

# Contrôle non destructif des matériaux – R3.03

## NDT : Non-Destructive Testing

**Objectif : Connaître et mettre en pratique les principales techniques de contrôle non destructifs**

# Contenu

I. Intérêt des contrôles non destructifs (CND)

II. Méthodes surfaciques et volumiques :

- Ressuage
- Thermographie infrarouge
- Magnétoscopie
- Ultrasons
- Courants de Foucault
- Radiographie....

III. Applications pratiques à la détection des défauts dans les pièces,  
choix des méthodes de contrôle

# I – Intérêt des contrôles non destructifs (CND) - NDT : Non-Destructive Testing

Ou Essai Non **Destructif** ou Examen Non Destructif

**Définition** : Diagnostic, mise en œuvre de méthodes pour **examiner sans destruction** des pièces et formuler un avis sur leur état de fonctionnement .

- > détecter, mesurer, localiser, dimensionner, caractériser des défauts sur des éléments sensibles et constater leur évolution : qualifier et émettre un avis sur l'état d'un produit sans l'altérer
- > Contrôle de soudure, pièces forgées, barres, tôles...
- > Nécessité d'une bonne connaissance des techniques, méthodes d'investigation, de leur limite et de leur adéquation avec les critères mis en œuvre.
- Utilisation : industrie automobile (contrôle des blocs moteurs) ; l'aéronautique (poutres, ailes d'avion, nombreuses pièces moteurs, trains d'atterrissage, etc.) ;l'industrie de l'énergie (réacteurs nucléaire, chaudières, tuyauterie, turbines, etc.) ;le ferroviaire en fabrication et en maintenance notamment pour les organes de sécurité (essieux, roues, bogies).
- Pièces dont le fonctionnement est critique ou coût élevé

- -> détecter les failles dans les matériaux qui risquent de provoquer une panne dans les composants ou dans les machines
- > pour éviter un arrêt des installations avec perte de temps conséquente et des frais supplémentaires. -> Le contrôle non destructif a l'avantage de ne pas dégrader les éléments
- > et possibilité de vérifier tous les composants et remplacer ceux qui sont réellement endommagés ou défectueux.

**CND: élément majeur du contrôle de la qualité des produits et de la gestion des risques, assurant ainsi la sécurité des personnes et des biens.**

**COFREND** : formation et Certification régit par :

- la norme française et européenne NF EN 473 intitulée : "Essais non destructifs, qualification et certification du personnel END.
  - Pour l'aérospatiale (aéronautique et espace, COSAC Comité Sectoriel Aérospatial de Certification) : norme française EN 4179 identique à la norme américaine NAS 410.
- > Technique en pleine évolution avec automatisation des techniques, traitement des signaux et données recueillies par les capteurs

# Hétérogénéité et défauts :

Déetecter un défaut dans une pièce, c'est :

- mettre en évidence une hétérogénéité de matière,
- **une variation locale de propriété physique ou chimique.**

**Les défauts sont classés en deux grandes catégories :**

## ● Les défauts de surface :

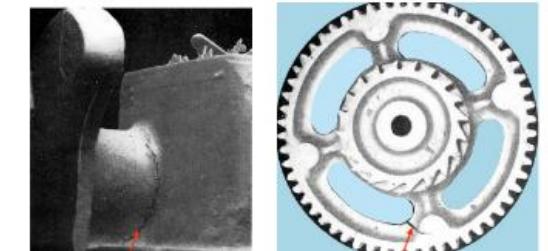
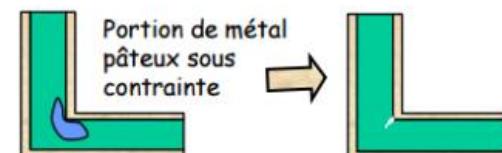
Accessibles à l'observation directe mais pas toujours visibles à l'œil nu, peuvent se classer en deux catégories distinctes :

- les défauts **ponctuels** : il s'agit des criques (fissures pouvant apparaître en surface ou dans la masse d'une pièce forgé), piqûres (bulles de gaz incluses dans les pièces de fonderie), fissures. Pour leur détection on utilise le ressage, la magnétoscopie, les courants de Foucault.
- les défauts **d'aspect** : c'est-à-dire à des plages dans lesquelles une variation de paramètres géométriques ou physiques attire le regard et rend le produit inutilisable.

## ● Les défauts internes:

Ce sont des hétérogénéités de natures, de formes, de dimensions variées, localisées dans le **volume** du corps à contrôler. Pour les détecter on utilise la radiographie, ultrasons ou thermographie infrarouge

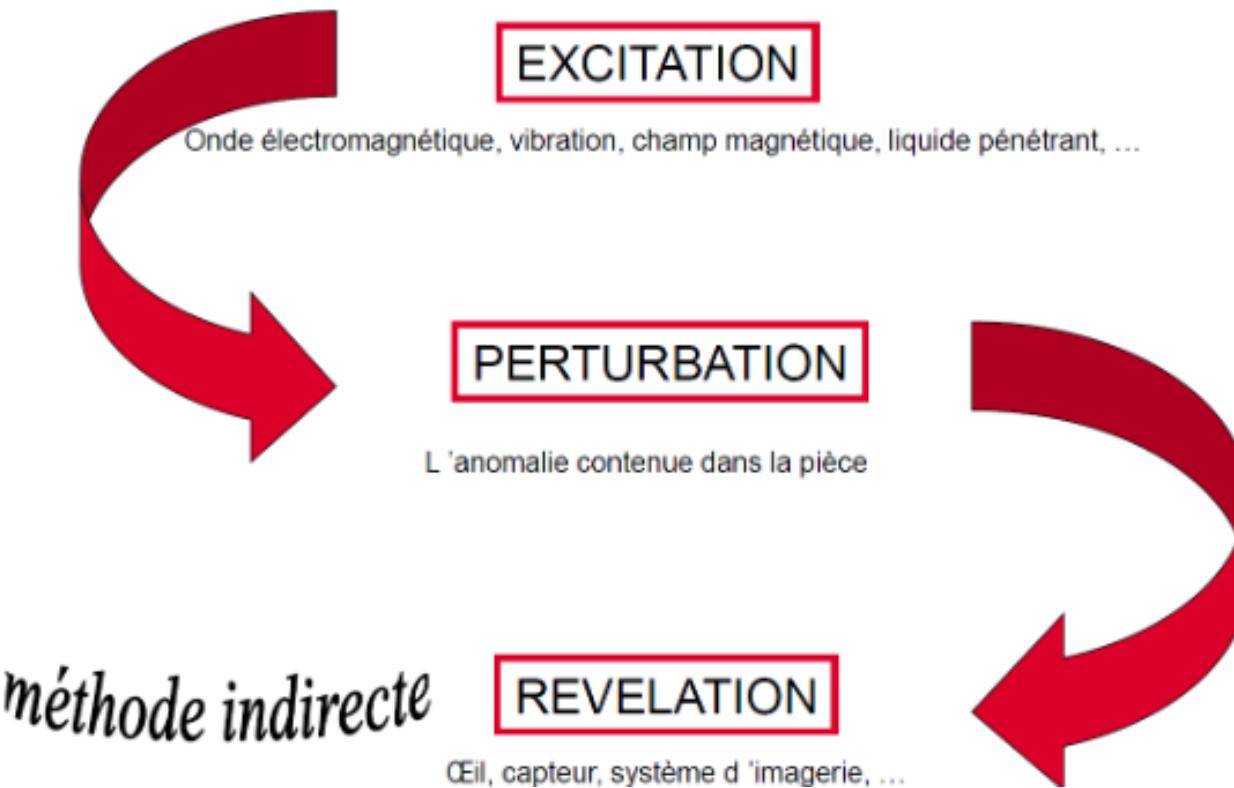
**Les criques:** Il s'agit d'une déchirure à chaud qui se produit au cours de la solidification en présence de contraintes mécaniques. Elle se développe généralement dans les parties chaudes.



# méthodes de détection :

- les méthodes avec une excitation et une détection de même nature
- les méthodes avec une excitation et une détection de natures différentes

## Principe général du CND



## II - Méthodes surfaciques et volumiques

Différentes méthodes de contrôle :

- Les contrôles surfaciques : examen visuel, ressuage, magnétoscopie, courant de Foucault . Elles permettent de déceler que des discontinuités présentes en surface.
- les Contrôles volumiques : radiographies, ultrasons...
- Les méthodes complémentaires (classement en fonction du critère de localisation surfacique ou volumiques n'est pas aussi nette que dans les cas précédents mais sont globales) : thermographie IR, émission acoustique...

La norme EN 473 définit un certain nombre de symboles (abréviation anglaise de la méthode) pour les méthodes usuelles. Ex: Courants de Foucault <-> ET (Electromagnetic Testing), Examen Visuel <-> VT

# Visual Testing

- Mise en œuvre simple : L'inspection visuelle peut être réalisée à l'œil nu (directe) ou au moyen d'accessoires et d'appareils (indirects) : loupe, microscope, endoscope (visualiser l'intérieur de conduits ou de cavités inaccessible à l'œil), boroscope (voir dans des endroits extrêmement petits et difficiles d'accès)
- L'observation de la surface nécessite un éclairage optimal (rayonnement visible, source de lumière blanche ou monochromatique) et surtout une bonne connaissance des matériaux et de leurs défauts (ex: défaut soudure).
- Généralement, il précède tout autre CND (Contrôle Non Destructif) et est complémentaire à la mise en place d'un contrôle plus approfondi.
- Inconvénients : Définition incomplète des critères, difficulté de repérage (espace), parfois onéreux (endoscope)



Endoscope : tube optique muni d'un système d'éclairage. Couplé à une caméra vidéo qui retransmet l'image sur un écran.



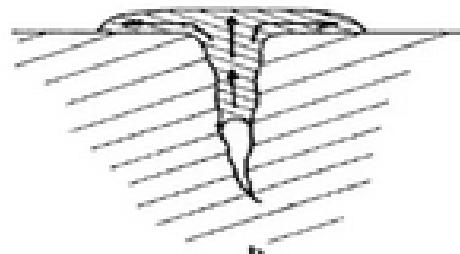
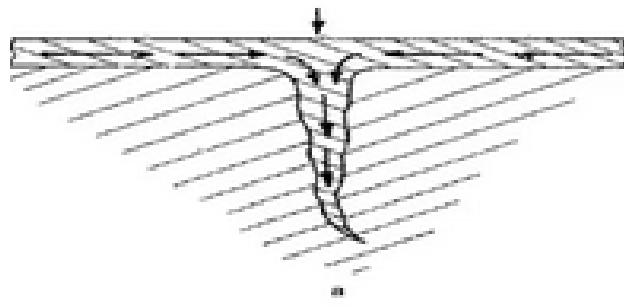
boroscope : fibres optiques situées dans un câble pour visualiser une image située à l'extrémité de celui-ci

# Le contrôle par Ressuage (PT)

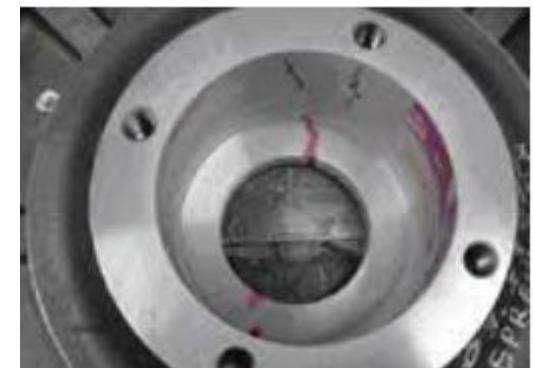
- Le ressuage permet la détection et la localisation précise de défauts de surfaces (cavités débouchantes, ex: fissures) **sur tous métaux et certains matériaux non métalliques (céramiques, matières plastiques...).**
- Elle consiste, après nettoyage soigné de la pièce, à badigeonner (par immersion ou par pulvérisation électrostatique) la pièce avec un liquide (fluorescent ou coloré en rouge) : C'est la **phase d'excitation**.
- Le liquide (pénétrant) pénètre dans les discontinuités (défaut : c'est la **phase de perturbation**)
- Après nettoyage de la cible, le liquide resté dans les fissures va ressuer (remonter à la surface) et les révéler: c'est la **phase de révélation**. On observe la tâche résultante sous l'éclairage adapté.

Avantages : simplicité de mise en œuvre. Mise en évidence des discontinuités de 1 µm d'ouverture (100 fois plus fines qu'un cheveu).

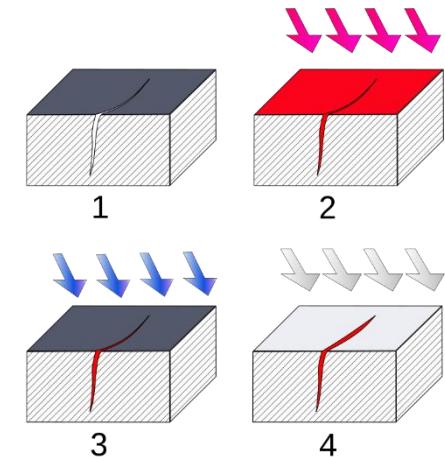
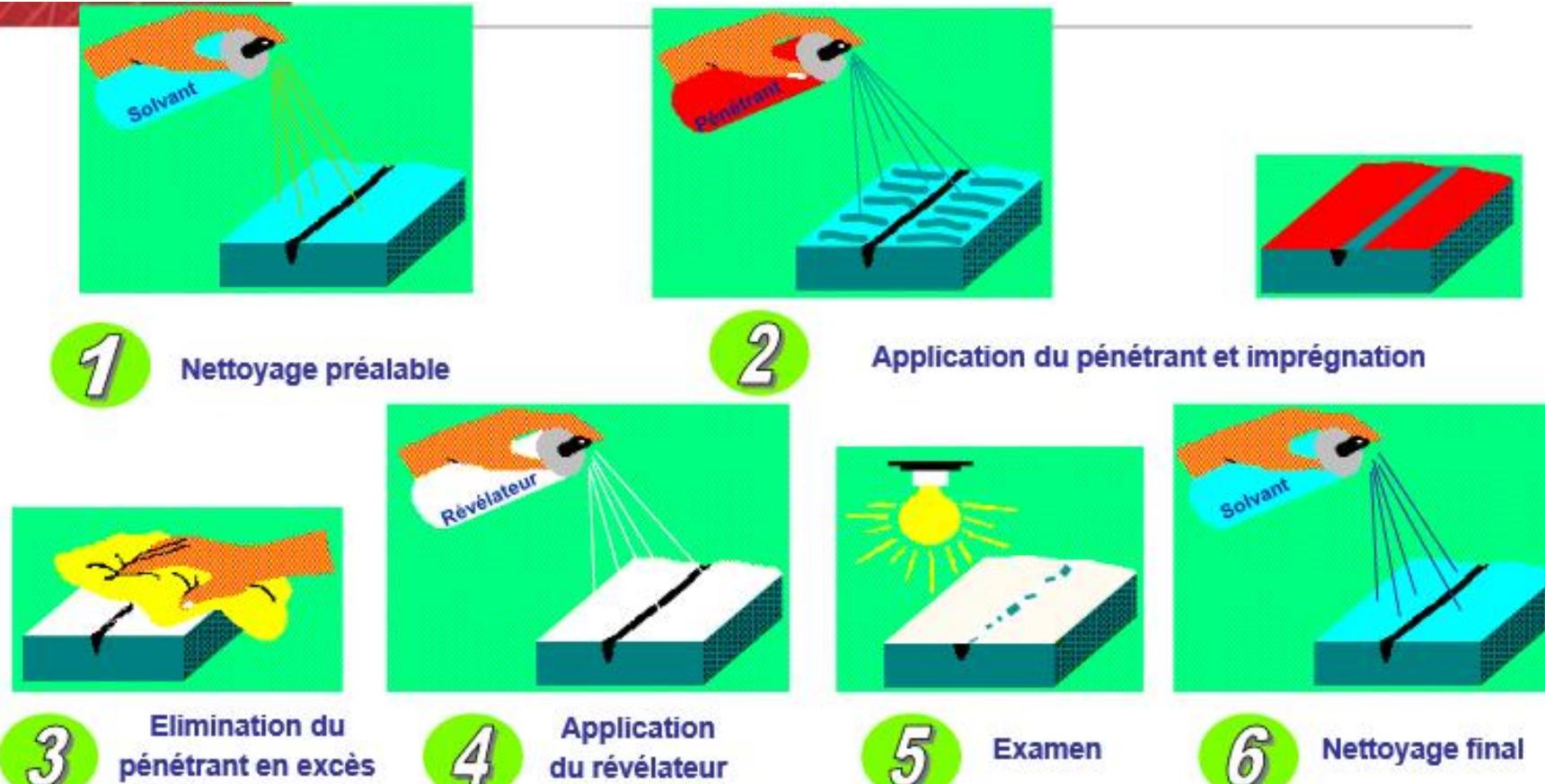
**Inconvénient:** Appréciation de la profondeur des défauts n'est pas possible (Uniquement sur défauts surfaciques) et sur matériaux non absorbant, non automatisable, nécessite l'utilisation de produits non récupérables, voire contaminés après utilisation. **Matériaux non poreux exclusivement.**



a) Introduction du pénétrant dans les discontinuités par capillarité  
b) Phénomène de ressuage après élimination de l'excès de pénétrant.



