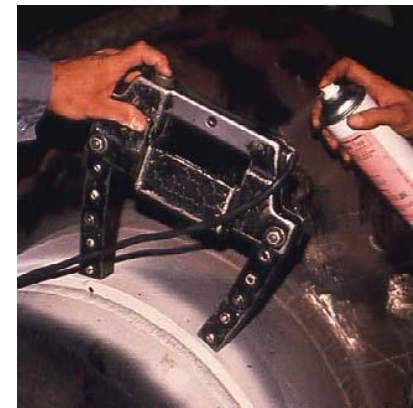


*Université Frères Mentouri Constantine1*  
*Institut des Sciences et Techniques Appliquées «ISTA»*  
*3<sup>ème</sup> Année PMI/ 2<sup>ème</sup> Année GIM*

# Contrôle Non Destructif (CND)

*Dr. Lyes BIDI*



# Positionnement du contrôle dans l'entreprise



Un client, une expression de besoin

Etudes et Spécification de fabrication



Réalisation du produit



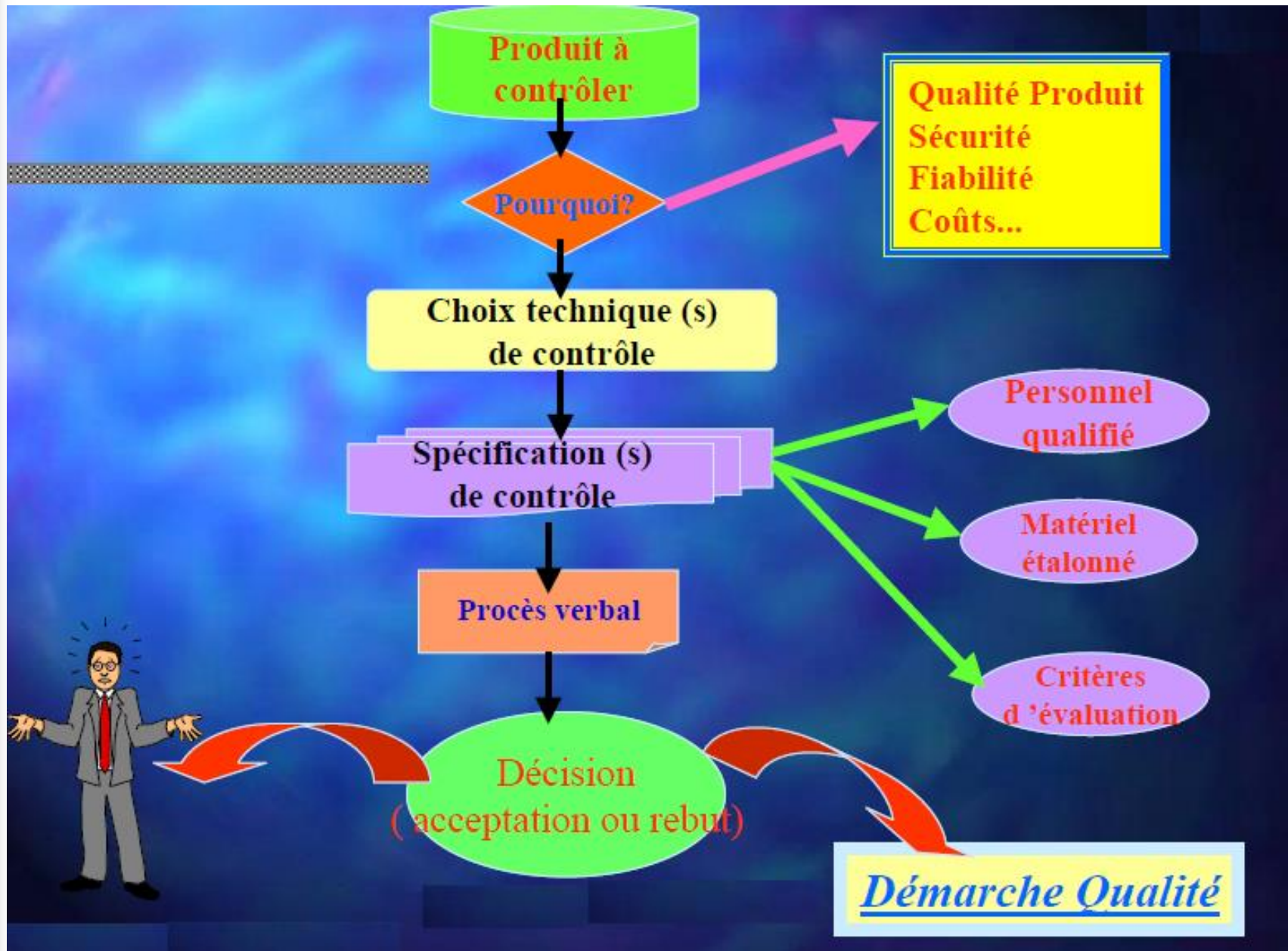
Contrôle du produit



Service Contrôle

Conformité ???







**Destructifs**

Essais mécaniques  
Métallographie

Dégradation du  
matériau

*Avec ou sans  
contact*

*Méthodes  
surfaceutiques ou  
volumiques*

Connaissance des  
défauts  
(localisation, géométrie...)

**Non destructifs**

Visuel, ressuage,  
vide, radio.....

Intégrité du matériau

Souci Qualité, sécurité  
et d'économie...



# Définition du contrôle non destructif



**Définition:** *Méthode de diagnostic de produits, afin de détecter, localiser, dimensionner, caractériser, d'éventuels défauts dans ceux-ci.*

**Moyens:** *Utilisation de capteurs dont le fonctionnement est basé sur les principes de la physique ( électromagnétisme, rayonnements, propagation, électricité ....)*

## 1. Le contrôle en cours de fabrication

Le contrôle en cours de fabrication procède de la philosophie de l'instrumentation industrielle en tant qu'outil de contrôle d'un procédé souvent automatisé et impliquant alors un appareillage installé à demeure en ligne de fabrication présentant une grande robustesse, une réaction rapide, un coût d'exploitation faible et une bonne fiabilité. Les défauts recherchés sont ici généralement bien identifiés, le fonctionnement est automatique aboutissant à un **repérage** ou un **tri des produits défectueux**.

## 2. Le contrôle de réception

Le contrôle de réception d'un lot de pièces, d'une installation, d'un ouvrage au moment de la livraison procède d'une philosophie de respect de conformité à des spécifications de qualité définies auparavant.

Si l'aspect coût et productivité peut avoir encore une certaine importance à ce stade de contrôle, c'est surtout l'aspect procédure de la démarche qui devient primordial, qu'il s'agisse du choix du procédé, du choix des paramètres de réglage, de l'étalonnage, de la présentation et de l'archivage des résultats obtenus. À ce stade, il s'agit de **détecter des défauts** mais aussi souvent d'**en définir la nature et les dimensions**.

### 3. Le contrôle en service

Le contrôle en service s'effectue sur pièces ou structures lors d'opérations de maintenance ou à la suite de détection d'anomalies de comportement. On en attend une très grande fiabilité car les risques de non-détection d'un défaut sont graves. Pour ce type de contrôle, il convient de pouvoir estimer le mieux possible la **nature et les dimensions des défauts** pour pouvoir en apprécier la nocivité ; il faut disposer aussi d'une grande reproductibilité de l'examen non destructif, de façon à pouvoir **suivre l'évolution du dommage au cours du temps**.



## 1. Les défauts de surface

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 et les défauts d'aspect.

- Les défauts ponctuels qui correspondent aux défauts les plus nocifs sur le plan technologique, puisqu'il s'agit des criques, piqûres, fissures, craquelures, généralement aptes à provoquer à terme la rupture de la pièce, en initiant par exemple des fissures de fatigue. Dans les pièces métalliques, l'épaisseur de ces fissures est souvent infime (quelques  $\mu\text{m}$ ) et elles peuvent être nocives dès que leur profondeur dépasse quelques dixièmes de millimètre, ce qui implique l'emploi pour leur détection de méthodes non destructives sensibles, telles que le ressuage, la magnétoscopie, les courants de Foucault, les ultrasons.
- Les défauts d'aspect qui correspondent à des plages dans lesquelles une variation de paramètres géométriques ou physiques (rugosité, surépaisseur, taches diverses) attire le regard et rend le produit inutilisable. Ici, le contrôle visuel est possible, mais on cherche à le remplacer par des contrôles optiques automatiques.

## **2. Les défauts internes**

Ils sont des hétérogénéités de natures, de formes, de dimensions extrêmement variées, localisées dans le volume du corps à contrôler. Leur nomenclature est très étoffée et spécifique à chaque branche d'activité technologique et industrielle.

Dans les industries des métaux, il s'agira de criques internes, de porosités, de soufflures, d'inclusions diverses susceptibles d'affecter la santé des pièces moulées, forgées, laminées, soudées. Dans d'autres cas, il s'agira simplement de la présence d'un corps étranger au sein d'une enceinte ou d'un produit emballé.

# Principe de la détection d'un défaut

Le principe de la détection d'un défaut consiste à exciter celui-ci et à recueillir sa réponse. On peut généralement distinguer les étapes suivantes, quelle que soit la méthode employée :

- Mise en œuvre d'un processus physique énergétique (**excitation**);
- Modulation ou altération de ce processus par les défauts (**perturbation**);
- Détection de ces modifications par un capteur approprié (**révélation**);
- Traitement des signaux et interprétation de l'information délivrée.

## **Différentes techniques de contrôle CND**

Examens visuels, ressuage,  
magnétoscopie, ultrasons,  
radiographie, courants de Foucault,  
thermographie infrarouge, analyse  
des vibrations...



# **1. EXAMEN VISUEL - PROCEDES OPTIQUES**

# Introduction

L'examen visuel est le premier des procédés de contrôle, le plus simple et le plus général puisque c'est aussi le point final de la majorité des autres procédés non destructifs.

En examen préalable, l'inspection visuelle d'un objet, d'une structure, d'un assemblage tel qu'une soudure permettra de guider un observateur expérimenté dans la définition d'une autre technique : choix de l'angle de tir en radiographie, direction de magnétisation, fréquence ultrasonore.

L'examen visuel direct des pièces peut constituer un contrôle suffisant pour la détection des défauts débouchant en surface et surtout des **hétérogénéités locales et superficielles** (taches de différentes natures) constituant des défauts d'aspect rédhibitoires pour des produits plats du types tôles, tissus, verre, etc. Toutefois l'examen purement visuel présente des limitations de différentes natures.

## **L'oeil et ses limitations**

L'oeil est un capteur optique remarquable mais possédant toutefois des limitations dont il faut tenir compte en contrôle non destructif.



## **Aides optiques à la vision**

Il s'agit des instruments d'optique permettant d'accroître les performances de l'oeil ou encore plus généralement de donner la possibilité de contrôler des surfaces inaccessibles à la vision directe de l'observateur.

# 1. Outils optiques classiques

- Il s'agit en premier lieu des **loupes** et des **verres grossissants** constitués généralement d'une ou deux lentilles donnant un grossissement allant de 1,5 à 20 fois environ.
- **Loupe binoculaire** à grossissement variable et éclairage incorporé, éventuellement **microscope**
- On note enfin que l'emploi des **microscopes électroniques à balayage (MEB)**



## 2. Appareils optiques spécifiques

Des appareils optiques spécifiques ont été développés pour le CND.

- **L'endoscope** est un appareil conçu pour pouvoir observer les surfaces non directement accessibles à l'oeil telles que les parois d'un tube ou d'une cavité, d'un alésage ou d'un trou borgne. Mis au point à l'origine pour les examens liés au diagnostic médical, les endoscopes classiques à lentilles ont été remplacés par des **transmetteurs d'image à fibres optiques**



# Endoscope



# Fibroscope



Exemple flamme de four

Ecran de visualisation

# **2. LE RESSUAGE**



# INTRODUCTION

Le ressuage est une extension de l'inspection visuelle qui peut s'appliquer sur tout matériau à l'exception de certaines fontes qui présentent une surface poreuse.

C'est un terme qui désigne la sortie d'un fluide (liquide ou gazeux) d'une discontinuité dans laquelle ce fluide s'était précédemment accumulé au cours d'une opération d'imprégnation.

C'est une méthode de contrôle non destructif qui permet de détecter des défauts débouchant en surface de pièce pour des matériaux non absorbants (alliages métalliques, matières plastiques, caoutchouc moulés, verres, certaines céramiques...).

Les défauts observés sont principalement : les reprises de coulée, les criques, les tapures, les microporosités, les décohésions et les reprises de fonderie. L'opération de ressuage peut s'effectuer à tous les stades d'élaboration d'une pièce (brut de fonderie, après usinage, après traitements thermiques...).

