



CND

COURS



**IUT CLERMONT
AUVERGNE**

Aurillac - Clermont-Ferrand - Le Puy-en-Velay
Montluçon - Moulins - Vichy

Métrie et contrôle avancés

PPN IUT GMP 2^{ème} année

UE32	INDUSTRIALISER ET GERER : MISE EN ŒUVRE	METROLOGIE
M3203C	Métrologie et contrôle avancés	Semestre 3
Objectifs du module : En fonction de l'environnement industriel local, développer les différents enseignements de métrologie ou de contrôle correspondant aux compétences visées.		
Compétences visées : Préparer les contrôles à réaliser à partir de dossiers, gammes, commandes, consignes. Contrôler la conformité de fabrication de produits, pièces, sous-ensembles, ensembles. Réaliser des contrôles destructifs et non destructifs. Approfondir les méthodes de mesure et de contrôle des surfaces canoniques et les étendre aux surfaces complexes. Connaître les principes des autres technologies de mesure et participer à leur mise en œuvre. Réaliser la métrologie des moyens de production.		
Prérequis : Outils mathématiques de résolution de systèmes d'équations.		
Contenus : Mise en œuvre de procédures de contrôle. Analyse des spécifications des surfaces canoniques (approfondissement) et complexes. Mise en œuvre du processus de mesure avec ou sans contact. Mettre en œuvre des techniques de contrôle non destructif. Choix et utilisation d'une méthode d'investigation en fonction du défaut recherché. Mesure des défauts géométriques des moyens de production et évaluation de leur influence sur la pièce		

SOMMAIRE

I. Introduction	4
II. Méthodes de surface	5
1) Examen visuel	5
2) Ressuage	6
3) Magnétoscopie	9
4) Courants de Foucault	10
III. Méthodes de volume	11
1) Radiographie	11
2) Ultrasons	12
3) Tomographie	17
IV. Méthodes globales	18
1) Thermographie	18
2) Ondes guidées	19
3) Emissions acoustique	20
V. Certifications	22

I. Introduction

Le CND (.....) 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 lors de maintenances. On parle aussi d'END (.....).

Certaines méthodes sont connues et utilisées depuis longtemps :

- Le contrôle visuel (existe depuis... que l'Homme a des yeux !)
- Le ressuage (pratiqué en 1880 pour le contrôle de pièces ferroviaires)
- Les ultrasons (découverts en 1883 par Galton)
- La radiographie (premières applications de contrôle par rayons X dès 1900)
- La magnétoscopie (principe attribué au major W H Hoke en 1922)

... mais évoluent toujours :

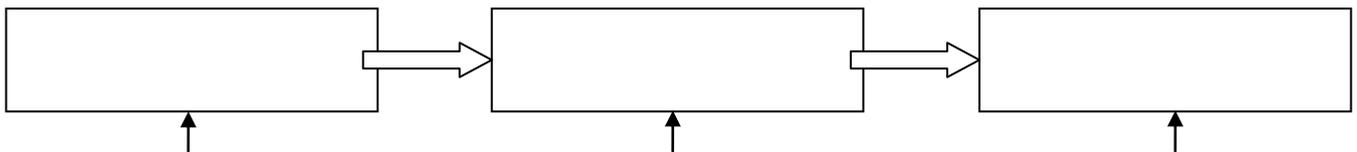
- Tomographie et radio numérique (proviennent de la radiographie)
- Méthodes ultrasonores : multiéléments, imagerie, TOFD, ondes guidées...

....avec également l'arrivée de nouvelles techniques :

- Thermographie
- Emission acoustique

Le choix d'une méthode de CND est fonction de plusieurs critères : Petite ou grosse pièce, matériau utilisé (ferromagnétique ou non, conduisant l'électricité ou non,...), service pièce (corrosion, fatigue,), méthode d'obtention de la pièce (pièce de fonderie, usinée, soudée,...), le défaut recherché observable en surface ou non,...

Quelque soit la méthode choisie, le procédé est toujours le même :



Ces méthodes sont utilisées dans l'ensemble des secteurs industriels :

- L'industrie pétrolière (pipelines, tubes, barres, soudures, réservoirs)
- L'industrie navale (contrôle des coques)
- L'aéronautique (ailes d'avion, nombreuses pièces moteurs, trains d'atterrissage, ...)
- L'aérospatiale et l'armée
- L'industrie automobile (contrôle des éléments moteurs)
- La fonderie (bloc moteur, culasse, ...)
- La chaudronnerie et la tuyauterie en fabrication
- L'industrie de l'énergie : réacteurs nucléaires, chaudières, tuyauterie, turbines, etc. (maintenance des installations) ;
- ...

Les agents qui effectuent ces contrôles peuvent être certifiés selon les normes en vigueur, si la réglementation l'exige, si le client le demande, ou si l'entreprise utilise ce moyen comme assurance dans le cadre de sa politique qualité.

Les normes NF EN 473 et EN 4179 spécifient des exigences pour les principes de qualification et de certification du personnel chargé d'effectuer des CND. Elles définissent également un certain nombre de symboles pour les méthodes usuelles :

METHODE CND	SYMBOLE
Examen visuel	
Ressuage	
Magnétoscopie	
Courants de Foucault	
Radiographie	
Ultrasons	
Tomographie	
Thermographie	
Emissions acoustique	

Ces symboles correspondent généralement à l'abréviation de la désignation anglaise de la méthode, par exemple, le symbole **PT** pour le ressuage vient de « **P**enetrant **T**esting ». Cependant, il existe de nombreuses méthodes qui ne sont pas sujettes à la certification des contrôleurs, et n'ont donc pas de terminologie normée.

II. Méthodes de surface

1) Examen visuel

L'examen visuel ou inspection visuelle (**VT** : **V**isual **T**esting) permet de s'assurer de l'absence d'anomalies visibles à l'œil nu et en dehors des critères d'acceptation. Une irrégularité sur la surface extérieure peut être une indication de défaut plus grave à l'intérieur.



a) Principe

Il convient de pratiquer un examen visuel avant tout autre essais ou contrôle non destructif. Si des défauts sont repérés, il est inutile d'aller plus loin et de mettre en œuvre un autre contrôle. Cela peut donc permettre dans certains cas un gain d'argent et de temps.

L'examen visuel peut, selon la pièce, se dérouler en plusieurs étapes comme par exemple :

- Vérifier la conformité de la pièce avec son plan de fabrication : dimensions, formes, positionnement par rapport à un autre élément,...
- Déceler des anomalies dans la pièce et/ou son fonctionnement : corrosion, pliures, cassures, fissures visibles, soudure mal réalisée (soufflure, manque de fusion, défaut d'alignement, ...), jeu dans un mécanisme pouvant être lié à une usure prématurée, ...



b) Mise en œuvre

Il s'agit généralement de réaliser un examen visuel de surface, qui va donc être limité aux parties visibles et accessibles directement.