# Déroulement d'un contrôle par Ressuage



1. Coupe d'un matériau comportant un défaut débouchant type fissure
2. La surface du matériau est enduite de pénétrant.
3. Le pénétrant est éliminé par lavage et la pièce est ensuite séchée.
4. Le matériau est enduit de révélateur. Le défaut devient visible.

[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/3/3b/Ressuage\\_principe\\_2.svg/800px-Ressuage\\_principe\\_2.svg.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/3/3b/Ressuage_principe_2.svg/800px-Ressuage_principe_2.svg.png)

CETIM : Centre Technique des Industries Mécaniques. Centre d'expertise mécanique français dont l'objectif est de promouvoir le progrès des techniques, de participer à l'amélioration du rendement et à la garantie de qualité dans l'industrie.

# La Magnétoscopie (MT)

- Elle est utilisée pour détecter de manière précise des discontinuités (défauts) de surface ou sous-jacentes (dans certaines conditions, jusqu'à quelques millimètres de profondeur) **sur des matériaux exclusivement ferromagnétiques** (fer, le nickel, le cobalt et certains de leurs alliages.)
- Elle est plus "restrictive" que le ressage mais **beaucoup plus rapide**.
- Principe :
  - 1) **Phase 1 – l'excitation**: Elle consiste à aimantée (soit **par passage d'un champ magnétique**, soit **par passage de courant**) la pièce à contrôler. 3 paramètres à prendre en considération : **Nature** (sin, monophasée, triphasée...), **Intensité** (2000 à 4000 A.m<sup>-1</sup> Norme NF A 09.125) **et Direction du champ magnétique H** ( $\perp$  dir. Défaut  $\Rightarrow$  contrôle suivant 2 di.r H orthogonale)
  - 2) **Phase 2 - la perturbation** : c'est l'interaction entre le défaut et H. Paramètre à prendre en compte : **Nature ferromagnétique** (perméabilité max : méthode efficace), **géométrie** de la pièce (lignes induction influencée) et **nature du milieu constitutif** (si  $\mu_{\text{défaut}}$  proche matériau  $\mu_{\text{matériau}}$  alors méthode inefficace).
  - 3) **Phase 3 – la révélation** : application d'un « révélateur magnétique », composé de fines particules d'oxyde de fer (limaille de fer très fine) appliqué soit par voie sèche (poudre) soit par voie humide (en suspension dans un liquide) sur la zone à examiner pour déceler un éventuel défaut : en effet, en présence d'une discontinuité (défauts), les particules magnétiques seront attirées vers la zone défectueuse et fournissent une signature particulière caractéristique du défaut mis en évidence. On dit aussi que les lignes du champ magnétique subissent une distorsion (déviation) qui crée une « fuite ». Paramètres : **nature** des particules, **volume et géométrie**, **variation du champ à l'aplomb du défaut** et **conditions d'éclairages**.

On observe le spectre électromagnétique résultant sous éclairage adapté : soit en lumière blanche artificielle ou lumière du jour, soit sous rayonnement ultraviolet (UV-A) ou lumière bleue actinique, selon le type de produit indicateur utilisé.

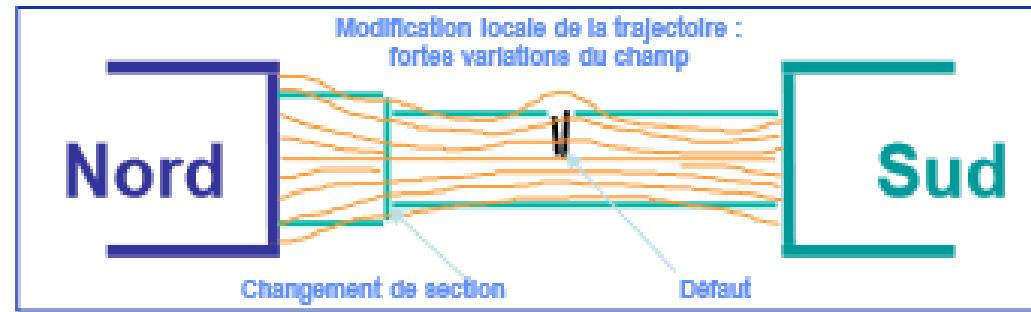
# 1. L'EXCITATION

Champ magnétique



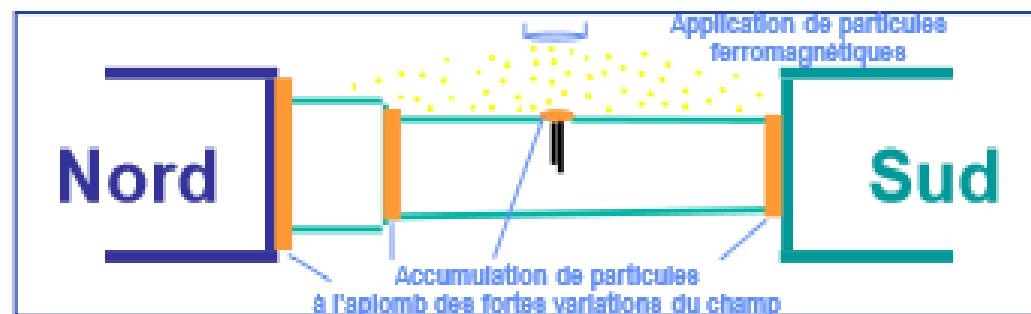
# 2. LA PERTURBATION

Défaut de la surface

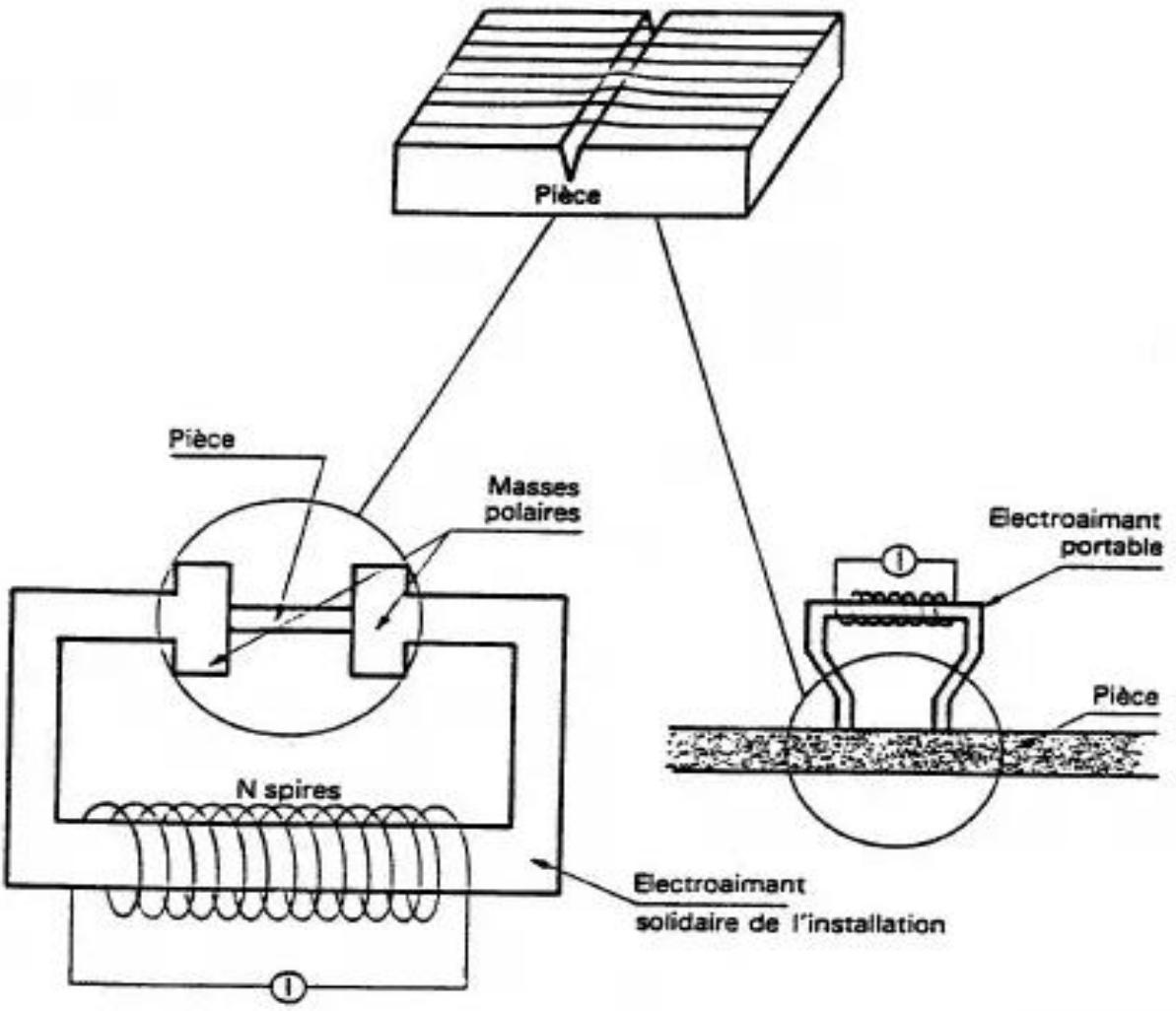


# 3. LA REVELATION

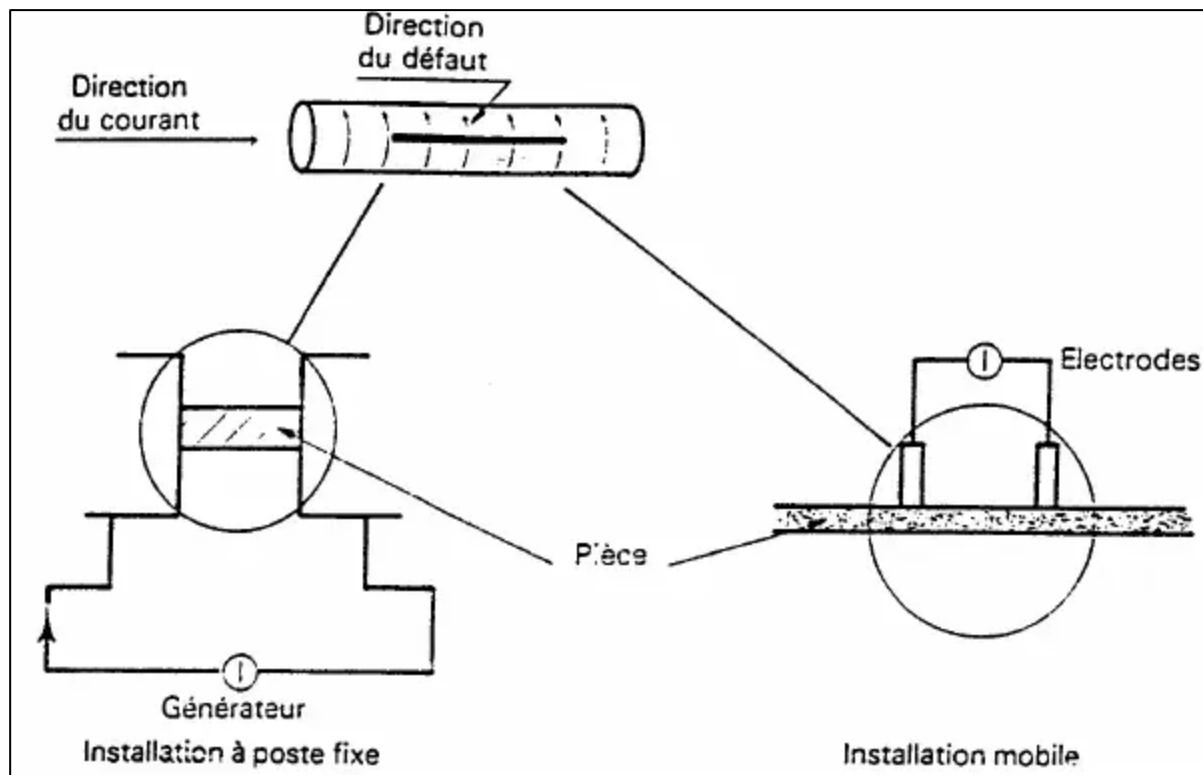
Accumulation de particules magnétiques  
Eclairage







Représentation schématique des méthodes d'aimantation **directes** par électro-aimant:  
La pièce est aimantée totalement ou localement par l'intermédiaire d'un électro-aimant

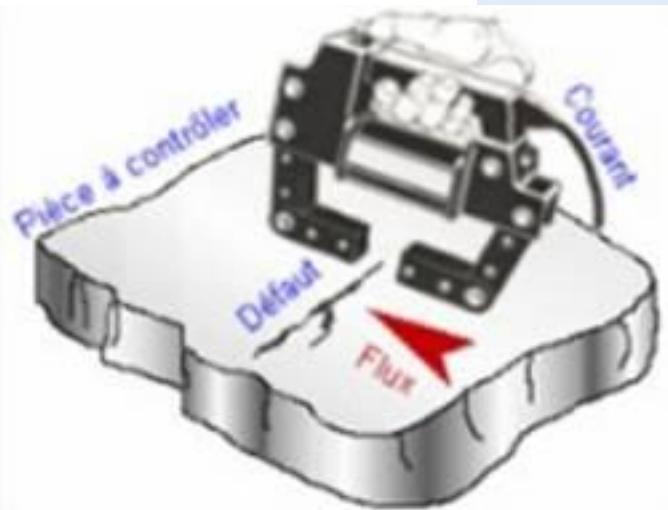
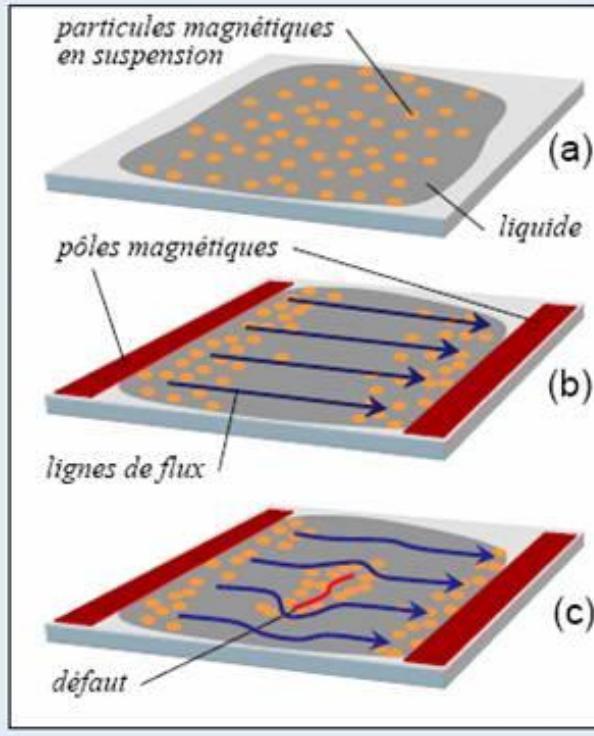


Méthode indirecte:  
Aimantation par passage de courant (totalement ou localement) dans la pièce

# Examen magnétique : principe général

- Des particules magnétiques en suspension sont dispersées sur la surface à examiner (a)
- Les pôles créent une induction dans une pièce magnétique (b).
- Les particules sont attirées vers les pôles (b).
- En présence d'un défaut (c) :
  - les lignes de flux sont déviées ;
  - une tension apparaît entre les bords du défaut ;
  - les particules s'accumulent le long des bords.

[http://scharwatt.fr/CND/magnetoscopie\\_fichiers/image004.jpg](http://scharwatt.fr/CND/magnetoscopie_fichiers/image004.jpg)



[http://scharwatt.fr/CND/magnetoscopie\\_fichiers/image002.jpg](http://scharwatt.fr/CND/magnetoscopie_fichiers/image002.jpg)



<https://www.technisonic.fr/wp-content/uploads/Photo-Magneto-400x400.jpg>



[https://www.savoycontrol.fr/wp-content/uploads/2018/09/IMG\\_4803-e1631020997575.jpg](https://www.savoycontrol.fr/wp-content/uploads/2018/09/IMG_4803-e1631020997575.jpg)

Marie SBAJ - marie.sabaj@univ-orleans.fr

Perméabilité d'un matériau :  $\mu_r = \frac{B}{\mu_0 \cdot H}$  avec  $\mu_0 = 4 * \pi * 10^{-7} Vs / Am$

Norme NF A 09.125: Le caractère ferromagnétique du matériau compatible avec l'exécution du contrôle par magnétoscopie est défini comme présentant : **une induction d'au moins B=1 Tesla lorsqu'il est soumis à un champ magnétique d'excitation H de 2400 A.m<sup>-1</sup>.**

Inconvénients : - seulement les matériaux ferromagnétiques et  
- sensibilité dépend de l'orientation de magnétisation du défaut.

# Le contrôle par courants induits ou courants de Foucault

## - Electromagnetic Testing or Eddy-current testing

Phénomène découvert par le physicien français Léon Foucault en 1851 .

