

## Contrôle Non Destructif

Le Contrôle Non Destructif (C.N.D.) est un ensemble de méthodes qui permettent de caractériser l'état d'intégrité de structures ou de matériaux, sans les dégrader, soit au cours de la production, soit en cours d'utilisation, soit dans le cadre de maintenances. On parle aussi d'«Essais Non Destructifs » (END) ou d'«Examens Non Destructifs».



### Objectif du CND :

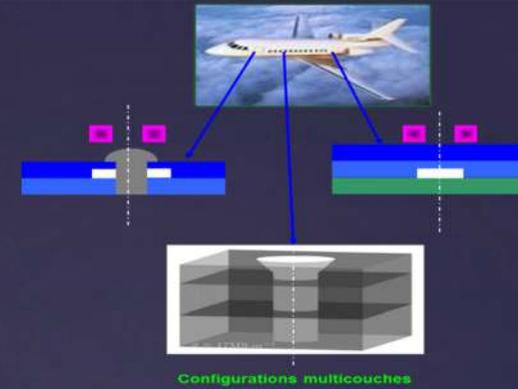
Les méthodes de CND ont comme objectifs de :

- Détection et caractérisation des matériaux
- Evaluer leurs état de santé en détectant d'éventuels défauts
- Caractérisation de défauts : forme, taille, orientation, position

## Domaines d'utilisation

Ces méthodes sont très utilisées dans :

- ❑ l'industrie automobile (contrôle des blocs moteurs),
- ❑ l'aérospatiale et l'armée,
- ❑ l'industrie pétrolière (pipelines, tubes, barres, soudures, réservoirs),
- ❑ l'industrie navale (contrôle des coques),
- ❑ l'industrie de l'énergie (réacteurs, chaudières, tuyauterie, turbines, ..),
- ❑ l'aéronautique (poutres, ailes d'avion, nombreuses pièces moteurs, trains d'atterrissage..),
- ❑ le ferroviaire



## Origines de défauts

Un objet (pièce, installation, machine) peut contenir des défauts qui ont plusieurs origines :

- ❑ la méthode et le procédé d'élaboration de brut (soudage, laminage, forgeage, moulage, ...),
- ❑ les conditions de service (chargement, température, nombre d'heures de fonctionnement ...),
- ❑ les traitements thermiques (trempe, ...).
- ❑ Les contraintes chimiques (sel, humidité, .....

## Techniques de CND

Technique	Application
Ressuage	Recherche des défauts de surfaces
Magnétoscopie	Recherche des défauts de surfaces et sous-jacents
Ultrason	Recherche des défauts internes Mesures d'épaisseurs de parois
Radiographie	Recherche des défauts internes
Courants de Foucault	Mesure de l'épaisseur de revêtements Examen de tubes et faisceaux tubulaires

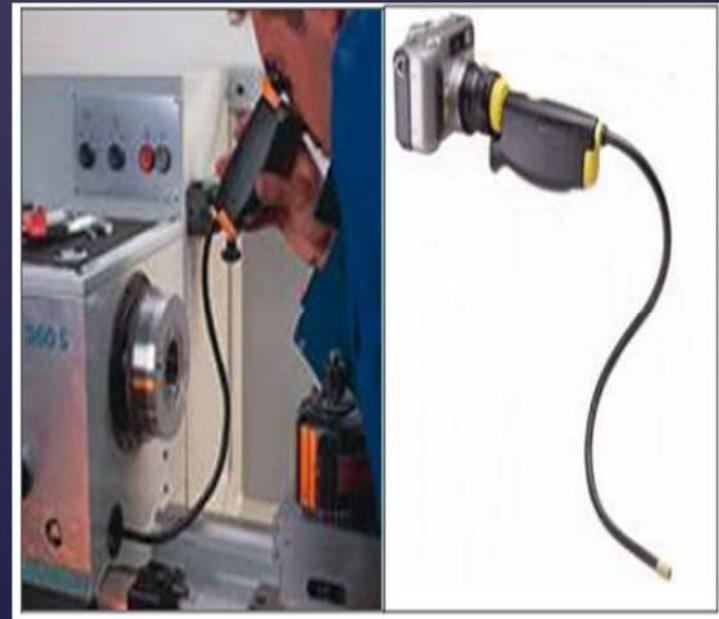
## Examen visuel

Le contrôle visuel est une technique de base essentielle de contrôle non destructif de l'état extérieur d'une pièce peut donner des informations essentielles sur l'état de celle-ci :

- ❑ des défauts évidents (comme des cassures, de la corrosion, fissures, ...)
- ❑ des défauts cachés sous-jacents présentant une irrégularité sur la surface extérieure peut être une indication de défaut plus grave à l'intérieur.

### Le baroscope ou fibroscope

Le est un appareil permettant de voir dans des endroits extrêmement petits et difficiles d'accès. Il est constitué de fibres optiques situées dans un câble et permettant de visualiser une image située à l'extrémité de celui-ci.



## Endoscope

est une méthode d'exploration et d'imagerie industrielle (ou médicale) qui permet de visualiser l'intérieur de conduits ou de cavités inaccessible à l'œil. L'endoscope est composé d'un tube optique muni d'un système d'éclairage. Couplé à une caméra vidéo on peut ainsi retransmettre l'image sur un écran.



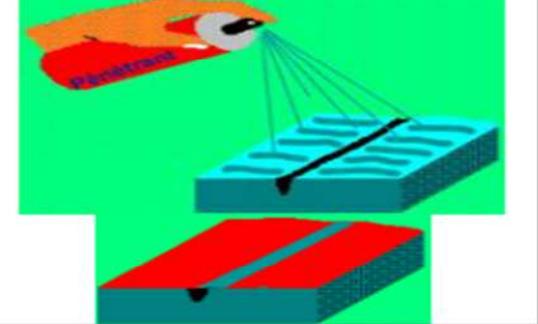
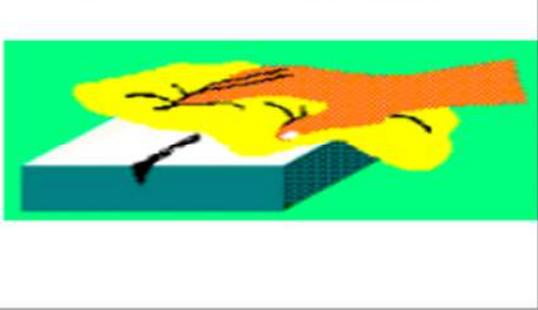
### Inconvénients :

- Technique limitée aux surfaces visibles.
- La surface doit être propre.
- Besoin de formation des opérateurs.
- La caractérisation des défauts est limitée
- Pas d'enregistrement (sauf par vidéo ou photo).

## Ressuage

Le ressuage est une méthode de contrôle non destructif dont le but est la détection et la localisation de défauts ouverts et débouchant en surface sur tous métaux et certains matériaux non métalliques (céramiques, matières plastiques...).

Cette méthode repose sur la capacité de certains liquides à pénétrer, puis à ressortir par capillarité, dans ces discontinuités géométriques.

<p><b>a- Le nettoyage de la surface à contrôler :</b></p> <p>La méthode consiste à appliquer un pénétrant de faible tension superficielle (de bonne capillarité) sur la surface de la pièce :</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Par meulage,</li><li>• Par brossage,</li><li>• Par dégraissage (chimique ou en phase vapeur)</li></ul>	
<p><b>b- L'application du pénétrant sur la surface à contrôler :</b></p> <p>On laisse au pénétrant un certain temps de sorte qu'il puisse s'introduire dans les discontinuités aboutissant à la surface.</p>	
<p><b>c- L'élimination de l'excès de pénétrant :</b></p> <p>On élimine ensuite le pénétrant sur la surface mais cette opération laisse cependant en place la partie qui a réussi à s'infiltrer dans les discontinuités. On utilise dans cette opération :</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Un chiffon sec et propre et non pelucheux,</li><li>• L'eau suivi ou non d'un séchage,</li><li>• Un solvant.</li></ul>	

**d- Application du révélateur :**

Un révélateur, produit opaque et absorbant est appliqué sur la surface, le pouvoir absorbant du révélateur fait que le pénétrant qui a réussi à s'infiltrer dans les discontinuités est alors aspiré vers la surface et y laisse une trace. Cette trace à cause de la diffusion du pénétrant dans le révélateur, est toujours plus importante que la discontinuité



**e- Interprétation des résultats :**

L'efficacité de cette méthode de contrôle repose sur la possibilité de détecter les indications de discontinuité afin d'améliorer cette détectabilité, le pénétrant contient en général :

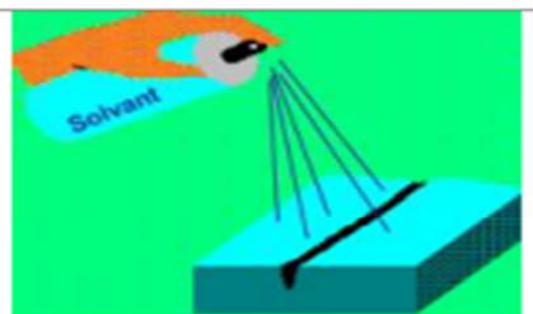
- un produit coloré visible à la lumière blanche (lumière du jour).
- ou un produit fluorescent visible à la lumière noire (ultra violet).

Une estimation grossière de la fissure peut être faite grâce à la largeur de l'étalement du pénétrant sur le révélateur.



**f- Nettoyage final :**

Un nettoyage final est préconisé pour certains matériaux (alliages d'aluminium, alliage de magnésium) pour lesquels la présence des produits utilisés peut entraîner des corrosions.





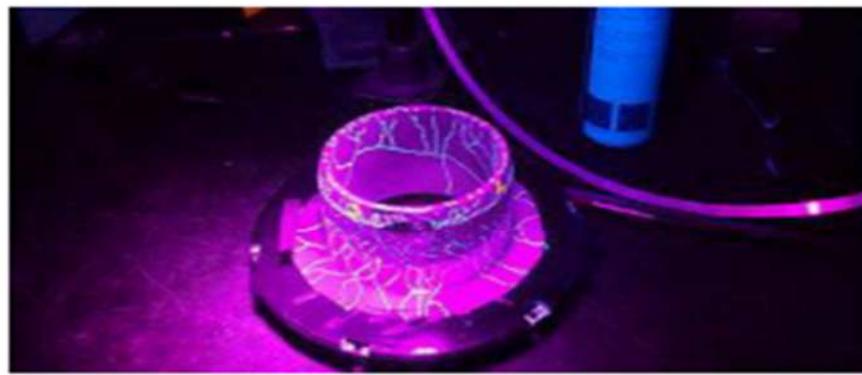
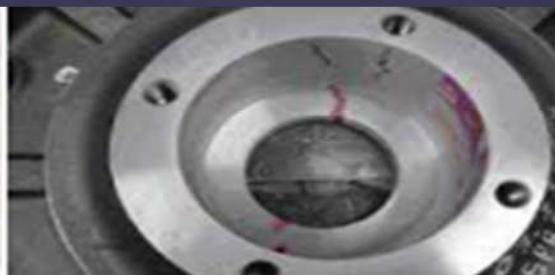
## 6. Domaines d'application

On peut localiser les défauts de : moulage, de fatigue, d'usinage, de traitement thermique et soudage

Le ressuage donne des résultats intéressants avec des métaux tel que l'aluminium, le magnésium le cuivre, le titane, l'acier inoxydable et la plupart des alliages non métalliques

- ❑ Aéronautique.
- ❑ Chaudronnerie: cordons de soudures.
- ❑ Centrales nucléaires.
- ❑ Industries mécaniques: engrenages, arbres, cylindres.
- ❑ Industries agro-alimentaires: sucreries.
- ❑ Étanchéité: détection de fuites.

