

Résumé et support de cours (2023 – 2023)

Introduction – Généralités Présentation du Contrôle non destructif (C.N.D.)

1. Définition du contrôle non destructif :

«C'est de qualifier sans nécessairement quantifier l'état du produit, sans altération à ses caractéristiques par rapport à des normes de recette».

C'est un contrôle de la qualité des produits. Ne donne pas une information fiable sur les propriétés et caractéristiques physiques du produit.

Objectif : Détecter les anomalies, hétérogénéités et irrégularités dans le produit.

2. Applications et tendances :

Dans l'industrie : matériaux, produits et structures de toutes natures. Une nécessité majeure dans le domaine de l'aéronautique et le nucléaire (sécurité primordiale).

Une importance majeure dans les biens de consommation (santé publique).

2.1. Nature des défauts recherchés :

- Défauts technologique ponctuels graves (fissure de fatigue, macro-entailles, impuretés de nature métallurgiques, etc..).
- Défauts d'aspect : Taches sur surfaces propres, bavures ou imperfections de la pièce, ...
- Corps étrangers nuisibles : Fragments de métal dans un produit en verre, éclats de verre dans un produit alimentaire, ...

2.2. Stades du contrôle non destructif :

En cours de fabrication : Appareils de contrôle et de mesure dans la chaîne ou la ligne de fabrication avec un tri et repérage automatique ou semi-automatique ou manuelle (assisté par un opérateur).

a. Contrôle de réception :

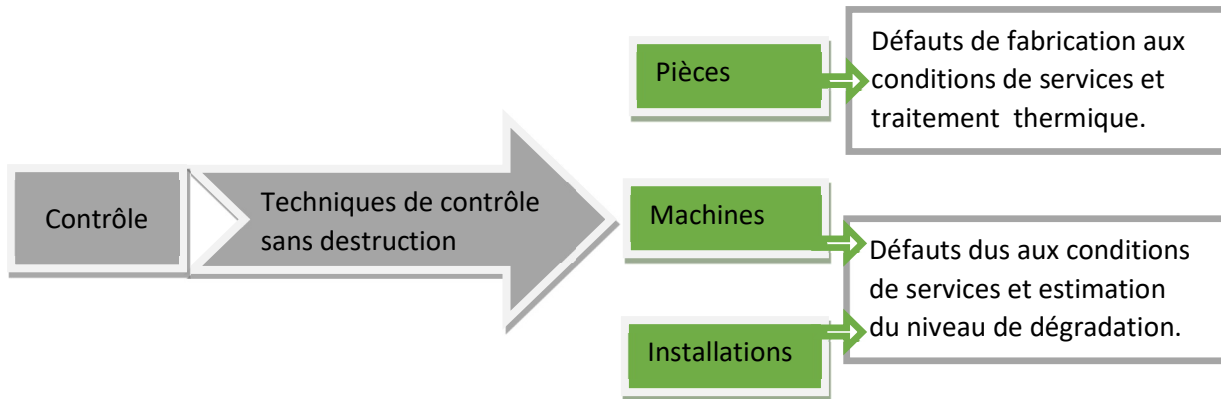
Contrôle de réception des produits : pièces, appareils, installation soft ou hard.

Il s'agit de détecter les défauts et définir la nature et les dimensions.

Le contrôle se fait selon les spécifications de qualités exigés ou définies auparavant : normes et recommandations techniques. On en distingue deux aspects : Aspect coût et productivité et aspect procédure (choix du procédé, choix des paramètres de réglage, de l'étalonnage, présentation et archivage et résultats obtenus).

b. Contrôle de service : Se fait lors d'opération de maintenance ou à la suite de détection d'anomalie de comportement. Il faut estimer la nature et les l'importance ou la gravité de cette anomalie pour en savoir le type d'intervention à faire mais aussi prévenir l'évolution du dommage au cours du temps.

Localisation du CND :



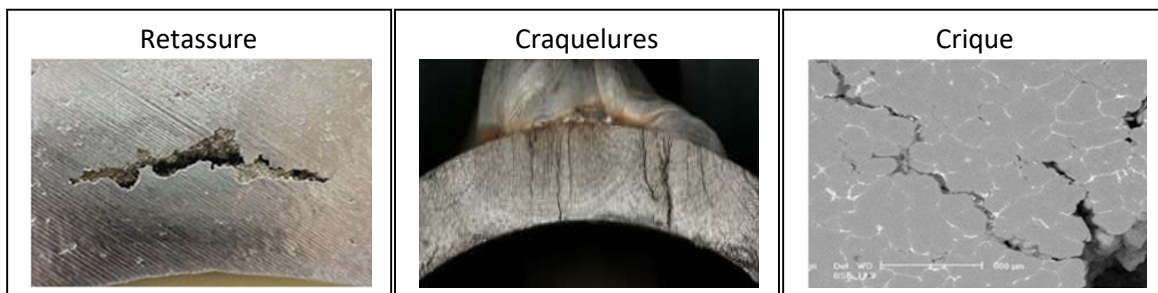
c. Tendances et évolution :

