

République Algérienne Démocratique et populaire
Ministère De l'enseignement Supérieur et de la recherche Scientifique

Université SAAD DAHLAB de Blida
Faculté des sciences de l'ingénieur
Département d'aéronautique

Mémoire de fin d'étude
En vue d'obtention du diplôme d'études universitaires
Appliquées en aéronautique (DEUA)

Spécialité : Propulsion

Thème :

Les méthodes de CND appliquées pour la détection des criques



Réaliser par :

M^r Salah Farouk

Promoteur :

M^r Bennoud. S

Promotion : 2008

Remerciements



Je remercie le bon dieu de m'avoir donnée le courage tout au long de l'élaboration de ce travail.

J'exprime mes profonds remerciements à mon promoteur M^R Bennoud. S pour l'aide compétente qu'il m'a apportée, pour sa patience et son encouragement à finir un travail commencé il y a longtemps. Son œil critique m'a été très précieux pour structurer le travail et pour améliorer la qualité des différentes sections.

J'adresse évidemment mes sincères remerciements à l'ensemble du jury et les enseignants qui m'ont suivi pendant le cursus universitaires.



Dédicace



Cette thèse est dédiée à ma famille, qui m'a toujours poussé et motivé dans mes études. Sans elle, je n'aurais certainement pas fait d'études longues.

Cette thèse représente donc l'aboutissement du soutien et des encouragements qu'elle m'a prodigués tout au long de ma scolarité.

Qu'elle en soit remerciée par cette trop modeste dédicace.

A tous mes amis et spécialement : Fouad.Lyes. Mouhamed B. Salime.

Karime. Hmed. Kader R. Chafik. Azize. Amine. Jigo. Sofiene.

Mourad. Farouk et tous ceux qui me connaît



Table des matières

Introduction	3
Chapitre I : généralités	6
1. introduction	7
2. définition du contrôle non destructif.....	7
3. évolution des besoins.....	9
4. les raisons d'évolution	10
5. principes généraux.....	11
6. définition des défauts	12
7. méthodes de contrôle non destructif.....	13
Chapitre II : Les différentes méthodes de contrôle	14
1/ Le contrôle par ressuage	16
1.1 Principe du contrôle par ressuage.....	16
1.2 Choix du produit de ressuage en fonction de la mise en œuvre.....	17
1.3 Choix du pénétrant de ressuage en fonction de la sensibilité.....	17
1.4 Méthode simple de mise en œuvre du contrôle par ressuage.....	18
1.5 Domaine d'application	20
1.6 Avantages du contrôle par ressuage	20
1.7 Inconvénients du contrôle par ressuage	21
2/ Contrôle par magnétoscopie	21
2.1 Principe du contrôle par magnétoscopie	21
2.2 Domaine d'application	22
2.3 Différentes méthodes d'aimantation.....	22
2.4 Avantages du contrôle par magnétoscopie	25
2.5 Inconvénients du contrôle par magnétoscopie.....	25

Table des matières

3/	Contrôle par Radiographie.....	26
3.1	Principe du contrôle radiographique ou gamma graphique.....	26
3.2	Domaine d'application.....	27
3.3	Les sources de rayonnements ionisants.....	27
3.4	Les différents types d'irradiation des tubes à rayons X.....	29
3.5	Avantages du contrôle par radiographie.....	29
3.6	Inconvénients du contrôle par radiographie.....	30
4/	Contrôle par ultrason.....	30
4.1	Principe de contrôle ultrason.....	30
4.2	Domaine d'application.....	31
4.3	Appareils utilisé	31
4.4	Caractéristiques.....	32
4.5	Performance remarquable dans un appareil compact.....	33
4.6	Avantages du contrôle par ultrasons.....	34
4.7	Inconvénients du contrôle par ultrasons.....	34
5/	le contrôle par le courant de Foucault	35
5.1	Principe de courant de Foucault.....	35
5.2	Application de courant de Foucault.....	36
5.3	Appareil de recherche des défauts par courants de Foucault.....	37
5.4	Caractéristiques techniques.....	38
5.5	Avantages de la méthode.....	39
5.6	Inconvénients de la méthode.....	39
6/	Contrôle par émission acoustique.....	40
6.1	Principe du contrôle par émission acoustique.....	40
6.2	Avantages du contrôle par émission acoustique.....	41
6.3	Inconvénients du contrôle par émission acoustique.....	42
7/	Contrôle par la méthode optiques.....	42
7.1	Avantages Méthodes optiques	44
7.2	Inconvénients Méthodes optiques.....	44

Table des matières

8/	Le contrôle par les méthodes couplées.....	44
1 /	Contrôle par ultrasons multiéléments.....	44
2/	Méthodes par acousto-ultrasons.....	45
3/	Thermographie infrarouge.....	45
	3.1 Principe de fonctionnement.....	46
4/	Méthodes vibrothermographie.....	46
	4.1 Avantages méthodes vibrothermographie.....	46
	4.2 Domaines d'application	47
Chapitre III :	Détection des criques.....	46
1/	Définition d'une crique.....	47
2/	Domaine d'application.....	48
	2.1. L'examen de la turbine.....	49
	2.2 L'examen de la chambre de combustion.....	51
3 /	Analyse.....	56
4 /	Faits établis quant aux risques.....	57
5 /	conclusion.....	58
	Conclusion général	

Table des figures :

CHAPITRE I : généralités

Figure 1 : évolution des besoins au CND.....9
Figure 2 : les principes des CND.....11

