

Chapitre IV : Contrôles non- destructifs

IV.1. Introduction

L'objectif des méthodes d'examen et de contrôle est de faire la distinction entre les méthodes d'essais destructifs et non destructifs et de décrire différentes méthodes d'essais non destructifs pour identifier les défauts.

Les méthodes d'examen non destructifs incluent les méthodes d'examen ainsi que les méthodes de contrôle. Le contrôle non destructif (CND) permet de vérifier la qualité du matériau (repérer les discontinuités dans une pièce) sans l'endommager, soit au cours de la production, soit au cours de la maintenance.

Toutes les soudures présentent des défauts. Les défauts ou les discontinuités dont la taille est trop importante sont appelés défauts inacceptables. En pratique, les défauts de petites tailles sont peu nombreux et n'affectent pas les performances de l'assemblage soudé.

IV.2. Les méthodes du CND

Les méthodes utilisées pour les contrôles non destructifs (CND) sont :

1. Le contrôle visuel.
2. Le contrôle par ressuage.
3. Le contrôle par magnétoscopie.
4. Le contrôle par radiographie : rayons X (RX) et gammagraphie (γ).
5. Le contrôle par courant de Foucault.
6. Le contrôle par ultrasons (US).
7. La détection par spectromètre de masse.
8. Les essais d'étanchéité à l'air ou au gaz.
9. La tomographie et neutrographie.

IV.3. Le ressuage

La technique est très ancienne et réside dans la simplicité de sa mise en œuvre. C'est une méthode globale qui autorise un examen de la totalité de la surface de la pièce. Elle

permet de bien apprécier la longueur des défauts indépendamment de leur orientation. On peut mettre en évidence des discontinuités débouchâtes de quelques dizaines de micromètres. Le contrôle par ressuage comporte trois étapes.

- ✓ La phase initiale consiste à nettoyer la surface de la pièce et d'appliquer un liquide pénétrant, soit par immersion, soit par pulvérisation. La durée d'application est variable selon le type de pénétrant, mais se situe en général entre 15 et 30 minutes. Le choix du liquide dépend essentiellement de la rugosité de la surface à contrôler. Le pénétrant peut être un produit coloré (faible sensibilité), un produit pré-émulsionné (sensibilité moyenne) ou un produit fluorescent (sensibilité élevée). Le pénétrant appliqué s'infiltré dans les petits interstices débouchant en surface, un certain temps est nécessaire pour laisser « poser » le pénétrant.
- ✓ La deuxième étape consiste à rincer la surface de la pièce pour enlever l'excès de pénétrant. Cette opération est délicate parce qu'un rinçage excessif ou insuffisant permet de fausser le résultat final.
- ✓ La troisième étape on applique un révélateur, liquide ou sous forme de poudre, sur la surface rincée, puis séchée. Le liquide (pénétrant) qui s'est introduit dans les fissures « ressort » à la surface dans le révélateur et s'élargit au niveau du défaut. Il devient nettement visible par un éclairage approprié qui dépend du pénétrant utilisé. La méthode ne donne aucune indication sur le volume et donc de l'importance des défauts.

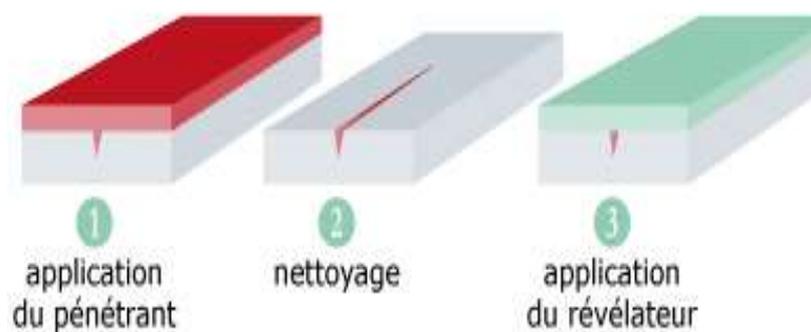


Figure IV-39 : Contrôle par ressuage.