Il ne suffit pas de détecter les défauts. Il y a lieu une importance et une nécessité pour réduire le coût et le temps, de caractériser et dimensionner ses mêmes défaut, tels que les variations de la microstructure dans un métal, la rugosité sur une surface et les propriétés électromagnétique sur une bande. L'outil informatique a surement eu la part dominante pour automatiser les techniques et la gestion de données et résultats expérimentaux.

3. Différents types de défauts :

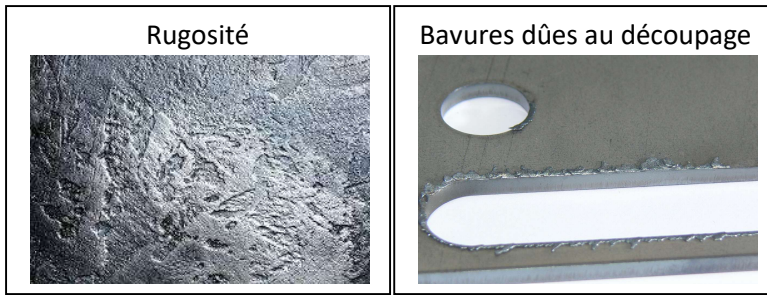
3.1. Les défauts de surface : Détectés par observation directe à l'œil nu ou à travers des appareils d'observation.

a. Les défauts ponctuels : Criques et retassures (défauts de moulage), porosités, soufflures et piqures, fissures, craquelures (défauts de soudure), ... en grandeur infime (de l'ordre de μm) ou graves et nocives lorsqu'ils atteignent le mm. Différentes méthodes non destructives sont utilisées pour ce types de défauts, telles que le ressuage, la magnétoscopie, les courants de Foucault et les ultrasons.



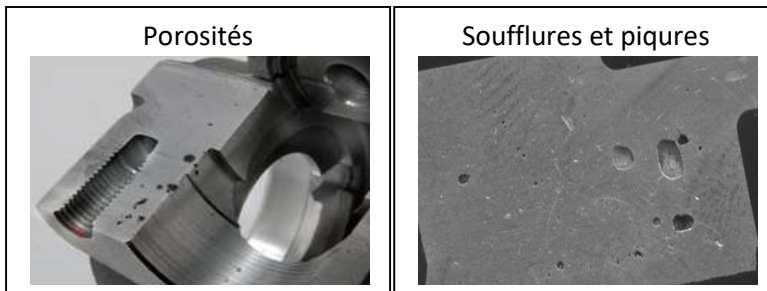
b. Les défauts d'aspects :

Variations ou irrégularités géométriques ou physiques qui rendent les produit défectueux et inutilisable : rugosité, surépaisseur, tâches gênantes au bon fonctionnement, bavures ou reliefs, etc..



3.2. Les défauts internes :

Hétérogénéités de divers types selon leurs natures, leurs formes et les dimensions localisées à l'intérieur du volume à contrôler. Dans les métaux par exemple, on peut citer les criques internes, les porosités, les soufflures et les inclusions et impuretés qui affaiblissent les pièces moulées, forgées, laminées et soudées.

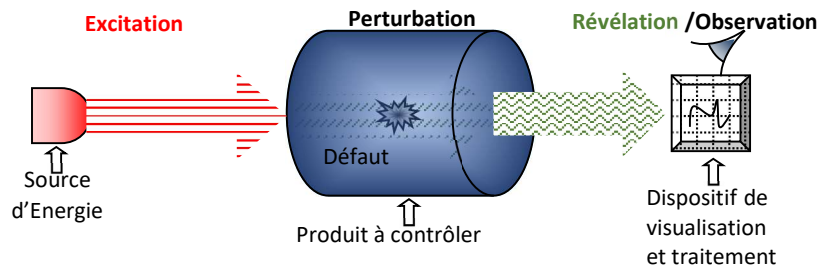


4. Procédure du CND

L'opération doit tenir compte de toute information utile pour bien exploiter les résultats après contrôle et prendre la bonne décision en ce qui concerne l'utilisation ou l'affectation du produit contrôlé : localisation, identification, caractérisation, conditions et la fiabilité du contrôle.