CHAPITRE II : les différentes méthodes de contrôle

Figure 1: Les différents produits utilisés dans le contrôle par ressuage.....16
Figure 2 : Une ligne de flux traversant une pièce.....21
Figure 3. Un électro-aimant utilisé au contact de la pièce à contrôler (circuit magnétique fermé)22
Figure 4: Le contrôle avec des spires qui sont enroulées sur la paroi d'une pièce annulaire (circuit magnétique fermé)23
Figure 5 : Le contrôle avec utilisation d'une bobine la pièce à contrôler considéré comme un noyau (circuit magnétique ouvert).....23
Figure 6 :. La pièce à contrôler est placée à l'intérieur du solénoïde et elle constitue le noyau (circuit magnétique ouvert).....24
Figure 7 : L'aimantation est réalisée par passage direct de courant dans la pièce à contrôler..24
Figure 8 : Un conducteur central traversé par un courant est placé au centre de la pièce annulaire à contrôler.....25
Figure 9: Le contrôle radiographique par rayonnements ionisants (X ou gamma) qui permet de détecter des défauts internes.....27
Figure 10 : Composition de tube radiogène.....29
Figure 11 : La déviation du champ de courant électrique sur les cotes du défaut (contrôle par le courant de Foucault)35
Figure 12 : La détermination de la profondeur et la longueur du défaut selon BX.BZ.....36
Figure 13 : Le principe et les étapes du Contrôle par émission acoustique.....41

Figure 14: Le contrôle optique qui mesure les déformations sur la surface d'une pièce.....43
Figure 15 : Défaut structurel par une modification de la signature du mode vibratoire.....52

CHAPITRE III : Détection des criques

Figure 1 : Le résultat d'une propagation d'une crique dans une turbine d'un réacteur53
Figure 2 : Une aube mobile brisée du deuxième étage de la turbine.....53
Figure 3 : Une crique dans une aube s'étant propagée à partir de multiples origines sur les surfaces convexes et concaves de l'aube, ce qui est le signe de charges cycliques en flexion inversée.....53
Figure 4 : Une vue optique d'une crique de fatigue.....54
Figure 5 : Une vue microscopique d'une crique de fatigue.....55
Figure 6 : Une crique de fatigue sous les rayons X.....56
Figure 7 : Une rupture du carter de chambre de combustion sur toute sa longueur et sur une partie de sa circonférence.....57

Introduction générale :

Dans les domaines industriels de pointe (aéronautique. Nucléaire.etc). L'évaluation de l'endommagement des matériaux est un point clé pour la maîtrise de la durabilité et de la fiabilité des pièces et matériaux en service. Dans cette perspective il est nécessaire non seulement de quantifier l'endommagement mais aussi d'identifier les différents mécanismes qui en sont responsables. Il est donc indispensable de bien caractériser les matériaux et définir les indicateurs les plus sensibles à la présence d'endommagement afin de prévenir leur ruine et à les utiliser de manière optimal.

Pour répondre à cette problématique Le contrôle non destructif (CND) a pour objectif de vérifier l'intégrité d'une pièce ou d'un matériau sans l'endommager en détectant d'éventuels défauts présents dans celui-ci. Les CND permettent de caractériser des matériaux.

Dans différents secteurs industriels (aéronautique, nucléaire,...) la nécessité de contrôler des pièces de plus en plus complexes tout en améliorant l'efficacité économique conduit à concevoir des méthodes adaptées de plus en plus évoluées. Un axe de recherche vise ainsi à développer des méthodes innovantes pour les contrôles complexes.

De manière générale, le contrôle non destructif (CND) représente une famille de techniques très spécialisées qui permettent d'acquérir des informations sur un objet ou un matériau sans les détruire et sans affecter leur utilisation future. Ces tests sont effectués au cours ou en fin de fabrication (vérification de la

Introduction général

conformité à des spécifications prédéfinies) ou bien encore tout au long de leur utilisation (suivi au cours du temps).

Les procédés de mesure qui sont les plus classiquement mis en œuvre font appel, en général, aux ultrasons, à la radiographie (rayons X, rayons gamma), aux infrarouges, aux courants de Foucault ou à des méthodes de ressuage.

Notre travail a pour but d'arriver aux suivants :

- Acquérir des connaissances techniques, scientifiques et pratiques de base concernant les champs magnétiques, électriques et électromagnétiques liées aux applications industrielles principalement les techniques magnétiques de CND.
- Appliquer une démarche scientifique intégrant les connaissances fondamentales de façon synthétique et pragmatique de façon à maîtriser la mise en œuvre de techniques de CND.
- Acquérir les connaissances scientifiques essentielles par des méthodes qui associent intimement les résultats de l'expérience de terrain et l'approche théorique résumée sous forme de mémoire.
- Faire le point sur les développements récents : contrôle magnétoscopique assisté par caméra, la magnétisation sans contact par champ magnétique tournant 2D et 3D, les techniques concurrentes et leur évolution prévisible : courants de Foucault, ondes ultrasonores guidées, magnéto-optique, vibro-thermographie...

Pour cela nous procédons comme suit :

Le premier chapitre est désigné à la présentation générale des CND

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation des différentes méthodes de contrôle non destructif des pièces en démontrant le principe de fonctionnement

Introduction général

et le domaine d'application à chacune d'elle on sachant que chaque méthode a son domaine d'application précis. Après avoir démontré le principe de fonctionnement en prend en compte les limites de chaque méthode (avantages. Inconvénients) .à la fin de ce chapitre on représente quelque nouvelles méthodes de contrôle les méthodes couplées. Dans le dernier chapitre on définit les criques de fatigue et leurs effets sur les structures ou elles se trouvent. Après on fait une petite étude sur les conséquences des criques de fatigue sur le A330 qui est équipé 2 réacteurs General Electric CF6-80E1A3 on utilisant les méthodes non destructives.