# PRINCIPE DE RESSUAGE

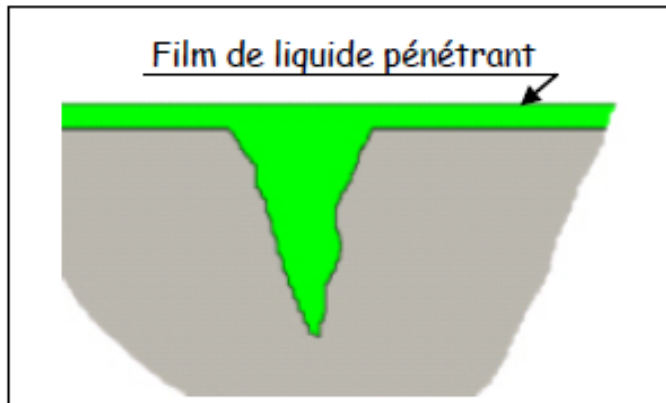
La méthode consiste à appliquer un pénétrant de faible tension superficielle (de bonne capillarité) sur la surface de la pièce.

On lui laisse un certain temps de sorte qu'il puisse s'introduire dans les discontinuités aboutissantes à la surface, 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.

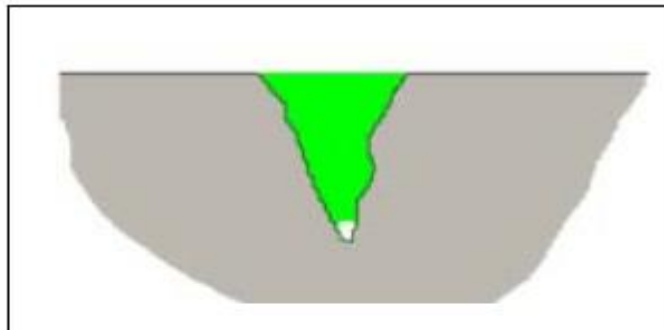
Un révélateur, produit opaque et absorbant est appliqué sur la surface, le pouvoir absorbant du révélateur fait que le pénétrant qui a réussi à s'infiltrer dans les discontinuités est alors aspiré vers la surface (effet buvard) et y laisse une trace. Cette trace à cause de la diffusion du pénétrant dans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

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 ou un produit fluorescent visible à la lumière noire (ultra violet).

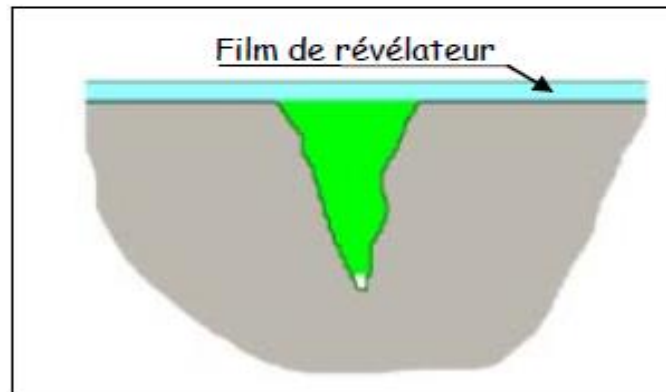
## Principe de la méthode de ressuage par liquide pénétrant pré émulsifié



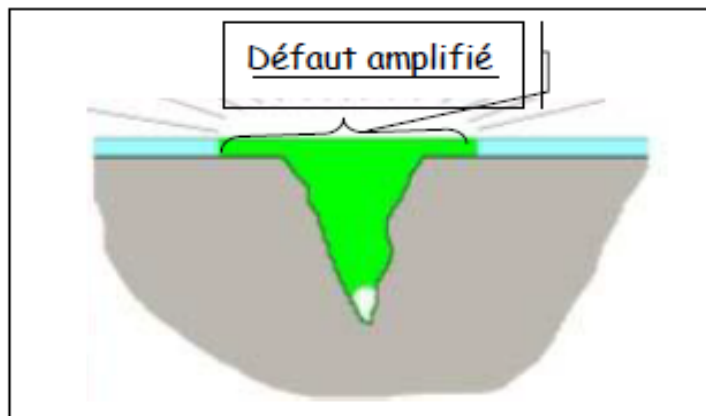
a- Application et pénétration du liquide du pénétrant dans les fissures.



b- Nettoyage de l'excès de pénétrant



c- Application du révélateur.



d- Le révélateur extrait le pénétrant retenu par les fissures.

## DOMAINE D'APPLICATION ET TECHNIQUE OPERATOIRE

Le ressuage ne peut détecter que les défauts superficiels débouchant sur la surface. Les défauts matés ou obturés ne sont que partiellement détectés. Par contre les défauts internes ne peuvent pas être décelés.

On peut ainsi localiser les défauts de : moulage, de fatigue, d'usinage, de traitement thermique et de 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 comme les céramiques, les plastiques, le caoutchouc moulé, (mais il faut, pour les plastiques et les composés caoutchouc moulé, se méfier de leur réactivité vis à vis des produits utilisés et donc procédé à des essais préliminaires).

## La procédure générale

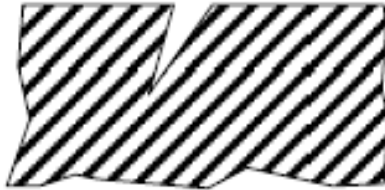
Sur une surface propre, exempte de pollution susceptible de colmater les défauts débouchant (les traces d'huile et de graisse, les résines inorganiques, les matières carbonneuses, les peintures, les produits de corrosion, les oxydes, etc.), est appliqué un liquide contenant des traceurs colorés et (ou) fluorescents. Ce liquide est appelé **liquide d'imprégnation** ou **pénétrant**.

Après une période d'attente (temps d'imprégnation) au cours de laquelle le **pénétrant** vient remplir les discontinuités, l'excès en surface est éliminé.

Un deuxième produit appelé révélateur est alors appliqué à sec ou en suspension sur la surface de la pièce. Son but est de faire « ressuer » c'est-à-dire d'attirer le pénétrant resté en rétention dans les discontinuités.

## Action du pénétrant

Pièce comportant  
une crique



Application du  
pénétrant

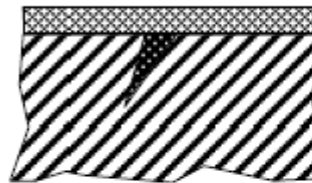


Elimination de  
l'excès de pénétrant

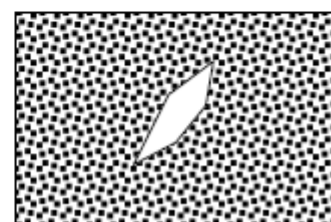
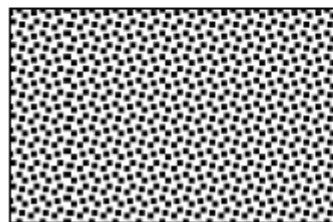
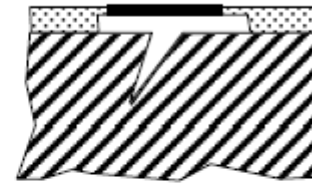


## Action du révélateur

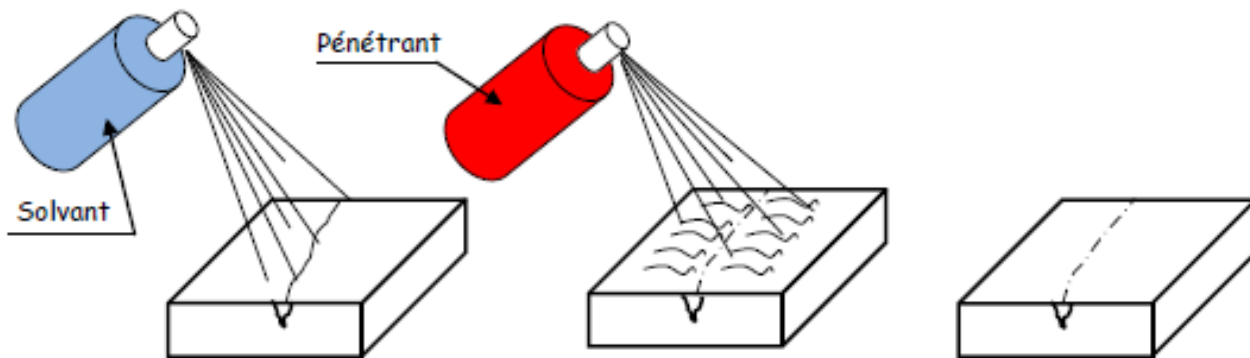
Application du  
révélateur



Examen après  
révélation

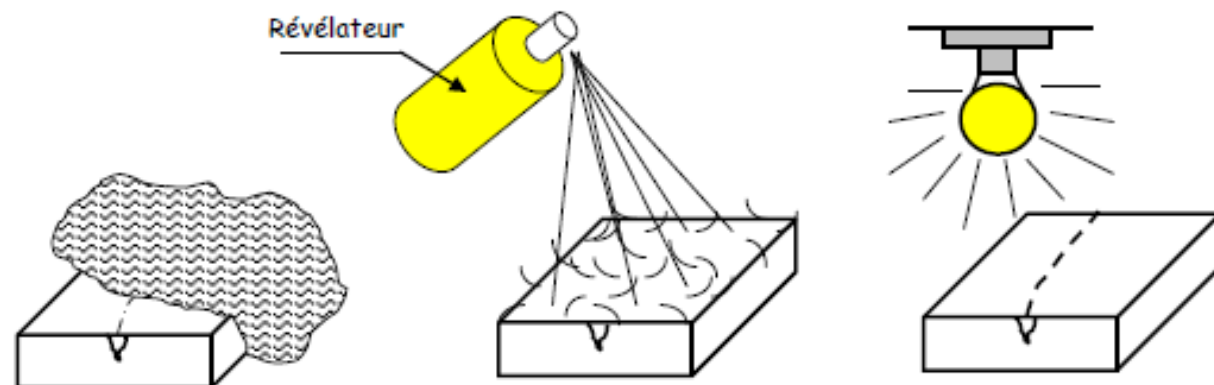






1<sup>er</sup> temps : Nettoyage préalable.

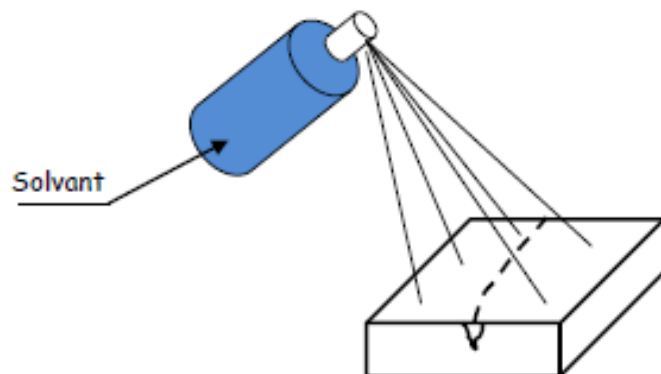
2<sup>ème</sup> temps : Application du pénétrant et imprégnation.



3<sup>ème</sup> temps : Elimination du pénétrant en excès.

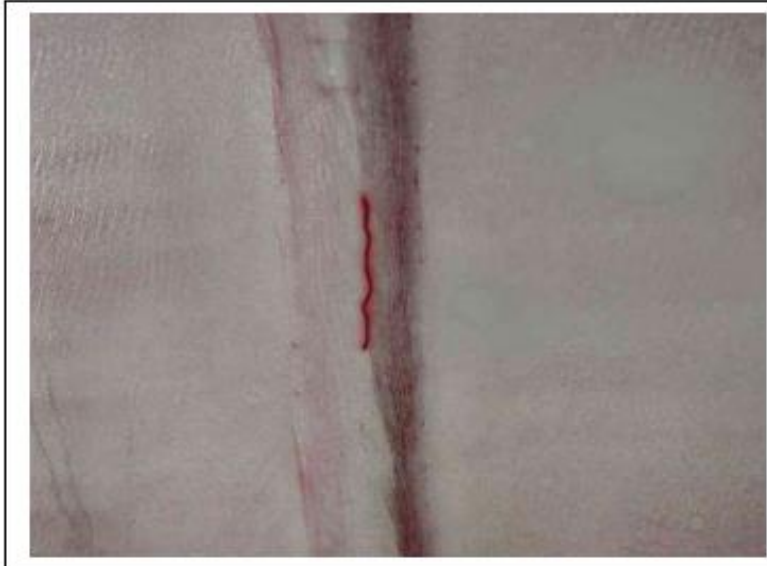
4<sup>ème</sup> temps : Application du révélateur.

5<sup>ème</sup> temps : Examen.