IV.4. La magnétoscopie

C'est une méthode applicable seulement aux matériaux magnétiques pour la détection des défauts débouchant en surface ou proche à la surface. À l'instar du ressuage, la

magnétoscopie complète l'examen visuel. On a recours à la magnétoscopie lorsque le ressuage est insuffisant (les imperfections de surface restent peu visibles malgré tout le soin apporté). La pièce est aimantée localement ou totalement à une valeur proche de la saturation magnétique. En l'absence de défaut, les fuites dans l'air sont insignifiantes (la perméabilité du matériau étant beaucoup plus grande que celle de l'air). Toute discontinuité du matériau provoquera une diminution de la section de passage et donc une augmentation du champ d'induction magnétique (conservation du flux). Cette augmentation provoquera une fuite magnétique à la surface de la pièce. Des particules ferromagnétiques contenues dans un révélateur s'accroissent au droit du défaut. On observe le spectre résultant sous un éclairage adapté.

L'avantage réside dans la simplicité de sa mise en œuvre. On peut apprécier la longueur des défauts de surface et ceux légèrement sous-jacents ; il est possible d'automatiser le contrôle. Dans la pratique, on procède à l'aimantation des pièces suivant deux techniques principales : magnétisation par courant d'injection et par électro-aimant mobile. Les particules du produit révélateur doivent être suffisamment fines et légères pour circuler dans toute la pièce. Ainsi elles sont facilement attirées par les fuites magnétiques. Des poudres à base de produits fluorescents sont utilisées pour améliorer le contraste. Après examen le magnétisme résiduel peut causer des problèmes ultérieurs (soudage, usinage) ; il est recommandé de procéder à la démagnétisation de la pièce en la soumettant à un champ magnétique dont on diminue progressivement l'intensité et inversant à chaque fois son sens.

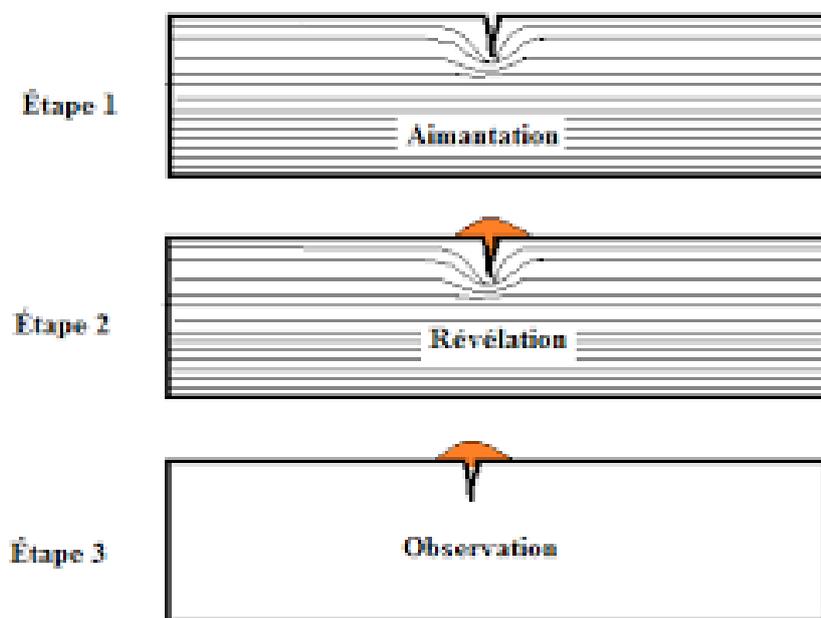


Figure IV-40 : Les étapes du contrôle de magnétoscopie.

IV.5. La radiographie

La radiographie industrielle permet l'examen interne des défauts d'un objet en lui faisant traverser un rayonnement électromagnétique de courte longueur d'onde (rayons X et γ) et recueillir les variations d'intensité du faisceau sous forme d'image, pour la plus part, sur un film. La quasi-totalité des matériaux peuvent être examinés en radiographie et les épaisseurs peuvent être importantes.

IV.5.1. Génération des RX

Les rayons X, mis en évidence Röntgen en 1895, sont créés en envoyant des électrons accélérés sur une cible en tungstène. On définit la longueur d'onde limite λ_L et la longueur d'onde maximale λ_m des rayons X qui sont reliés à la tension d'accélération des électrons V par les relations :

$$\lambda_L(nm) = \frac{1,24}{V(kV)}; \lambda_m \approx 1.5\lambda_L$$

Les rayons X ont des longueurs d'onde comprises entre 10^{-7} m et 10^{-12} m ; seuls les rayons X de longueur d'onde inférieure à $2.5 \cdot 10^{-10}$ m ont un pouvoir pénétrant suffisant pour être utilisés industriellement. Les rayons X sont absorbés par la matière, l'intensité du rayonnement subit un affaiblissement en fonction de l'épaisseur. En pratique, on considère la qualité d'un rayonnement X en fonction de la tension appliquée et de l'épaisseur de demi-absorption du matériau.

