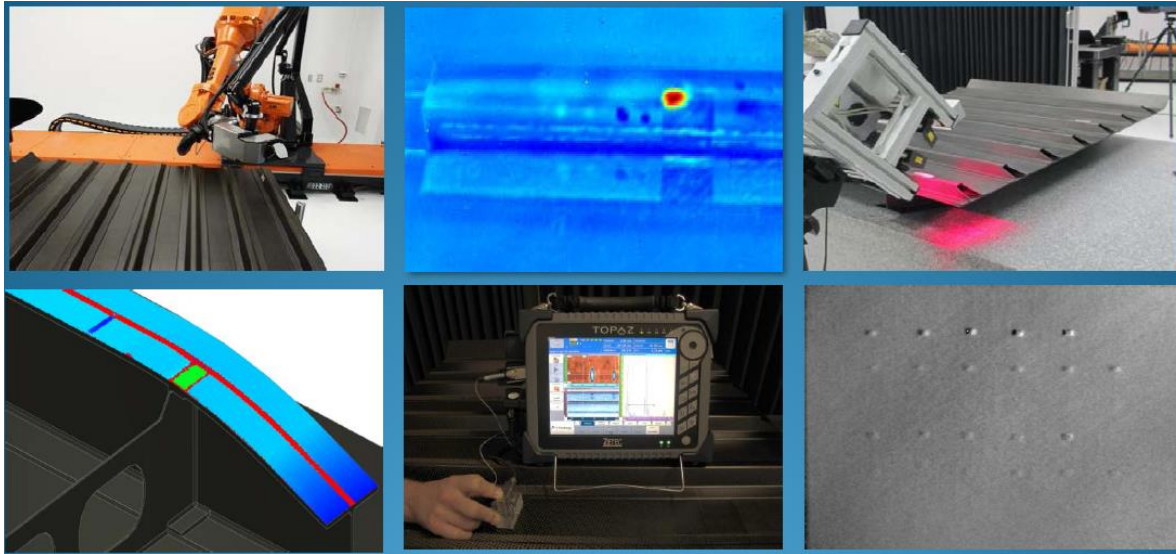


# Contrôle non destructif



- ✓ Donner les principes communs à tous les procédés de CND
- ✓ Dresser un panorama des principaux contrôles non destructifs

# À quoi sert le CND?

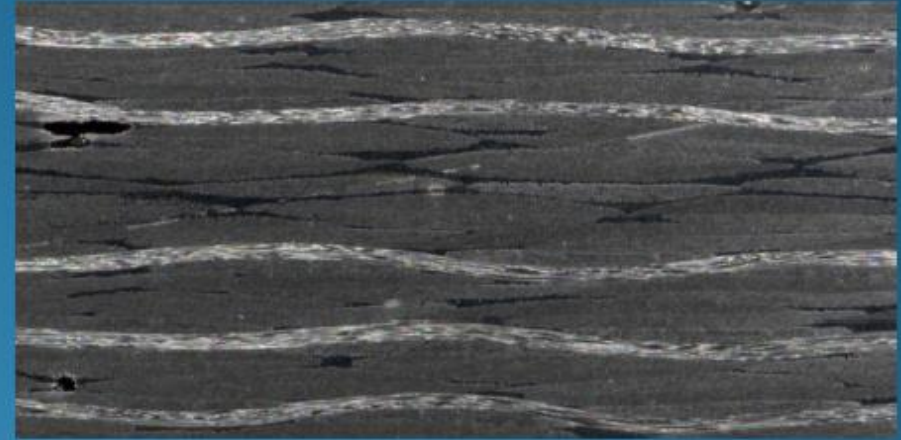
- ✓ Vol 243 Aloha Airlines, 28 avril 1988, Boeing 737-200
- ✓ Décompression en vol, large partie du fuselage arrachée. 1 mort, 65 blessés.
- ✓ Fissures de fatigues + décollement de joints (*lap-joint*) + corrosion
- ✓ Inspection non destructive recommandée par Boeing **non effectuée** par la compagnie aérienne.





✓ **En production : détecter les défauts induits lors de la fabrication**

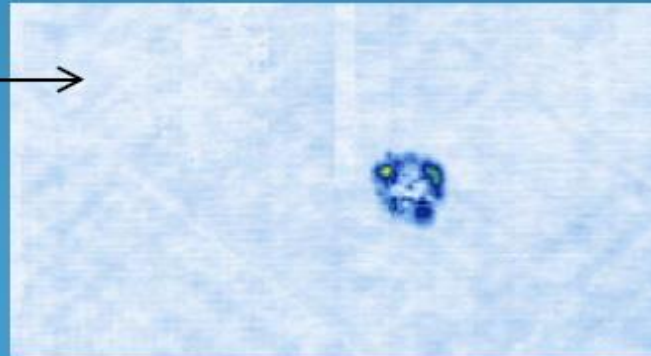
- inclusions et contaminations
- porosités, vides
- délaminations
- manques ou surplus de résine
- inhomogénéités
- mauvaise orientation de fibres, etc.



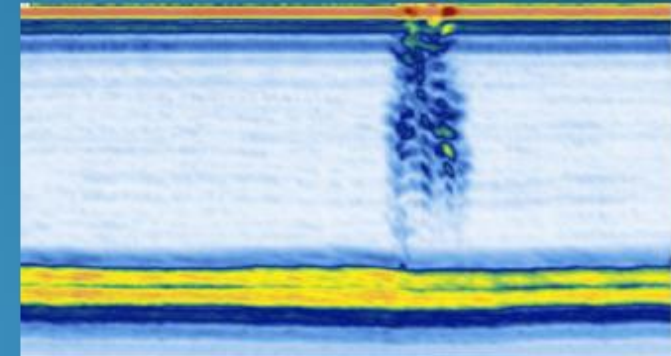
CFRP (taffetas) microscopie x50

✓ **En service : identifier les défauts induits en opération, guider les réparations**

- dommages dus aux impacts
- décollements de joints
- inclusions d'eau, etc.



C-scan (ultrasons)

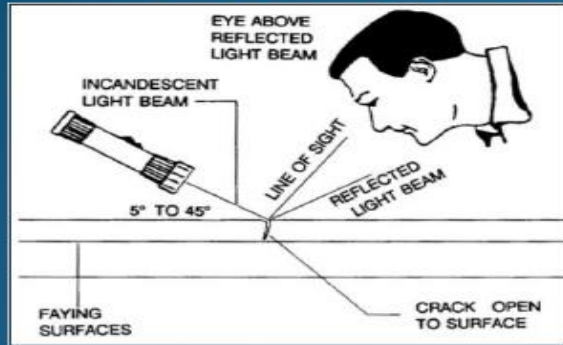


B-scan (ultrasons)

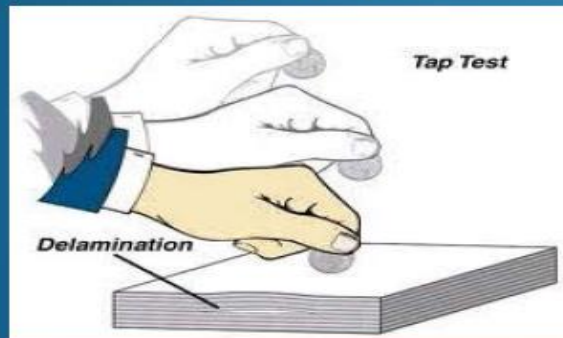
**Le CND est une étape critique en fabrication comme en service et une condition essentielle à la sécurité des biens et des personnes.**

# Quelques techniques traditionnelles...

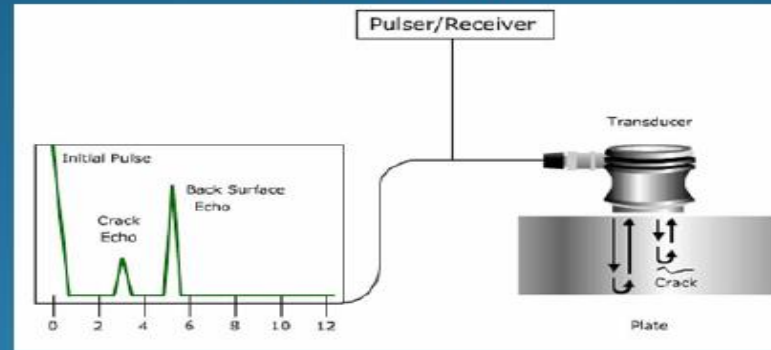
## ✓ Inspection visuelle



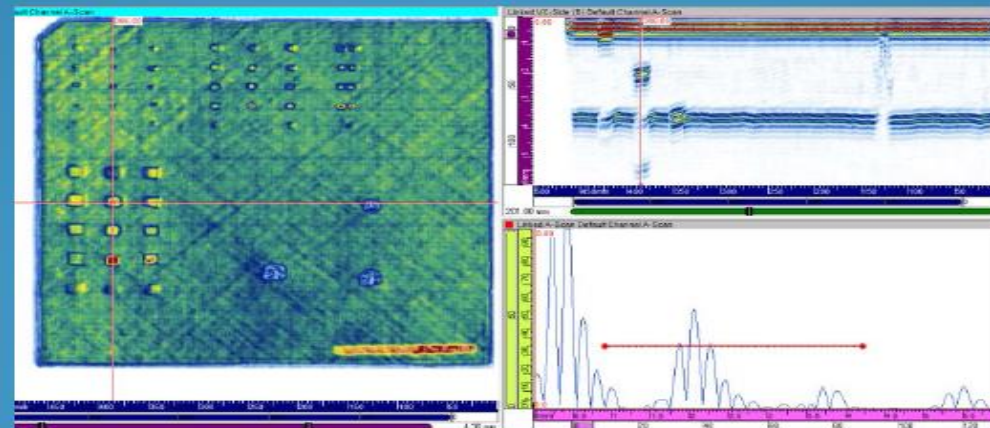
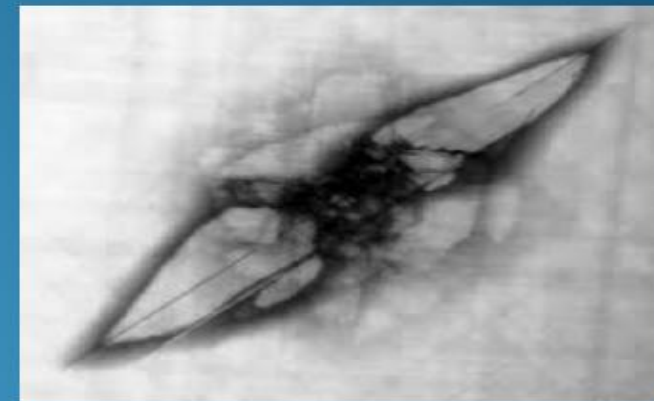
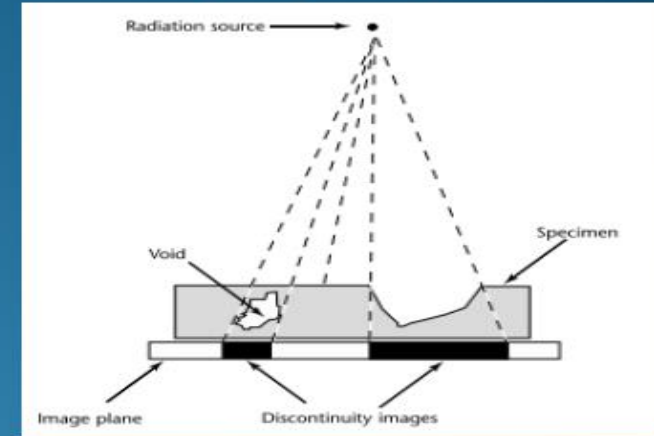
## ✓ « Tap-test »



## ✓ Ultrasons



## ✓ Radiographie X et tomographie (CT-scan)





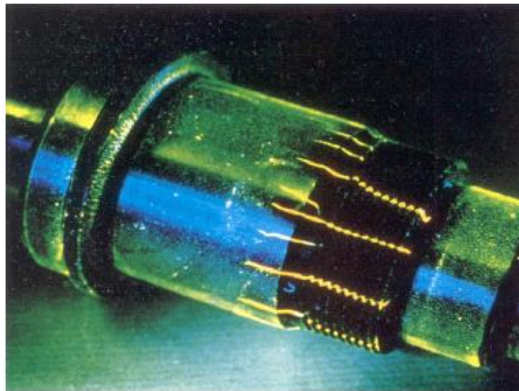
# Quelques techniques traditionnelles



visuel

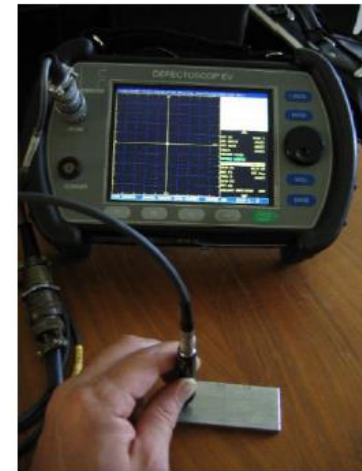


Ressuage



Magnétoscopique

Contrôle par Courants de Foucault



# Émergence d'autres techniques

*Thermographie IR*

*Émission acoustique*

*Laser Ultrasons*

*Phased-Arrays*

*Tomographie*

...

# Classification des méthodes de CND

## Méthodes de surface

- ✓ Inspection visuelle, endoscopie
- ✓ Ressuage
- ✓ Magnétoscopie
- ✓ Courants de Foucault (Conventionnels ou multiéléments)
- ✓ Thermographie infrarouge
- ✓ Shearographie
- ✓ ...

## Méthodes globales et volumiques

- ✓ Rayons X (argentique, numérique, tomographique)
- ✓ Ultrasons (Conventionnels ou multiéléments)
- ✓ Laser ultrasons
- ✓ Terahertz
- ✓ Émission acoustique
- ✓ Ondes guidées
- ✓ ...

# Principe général du CND

**EXCITATION**

Onde électromagnétique, vibration, champ magnétique, liquide pénétrant, ...

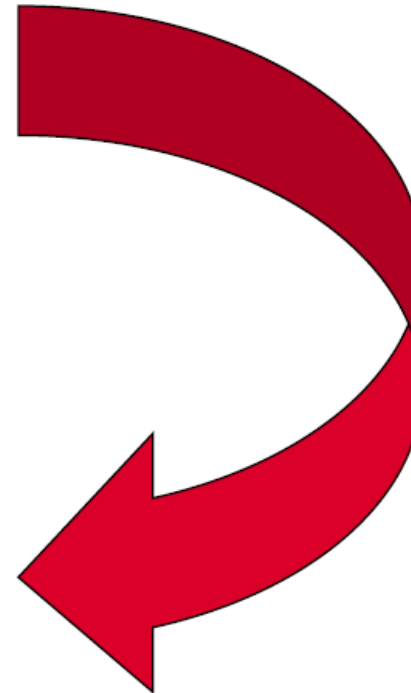
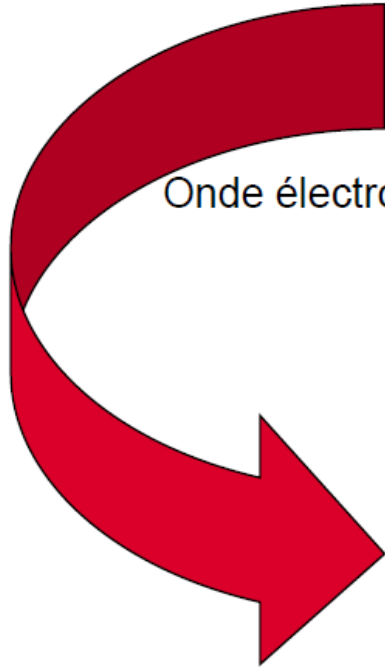
**PERTURBATION**

L'anomalie contenue dans la pièce

**REVELATION**

Œil, capteur, système d'imagerie, ...