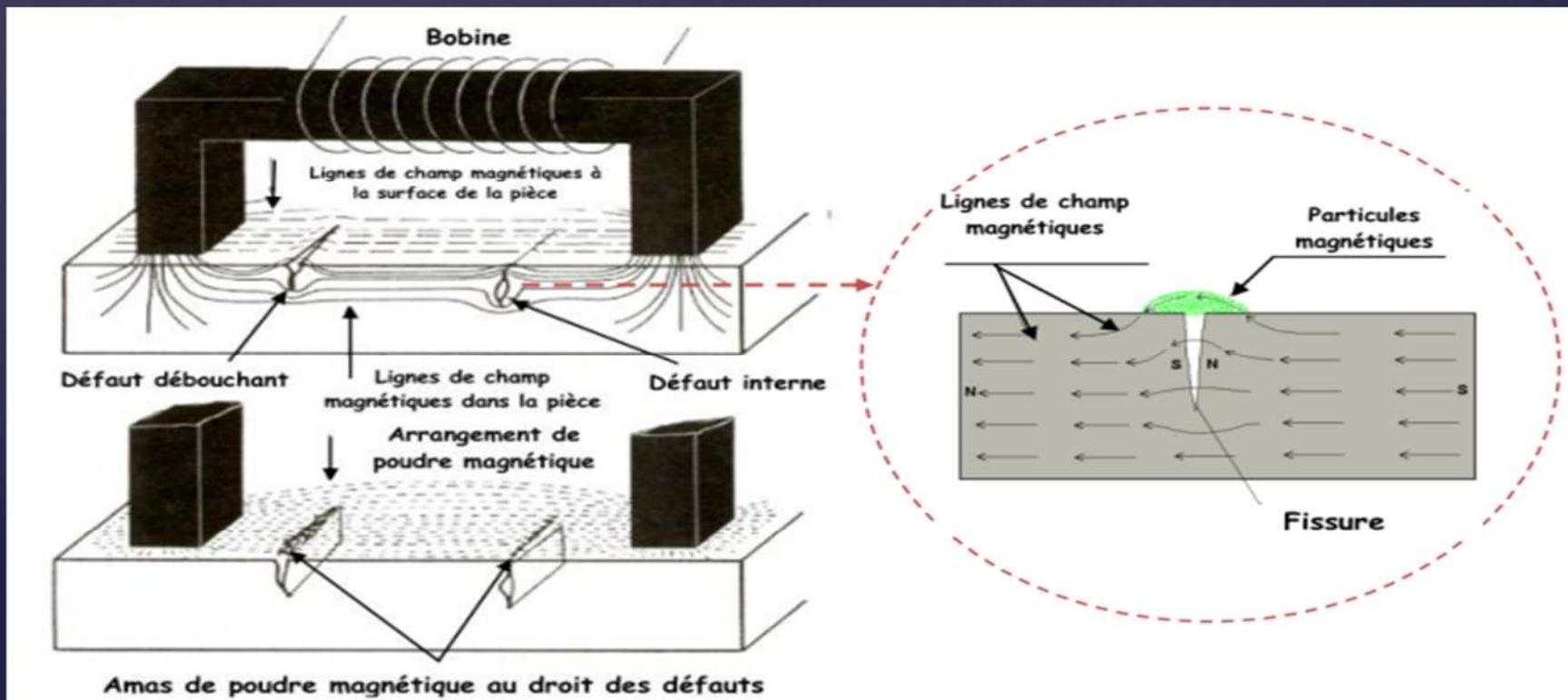
Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"><li>- Mise en œuvre possible sur organes montés dans un ensemble.</li><li>- Très grande fiabilité.</li><li>- Grande souplesse d'adaptation en fonction de la géométrie des pièces et de leur état de surface.</li><li>- Interprétation aisée des indications des discontinuités révélées.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Nécessité d'une bonne préparation des surfaces à contrôler.</li><li>- Domaine de températures à respecter.</li><li>- Nécessité de travailler proprement.</li><li>- Effluents liquides à traiter.</li></ul>

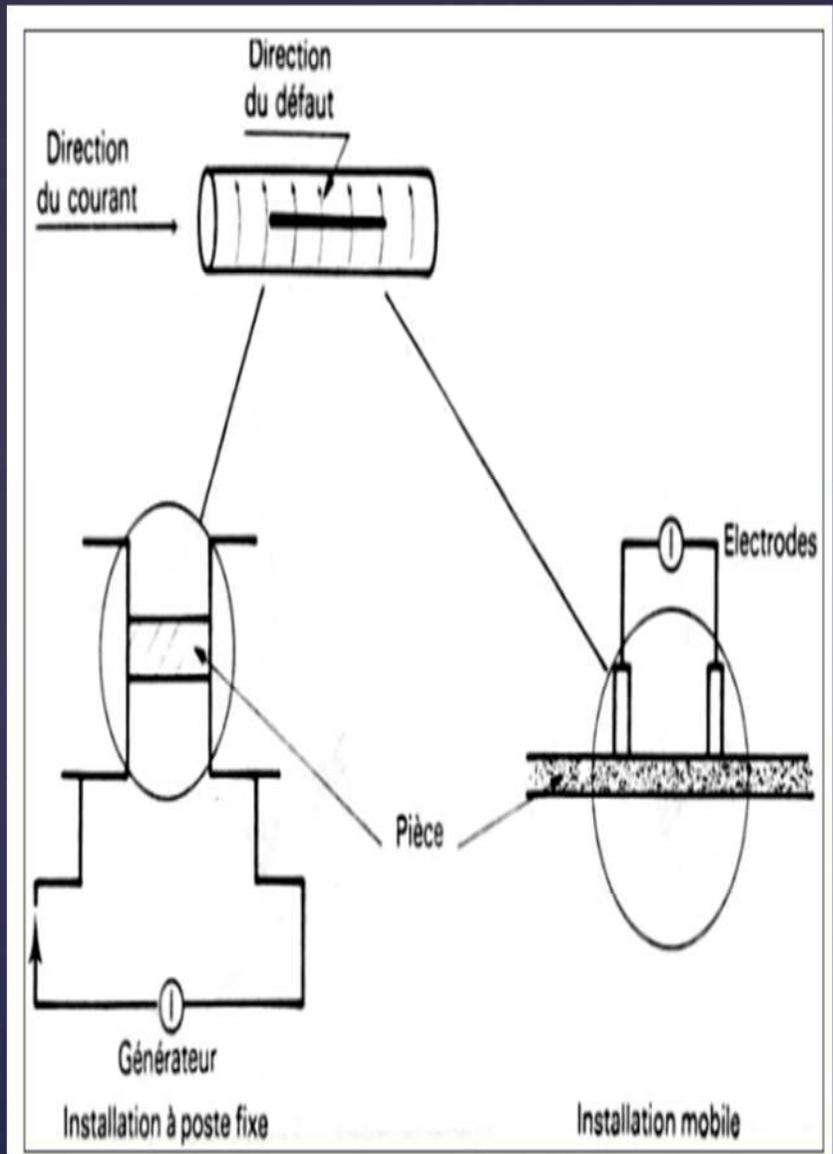
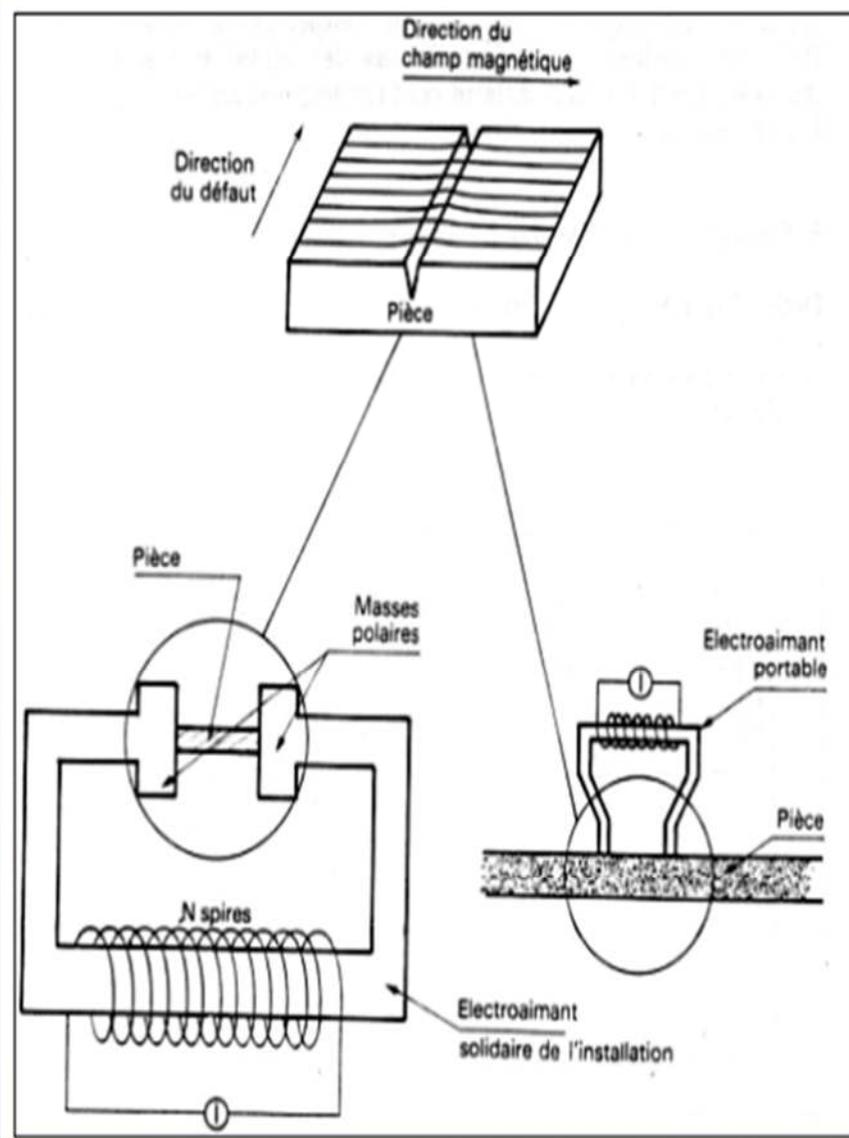


## Magnétoscopie

Le magnétoscope complète l'examen visuel. Souvent les imperfections de surface, surtout lorsqu'il s'agit de solution de continuité, restent peu visibles au ressuage malgré tout le soin apporté. Parfois même si les anomalies débouchant, le milieu ne permet pas d'avoir recours au ressuage (pièces immergées par exemple). Lorsque le ressuage est insuffisant, on a recours à la magnétoscopie sous ses différentes formes,

### Principe





**Matériel pour l'aimantation par passage de flux magnétique dans la pièce:**

❖ **Electroaimant**

- Passage du flux magnétique dans la pièce.
- Alimentation sur secteur ou par l'intermédiaire d'un transformateur, ou encore sur batteries.

❖ **Bobines**

- Bobines d'aimantation ou de désaimantation.
- Possibilité d'utiliser des bobines à ouverture et fermeture rapide.



**Source d'alimentation électrique (générateur de courant électrique):**

- Permet de générer des courants électriques de différentes intensités, formes d'onde et fréquences en fonction des pièces à contrôler.