Introduction generale

Chapitre I: Généralités

1/ Introduction :

Les contrôles non destructifs (CND) sont nés de la nécessité devant laquelle se sont trouvés les Ingénieurs de devoir garantir la sécurité des personnes et des matériels. Ainsi, dans les industries de pointe telles l'industrie aéronautique et l'industrie nucléaire, se sont implantées des techniques sophistiquées pour « débusquer » dans le stade final de l'élaboration des produits, les dernières imperfections de la matière.

Aujourd'hui, on assiste à une demande très importante et généralisée, émanant de tous les secteurs industriels. La « qualité » est devenue une nécessité vitale pour les entreprises confrontées à la concurrence internationale et à une clientèle exigeante.

Devant cette réalité et à l'image des précurseurs que furent les Japonais, « l'assurance Qualité » s'est implantée dans les entreprises sous la forme d'une organisation visant à répertorier et à minimiser les facteurs de « non Qualité » : facteurs techniques, facteurs liés à la structure de l'entreprise, facteurs humains. Les CND étant un moyen d'évaluer un aspect de cette qualité, sont donc plus largement utilisés aujourd'hui, et voient ainsi leurs performances mises à l'épreuve d'une grande variété de problèmes.

2/ Définition du contrôle non destructif :

Le contrôle non destructif (CND) est un ensemble de méthodes qui permet de définir l'état d'intégrité de productions industrielles sans les dégrader :

- en cours de production (présence de défauts lors de la fabrication),
- en cours d'utilisation (apparition de défaut au fil du temps ou suite à un choc, par exemple). On parle aussi d'essais ou d'examens non destructifs.

Le contrôle non destructif est un atout majeur dans le cadre du contrôle de qualité car il permet de rechercher sans contact la présence de défauts dans les matériaux et d'en déterminer les caractéristiques : position, forme, dimension,...

Elles sont très utilisées dans l'industrie automobile (contrôle des blocs moteurs), l'industrie pétrolière (pipelines, tubes, barres, soudures, réservoirs), l'industrie navale (contrôle des coques), l'aéronautique (poutres, ailes d'avion, nombreuses pièces moteurs, trains d'atterrissage, etc.), l'aérospatiale et l'armée (dont la totalité des programmes sont confidentiels ou secret défense), l'industrie de l'énergie (réacteurs, chaudières, tuyauterie, turbines, etc.), le ferroviaire en fabrication et en maintenance notamment pour les organes de sécurité (essieux, roues.), autres (fabrication de mousquetons d'escalade, ouvrages d'art, etc.)

Les méthodes d'inspections non destructives typiques comprennent la radiographie (aux rayons X et aux rayons gamma), la magnétoscopie, les ultrasons (comme dans les hôpitaux), le ressuage, les courants de Foucault,

les épreuves d'étanchéité, les émissions acoustiques, l'examen visuel, la thermographie infrarouge et les méthodes couplés.

3/ Évolution des besoins :

La demande actuelle en CND est couverte le plus souvent en ayant recours aux techniques éprouvées et bien maîtrisées. L'augmentation quantitative des pièces à contrôler nécessite la conception de machines spéciales automatisées et de grande productivité.

L'analyse du marché montre une progression importante de certains secteurs.

L'industrie nationale est relativement peu importante et ne couvre que 40 % du marché Français. Les Allemands et les Américains sont les mieux représentés (Kramer, Forster, Endvco, Automation.).

	Progression annuelle prévue du marché (%)
Radioscopie télévisée	10
Ultrasons	15
Émission acoustique	40

Fig. 1 : évolution des besoins en CND

Parallèlement à cette évolution de la demande, qui correspond à la pénétration des CND dans des entreprises qui ne les pratiquaient pas, existe une évolution plus technique et scientifique ayant pour motivation une amélioration des performances. Cette demande est le fait des utilisateurs de l'Aéronautique et du Nucléaire qui sont confrontés en permanence à de nouveaux problèmes. Ces nouveaux problèmes ont un nom : « les matériaux nouveaux».

4 / Les raisons d'évolutions :

Les techniques de contrôle non destructif ont pris de plus en plus d'essor ces dernières années. Deux raisons à cela :

- L'évolution technologique qui a permis aux constructeurs de matériels de concevoir et fabriquer des appareils fiables permettant d'obtenir des diagnostics sur l'état d'une structure en se basant sur des contraintes physiques (pression, température, onde électromagnétique, ...)
- La possibilité d'obtenir un diagnostic sans devoir détruire des pièces d'épreuves est la grande évolution de ce type de contrôle. En effet, contrairement aux techniques de contrôles destructives où l'on réalise des éprouvettes devant être détruites pour permettre d'obtenir les caractéristiques mécaniques de la pièce, les techniques de contrôle non destructives ont permis d'obtenir les mêmes résultats sans devoir détruire des pièces d'épreuve. De plus, elles permettent de se constituer un historique de l'évolution des pièces au cours du temps (vitesse de propagation de fissures, de vieillissement, ...)