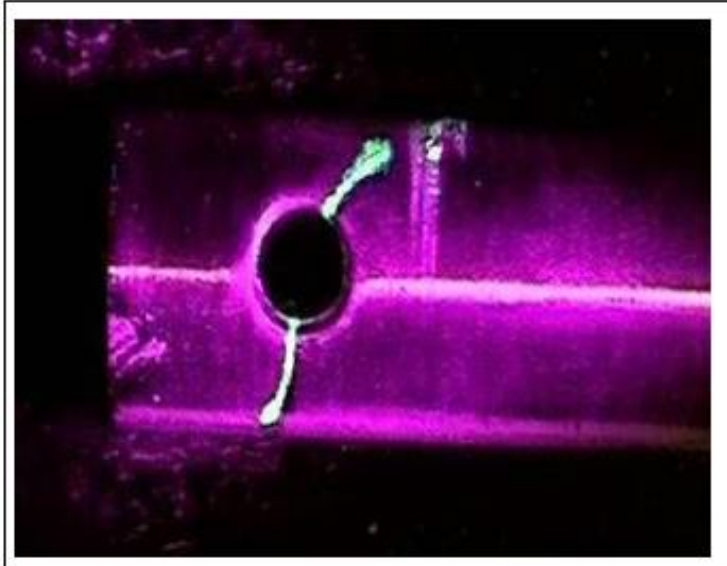


6<sup>ème</sup> temps : Nettoyage final.

# Exemples de pièces

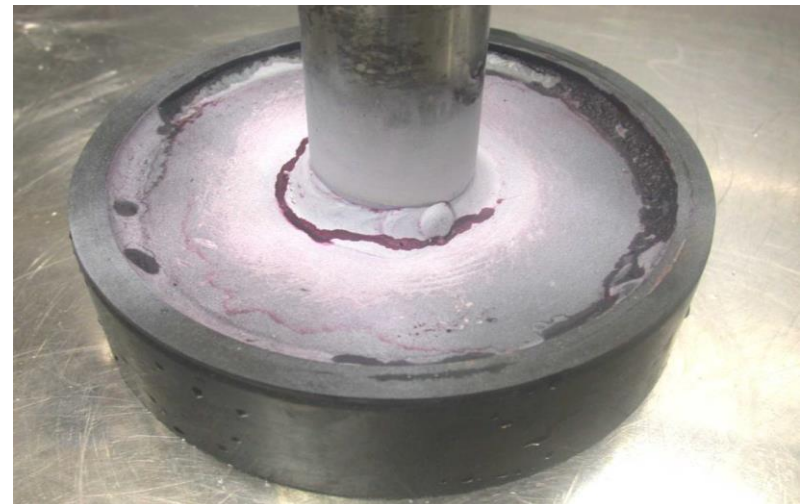
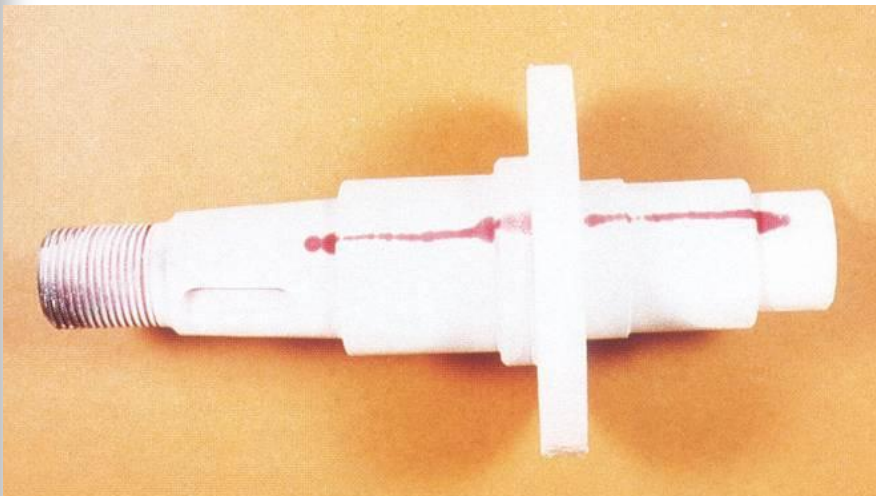
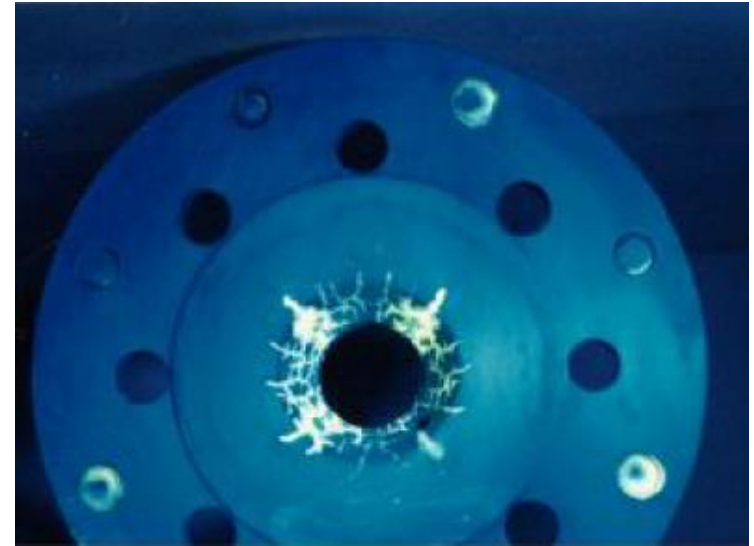


Exemple de pièce, observée en lumière blanche, présentant un défaut.



Exemple de pièce, observée en lumière UV, présentant un défaut.

# Exemples de pièces



# 3. LA MAGNETOSCOPIE



# INTRODUCTION

La magnétoscopie 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).

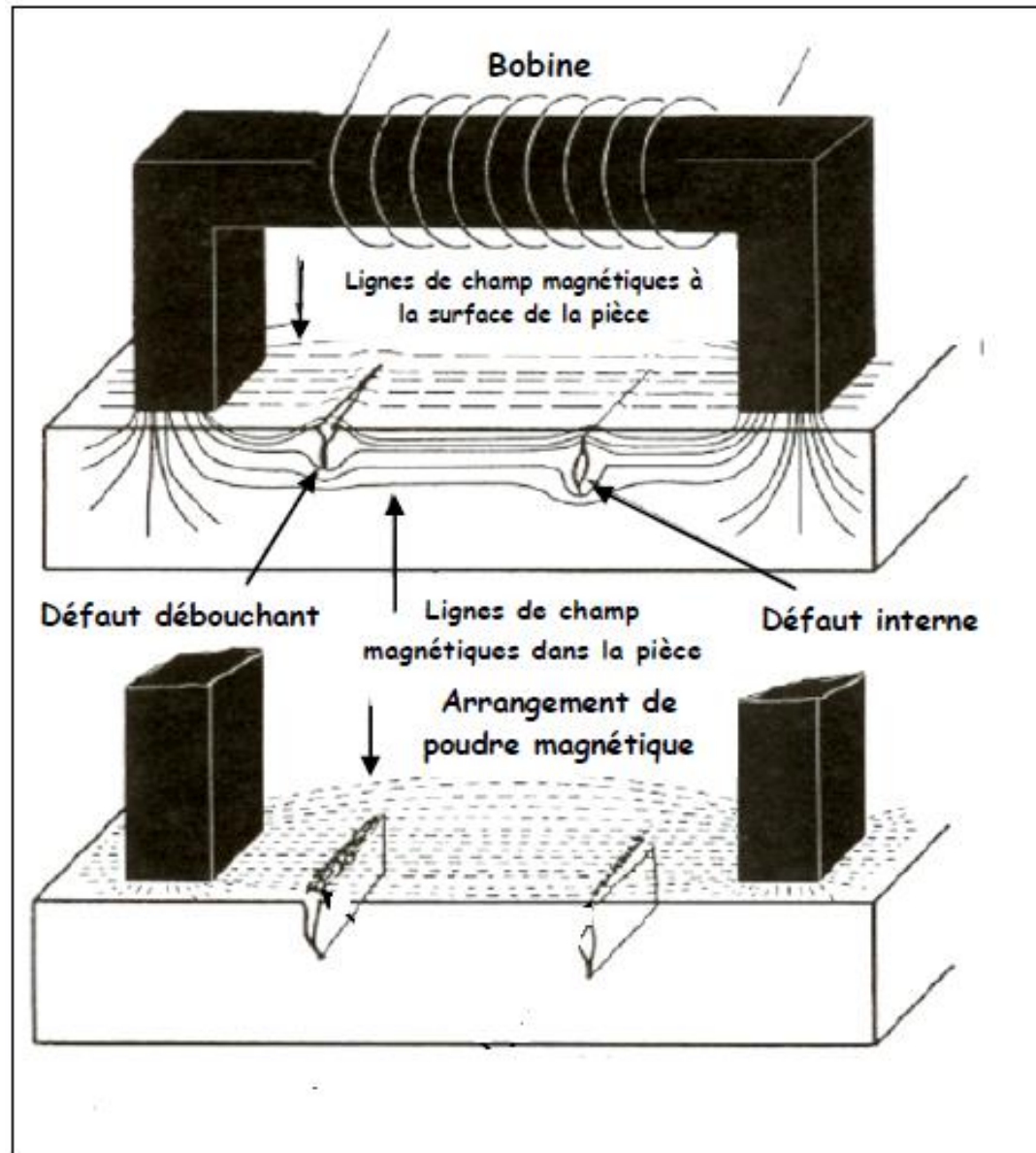
Lorsque le ressuage est insuffisant, on a recours à la magnétoscopie sous ses différentes formes: passage de courant électrique, passage de flux magnétique.

Les procédés magnétiques de contrôles non destructifs permettent la détection des défauts superficiels débouchant ou non débouchant dans les matériaux ferromagnétiques (forgés, moulés, soudés, laminés...).

Le principe de la magnétoscopie est exposé dans la norme NF A09-590, comme suit: **«L'examen magnétoscopie consiste à soumettre la pièce ou une partie de la pièce à un champ magnétique de valeur définie en fonction de la pièce. Les discontinuités superficielles provoquent à leur endroit des fuites magnétiques qui sont mise en évidence par des produits indicateurs déposés à la surface de la pièce. L'image magnétique obtenue est observée dans des conditions qui dépendent du produit indicateur utilisé».**



# Principe du contrôle par magnétoscopie

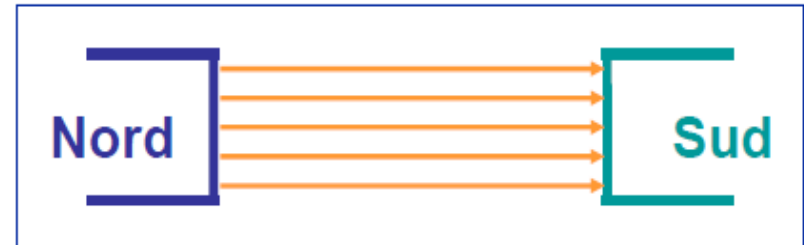




- Matériaux **ferromagnétiques** exclusivement
- Discontinuités sous-cutanées ( qq millimètres de profondeur) ou débouchantes
- Méthode de surface, « rapide »

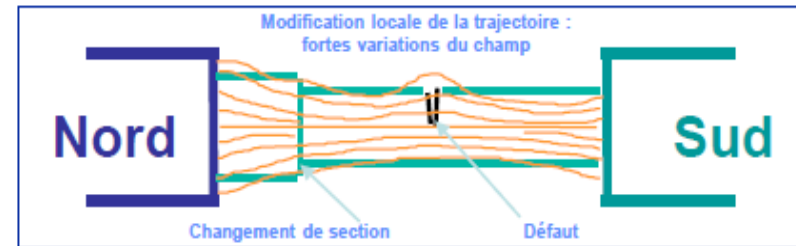
# 1. L'EXCITATION

Champ  
magnétique



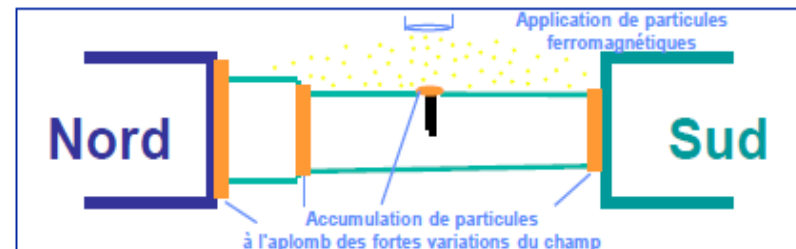
# 2. LA PERTURBATION

Défaut de la  
surface



# 3. LA REVELATION

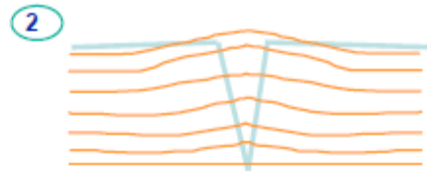
Accumulation de  
particules  
magnétiques  
Eclairage