**Moyens de visualisation :**

- Eclairage lumière blanche.
- Eclairage UV (ressuage fluorescent).



## Avantages

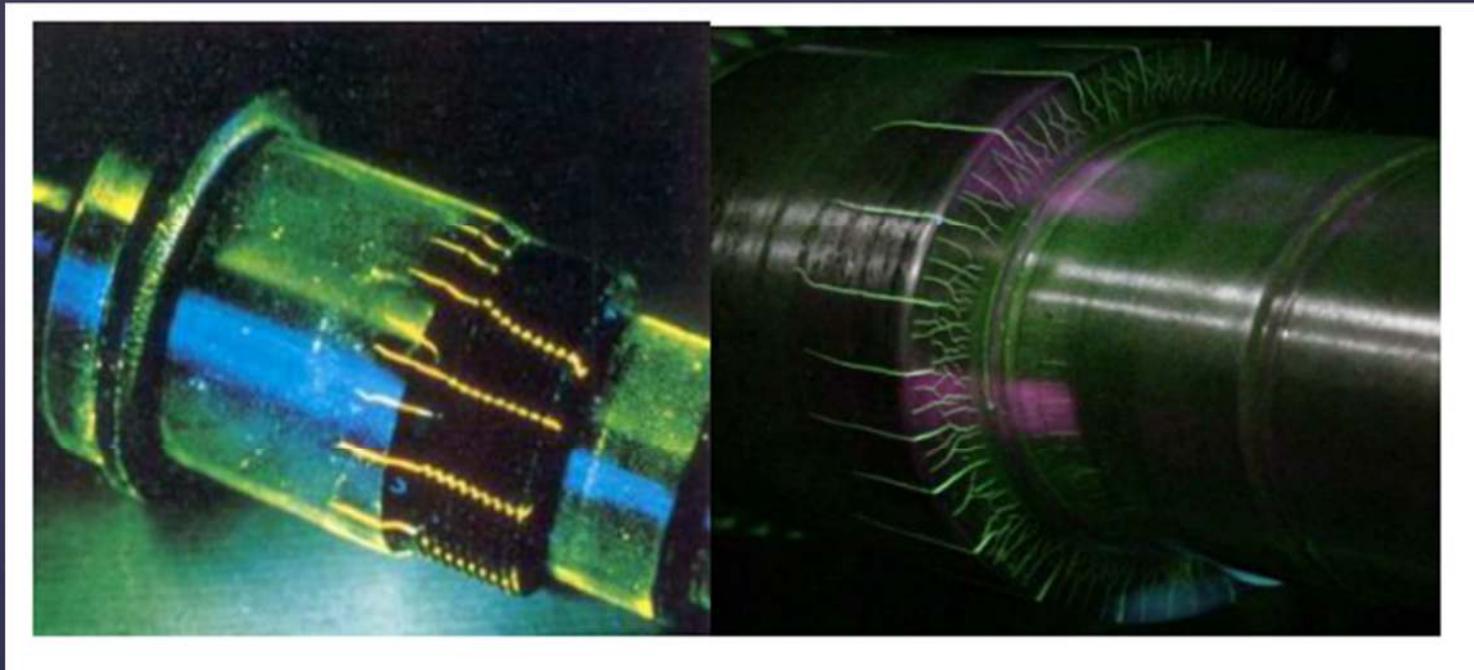
La méthode est relativement simple de mise en œuvre, elle permet une localisation précise des défauts de surface ou légèrement sous-jacentes et une appréciation de leur longueur.

## Inconvénients

La méthode ne s'applique que sur les matériaux ferromagnétiques et la sensibilité est dépendante de l'orientation du défaut par rapport à la direction générale des lignes d'induction. Elle ne permet pas une appréciation de la profondeur et l'interprétation dans la phase de révélation reste parfois très délicate : l'automatisation de cette dernière phase n'a pas encore vraiment débouché industriellement. Une désaimantation des pièces après contrôle est nécessaire pour les pièces exposées à un environnement sévère.

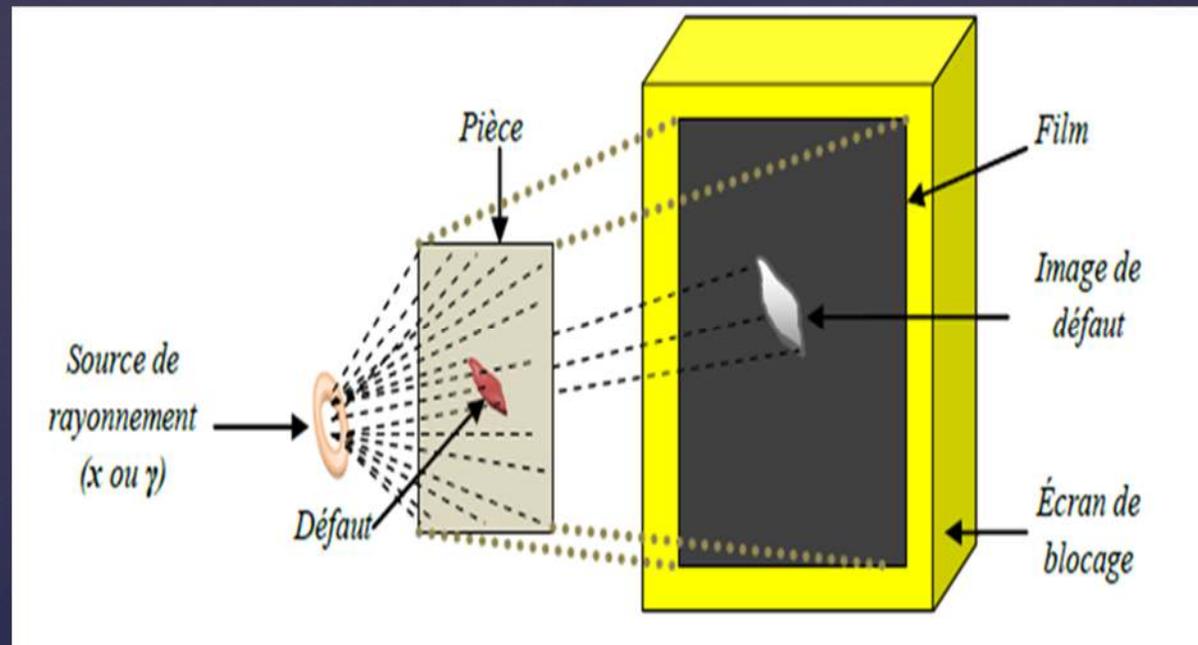
## Applications

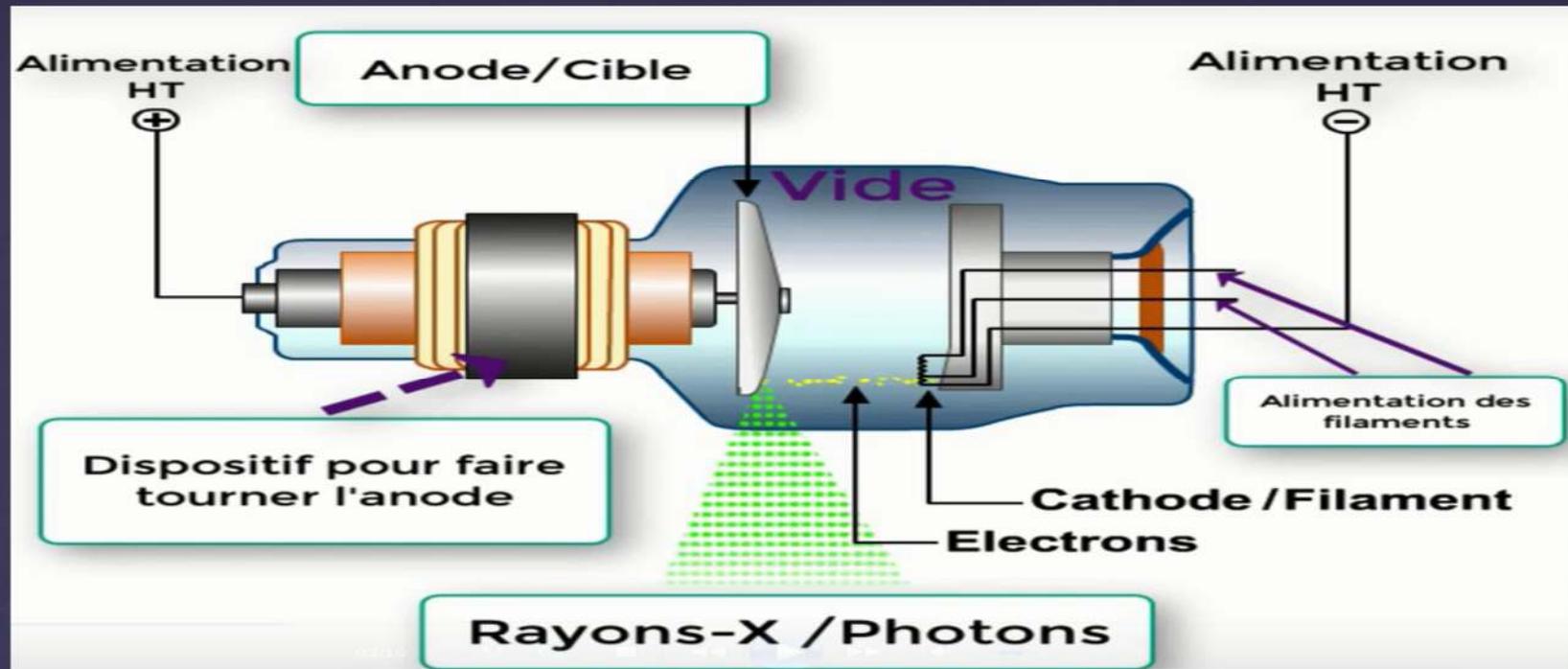
- ❑ Contrôle de bielles, biellettes,
- ❑ Contrôle de tiges, ressorts...
- ❑ Contrôle de soudures, piquages
- ❑ .....