5/ Principes généraux :

Quelle que soit la méthode adoptée, on peut représenter la mise en œuvre d'un système CND suivant le synoptique suivant :

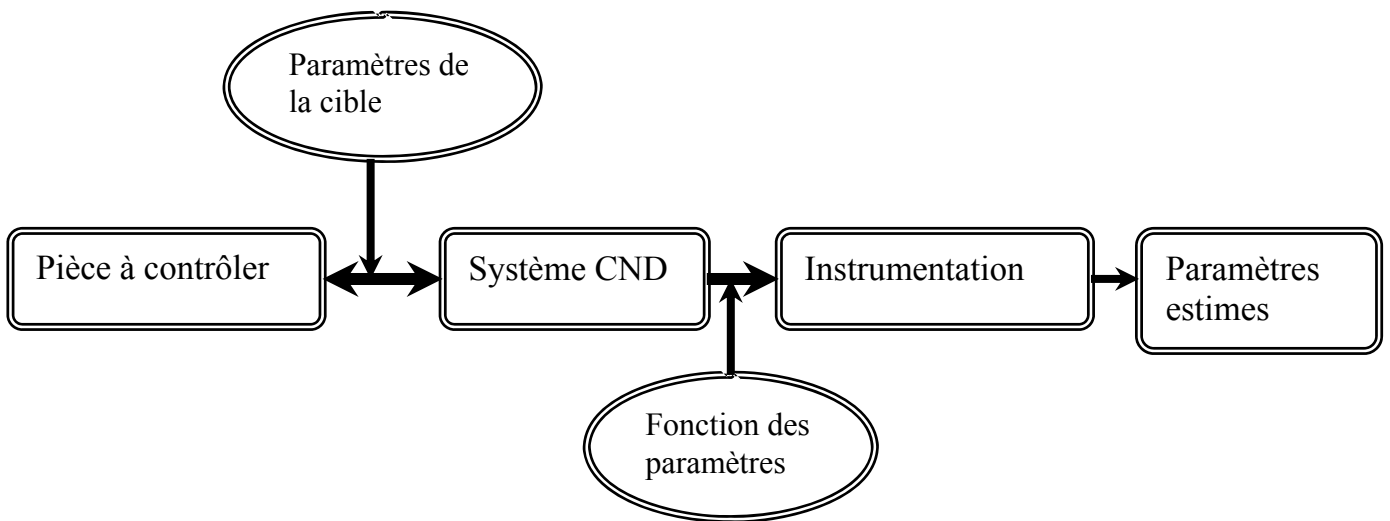


Fig. 2 : la mise en œuvre d'un système CND

La cible se caractérise par un ensemble de paramètres que l'on va chercher à estimer afin de former un diagnostic d'intégrité. La mise en œuvre d'un système CND adéquat va permettre de produire un certain nombre de signaux qui sont fonction des paramètres recherchés. Une étape « d'inversion », plus ou moins compliquée, est bien souvent nécessaire afin de retrouver les paramètres initiaux de la pièce.

6/ Définition des défauts :

Sous la dénomination « nouveaux matériaux », on considère une grande variété de produits qui sont :

- les composites aux multiples combinaisons de fibres et de matrices;
- les céramiques thermomécaniques à hautes caractéristiques;
- les superalliages à solidification orientée ou élaboré par la métallurgie des poudres ;
- les alliages de titane (TA6V, TA6Zr5D) et les nouveaux alliages pour turbines (IMI 679. ..) .

Chacun de ces matériaux pose un problème de contrôle, spécifique, dont la complexité peut évoluer suivant, les épaisseurs concernées, la géométrie des pièces et leurs modes d'élaboration.

S'il faut contrôler la santé du matériau de base, il est nécessaire de s'intéresser aussi à celle des assemblages.

7/ MÉTHODES DE CONTROLE NON DESTRUCTIF :

Les méthodes de contrôle non destructif utilisées couramment sont :

- **Le contrôle visuel** : qui ne doit pas être oublié est généralement pratiqué par le soudeur lui-même : linéarité et régularité du cordon de soudure, absence de surépaisseur ou de criques, de caniveaux (manque de fusion du métal sur les bords de la soudure), bonne pénétration du métal d'apport, etc....).

- **Le ressuage** : utilisable pour la recherche de micro défauts en surface non visibles à l'oeil nu de tous métaux non poreux.

Après nettoyage et dégraissage de la surface à contrôler, un produit est appliqué au pinceau, par pulvérisation ou immersion et va s'infiltrer dans les criques. Ce produit contient soit un traceur rouge visible en lumière naturelle, soit un traceur fluorescent pour examen en lumière ultraviolette.

- **Le contrôle par magnétoscopie** : qui permet de déceler des défauts affleurant la surface mais est uniquement utilisable pour des matériaux ferromagnétiques. Sous l'action d'un champ magnétique, les particules magnétiques en suspension dans un liquide s'accumulent au droit des défauts.

- **Le contrôle par ultrasons** : qui permet la recherche des défauts situés de quelques millimètres à plusieurs mètres de profondeur et qui utilise la technique de "l'impulsion écho" avec une fréquence du transmetteur de 0,5 à 15 MHz.

- **Le contrôle d'étanchéité** : qui permet de déceler les fuites dues à des défauts de dimensions microscopiques par mise sous pression ou en dépression du conteneur à contrôler au moyen d'un gaz (hexafluorure de soufre, hélium, ammoniac, etc....) ou d'un liquide.
- **Le contrôle radioscopique** : qui met en oeuvre une source de rayonnements ionisants et qui reste la méthode la plus utilisée, elle permet de détecter des défauts interne de compacité souvent très fin.
- **Le contrôle par courant de Foucault** : s'effectue en créant un champ magnétique dans une bobine que l'on va déplacer à la surface d'une pièce métallique. Toute perturbation, par un défaut, des lignes de courant, des courants induits dans la pièce, va se traduire par une modification du coefficient de self induction, qui sera détectée.
En jouant sur la fréquence du courant exciteur et la géométrie des bobines, il est possible de contrôler jusqu'à quelques millimètres sous la surface.
- **Émission acoustique** : c'est une méthode qui permet de vérifier efficacement la fiabilité et l'état de santé des installations tout en réduisant les coûts de maintenance.
- **Les méthodes couplées** : récemment, des méthodes couplées ont vu le jour, et pour certaines sont encore dans le domaine de la recherche : les méthodes de vibrothermographie, acousto-ultrasons, magnéto-optiques.