Il consiste à détecter les anomalies visibles à l'œil nu, ce qui nécessite d'observer la pièce dans des conditions d'éclairage satisfaisantes et à une distance raisonnable. En fonction des critères d'acceptation et des seuils de tolérance, il est possible d'utiliser en complément un pied à coulisse, un mètre, un gabarit, une règle graduée, une loupe, ou bien un éclairage.



La réussite de l'examen est dépendante de l'opérateur. Celui-ci doit donc disposer d'une vue satisfaisante qui fera l'objet de contrôles et tests réguliers. A noter qu'un certificat d'acuité visuelle est par ailleurs demandé pour passer une certification. Il est également possible de mettre en œuvre des techniques complémentaires (caméra vidéo ou endoscope). On parle alors d'examen visuel indirect.

c) Limites

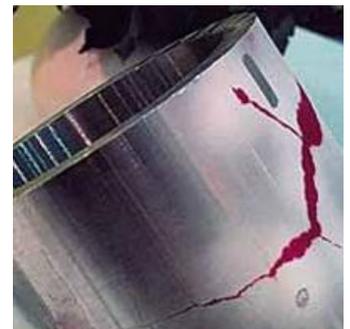
Les principales limites sont :

- La capacité de l'opérateur à voir les défauts (liée à sa vue)
- La qualité de la surface de la pièce observée (grenaillage, présence d'un revêtement ou de graisse)
- L'éclairage (orientation, puissance d'éclairage, couleur de l'éclairage)
- Le type de défauts visibles : uniquement surfaciques ou débouchants
- Le risque de sous-dimensionnement du défaut :
 - Une partie peut être masquée
 - La partie visible de la corrosion n'est pas forcément révélatrice de l'ensemble de la corrosion
 - Seule la partie débouchante d'une fissure peut-être vue sans pour autant rendre possible l'estimation de sa profondeur

2) Ressuage

Le contrôle par ressuage est une méthode largement répandue qui permet la détection des discontinuités ouvertes, débouchant en surface sur tous type de matériaux non poreux (matériaux métalliques, de nombreux matériaux minéraux (verre, céramiques) et, après essai satisfaisant de compatibilité, certains matériaux organiques).

Cette méthode permet de mettre en évidence des discontinuités de 5 μm d'ouverture (10 fois moins que le diamètre d'un cheveu humain). C'est une méthode assez ancienne, car elle était déjà utilisée en 1880 pour le contrôle de pièces ferroviaires et de la tôlerie des chaudières (alors appelée « Technique à l'huile et à la craie »).



a) Principe

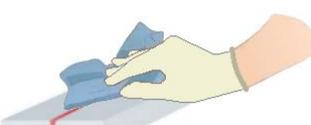
Elle consiste à faire pénétrer un produit, dit « pénétrant » (**PT** : **P**enetrant **T**esting) dans les porosités du matériau (liquide fluorescent ou coloré en rouge, déposé par immersion, pulvérisation ou au pinceau). Celui-ci pénètre dans les discontinuités.

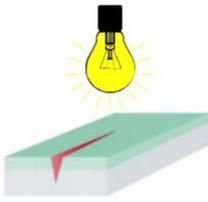
La surface de la pièce est nettoyée pour enlever le pénétrant présent en surface.

Un second produit ayant un « effet buvard », le faire « ressuer » le pénétrant, c'est à dire ressortir de la discontinuité. La largeur de la « tache » en surface est donc liée à la taille de celle-ci.

Matériel nécessaire :



1		<p>La pièce contrôlée doit être propre :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Porosités recherchées non obstruées
2		<ul style="list-style-type: none"> - Surface du matériau compatible avec les produits : - Enlever les produits déposés lors de la fabrication (lubrifiant,...) - Enlever les oxydes (oxyde d'aluminium, rouille,...) <p>!!!! Conditionne grandement la détection des anomalies !!!!</p>
3		<ul style="list-style-type: none"> - Les parties où des défauts sont recherchés doivent être intégralement couvertes
4		<ul style="list-style-type: none"> - Les 20 min permettent au liquide de pénétrer dans les imperfections.
5		<p>Il ne doit pas rester de pénétrant en surface avant l'application le solvant.</p>
6		
7		<ul style="list-style-type: none"> - Un nettoyage est nécessaire pour faire disparaître les traces de révélateur en surface
8		<ul style="list-style-type: none"> - Les parties où des défauts sont recherchés doivent être intégralement couvertes

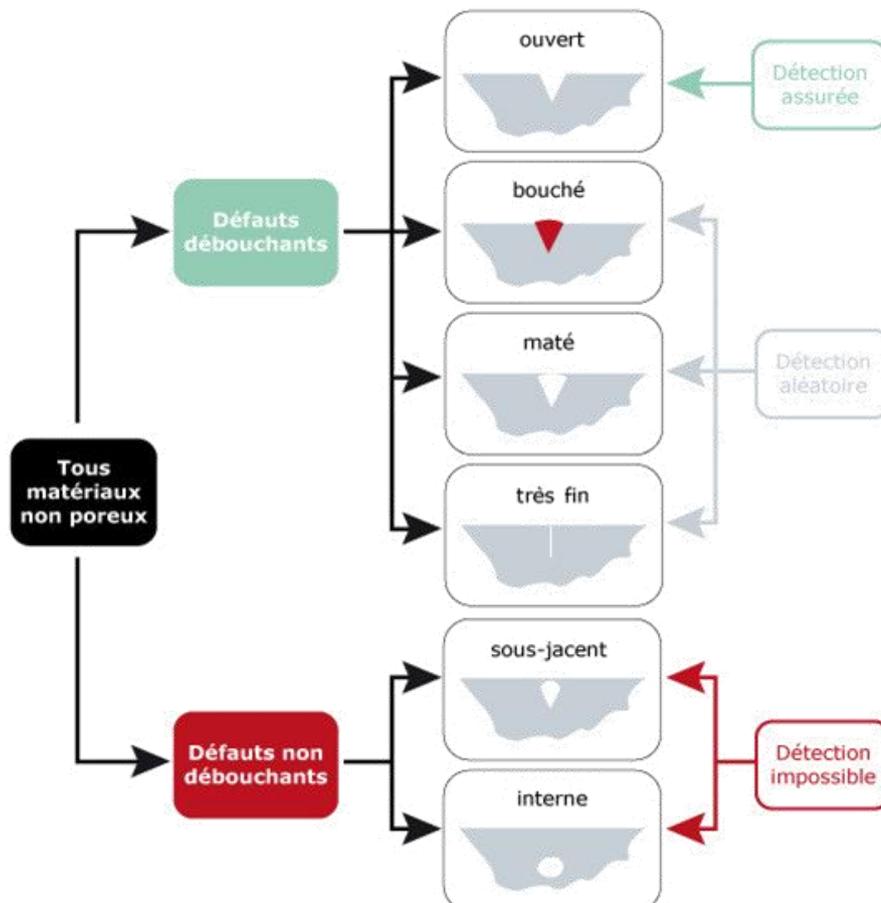
9		<ul style="list-style-type: none"> - L'observation peut se faire sous lumière naturelle (ou artificielle) si le pénétrant est coloré - L'observation peut se faire sous rayonnement ultraviolet (UV-A) si le pénétrant est fluorescent. - Les défauts apparaissent immédiatement ou jusqu'à 30 mn après l'application du révélateur
10		
11		<ul style="list-style-type: none"> - Un nettoyage est nécessaire pour faire disparaître les traces de révélateur et éventuellement de pénétrant s'il y a un ou plusieurs défauts.