Principe de détection :

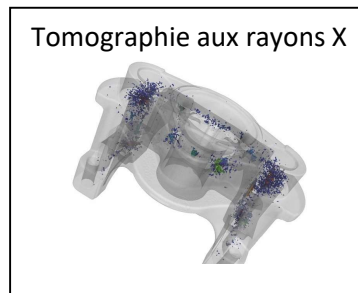
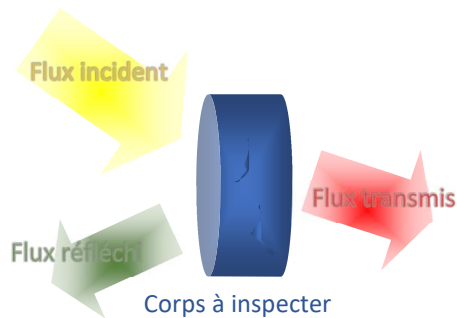
Il consiste à exciter le défaut par la mise en œuvre d'un processus énergétique (Mécanique, électrique ou magnétique) pour en détecter sa réaction sous forme d'une perturbation (modulation ou altération) par des capteurs spécifiques. Le traitement du signal est par la suite nous délivre l'information relative à la caractérisation de ce défaut.



Différents types d'énergie sont utilisés tels que l'énergie mécanique (ressuage, ultrasons), électromagnétique (radioscopie, la lumière visible, flux magnétique, ...) et on en distingue en fait deux grandes catégories de méthodes de détection :

- A. Méthodes de flux : Excitation et détection de même nature.

- Par effet d'excitation, les défauts introduisent une perturbation de flux, relevée dans le flux transmis (radiographie) ou dans le flux rediffusé (ultrasons).
- Par effet de proximité (Courant de Foucault, flux de fuite magnétique).



B. Excitation et détection de natures différentes.

- Excitation par vibrations mécaniques ou microdéformations (interférométrie holographique) ;
- Emission acoustique.

L'analyse et la détection des défauts se fait à l'aide des méthodes de traitements de signal (mécanique ou acoustique).

4. Techniques de contrôle non destructives :

Examens visuel, ressuage, magnétoscopie, ultrason radiographie, courants de Foucault, tomographie, thermographie infrarouge, analyse des huiles en service, analyse des ondes vibratoires, ...

Chapitre 1 : Le ressuage

1. Introduction :

Le ressuage est une méthode d'inspection visuelle qui peut être s'appliquer sur tous les matériaux à l'exception des matériaux poreux ou présentent des porosités en volume et sur la surface.

Le terme ressuage est relatif à la sortie d'un fluide d'une discontinuité dans laquelle s'était accumulé précédemment au cours d'une opération d'imprégnation.

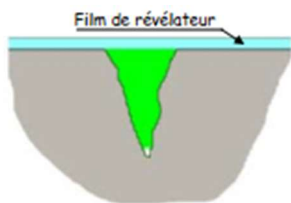
Le ressuage est une méthode de contrôle non destructif qui permet de détecter les défauts débouchant en surface de la pièce pour les matériaux non absorbants : Alliages métalliques, matières plastiques, caoutchoucs moulés, certaines céramiques, ...

2. Principe :

Etape 1 : Appliquer un pénétrant de faible tension superficielle (de bonne capillarité) sur la surface de la pièce inspectée ;

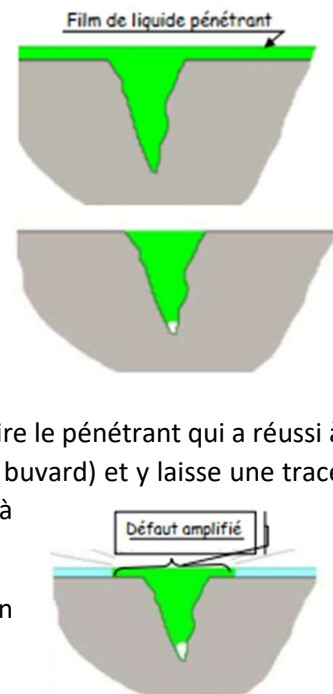
Etape 2 : Laisser un temps d'imprégnation de sorte que le pénétrant puisse s'introduire dans les discontinuités aboutissant à la surface ;

Etape 3 : Eliminer le pénétrant de la surface. Cette opération n'élimine pas la partie du pénétrant qui a réussi à s'infiltrer dans les discontinuités ;



Etape 4 : Appliquer un révélateur, qui est un produit opaque et absorbant, sur la surface. Le révélateur aspire le pénétrant qui a réussi à s'infiltrer dans les discontinuités vers la surface (effet buvard) et y laisse une trace plus importante, en taille, que la discontinuité et ce à cause de la diffusion du pénétrant dans le révélateur ;

Le pénétrant contient un produit coloré visible à la lumière blanche ou un produit fluorescent visible à l'ultraviolet (lumière noire).