Chapitre II:

Les différentes méthodes de contrôle

Les différentes méthodes de contrôle

1/ Le contrôle par ressuage

1.1- Principe du contrôle par ressuage :

Le contrôle par ressuage permet de détecter des défauts de compacité, parfois très fins, débouchant en surface et non obstrués (fissures, porosités, tapures, replis, manque de liaison) sur des matériaux métalliques non poreux et non absorbants. Après un nettoyage soigné de la surface à contrôler, le contrôle est réalisé à l'aide de produits (les pénétrants) à très faible tension superficielle qui pénètrent par capillarité dans les défauts débouchant en surface.



Fig. 1 : Les produits utilisés pour le contrôle.

Après élimination de l'excès de pénétrant sur la surface des pièces par lavage et séchage, l'apparition visuelle des défauts est réalisée par l'application d'un révélateur en une fine couche de poudre constituée de microscopiques tubes capillaires qui pompent le pénétrant retenu dans les discontinuités des défauts.

1.2- Choix du produit de ressuage en fonction de la mise en œuvre :

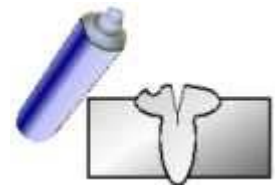
- Pénétrant pré émulsionné : lavable à l'eau - Facile d'emploi. Pénétrant post-émulsionné : lavable à l'eau après émulsification (émulsifiant hydrophile ou lipophile) - Difficile d'emploi.
- Révélateur à support volatil : bombe aérosol - Facile d'emploi.
- Révélateur sec : application par brouillard ou pulvérisation.
- Révélateur en suspension aqueuse : application sur pièce humide
- Révélateur pelable : application en gel tixotropique pour archive des résultats.

1.3 Choix du pénétrant de ressuage en fonction de la sensibilité :

- Sensibilité moyenne : Pénétrant coloré pré émulsionné - Dimension des défauts de l'ordre de 0,3 mm.
- Haute sensibilité : Pénétrant fluorescent pré émulsionné - Dimension des défauts de l'ordre de 0,1 mm.
- Très haute sensibilité : Pénétrant fluorescent post-émulsionné - Dimension des défauts détectables inférieure à 0,1 mm

1.4 Méthode simple de mise en oeuvre du contrôle par ressuage :

- ✚ Nettoyage rigoureux et efficace avec brosse métallique pour éliminer toute trace de rouille ou calamine puis dégraissage soigné avec solvant volatil non chloré de la surface de la pièce à contrôler. Vérification du séchage complet de la pièce à contrôler. La pièce doit avoir une température supérieure à 10° Celsius.



- ✚ Application par pulvérisation (ou application au pinceau de soie) du liquide pénétrant (pré ou post émulsionné) coloré, fluorescent ou mixte sur toute la surface à examiner



- ✚ Temps d'imprégnation (de 15 à 40 minutes selon la température et la procédure applicable) du pénétrant par capillarité dans les défauts débouchants.



- ✚ Application d'un émulateur lipophile (à base d'huile) uniquement lors de l'utilisation d'un pénétrant post émulsionné avec émulateur lipophile



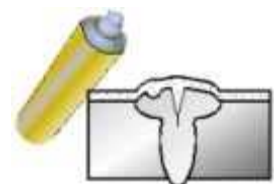
- ✚ Élimination de l'excès de pénétrant sur la surface de la pièce à contrôler par rinçage à l'eau sous une pression inférieure à 2 bar ou par solvant spécial imbibé sur un chiffon non pelucheux. Vérification de l'élimination complète de l'excès de pénétrant et vérification du séchage complet de la pièce à contrôler.



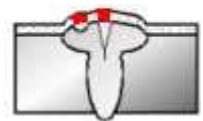
- ✚ Application d'un émulateur hydrophile (à diluer dans l'eau) uniquement lors de l'utilisation d'un pénétrant post émulsionné avec émulateur hydrophile. Immédiatement après l'élimination de l'excès de pénétrant, application



- ✚ par pulvérisation du révélateur à sec ou en suspension dans un solvant volatil en une couche mince et uniforme. Le révélateur pompe le pénétrant resté dans les discontinuités des défauts débouchants. Des taches colorées apparaissent à l'endroit des défauts.



- ✚ Interprétation du ressuage dans un délai de 7 à 30 minutes après application du révélateur sous un éclairage de 500 lux minimum à la surface de la pièce pour les pénétrants colorée ou mixte. Interprétation sous éclairage ultraviolet avec lampe de Wood (800 à 1500 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ requis à la surface de la pièce) pour les pénétrants fluorescents et mixtes dans une pièce sombre



1.5 Domaine d'application :

- ❖ Recherche des défauts alignés, Continus ou discontinus de surface ou des couches superficielles
- ❖ Contrôler l'étanchéité

1.6 Avantages du contrôle par ressuage :

- Facilité de mise en oeuvre avec les produits pré émulsionnés
- Facilité de mise en oeuvre sur les chantiers avec les produits pré-émulsionnés
- Bonne sensibilité de détection des défauts débouchants
- Contrôle relativement économique et rapide
- Contrôle complémentaire aux autres techniques de contrôles