c) Limites

Les principales limites sont :

- Seules les anomalies débouchantes sont détectées
- Des défauts bouchés ou matés peuvent ne pas être vus
- Un défaut très fin peut ne pas être vu (nécessite un pénétrant à très haute sensibilité)
- Pas d'information sur la profondeur ou la forme de l'anomalie (ce qui peut aussi en faire un atout car d'autres méthodes sont sensibles à la forme et la complexité de l'anomalie)
- La qualité de l'état de surface est importante : la méthode ne peut pas être utilisée sur une surface poreuse ou peinte

En résumé :





3) Magnétoscopie

La magnétoscopie permet de détecter, dans un matériau ferromagnétique, les défauts de surface débouchants ou sous-jacents (sous la surface), sans pour autant permettre leur dimensionnement, ni leur profondeur. Cette méthode est relativement économique et rapide (pas de temps d'attente, comme dans le ressuage par exemple).

a) Principe

La méthode consiste à faire circuler un flux magnétique dans la pièce à tester (**MT : Magnetic particle Testing**) et à observer un produit révélateur en surface, contenant de fines particules magnétiques. Lors de la présence de défaut sur son chemin, le flux magnétique est dévié et crée une fuite qui, en attirant les particules colorées ou fluorescentes du produit révélateur, fournit une signature particulière caractéristique du défaut.

b) Mise en œuvre

Matériel nécessaire :	
1	
2	<p>La pièce contrôlée doit être propre pour permettre le dépôt du révélateur</p>
3	<p>- Les parties où des défauts sont recherchés doivent être intégralement couvertes</p>
4	<p>- Application avec deux électroaimants : suivant 2 directions perpendiculaires</p>
5	<p>S'il y a une discontinuité, le champ magnétique est perturbé et traverse le révélateur</p>
6	<p>Les particules magnétiques forment alors une ligne au dessus du défaut</p>
7	
8	<p>- Un nettoyage est nécessaire pour faire disparaître les traces de révélateur</p>

c) Limites

- Le matériau doit être ferromagnétique
- Un défaut mal orienté par rapport au champ magnétique peut ne pas être vu
- Les défauts profonds ne peuvent pas être détectés
- Les très grandes pièces nécessitent plusieurs aimantations et ne peuvent donc pas être contrôlées en une seule opération
- Nécessité de démagnétiser et nettoyer les pièces après l'essai

4) Courants de Foucault

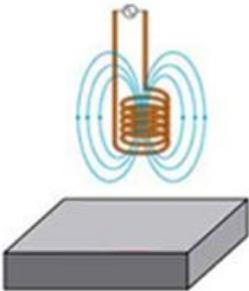
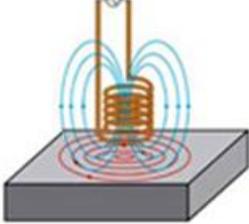
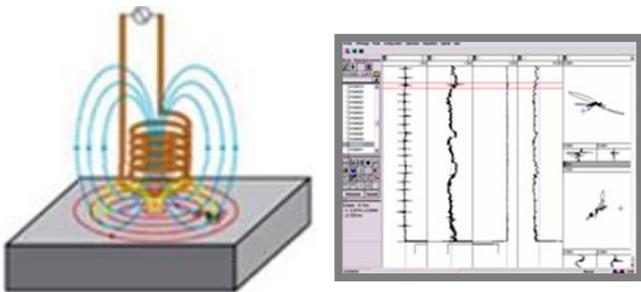
La méthode des courants de Foucault (**ET** : **Eddy current Testing**) est une méthode de surface qui ne nécessite pas de préparation sur la pièce à contrôler. Cette méthode est appropriée pour détecter et pour dimensionner des discontinuités dans le métal, comme la corrosion, l'érosion, l'usure, les piqûres et les fissures. Elle peut être automatisée facilement, ce qui rend le contrôle rapide et pratique.

a) Principe

Les courants de Foucault sont des courants qui apparaissent dans un matériau conducteur lorsqu'on fait varier le flux magnétique à proximité. Ils sont une conséquence de la loi de Lenz-Faraday.

Le flux magnétique est généré par une bobine dans laquelle circule un courant alternatif, selon différentes fréquences. Cette bobine joue le rôle d'émetteur et parfois de récepteur. La variation de flux dans le matériau crée des courants induits : les courants de Foucault. En présence d'un défaut, leur circulation est perturbée. Cette perturbation entraîne une variation du champ magnétique créé par les courants de Foucault, que l'on peut détecter grâce à cette même bobine (qui devient alors récepteur).

b) Mise en œuvre

	<p>Le courant alternatif qui circule dans la bobine à une fréquence choisie génère un champ magnétique autour de la bobine.</p>
	<p>Lorsque la bobine est placée près d'un matériau conducteur d'électricité, les courants de Foucault sont induits dans le matériau.</p>
	<p>Si un défaut dans le matériau conducteur modifie la circulation des courants de Foucault, le couplage magnétique avec la sonde change et un signal de défaut peut être lu en mesurant la variation d'impédance de la bobine.</p>

c) Limites

- Ne fonctionne qu'avec des matériaux électro-conducteurs
- Temps de contrôle qui peut être important pour les grandes surfaces
- Faible profondeur de contrôle (surface à quelques millimètres)
- Importance de l'état de surface : une forte rugosité peut masquer les défauts
- Sensibilité de la méthode (nécessite une bonne maîtrise)

II. Méthodes de volume

1) Radiographie

Découverte il y a plus de 100 ans, la radiographie (**RT : Radiographic Testing**), permet de fournir des informations directement exploitables sur l'intérieur des objets ou des matériaux. Utilisée en radiologie médicale mais également en radiologie industrielle dans le cadre de contrôles non destructifs.

a) Principe

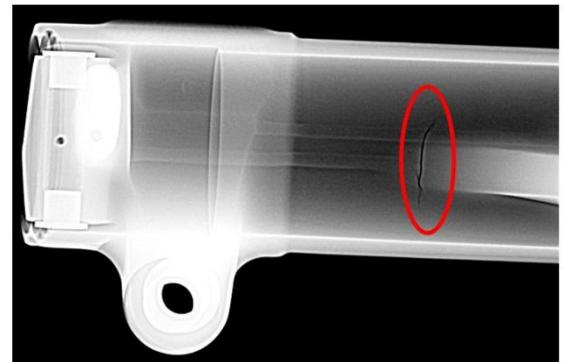
La radiographie est une technique d'imagerie de transmission, par rayons X dans le cadre de la radiographie X, ou par rayons gamma en gammagraphie.