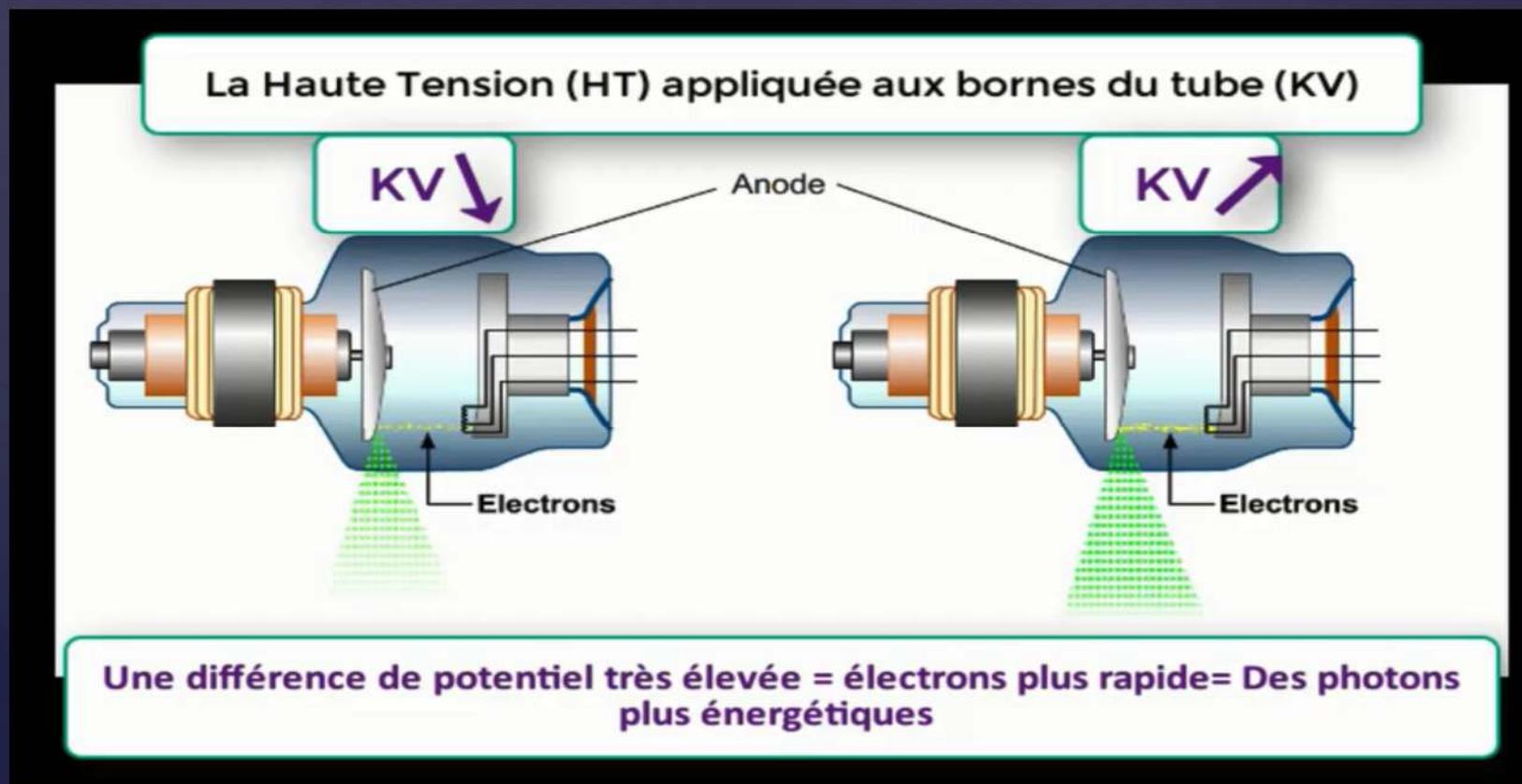
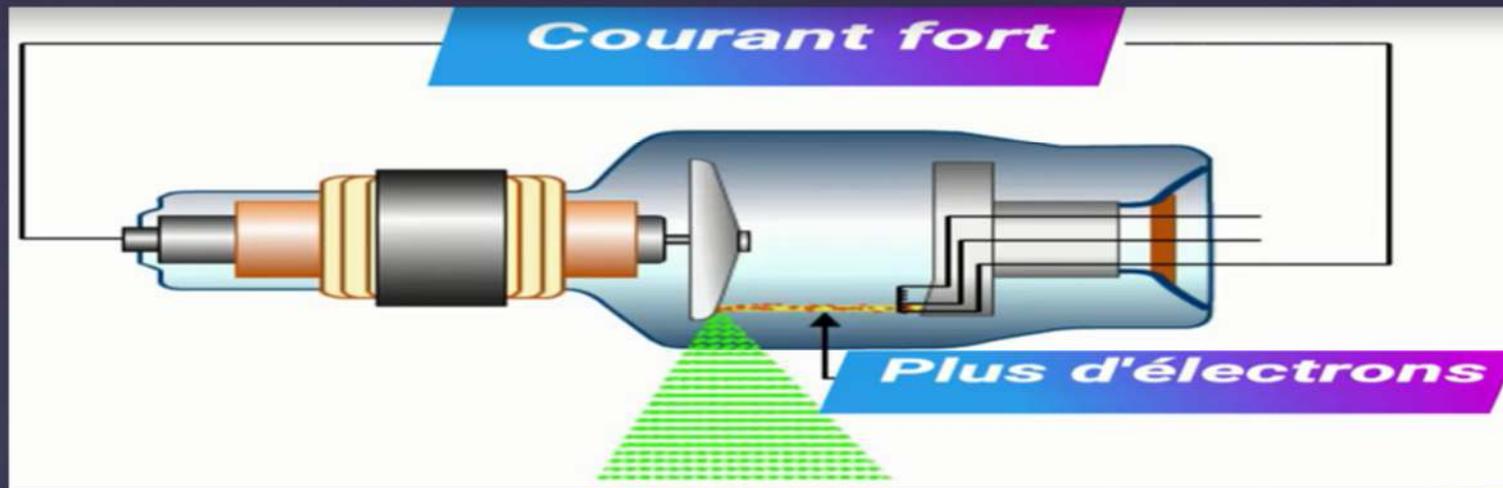


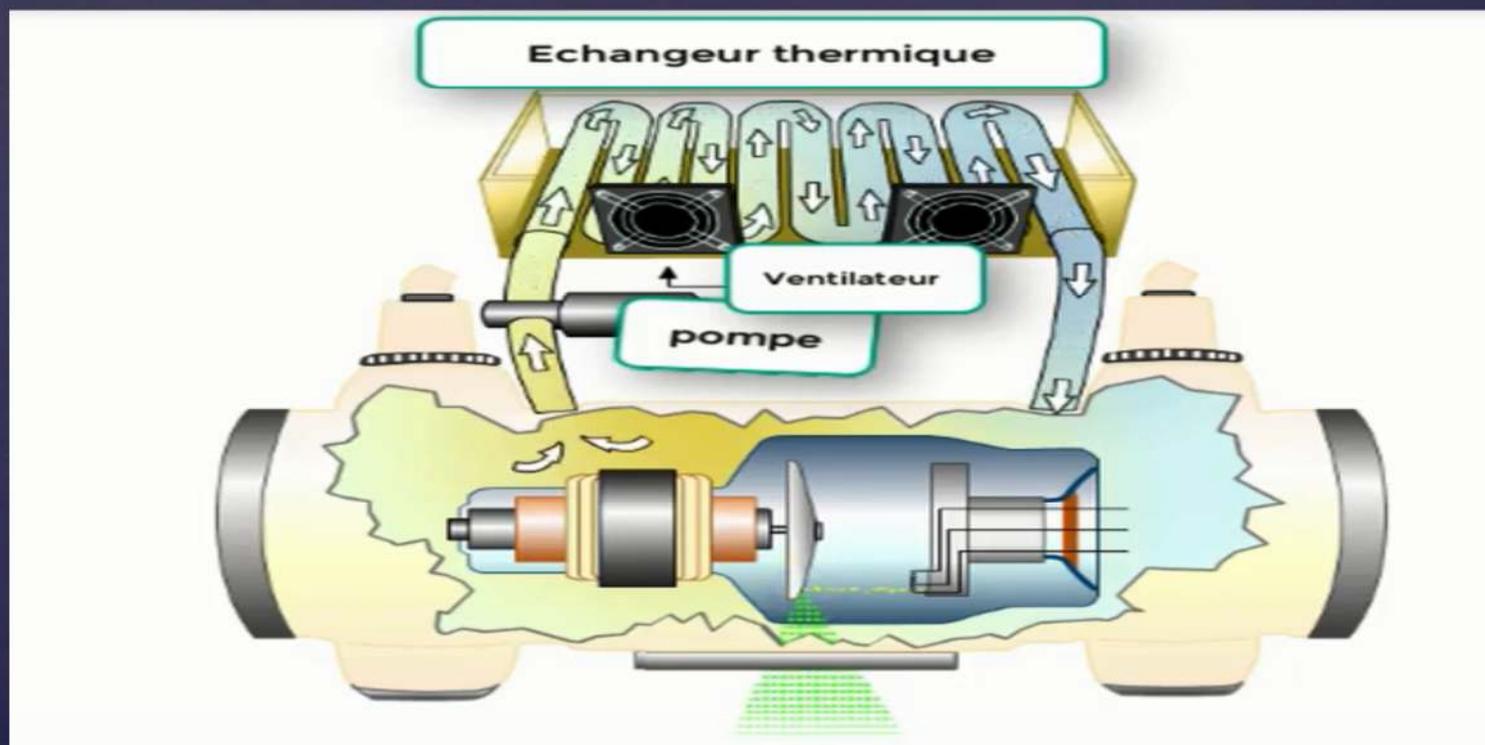
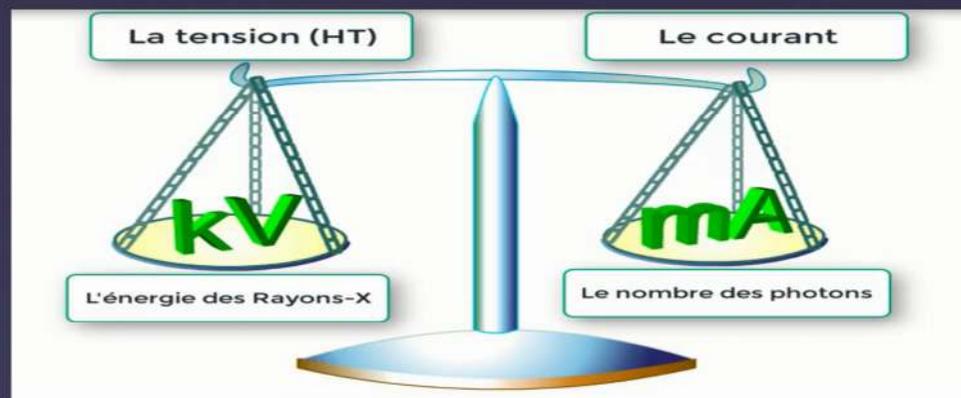
## Radiographie

L'examen de la structure interne d'un objet par radiographie consiste à le faire traverser par un rayonnement électromagnétique de très courte longueur d'onde (rayons X ou  $\gamma$ ) et à recueillir les modulations d'intensité du faisceau sous forme d'une image sur un récepteur approprié, un film dans la plupart des cas.