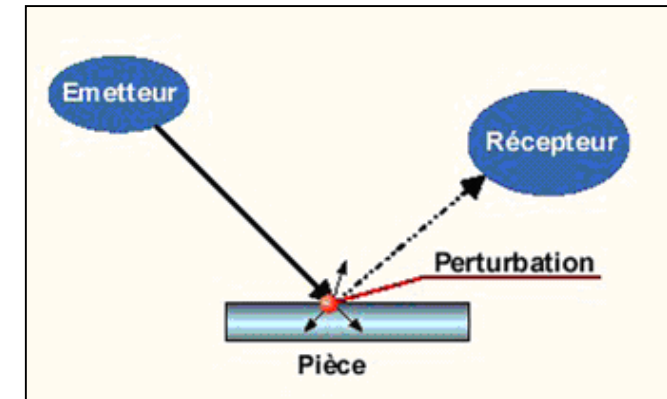
*méthode indirecte*





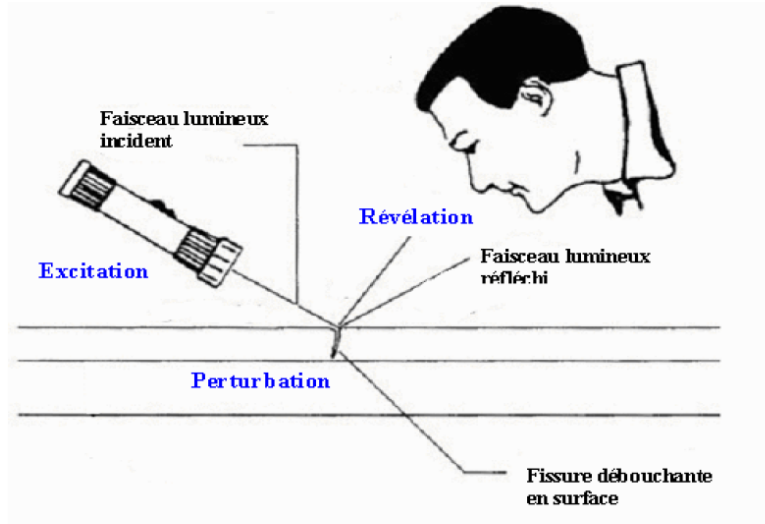
# Principaux types de CND

PROCEDE	EMETTEUR	RECEPTEUR
Examen visuel	Rayonnement visible. Source de lumière blanche ou monochromatique	Oeil et aides optiques tels que loupes, binoculaire, endoscope, microscope
Ressuage	Liquide d'imprégnation conjugué à un rayonnement visible ou ultraviolet	Fines particules absorbant le liquide et oeil avec aides optiques
Magnétoscopie	Champ magnétique conjugué à un rayonnement ultraviolet	Fines particules magnétiques piégées par le champ perturbé et oeil avec aides optiques
Courants induits	Champ magnétique basse ou moyenne fréquence	Bobine ou capteur dont l'impédance varie en fonction du champ perturbé
Ultrasons	Vibration mécanique de moyenne fréquence engendrée par un transducteur	Transducteur convertissant l'énergie mécanique en signal électrique
Rayons ionisants	Rayonnement électromagnétique	Film ou système de conversion du rayonnement
Thermographie	Rayonnement électromagnétique de type infrarouge ou source de chaleur	Caméra infrarouge et moniteur ou laque thermosensible
Emission acoustique	Contrainte mécanique ou bruit acoustique	Transducteur convertissant l'énergie mécanique en signal électrique



# Contrôle visuel

Le contrôle visuel existe depuis... que l'homme a des yeux



## ***Aides optiques à la vision***

- ✓ *Loupes et verres grossissants*
- ✓ *Microscopes*
- ✓ *Appareils photos*
- ✓ *Endoscopes*
- ✓ *Stroboscopes*
- ✓ *TV & imagerie*
- ✓ *Traitement d'images*
- ✓ *Appareillages à balayage par laser*



# Ressuage...

## Principe

---

### 1. L'EXCITATION

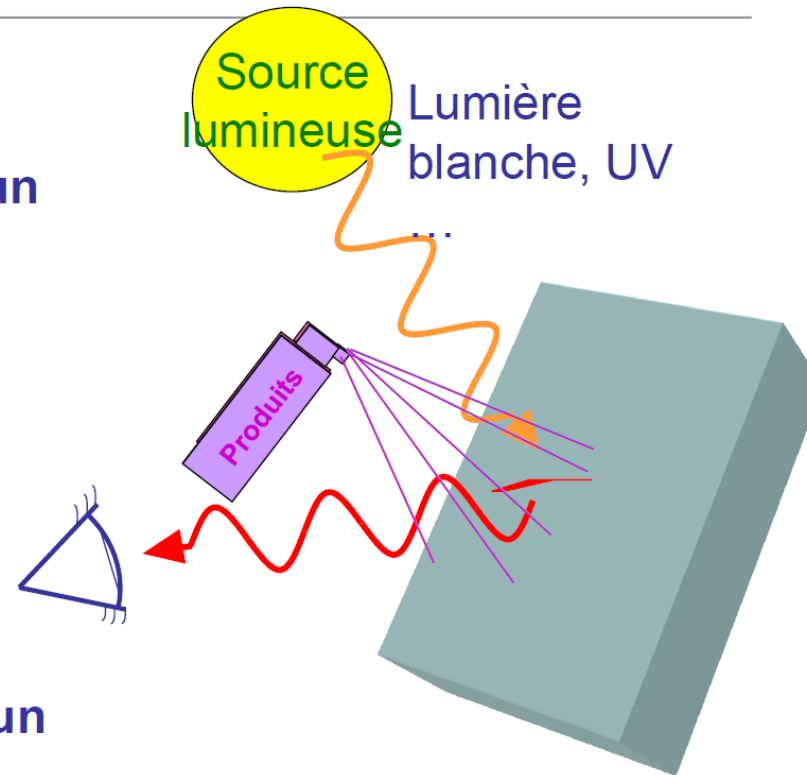
Application d'un  
pénétrant

### 2. LA PERTURBATION

Défaut de la  
surface

### 3. LA REVELATION

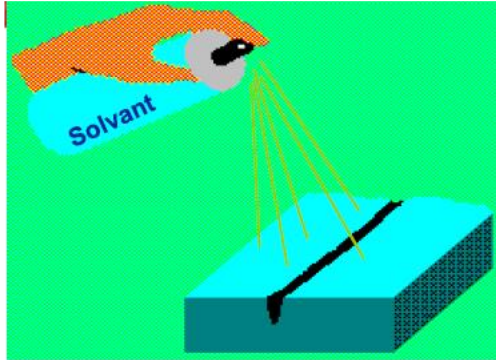
Application d'un  
révélateur  
Eclairage



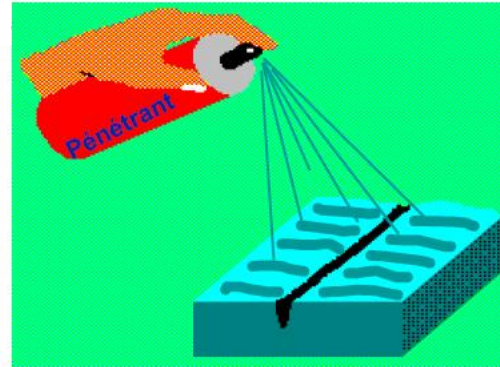


# Ressuage...

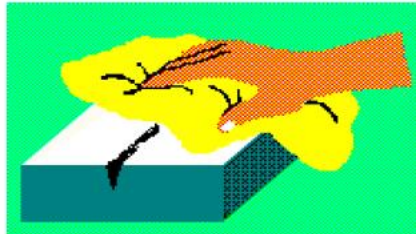
## Les étapes



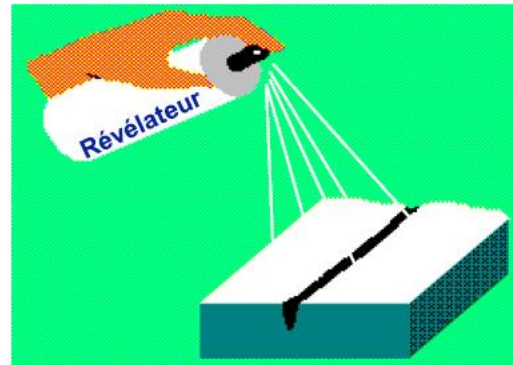
**1** Nettoyage préalable



**2** Application du pénétrant et imprégnation



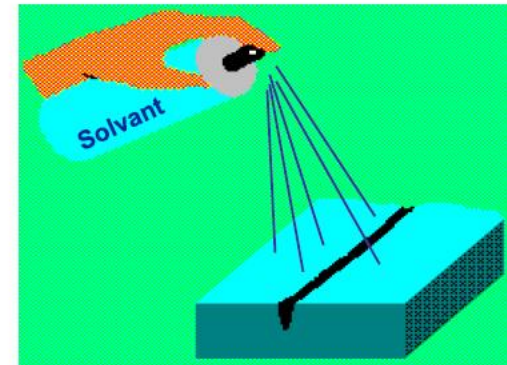
**3** Elimination du pénétrant en excès



**4** Application du révélateur



**5** Examen



**6** Nettoyage final

# Ressuage...



## Choix du révélateur

---

### Deux familles de révélateur:

#### - **sec (poudre) ou liquide non aqueux**

- surface rugueuse
- pièces de formes complexes : filetage, rainure...
- pièces de grandes dimensions

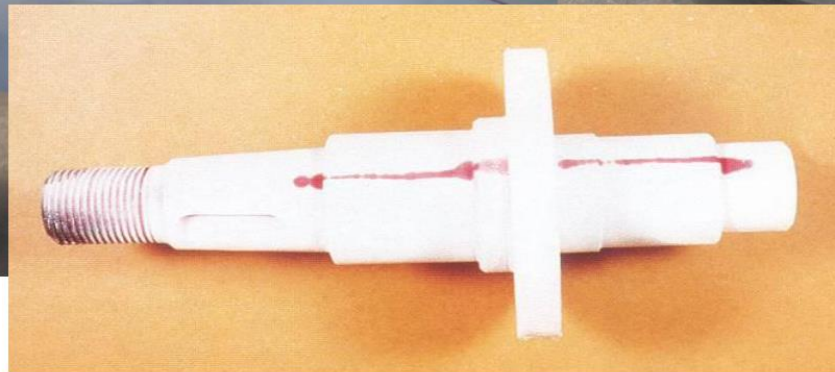
#### - **humide : liquide à support aqueux ou hydrosoluble**

- surface polie et lisse
- grand nombre de petites pièces
- pour la recherche de discontinuités larges et peu profondes

## CONDITIONS D'ECLAIRAGE

# Ressuage...

## Exemples





# Ressuage

## Avantages

- ✓ Simplicité de mise en œuvre
- ✓ Prix modique dans une application manuelle
- ✓ Localisation des défauts de surface et appréciation de leur longueur
- ✓ Possibilité d'automatisation

## Inconvénients

- ✓ Pas de détection de défauts internes
- ✓ Pas d'appréciation de la profondeur des défauts
- ✓ Interprétation délicate
- ✓ Non utilisables sur les matériaux poreux

# Magnétoscopie...

## Principe

---

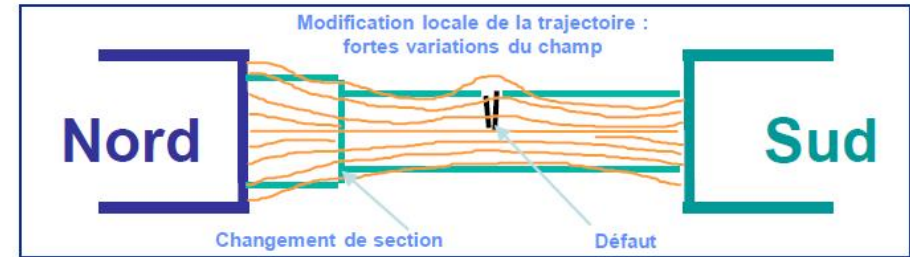
### 1. L'EXCITATION

Champ  
magnétique



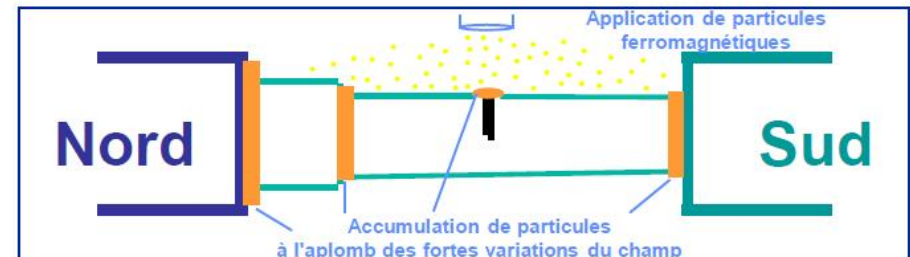
### 2. LA PERTURBATION

Défaut de la  
surface



### 3. LA REVELATION

Accumulation de  
particules  
magnétiques  
Eclairage



# Magnétoscopie...



## Choix du révélateur

---

### DEUX GRANDES FAMILLES :

#### \* REVELATEURS SECS :

- POUDRE (NOIRE, ROUGE, GRISE, BLEUE),

#### \* REVELATEURS LIQUIDES (support pétrolier/aqueux) :

- COLORES (NOIR SUR FOND BLANC, JAUNE, ...)

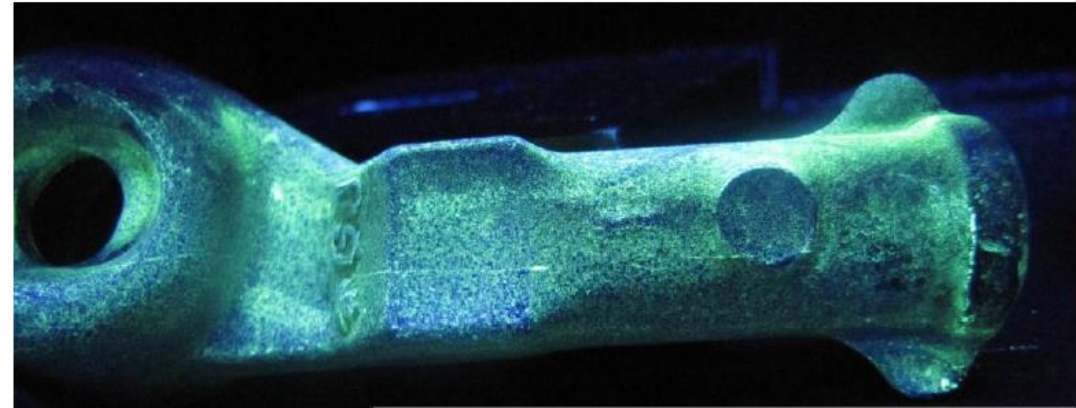
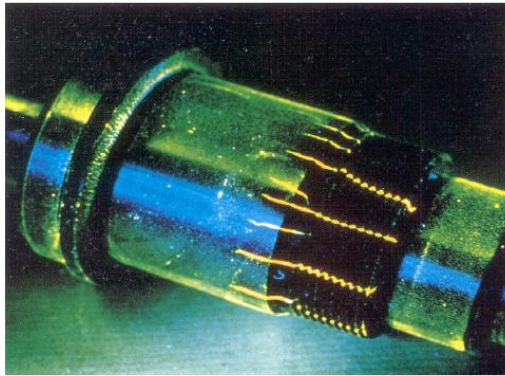
- FLUORESCENTS

### CONDITIONS D'ECLAIRAGE



# Magnétoscopie...

## Exemples



# Magnétoscopie

## Avantages

- ✓ Simplicité de mise en œuvre
- ✓ Méthode rapide
- ✓ Localisation des défauts de surface ou légèrement sous-jacents et appréciation de leur longueur
- ✓ Possibilité d'automatisation

## Inconvénients

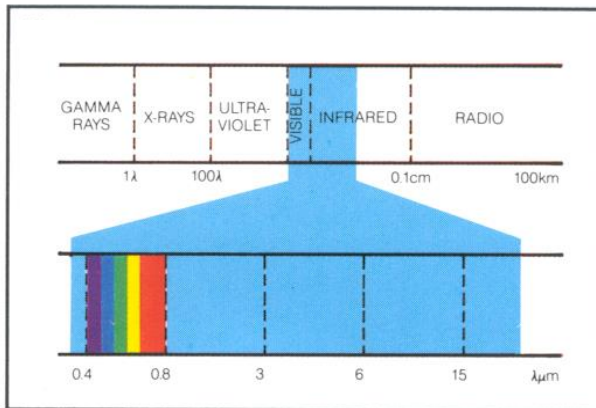
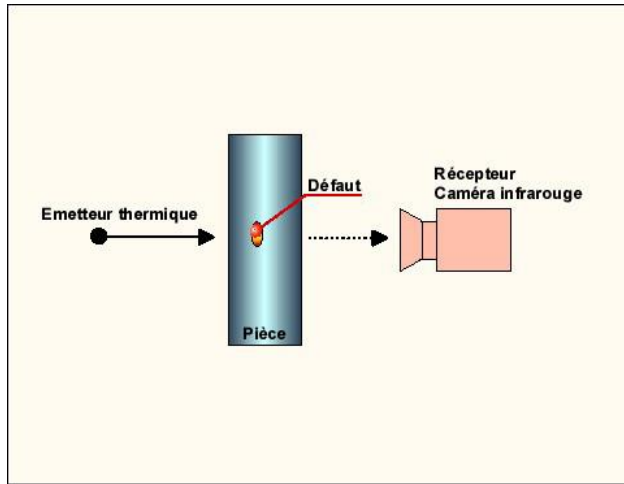
- ✓ Pas de détection de défauts internes
- ✓ Pas d'appréciation de la profondeur des défauts
- ✓ Interprétation délicate
- ✓ Utilisables que sur les matériaux ferromagnétiques
- ✓ Sensibilité fonction de l'orientation du défaut par rapport à la direction générale des lignes d'induction
- ✓ Nécessité de désaimantation des pièces après contrôle