1.7 Inconvénients du contrôle par ressuage :

- Impossibilité de révéler les défauts internes et obstrués
- Impossibilité d'évaluer la profondeur des défauts
- Impossibilité de contrôler les matériaux poreux
- Nettoyage et dégraissage rigoureux des pièces avant le contrôle
- Les opérateurs doivent être expérimentés pour certaines techniques
- Produits inflammables, volatiles et nocifs
- Gestion des déchets liquides rejetés à l'égout

2 / Contrôle par magnétoscopie:

2.1 Principe du contrôle par magnétoscopie :

Le contrôle magnétoscopique permet de détecter des défauts débouchants (obstrués ou non) et sous-jacents (de 1 à 2 mm environ) sous la surface des matériaux métalliques ferromagnétiques (les aciers inoxydables, les alliages de cuivre et les alliages d'aluminium sont exclus de cette application). Un champ magnétique important ($> 2400 \text{ A / m}$) traverse la pièce à contrôler jusqu'à saturation magnétique avec l'application simultanée en surface d'une liqueur magnétique colorée ou fluorescente constituée de traceurs comme produit indicateur



Fig.2 : Une ligne de flux traversant une pièce

En présence d'un défaut plan ou volumique, les lignes de force du champ sont déviées et accumulent la poudre magnétique au droit du défaut pour le rendre visible à l'œil nu. La perpendicularité du défaut par rapport aux lignes du champ magnétique accentue la sensibilité de détection du contrôle.

2.2 Domaine d'application :

Cette méthode est utilisée pour la recherche des défauts alignés, continus ou discontinus de surface ou des couches superficielles.

2.3 Différentes méthodes d'aimantation :

Deux méthodes de magnétisation sont possibles :

a- Aimantation longitudinale par passage d'un champ magnétique :

Par circuit magnétique fermé :

Un électro-aimant fixe ou portable à pièces polaires fixes ou articulées est utilisé au contact de la pièce à contrôler. L'aimantation est longitudinale et l'induction B est parallèle à l'axe Nord-sud des pôles et à la direction de l'examen. Des défauts transversaux sont détectés.

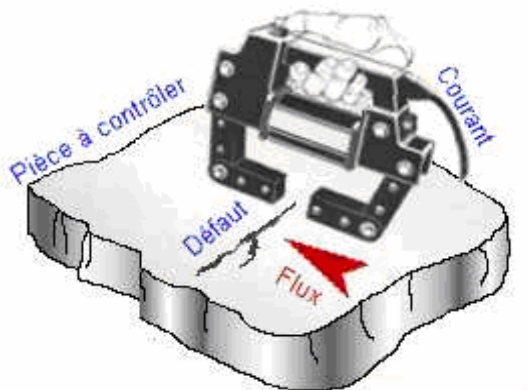


Fig.3 : Un électro-aimant utilisé au contact de la pièce

Des spires sont enroulées sur la paroi de la pièce annulaire à contrôler.
L'aimantation est longitudinale et l'induction B est parallèle à la direction de l'examen. Des défauts transversaux sont détectés.

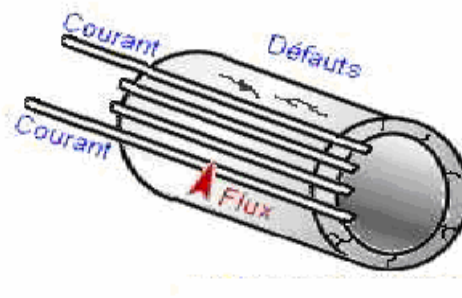


Fig. 4 : Le contrôle avec des spires qui sont enroulées sur la paroi d'une pièce annulaire.

Par circuit magnétique ouvert :

Une bobine fixe ou mobile est utilisée. La pièce à contrôler est placée au centre de cette bobine et forme le noyau. L'aimantation est longitudinale et l'induction B est parallèle à la direction de l'examen. Des défauts transversaux sont détectés

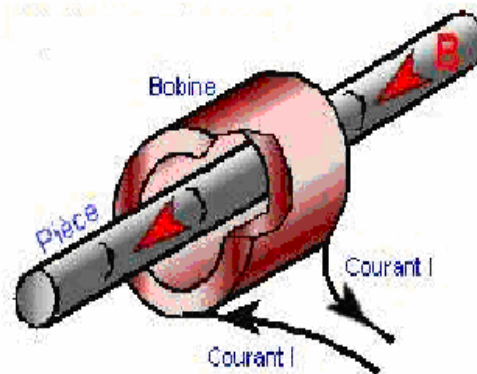


Fig. 5 : Le contrôle avec utilisation d'une bobine la pièce à contrôler considéré comme un noyau

Un solénoïde est utilisé et traversé par un courant électrique. La pièce à contrôler est placée à l'intérieur du solénoïde et elle constitue le noyau. L'aimantation est longitudinale et l'induction B est parallèle à la direction de l'examen. Des défauts transversaux sont détectés.

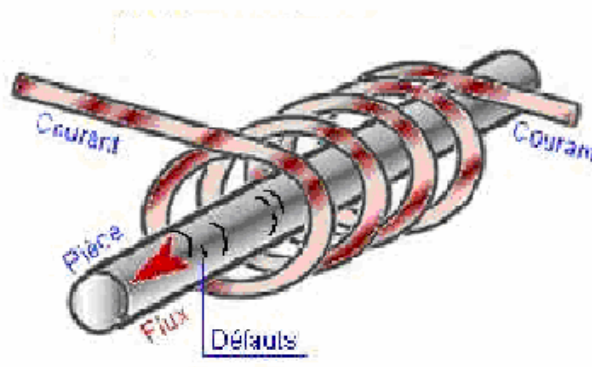


Fig.6 : La pièce à contrôler est placée à l'intérieur du solénoïde et elle constitue le noyau

b- Aimantation transversale par passage de courant électrique :

L'aimantation est réalisée par passage direct de courant dans la pièce à contrôler soit avec un appareil fixe ou banc d'aimantation, soit avec un système à deux électrodes (contrôle à la touche). L'aimantation est transversale et l'induction B est perpendiculaire à la direction de l'examen. Des défauts transversaux sont détectés.