## Applications

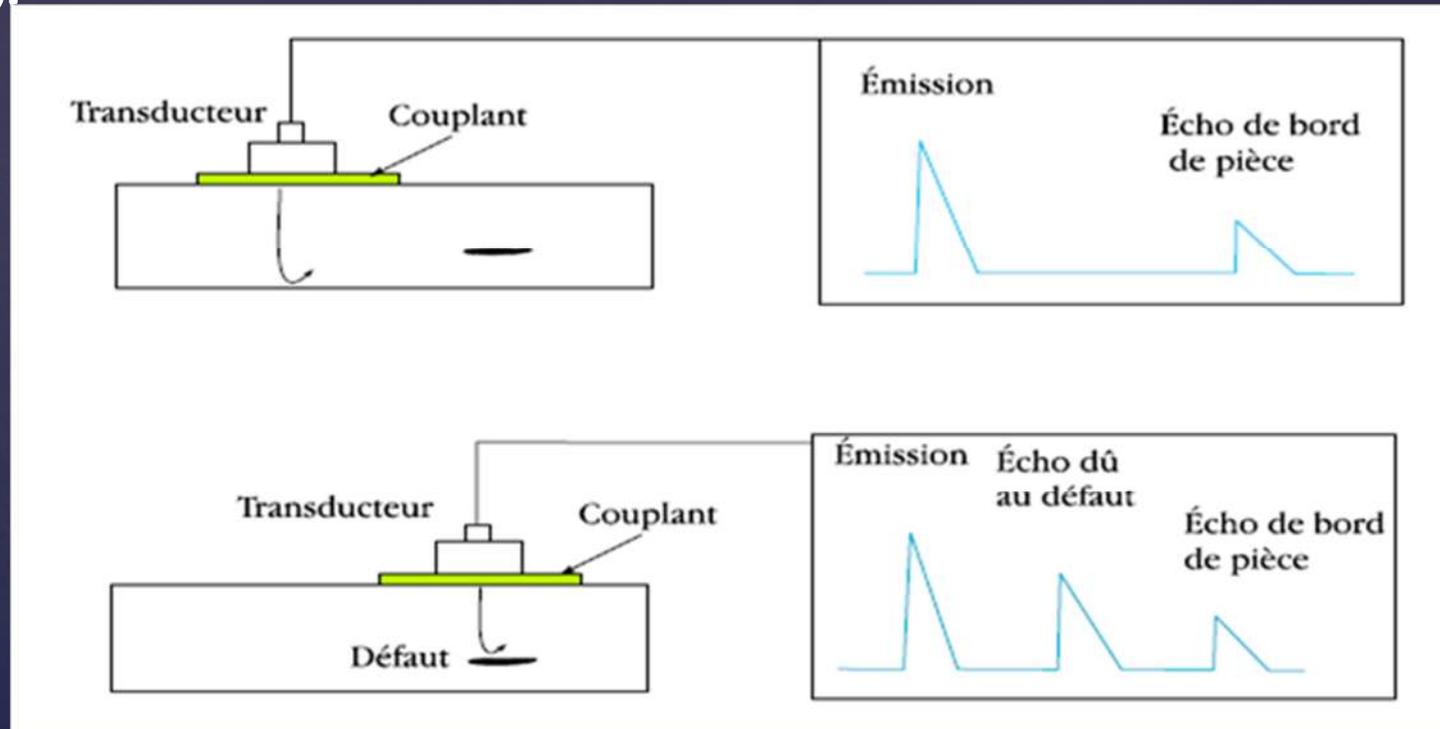
### Recherche d'anomalies internes :

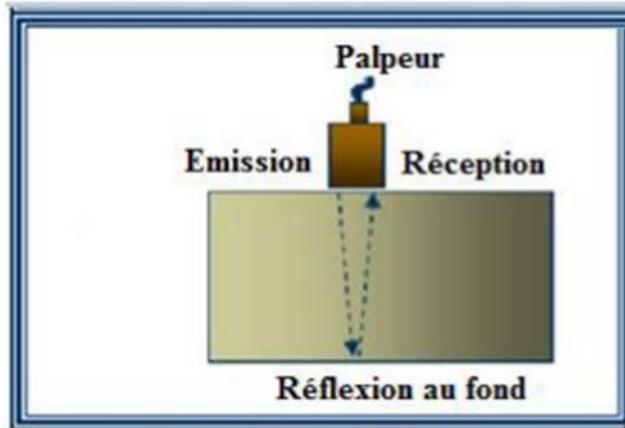
- a) Pièces moulées : retassures, criques, restes de noyaux...
- b) Soudures : fissures, manques de fusion, manque de pénétration, soufflures, inclusions, défauts de formes ;
- c) Tuyauterie : corrosions ou érosions internes, dépôts internes, défauts de soudure ;
- d) Parois en béton armé : cavité, fissures, armatures;
- e) Position du clapet dans une vanne ;
- f) Contrôle de jeux dans un assemblage emboîté ;

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"><li>◆ Technique possible dans tous les matériaux</li><li>◆ Large gamme d'épaisseurs (de quelques fractions de mm à plusieurs centaines de cm)</li><li>◆ Film radio : preuve</li><li>◆ Large domaine d'applications</li></ul>	<p><b>Limites d'ordre techniques :</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>◆ Interprétation délicate des images,</li><li>◆ Personnel hautement qualifié.</li></ul> <p><b>Limites d'ordre pratique :</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>◆ Conditions de sécurité strictes,</li><li>◆ Orientation du défaut,</li><li>◆ Prix de revient élevé.</li></ul>

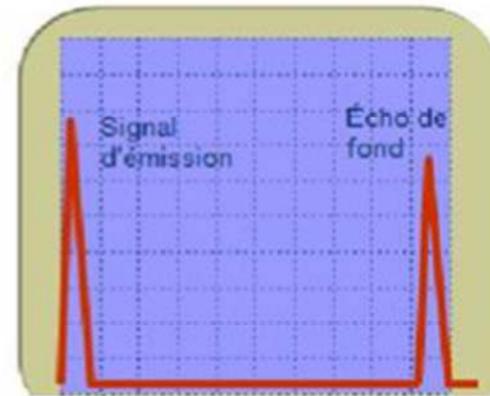
## Ultrasons

Les ultrasons sont des vibrations mécaniques qui se propagent dans la matière. Le principe consiste à émettre une onde ultrasonore (par un transducteur) qui se propage dans la pièce à contrôler et se réfléchit, à la manière d'un écho, sur les obstacles qu'elle rencontre (défauts, limites de la pièce).

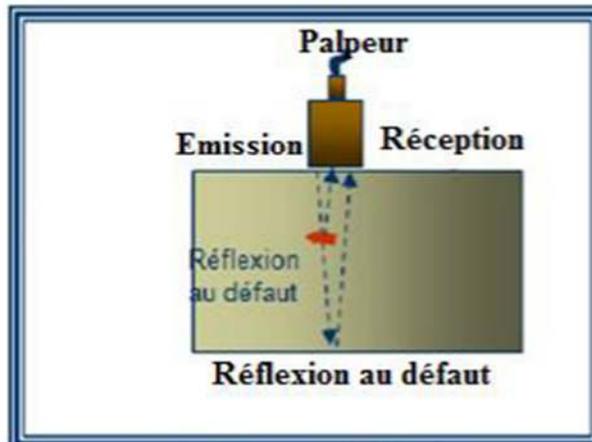




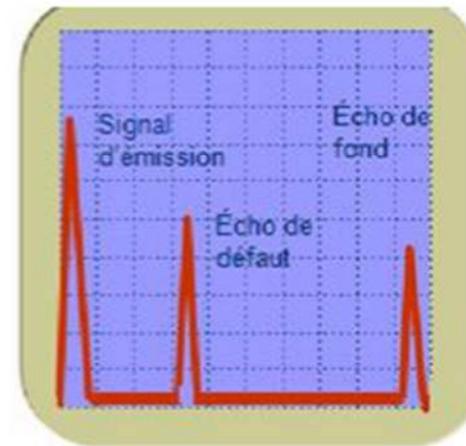
Pièce sans défaut



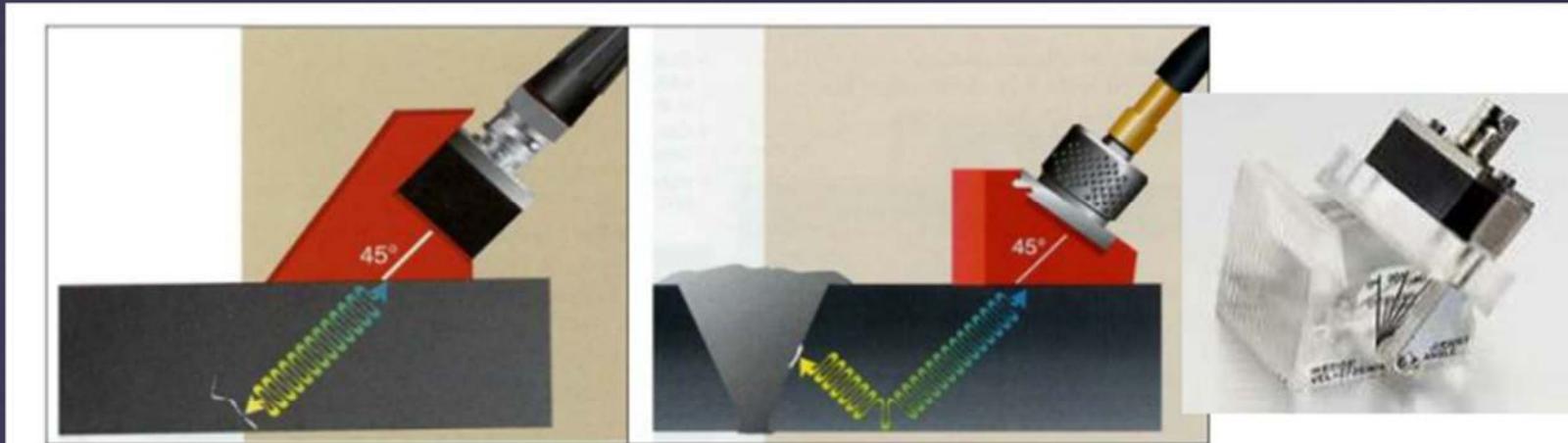
**Temps de pose** (temps de silence) : c'est le temps nécessaire pour lequel l'onde soit perturbé (se réfléchisse) par le fond de la pièce ou par le défaut.



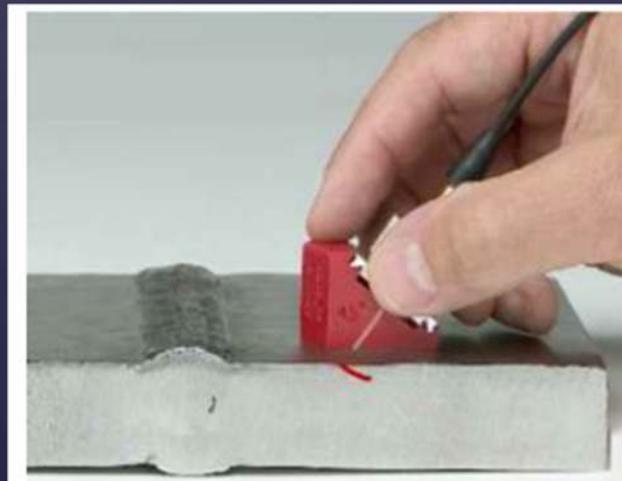
Pièce avec défaut



## Utilisation de palpeurs obliques



Les angles les plus courants dans le commerce sont : 45°, 60° et 70° (sous-entendus dans l'acier).