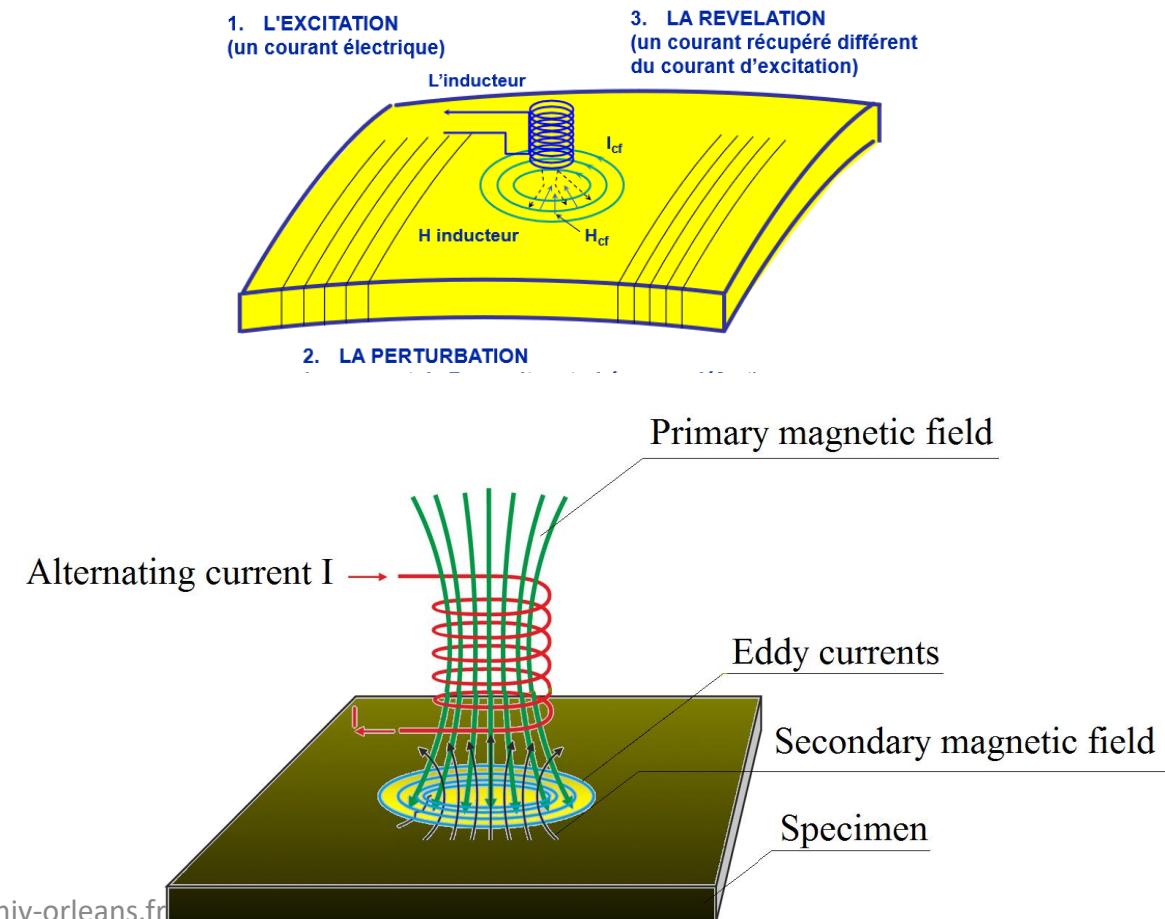
Les courants de Foucault sont les courants électriques créés dans un matériau conducteur lorsqu'il est placé dans un champs magnétique variable.

**Principe (basé sur le phénomène d'induction électromagnétique)** : il consiste à créer, dans des **matériaux conducteurs électriques**, des courants induits (appelés courants de Foucault) par un champ magnétique variable, au moyen d'un capteur.

**Excitation** : création de courants de Foucault dans le matériau à contrôler en plaçant une bobine parcourue par un courant alternatif

**Perturbation** : la trajectoire du courant est perturbé par des variations locales  $\Rightarrow$  modification de l'impédance du capteur

**Révélation** : Comparaison du signal de déséquilibre par rapport au signal de référence pour conclure sur la présence ou l'absence de défauts.

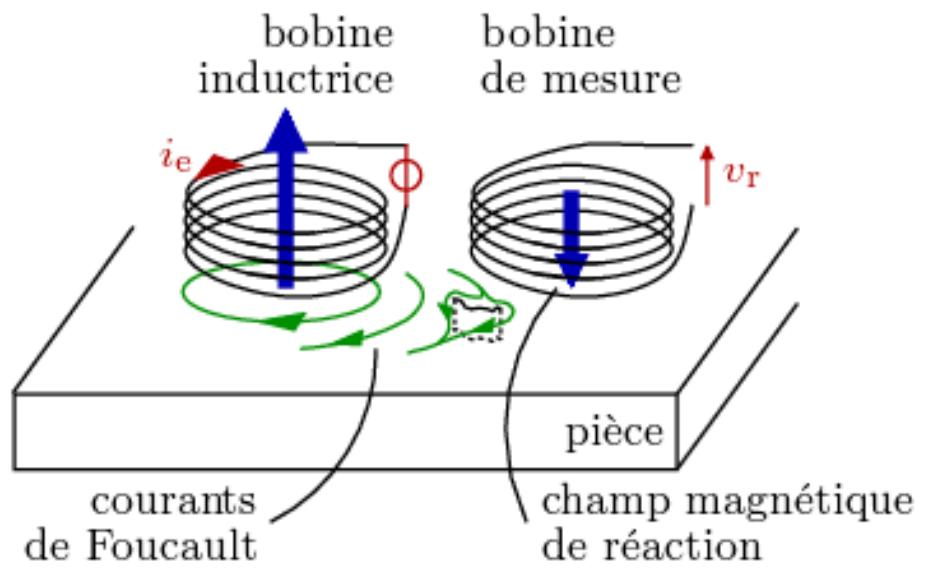


- En présence d'une anomalie (défaut) dans la pièce contrôlée, les courants induits sont perturbés, entraînant ainsi une variation de l'impédance apparente du capteur qui dépend de la nature de l'anomalie et de sa dimension en volume.
- C'est l'analyse de cette variation d'impédance qui fournit les indications exploitables pour effectuer le contrôle. Cette variation est traduite en amplitude et phase sur un écran sous forme de courbes dites de « Lissajous ».
- L'interprétation des signaux recueillis s'effectue par comparaison de ceux relevés dans le matériau contrôlé avec ceux d'une pièce de référence, comportant des anomalies représentatives des phénomènes recherchés.

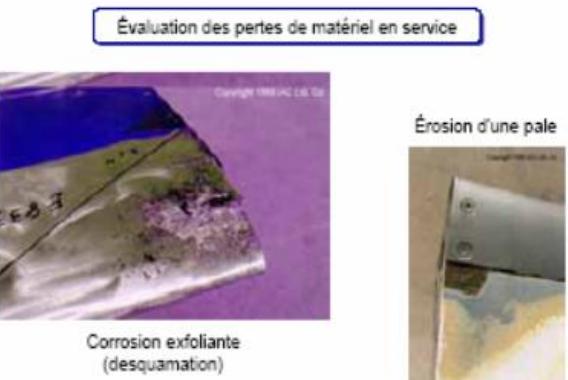
Cette méthode non seulement permet de détecter des défauts, mais de mesurer l'épaisseur de l'objet de contrôle.

Avantages : technique sans contact. Précision de l'ordre du nanomètre

Inconvénient : matériaux conducteurs. Mise en œuvre difficile pour les pièces de forme complexe. Faible pénétration des courants induits, selon l'effet dit « de peau », qui rend difficile la détection de défauts enfouis.



## Applications en aéronautique



### Méthode :

- Une bobine est parcourue par un courant alternatif à haute fréquence.
- Le champ électromagnétique de la bobine induit des courants de Foucault dans l'objet à mesurer.
- Les courants induits engendrent un champ magnétique alternatif de réaction sortant de la pièce à inspecter.
- Les défauts superficiels dévient les lignes des courants de Foucault, et modifient le champ magnétique résultant.
- La variation du champ magnétique est enfin mesurée au moyen d'un élément sensible au champ magnétique alternatif, qui peut être une bobine ou un capteur de champ magnétique.

Remarque : Les lignes de champ à haute fréquence en provenance de la bobine du capteur pénètrent sans problème les matières non métalliques, ce qui permet des mesures, même en cas de fort degré d'encrassement, de pression, et d'huile. Cette propriété particulière permet par ailleurs la réalisation de mesures sur objets métalliques revêtus de matière plastique, ce qui permet par ex. de mesurer les épaisseurs de couches des revêtements (peinture, dépôts électrolytiques, matières plastiques, anodisation...) ou des traitements thermochimiques (cémentation, nitruration...).

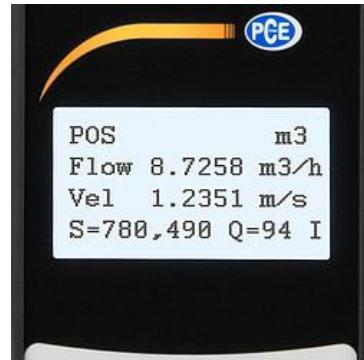
# Le contrôle par Ultrason

Un appareil de mesure par ultrason permet de façon non destructive et pour un contrôle de qualité efficace:

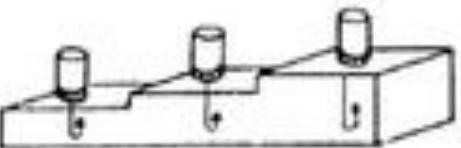
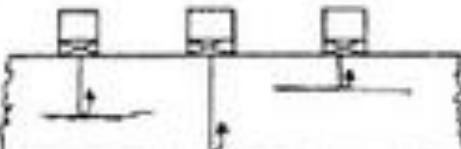
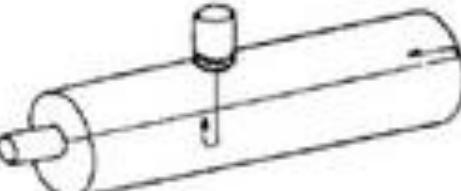
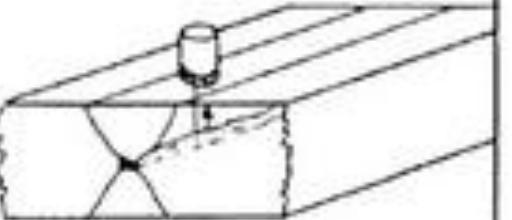
- De détecter des fissures, des défauts d'homogénéité dans le matériau (acier, acier inoxydable, aluminium),
- Vérifier des soudures, contrôle des assemblages soudés
- Contrôler des produits forgés, moulés, laminés,
- Contrôler des assemblages vissés et déterminer l'effort de serrage qui assure la rigidité d'un assemblage
- Contrôler des produits semi-finis

Il peut aussi être utilisée pour:

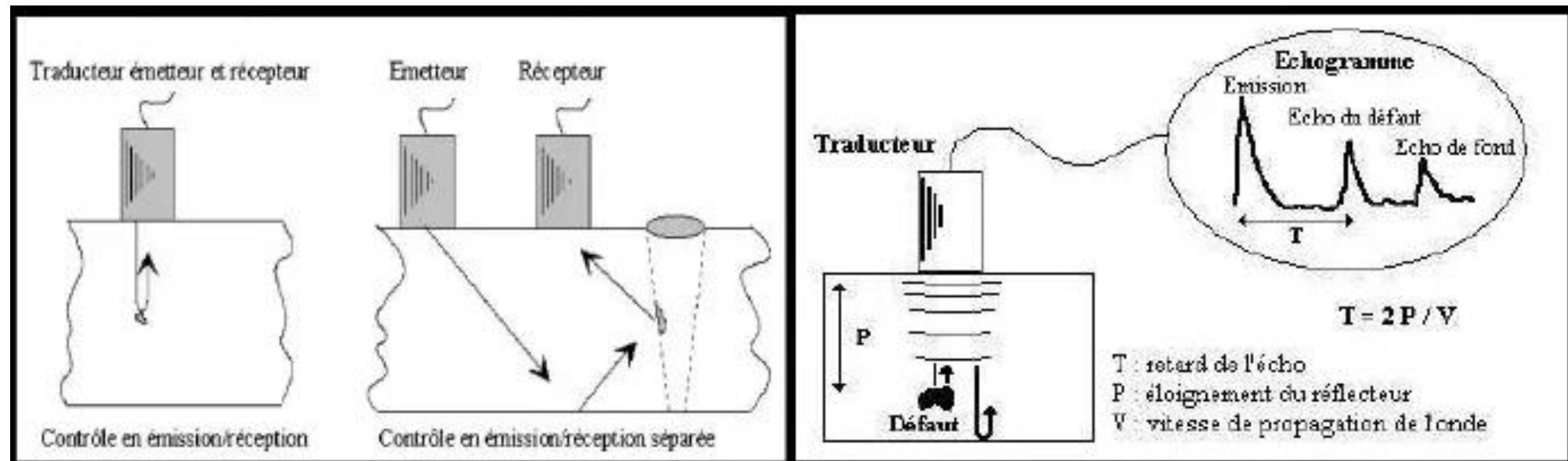
- mesurer l'épaisseur d'un matériau
- ou contrôler des épaisseurs de manière très simple et quand des techniques traditionnelles ne sont pas utilisables (exemple : contrôle de l'épaisseur résiduelle de la paroi d'une cuve contenant un produit corrosif)
- Mesurer la dureté ou le débit d'une tuyauterie



## Domaine d'utilisation :

a) Mesure d'épaisseurs	b) Contrôle de tôles	c) Contrôle de ronds
		
d) Contrôles de soudures	e) Soudures d'angle	f) Détection de corrosion
		

Le principe est le transfert d'une onde **acoustique** à travers un matériau et en fonction des défauts constatés, une partie de l'énergie est réfléchie sur un capteur (principe utilisé en échographie médicale). Autrement dit le contrôle par ultrason consiste à observer les **échos** produits par un manque ou défaut de matière lors de la propagation d'une vibration **de très haute fréquence et de très courte durée** dans le matériau.



Les ultrasons sont des vibrations mécaniques de la matière fluide ou solide, de même nature que les sons, dont la fréquence est supérieure au domaine audible d'une oreille humaine normale (16Hz à 16KHz).

0-----16 Hz	16 Hz----16. $10^3$ Hz	16. $10^3$ Hz-----150. $10^6$ Hz	Plus que 150. $10^6$ Hz
Infrasons sons	Zone audible	Ultrasons	Hyper sons

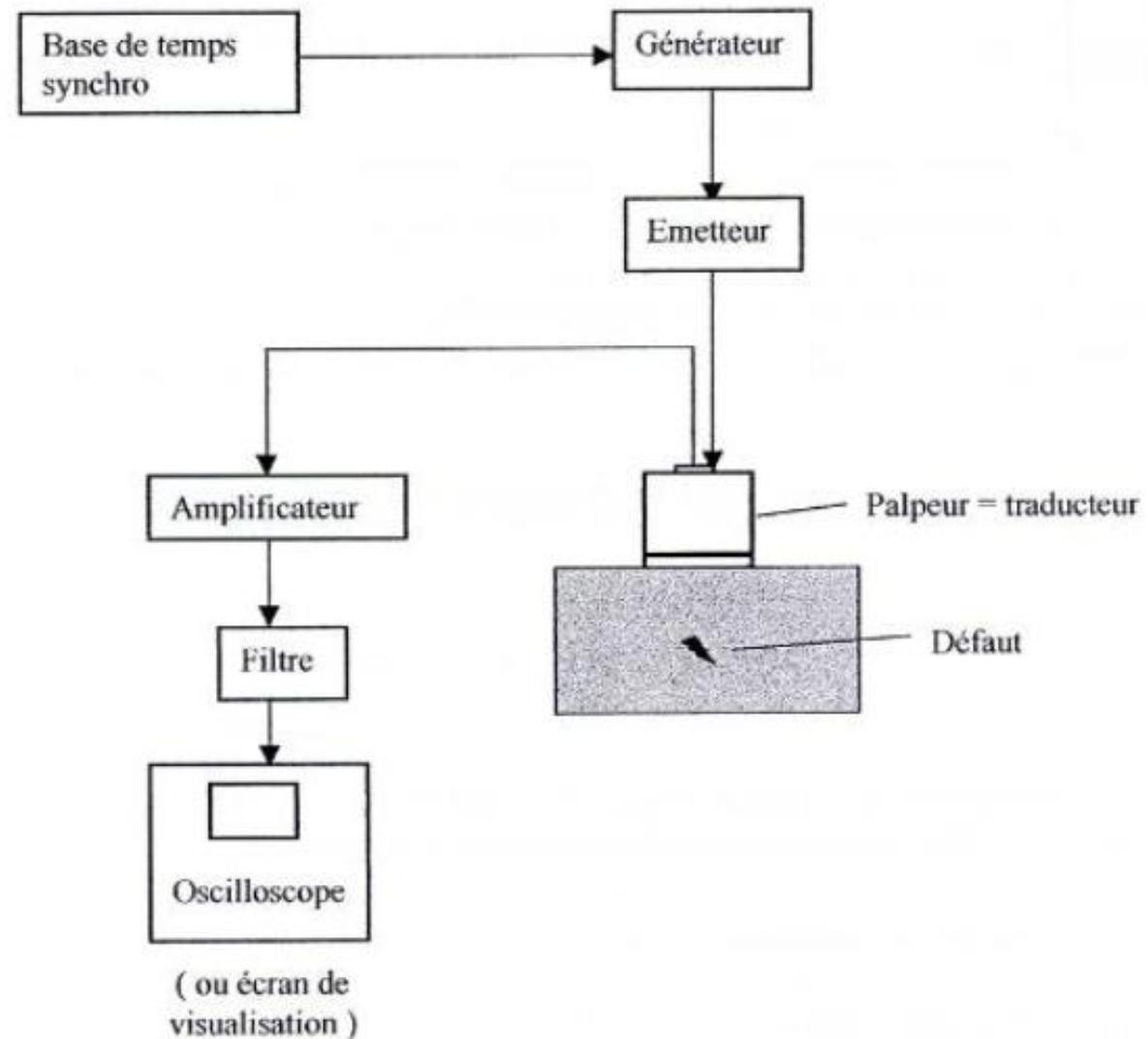
Marie SBAI - marie.sbai@univ-orleans.fr

# Fonctionnement d'un appareil à ultrason

1- Un générateur envoie des impulsions (échos) à une fréquence de répétition de quelques centaines de hertz grâce à une horloge. Les impulsions envoyées au palpeur sont transformées par ce dernier en onde ultrasonore