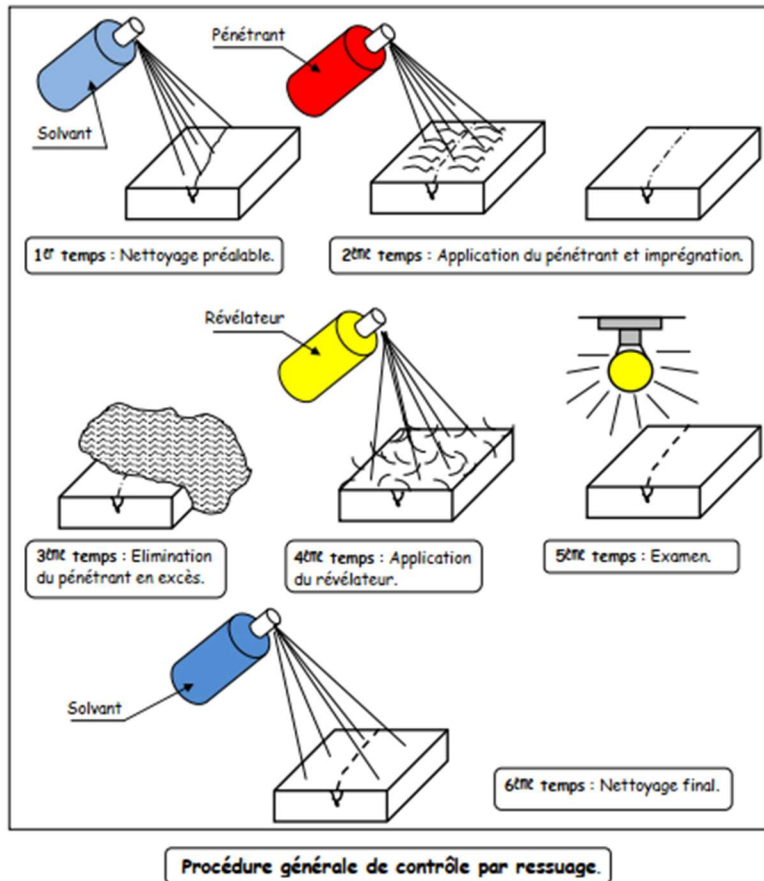


3. Domaine d'application :

1. Les défauts débouchant de moulage, de fatigue, d'usinage, de traitement thermique et de soudage.
2. Donne des résultats intéressants avec les métaux et la plupart des alliages non métalliques comme les céramiques, les plastiques, le caoutchouc moulé. Il est nécessaire de procéder à des essais préliminaires sur la réactivité avec les certains produits comme les plastiques et les composés caoutchouc moulé.

4. Procédure :

La procédure par étape est expliquée dans le principe de la méthode, néanmoins, il faut s'assurer que la surface avant d'appliquer le pénétrant soit propre. Il faut procéder à un nettoyage de toute pollution susceptible de colmater les défauts débouchant tels que les traces d'huile et de graisse, les résines inorganiques, les matières charbonneuses, les peintures, les produit de corrosion, les oxydes, etc...

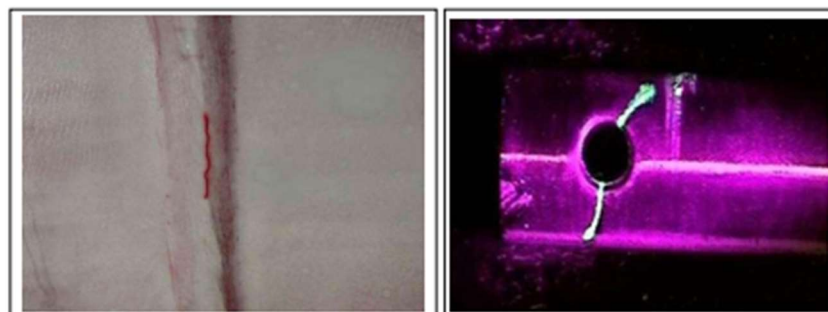


Il est parfois nécessaire d'utiliser un émulsifiant dans la phase de l'élimination de l'excès de liquide pénétrant.

Il faut aussi noter que les opérations sont relativement lentes, de 3 à 30 mn en ce qui concerne l'imprégnation. Les variantes sont codifiées dans les normes internationales et la norme NF A 09-120.

Un traçage coloré (généralement en rouge) implique l'utilisation d'un révélateur à fond blanc. Le traçage fluorescent implique un examen fait en lumière noire (fluorescence excitée par un projecteur de rayons ultraviolets UV).

Il est toutefois très utile de se servir de cales étalon pour une bonne et correcte mesure des résultats obtenus.



