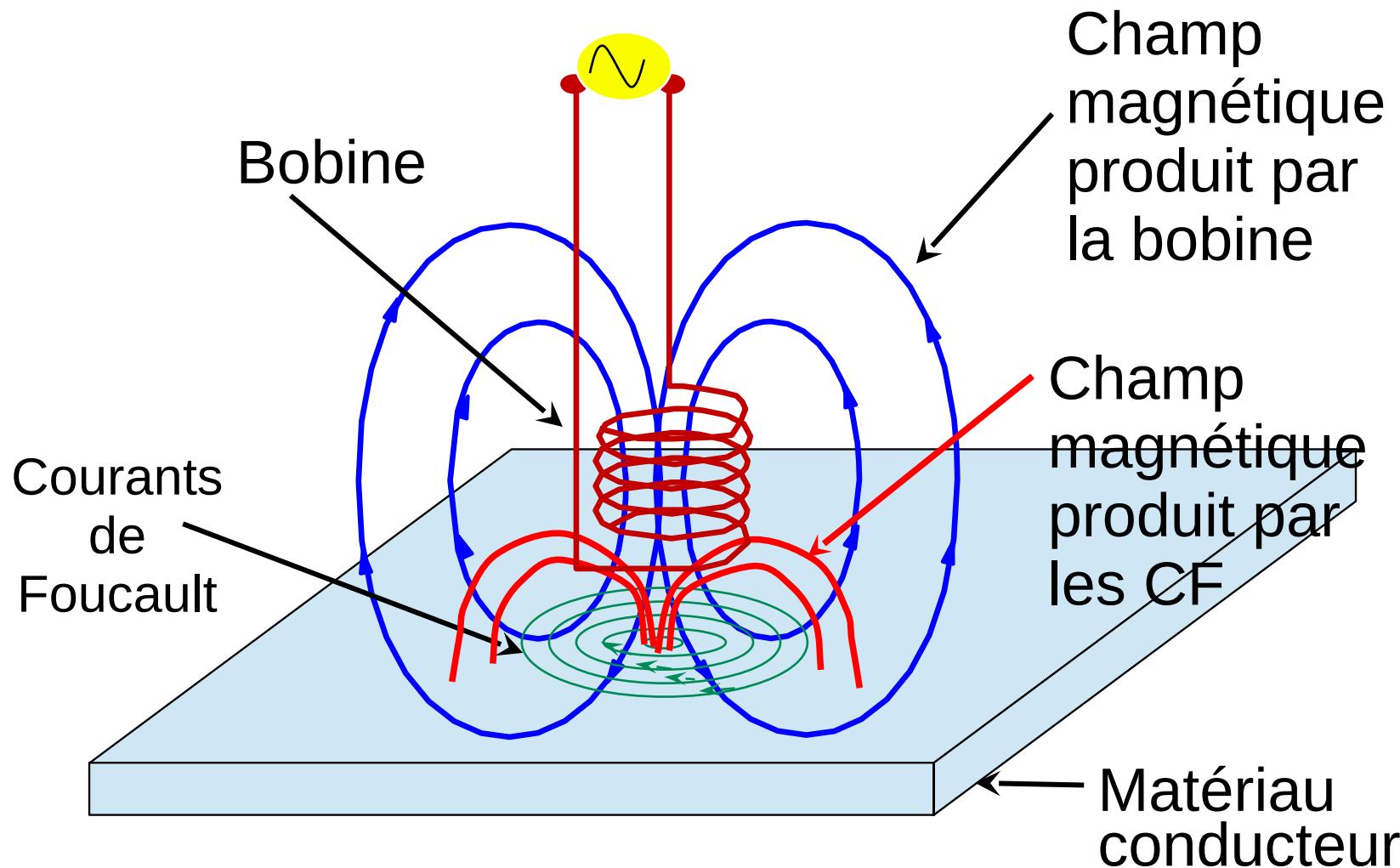
# Courants de Foucault (Eddy currents)

Les CF sont particulièrement bien adaptés pour la détection de fissures proches de la surface mais peuvent aussi être employés pour des mesures de conductivité et d'épaisseur de revêtements ou pour du tri de matériaux

Ici une petite sonde de surface balaye la surface d'une pièce dans le but d'y détecter une fissure.



# Courants de Foucault (Eddy currents)



# ET (Courants de Foucault)

---

**Avantages :**

- Rapide
- Grande sensibilité
- Matériel portable
- Automatisable

**Inconvénients :**

- Matériaux conducteurs électriques
- Surfacique

# Choix de la méthode d'END optimale

---

- Type de contrôle : détection, localisation, dimensionnement, caractérisation ?
- Nature des pièces : matériaux, dimensions, géométrie
- Types de défauts : taille, orientation, localisation
- Environnement : accessibilité, démontage possible, atmosphère hostile
- Automatisation possible
- Définition d'étalons de calibration
- Qualification de la méthode.
- Contrôlabilité des matériaux et structures
- ...

---

Ce document a été élaboré en français par  
Philippe GUY  
sur la base d'une présentation obtenue  
auprès de [www.ndt-ed.org](http://www.ndt-ed.org)

**Pour plus d'information sur le CND**

[www.cofrend.com](http://www.cofrend.com)  
[www.ndt-ed.org](http://www.ndt-ed.org)  
[www.asnt.org](http://www.asnt.org)