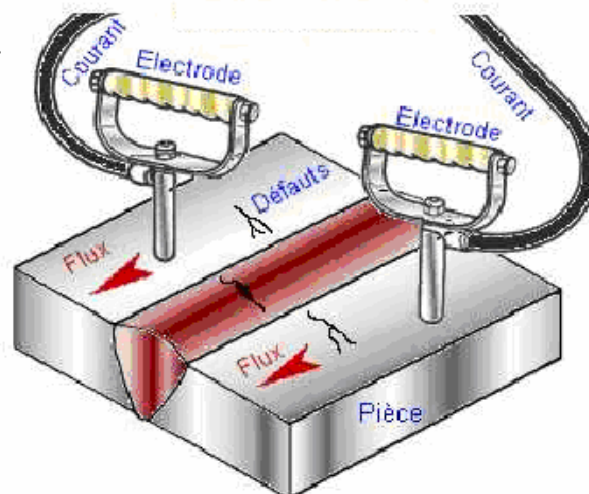


Fig. 7 : L'aimantation est réalisée par passage direct de courant dans la pièce à contrôler

Un conducteur central traversé par un courant est placé au centre de la pièce annulaire à contrôler. L'aimantation est transversale et l'induction B est perpendiculaire à la direction de l'examen. Des défauts transversaux sont détectés.

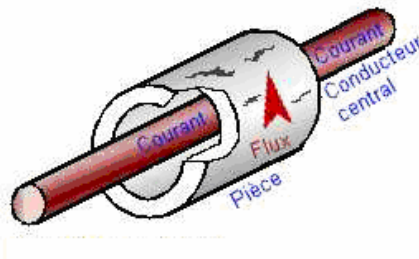


Fig.8 : Un conducteur central traversé par un courant est placé au centre de la pièce annulaire à contrôler

2.4- Avantages du contrôle par magnétoscopie :

- Méthode de mise en oeuvre plus rapide que le contrôle par ressuage
- Facilité de détection des défauts débouchants et sous-jacents (à 2 mm maxi).
- Les défauts peuvent être matés ou obstrués.
- Rapidité relative d'obtention des résultats.
- Bonne sensibilité de détection des défauts perpendiculaires au champ.

2.5 -Inconvénients du contrôle par magnétoscopie :

- Méthode de contrôle exclusivement réservée aux matériaux ferromagnétiques.
- Impossibilité de détecter des défauts en profondeur (> 2 mm de profondeur).
- Les opérateurs doivent être formés et expérimentés
- Risque d'interprétation d'images fallacieuses (sur filetage de vis par exemple)

- Risque électrique par passage direct de courant.
- Risque de micro fissuration sur certains aciers sensibles.
- Démagnétisation obligatoire après contrôle.
- Limitation du contrôle pour les grandes dimensions de pièces.
- Méthode de contrôle très salissante pour les opérateurs (produit pétrolier à base d'huile légère)

3/ Contrôle par Radiographie :

3.1 - Principe du contrôle radiographique ou gamma graphique :

Le contrôle radiographique par rayonnements ionisants (X ou gamma) permet de détecter des défauts internes de compacité souvent très fins (fissures, soufflures, inclusions, manque de liaison, manque de fusion) dans les parois des matériaux métalliques. Ce contrôle est réalisé à l'aide d'un tube générateur à rayons X ou d'une source radioactive gamma qui émettent des rayonnements ionisants, de films radiographiques ou d'une caméra pour l'acquisition numérique de l'image transmise placés sur la face inverse au rayonnement. Les rayons électromagnétiques de faible longueur d'onde sont partiellement absorbés par les hétérogénéités du milieu en traversant la paroi du matériau irradié.

Le faisceau impressionne le film radiosensible en fonction des rayonnements transmis à travers la pièce contrôlée pour donner naissance à l'image radiographique. La présence d'un défaut se traduit par une variation de l'absorption du rayonnement émis et donc à une variation de la densité optique du film au droit de l'image du défaut.

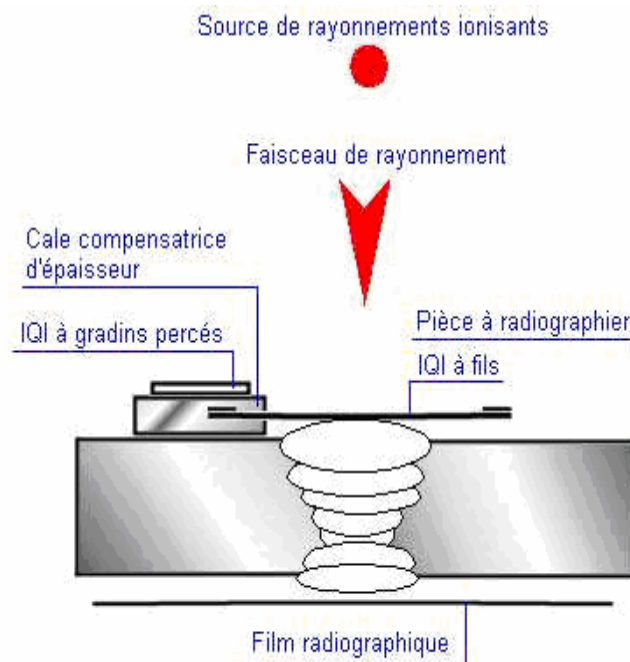


Fig. 9 : Le contrôle radiographique par rayonnements ionisants (X ou gamma) qui permet de détecter des défauts internes