## Avantages et inconvénients

### 1. Avantages

- ⊙ Contrôle sur métaux, plastiques, matériaux divers
- ⊙ La détection des défauts à l'intérieur des matériaux
- ⊙ Grande précision possible.
- ⊙ Localisation et dimensionnement des défauts.
- ⊙ Rapidité de mise en œuvre et transportabilité.
- ⊙ Contrôle en service possible, large domaine d'application.
- ⊙ Contrôle en temps réel

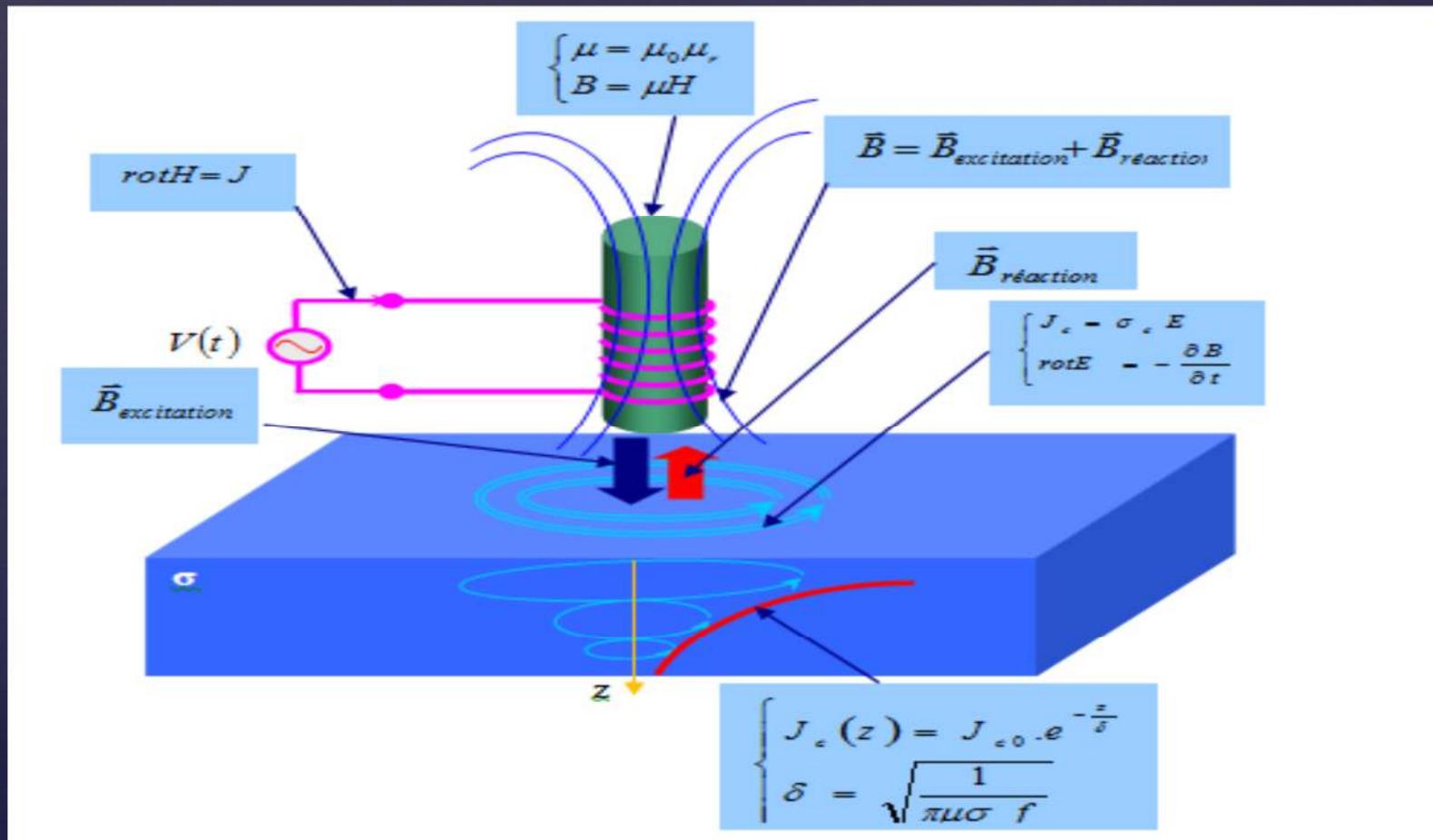
### 2. Inconvénients

- ⊙ 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).

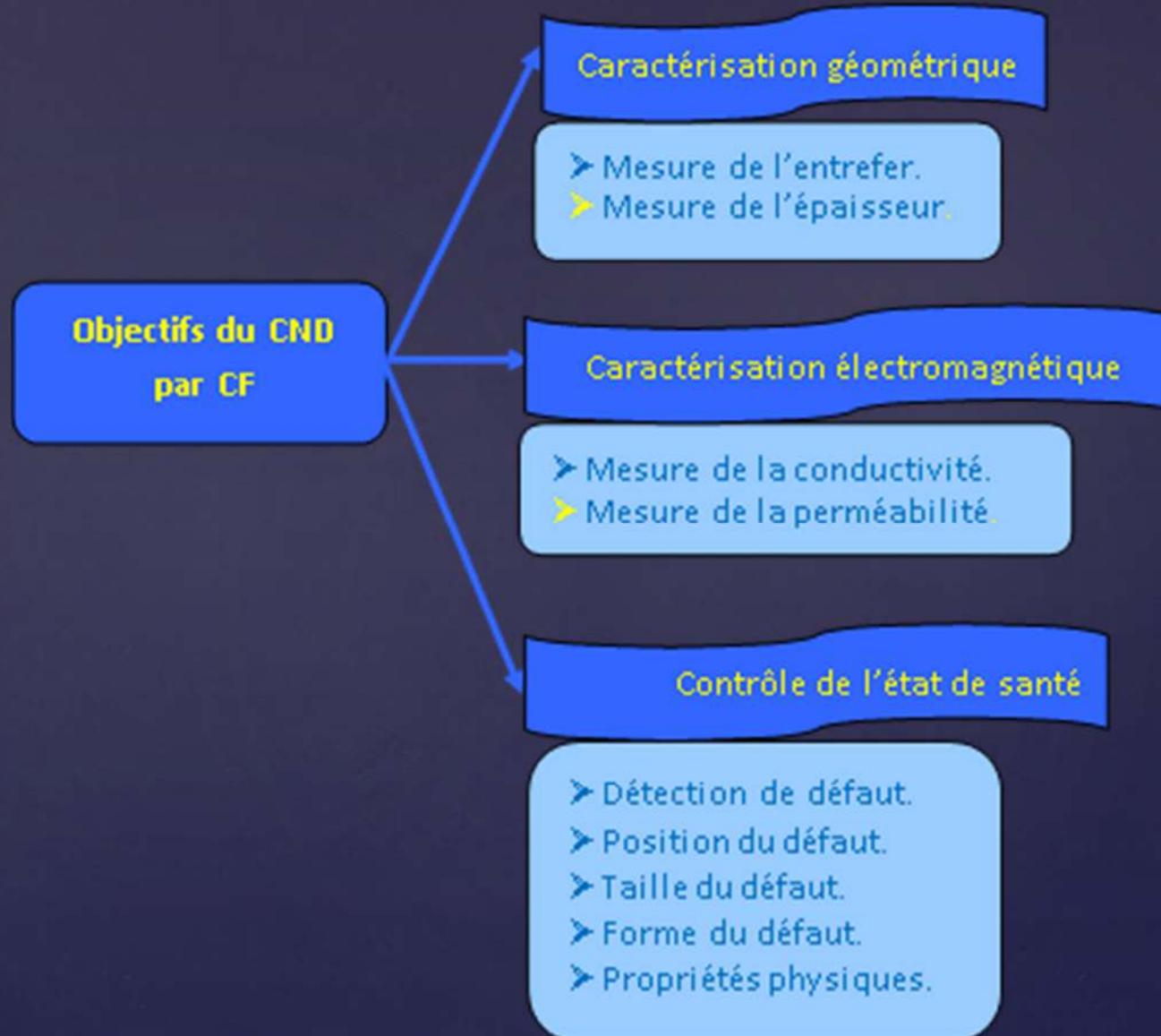
## Courants de Foucault

### Principe

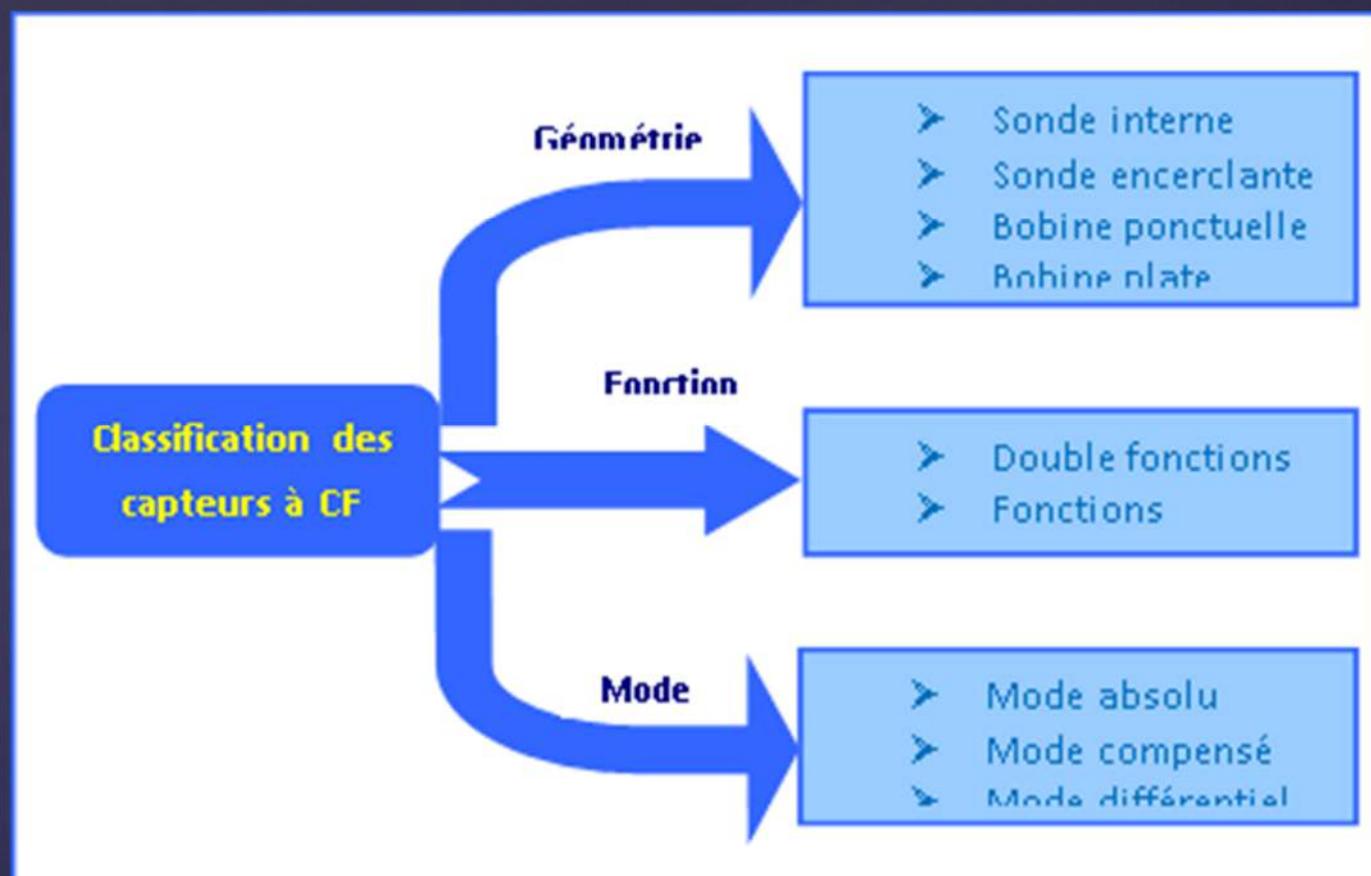
On appelle courants de Foucault (CF) ou courants induits les courants électriques créés dans un objet conducteur, soit par la variation au cours du temps d'un champ magnétique dans lequel est plongé l'objet, soit par déplacement de cet objet dans un champ magnétique constant. Ce phénomène a été découvert par le physicien français Léon Foucault en 1851.