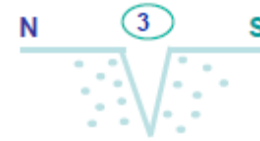
# Principaux paramètres



Champ exciteur



Champ de fuite à l'aplomb du défaut



Polarisation  
des 2 lèvres du défaut



Attraction  
des particules

## 1. L'EXCITATION :

- \* NATURE DU CHAMP MAGNETIQUE
- \* INTENSITE DU CHAMP MAGNETIQUE
- \* DIRECTION DU CHAMP MAGNETIQUE

## 2. LA PERTURBATION :

- \* NATURE FERROMAGNETIQUE DU MATERIAU
- \* GEOMETRIE DE LA PIECE
- \* NATURE DU MILIEU CONSTITUTIF DE DEFAUT

## 3. LA REVELATION :

- \* NATURE DES PARTICULES
- \* VOLUME, GEOMETRIE ET CONCENTRATION DES PARTICULES
- \* VARIATION LOCALE DU CHAMP A L'APLOMB DU DEFAUT
- \* CONDITIONS D'ECLAIRAGE

# 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

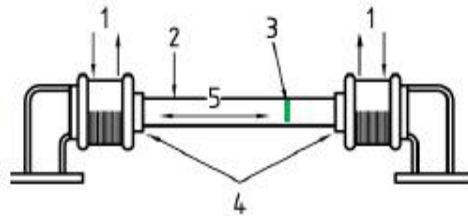
## CONDITIONS D'ECLAIRAGE

# Le banc de magnétoscopie

## Banc de magnétoscopie - Installation à poste fixe

### Légende

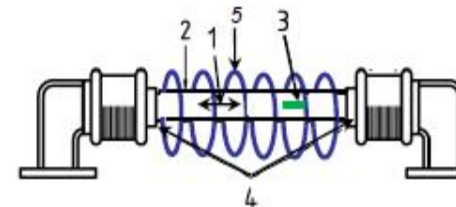
- 1 Courant
- 2 Pièce à contrôler
- 3 Discontinuité
- 4 Pièce polaire
- 5 Flux



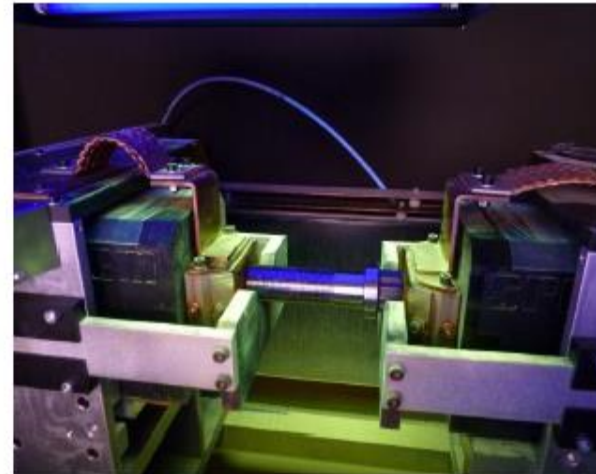
Aimantation par passage de flux

### Légende

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



Aimantation par passage de courant  
(directement dans la pièce)



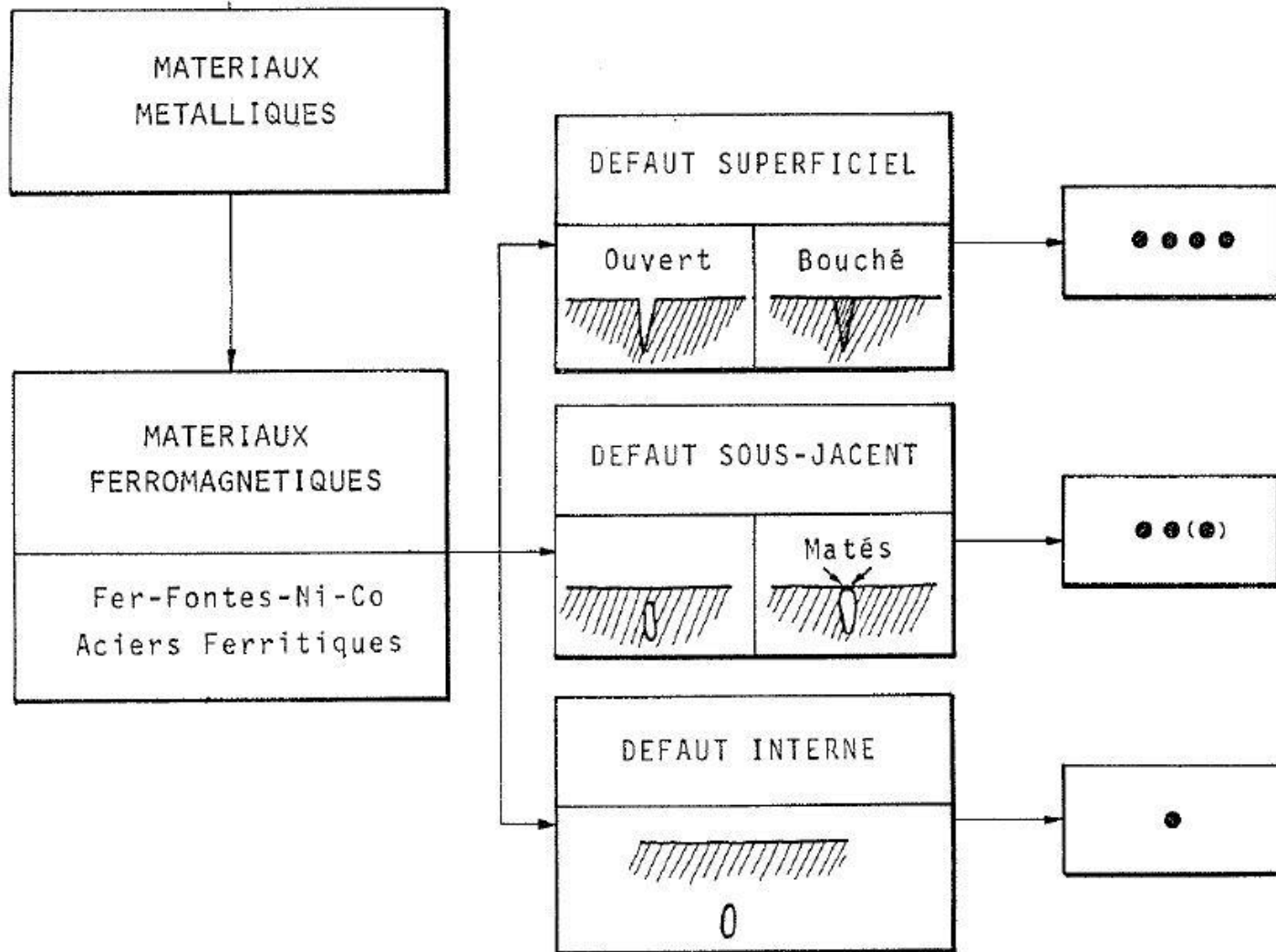
## **Avantages**

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. Les différentes séquences de la mise en œuvre se prêtent bien à l'automatisation.

## **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.

# Les limites de la technique



- Détection impossible
- Détection satisfaisante
- Détection aléatoire
- Détection très satisfaisante



### Conditions opératoires:

- un aimant ou un électro-aimant
- des matériaux ferromagnétiques
- des défauts proches de la surface ( débouchants ou non)

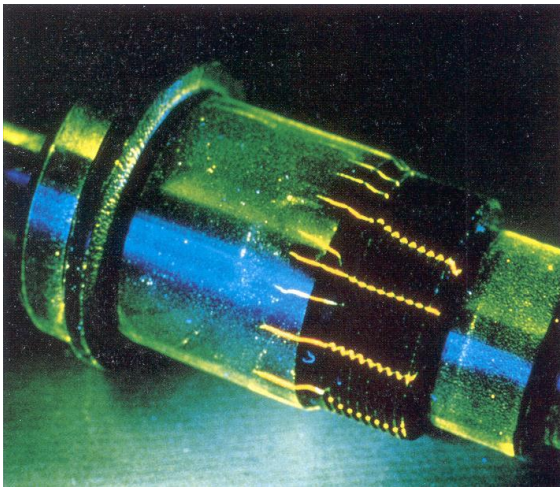
### Principe:

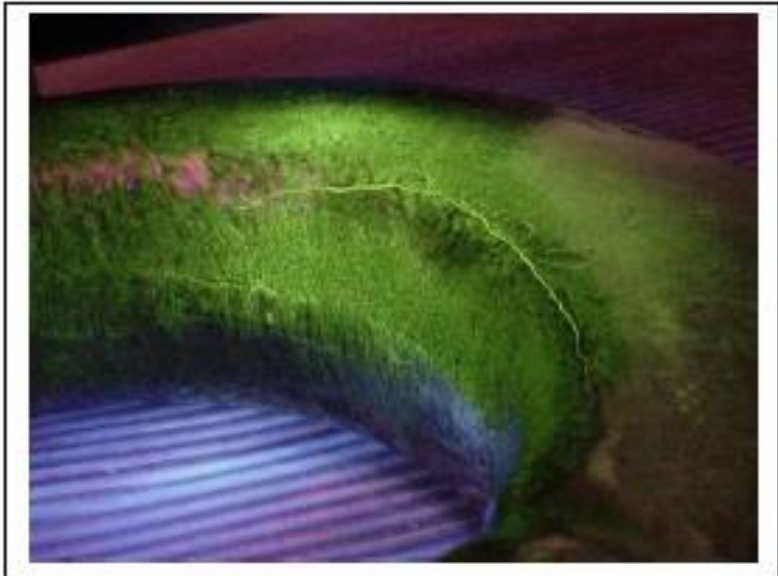
- La zone à contrôler est soumise à un flux magnétique, crée par l'aimant
- projection de poudre magnétique, qui se répartit de manière homogène si la pièce est saine
- agglomération de poudre dans les zones de défauts

## Appareil portatif de magnétisation

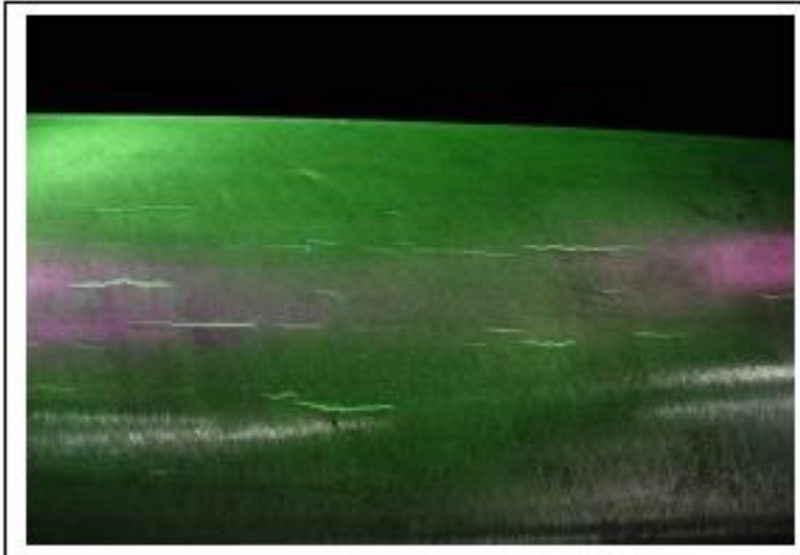


## Quelques exemples





Fissuration en service d'un crochet



Fissuration induite par un traitement thermique

# Choix entre Magnétoscopie et Ressuage

- 
- Sensibilité, défauts recherchés
    - Très fins ⇨ PT
    - Sous-cutanés ⇨ MT
  - Nature du matériau
    - PT uniquement Non poreux
    - MT uniquement Ferromagnétique
  - Dimension des pièces → Grande dimension ⇨ PT
  - Géométrie des pièces → Géométrie complexe ⇨ PT
  - Etat de surface → Forte rugosité, porosité ⇨ MT
  - Rapidité de contrôle
  - Lieu de l'intervention



# 4. LES ULTRASONS



## **INTRODUCTION AUX ONDES ULTRASONS**

Les ondes ultrasonores sont des vibrations mécaniques dont la fréquence est supérieure au domaine audible d'une oreille humaine normale (16 Hz à 16 KHz). Elles se propagent à l'intérieur des matériaux avec des vitesses qui dépendent du milieu lui-même et du type d'onde.

Dans les matériaux métalliques, les fréquences d'utilisation courante vont de quelques centaines de kilohertz à quelques dizaines de mégahertz.