Épaisseur de demi-absorption (mm)				
Matériau	Aluminium	Fer	Cuivre	Plomb
Masse volumique ρ (g/cm^3)	2.7	7.86	8.9	11.34
Énergie du rayonnement				
20 keV	0.8	0.037	0.025	0.007
100 keV	15.1	2.5	1.8	0.15
200 keV	21.7	6.4	5.3	0.6
1 MeV	42	14.7	12.7	10
2 MeV	60	20.6	18	14

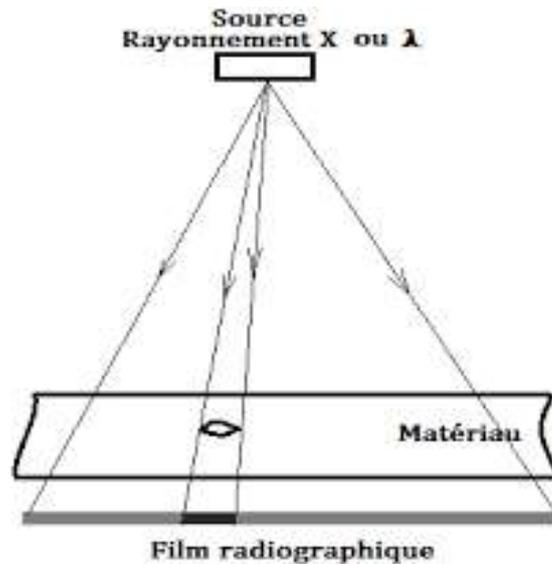


Figure IV-41 : Impression de l'image du défaut sur le film radiographique.

IV.5.2. Production des rayons γ .

Les rayonnements λ (gamma) sont créés par la désintégration spontanée des éléments radioactifs tels l'iridium 192 de période de 74 jours (ces éléments peuvent être naturels comme le radium 226 ou l'uranium 235). En pratique, la radiographie fait appel aux radioéléments artificiels mieux adaptés et peu coûteux. Les radio-isotopes sont obtenus par irradiation neutronique comme le cobalt 60 produisant un spectre de raies d'émission λ caractérisé par deux niveaux d'énergie proches respectivement de 1.17 et 1.33 MeV. L'émission décroît de façon exponentielle dans le temps. On définit la période du radioélément (sa durée de vie) comme le temps nécessaire à la désintégration de la moitié des noyaux atomiques actifs. Un facteur important est l'activité de la source radioactive, correspond au nombre d'atomes se transformant par unité de temps. Elle s'exprime en Becquerels (Bq), c'est le nombre de désintégrations par seconde et plus couramment en curies (Ci) sachant que :

$$1Ci = 37GBq$$

En gammagraphie, il n'est pas utile de disposer d'une alimentation en eau et en électricité. La source peut se positionner dans des tubes de petits diamètre et rayonne dans toutes les directions ; ce qui permet une radiographie panoramique d'une cuve. L'utilisation des rayonnements ionisants exige des locaux spéciaux et doivent être transportés conformément au règlement de transport visant les marchandises dangereuses et les matières radioactives.

Radioéléments utilisés en gammagraphie			
Éléments	Isotope	Période	Énergie (MeV)
Cobalt	⁶⁰ Co	5.3 ans	1.17 à 1.33
Iridium	¹⁹² Ir	74 jours	0.137 à 0.615
Césium	¹³⁷ Cs	30 ans	0.66

IV.6. Courant de Foucault

Lorsque l'on place un corps conducteur dans un champ magnétique variable dans le temps ou dans l'espace, des courants induits se développent à l'intérieur du matériau en circuit fermé. Une bobine parcourue par un courant alternatif, génère des courants induits qui créent eux-mêmes un flux magnétique. Ce flux magnétique, en s'opposant au flux générateur, modifie l'impédance de la bobine. La présence d'un défaut perturbe la circulation et la répartition des courants de Foucault. La variation de l'impédance décelable au niveau de la bobine d'excitation est utilisée pour détecter des défauts superficiels. En général, On utilise une méthode comparative qui consiste à mesurer la différence entre l'impédance Z de la bobine sur la pièce à étudier et l'impédance Z_0 d'une pièce de référence ne comportant pas de défaut. Cette procédure a donc recours à un étalonnage préalable. C'est ainsi que les courants de Foucault sont couramment utilisés pour la recherche de fissures de fatigue au cours de la maintenance en aéronautique des trous à l'emplacement des rivets.