Elle permet d'obtenir une image de la densité de matière d'un objet traversé par un rayonnement électromagnétique X ou gamma. Elle permet de visualiser les manques de matière du volume de l'objet contrôlé, sur une image à deux dimensions.

L'image est obtenue grâce à un détecteur qui est soit :

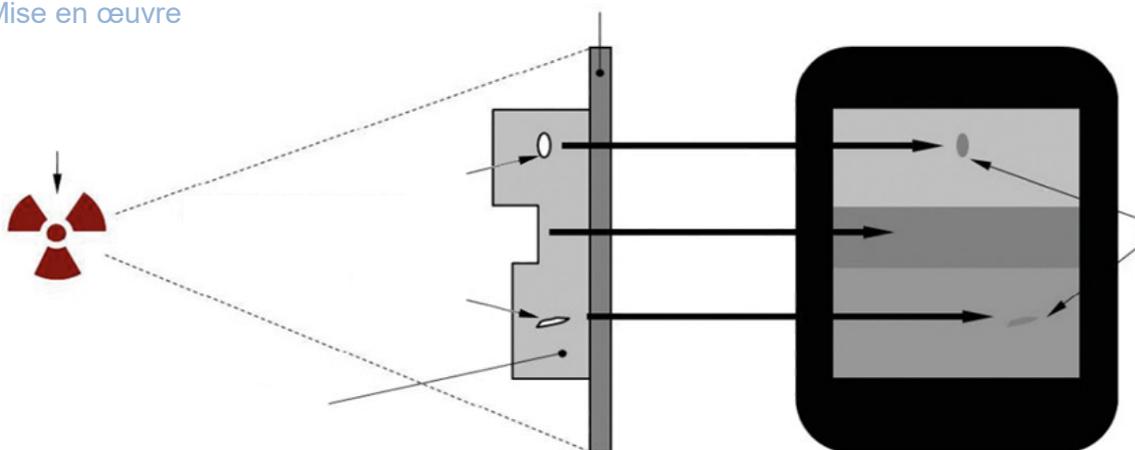
- Un film argentique,
- Un écran photostimulable à mémoire réutilisable,
- Un ensemble de détecteurs numériques

En radiologie industrielle, les rayons X sont produits par un tube à rayons X (le plus souvent) ou par un accélérateur de particules pour les applications à haute énergie. Les sources de rayonnement gamma utilisées industriellement sont l'iridium 192, le cobalt 60 et le sélénium 75.



Détection d'une fissure grâce à une radiographie

b) Mise en œuvre



c) Limites

- L'interprétation des images demande de l'expertise
- La réalisation des clichés nécessite des conditions de sécurité pour l'opérateur et l'environnement : les rayonnements utilisés sont dangereux et peuvent provoquer des maladies professionnelles graves
- Coût de fonctionnement important (entretien, sources de rayonnement, ...)

2) Ultrasons

Le contrôle par ultrasons (**UT : Ultrasonic Testing**) est basé sur la transmission, la réflexion et l'absorption d'une onde ultrasonore se propageant dans une pièce à contrôler. Les ultrasons sont des ondes acoustiques comprises entre 20 kHz et 10 GHz, fréquences trop élevées et aiguës pour être perçues par l'oreille humaine (ondes audibles entre 20Hz et 20 kHz), d'où leur nom. Grâce à eux, les chauves-souris perçoivent leur environnement, les médecins réalisent des échographies et nous pouvons examiner des pièces mécaniques pour y trouver : fissures, cavités, inclusions métalliques, occlusions gazeuses,...



La fréquence, la célérité (vitesse de propagation) et la longueur d'onde sont reliées par :



λ : Longueur d'onde, en mètre (m)

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

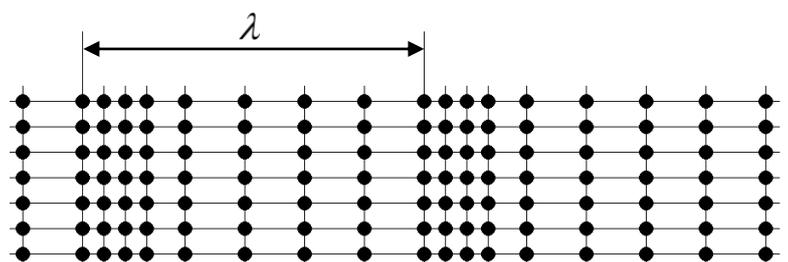
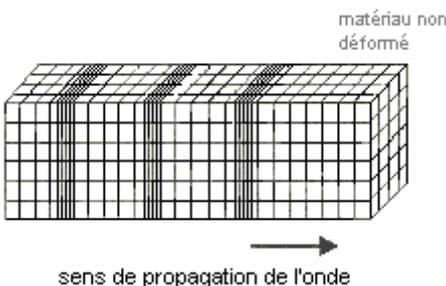
T : Période de l'onde, en seconde (s) avec $T = 1 / f$

C_L : Célérité de l'onde, en m/s

Pour que l'on puisse détecter un défaut, celui-ci doit avoir une taille au moins égales à $\lambda / 2$. C'est pour cette raison qu'on utilise des fréquences élevées, comprises en général entre 0,5 MHz et 20 MHz. L'augmentation de la fréquence a pour effet d'augmenter l'absorption et donc de limiter la profondeur accessible aux ultrasons.