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

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

Chapitre 2 : La magnétoscopie

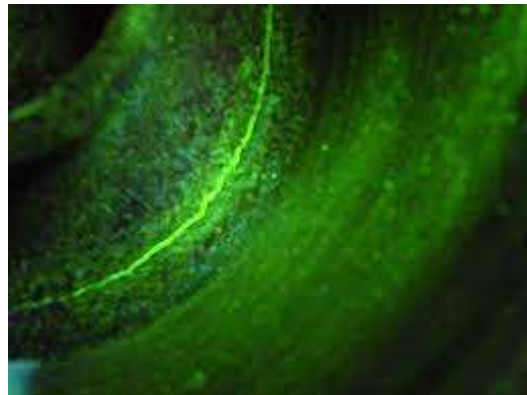
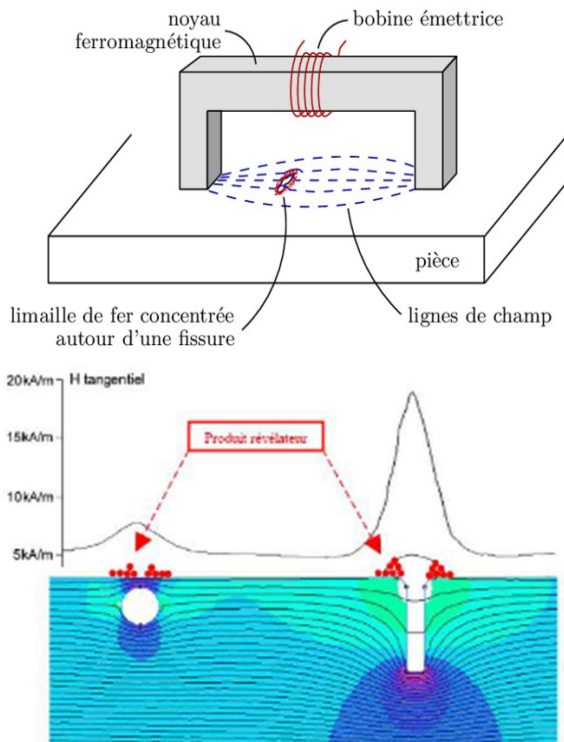
1. Introduction :

Les discontinuités superficielles dans la matière à inspecter provoquent des fuites magnétiques qui peuvent être révélées et mise en évidence par des produits indicateurs déposés à la surface de la pièce. Une image magnétique observée donne une idée moyennement qualitative et quantitative sur la forme, la position et la taille du défaut.

Le contrôle par magnétoscopie permet la détection des défauts superficiels ou sous-jacents dans la matériaux ferromagnétiques (soumis à un champ de 2400 A/m et présentent une induction d'au moins 1 Tesla.

2. Principe :

"Soumettre la pièce (ferromagnétique) à un champ magnétique d'une intensité suffisante de manière à travailler dans une zone située au-dessus de la valeur maximale de la perméabilité magnétique du matériau".

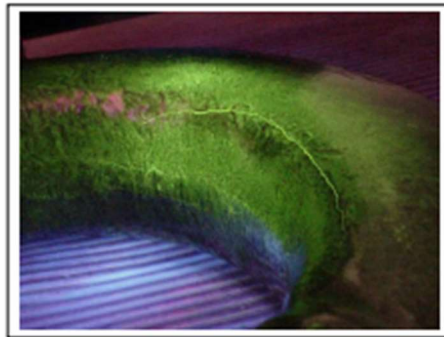


On utilise généralement les deux méthodes : directe (champ magnétique généré par un aimant ou un électro-aimant) ou indirectes (champ magnétique généré par le passage du courant dans la pièce elle-même).

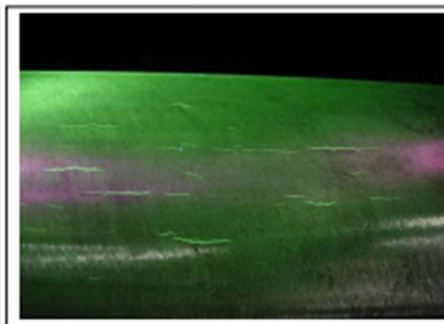
3. Procédure :

Un liquide à faible viscosité contenant des particules magnétiques très fines (moins de 30µm) est pulvérisé sur la pièce pour visualiser le champ magnétique, souvent colorées pour aider à la lecture du défaut. Il s'agit en fait d'un liquide révélateur qui contient des particules de fer noir (5 à 10 g/l de pétrole). Ces particules sont attirées au-dessus du défaut pour former un "pont magnétique" tout autour visible à l'œil nu.