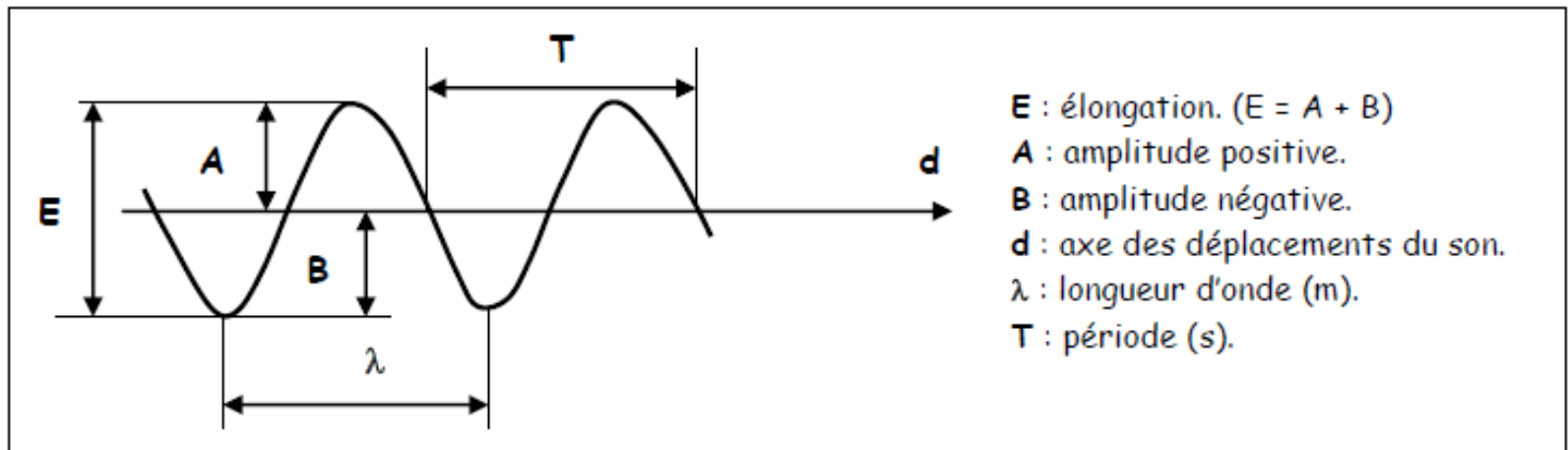


Les sons d'une manière générale sont des ondes élastiques. Elles ne se différencient entre eux que par leurs fréquences.

|                  |                            |  |                       |
|------------------|----------------------------|--|-----------------------|
| 0 à 16 Hz        | 16 Hz à $16 \cdot 10^3$ Hz | $16 \cdot 10^3$ Hz à $150 \cdot 10^6$ Hz | $> 150 \cdot 10^6$ Hz |
| <b>Infrasons</b> | <b>Zone audible</b>        | <b>Ultrasons</b>                         | <b>Hyper sons</b>     |

En contrôle non destructif par ultrasons, la plage utilisée est comprise entre 105 Hz et  $20 \cdot 10^6$  Hz.

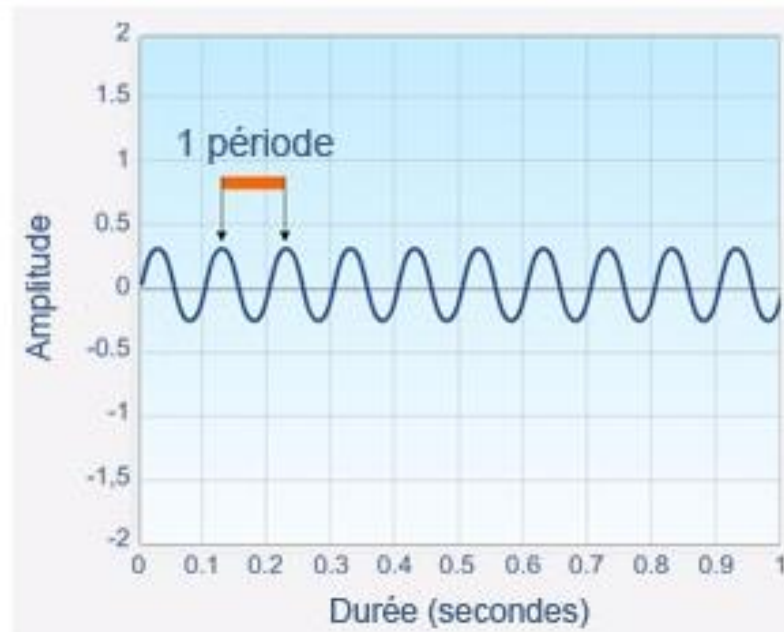
On parle généralement d'onde lorsqu'il s'agit d'un phénomène qui se répète après un certain temps (T) appelé période.



Représentation des vibrations du son (sinusoïde).

## Période

La période, notée  $T$ , est l'**intervalle de temps séparant deux états vibratoires identiques et successifs** d'un point du milieu dans lequel l'onde se propage.



Cette courbe représente les variations de pression acoustique d'une onde pour une durée d'une seconde. La période est l'intervalle de temps entre deux points successifs ayant la même amplitude : par exemple, sur le graphe entre le 3ème et le 4ème maximum la période est de 0,1 seconde.

## Fréquence

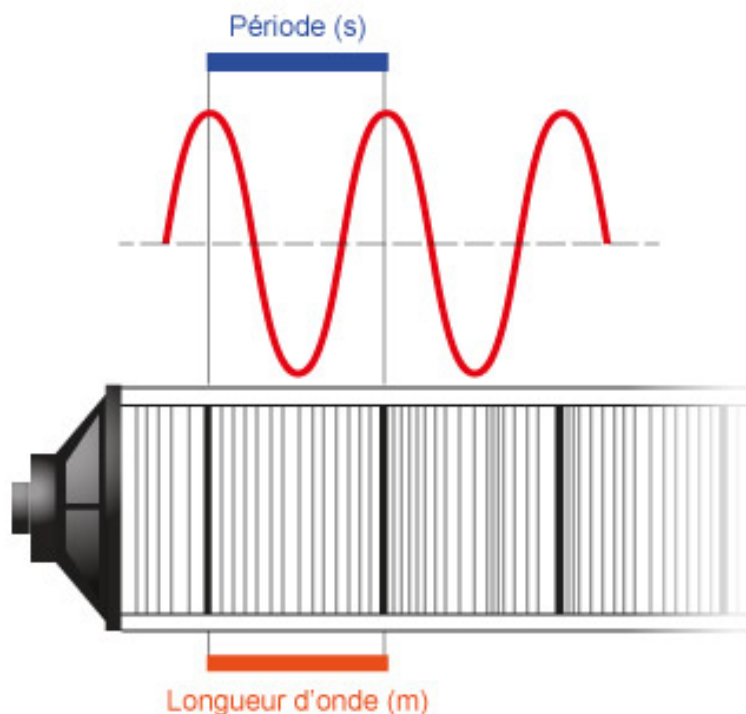
La fréquence est le **nombre de périodes par unité de temps** ce qui correspond à l'inverse de la période :  $f=1/T$  ou  $f$  est la fréquence en Hertz (Hz ou  $s^{-1}$ ) et  $T$  la période en seconde (s).



Dans l'exemple choisi, la sinusoïde possède une période de 0,1 seconde. La fréquence correspond au nombre de période par seconde, c'est à dire le nombre de fois que le motif se répète, soit 10 fois. La fréquence est donc de 10 Hz. En appliquant l'inverse de la période on obtient également cette valeur :  $f=1/0,1=10$  Hz.

## Longueur d'onde

La longueur d'onde est la distance séparant deux molécules successives dans le même état vibratoire (même pression et vitesse acoustique) ou encore **la distance parcourue par l'onde pendant une période**.



Dans l'exemple choisi ici, la longueur d'onde peut être représentée comme la distance séparant deux maximums de compression (traits gras successifs) ; à cet instant  $t$ , chaque molécule séparée de la longueur d'onde est soumise à une pression et une vitesse acoustiques identiques.

Dans un milieu donné, la fréquence et la longueur d'onde sont liées par la formule :  $\lambda = c/f = c \cdot T$  où  $\lambda$  est la longueur d'onde en mètre (m),  $c$  la célérité de propagation de l'onde en mètre par seconde ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ),  $f$  la fréquence (Hz) et  $T$  la période (s). Pour une sinusoïde de fréquence 10 Hz et une célérité de propagation de l'onde

égale à  $340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , la longueur d'onde vaut 34 mètres.

Plus la longueur d'onde est grande, plus la fréquence est faible. A l'inverse, plus elle est faible, plus la fréquence est élevée.

- La fréquence  $f$  (nombre de cycles par seconde) de réapparition du phénomène est donc donnée par l'inverse du temps :

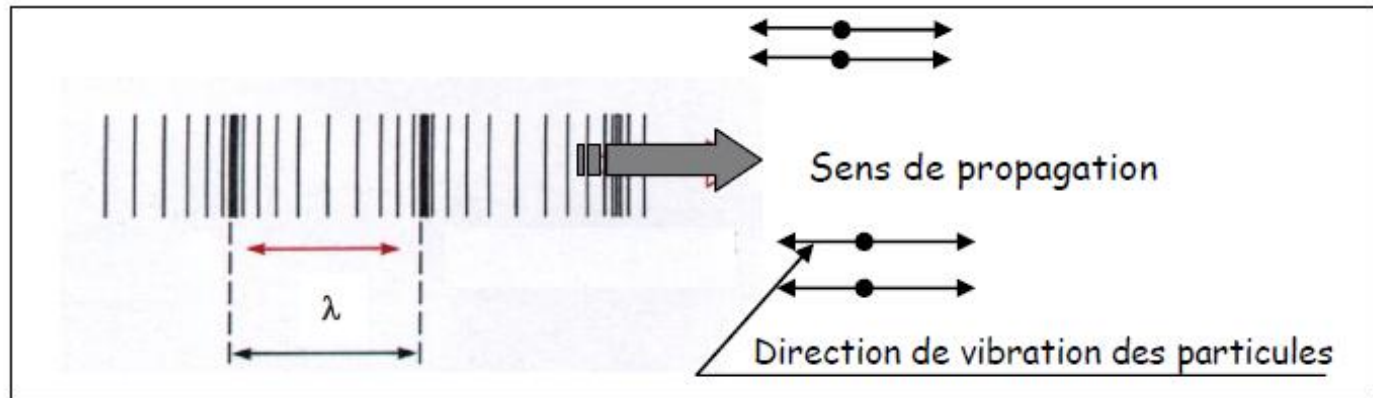
$$f = 1/T \quad (f \text{ en Hz et } T \text{ en s})$$

- L'espace parcourue par l'onde pendant un cycle ou une période est dit longueur d'onde :

$$\lambda = v T = v / f \quad (\lambda \text{ en m, } v \text{ en m/s et } f \text{ en Hz})$$

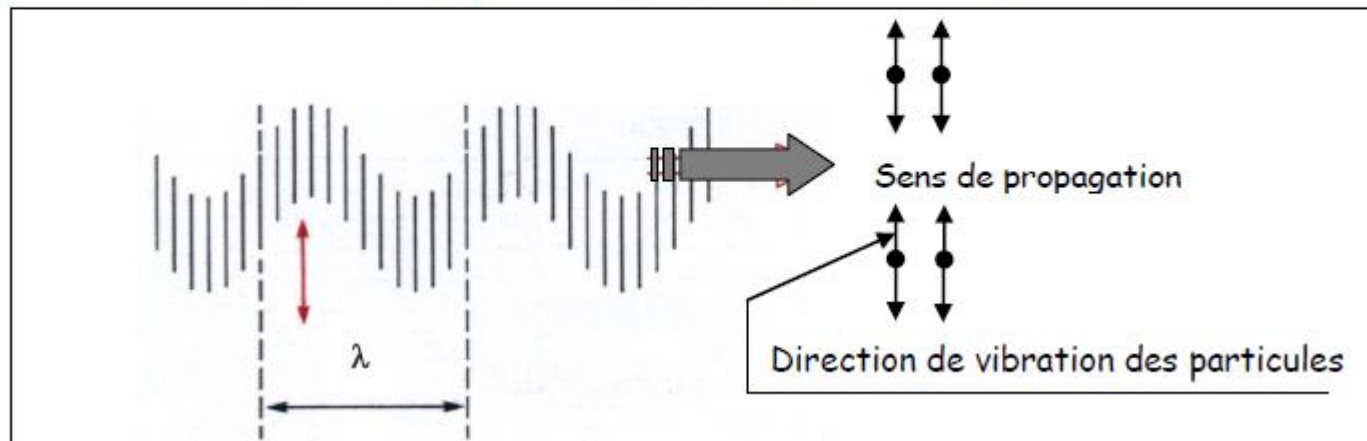
On distingue trois types d'onde :