# Choix entre ressuage et magnétoscopie

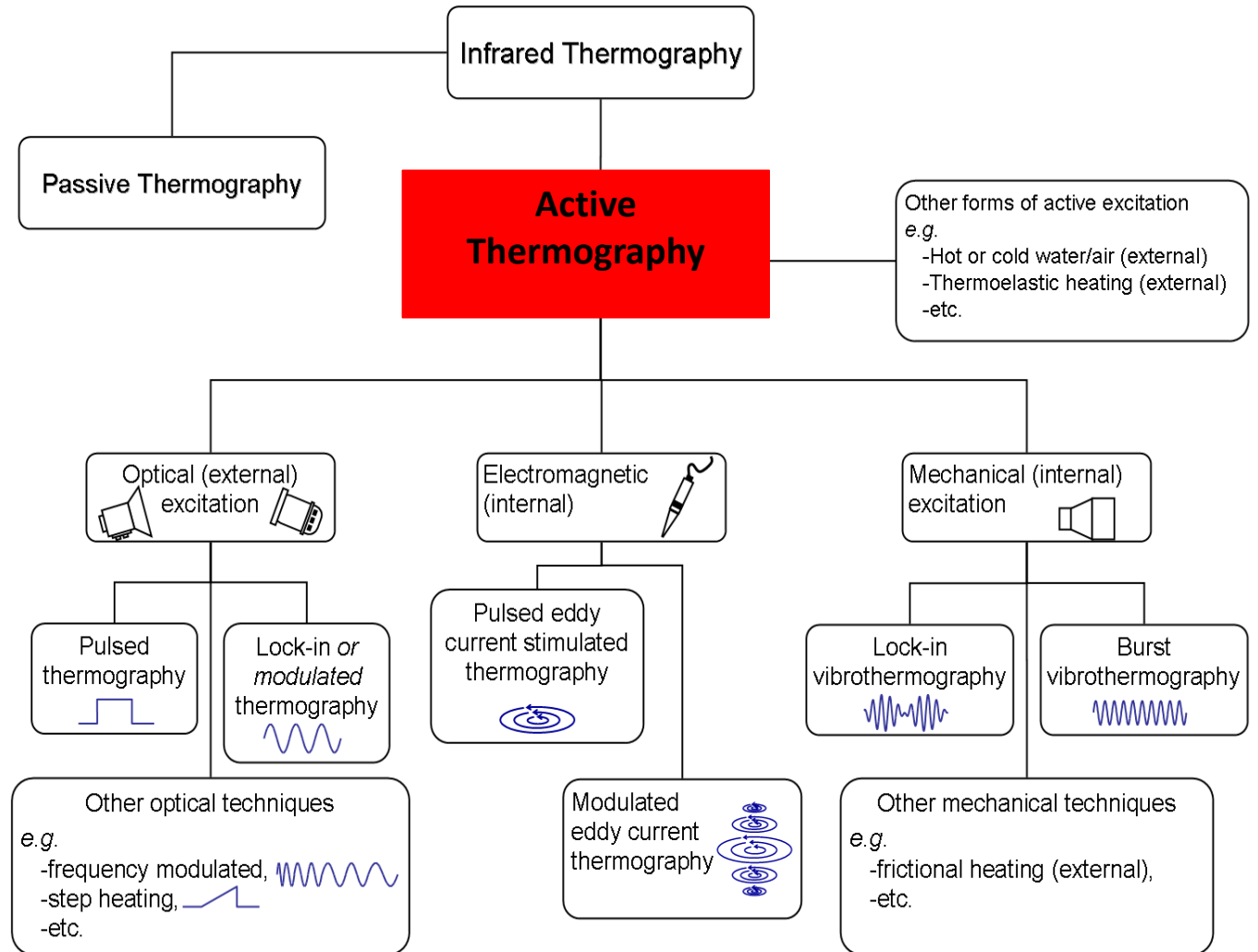
- 
- **Sensibilité, défauts recherchés**
    - Très fins  $\Rightarrow$  PT
    - Sous-cutanés  $\Rightarrow$  MT
  - **Nature du matériau**
    - PT uniquement Non poreux
    - MT uniquement Ferromagnétique
  - **Dimension des pièces** → Grande dimension  $\Rightarrow$  PT
  - **Géométrie des pièces** → Géométrie complexe  $\Rightarrow$  PT
  - **Etat de surface** → Forte rugosité, porosité  $\Rightarrow$  MT

# Thermographie

## Principe



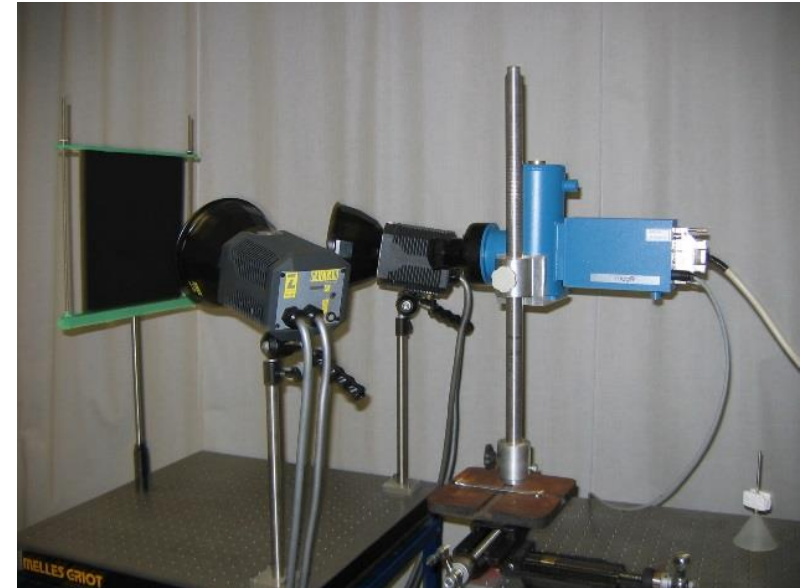
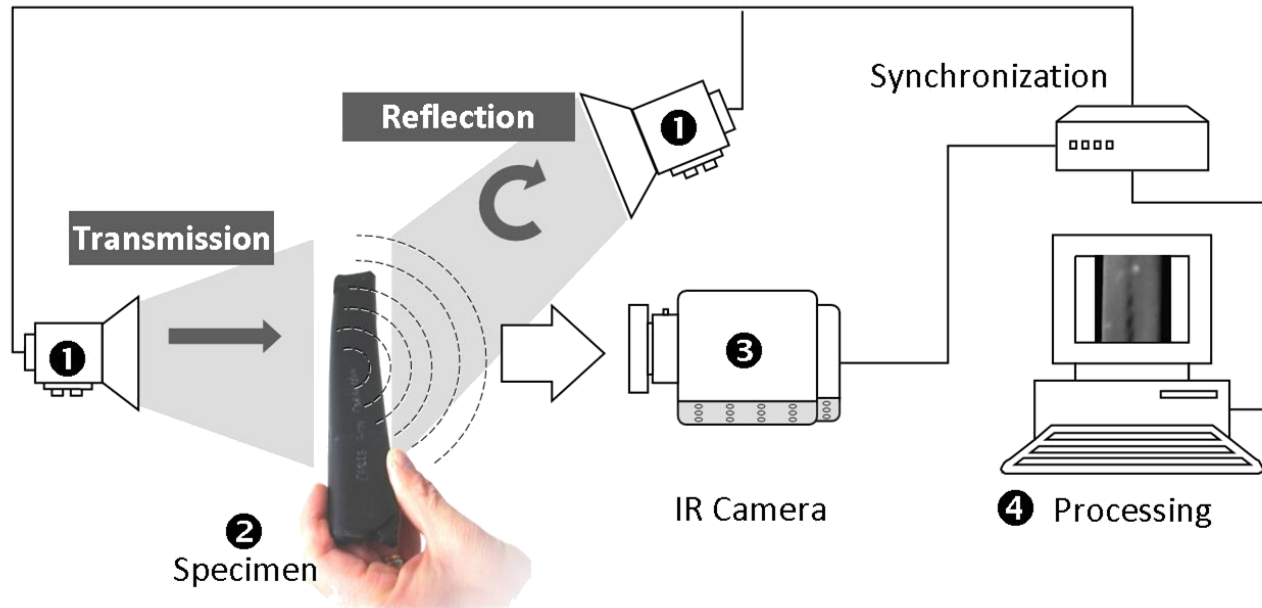
Spectre du rayonnement thermique