Il est nécessaire de pratiquer au moins deux directions d'aimantation pour s'assurer que les défauts se situent perpendiculairement aux lignes de champ pour pouvoir être détectés. Le révélateur peut être un produit sec.



Fissuration en service d'un crochet



Fissuration induite par un traitement thermique

On utilise aussi des produits fluorescents avec inspection à l'ultraviolet (Lampe de Wood).

Selon la forme géométrique de la pièce à inspecter on choisit le mode d'aimantation, comme le montre le tableau suivant.

MÉTHODES D'AIMANTATION	SYMBOLES	1ère & ASSÉRIATION			
		Quand l'orientation est indiquée	Quand circular est indiquée	Passer de circuit	Passer de flux
A - Aimantation général par passage de courant dans la pièce.			X		
B - Aimantation d'une pièce creusée à l'aide d'un conducteur central (exemple au n°101).			X		X
C - Aimantation d'une pièce creusée à l'aide d'un conducteur angulaire portablement à l'axe de la pièce.			X		X
D - Aimantation localisée par passage de courant dans une pièce de grande dimension.			X	X	
E - Aimantation par solénoïde court ou bobine fixe.		X			X
F - Aimantation par pâtes magnétiques.		X			X
G - Aimantation par électro-aimant.		X			X
H - Aimantation par aimant permanent.		X			X
I - Aimantation par courant induit.			X		X

On applique le produit lors de la magnétisation (méthode continue) ou après (Méthode résiduelle).

4. Caractéristiques du produit révélateur :

- Non toxique ;
- Ferromagnétique ;
- Haute perméabilité ;
- Faible rémanence ;
- Couleur contraste par rapport à la surface de la pièce ;
- Graines de dimension satisfaisante et avec grande mobilité.

Il est nécessaire de faire une démagnétisation après inspection dans le cas où la magnétisation présente un effet néfaste sur l'équipement que la pièce en fait partie, sauf si cette pièce est en acier doux (champ résiduel faible) ou s'il subira un traitement thermique après l'inspection (un deuxième contrôle est nécessaire).

5. Avantages :

- Simple à mettre en œuvre ;
- Localisation précise des défauts avec une bonne appréciation des longueurs ;
- Se prête partiellement bien à l'automatisation.

6. Inconvénients :

Ne s'applique que sur les matériaux ferromagnétiques.

La sensibilité est dépendante de l'orientation du défaut par rapport à la direction des lignes d'induction ;

Ne permet pas une appréciation de la profondeur du défaut. C'est ainsi que son automatisation reste encore restreinte.

Une démagnétisation des pièces est parfois nécessaire après contrôle.

7. Domaine d'application :

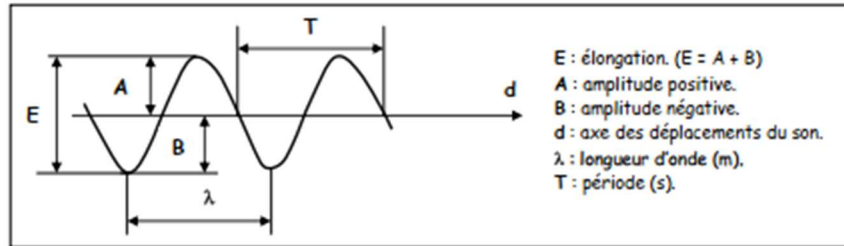
- Contrôle de bielles, biellettes, tiges et ressorts etc...
- Contrôle des soudures et piquages.

Chapitre 3 : Contrôle non destructif par les ultrasons

1. Introduction :

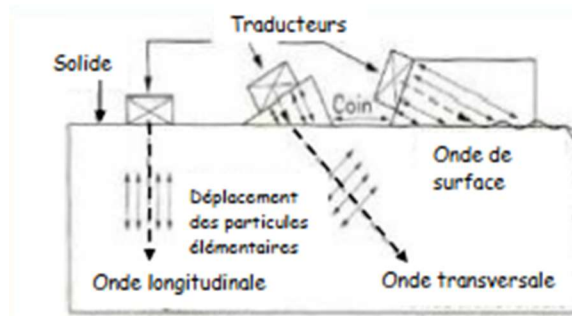
Les ondes sonores sont des ondes élastiques dont la fréquence est beaucoup supérieure au domaine audible (16 Hz à 16 KHz) sont appelées des ondes ultrasons. Elles se propagent à l'intérieur des matériaux avec des vitesses qui dépendent du milieu et du de l'onde. La plage que le CND utilise est compris entre 10^5 Hz et 20^6 Hz.