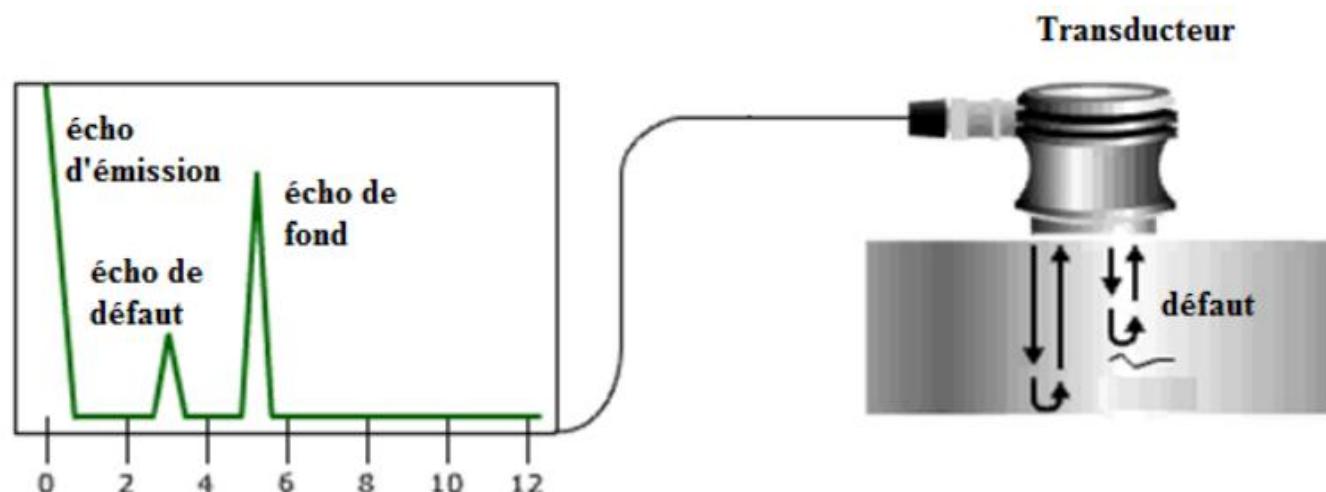
2- Lorsqu'il y a un défaut, une partie du signal écho est réfléchie par le défaut (impédance acoustique différente du matériau) avant que l'autre partie du faisceau US n'atteigne le fond de la pièce.

3- Il apparaît alors sur l'écran de visualisation, un écho intermédiaire qui révèle sa position et dont l'amplitude est caractéristique de la taille et orientation du défaut.



### Remarques :

- Parfois il est nécessaire d'ajouter un couplant (gel) entre le palpeur et la pièce pour assurer la transmission des ondes.
- La vibration est transmise et reçue par un capteur (qui peut être le même que l'émetteur). appelé palpeur ou transducteur.
- Le capteur ultrasonore comporte un élément piézoélectrique apte à transformer un signal électrique en vibration mécanique et inversement
- le signal reçu et visualisé sur l'écran est d'abord traité par un système d'amplification à large bande pour diminuer le bruit.



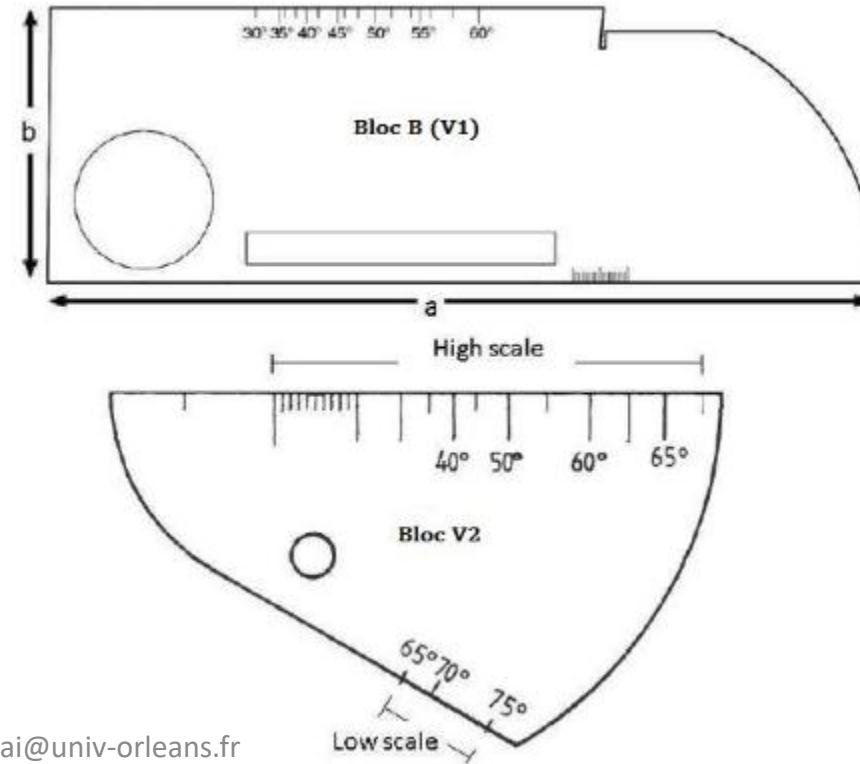
Exemple du contrôle d'une tôle.

- L'écran de l'oscilloscope montre un pic d'entrée à gauche et un pic de sortie à droite. La distance entre les deux pics correspond à l'épaisseur de la tôle.
- Le palpeur émet au dessus d'un défaut, il y apparaît un pic correspondant au défaut. La position relative du pic créé par le défaut permet de connaître sa profondeur.

# Partie pratique du contrôle par US: L' étalonnage

Avant tout contrôle, il est nécessaire d'étalonner les caractéristiques du palpeur et la base de temps du générateur à ultrasons. On utilise à cette fin des blocs d'étalonnages.

On utilise un acier non allié dont les vitesses de propagation  $V_{OL}$  et  $V_{OT}$  sont respectivement 5920 et 3255  $\text{m.s}^{-1}$ , d'épaisseur 25 mm et de largeur 100 mm



## 2) Méthodes de contrôles par écho d'anomalie i.e par réflexion (la plus employée):

Les signaux d'échos sont réfléchis par les anomalies ou défauts rencontrés lors de l'exposition de la pièce contrôlée.

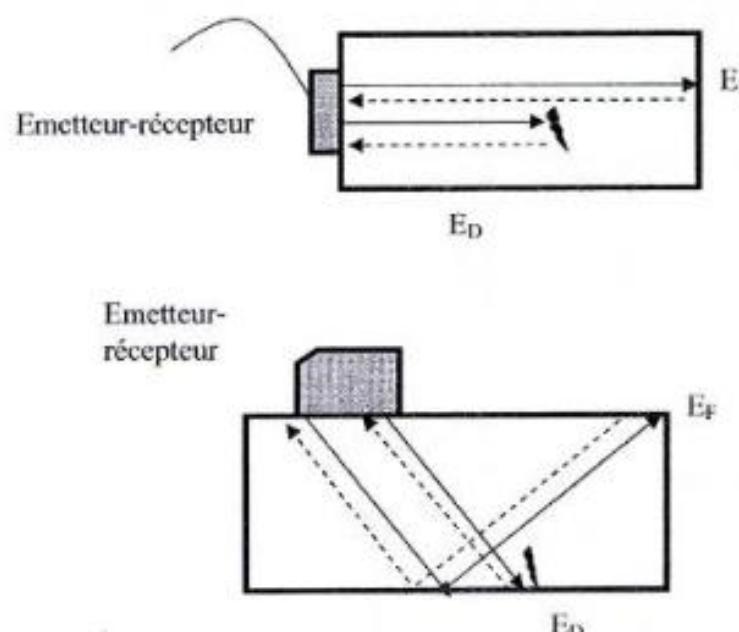
L'écho est généralement recueilli par le même élément sensible (transducteur) en émission-réception.

L'opérateur déplace le traducteur (ou transducteur ou palpeur) sur la surface de la pièce à contrôler

La position des signaux d'écho sur l'écran de l'appareil de contrôle permet de déterminer la distance parcourue

par l'onde ultrasonore et par conséquent la position du réflecteur(défaut...) qui est à l'origine de l'écho.

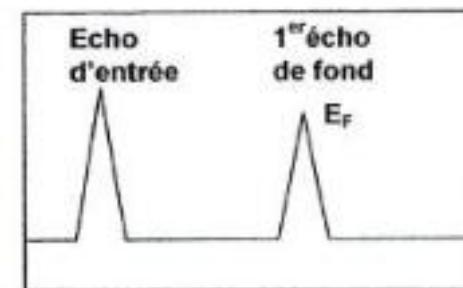
On analyse ici les échos de défauts qui se situent entre les échos d'entrée et les échos de fond.



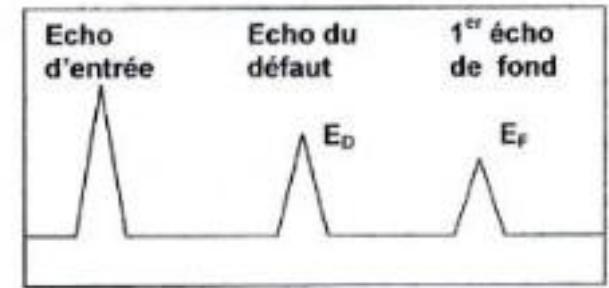
Ondes longitudinales

Ondes transversales

### CONTROLE PAR REFLEXION



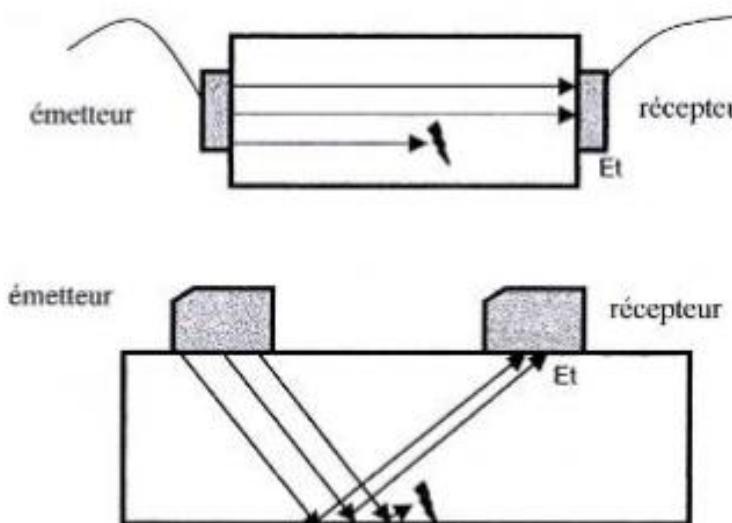
L'impulsion se réfléchie sur le fond de la pièce.



L'impulsion se réfléchie sur un défaut de la pièce.

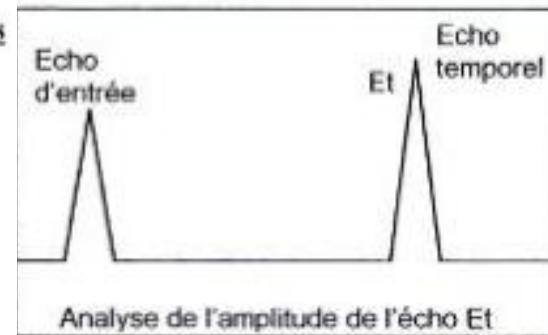
## Ou Contrôle par transmission

On utilise deux capteurs (un émetteur et un récepteur) séparés par la pièce à contrôler. Le récepteur reçoit une pression acoustique qui est fonction de la pression générée par l'émetteur et de l'absorption du matériau. Un défaut sur les parcours ultrasonores se traduit par une absorption locale plus importante que dans le reste de la pièce. Cette technique de faible résolution est généralement utilisée sur des produits absorbants, pour des pièces de fortes épaisseurs avec de gros défauts.

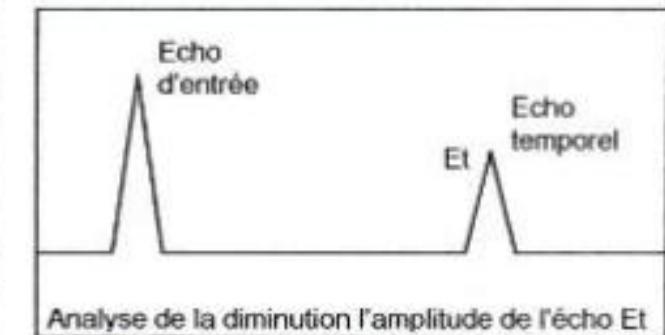


### Contrôle par transmission

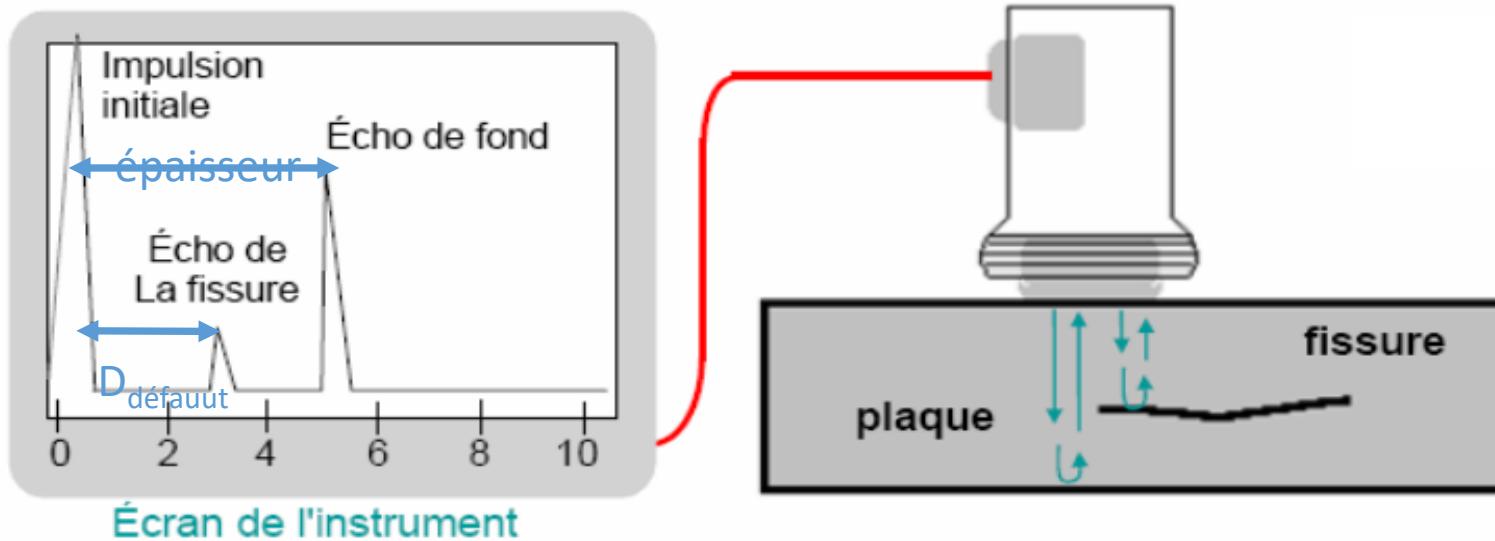
#### Ondes longitudinales



#### Ondes transversales



L'amplitude de l'écho est une indication de la taille de la discontinuité alors que le délai d'arrivée nous informe sur sa profondeur



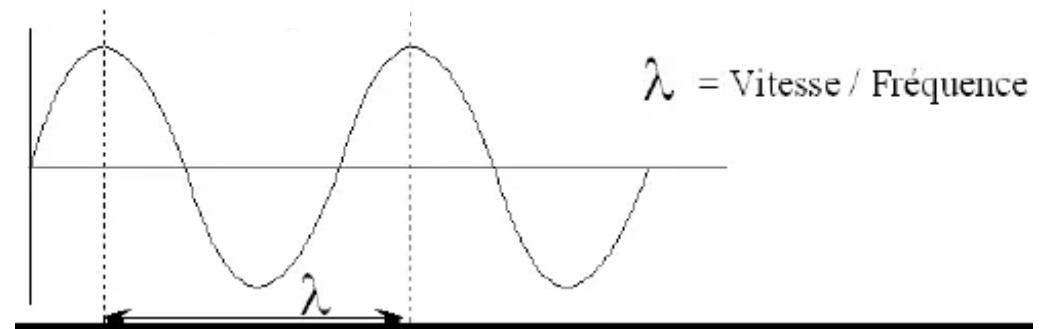
On peut donc déterminer :

- l'épaisseur de la pièce à contrôler
- La distance entre le palpeur et le défaut

# Rappel sur les ondes

Les ondes sont caractérisées par :

- la vitesse de propagation qui ne dépend que du matériau dans lequel les ondes se déplacent ( $v$ ) ;
- la longueur d'onde  $\lambda$  qui est la périodicité spatiale des oscillations i.e la distance entre deux maxima de l'oscillation
- La fréquence ( $f$ ) correspond au nombre d'**oscillations** par seconde



On rappelle que la longueur d'onde  $\lambda$ , la vitesse de propagation  $v$  et la fréquence  $f$  sont

$$\text{reliées par : } \lambda = \frac{v}{f} = v \cdot T$$

$\lambda$  : longueur d'onde en m.