**a- Onde longitudinale ou de compression** : la direction des vibrations des particules est parallèle à la direction de propagation de l'onde ;



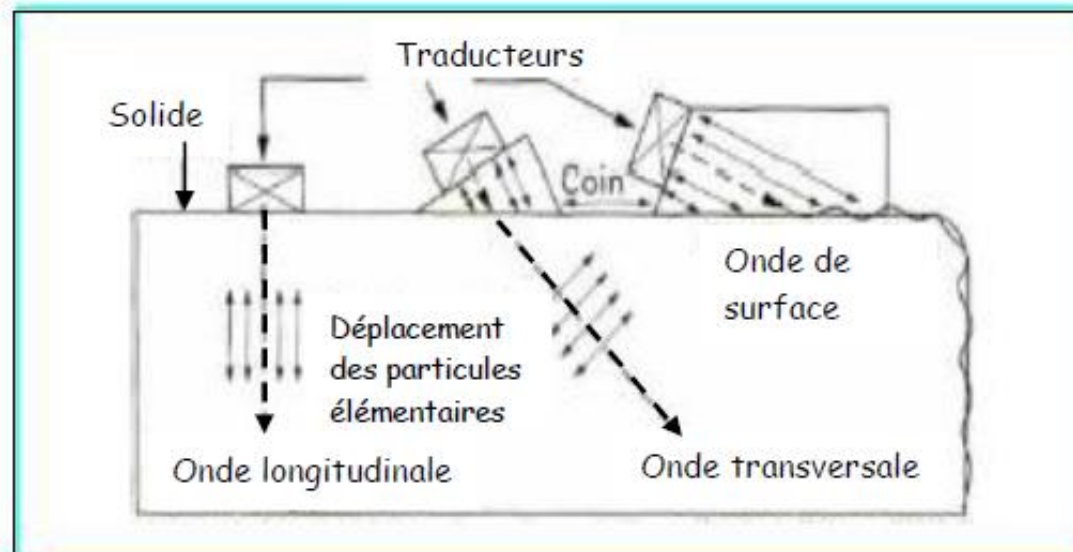
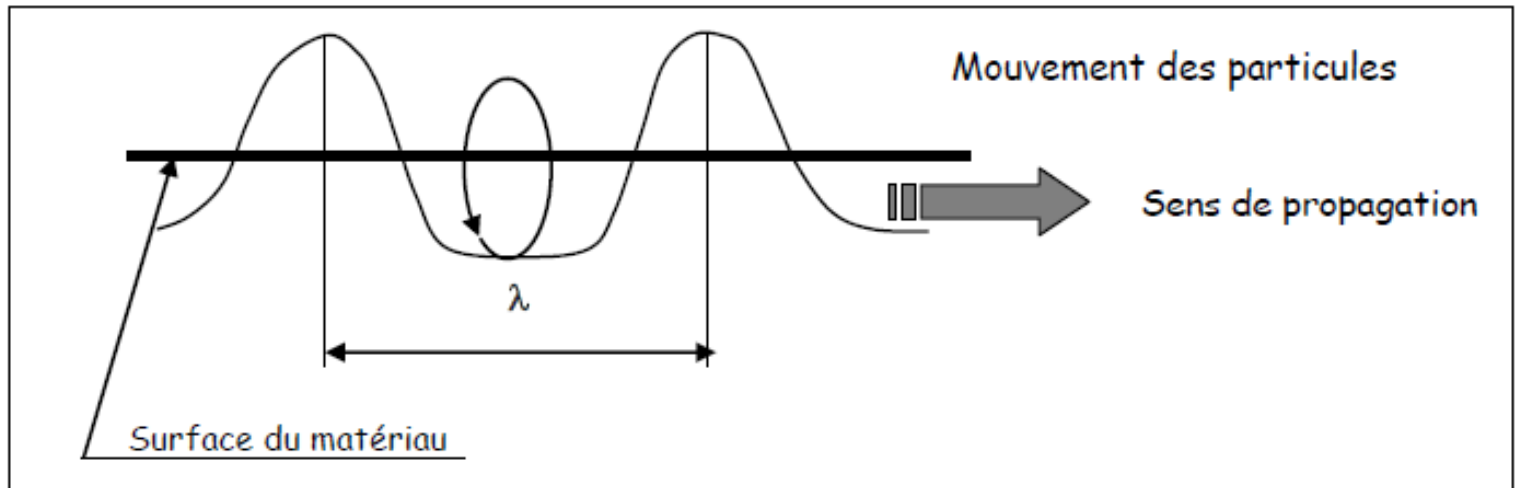
**b- Onde transversale ou de cisaillement** : la direction des vibrations des particules est perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde.

Ces ondes ne peuvent exister que dans les solides car leur existence est liée à une résistance au cisaillement que ne possèdent ni les liquides ni les gaz.





c- **Onde de surface** : ondes obtenues par superposition des deux ondes longitudinale et transversale parallèle à la surface du solide.



**Types d'ondes et modes de propagation des ultrasons dans un solide**



# VITESSE DE PROPAGATION

Une bonne connaissance des phénomènes liés à la propagation des ultrasons est donc une base indispensable à la pratique de ce type de contrôle.

Les principes fondamentaux du contrôle non destructif par ultrasons résident dans l'analyse de l'influence des défauts, du type d'hétérogénéités de structure, sur la propagation des ondes vibratoires dans le matériau : réflexion, réfraction et transmission sur les interfaces, atténuation dans la matrice liée aux phénomènes d'absorption et de diffusion, vitesses de propagation variables selon les directions.

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

✓ **Onde longitudinale :**

$$V_L = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}$$

- $E$  : Module d'Young du matériau  $\text{N/m}^2$  ;
- $\rho$  : masse spécifique du matériau ( $\text{Kg/m}^3$ ) ;
- $\nu$  : coefficient de Poisson.

✓ **Onde transversale :**

$$V_T = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}$$

✓ **Onde de surface :**

$$V_S = 0,9 V_T$$

## Exemple :

1) Calculer la vitesse de propagation des ondes ultrasons dans l'acier, en onde longitudinale, onde transversale et onde de surface.

On donne :  $E = 21 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$  ;  $\rho = 7,8 \cdot 10^3 \text{ Kg/m}^3$   
et  $\nu = 0,28$ .

2) Calculer la vitesse de propagation des ondes ultrasons dans l'aluminium, en onde longitudinale, onde transversale et onde de surface.

On donne :  $E = 7 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$  ;  $\rho = 2,51 \cdot 10^3 \text{ Kg/m}^3$   
et  $\nu = 0,34$ .

## Exemples de vitesses des ultrasons (ondes longitudinales) dans la matière

| Vitesses et impédances acoustiques |  |  |   |  |
|------------------------------------|--|--|---|--|
| Matériau                           | Masse volumique<br>( $10^3 \text{ Kg/m}^3$ ) | Vitesse des ondes<br>longitudinales<br>(m/s) | Vitesse des ondes<br>transversales<br>(m/s) | Impédance<br>acoustique<br>( $10^6 \text{ Kg/m}^2 \text{ s}$ ) |
| Aciers                             | 7.8  | 5 900  | 3 250                                       | 46   |
| Fontes                             | 7.2  | 4 600  | 2 150                                       | 33   |
| Aluminium                          | 2.7  | 6 300  | 3 100                                       | 17   |
| Cuivre                             | 8.9  | 4 700  | 2 250                                       | 42   |
| Laiton                             | 8.5  | 4 500  | 2 100                                       | 38   |
| Béton                              | 2.5  | 4 500  |   | 11   |
| Muscle                             | 1.0  | 1 600  |   | 1.6  |
| Araldite                           | 1.2  | 2 500  | 1 050                                       | 3  |
| Plexiglas                          | 1.2  | 2 700  | 1 100                                       | 3.2  |
| Verre                              | 2.6  | 5 650  | 3 400                                       | 14   |
| Huile                              | 0.8  | 1 500  |   | 1.2  |
| Glycérine                          | 1.3  | 1 900  |   | 2.5  |
| Eau                                | 1.0  | 1 480  |   | 1.5  |
| Mercure                            | 13.6   | 1 450  |   | 20   |
| Quartz                             | 2.7  | 5 750  |   | 15   |
| Titane de baryum                   | 5.7  | 4 400  |   | 35   |
| Air                                | $1.3 \cdot 10^{-3}$                          | 330  |   | $4 \cdot 10^{-4}$  |

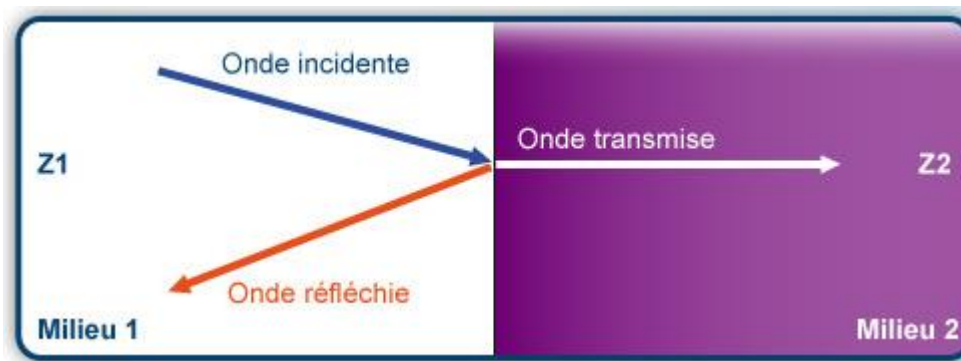
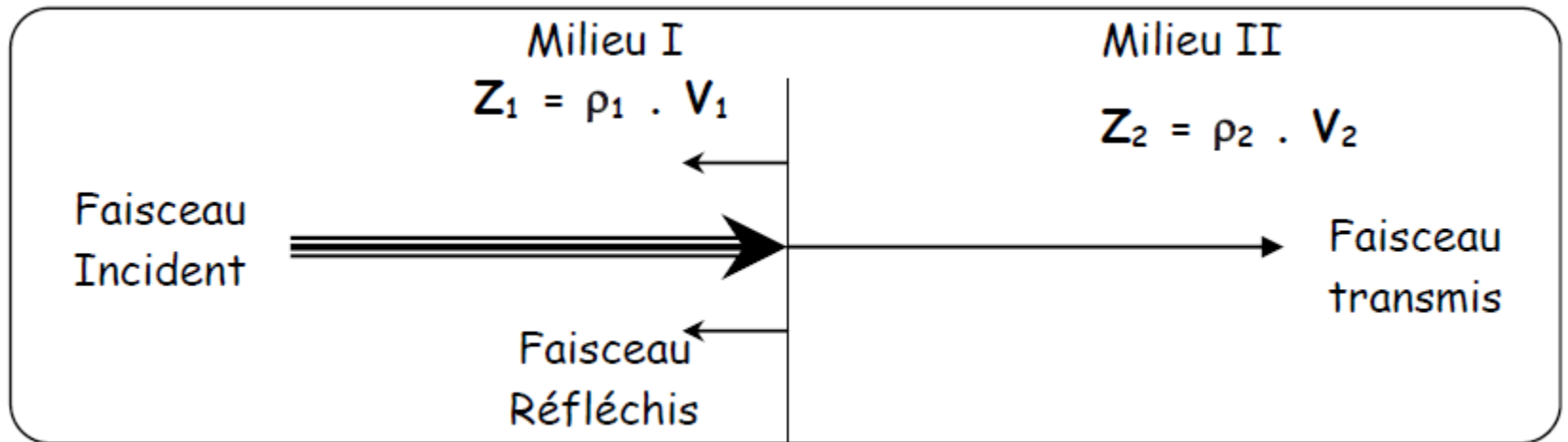
# TRANSMISSION ET REFLEXION DES ONDES

## 1- Impédance acoustique

C'est la propriété qui détermine la transmission des ultrasons à travers la ligne adjacente à deux milieux. Elle correspond à la masse ébranlée par un faisceau ultrasonore de 1 m<sup>2</sup> de section pendant une seconde. Pour un matériau donné elle est égale au produit de la masse spécifique du matériau par la vitesse de l'onde ( $Z = \rho \cdot V$ ).

# Réflexion – réfraction

## a- Incidence normale :



- 1<sup>er</sup> cas :  $Z_1 = Z_2$   $\Rightarrow$  transmission totale ;
- 2<sup>ème</sup> cas :  $Z_1 \cong Z_2$   $\Rightarrow$  transmission partielle ;
- 3<sup>ème</sup> cas :  $Z_1 \gg \gg \gg Z_2$   $\Rightarrow$  réflexion totale.

On note par :

- $A_r$  : l'amplitude de l'onde réfléchie ;
- $A_i$  : l'amplitude de l'onde incidente ;
- $A_t$  : l'amplitude de l'onde transmise.