L'intensité des courants de Foucault I est maximale à la surface de la pièce et diminue suivant une loi exponentielle. Dans le cas d'un solide massif à surface plane, elle s'écrit :

$$I = I_0 \exp - \delta \sqrt{\pi f \sigma \mu} \quad (\text{IV-11})$$

La profondeur standard de pénétration δ_c (m) pour laquelle l'intensité est diminuée de 0.37 ($\approx 1/e$), c'est-à-dire :

$$I = I_0 \exp - 1 = 0,37 I_0 \quad (\text{IV-12})$$

Ainsi δ_c vaut :

$$\delta_c = \frac{1}{\sqrt{\pi f \sigma \mu}} \quad (\text{IV-13})$$

f : fréquence en Hz ; δ_c : profondeur en mètre ; σ : conductivité électrique en $\Omega.m^{-1}$ et μ : perméabilité magnétique $H.m^{-1}$.

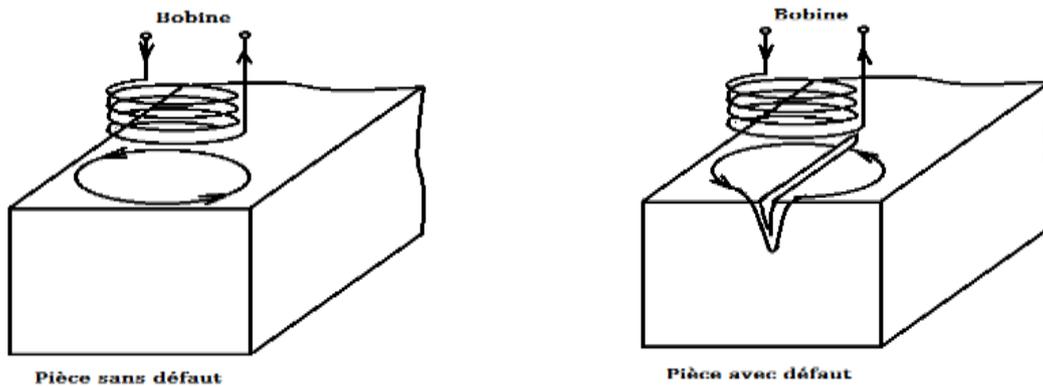


Figure IV-42 : Modification du trajet des courants de Foucault.

Dans le cas des matériaux amagnétiques tels que les alliages légers, alliages cuivreux, zinc), on a :

$\mu = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H.m}^{-1}$ et la profondeur standard s'écrit :

$$\delta_c = \frac{1503}{\sqrt{f\sigma}} \quad (\text{IV-14})$$

IV.6.1. Domaines d'application

IV.6.1.1. Contrôle des tubes, des barres et des fils

La technique de détection des défauts par courants de Foucault à l'aide de bobines encerclées se trouve très bien adaptée au contrôle industriel à grande cadence de tous les produits longs métalliques. Elle est très utilisée dans les industries métallurgiques où l'on détecte ainsi les défauts superficiels de nature variée sur des fils, les barres et les tubes de petits diamètres.

Une telle technique peut mettre en évidence, sur ces produits, non seulement des défauts de santé superficiels tels que les criques, les piqûres et les petites pailles mais aussi des défauts de géométrie tels que des variations brusques de diamètre ou d'épaisseur de paroi, des hétérogénéités de structure telles que des zones à gros grains, etc.

Le procédé à sonde encerclant devient toutefois insuffisamment sensible lorsque l'on veut contrôler des produits longs de gros diamètre ou lorsque l'on recherche de très petits défauts sur des produits bien calibrés et présentant un bon état de surface tels que les étirés et les tréfilés. On préfère dans ce cas utiliser les procédés dits à sondes tournantes, basés sur l'auscultation de la surface selon des pistes hélicoïdales : 2 ou 4 sondes pick-up tournent à grande vitesse autour du produit lui-même en défilement lent à l'intérieur du rotor de la machine. Les sondes sont constituées de petites bobines qui effleurent la surface du produit et

présentent ainsi une grande sensibilité aux fins défauts longitudinaux tels que les longues criques appelées lignes dont la profondeur peut être inférieure à 100 mm.