Dans un milieu homogène, les ultrasons se propagent de manière rectiligne. La vitesse de propagation C_L (vitesse du son) dépend du milieu traversé (densité, modules élastiques) et des dimensions géométriques si celles-ci sont du même ordre de grandeur que la longueur d'onde. De plus, elle n'est pas la même pour les ondes longitudinales que pour les ondes transversales (ou ondes de cisaillement) :

- Ondes longitudinales :



Position des atomes sous l'effet d'une onde longitudinale
(Représentation extrêmement agrandie et simplifié en monocristaux)

Pour les matériaux solides, la célérité des ondes longitudinales est liée à la masse volumique, au module d'Young et au coefficient de Poisson par la relation :

C_L :

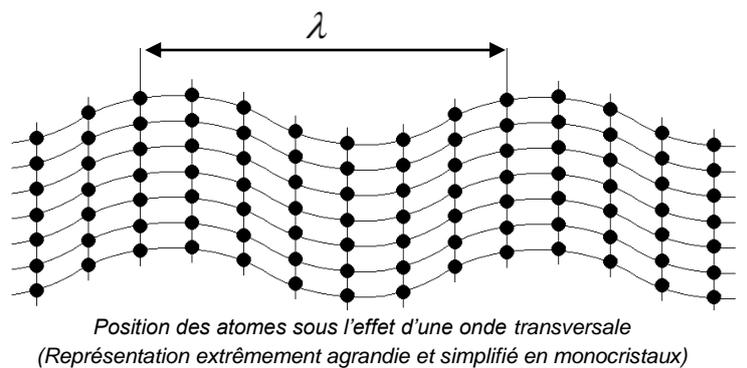
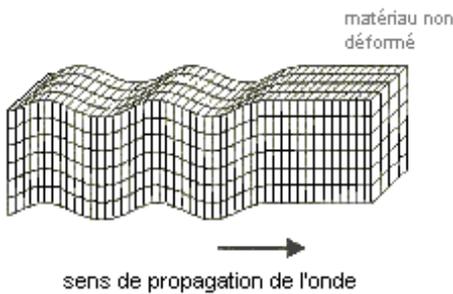
E :

σ :

μ :

- Ondes transversales :

Seuls les matériaux solides (éventuellement les fluides très visqueux) sont susceptibles de propager ces ondes.



Pour les matériaux solides, la célérité des ondes transversales (C_T) est approximativement la moitié de celle des ondes longitudinales.

C_T :

E :

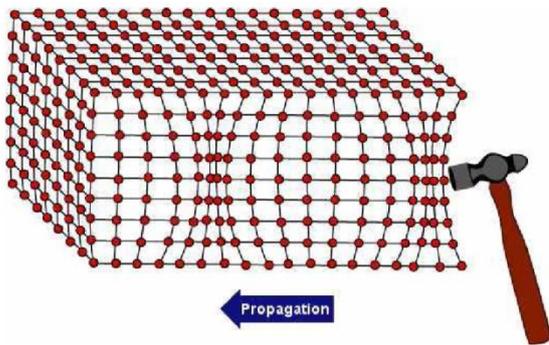
μ :

σ :

C_L :

Valeurs pour quelques matériaux :

Matériau	C_L (m.s ⁻¹)	C_T (m.s ⁻¹)	μ (g.cm ⁻³)
Acier	5900	3230	7,8
Aluminium	6320	3080	2,7
Cuivre	4200	2260	8,9
Fonte grise	4600	2160	7,2
Laiton	3830	2050	8,5
Plomb	2160	700	11,4
Caoutchouc mou	1500	Non transmise	0,9
Plexiglas	2730	1430	1,2
Huile	1570	Non transmise	0,9
Eau 20°C	1483	Non transmise	1,0
Air sec 20°C	340	Non transmise	0,0013



Pour créer une onde mécanique, il faut une excitation mécanique : L'onde peut être générée par un impact ou une force vibratoire externe. L'onde se propage ensuite de proche en proche grâce à l'oscillation des particules autour de leur position au repos. Plusieurs phénomènes permettent de produire des ondes ultrasonores, le plus utilisé est la piézo-électricité.

La piézoélectricité est la propriété que possèdent certains corps de se polariser électriquement sous l'action d'une contrainte mécanique, et, réciproquement, de se déformer lorsqu'on leur applique un champ électrique. Ce phénomène a été découvert en 1880 par Pierre et Jacques Curie.

a) Principe

La sonde, qui joue souvent le rôle d'émetteur et de récepteur, est appelée **traducteur**. Le traducteur génère une onde ultrasonore par effet piézoélectrique. À la réception de cette onde, le traducteur convertit l'énergie mécanique perturbée en signal électrique.

L'interprétation des signaux permet de positionner le défaut et de définir ses dimensions relatives. Il est possible de trouver des défauts aussi bien dans le volume de la matière qu'en surface.

Cette méthode nécessite d'effectuer un balayage mécanique exhaustif de la pièce. Il est d'ailleurs souvent nécessaire de contrôler plusieurs surfaces de la pièce pour pouvoir faire une représentation tridimensionnelle des défauts.



b) Mise en œuvre

Il existe plusieurs méthodes permettant l'examen par ultrason :

- La méthode par écho est de loin la plus utilisée en contrôle par ultrasons. Elle nécessite un transducteur émetteur/récepteur :

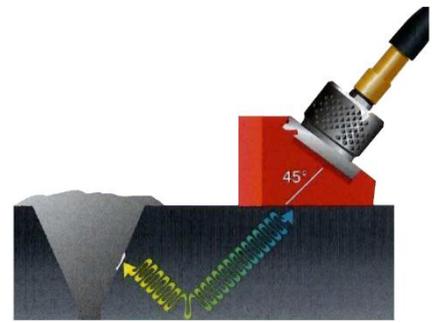
<p>Pièce à examiner</p> <p>Liquide de couplage</p> <p>L</p> <p>Ep</p>	<p>L</p> <p>Ep</p>	<p>Un premier écho, à gauche sur l'écran, correspond à la face par laquelle rentre l'onde dans la pièce. Légèrement décalé du « 0 » à cause du liquide de couplage (L).</p> <p>Un second écho, à droite sur l'écran, correspond à la face inférieure de la pièce.</p> <p>La distance entre les échos (E_p) correspond à l'épaisseur de la pièce (2 fois la distance parcourue par l'onde : aller + retour)</p>
<p>d</p> <p>Ep</p>	<p>Ep</p> <p>d</p>	<p>Si la sonde est en partie sur un défaut, les deux échos précédents sont toujours présents.</p> <p>Un nouvel écho apparaît, dû au défaut dans la pièce, qui renvoie une partie de l'onde.</p> <p>La distance entre le premier écho et ce nouvel écho (d) correspond à la profondeur à laquelle se trouve le défaut (2 fois la distance parcourue par l'onde : aller + retour)</p>
<p>d</p>	<p>d</p> <p>d</p>	<p>Si la sonde est complètement sur un défaut, l'écho de la face inférieure de la pièce disparaît.</p> <p>En effet, la totalité de l'onde est renvoyée par le défaut.</p> <p>La distance entre les deux échos (d) correspond à la profondeur à laquelle se trouve le défaut (2 fois la distance parcourue par l'onde : aller + retour)</p> <p>Ce signal va faire plusieurs aller-retour, générant plusieurs échos à une distance « d » les uns des autres. Le signal s'affaiblira un peu et à mesure, leur amplitude à l'écran va donc diminuer.</p>

- Utilisation de **palpeurs obliques** :

Pour des défauts très désorientés par rapport à la parallèle de la surface, il faut travailler avec un angle.

Il existe des traducteurs à faisceaux inclinés, ou de simples sabots (généralement en matière plastique) qui s'ajoutent au traducteur pour lui donner l'angle souhaité. Certains sabots permettent l'ajustement de l'angle d'incidence.