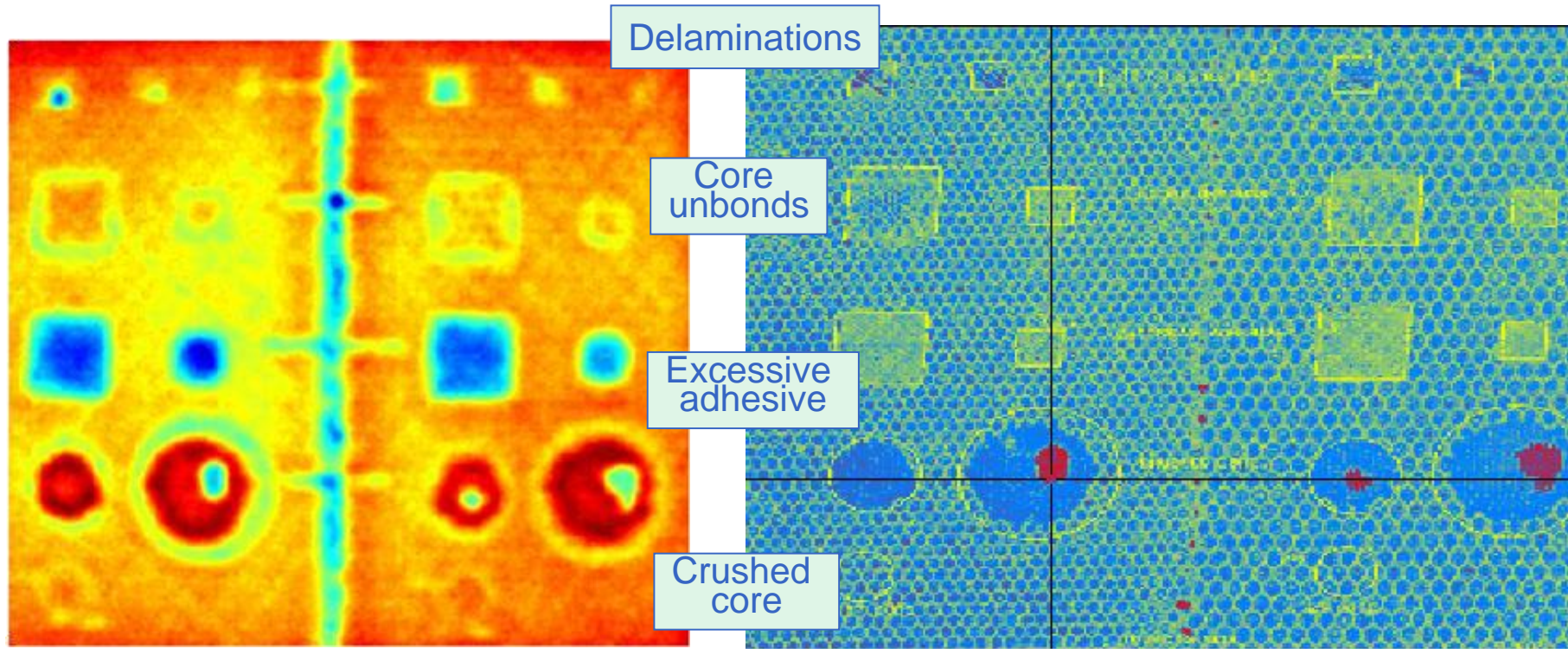
# Thermographie

## Thermographie impulsionnelle



# Thermographie

## Thermographie impulsionnelle / Exemple

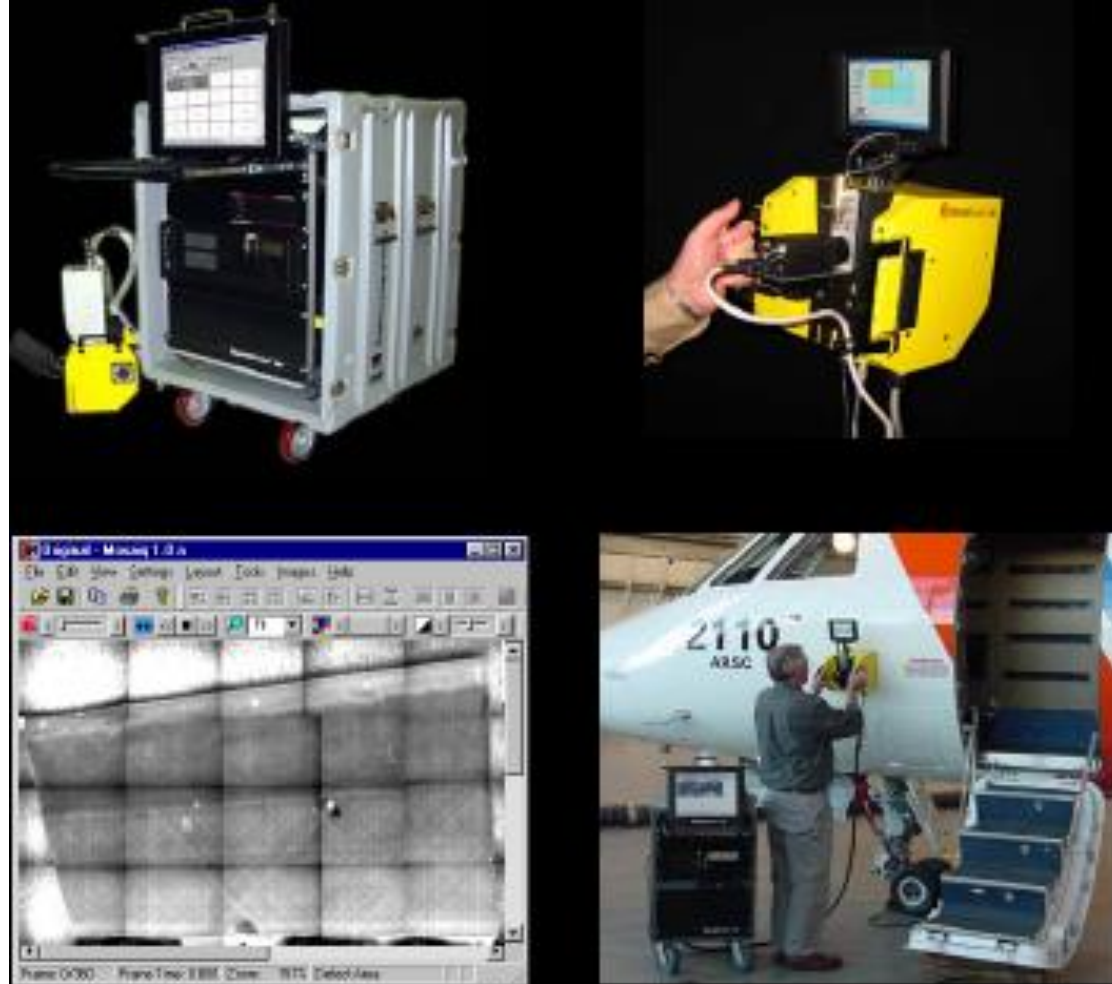


Structure  
NIDA

# Thermographie

## Thermographie impulsionnelle / Systèmes

Echotherm



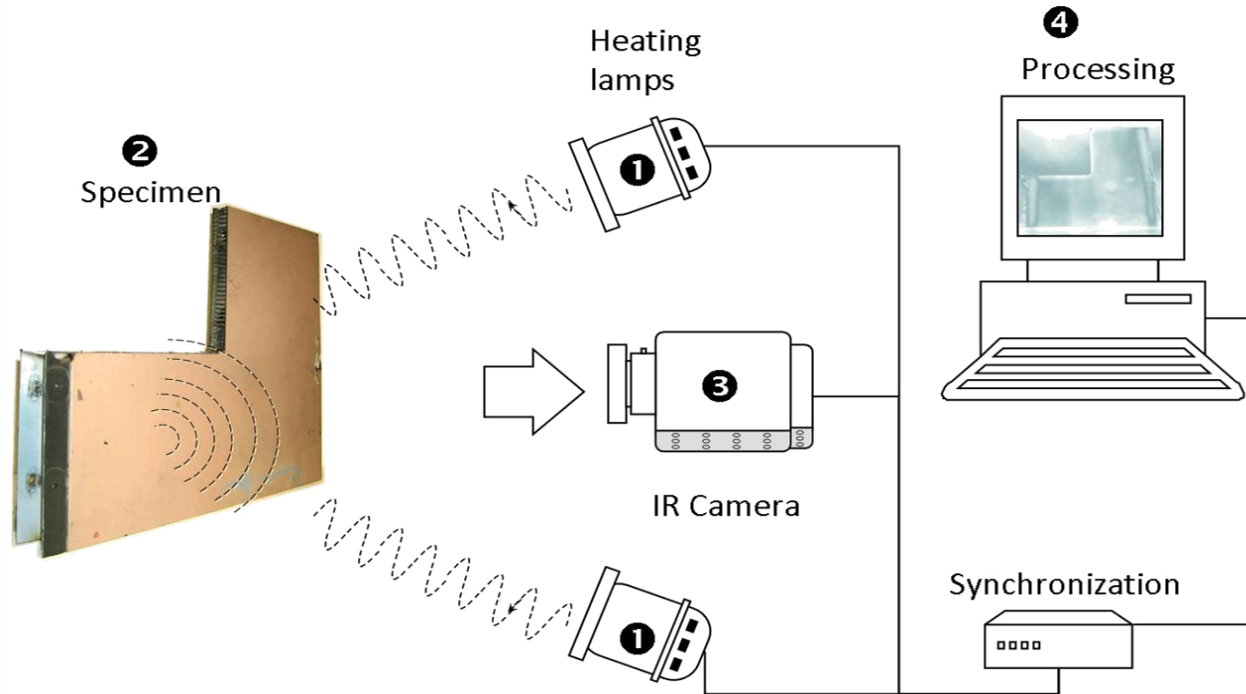
Thermoscope

Mosaic  
software



# Thermographie

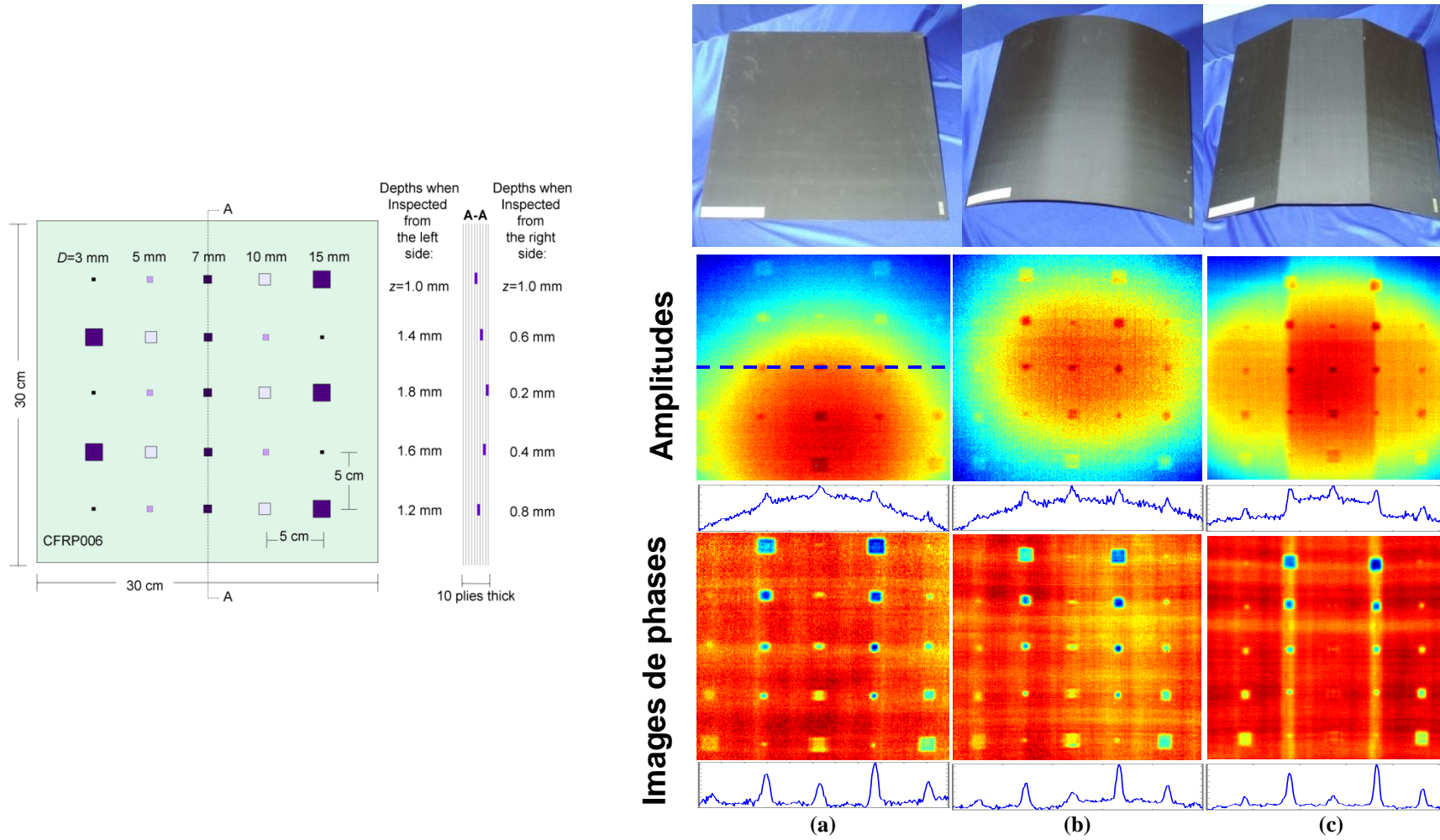
## Thermographie modulée





# Thermographie

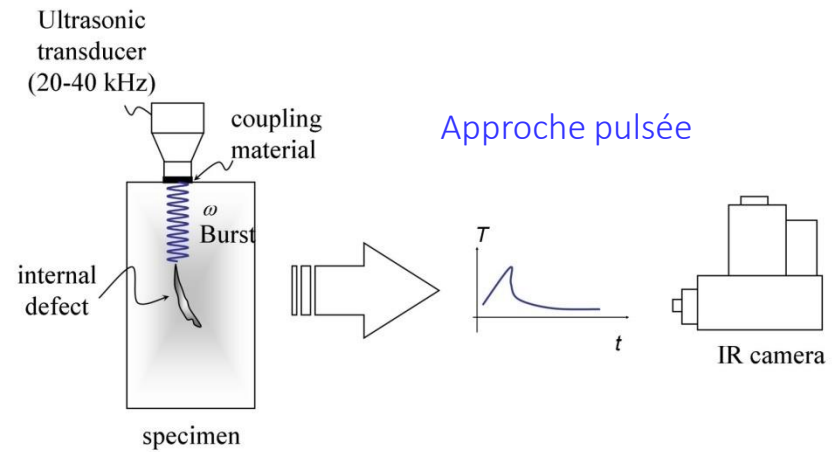
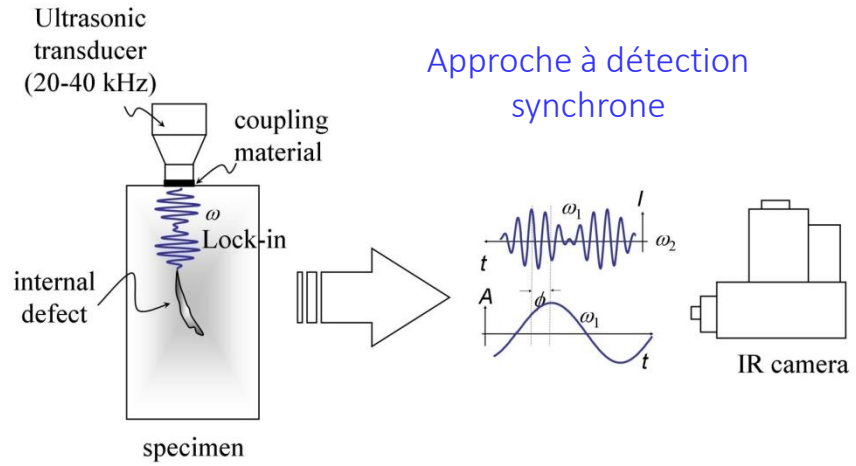
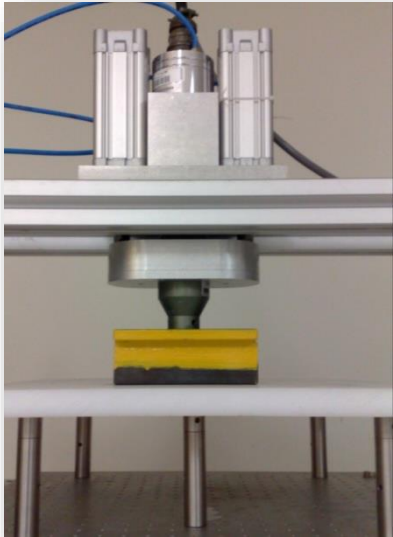
## Thermographie modulée / Exemple



*Les images de phase sont moins sensibles aux variations de reliefs et aux non uniformités spatiales des excitations photoniques.*

# Thermographie

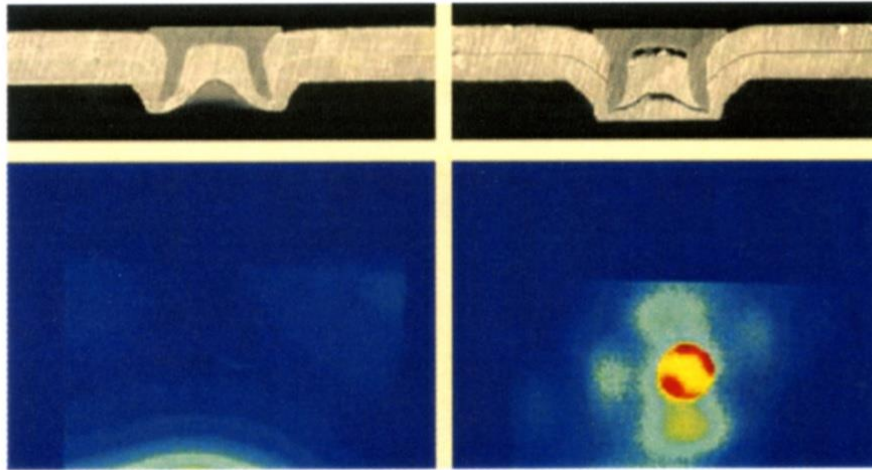
## Thermographie sonore



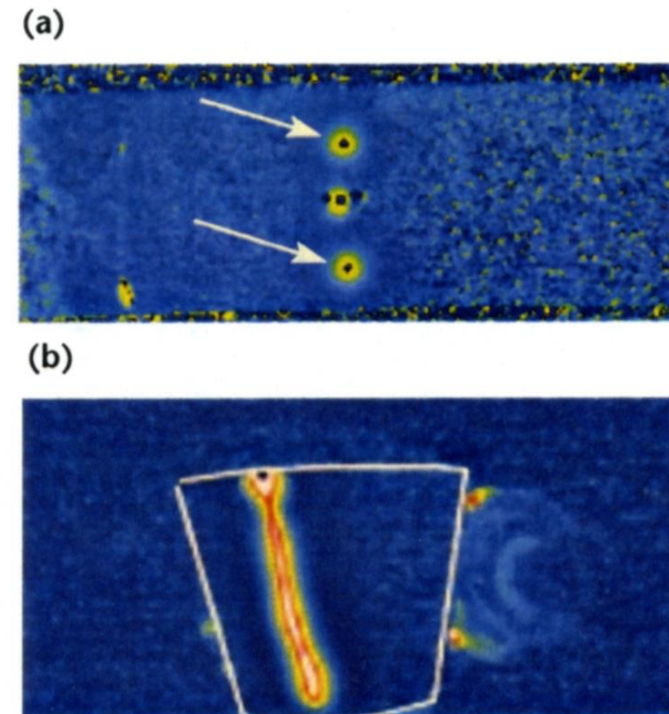
# Thermographie

## Thermographie sonore / Exemples

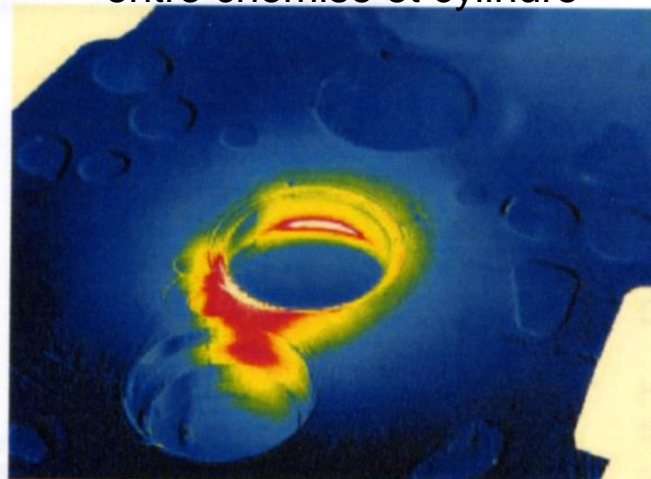
Détection de corrosion dans des rivets



Détection de fissures



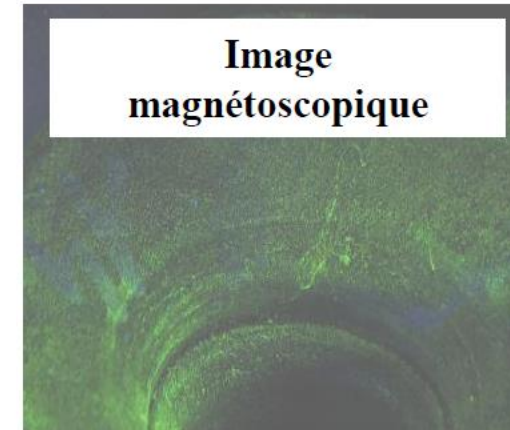
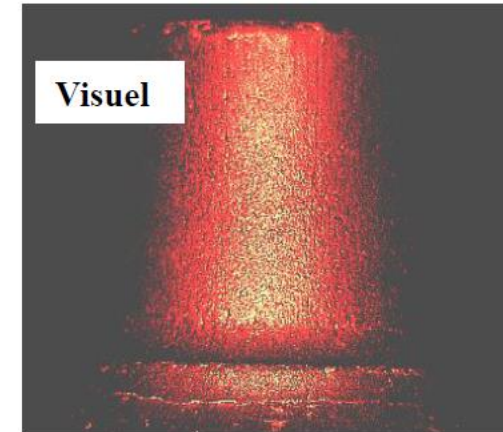
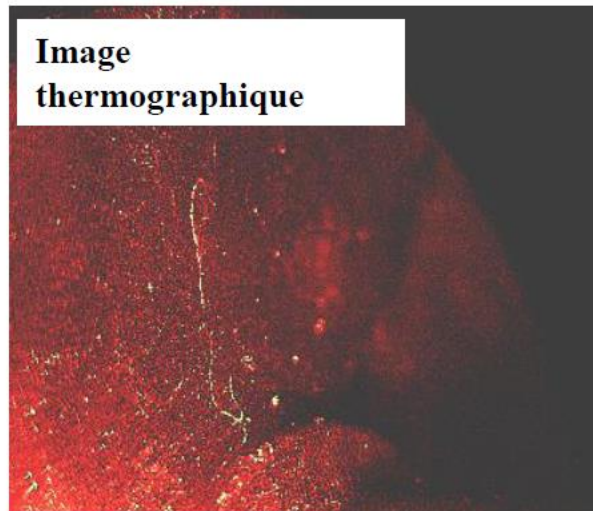
Détection de mauvais contact  
entre chemise et cylindre



# Thermographie

## Thermographie sonore / Exemples

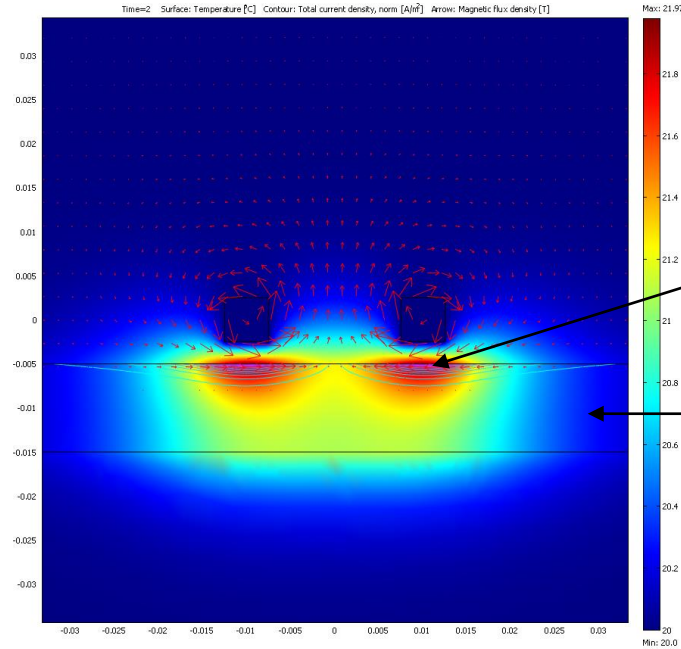
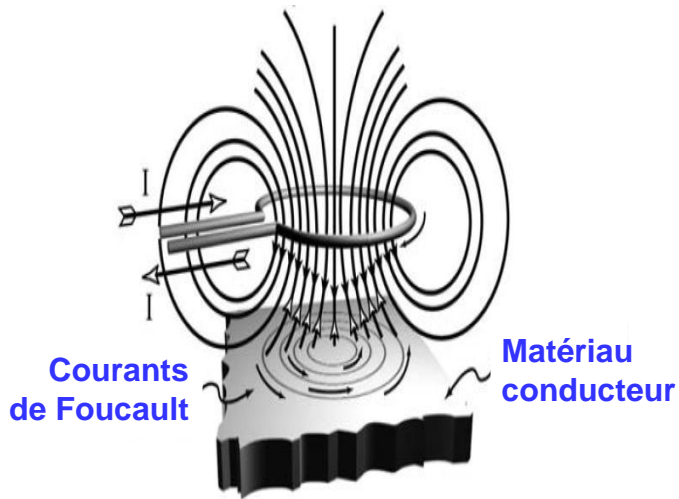
Une alternative potentielle à  
la magnétoscopie





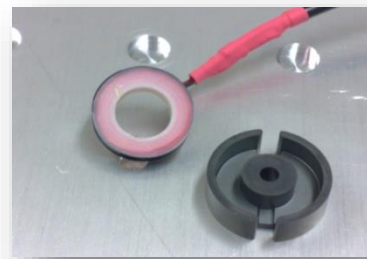
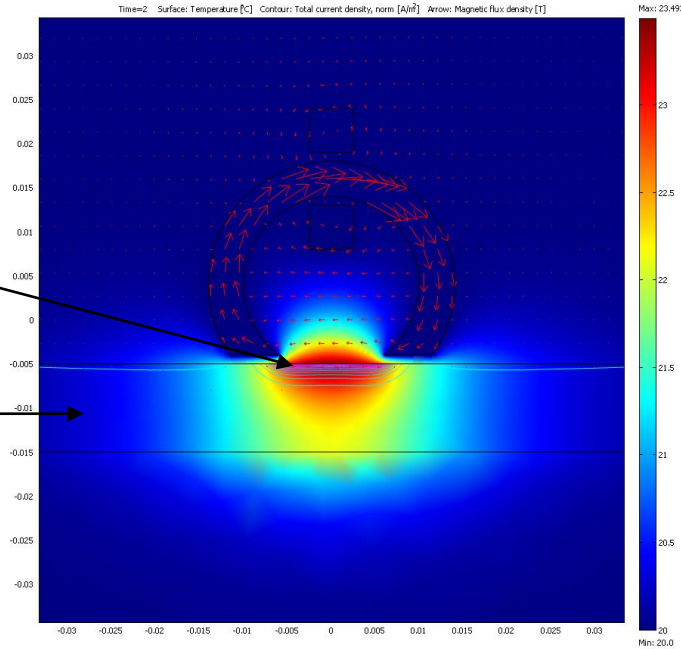
# Thermographie

## Thermographie à courants de Foucault



La couleur représente la température

Distribution des courants de Foucault



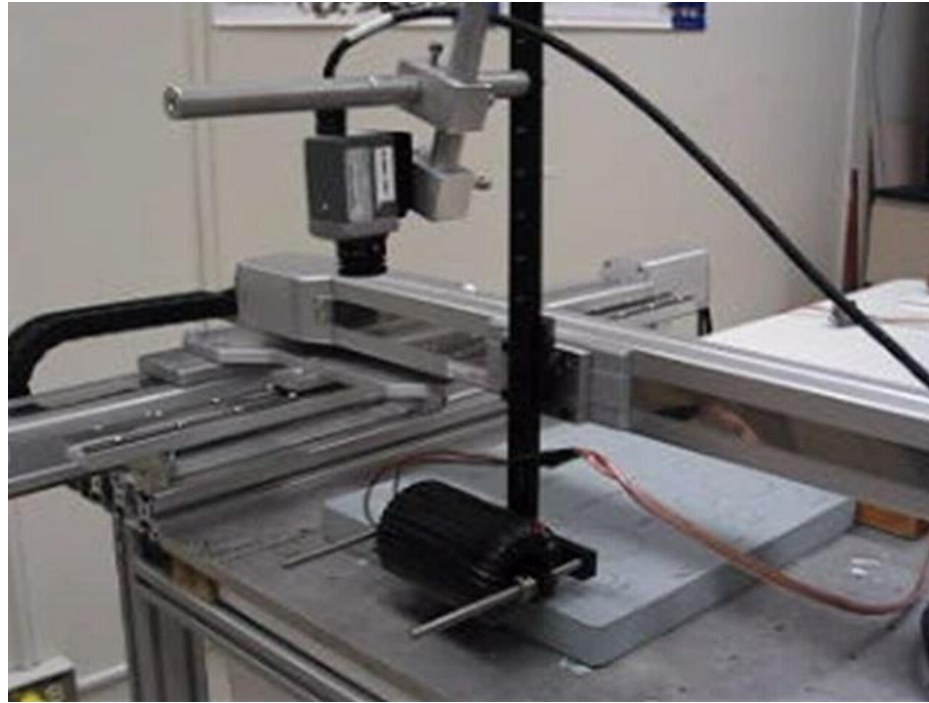
Forme de la bobine (Circulaire)