## Objectifs du CND-CF



## Classification

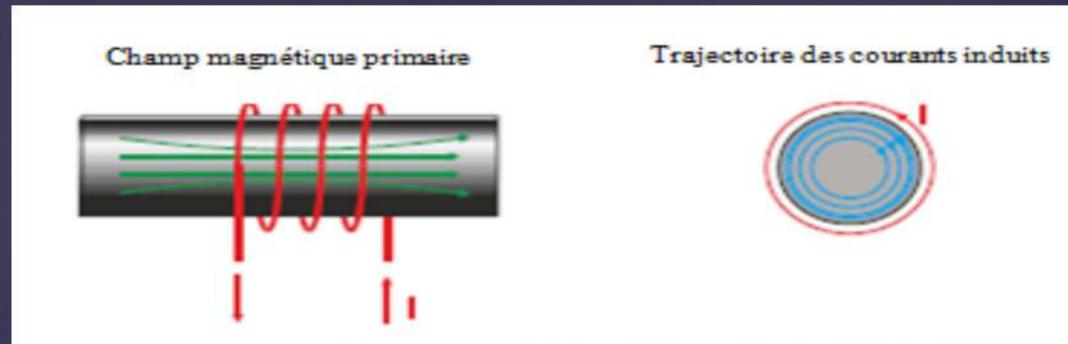


## Types de capteurs

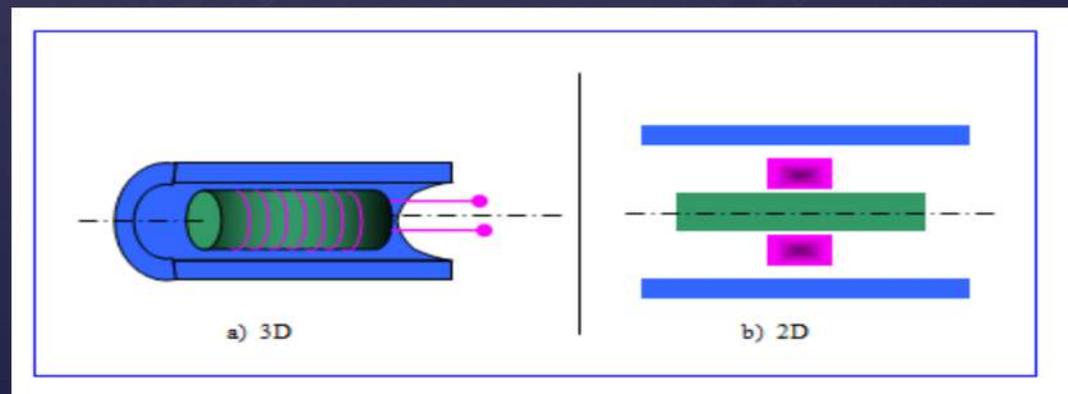
Selon la forme géométrique, on distingue cinq principales configurations.

### Bobine encerclante

C'est un capteur dont les enroulements de mesure entourent le produit à examiner. Il est utilisé pour contrôler par l'extérieur des objets de faibles sections, les tubes, les barres.

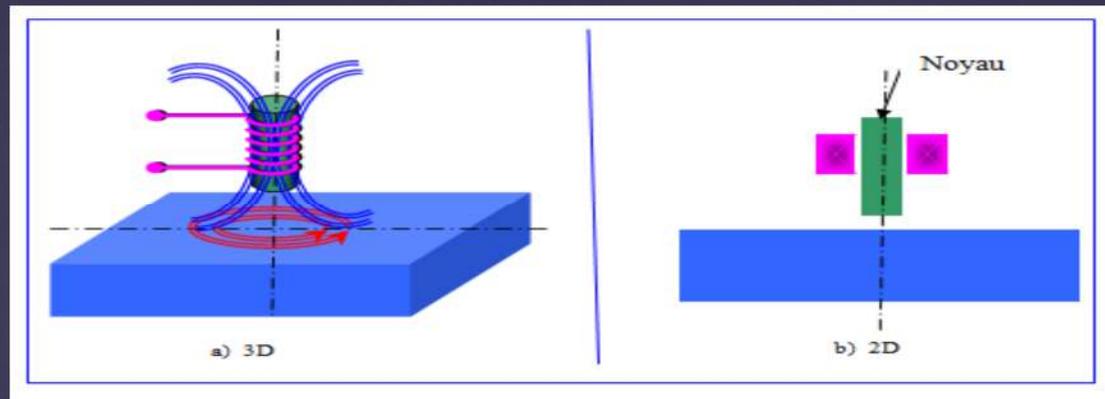


### Sonde interne



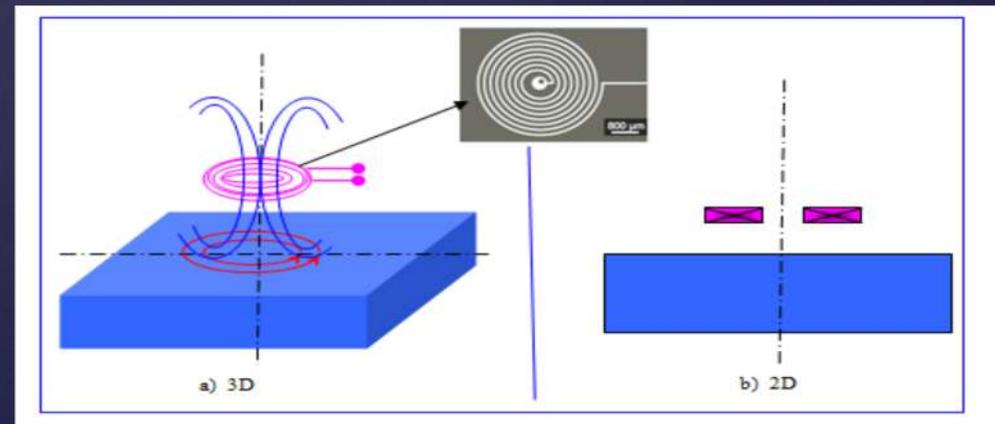
## Sonde ponctuelle

Elle est utilisée pour l'inspection des objets à des endroits précis. L'axe du capteur est perpendiculaire à la surface de la pièce. En effet, ce palpeur permet de faire un contrôle local des pièces même celles dont la géométrie est complexe



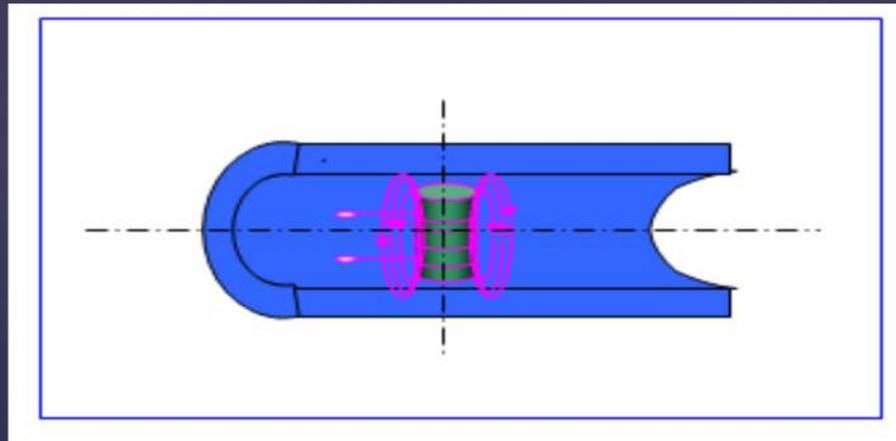
## Bobine plate

De la même manière que la bobine ponctuelle, ce capteur opère sur les surfaces des pièces. Vue sa géométrie, sa zone d'action est plus large



## Sonde interne tournante

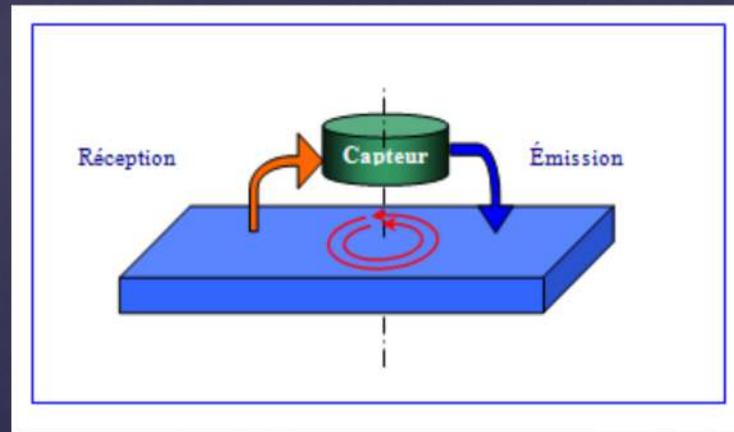
Dans ce cas, le capteur tourne autour de l'axe de translation. Il en résulte alors un champ magnétique perpendiculaire à l'axe du tube. Ce capteur permet de localiser le défaut avec précision sur la surface interne du tube



## Fonctions du capteur

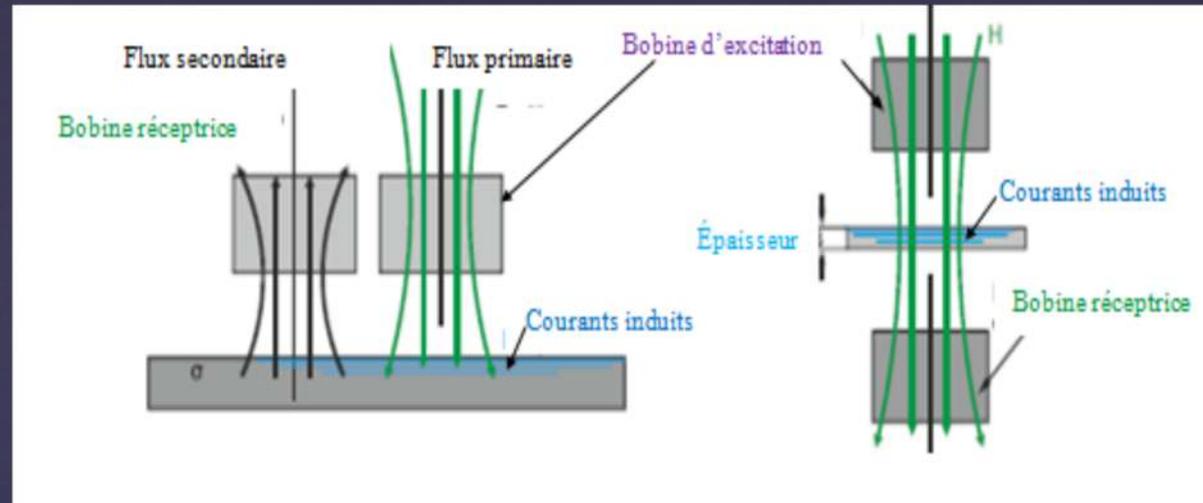
### Capteur à double fonction

Ce capteur assure les deux fonctions d'excitation et de réception. L'extraction de l'information se fait par la mesure de l'impédance équivalente ou de la variation de l'impédance. Cette dernière est due à la présence du matériau au voisinage du capteur ou à la présence d'une anomalie dans ce matériau.



## Capteur à fonctions séparées

Le capteur est muni d'un second enroulement qui servira uniquement pour la mesure. On parle alors de mesure par trans-impédance ou de capteur à fonctions séparées.