Les angles les plus courants pour l'acier sont 50°, 60° et 70°.



Recherche de défaut dans une soudure avec un angle de 45°



Sabots inclinés pour transducteur



Transducteurs avec différents faisceaux inclinés

- La **méthode par transmission** : utilise 2 palpeurs droits (un émetteur et un récepteur) :

		<p>La totalité du signal est transmise de l'émetteur au récepteur : Il n'y a aucun défaut</p>
		<p>Le signal qui parvient au récepteur est diminué : il y a un défaut.</p>

d) Limites de l'examen par ultrason

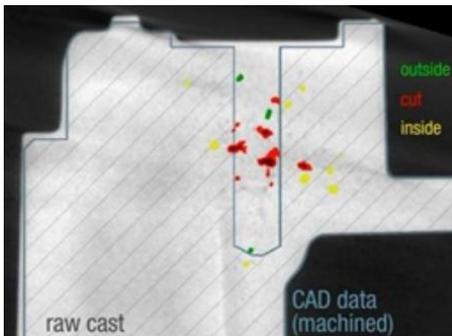
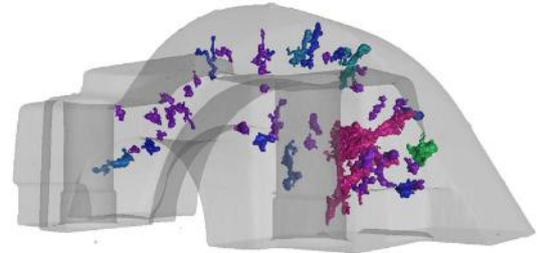
- Sensible à la nature et à l'orientation des défauts
- Sensible à la géométrie de la pièce (forme, rugosité, zones mortes,...)
- Les contrôles manuels demandent des connaissances et compétences importantes

3) Tomographie

La tomographie (**CT : Computed Tomography**) est dérivée des technologies médicales (scanner, IRM). Elle permet une visualisation en 3D de l'intérieur comme de l'extérieur de pièces d'une grande complexité géométrique. Il faut distinguer les micro-tomographes utilisés en recherche et développement, qui offrent une très bonne résolution (1 à 20 μm) sur des échantillons ou des éprouvettes de faible taille, des tomographes de production qui permettent de scanner des pièces entières mais avec un niveau de résolution moindre (100 μm à 200 μm).

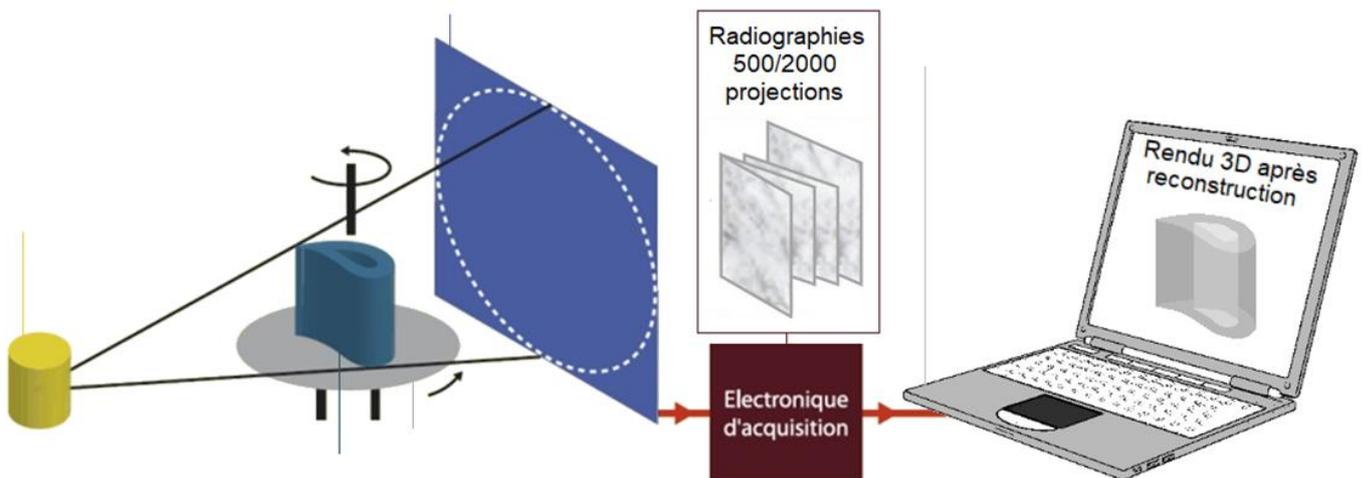
a) Principe

Comme la radiographie (en deux dimensions), la tomographie est basée sur l'absorption différentielle des rayons X en fonction de la densité de matière. Elle exploite un grand nombre de vues réalisées suivant différents angles par rotation de l'objet et suivant plusieurs positions en hauteur.



Les différentes vues permettent de déterminer l'absorption de chaque élément de volume appelé « voxels » et ainsi de reconstituer l'objet en trois dimensions. Il est alors possible d'obtenir plusieurs représentations en volume de l'objet, ou de réaliser des coupes virtuelles. La vue en coupe est la plus conventionnelle et la plus pratique pour déterminer des taux de porosités ou mesurer des discontinuités. Pour examiner la totalité du volume, il suffit de faire défiler à l'écran les coupes 2D.

b) Mise en œuvre



c) Limites

- La réalisation des clichés nécessite des conditions de sécurité pour l'opérateur et l'environnement : les rayonnements utilisés sont dangereux et peuvent provoquer des maladies professionnelles graves
- Coût de fonctionnement important (entretien, sources de rayonnement, ...)
- Logiciel d'analyse d'images très coûteux (entre 10 000€ et 50 000€)

IV. Méthodes globales

Elles permettent de détecter les discontinuités de surface, en une seule fois avec une totale fiabilité, quels que soient :

- Leur orientation
- Leur emplacement sur la pièce
- La dimension et la géométrie de la pièce à contrôler

Contrairement à de nombreuses méthodes de CND, où le positionnement et l'orientation de la source d'excitation jouent un rôle fondamental par rapport à l'emplacement et à la direction des discontinuités.

Méthode globale, ne signifie pas pour autant que la méthode soit suffisante pour contrôler complètement la qualité d'une pièce.

En effet, toutes les méthodes de CND sont complémentaires. Il n'est jamais possible de détecter, en utilisant une seule méthode, à la fois les discontinuités de surface et les discontinuités volumiques.