Forme de la bobine (en U)

# Thermographie

## Thermographie à courants de Foucault / Exemple



Vidéo montrant la bobine en U

# Thermographie

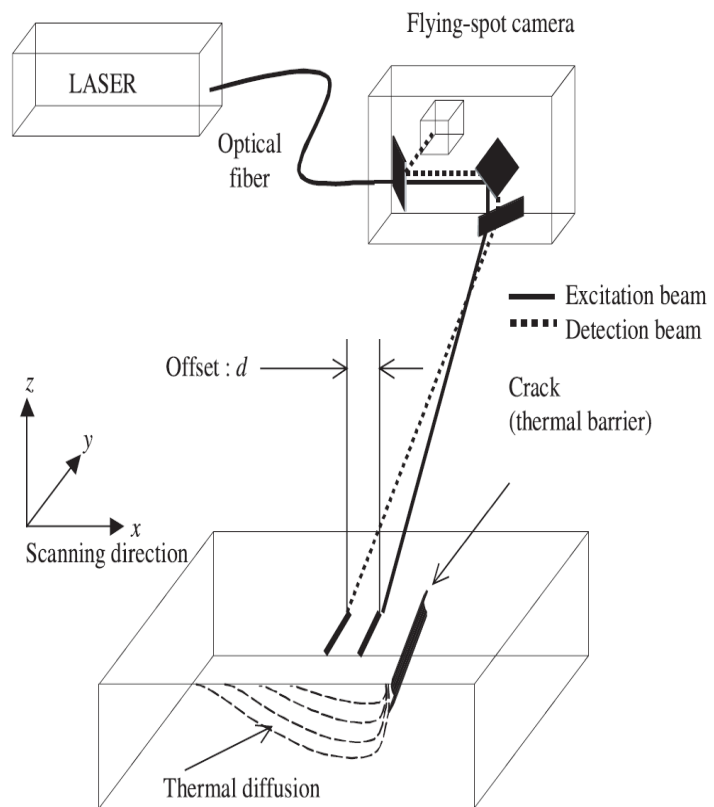
## Avantages et limitations

- ✓ Sans contact, sans couplant
- ✓ Méthode rapide : inspection de larges surfaces en une seule acquisition
- ✓ Limitée en profondeur
- ✓ Certains modes d'excitation permettent d'aller plus en profondeur (mode lock-In)
- ✓ Méthode coûteuse en investissement

# « Flying spot »

## Mode en excitation continue

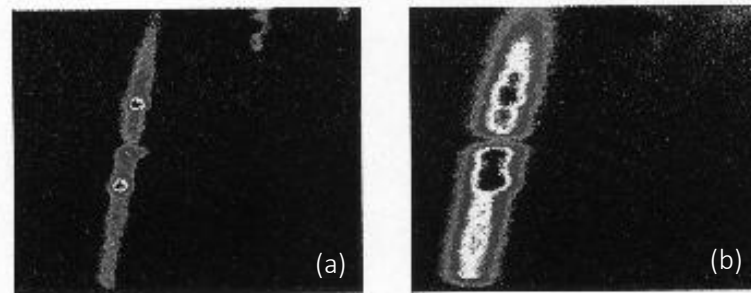
### Schéma de principe



### Image d'une fissure verticale

(a)  $d = 0$

(b) Avec un retard,  $d$

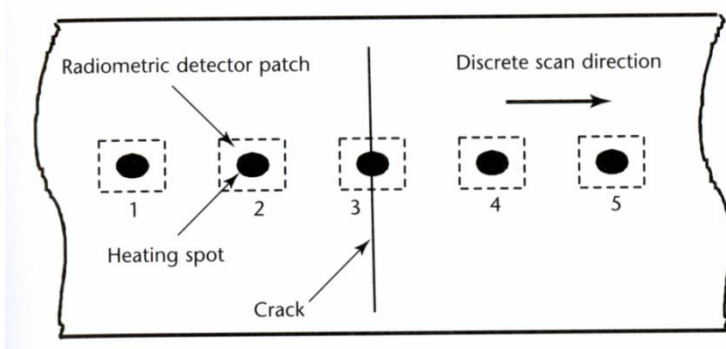




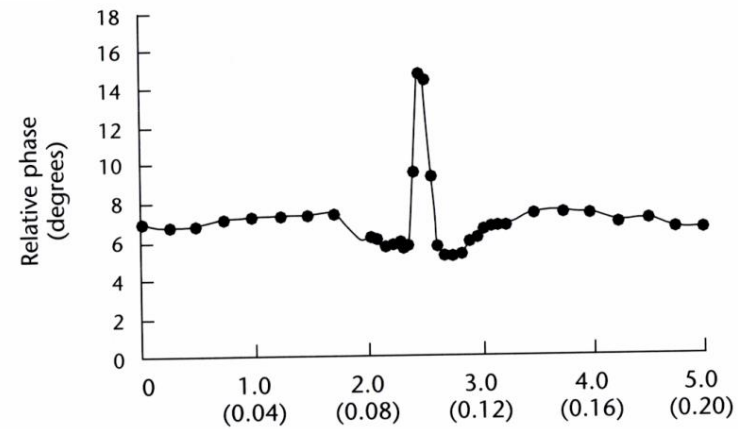
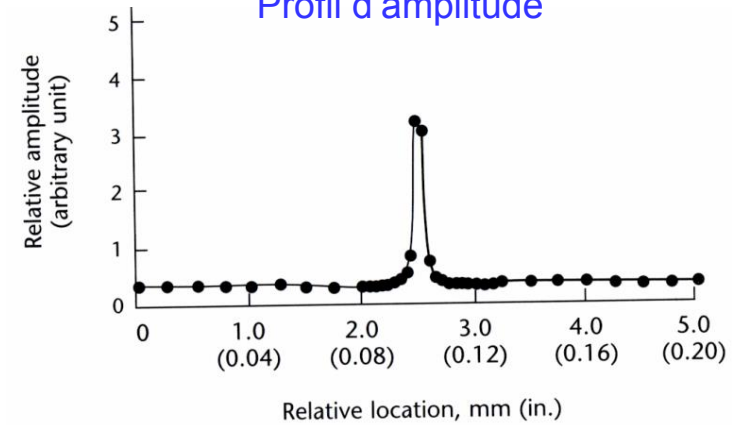
# « Flying spot »

## Mode à détection synchrone

Schéma de principe

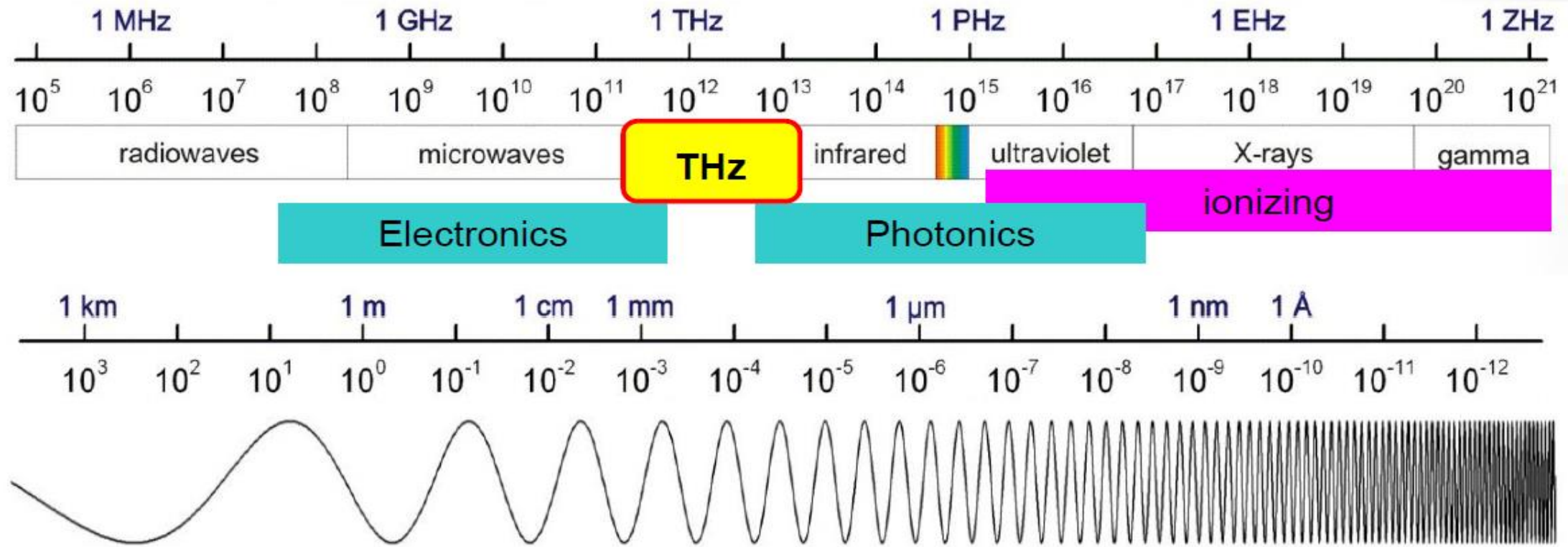


Profil d'amplitude



Profil de phase

# Rayonnement Terahertz

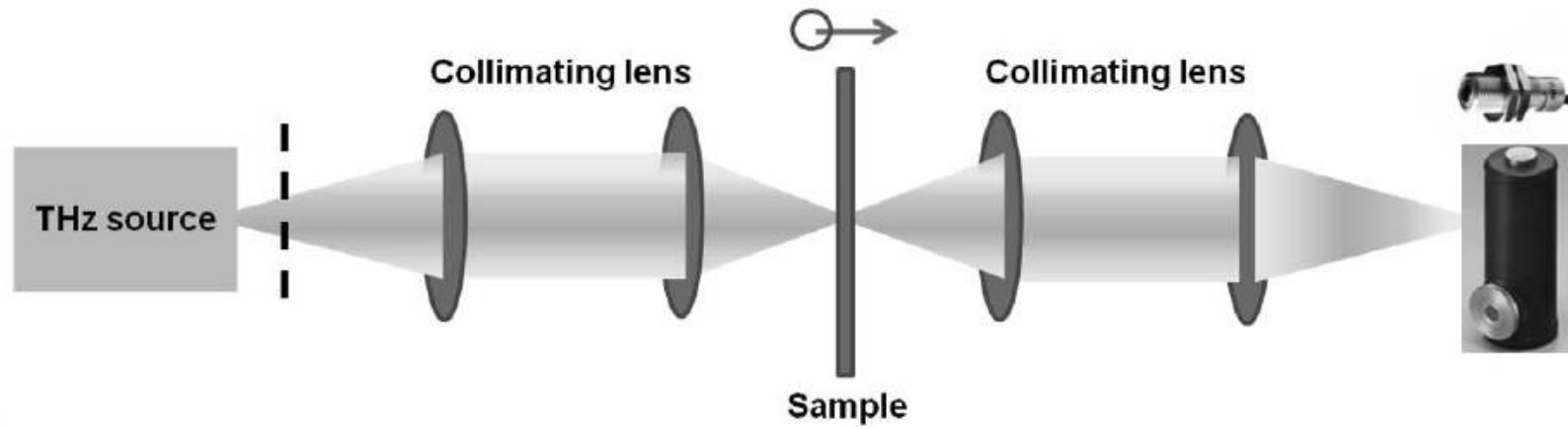


**Propriétés physiques des ondes THz : photons de basse énergie, longueur d'onde (sub-) millimétrique**

- Forte réflexion sur les métaux : **analyse des surfaces**
- Transmission dans les **matériaux diélectrique : analyse des volumes** (céramiques, plastiques, papier, vêtements, bois, etc.)

# Rayonnement Terahertz

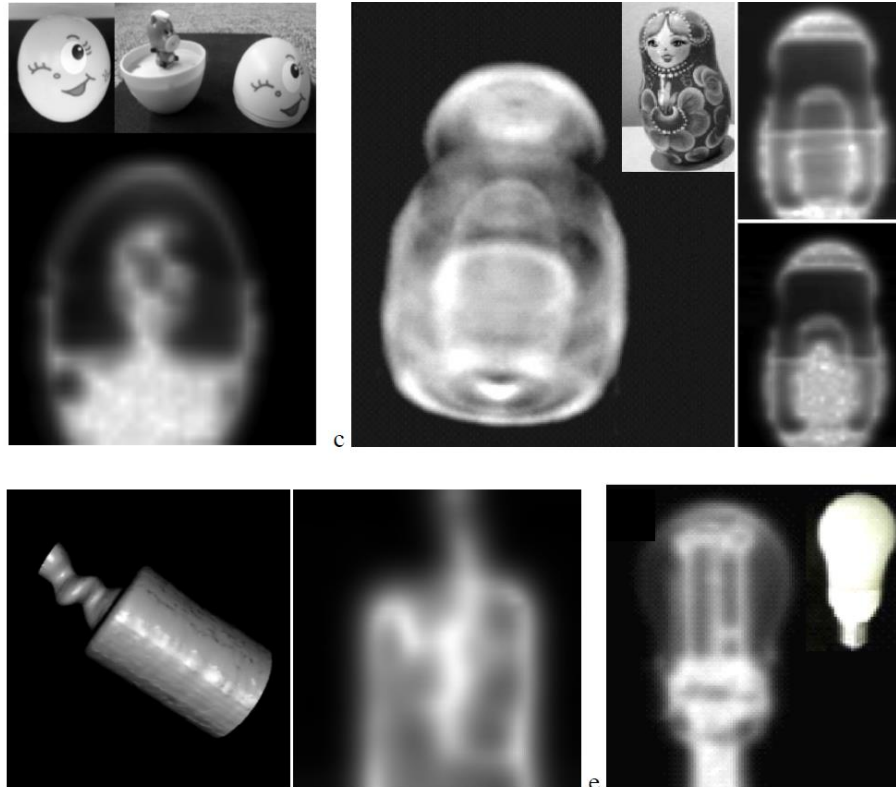
## Principe



1

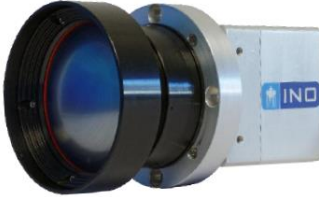
# Rayonnement Terahertz

## Exemples



Source : QIRT Journal

### MICROXCAM-384i-THz CAMERA






**APPLICATIONS**

- Package inspection
- Manufacturing
- Security screening and surveillance
- Concealed weapons detection
- Vision through camouflage
- Quality control, process monitoring
- Spectroscopy
- Submillimeter astronomy
- Dental and medical imaging
- Food inspection


**BENEFITS**

- Wide band response
- High sensitivity
- 16-bit raw data
- High image quality
- Refractive optics available