Alors on a :

$$\frac{A_t}{A_i} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

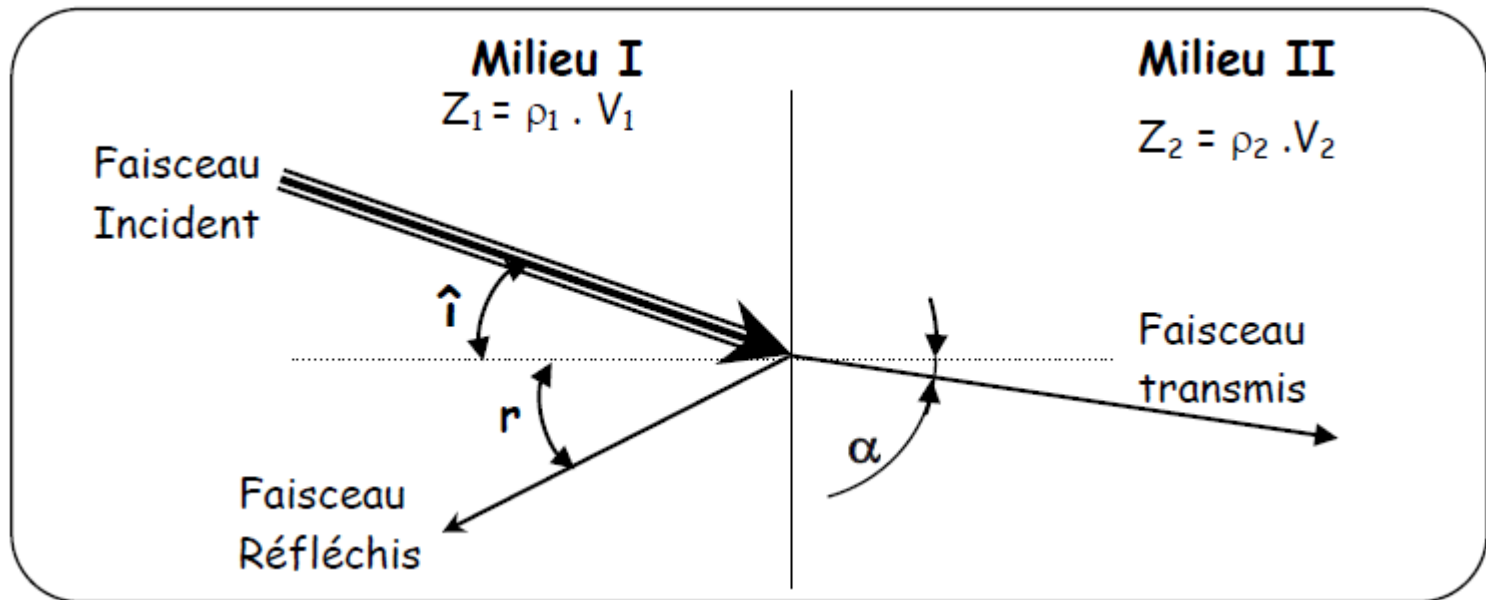
et

$$\frac{A_r}{A_i} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2}$$



## b- Incidence oblique :

Une onde incidente arrive à la surface de séparation de deux milieux sous un angle  $\hat{i}$  autre que l'angle droit, l'onde réfléchie forme un angle  $r$  par rapport à la normale est égal à  $\hat{i}$ .



Lorsqu'une onde incidente franchit obliquement une interface séparant les deux milieux elle subit un changement brusque de direction si la vitesse de propagation des ondes est différente dans les deux milieux. L'onde réfractée dans le milieu II, forme un angle  $\alpha$  par rapport à la normale, cet angle est appelé angle de réfraction.

La loi de Descartes est :

$$\frac{\sin(i)}{V_1} = \frac{\sin(\alpha)}{V_2}$$

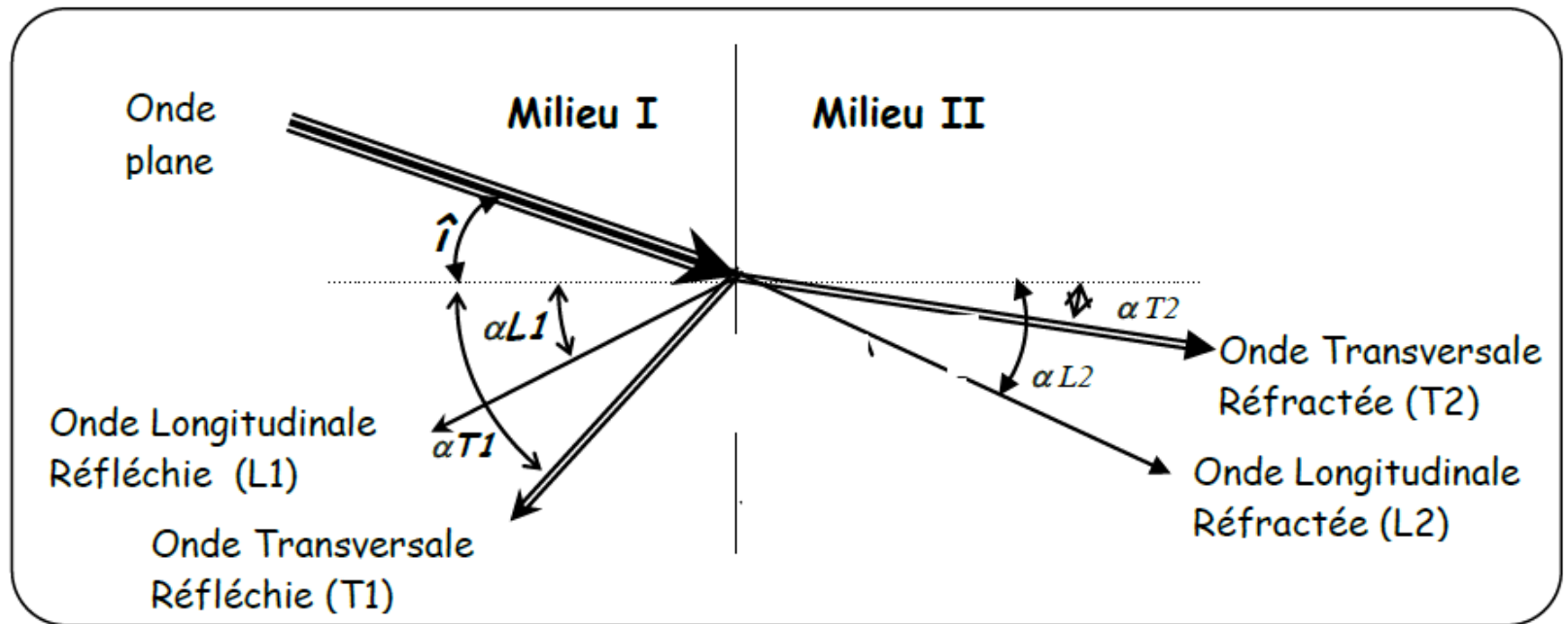
### c- Double réflexion - double réfraction

Lorsqu'une onde plane longitudinale ou transversale rencontre sous incidence oblique une surface de deux milieux I et II, il apparaît les ondes suivantes :

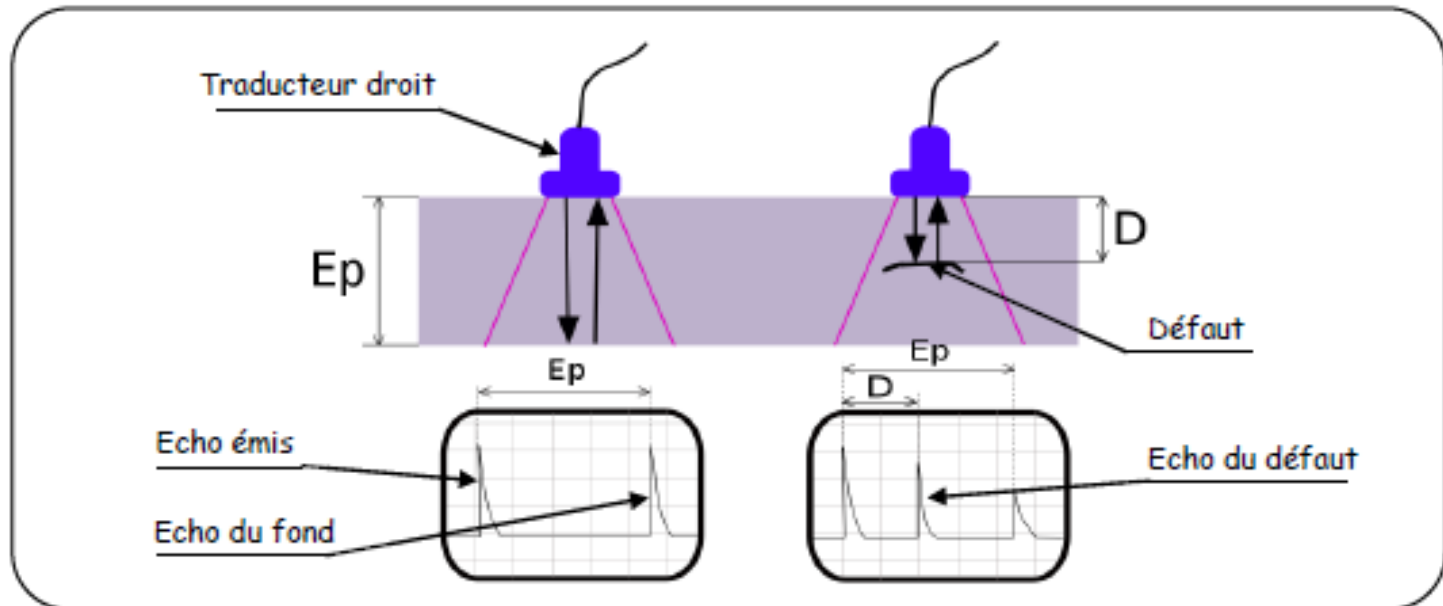
- $L_1$  : une onde longitudinale réfléchiée ;
- $T_1$  : une onde transversale réfléchiée ;
- $L_2$  une onde longitudinale réfractée ;
- $T_2$  : une onde transversale réfractée.

La relation qui relie ses différentes grandeurs est connue sous la loi de sinus ou la loi de Snell, on a alors :

$$\frac{\sin(i)}{VL1} = \frac{\sin(\alpha L1)}{VL1} = \frac{\sin(\alpha T1)}{VT1} = \frac{\sin(\alpha L2)}{VL2} = \frac{\sin(\alpha T2)}{VT2}$$

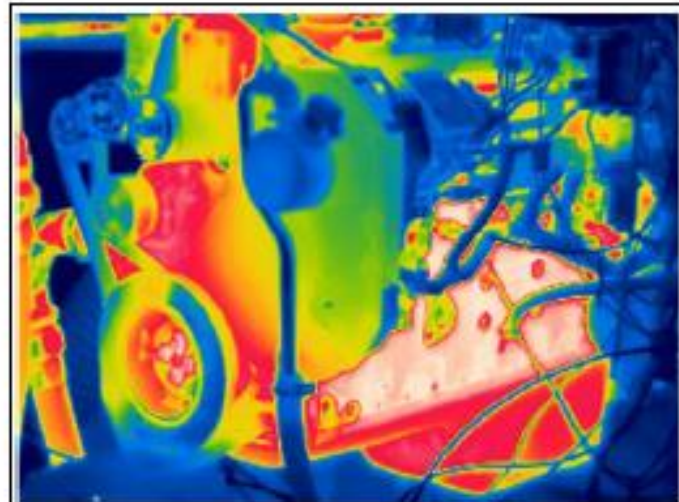


## PRINCIPE DE CONTROLE PAR ULTRASONS



# **5. THERMOGRAPHIE** **INFRAROUGE**

## LA THERMOGRAPHIE INFRAROUGE



La **thermographie infrarouge** est une 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.

A partir du zéro absolu ( $-273^{\circ}\text{C}$ ), tous les corps rayonnent de l'énergie. Cette énergie émise est dépendante de deux facteurs principaux qui sont:

- ♦ La température du corps ;
- ♦ Le type de matériau et son état de surface.

En résumé, plus un corps est chaud, plus il émet de rayonnements. Le mesurage de cette énergie est possible grâce à un système de mesure appelé « **camera infrarouge** », ou plus techniquement « **radiomètre infrarouge** ». Le domaine militaire et le secteur médical ont contribué au développement de cette technologie.



## DEFINITION

La thermographie infrarouge «TIR» est la science de l'acquisition et de l'analyse d'informations thermiques à l'aide de dispositifs d'imagerie thermique à distance.

La norme française A 09-400 définit la thermographie infrarouge comme *«Technique permettant d'obtenir au moyen d'un appareillage approprié l'image thermique d'une scène thermique dans un domaine spectral de l'infrarouge»*.

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.