1) Thermographie

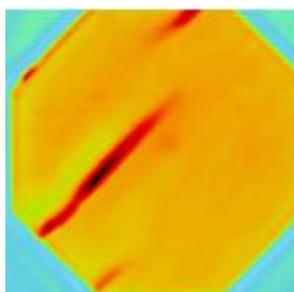
a) Principe

La thermographie consiste à exciter thermiquement le matériau à examiner (chauffage par induction, air chaud, laser...) et à mesurer l'évolution thermique qui en résulte avec une caméra infrarouge.

b) Mise en œuvre

Le choix de la combinaison entre la caméra et le système d'excitation dépend très fortement des pièces à contrôler (matériau, nature, dimensions) et des défauts à rechercher (type de défauts, dimensions, profondeur, position).

La diffusion de la chaleur dans le matériau et l'impact qu'elle a sur la distribution de température de surface renseignent sur les propriétés thermo-physiques des matériaux et sur d'éventuels défauts.



c) Limites

- Lenteur du contrôle
- Interprétation des résultats

2) Ondes guidées



La méthode des ondes guidées est une technique émergente permettant une inspection globale et rapide de **structures tubulaires ou de plaques**. Les **ondes ultrasonores** sont créées dans le matériau à contrôler et se propagent entre les parois de la canalisation ou de la plaque. La présence de défauts induit une réflexion de l'onde. L'analyse des signaux reçus (temps de parcours et amplitude) permet de repérer des zones suspectes. Celles-ci peuvent faire l'objet par la suite d'un contrôle plus approfondi utilisant d'autres techniques.

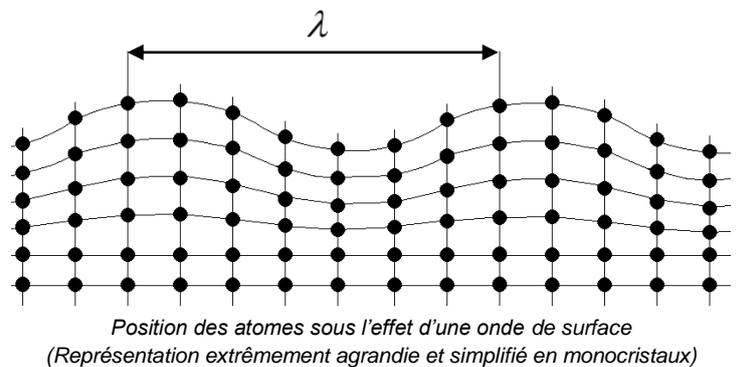


Cette méthode, facile à installer, permet de contrôler rapidement un système en service dans des zones inaccessibles. Très utilisée sur de la tuyauterie placée sous des routes, dans des ponts ou sous des voies ferrées, mais également dans des centrales thermiques, des usines pétrochimiques ou des raffineries.

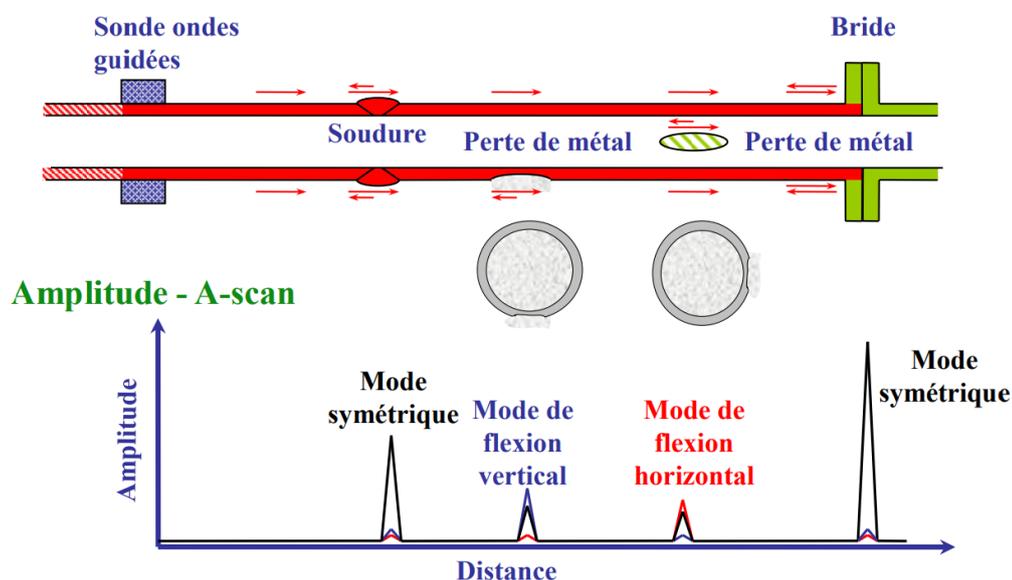
a) Principe

Les **ondes de surface** (ou ondes de Rayleigh) qui n'affectent que la surface du solide sur une profondeur de l'ordre de la longueur d'onde. Pour la plupart des matériaux on a approximativement $C_S = 0,9.C_T$

Les **ondes de plaque** (ou ondes de Lamb) qui affectent toute l'épaisseur « e » d'une plaque quand cette épaisseur est de l'ordre de quelques longueurs d'onde. Contrairement aux différents cas ci-dessus, la vitesse de propagation dépend alors de la fréquence : on dit qu'il y a dispersion.