### EXAMPLES OF SEE-THROUGH IMAGING

VISIBLE IMAGE – MAGNETIC CARD	TERAHERTZ IMAGE	VISIBLE IMAGE - INSIDE
		

**CONCEALED WEAPON DETECTION THROUGH FABRIC**



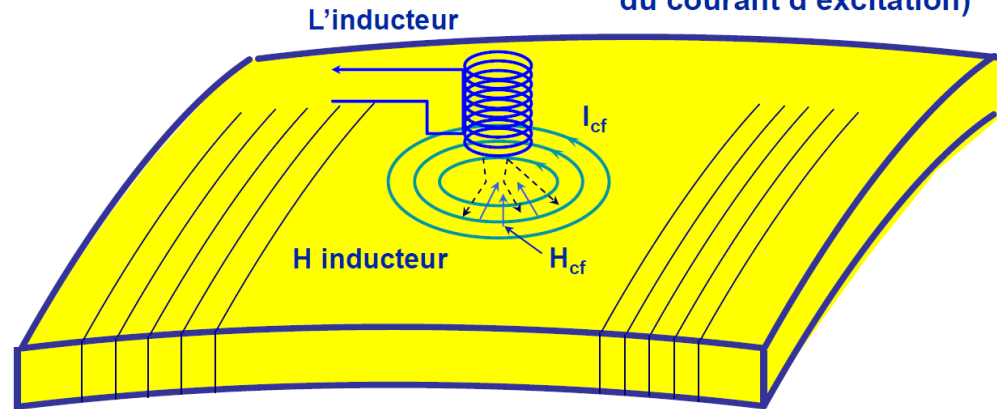
Source : INO



# Courants de Foucault...

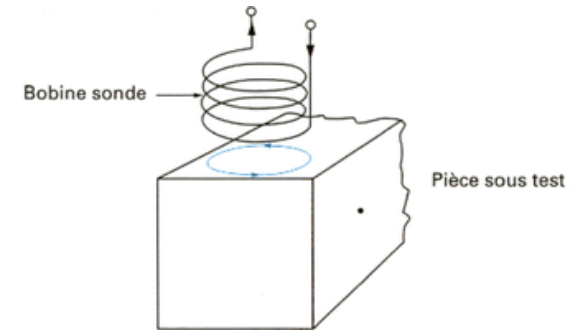
## Principe 1

1. L'EXCITATION  
(un courant électrique)

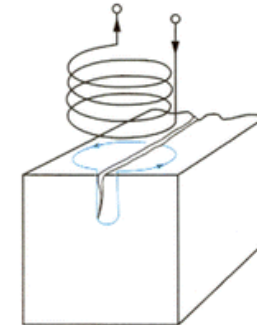


3. LA REVELATION  
(un courant récupéré différent  
du courant d'excitation)

2. LA PERTURBATION  
(un courant de Foucault perturbé par un défaut)



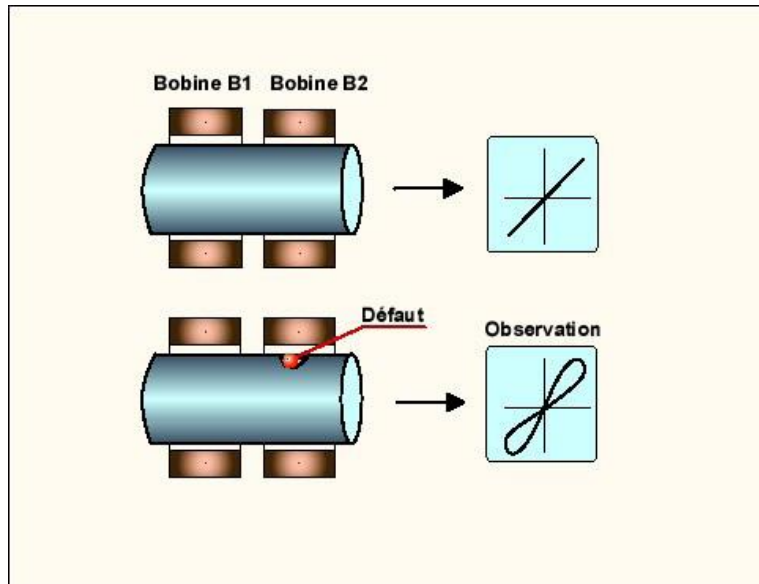
a pièce sans défaut



b pièce avec défaut : modification du trajet des courants de Foucault

# Courants de Foucault...

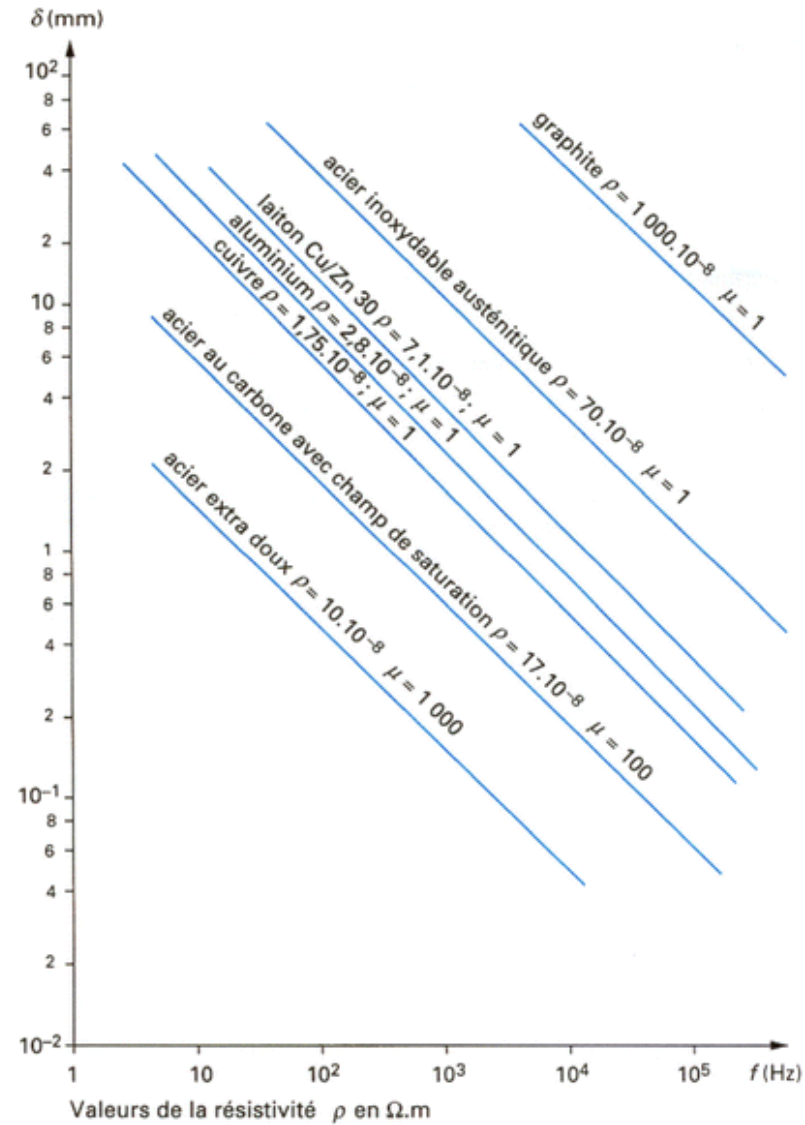
## Principe 2



- ✓ Des courants en opposition de phase sont induits dans deux sections voisines du produit à contrôler. En l'absence de défaut, en regard des bobines d'excitation le système est en équilibre.
- ✓ La présence d'un défaut en regard d'une des bobines modifie la répartition des courants induits et provoque un déséquilibre du système.
- ✓ On observe sur l'écran de visualisation une signature caractéristique du signal déséquilibré.

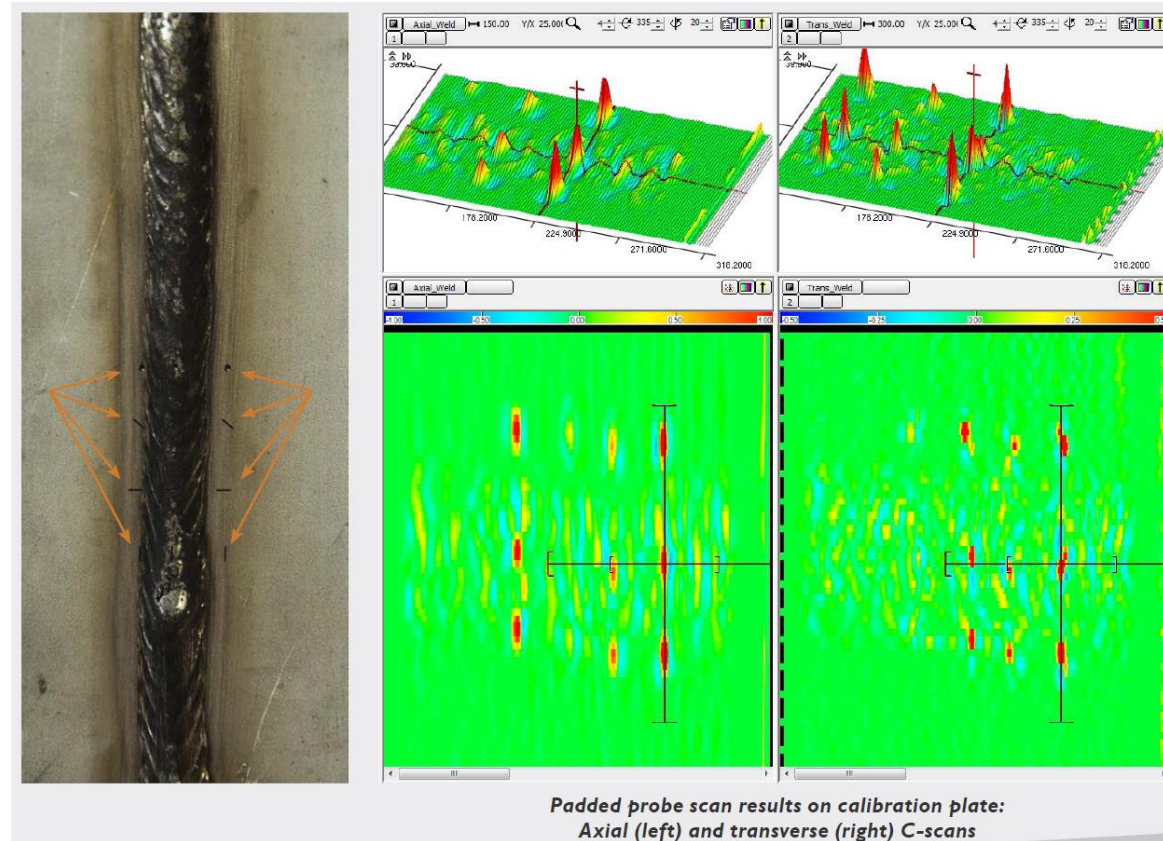
# Courants de Foucault...

## L'effet de peau



# Courants de Foucault...

## Détection de fissures dans les soudures

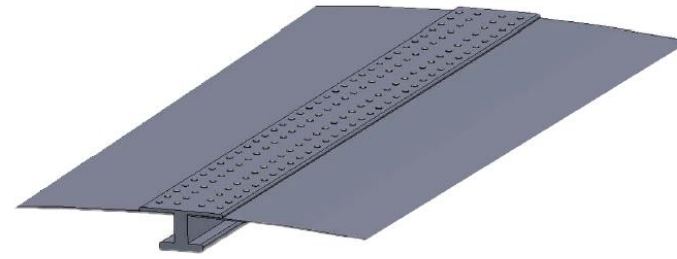


Source : Eddyfi

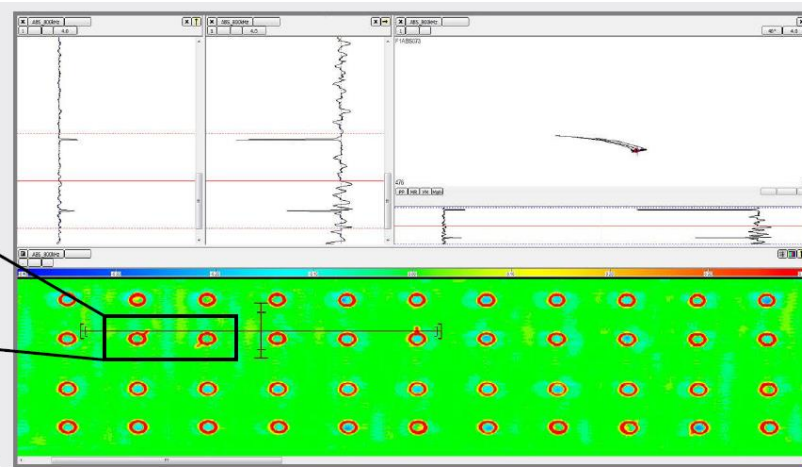
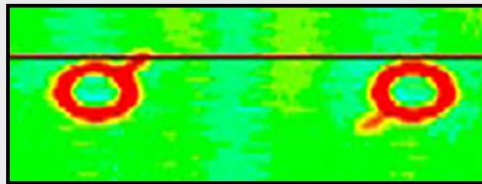


# Courants de Foucault...

## Détection de fissures et de corrosion dans les rivets



Corrosion detection



Cracking detection

Source : Eddyfi

# Courants de Foucault



## Domaine d'application

---

### Matériaux concernés :

Tous les matériaux électriquement conducteur.

### Défauts détectables :

Les défauts débouchant ou proches de la surface. La profondeur dépend du matériau concerné et de la fréquence utilisée.

### Limitations de la méthode :

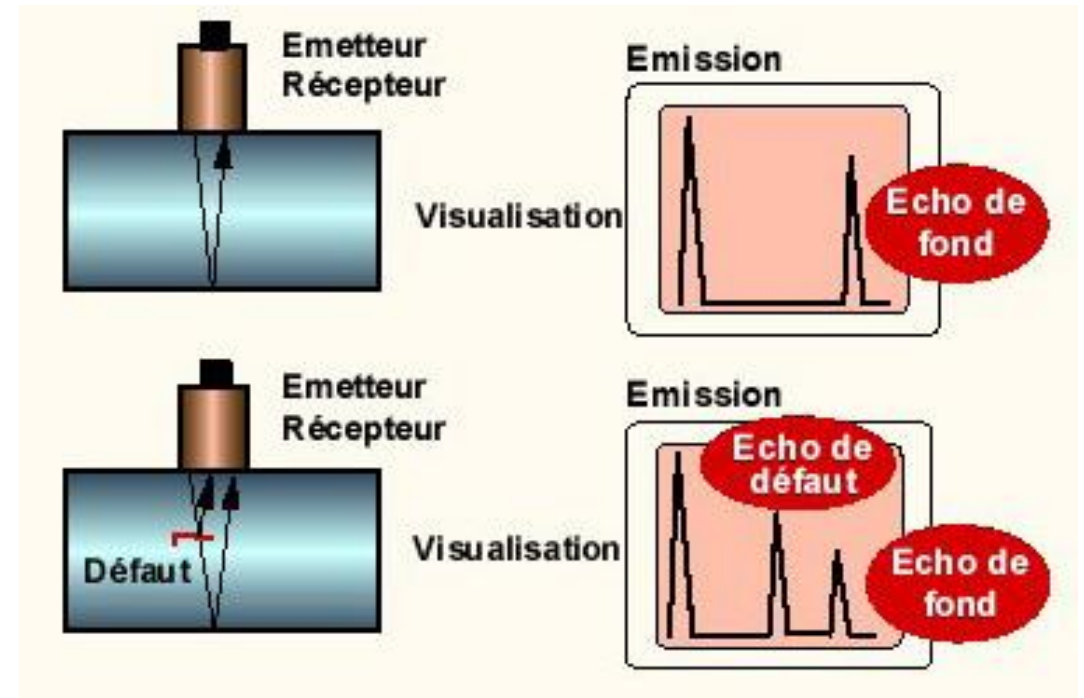
- Pas de contrôle sur matériaux non conducteurs
- Limitations en profondeur de détection (pas de détection en interne)
- Obligation d'échantillons de référence pour la plupart des applications.

# Ultrasons

## Principe

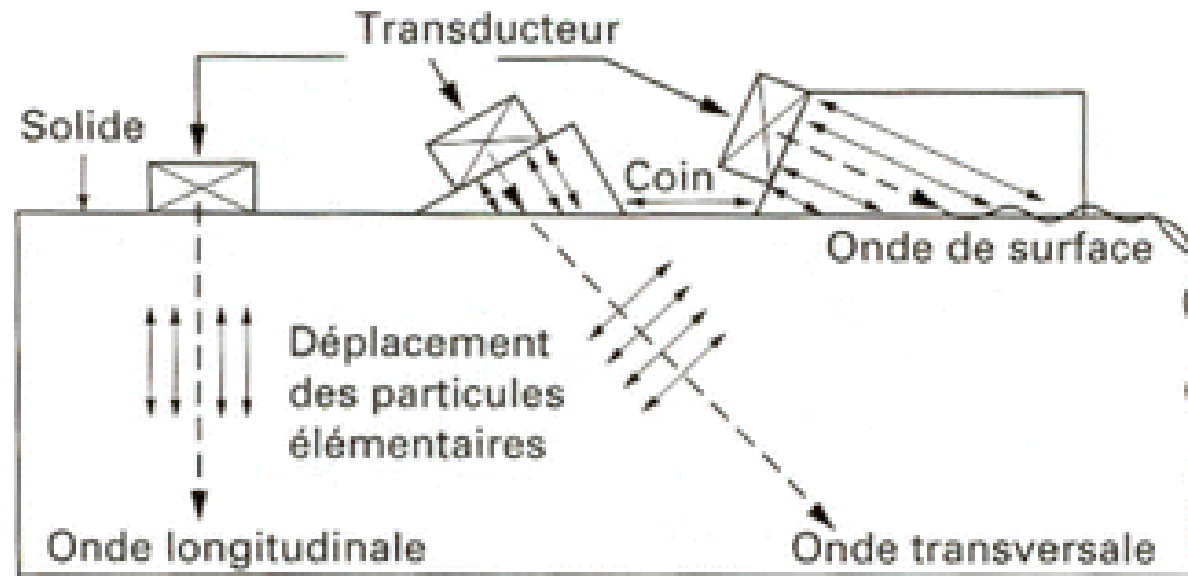
Le contrôle par ultrasons comprend 3 étapes :

- ✓ La vibration mécanique engendrée par le palpeur émetteur se propage dans la pièce en se réfléchissant aux interfaces.
- ✓ Une partie du faisceau est interceptée par le défaut et renvoyée vers le palpeur récepteur (Eventuellement le même que l'émetteur) qui convertit la vibration en signal électrique.
- ✓ On observe sur l'écran de visualisation un écho caractéristique apparaissant à une distance donnée sur la base de temps.