$f$  : fréquence de l'onde, en hertz (Hz)

$T$  : période de l'onde, en seconde (s) et  $T = 1/f$ .

$v$  : vitesse de l'onde, en m/s.

## Rappel sur les ondes

Les sons d'une manière générale sont des ondes élastiques, elles ne diffèrent entre elles que par leurs fréquences.

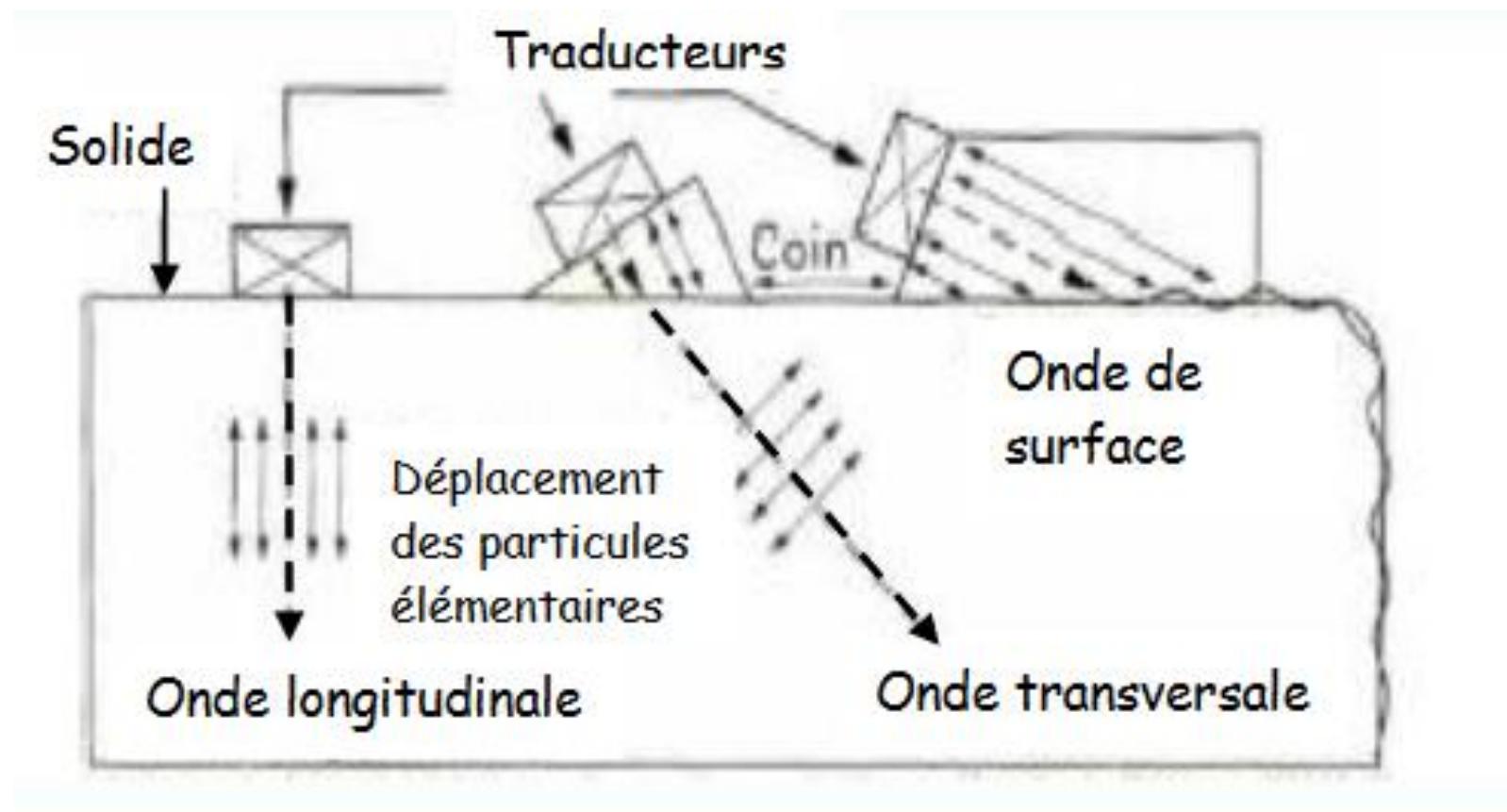
0-----16 Hz	16 Hz---- $16 \cdot 10^3$ Hz	$16 \cdot 10^3$ Hz----- $150 \cdot 10^6$ Hz	Plus que $150 \cdot 10^6$ Hz
Infrasons sons	Zone audible	Ultrasons	Hyper sons

En contrôle non destructif, pour qu'on puisse détecter un défaut, il faut que celui-ci ait une taille au moins égal à  $\lambda/2$ .

C'est pourquoi, on utilise des fréquences élevées, comprises en général entre 16 kHz et 150 MHz.

Rq: Dans le cas des matériaux métalliques, on utilise des ondes comprises entre 1MHz et 20MHz

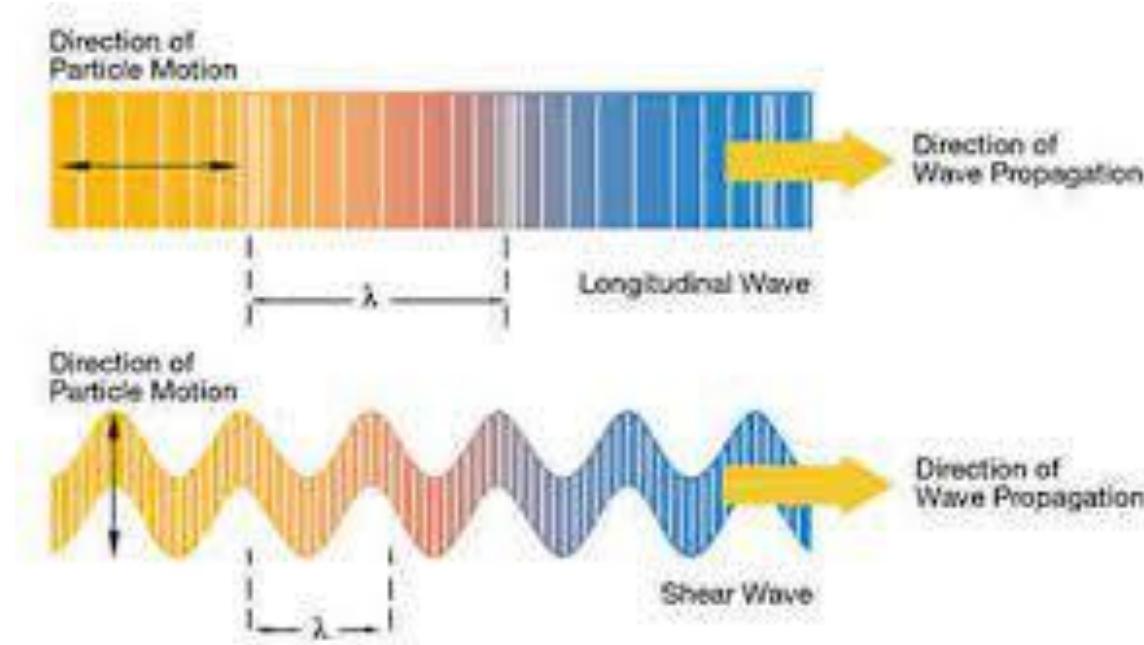
# Type d'onde et mode de propagation



# Rappel sur les ondes

Il existe 3 types d'ondes :

- **Ondes longitudinales** : le mouvement des particules du matériau est parallèle à la direction de propagation de l'onde. Ce sont les ondes les plus couramment utilisées pour le contrôle par ultrasons et ce sont celles qui voyagent le plus rapidement, soit environ 5900 mètres par seconde (0,23 pouce par microseconde) dans l'acier.



- **Ondes transversales** : Les particules du matériau se déplacent perpendiculairement à la direction des ondes. Elles sont utilisées dans la plupart des inspections par sonde d'angle pour la recherche de défauts par ultrasons. La vitesse de propagation des ondes transversales dans l'acier est d'environ 3250 mètres par seconde (0,128 pouce par microseconde). Ce type d'ondes ne se propage que dans les solides. On ne les trouve ni dans les liquides, ni dans les gaz.
- **Ondes de surface** ou ondes de Rayleigh: se déplacent sous forme de mouvement oscillatoire à la surface de la pièce inspectée à une profondeur d'une longueur d'onde. Les vagues océaniques représentent un exemple d'ondes de surface. Les ondes de surface peuvent servir à détecter les fissures débouchantes à la surface d'une pièce.

## PROPRIETES PHYSIQUES DES MATERIAUX

### MASSE VOLUMIQUE $\rho$

Elle est définie comme étant le rapport de la masse d'un corps par son volume.

$$\rho = m/V$$

avec  $\rho$  en  $\text{kg/m}^3$

$m$  en kg

$V$  en  $\text{m}^3$

### MODULE DE YOUNG E (ou module d'élasticité longitudinale)

Dans le domaine élastique, la contrainte est proportionnelle à l'allongement (Loi de Hooke). Pour les forces de traction et de compression, la constante de proportionnalité s'appelle module d'élasticité longitudinale (ou module d'YOUNG), avec  $E = \sigma/\epsilon$

avec  $\sigma$  : contrainte principale

$\epsilon$  : dilatation linéaire correspondante

Le module d'YOUNG s'exprime en  $\text{N/mm}^2$  ou en Pascal (Pa).

Les valeurs de  $E$  sont très peu affectées par la composition des aciers. En revanche, la température affecte sensiblement les valeurs de  $E$ .

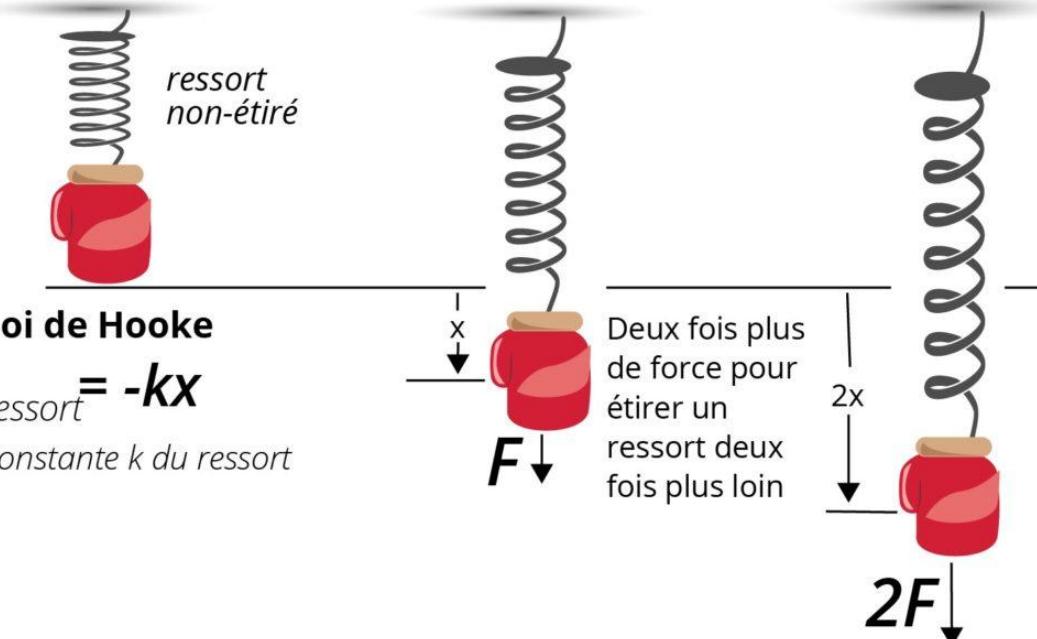
On suppose que le rapport  $E(\theta) / E(20^\circ\text{C}) = f(\theta)$

avec  $f(\theta) = 1$  à  $20^\circ\text{C}$

$94\% E$  0,948 à  $200^\circ\text{C}$

$87\% E$  0,875 à  $400^\circ\text{C}$

$77\% E$  0,775 à  $600^\circ\text{C}$



La loi de Hooke permet de relier la **déformation** à la **contrainte mécanique** dans le domaine élastique linéaire, grâce à un module portant le nom de : **Module de Young E**.

**E (constante numérique de rigidité)** décrit la **résistance d'un objet à une déformation élastique lorsqu'une force extérieure lui est appliquée**.

La loi de Hooke : Force  $\alpha$  Contrainte

Le module de Young : Contrainte  $\alpha$  Déformation

⇒ Donc le module d'Young E est un module d'élasticité et caractérise **le régime élastique** du matériau. Il est comparable à la rigidité d'un ressort.  
La contrainte  $\sigma$  est proportionnelle à la déformation  $\epsilon$  :  $\sigma = E\epsilon$  ou  $E = \sigma/\epsilon$  (la loi de Hooke).

⇒ La propagation d'une vibration mécanique provoque une déformation élastique du matériau (qui reprend son état initial après le passage de cette onde vibratoire).

C'est pour cela que la vitesse de propagation des ondes acoustiques  $v$  est liée à  $E$  et  $\nu$  selon les formules suivantes :

$$V_{OL} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \times \frac{1-\nu}{(1+\nu).(1-2\nu)}}$$

$$V_{OT} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \times \frac{1}{2.(1+\nu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \approx \frac{V_{OL}}{2}$$

Avec  $E$ (Pa) module d'Young,  $\nu$  coefficient de poisson (sans dimension) et  $\rho$  ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ ) masse volumique.

## Vitesse des ondes longitudinales (OL):

- recherche de défauts
- Mesure du couple de serrage (mesure d'allongement)
- mesure d'épaisseur
- échographie médicale
- microscopie acoustique (très hautes fréquences)
- mesure de vitesse

$$V_{OL} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \times \frac{1-\nu}{(1+\nu).(1-2\nu)}}$$

Avec E(Pa) module d'Young,  $\nu$  coefficient de poisson (sans dimension) et  $\rho$  (Kg/m<sup>3</sup>) masse volumique.

## Vitesse des ondes transversal (ondes de cisaillement)

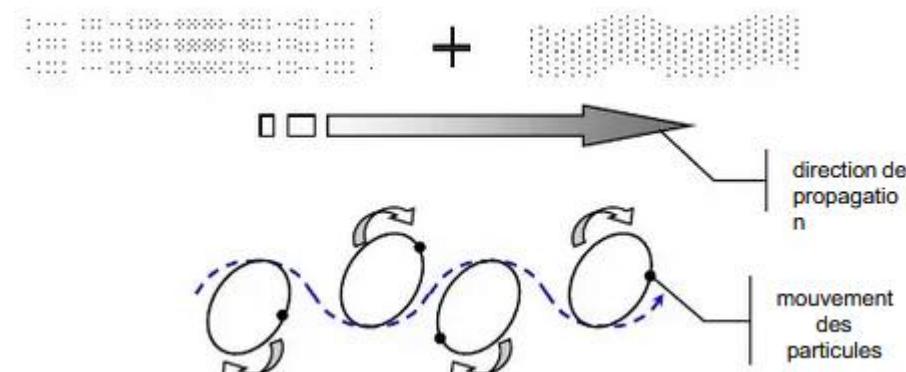
- recherche de défauts dans les tubes, dans les soudures
- recherche de criques sous les têtes de rivets

$$V_{OT} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \times \frac{1}{2.(1+\nu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \approx \frac{V_{OL}}{2}$$

## Vitesse des ondes de surface :

- recherche de défauts débouchants ou défauts de surface
- recherche de défauts à l'interface (décollement)

$$V_{OS} \approx 0.9 \times V_{OT}$$



# Le coefficient de Poisson

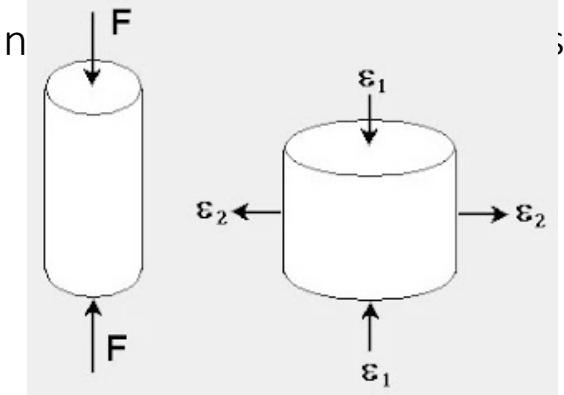
Le coefficient principal de Poisson, désigné par la lettre grecque  $\nu$ , est une constante élastique caractéristique d'un matériau. Il permet de **caractériser la contraction de la matière** perpendiculairement à la direction de l'effort appliqué.