Le contrôle des tubes en service est une application importante du contrôle par courants de Foucault, étant donné l'importance de la maintenance des chaudières, des échangeurs et surtout des générateurs de vapeur des centrales nucléaires. On sonde ici les tubes par l'intérieur en utilisant un « furet » poussé et tiré par un câble et constitué par une ou des bobines longitudinales et concentriques au tube.

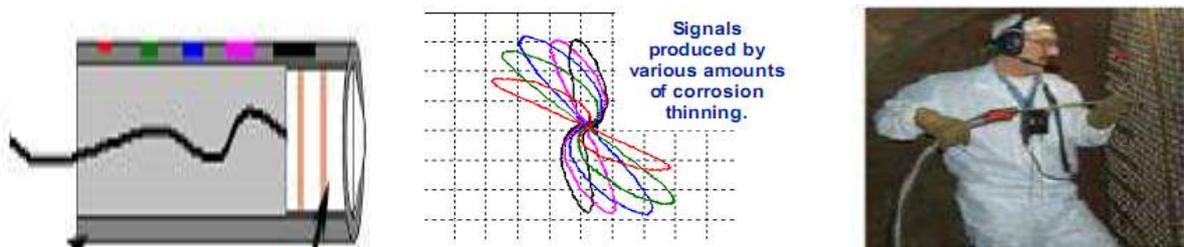


Figure IV-43: Evaluation des pertes du matériel en service.

IV.6.1.2. Contrôle des surfaces planes

Le contrôle des surfaces planes, en ce qui concerne la recherche de petites criques, fissures ou hétérogénéités locales, peut être réalisé à l'aide d'une sonde pick-up que l'on glisse avec ou sans contact. De très fins défauts peuvent être ainsi détectés sur tout produit conducteur, toutefois, le caractère ponctuel de la zone sensible oriente plus volontiers l'usage du procédé vers le contrôle de petites surfaces correspondant aux zones critiques dans la dégradation d'une pièce mécanique plutôt que vers l'examen de grandes surfaces comme les tôles.

C'est ainsi que les courants de Foucault sont couramment utilisés pour la recherche de fissures de fatigue au cours des opérations de maintenance du matériel aéronautique. Le contrôle peut être manuel ou automatique en utilisant un bras manipulateur pour déplacer la sonde et un système de traitement de l'information conduisant à une cartographie et à un archivage des résultats du contrôle.



Figure IV-44: Applications en aéronautique.

On trouve aussi quelques applications des courants de Foucault dans le domaine des mesures dimensionnelles, l'intérêt étant de disposer ainsi d'une méthode de mesure sans contact avec la pièce, ce qui n'est pas le cas en métrologie traditionnelle ou avec les procédés ultrasonores. On mesure ainsi des diamètres de tubes et l'on peut mettre en évidence des amincissements de parois.

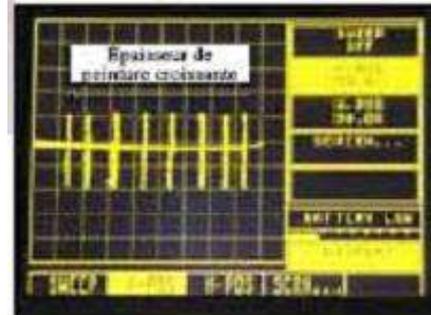


Figure IV-45: 8 différents épaisseurs de peinture sur un panneau d'aluminium (fuselage d'un avion).

Notons enfin que les procédés de détection par courants de Foucault sont utilisés en dehors de l'industrie dans des domaines très variés, dont le plus connu est celui de la détection d'objets métalliques dans un environnement isolant. Qu'il s'agisse des détecteurs de mines ou des appareils de sécurité dans les aéroports ou autres lieux publics, on base la détection sur l'emploi de bobines de grandes dimensions susceptibles de créer un champ suffisamment volumineux pour être perturbé à bonne distance par la présence d'un objet métallique dans lequel vont se développer les courants de Foucault.