## PRINCIPE

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

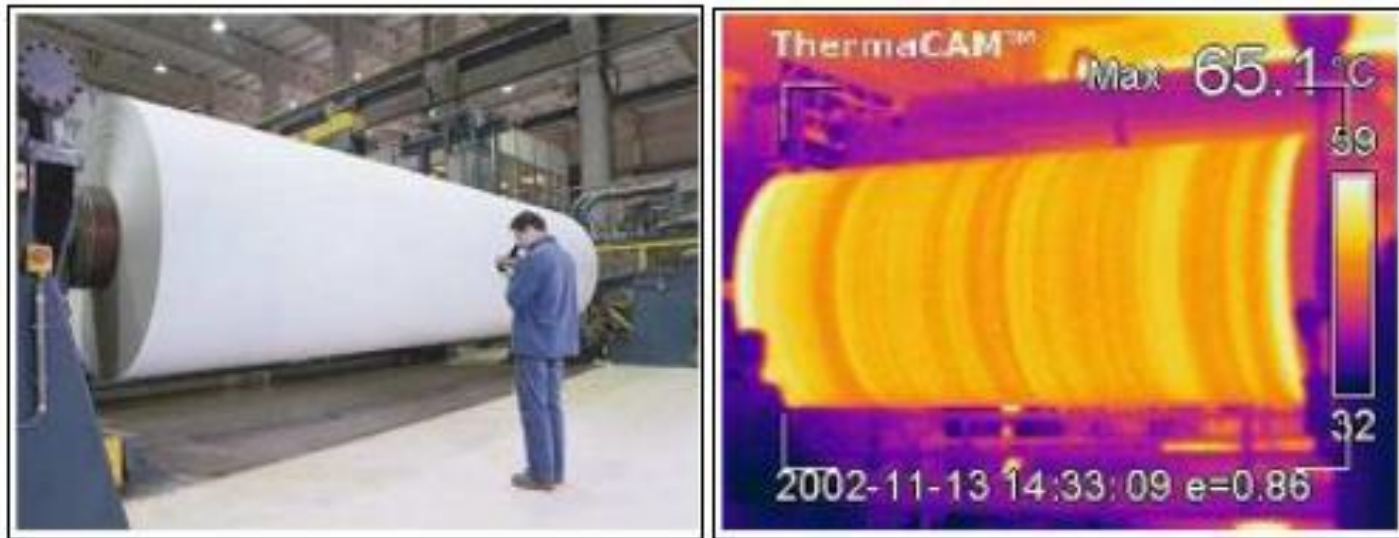
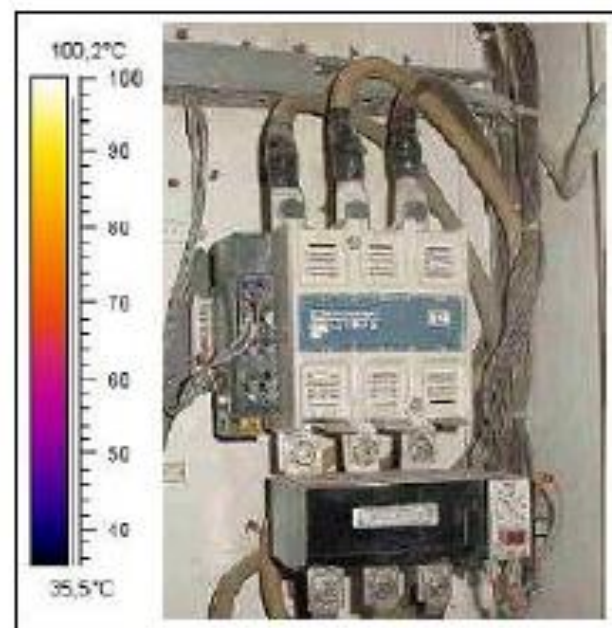


Image visible et thermogramme correspondant d'un rouleau de papier

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.

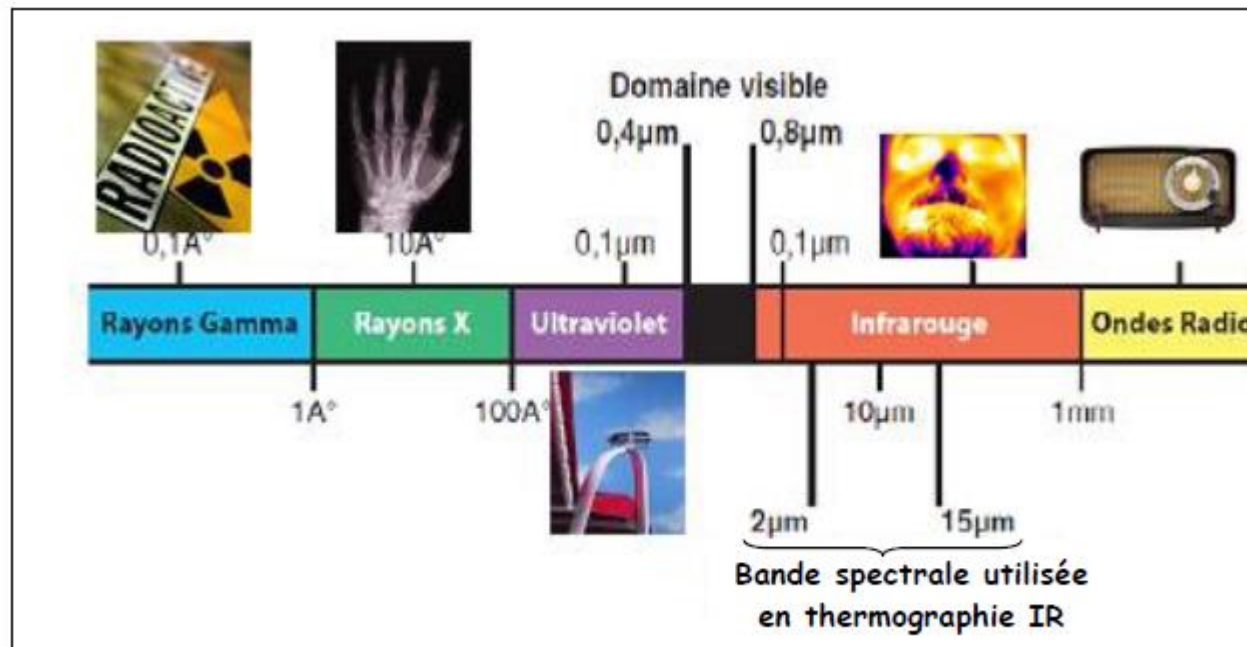


**Exemple de défaut électrique de connexion (mauvais serrage)**

## LOIS DU RAYONNEMENT INFRAROUGE

### Le spectre électromagnétique

La lumière visible, les ondes radio et TV, les rayons X sont des rayonnements électromagnétiques. Le domaine visible s'étend des longueurs d'onde allant de 0,4 à 0,8  $\mu\text{m}$ . La bande infrarouge s'étend de 0,8 à 1000  $\mu\text{m}$ . En thermographie infrarouge on travaille généralement dans une bande spectrale qui s'étend de 2 à 15  $\mu\text{m}$  et plus particulièrement dans les fenêtres 2-5  $\mu\text{m}$  et 7-15  $\mu\text{m}$ .



Rayonnements électromagnétiques

## Loi de Plank

Max Plank a calculé les flux de puissances électromagnétiques émis par un corps noir.

$$W_{\lambda} = \frac{2 \cdot \pi \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5 \cdot (e^{(h \cdot c / \lambda \cdot k \cdot T)} - 1)}$$

- $\lambda$  : Longueur d'onde ;
- $W_{\lambda}$  : Flux de puissance émis par un corps noir à la longueur d'onde  $\lambda$  ;
- $c$  : Vitesse de la lumière =  $3 \cdot 10^{10}$  cm/s ;
- $h$  : Constante de Plank =  $6,6 \cdot 10^{-34}$  Watt.s<sup>2</sup> ;
- $k$  : Constante de Boltzman =  $1,4 \cdot 10^{-23}$  Watt.s<sup>2</sup>/°K;
- $T$  : Température absolue du corps noir en Kelvin.

## Rayonnement incident

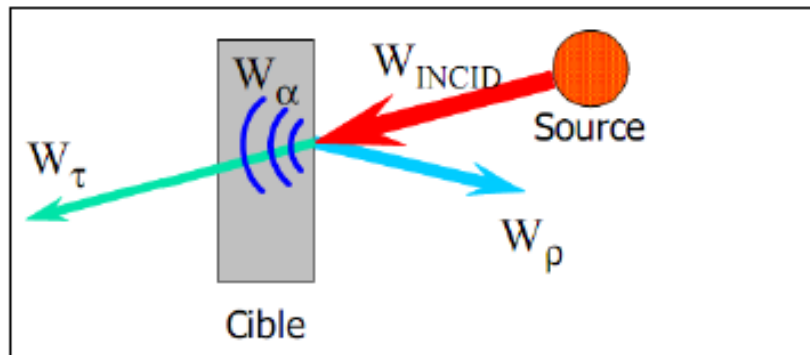
On appelle incident l'ensemble des rayonnements extérieurs à un objet qui viennent le frapper. Dans la figure suivante, le rayonnement incident, noté  $W_{\text{INCID}}$ , est l'ensemble des rayonnements qui heurtent l'objet cible provenant d'une ou plusieurs sources. Une certaine partie du rayonnement, notée  $W_{\alpha}$ , sera toujours absorbée, et l'objet cible en retiendra alors l'énergie. Une certaine quantité, notée  $W_{\rho}$ , sera réfléchiée. Cette dernière n'affectera aucunement l'objet cible. Il est enfin possible qu'une certaine proportion de rayonnement, notée  $W_{\tau}$ , traverse l'objet cible. Comme la quantité réfléchiée, elle n'affecte pas l'objet. Si on écrit cela sous forme d'une équation mathématique on obtient:

$$W_{\alpha} + W_{\rho} + W_{\tau} = W_{\text{INCID}} = 100\%$$

Un objet possède une certaine capacité ou aptitude à :

- ❖ **Absorber** : ce que l'on appelle l'**absorptivité**  $\alpha$  ;
- ❖ **Réfléchir** : ce que l'on appelle la **réflectivité**  $\rho$  ;
- ❖ **Transmettre** : ce que l'on appelle la **transmissivité**  $\tau$ .

La somme des trois est toujours égale à 1 :  $\alpha + \tau + \rho = 1$



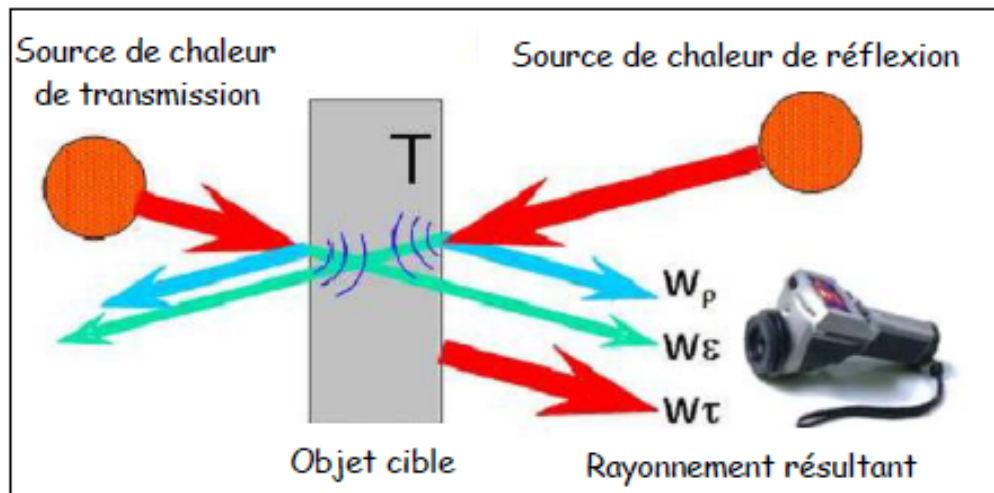
**Répartition du rayonnement incident  
en différentes composantes**



## Rayonnement résultant

Le rayonnement résultant, capté par une caméra infrarouge, est constitué de la somme de tous les rayonnements qui quittent la surface d'un objet, quelles que soient les sources d'origine. Il provient de trois types de sources.

Sur la figure suivante, on est en présence de trois sources de rayonnement : l'objet cible lui-même, une source devant et une source derrière. Si nous observons l'objet cible depuis la droite, le rayonnement résultant est une combinaison du rayonnement de l'objet cible lui-même, du rayonnement provenant de la réflexion sur l'objet de la source de chaleur avant (située sur la droite) et du rayonnement issu de la source de chaleur arrière (située sur la gauche) traversant l'objet cible.



**Les trois sources de rayonnement réfléchi issues de l'objet**

