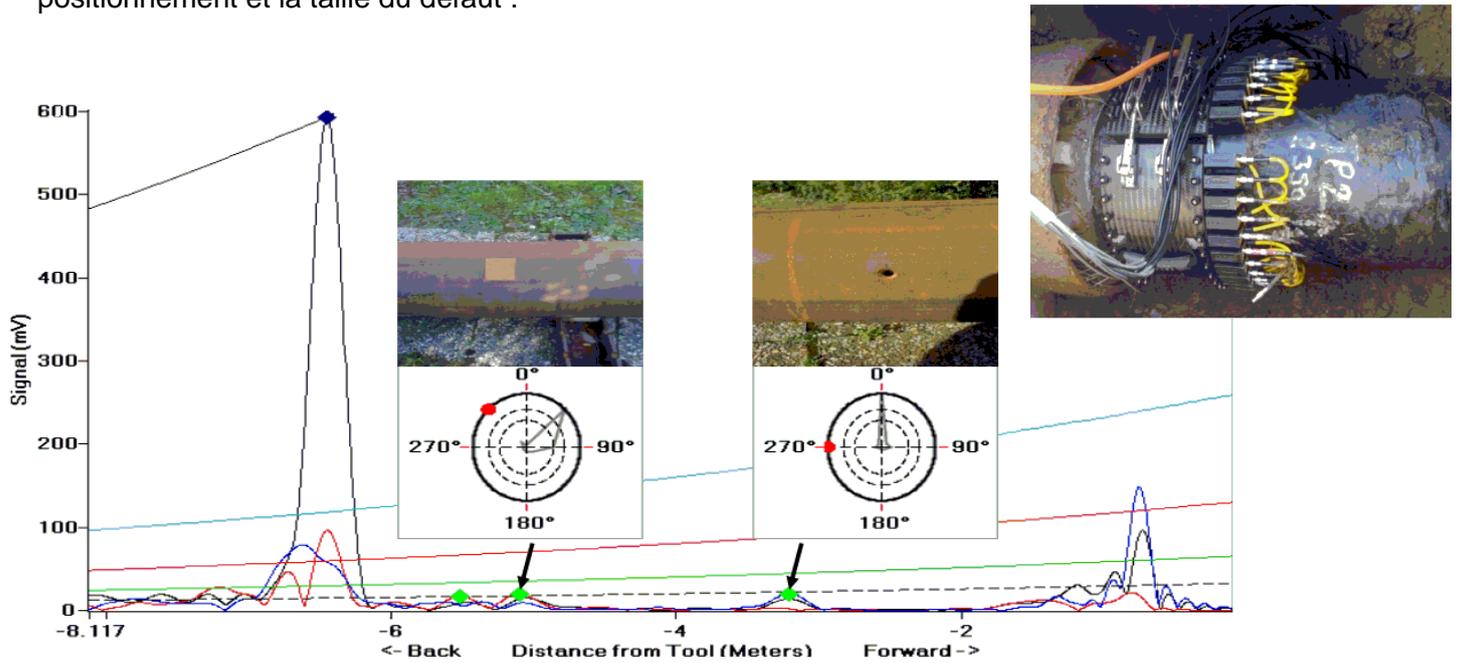


Une réflexion a lieu lorsque l'onde rencontre une variation de section : soudure, support, piquage, perte d'épaisseur :



b) Mise en œuvre

La focalisation avec systèmes multiéléments permet d'augmenter la sensibilité et d'informer sur le positionnement et la taille du défaut :



c) Limites

- Interprétation compliquée
- Distorsion du signal en cas de géométrie complexe
- Dispersion des signaux
- Faisabilité pas toujours prévisible

3) Emission acoustique

L'émission acoustique (**AT : Acoustic Emission Testing**) est, selon la norme AFNOR NFA 09350, le phénomène de libération d'énergie sous forme d'ondes élastiques transitoires résultant des micro-déplacements locaux internes au sein d'un matériau (fissures, inclusions, corrosion, délaminage, etc.) soumis à sollicitation (application d'une charge et/ou présence d'un environnement agressif).

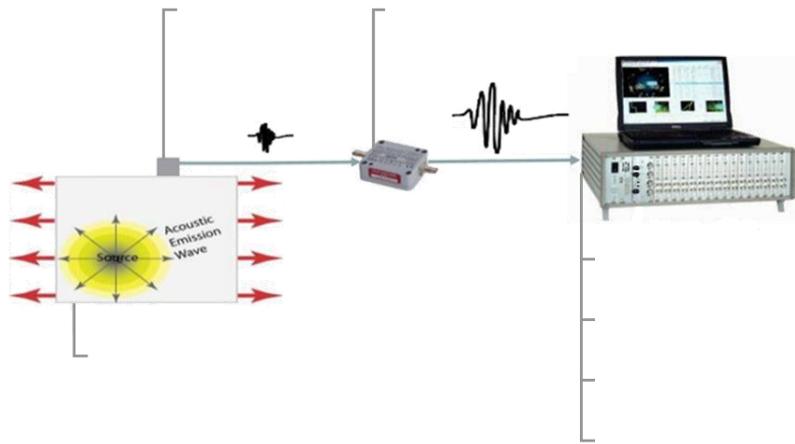
Utilisée avec précautions et rigueur, cette technique permet de détecter et de suivre les phénomènes d'endommagement et le vieillissement des installations. Les signaux recueillis et traités en temps réel permettent de déceler et d'identifier la nature des endommagements tout en suivant leur évolution dans le temps et de les localiser.

Les domaines d'applications sont divers : Contrôle de l'intégrité des équipements sous pression et pipelines, contrôle des structures industrielles telles que les réacteurs nucléaires, surveillance des installations en fonctionnement,...



Contrôle de sphères de stockage de GPL par émission acoustique

a) Principe



b) Mise en œuvre

c) Limites

- Les défauts non évolutifs ne sont pas détectés
- La structure examinée doit être mise sous contraintes
- Impossible sans étude préalable d'assurer une corrélation fiable entre le niveau d'activité de la source avec le type et les dimensions de l'indication à l'origine de celle-ci

V. Certifications

Comme le décrit l'Association Française de Normalisation (AFNOR) : « la certification est, au sens large, une activité par laquelle un organisme reconnu, indépendant des parties en cause, donne une assurance écrite qu'une organisation, un processus, un service, un produit ou des compétences professionnelles sont conformes à des exigences spécifiées dans un référentiel ».



La Cofrend (Confédération française pour les essais non destructifs) est l'organisme « tierce-partie » qui gère ces certifications selon deux normes :

- Norme française et européenne NF EN 473 intitulée : « Essais non destructifs, qualification et certification du personnel END ». Cette norme a été écrite en avril 1993, révisée en 2000 puis en 2008. Sous ce référentiel, la certification se répartit dans trois comités sectoriels : produits métalliques, maintenance ferroviaire, fabrication et maintenance.

- Norme européenne EN 4179 (équivalent américain de la NAS 410). Pour les pièces destinées à l'industrie aérospatiale (aéronautique et espace), les CND sont considérés comme des procédés spéciaux et doivent être qualifiés comme tels.

La certification est basée sur un examen théorique et pratique qui a une durée de validité de 5 ans (renouvelables). Actuellement, il y a en France 25 000 personnes certifiées pour le contrôle non destructif.

Il existe 3 niveaux de certification, témoignent de la qualification d'un agent CND, sachant que le niveau 3 est le plus élevé :

- Niveau 1 : Doit être épaulé par un agent de niveau 2 ou 3, et est autorisé à :

- Calibrer un équipement et effectuer les CND
- Enregistrer et classer les résultats d'après des critères figés
- Transmettre les résultats

- Niveau 2 : Est autorisé à :

- Sélectionner la technique à utiliser pour la méthode de contrôle
- Définir les limitations d'application d'une méthode de contrôle
- Transposer les standards et spécifications CND en instructions CND
- Calibrer un équipement et vérifier ses paramètres
- Effectuer et superviser les CND
- Evaluer et interpréter les résultats d'après les standards, normes et spécifications en vigueur
- Préparer les instructions CND
- Assurer et superviser toutes les formalités des agents de niveau 2 et 1.
- Organiser et transmettre les résultats

- Niveau 3 : Est autorisé à :

- Assurer l'entière responsabilité des équipements de contrôles, du centre d'examen et de l'équipe
- Rédiger et valider des instructions et procédures de CND
- Interpréter les références, normes, spécifications et procédures
- Désigner la méthode de contrôle, la procédure à suivre et les instructions à utiliser
- S'occuper et superviser toutes les formalités des agents de niveau 2 et 1.
- Assurer la gestion de l'ensemble des agents de tout niveau