Le coefficient de Poisson est une mesure de l'effet Poisson : c'est un phénomène dans lequel un matériau se dilate dans une ou plusieurs directions perpendiculaires à la direction de compression.

Sur le schéma, une force est appliquée pour comprimer un matériau.

Par conséquent, le matériau se dilate dans la direction perpendiculaire de la force appliquée. En d'autres termes, la longueur est réduite et la largeur est augmentée.

Si la force était appliquée dans la direction opposée, le matériau deviendrait plus fin, comme dans un "caoutchouc élastique d'entraînement".



$$\nu = -\epsilon_t / \epsilon_l$$

où,  $\epsilon_t$  est la déformation latérale ou transversale,  $\epsilon_l$  est la déformation longitudinale ou axiale et  $\nu$  est le coefficient de Poisson.

le Coefficient de Poisson est un rapport de la déformation transversale sur la déformation axiale (de ces 2 déformations opposées).

Dans le cas d'un matériau isotrope, le coefficient de Poisson permet de relier directement le module de cisaillement G au module de Young E.

La plage de sa valeur se situe entre -1,0 et +0,5. Cependant, pour la plupart des matériaux  $\nu$  est compris entre 0 et 0,5.

S'il est égal à 1/2, le matériau est parfaitement incompressible. Les matériaux incompressibles tels que le caoutchouc, ont un rapport proche de 0,5.

# Vitesse de propagation

La vitesse de l'onde dépend de la nature de matériaux qui la transporte et de type d'onde :

❖ Exemples de vitesses des ultrasons dans la matière :

Matériau	Masse volumique ( $10^3$ Kg /m $^3$ )	Vitesse des ondes longitudinales (m/s)	Vitesse des ondes transversales (m/s)	Impédance acoustique ( $10^6$ Kg.m $^{-2}$ .s $^{-1}$ )
<b>Aciers</b>	7.8	5900	3250	46
<b>Fonte</b>	7.2	4600	2150	33
<b>Aluminium</b>	2.7	6300	3100	17
<b>Cuivre</b>	8.9	4700	2250	42
<b>Laiton</b>	8.5	4500	2100	38
<b>Béton</b>	2.5	4500		11
<b>Verre</b>	2.5	5650	3400	14

## Impédance acoustique :

grandeur symbolisée par la lettre Z

Caractéristique de la réponse du milieu aux ultrasons

Caractérise l'aptitude du milieu à reprendre sa forme originelle après déformation

La séparation entre deux milieux d'impédances différentes s'appelle une interface

C'est la propriété qui détermine la transmission des ultrasons à travers la ligne adjacente à deux milieux, pour un matériau donné elle est égale aux produits de la masse spécifique de matériau par la vitesse de l'onde.

$$Z = \rho \cdot V$$

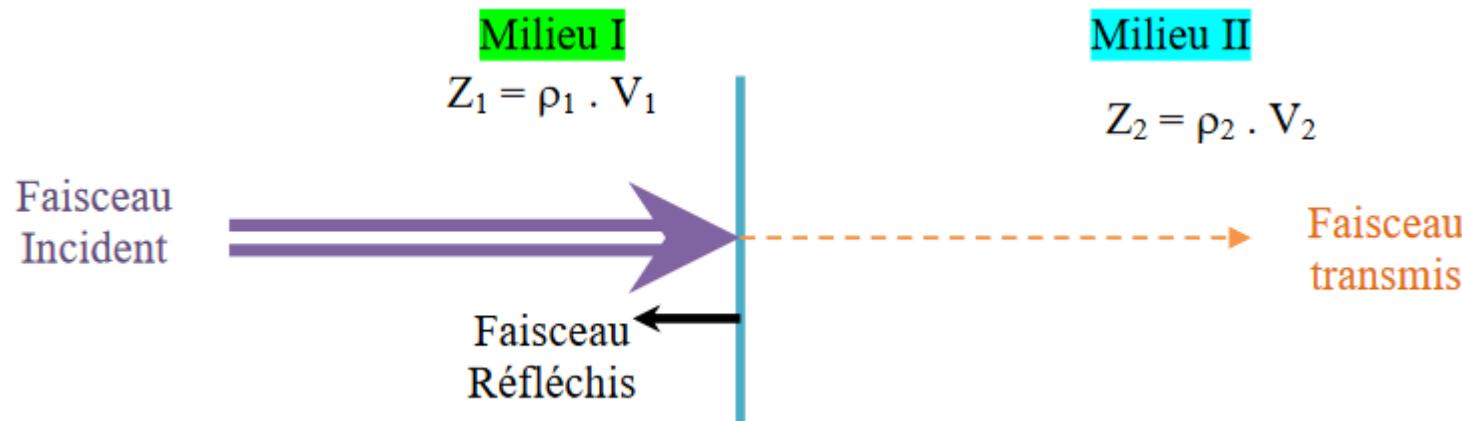
Z s'exprime en  $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

Avec  $\rho$  en  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$  et  $V$  en  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

Les matériaux ayant de grandes impédances acoustiques sont dits « durs ».

Les matériaux ayant de faibles impédances acoustiques sont dits « mous ».

# Lorsque le faisceau est sous incidence normale



On note :

Ar : l'amplitude de l'onde réfléchie

Ai: l'amplitude de l'onde incidente

At: l'amplitude de l'onde transmise

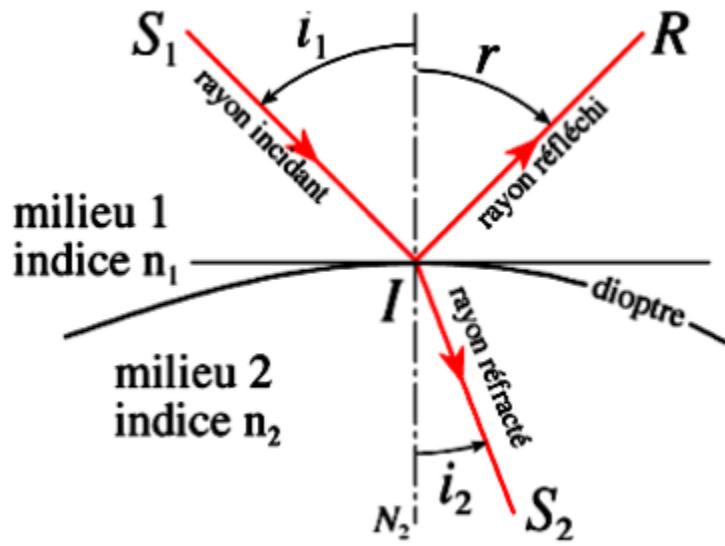
- **Coefficient de transmission :**  $t = \frac{A_t}{A_i}$

- **Coefficient de réflexion :**  $r = \frac{A_r}{A_i}$

Il est clair que  $t + r = 1$ .

On montre que :  $r = \left( \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2$  et que  $t = \frac{4 \times Z_1 \times Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2}$

# Lorsque l'onde est sous incidence oblique



Rappel d'optique géométrique : Lois de Snell-Descartes.

- **Première loi :** Le rayon réfléchi et le rayon réfracté appartiennent au plan d'incidence
- **Deuxième loi :** Les angles d'incidence et de réflexion sont égaux :  $r = i_1$
- **Troisième loi :** L'angle d'incidence  $i_1$  et l'angle de réfraction  $i_2$  vérifient la relation :  
$$n_1 \times \sin(i_1) = n_2 \times \sin(i_2)$$
 où  $n_1$  et  $n_2$  sont les indices de réfraction des deux milieux.

$$n_1 = \frac{c}{v_1} \text{ et } n_2 = \frac{c}{v_2}$$

La relation  $n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$  est très importante dans la recherche des défauts par faisceaux ultrasons qui viennent percuter la matière suivant des angles d'incidence

# Atténuation de l'amplitude de l'onde ultrasonore

L'amplitude d'une vibration qui se propage dans un milieu n'est pas constante

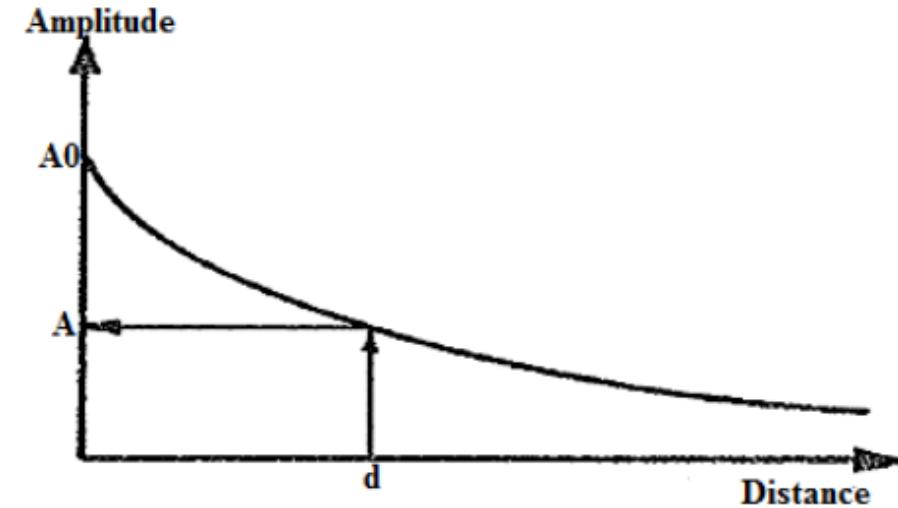
On montre que l'amplitude de l'onde décroît de façon exponentielle avec la distance parcourue dans le matériau.

Les causes d'atténuation :

- essentiellement liées au matériau
- la **fréquence de la vibration**

Donc l'atténuation sera fonction de :

- -La fréquence de l'onde,
- -Le matériau,
- -La distance parcourue par l'onde.



Si à un instant donné, l'onde a une amplitude  $A_0$  lorsqu'elle aura parcouru une distance, l'amplitude restante sera  $A$ , telle que  $A = A_0 e^{-\alpha d}$  avec:

$A_0$ : Amplitude initiale de l'onde émise,

$A$ : Amplitude de l'onde qui a parcourue la distance  $d$ ,

$d$ : Distance parcourue,

$\alpha$ : Coefficient dépendant du matériau et de la fréquence au carré:  $\alpha=k.f^2$

⇒ La fréquence des ultrasons a une influence déterminante sur la profondeur maximale d'exploration  
⇒ plus la fréquence est élevée, plus l'onde sonore est rapidement absorbée

# Les différents types de palpeurs

Un traducteur à ultrason est caractérisé par:

- son type (droit, angle...)
- sa fréquence
- son diamètre (quelques mm à 300 mm)
- son amortissement

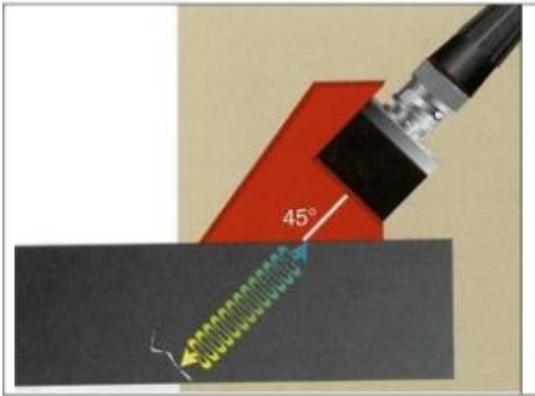
Le choix du palpeur est subordonné au contrôle à effectuer.

Le contrôle aux ultrasons s'effectue le plus souvent avec un palpeur à incidence normale ou un palpeur à incidence oblique (palpeur d'angle à sabot) :

- Les **palpeurs à incidence normale** émettent des ondes longitudinales avec comme direction de propagation la normale à la surface
- Les **palpeurs d'angle** émettent des ondes transversales dont la direction de propagation est inclinée par rapport à la normale de la surface

## transducteur à angle

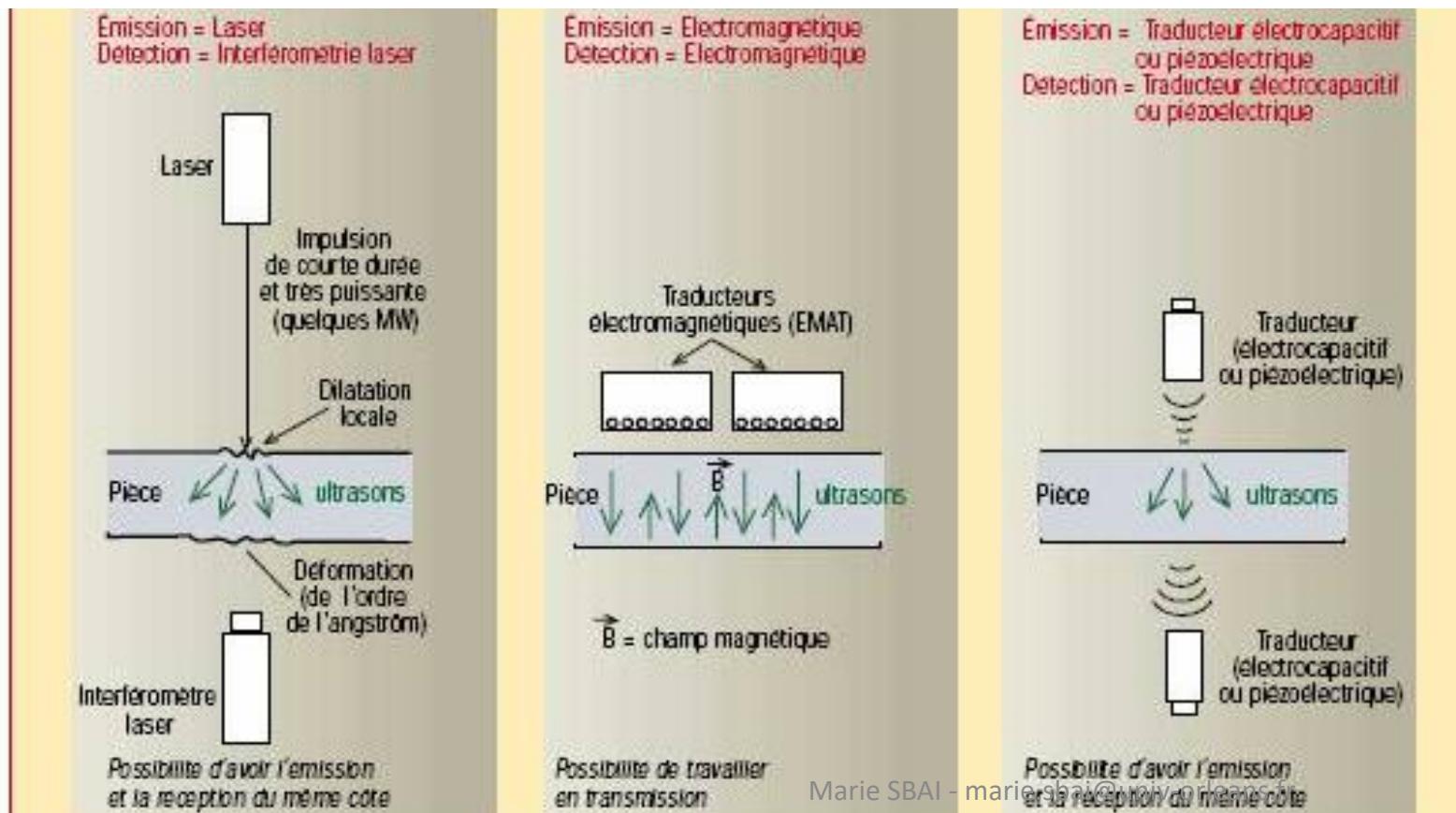
L'utilisation du transducteur à angle est très utilisée dans le contrôle des soudures



- Pour que l'écho revienne sur le palpeur, il faut que la direction du réflecteur (défaut) soit orthogonale au faisceau.
- On choisit généralement des angles d'incidences de manière à n'avoir que des O.T. dans le matériau à contrôler : les angles les plus courants sont :  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  et  $70^\circ$ .
- Les sabots sont généralement en matières plastiques (PVC, plexiglas)

# Les traducteurs ultrasonores

- Palpeurs piézoélectriques
- Palpeur EMA (électromagnétique)
- Palpeurs lasers : c'est l'interaction du faisceau lumineux avec le matériau. Une brève impulsion laser envoyé sur un matériau entraîne la création d'ondes élastiques. L'interaction de ces ondes avec les défauts ou les bords de la pièce étudiée sont détectés par un second laser (laser de détection) couplé à un interféromètre. Sans contact, ils peuvent donc être utilisés **pour un contrôle en ligne** puisqu'ils ne perturbent pas le procédé de fabrication et peuvent s'utiliser sous des contraintes de température. Sans couplant. Pièce à géométrie complexe



Donc plusieurs phénomènes permettent de produire des ondes US.