# Ultrasons

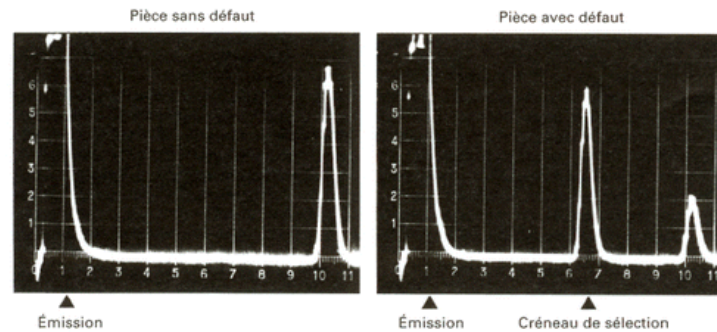
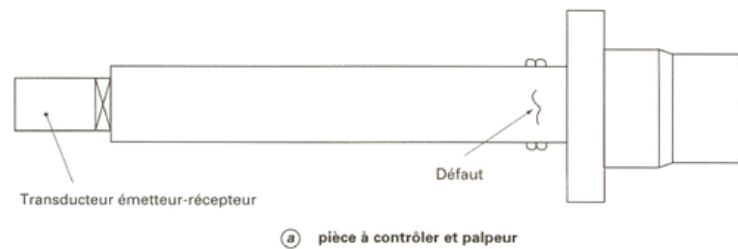
## Différents types d'ondes





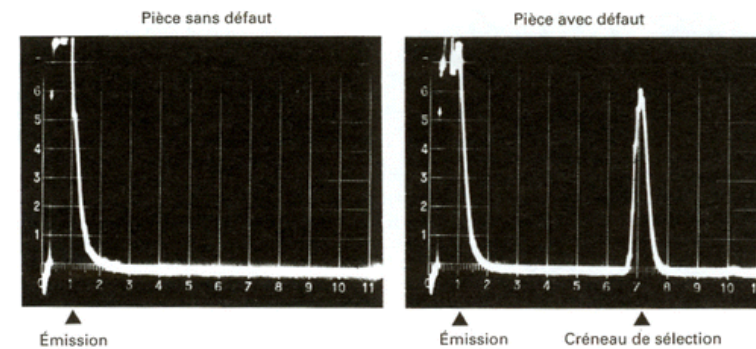
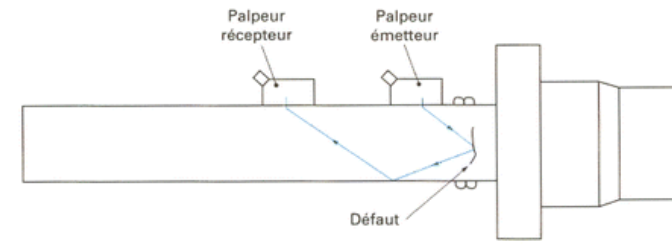
# Ultrasons

## Autre configuration possible



(b) signal électrique (usuellement appelé présentation A ou A-scan)

**Contrôle ultrasonore par échographie  
(ondes longitudinales)**



(b) signaux obtenus

**Contrôle ultrasonore par la méthode tandem  
(ondes transversales)**

# Ultrasons

## Couplage acoustique...

- ✓ *Contrôle en cuve d'immersion*
- ✓ *Contrôle au défilé (jet d'eau ou huile)*
- ✓ *Contrôle manuel (agent de couplage visqueux)*

### CND par jet d'eau

- ✓ *Systèmes robotisés avec jets d'eau*



### CND Manuel



Accès d'un seul côté

# Ultrasons

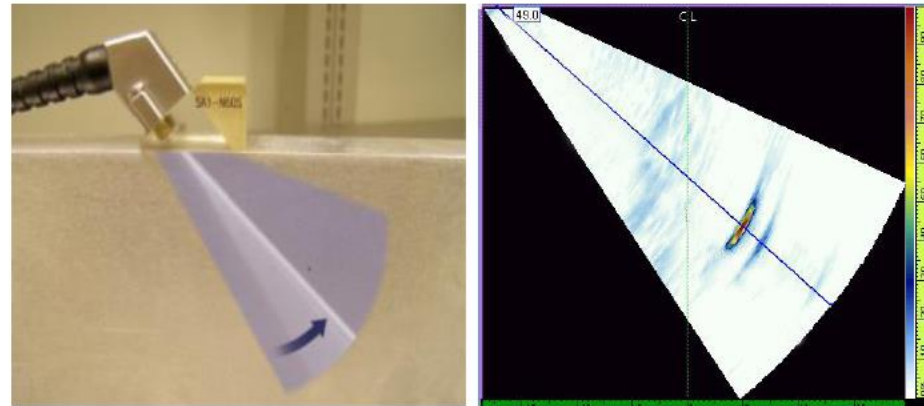
## Couplage acoustique

### Contrôle par ultrasons multiéléments (Phased arrays / Olympus NDT)

- Transposition de l'échographie médicale au CND



**Echographie médicale**

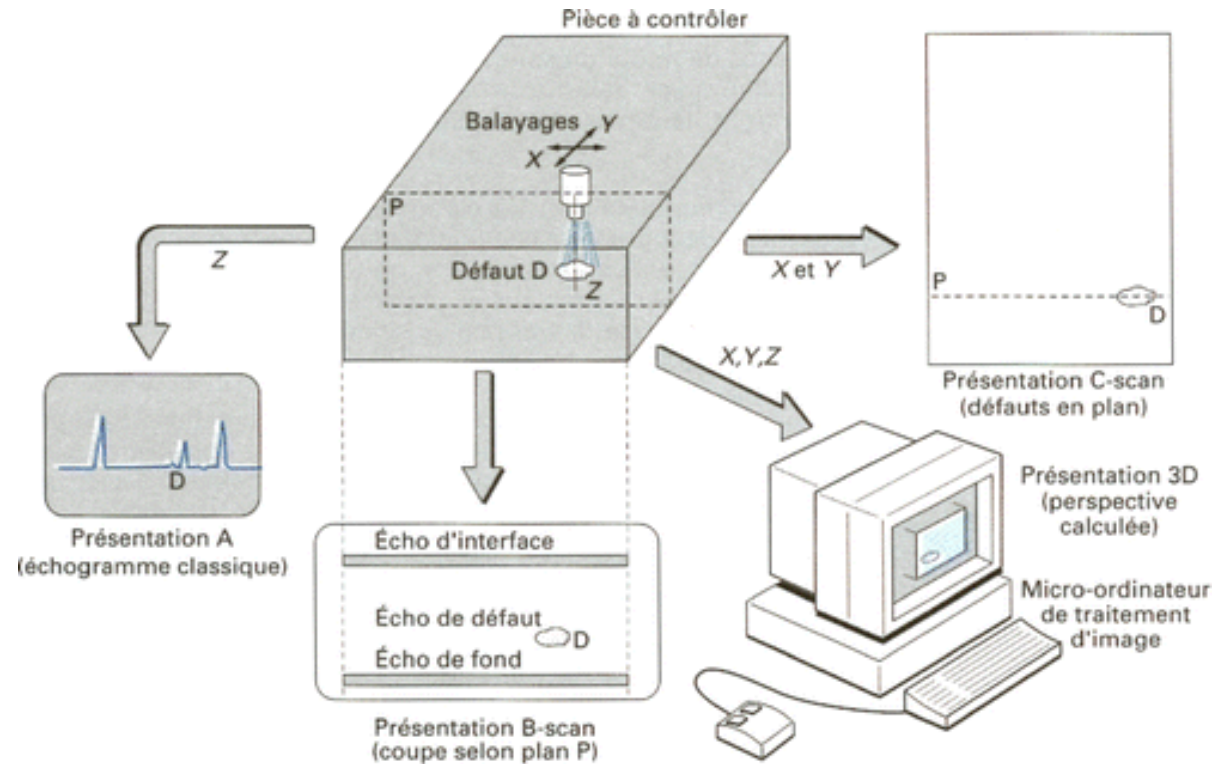


**CND**

- Mêmes principes d'étalonnage, de détection, de dimensionnement qu'en ultrasons conventionnels
- Requiert des transducteurs multiéléments

# Ultrasons

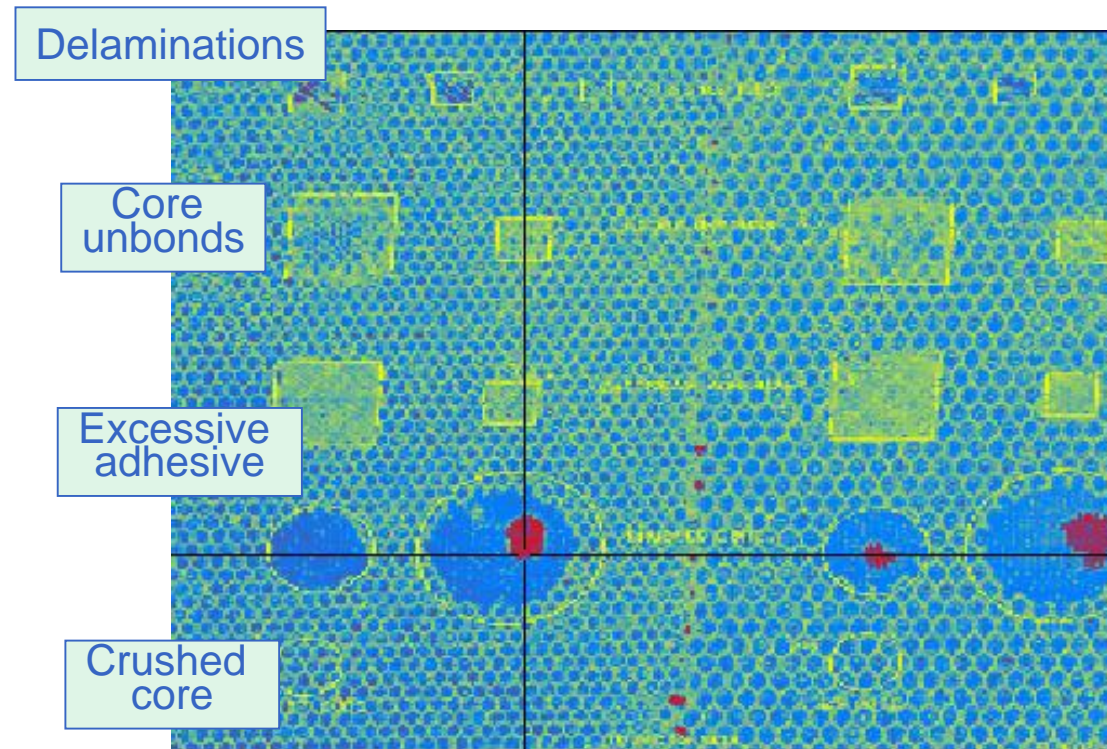
## Différents modes de présentation...





# Ultrasons

## Différents modes de présentation Exemple d'un C-scan



**C-scan d'un nid d'abeilles**

# Ultrasons

## Avantages

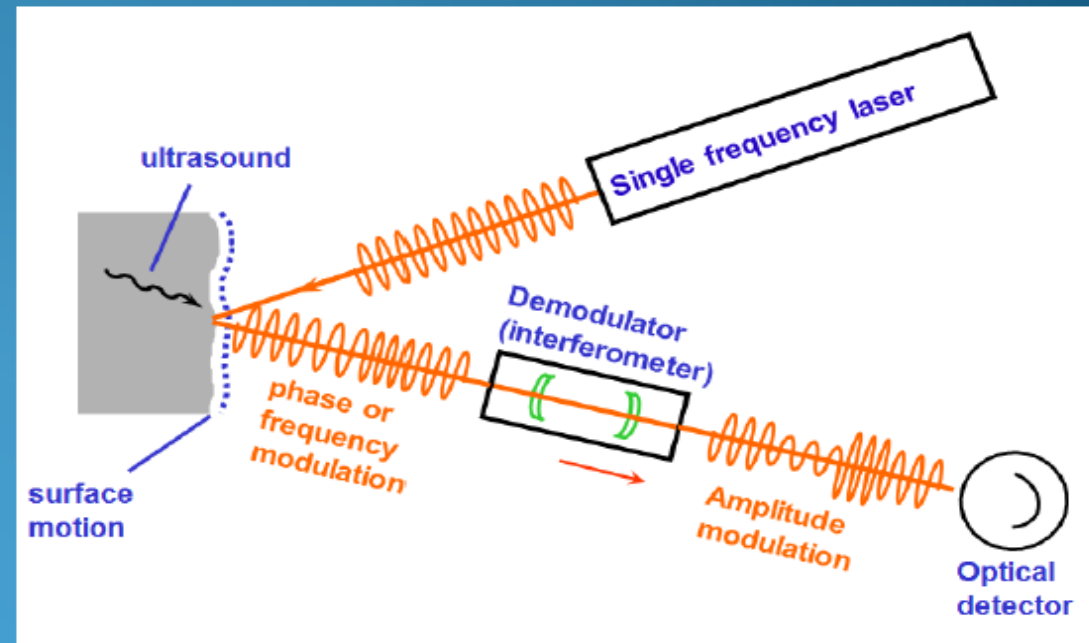
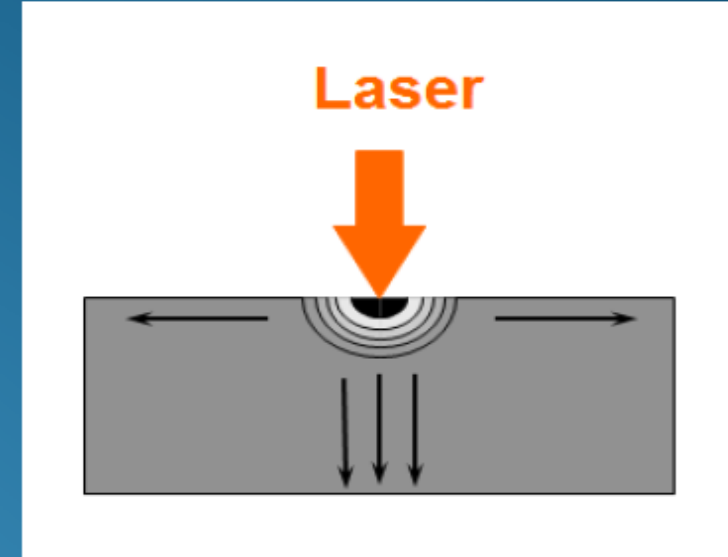
- ✓ Détection précise de la position des défauts dans le volume de la pièce.
- ✓ Grande sensibilité surtout pour les défauts plans correctement orientés.
- ✓ Souplesse d'utilisation (Utilisation sur chantier aussi bien qu'en contrôle automatisé).

## Inconvénients

- ✓ Nécessité d'utiliser un milieu de couplage entre le palpeur et la pièce.
- ✓ Interprétation de la nature des défauts et de leur dimension délicate nécessitant un personnel qualifié.
- ✓ Mise en œuvre difficile sur certains matériaux (Fonte par exemple).
- ✓ Sensibilité fortement fonction de l'orientation du défaut vis à vis de la direction.

# Ultrasons laser

- ✓ Un laser dirigé sur la surface de la pièce à inspecter génère localement un faisceau d'ultrasons par échauffement (effet thermoélastique).
- ✓ Les ultrasons se propagent dans le volume et sont réfléchis par les interfaces et les discontinuités internes (défauts).
- ✓ Un second laser de détection capte ces vibrations lorsqu'elles reviennent à la surface grâce à un interféromètre.
- ✓ Les faisceaux laser sont déplacés à l'aide d'un robot.
- ✓ Toutes les analyses UT classiques sont possibles (A-scan, B-scan, C-scan).

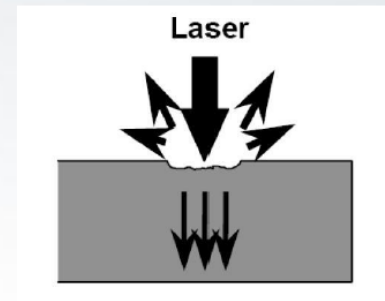
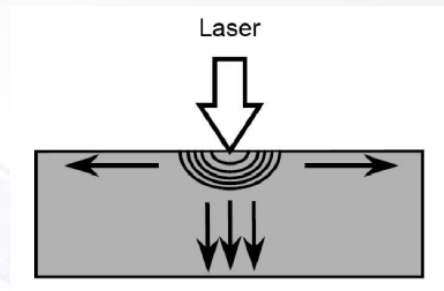


# Ultrasons laser

- Ultrasons Laser = Combinaison de 2 principes
- Génération d'ultrasons par Laser
- Détection d'ultrasons par Laser
- Lasers distincts
- Caractéristiques:
  - Sans contact (qqc cm à qqc mètres)
  - Sans couplant (air)
  - Spots laser : qqc millimètres, peut atteindre des endroits anguleux, difficiles d'accès

# Ultrasons laser

- Génération par laser impulsionnel
- Deux processus possibles
  - Régime thermo-élastique : non destructif
  - Régime ablatif : destructif



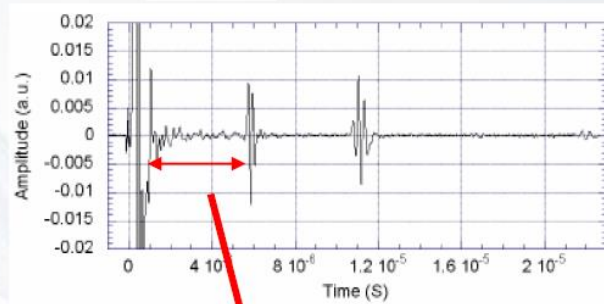
- Efficacité de génération dépend de
  - Du matériau
  - La longueur d'onde du laser
  - La densité d'énergie de l'impulsion (en restant  $<$  seuil d'ablation)



# Ultrasons laser

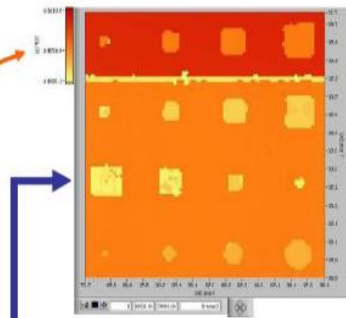
- Les UT Laser s'appliquent comme des UT
- Nécessitent un balayage

A-scan

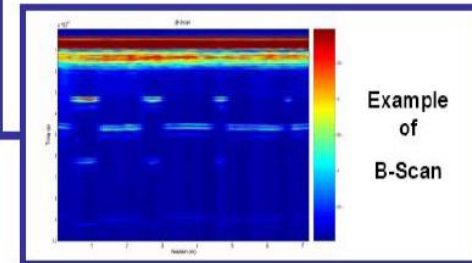


Profondeur du défaut

Epaisseur de la pièce



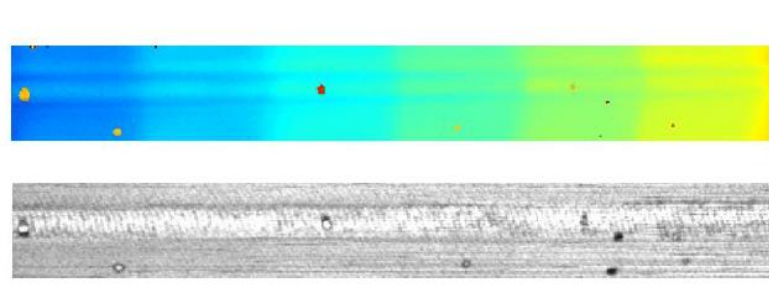
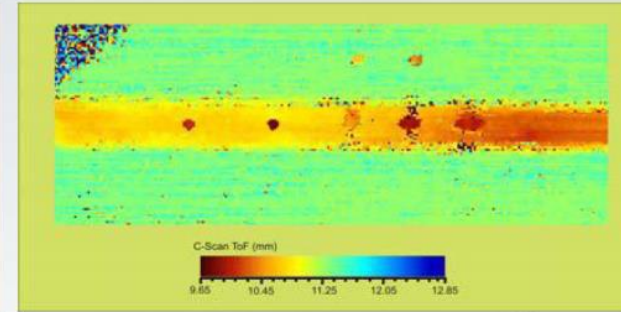
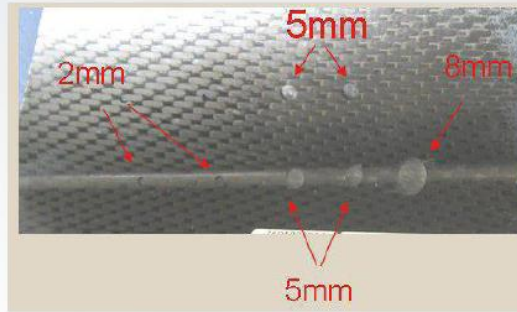
C-Scan