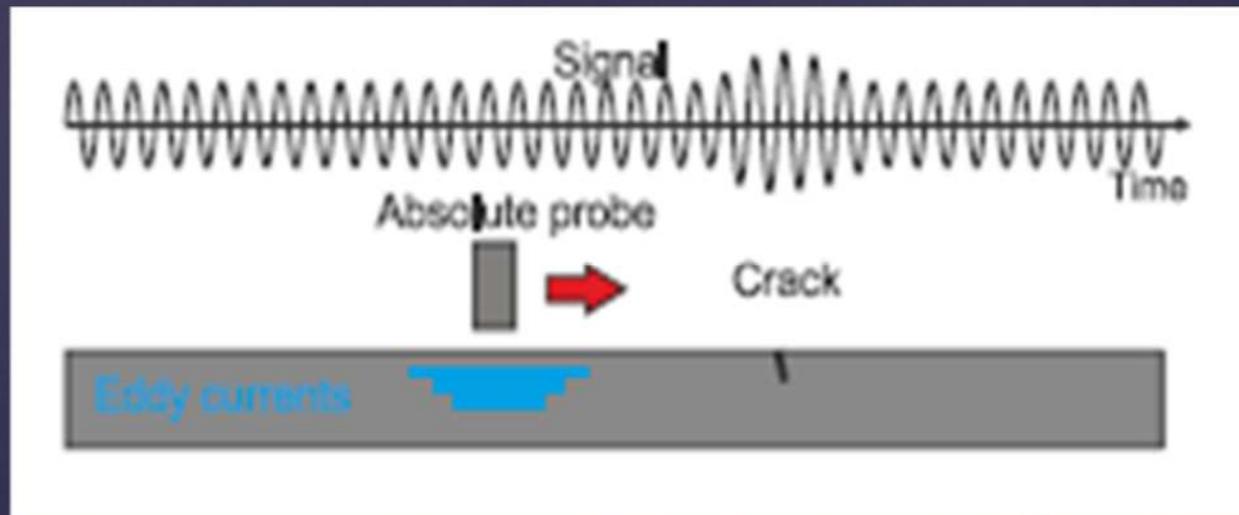


L'avantage du capteur à fonctions séparées est que la conception de la bobine émettrice est optimisée pour produire un champ fort et uniforme en ajustant les paramètres de la bobine en l'occurrence le diamètre de la bobine, la section et le nombre de spires. D'autre part, la conception de la bobine réceptrice (pick-up coil) est optimisée de telle sorte à capter le maximum de flux et adaptée (sa taille) aussi à la taille des défauts à détecter.

## Modes de contrôle

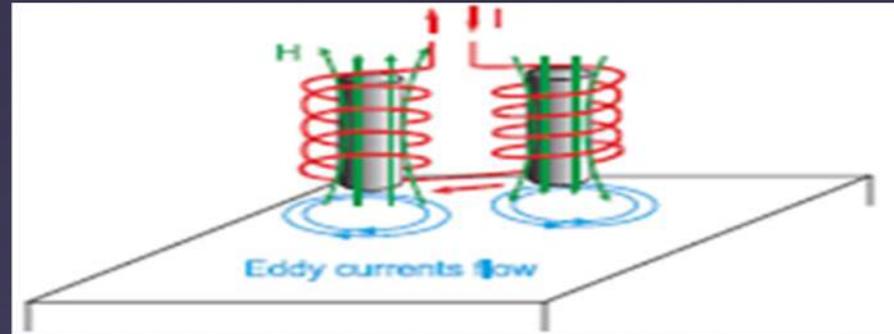
### Mode absolu

La méthode absolue utilise un capteur à double fonction. En présence d'un défaut, l'amplitude de la grandeur d'alimentation est modifiée. La mesure se fait par la comparaison du signal reçu à une référence artificielle. Ce mode permet d'accéder aux grandeurs utiles ainsi qu'aux grandeurs perturbatrices (température, ...). L'inconvénient de ce mode, sans compensation, est sa grande sensibilité à la variation de la température.



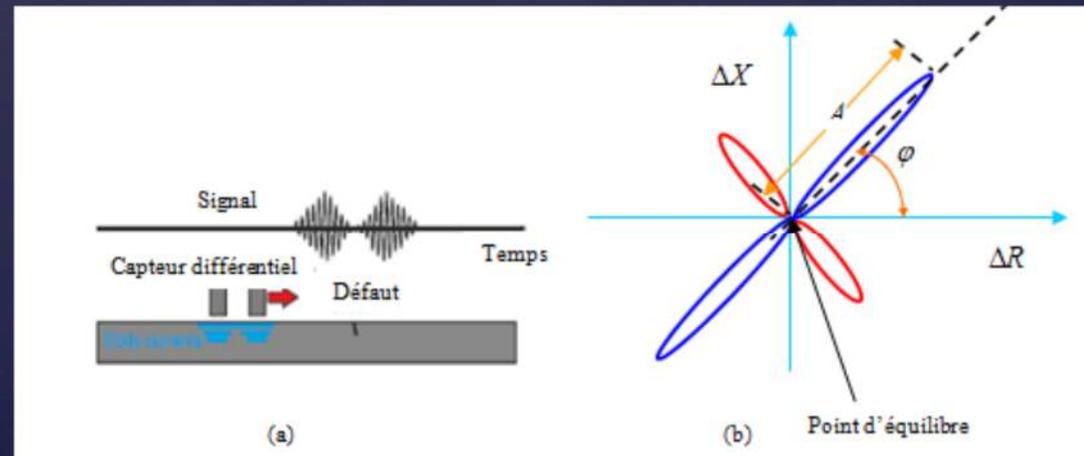
## Mode différentiel

La mesure différentielle est une comparaison de deux mesures effectuées simultanément d'impédances de deux capteurs absolus dont les flux sont opposés



En effet, dans le cas d'une pièce saine, l'impédance différentielle est nulle. Par contre, si la pièce présente une anomalie l'amplitude de la grandeur d'alimentation est modifiée.

- Le passage de la sonde devant un défaut provoque l'apparition d'un signal (courbe de Lissajous) dans le plan complexe (Figure 1.14.b).
- L'amplitude du signal est fonction du volume de la matière affectée. De même, la phase est liée au type de défaut et à sa profondeur.



## Avantages du contrôle par courants de Foucault

Le contrôle par courants de Foucault présente plusieurs avantages tels que :

- ❑ Rapidité de balayage et de détection ;
- ❑ Détection possible à travers un revêtement surfacique ;
- ❑ Aucune préparation particulière de la surface à contrôler ;
- ❑ Qualité de détection indépendante de la vitesse de balayage ;
- ❑ Pas de nécessité d'étalonnage de l'appareil, une simple calibration est suffisante ;
- ❑ Traitement informatique avec stockage des données de modélisation ;
- ❑ Contrôle non polluant ;
- ❑ Automatisable.

## Flux de fuite magnétique

Les dispositifs MFL sont généralement constitués d'un circuit magnétique magnétisé par un ensemble de bobines d'excitation alimentées par un courant continu ou aimant permanent. Le circuit magnétique forme avec la pièce à étudier un circuit magnétique fermé.

La présence d'un capteur lors du balayage de la pièce permet de relever les champs qui fuient dans l'air. Au voisinage d'un défaut, le parcours des lignes de champ est modifié. Les lignes de champ magnétiques contournent les zones d'air et quelques lignes de champ viennent à fuir dans l'air à proximité du défaut. Ces variations locales de champ magnétique sont détectées par un capteur de champ magnétique

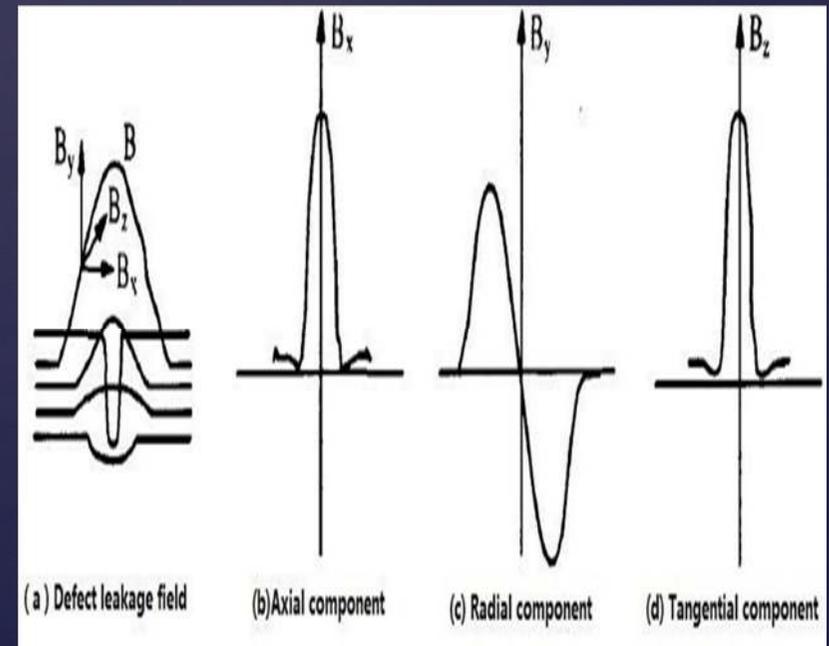
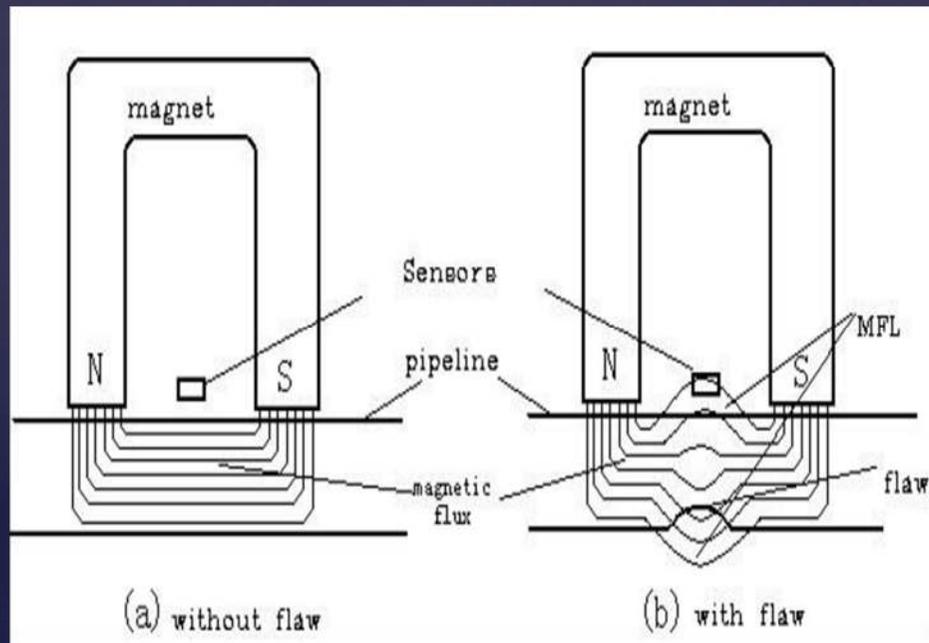


Table 1. Measurement ranges of magnetic sensors.

Magnetic Sensor	Measurable Intensity/T
Induction coils	$10^{-13} \sim 10$
Hall components	$10^{-5} \sim 10$
Magnetic flux gate	$10^{-12} \sim 10^{-13}$
Magnetic sensitive diode	$10^{-6} \sim 10^{-1}$
Magnetic sensitive transistor	$10^{-6} \sim 10^{-1}$
Magnetic resistance	$10^{-11} \sim 10^{-3}$

### a) Avantage :

- ⊙ Simple, peu coûteux et rapide.
- ⊙ Détection des défauts débouchant et sous - jacents

### b) Inconvénient :

- ⊙ Applicable seulement aux matériaux ferromagnétiques.
- ⊙ Aimantation dépend de la perméabilité de la pièce examinée.
- ⊙ La sensibilité de détection des défauts dépend en effet de la nature, de la direction et de l'intensité de la magnétisation de la pièce, [4].