Le plus utilisé est **la piézo-électricité**. L'effet piézoélectrique a été découvert en 1880 par Pierre et Jacques Curie. En règle générale, l'élément actif de la sonde est constitué d'un disque, d'un carré ou d'un rectangle de céramique piézo-électrique mince (quartz, titanate de Baryum, Titanate zirconate de plomb (PZT, utilisé dans les sondes échographiques ).

L'élément piézoélectrique convertit l'énergie électrique en énergie mécanique (vibrations ultrasonores), et vice versa.

Lorsque cette céramique piézo-électrique est excitée par une impulsion électrique, elle génère des ondes sonores, et quand les échos de retour la font vibrer, elle génère une tension.

# **Remarques : Caractéristiques pour l'utilisation des traducteurs US**

**Sensibilité** : C'est la capacité à détecter le plus petit défaut. Cela dépend essentiellement de la position du défaut dans le faisceau acoustique (champ proche et ouverture d'angle) et de la fréquence du palpeur.

**Résolution** : La résolution est la capacité à distinguer 2 défauts qui sont proches l'un de l'autre. Cela dépend des caractéristiques de l'appareil et du palpeur.

Cette capacité augmente avec la fréquence suite à la diminution de la longueur d'onde

**Le couplant** : il sert à la bonne transmission du signal ultrasonore entre le traducteur et la pièce à contrôler. Les ultrasons ne se propagent pas dans l'air et le couplant permet de réduire les pertes de signal liées aux irrégularités de surface (rugosité),

Exemple : un couplant avec une grande viscosité pour les pièces rugueuse remplira mieux les espaces entre le palpeur et la pièce à contrôler (générés par la rugosité de la pièce) alors qu'un couplant fluide sera à privilégier pour les surfaces lisses.

## **Avantages :**

- Contrôle sur métaux, plastiques, matériaux divers.
- La détection des défauts dans le volume (à l'intérieur) de la pièce;
- Grande précision possible.
- localisation et dimensionnement des défauts.
- Rapidité de mise en œuvre et transportabilité.

## **Inconvénients :**

- La sensibilité de la méthode est fortement influencée par l'orientation de la surface du défaut vis-à-vis de la direction principale du faisceau acoustique.
- Il est nécessaire d'interposer un milieu de couplage intermédiaire entre le traducteur et la pièce pour assurer la continuité de la propagation.
- L'interprétation de la nature des défauts et de leur dimension nécessite du personnel qualifié ayant une grande expérience.
- La mise en œuvre est difficile sur certains matériaux (matériaux absorbants)



## Contrôle de serrage à l'aérogare 2F de l'Aéroport Roissy Charles de Gaulle

Plus de 1000 boulons contrôlés 10 ans  
après pose et sans démontage



Contrôle d'un arbre à section multiples de grande dimensions : plusieurs mètres de long pour un diamètre maximum de 180 mm

Contrôle à partir de l'extrémité de l'arbre (seule partie accessible)



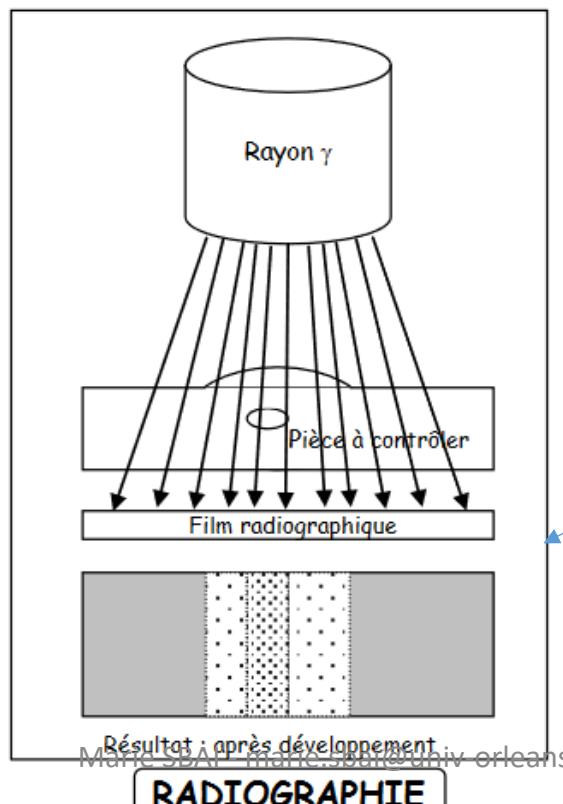
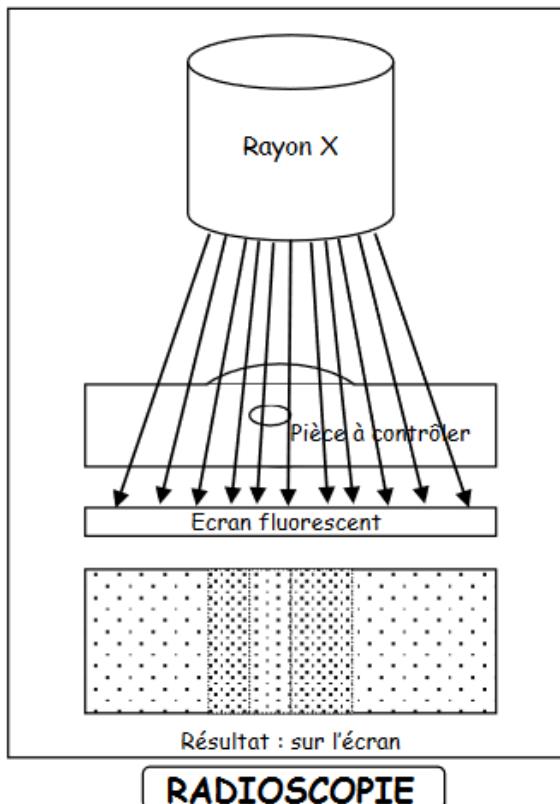
# La Radiographie industrielle

Les radiographies X et  $\gamma$  sont des procédés majeurs de CND qui permet de découvrir des défauts internes. Elle permettent de découvrir des défauts internes. Avantage : tous types de matériaux. Contrôle de la quasi-totalité des matériaux.

PRINCIPE DE LA METHODE : Des rayonnements ionisants X et  $\gamma$  de très courte longueur d'onde et de très grande énergie traverse la matière.

Lors de la traversée de la matière, les éventuels défauts contenus dans celle-ci constituent des obstacles qui absorbent plus aux moins le rayonnement.

Les différences d'absorption peuvent être soit visualisées sur un écran fluorescent (par exemple : la radiographie utilisée dans le domaine médical), soit enregistrées sur un film spécial (cas de radiographie industrielle).



- La pièce est placée entre la source de radiation et le film.
- Plus le matériau traversé est dense, plus il absorbe le rayonnement.
- L'intensité de gris du film est proportionnelle à l'intensité du rayonnement.

Le contrôle détecte la différence d'absorption provoquée par la présence du défaut par rapport au reste de la pièce, mise en évidence par : l'impression de films photographiques, l'utilisation d'écrans fluorescents et caméras, l'utilisation de détecteurs de rayonnements

Pour chaque contrôle, il existe un cahier des charges ou une norme (NF EN 444, NF EN 462-1...).

On caractérise couramment ces rayonnements par l'énergie unitaire  $E$  des photons associés, exprimée en électronvolts (eV). Si l'on exprime  $E$  en MeV et la longueur d'onde  $\lambda$  en pm, on tire de la relation du photon :  $E = h \times f$

Avec :  $E$  est exprimée en électron-volt,

$h$  est la constante de Planck ( $h = 6.62 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$ ),

$f$  est la fréquence de l'onde.

La relation pratique :  $E = \frac{1,24}{\lambda}$

Les énergies requises en contrôle non destructif se situent dans une gamme allant de 50 keV à 20 MeV.

Généralement, la fréquence  $f$  d'un phénomène périodique peut s'écrire :  $f = C / \lambda$

Avec :  $C$  est la vitesse d'une onde électromagnétique ( $C = 2.998 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$ ).

D'où, l'expression de l'énergie devient :  $E = \frac{h \times C}{\lambda}$

Par conséquent, l'énergie  $E$  sera plus importante si la longueur d'onde est plus faible.

Cela confère donc aux rayons X et aux rayons gamma l'aptitude de traverser des milieux solides puisqu'ils sont caractérisés par des énergies élevées

Ce mode de contrôle utilise des rayonnements électromagnétiques de faible longueur d'onde (ordre de grandeur de l'angstrom) pour traverser des matériaux opaques à la lumière.

Lorsqu'un faisceau homogène de rayons X ou gamma d'intensité  $I_0$  traverse une épaisseur infiniment petite  $dx$  d'un matériau. Il subit alors une diminution d'intensité  $dI$  qui est proportionnelle à l'intensité  $I_0$  du faisceau incident et l'épaisseur  $dx$  du corps absorbant

L'atténuation des RX dans la matière suit une loi exponentielle décroissante sous la forme :

$$I = I_0 e^{-\alpha e}$$

avec :      **I** : intensité en sortie ;  
 **$I_0$**  : intensité incidente ;  
 **$\alpha$**  : coefficient d'absorption ;  
**e** : épaisseur du matériau.

Le coefficient d'absorption prenant la forme :

$$\alpha = k l^3 Z^3$$

avec :      **k** : fonction de la masse volumique du matériau ;  
**l** : longueur d'onde du rayonnement ;  
**Z** : numéro atomique de l'élément traversé.

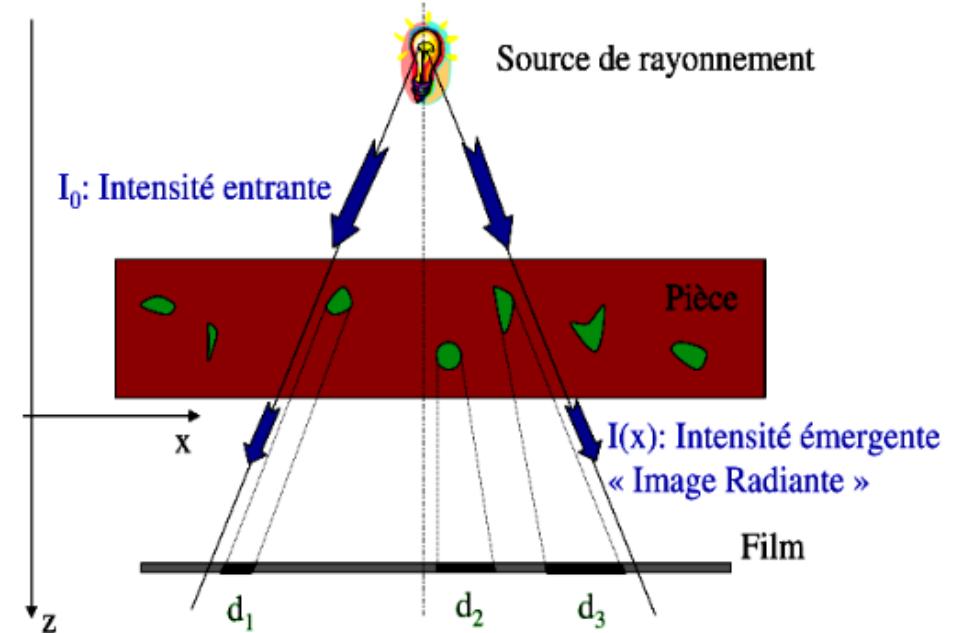
**Le rayon X** est généré dans un tube radiogène, un appareil électrique qui émet des rayons X lorsqu'il est mis sous tension.

**Le rayon gamma** est généré par la désintégration spontanée des éléments radioactifs (isotopes). Les isotopes les plus fréquemment utilisés sont le cobalt60, le césium137 et l'iridium192 (durée de vie: 74 jours)

On définit le nombre Becquerels (Bq) : nombre de désintégrations par seconde. Sachant que en gammagraphie, il n'est pas utile de disposer d'une alimentation en eau et en électricité.

La source peut se positionner dans des tubes de petits diamètre et rayonne dans toutes les directions ; ce qui permet une radiographie panoramique d'une cuve. L'utilisation des rayonnements ionisants exige des locaux spéciaux et doivent être transportés conformément au règlement de transport visant les marchandises dangereuses et les matières radioactives

Un film fixe toutes les inégalités de la pièce soumise aux rayons



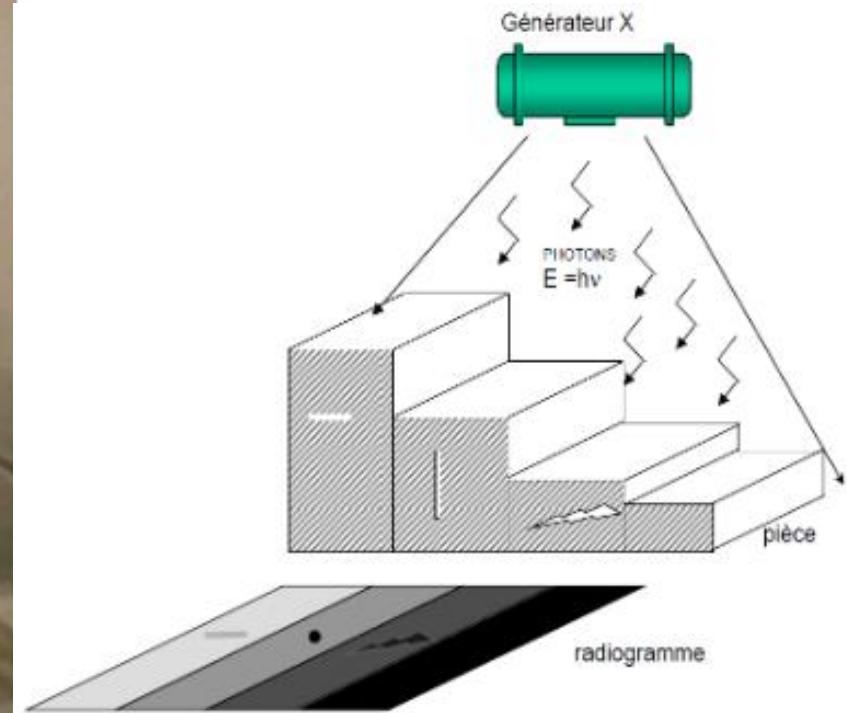
Application:

- la radiographie est utilisée pour contrôler des soudures dans des environnements sensibles : centrales nucléaires, chantiers navals...
- pour repérer des défauts de fonderie et contrôler la santé des structures composites ou de pièces mécaniques.
- pour évaluer le degré de corrosion de composants métalliques
- pour vérifier le positionnement d'un élément interne au sein d'une structure.