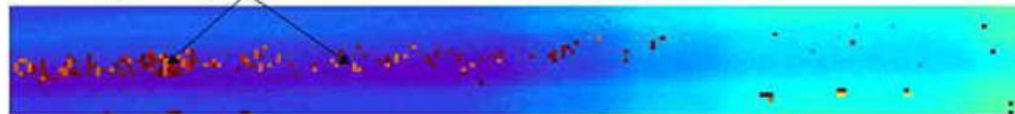
Example of B-Scan

# Ultrasons laser

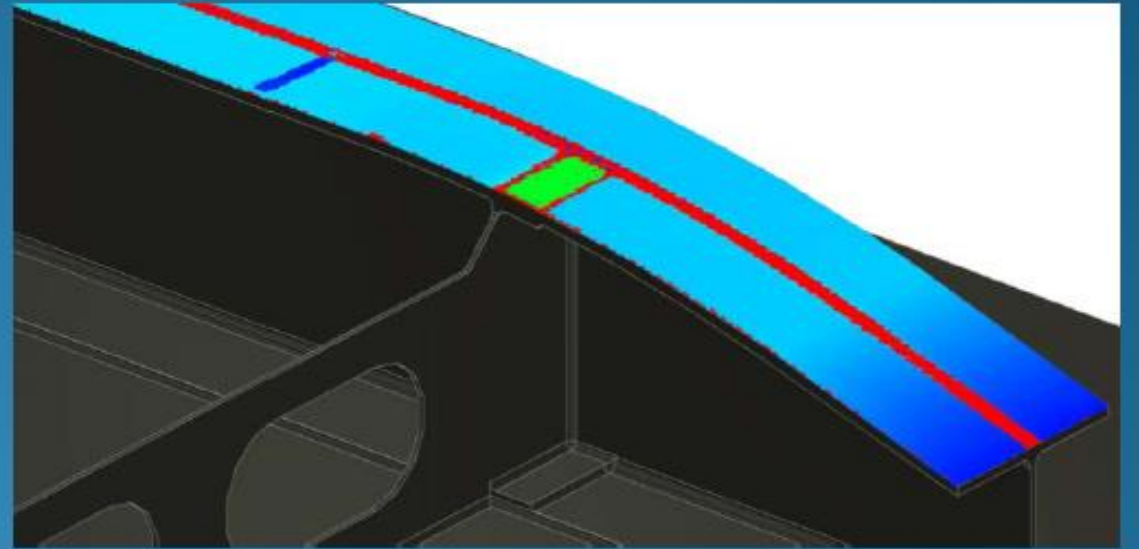
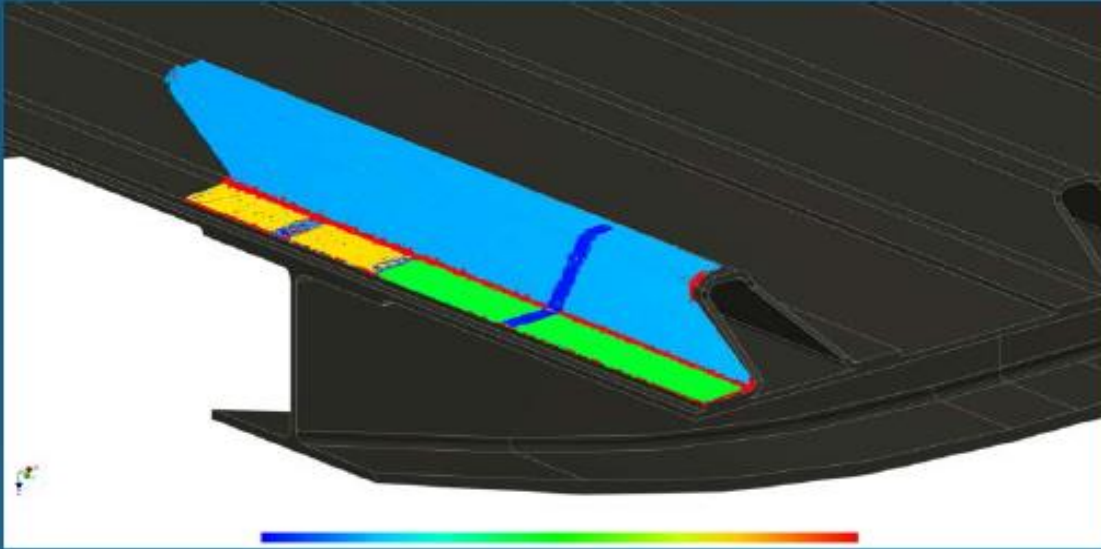
- Application : détection de défauts dans structures composites de formes complexes



porosity in the radius



# Ultrasons laser



## ✓ Avantages et limitations

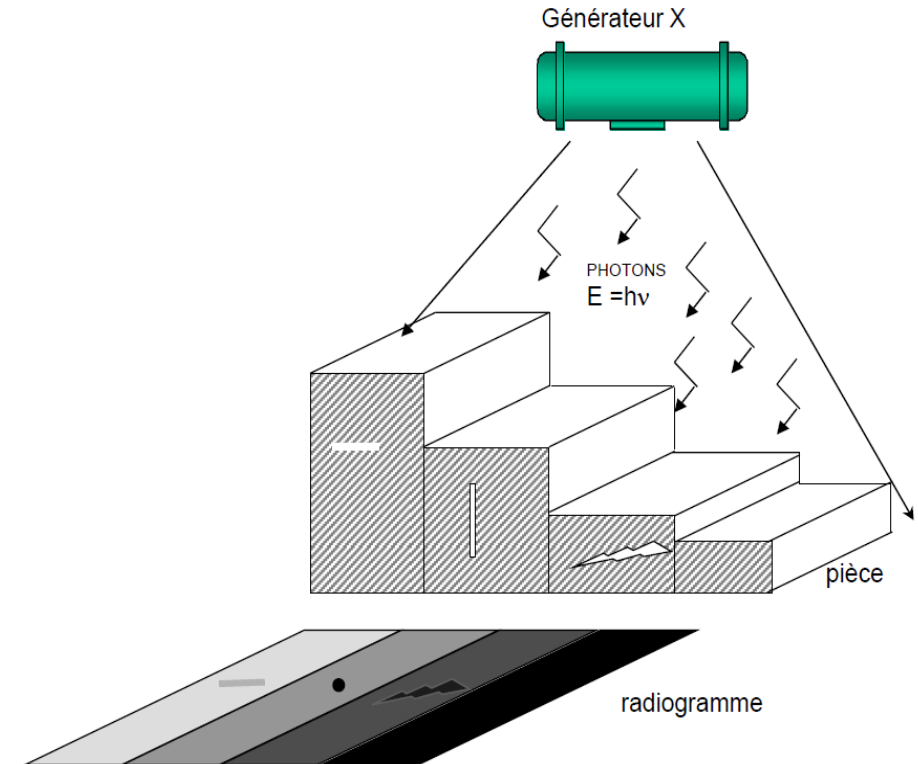
- ✓ Sans contact, sans couplant
- ✓ Performances comparables aux méthodes ultrasons classiques
- ✓ Capacité de pénétration en profondeur
- ✓ Capacité à inspecter des pièces de géométrie complexe (3D)
- ✓ Système dispendieux (ordre de grandeur : x10 par rapport à système UT phased-array)

# Rayonnements ionisants

## Principe

Le contrôle par rayonnements ionisants est le suivant :

- ✓ La pièce est soumise à l'action d'une source de rayonnement. Le rayonnement sortant de la pièce est fonction de l'épaisseur traversée. Au droit d'un défaut l'intensité transmise sera plus élevée ou plus faible.
- ✓ Une image se forme sur le film après exposition pendant un temps donné fonction du matériau, de l'épaisseur et de la puissance de la source, de la qualité du rayonnement.
- ✓ Le film est développé et interprété sous un éclairage adapté.





# Rayonnements ionisants

## Épaisseur de demi-absorption (en mm) de quelques matériaux

Matériau	Aluminium	Fer	Cuivre	Plomb	Béton	Polyéthylène	Eau
Numéro atomique Z	13	26	29	82			
Masse volumique $\rho$ (g /cm <sup>3</sup> )	2,7	7,86	8,9	11,34	2,25	0,93	1
<b>Énergie du rayonnement</b>							
20 keV	0,8	0,037	0,025	0,007	1	17	8,60
60 keV	9,5	0,78	0,53	0,16	13	38	30,5
100 keV	15,1	2,5	1,8	0,15	19	47	41
200 keV	21,7	6,4	5,3	0,6	26		
500 keV	30,3	10,6	9,3	4,5	37		
1 MeV	42	14,7	12,7	10	50,4		
2 MeV	60	20,6	18	14	72		



# Rayonnements ionisants

## Avantages

- ✓ Détection des défauts dans le volume de la pièce.
- ✓ Bonne définition des défauts avec détection de leur nature.
- ✓ Archivage aisé des résultats.

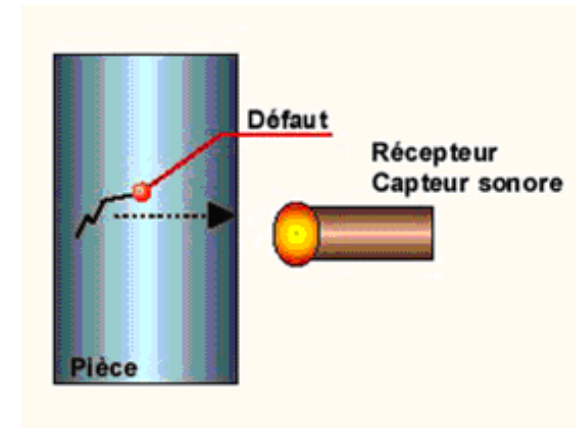
## Inconvénients

- ✓ Méthode coûteuse en investissement et développement des films.
- ✓ Nécessite le respect de règles de sécurité importantes.
- ✓ Pénétration des rayons limitée par l'épaisseur et la puissance de la source.
- ✓ Localisation du défaut dans la section non garantie.
- ✓ Sensibilité fonction de l'orientation du défaut vis à vis de la direction principe du rayonnement.

# Contrôle acoustique...

## Principe

- ✓ Sous l'action d'une contrainte mécanique, un début de fissuration (ou un déplacement) s'organise dans la pièce.
- ✓ La fissure se comporte comme une source d'émission sonore détectée par un capteur judicieusement placé.
- ✓ L'émission acoustique est différente des autres techniques de contrôle non destructif : elle ne s'applique pas sur la pièce terminée, mais elle doit être utilisée en cours de fabrication ou en cours d'utilisation.



# Contrôle acoustique

## Avantages

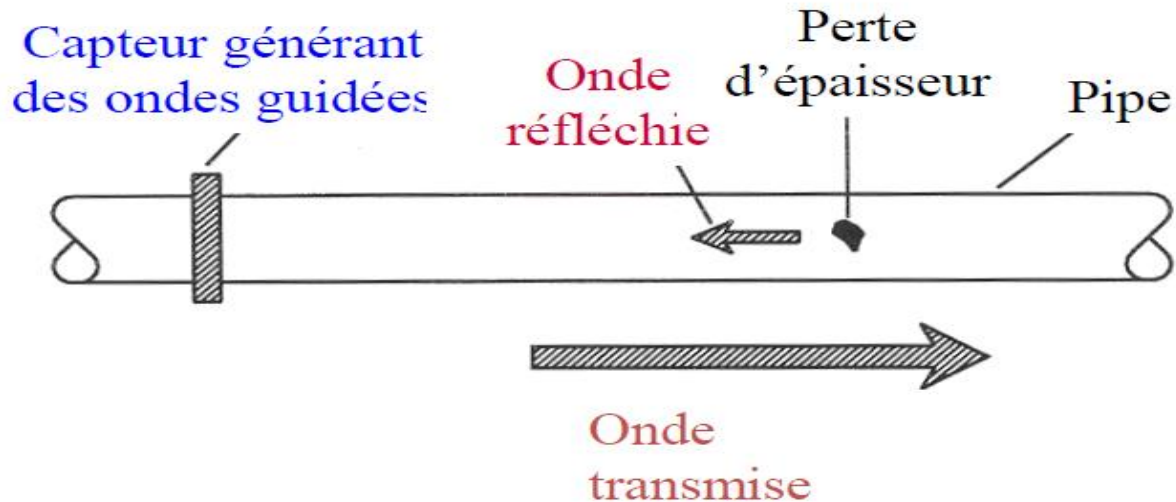
- Méthode bien adaptée à une surveillance en fonctionnement.
- Ne nécessite pas de démontage de la pièce.
- L'évolution de la fissure peut être quantifiée.
- Excellente sensibilité.

## Inconvénients

- Instrumentation complexe.
- Etalonnage délicat.

# Contrôle par ondes guidées

- Méthode de contrôle globale sur des structures de grandes longueurs
- Détection de pertes de section sur des structures tubulaires (le plus courant) ou des structures de type plaques
- Génération d'une onde ultrasonore guidée qui se propage dans l'épaisseur de la structure



# Contrôle par ondes guidées

- Passage sous routes, rivières et voies ferrées, ponts



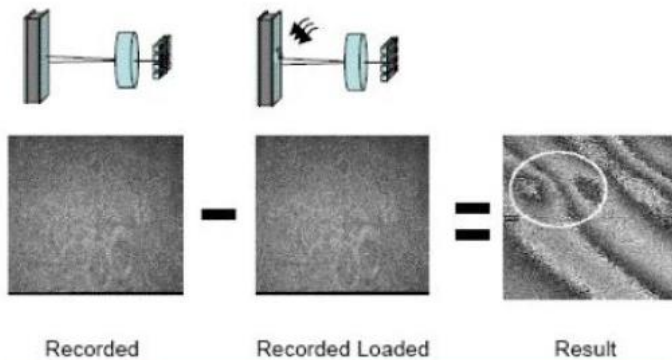
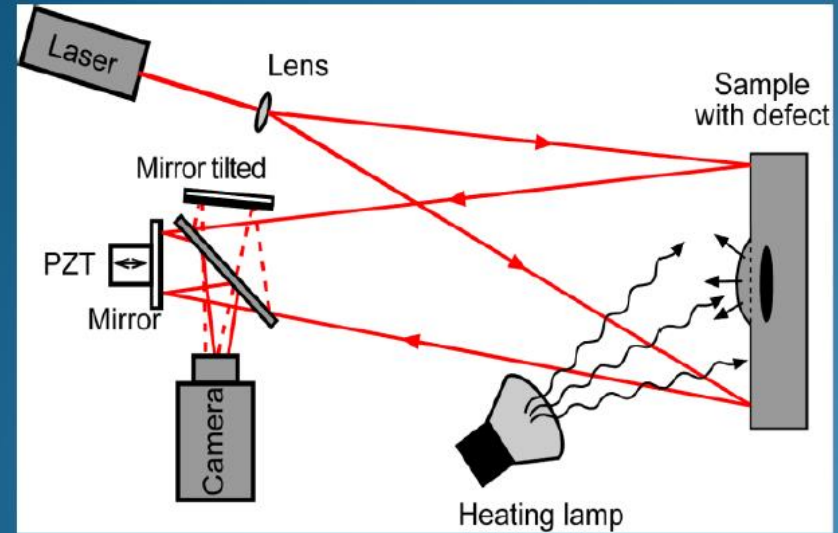
- Tube de centrales thermiques, usines pétrochimiques, raffineries ..





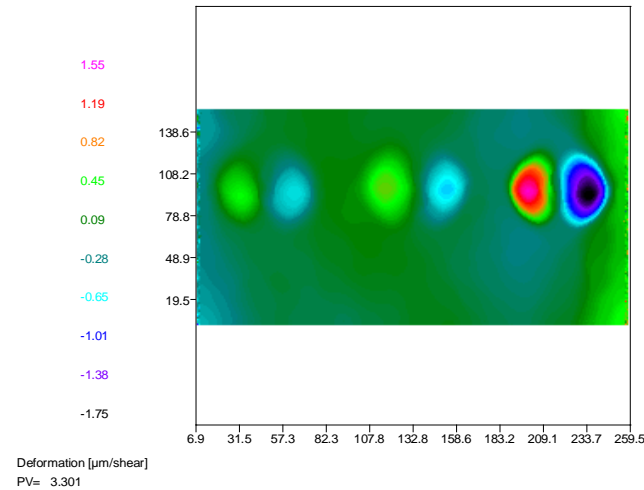
# Shearographie...

## ✓ Principe



# Shearographie

## Exemple



### ✓ Avantages et limitations

- ✓ Sans contact, sans couplant
- ✓ Méthode rapide : inspections de larges surfaces (2 à 115m<sup>2</sup>/h en conditions industrielles)
- ✓ Dimensionnement des défauts possibles
- ✓ Profondeur max. d'inspection limitée (dépend de la taille des défauts)
- ✓ Excellentes performances dans des applications spécifiques (ex : évaluation de joints collés, structures sandwichs)