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
Infrasons	Zone audible	Ultrasons	Hyper sons



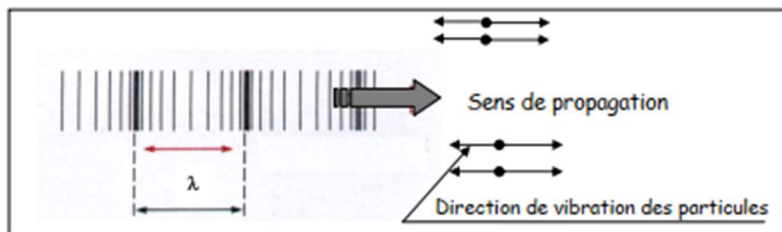
Représentation des vibrations du son (sinusoïde).

On distingue trois types d'onde :



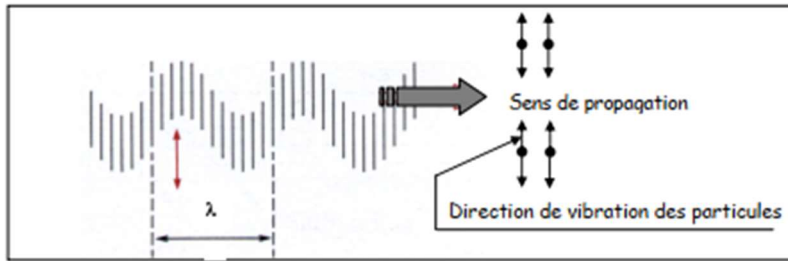
1. Ondes longitudinales ou de compression :

Vibrations parallèles à la direction de la propagation de l'onde.



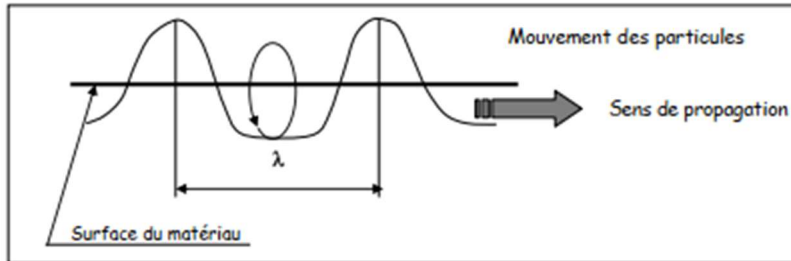
2. Ondes transversales ou de cisaillement :

Vibrations perpendiculaires à la direction de propagation de l'onde. N'existent que dans les solides.



3. Ondes de surface :

Obtenues par superposition des deux ondes longitudinale et transversale parallèle à la surface du solide.



Vitesse de la propagation :

Ce type de contrôle nécessite une bonne connaissance des phénomènes liés la propagation des ultrasons :

- Propagation des ondes vibratoires dans le matériau : réflexion, réfraction et transmission ;
- Analyse de l'influence des défauts ;
- Type d'hétérogénéités de la structure ;
- Atténuation des ondes (phénomènes d'absorption et de diffusion) ;
- Vitesses de propagation.

Vitesse de propagation de l'onde :

✓ Onde longitudinale :

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

- E : Module d'Young du matériau N/m² ;
- ρ : masse spécifique du matériau (Kg/m³) ;
- ν : coefficient de Poisson.

✓ Onde transversale :

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

✓ Onde de surface :

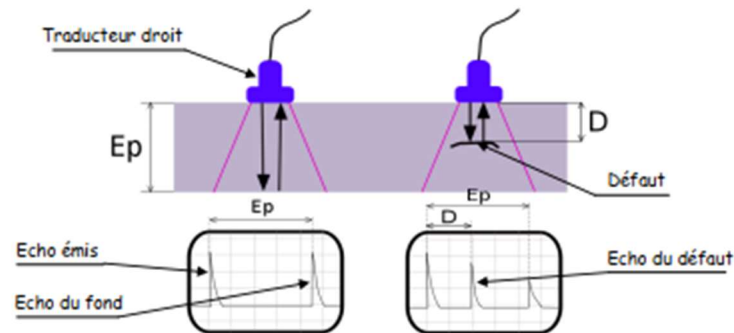
$$V_S = 0,9 V_T$$

Le tableau suivant donne une idée sur la vitesse de propagation de l'onde selon le matériau :

Vitesses et impédances acoustiques				
Matériau	Masse volumique (10^3 Kg/m^3)	Vitesse des ondes longitudinales (m/s)	Vitesse des ondes transversales (m/s)	Impédance acoustique ($10^4 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{s}$)
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		$4 \cdot 10^{-4}$

2. Principe du contrôle par ultrasons :

Une partie du faisceau acoustique de la vibration mécanique est interceptée par le défaut et renvoyée vers le transducteur (piézo-électrique) qui le convertit en signal électrique. La vibration mécanique se propage dans la section de la pièce se réfléchit d'une partie pour nous révéler l'information sur le fond et sur le défaut (écho du défaut).