## Dispositif expérimental de production des rayons X.



## Dispositif de production de rayons X

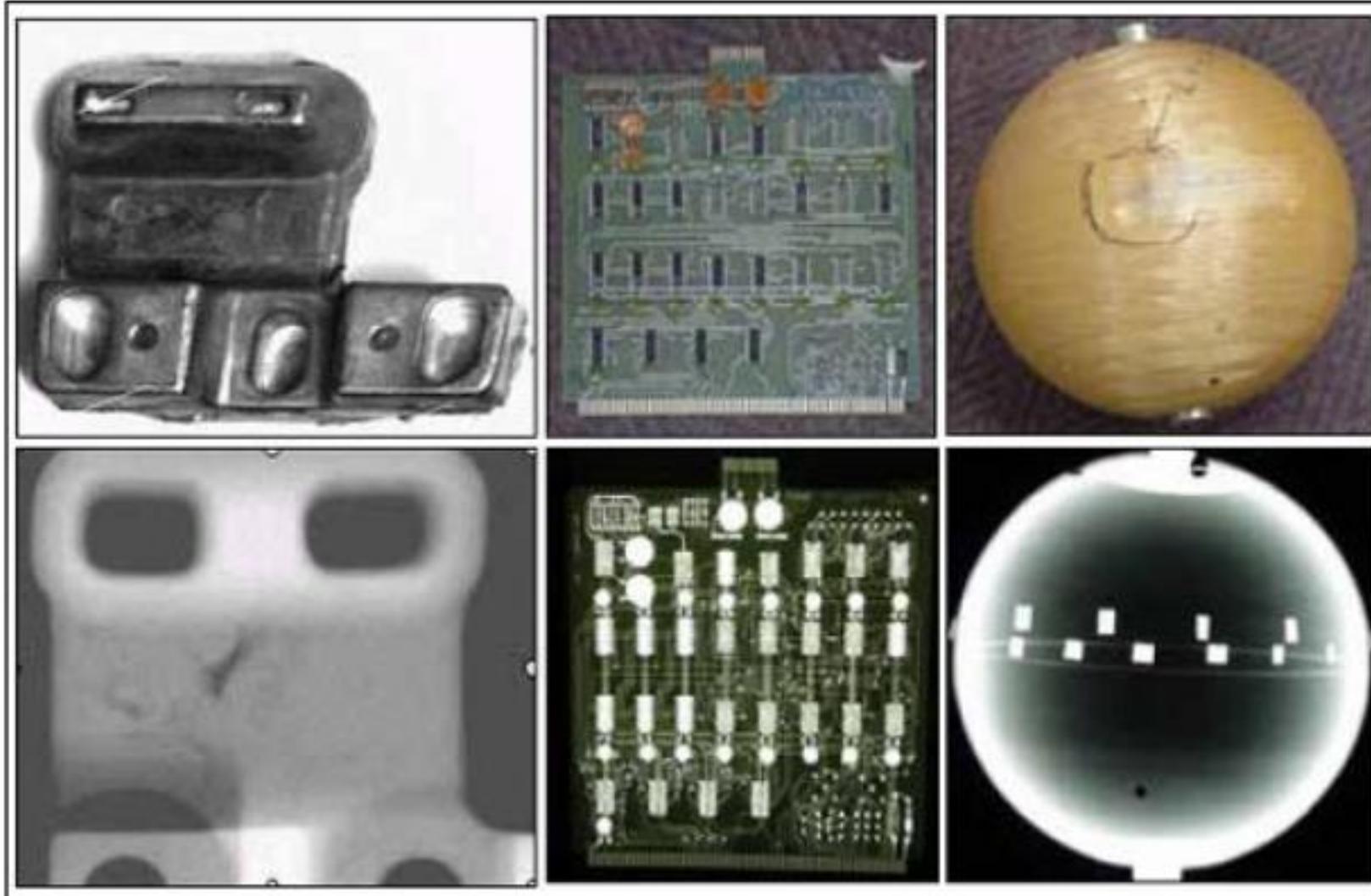


Une cathode (-), constituée d'un filament métallique chauffé par le passage d'un courant de quelques milliampères, fournit des électrons mobiles facilement accélérés par une forte différence de potentiel (de quelques kilovolts à environ 450 kilovolts pour les générateurs les plus courants).

Ce pinceau d'électrons heurte l'anode (+), en produisant principalement de la chaleur (99 %), mais aussi des rayons X.



**Radiographie de soudure sur un gazoduc**



## Images radiographiques

## Avantages

Détection des défauts de surface ou volumique dans tous les matériaux ;  
Possibilité de radiographier des formes complexes et des épaisseurs d'acier variant de quelques micromètres à 600 mm ;  
Dimensionnement et identification possible des défauts ;  
Sensibilité de détection des défauts très élevée pour certaines techniques ;  
Sensibilité de détection de l'ordre de quelques  $\mu\text{m}$  avec grossissement ;  
Examen possible en temps réel (radioscopie) ;

## Inconvénients

La sensibilité de détection des défauts dépend des dimensions de la source et de son énergie, de la position et de l'orientation des défauts dans la pièce, de l'épaisseur de la pièce, de la sensibilité du film...

Coûts de fonctionnement élevés (sources de rayonnement, entretien du matériel...)

L'interprétation des radiogrammes est souvent délicate et nécessite une formation des opérateurs de niveau élevé ainsi qu'une grande expérience.

Inconvénients en Hygiène et Sécurité : Les rayonnements utilisés sont dangereux et peuvent provoquer des maladies

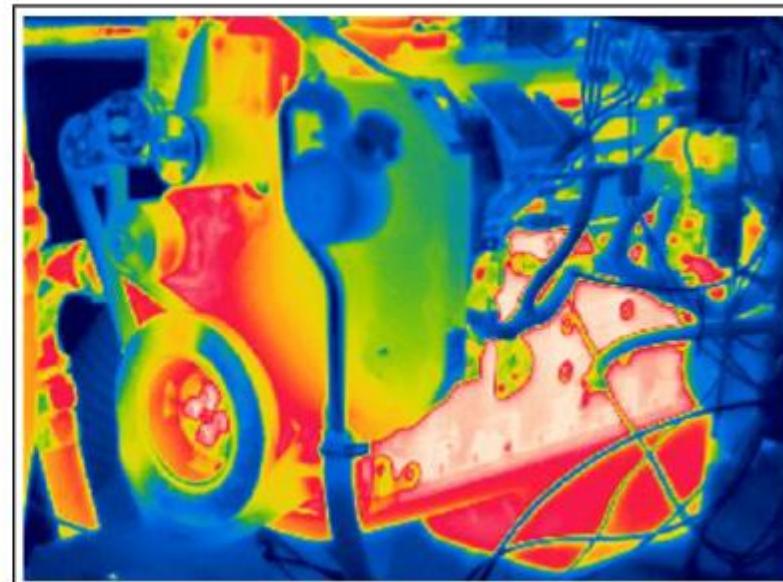
professionnelles graves ; ☷ Les opérateurs sont classés travailleurs de catégorie A et portent un dosimètre individuel ;

La réglementation est souvent très contraignante (transport et stockage des sources radioactives, déclarations, autorisations, travail des femmes...)

# La thermographie Infrarouge IR

technique permettant à distance et sans contact, d'observer des scènes thermiques et d'en mesurer des températures avec une précision variable en fonction des critères recherchés.

La thermographie infrarouge est utilisée dans le domaine de la surveillance conditionnelle de fonctionnement pour optimiser les tâches de maintenance sans interrompre le flux de production et réduire au maximum les coûts d'entretien.

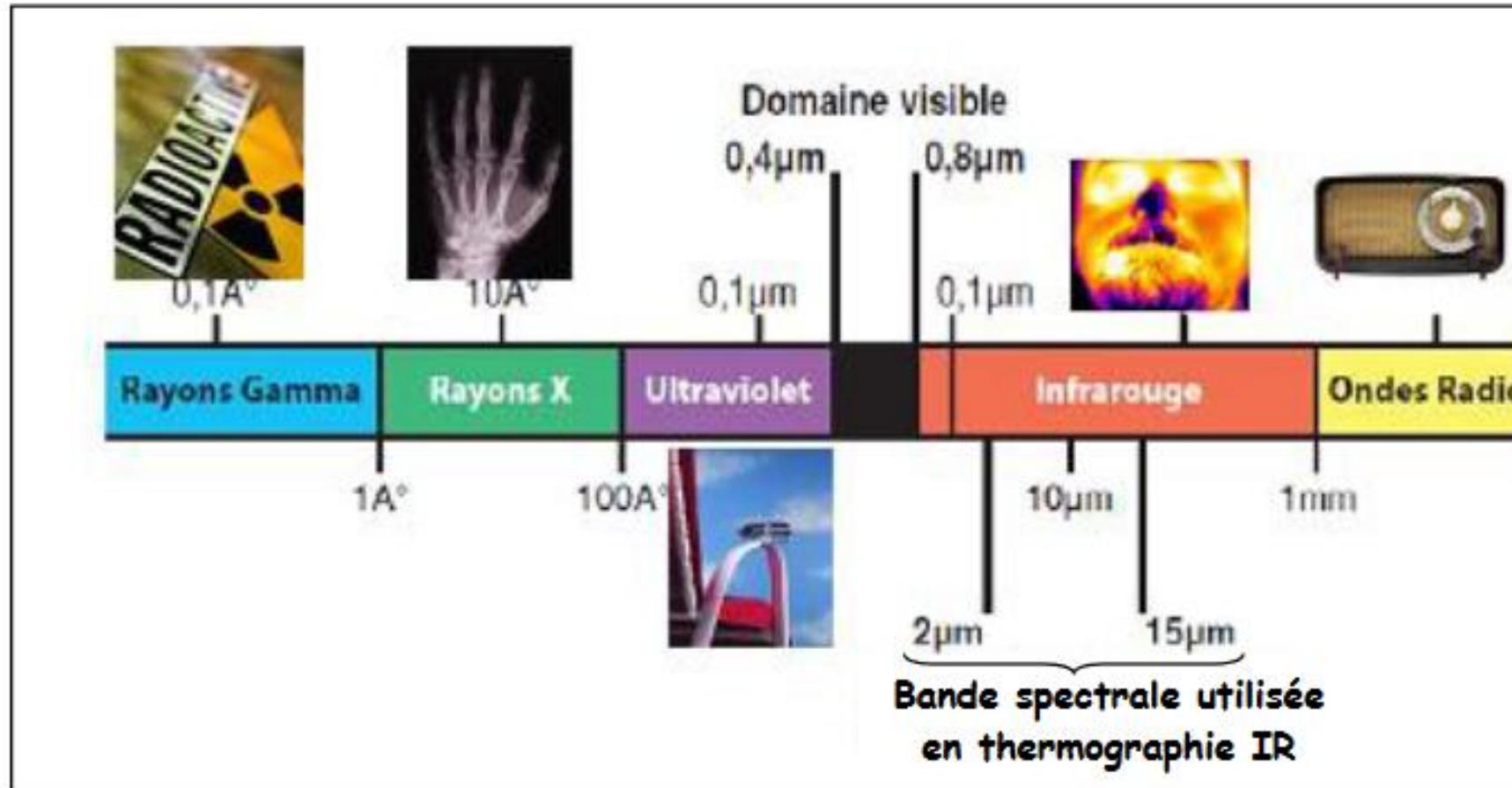


Le spectre électromagnétique rassemble les rayonnements électromagnétiques de la lumière visible, des ondes radio et TV, des rayons X.

Le domaine visible s'étend des longueurs d'onde allant de 0,4 à 0,8 µm.

La bande infrarouge s'étend de 0,8 à 1000 µm.

En thermographie infrarouge on travaille généralement dans une bande spectrale qui s'étend de 2 à 15 µm et plus particulièrement dans les fenêtres 2-5 µm et 7-15 µm.



# Principe :

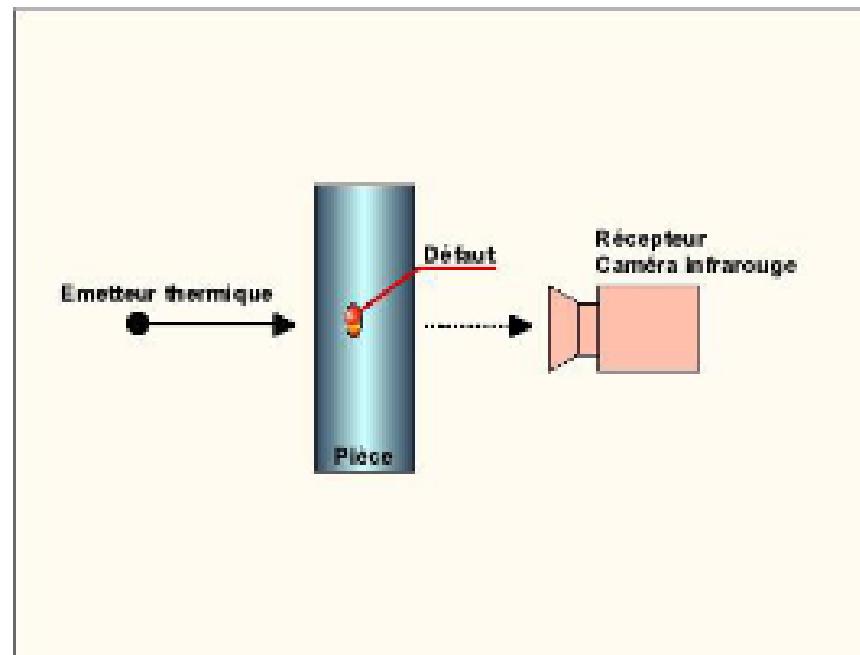
La caméra infrarouge capte au travers d'un milieu transmetteur les rayonnements émis par ce dernier. Le système radiométrique convertit la puissance de rayonnement en signaux numériques ou analogiques : ceux-ci sont transcrits en température par le calculateur et transformés en points lumineux sur un écran. L'image ainsi obtenue s'appelle « thermogramme ».

Autrement, on soumet l'élément à contrôler à une excitation extérieure maîtrisée et on analyse la propagation de la chaleur dans la zone examinée.

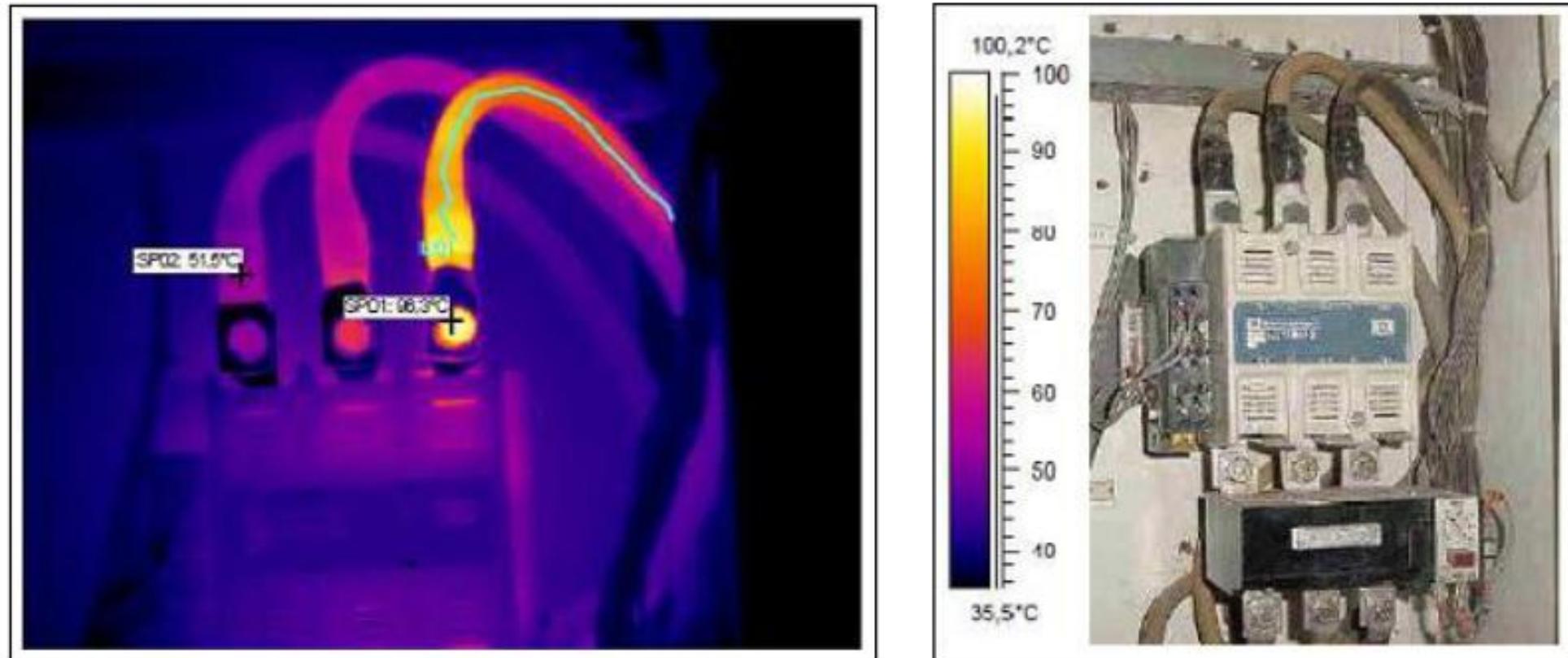
L'analyse d'image thermique se traduit par la recherche de zones dont le comportement diffère du reste de l'image

Application :

- Mise en évidence des défauts surfaciques telles que des fissures, des délaminages ou de la corrosion.
- contrôle d'installations électriques
- contrôle de l'isolation thermique des bâtiments.



La figure suivante montre un exemple courant de défaut dans une armoire électrique. La caméra infrarouge mesure tous les rayonnements émis et les restitue sous forme de thermogramme : cette image thermique est composée par des niveaux de couleurs, qui sont en corrélation avec les niveaux de températures mesurés (échelle des températures). Dans ce cas, par comparaison des températures des trois connexions, le thermogramme nous indique un mauvais serrage au niveau du câble droit.



Exemple de défaut électrique de connexion (mauvais serrage)

Avantage :

- Sans contact
- sans couplant
- Méthode rapide : inspection de larges surfaces en une seule acquisition

Inconvénients:

- Limitée en profondeur
- Méthode coûteuse en investissement

- <https://www.technologuepro.com>
- CETIM
- [http://www.isetgf.rnu.tn/ENS/uploads/rabhi\\_mouldi/COURS-CND-2016-2017.pdf](http://www.isetgf.rnu.tn/ENS/uploads/rabhi_mouldi/COURS-CND-2016-2017.pdf)