Les fréquences utilisées pour contrôler les métaux sont de l'ordre de 1 à 10 MHz.

3. Matériel et procédure de mise en œuvre :

- Postes US analogiques ou numériques ;
- Transducteurs OL, OT et à angles variables ;
- Mesureurs d'épaisseurs ;
- Logiciels de saisie, de suivi et d'analyse des mesures d'épaisseurs.



Appareil de contrôle par US

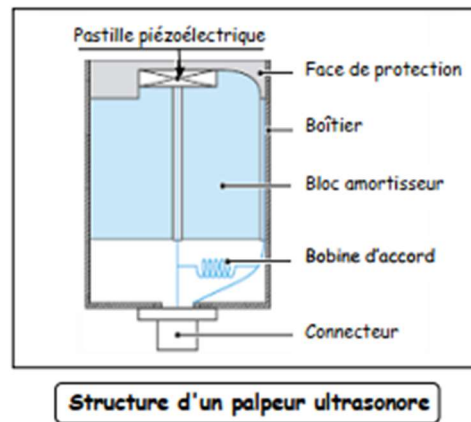


Transducteurs



Mesureur d'épaisseur

Le transducteur est principalement doté d'un palpeur qui est constitué de deux faces métallisées de façon à réaliser deux électrodes auxquelles sont soudés les fils de connexion. Le tout est logé dans une pastille piézo-électrique circulaire ou rectangulaire. Pour limiter les vibrations vers l'arrière du palpeur et leur durée, la pastille piézoélectrique est placée sur un bloc amortisseur dense et très absorbant. L'ensemble de ces éléments liés à une bobine d'accord sont placés dans un boîtier métallique complété par un connecteur électrique et une face de protection de la pastille piézoélectrique réalisée dans des matériaux très variés (résine, carbures non métalliques, etc..) choisie en sorte qu'elle n'aura pas une influence sur l'énergie transmise.



4. Domaine d'applications :

1. Détermination des défauts internes :

- Défauts de soudage : porosité, manque de fusion, défaut de pénétration, inclusions de laitier, fissures sur les bords, fissures en racines ;
- Contrôle des pièces moulées ;
- Mesures d'épaisseurs ;
- Recherche des fissures sur les installations en service.

2. Contrôle de serrage :

- Mesure de l'allongement des vis et des goujons sous l'effet de la tension de serrage (mesure avant L1 et après serrage L2).
- L'onde ultrasonore réfléchie est influencée par l'allongement de la vis et de la diminution de la vitesse de propagation à cause de la tension du serrage et les deux sont liées à la tension :

$$T \text{ (daN)} = K \times \text{Allongement ultrasonores (ns)}$$

5. Avantages :

- Contrôle des défauts localisés dans le volume de la pièce (pleine) et avec une grande sensibilité dans la recherche des défauts plans ;
- Contrôle des défauts sur les métaux, plastiques, et matériaux divers ;
- Contrôles des épaisseurs ;
- Utile dans l'atelier ou dans le chantier et se prête bien à l'automatisation.

6. Inconvénients :

- La sensibilité de la méthode est liée fortement à la direction de la surface du défaut par rapport à la direction principale du faisceau acoustique transmis ;
- Nécessite d'interposer un milieu de couplage intermédiaire "un couplant" entre le transducteur et la pièce pour assurer la continuité de la propagation ;
- Une bonne expérience du personnel pour une bonne interprétation de la nature du défaut ;
- Certains matériaux et certaines géométries de la pièce présentent une difficulté de mise en œuvre et d'interprétation.

Mini-projet

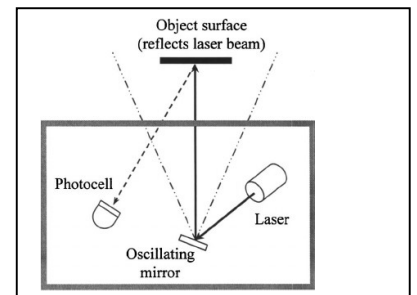
METHODES DE CONTROLE NON DESTRUCTIF – FICHE 1

Méthode :

Présentation et principe :

Procédure et technique

Matériel utilisé



Application

Avantages et inconvénients – Remarques importantes

Travail demandé et indications :

1. Il est demandé à chaque étudiant de préparer une fiche par chaque méthode (10 fiches maximum) dans un délai de 10 jours (3 semaines) à partir du 22 janvier 2023.
2. Le travail peut être préparé sur un format numérique ou format papier.
3. En format numérique, on doit suivre le format suivant du nom de fichier : MP_CND_nom_prénom.pdf
4. Pour toute information contacter hajomarcontact@gmail.com