3.2- Domaine d'application :

Cette méthode est utilisée pour la détection des défauts internes et manque de compacité

3.3- Les sources de rayonnements ionisants :

Le tube à rayons X :

Le tube radiogène ou tube de Coolidge est un tube en verre dans lequel règne un vide poussé. Il est alimenté en courant électrique et émet des électrons par échauffement d'un filament incandescent de tungstène de la cathode

(potentiel négatif). Ce faisceau d'électrons est attiré par la différence de potentiel (plusieurs milliers de volts) vers la cible de l'anode ou anti-cathode (potentiel positif). L'impact des électrons sur la cible ou foyer électronique ou foyer thermique génère 99% de chaleur et 1% de rayons X. L'émission du rayonnement X résulte de la brusque décélération des électrons sur la cible métallique.

- La qualité du rayonnement est déterminée par la tension d'accélération en kV.
- La quantité de rayonnement est définie par l'intensité du courant en mA.

Plus le rayonnement est pénétrant (faible longueur d'onde), moins le contraste est élevé.

Les alimentations électriques des générateurs à rayons X sont de plusieurs types :

Auto redressé sous tension alternative (la plus courante)

Circuit VILLARD

Circuit GRAETZ

Circuit GREINACHER

Circuit à une diode

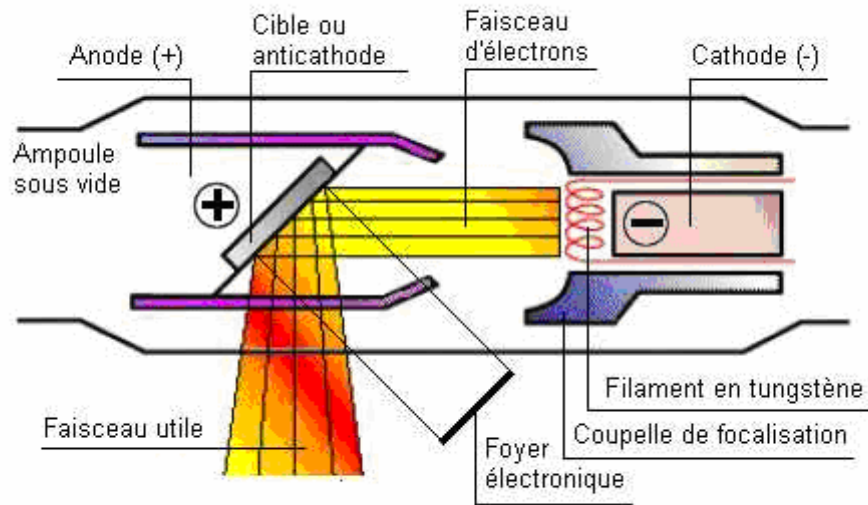


Fig. 10 : Composition de tube radiogène

3.4 Les différents types d'irradiation des tubes à rayons X :

- Irradiation directionnelle
- Irradiation panoramique orthogonale
- Irradiation panoramique non orthogonale
- Irradiation panoramique à anode longue

3.5 Avantages du contrôle par radiographie :

- Facilité de détection des défauts internes des pièces.
- Rapidité relative d'obtention des résultats (de l'ordre de 15 minutes).
- Bonne sensibilité de détection des défauts.
- Traçabilité et archivage des résultats

3.6 Inconvénients du contrôle par radiographie :

- Investissement important
- Limitation du contrôle par les épaisseurs et par le matériel utilisé.
- Les opérateurs doivent être très expérimentés
- Les règles de sécurité sont rigoureuses et contraignantes
- Mise en oeuvre délicate sur chantier avec tube à rayons X

4/ Contrôle par ultrason :**4.1 Principe de contrôle par ultrason :**

Le contrôle par ultrasons est basé sur la transmission, la réflexion et l'absorption d'une onde ultrasonore se propageant dans la pièce à contrôler. Le train d'onde émis se réfléchit dans le fond de la pièce et sur les défauts puis revient vers le transducteur (qui joue souvent le rôle d'émetteur et de récepteur). L'interprétation des signaux permet de positionner le défaut. Cette méthode présente une résolution spatiale élevée et la possibilité de trouver des défauts en profondeur. L'étape d'inversion est simple, du moins pour les pièces géométriquement et matériellement simples. Par contre, c'est une méthode lente car il faut faire 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.

4.2- Domaine d'application :

Cette méthode est utilisée pour la recherche des défauts internes et le contrôle de la forme du graphite sphéroïdal.

Le contrôle par ultrasons fait appel à des ondes sonores de haute fréquence composites, de la céramique, du caoutchouc et du verre. Les appareils à ultrasons émettent des fréquences au-delà de ce que l'oreille humaine peut percevoir, en courtes rafales d'énergie sonore dans la pièce soumise au contrôle, puis ils recueillent et analysent les formes d'ondes réfléchies ou transmises pour les convertir en résultats

4.3 Appareils utilisés :



L'appareil de recherche de défauts numérique EPOCH LTC de haute technologie est présenté dans un boîtier compact et pèse seulement 0,96 kg. Basé sur la conception de l'EPOCH XT, l'EPOCH LTC est un appareil conforme à la norme EN12668-1 qui offre un choix complet de fonctions standard, ainsi que des options spécialisées pour répondre aux exigences de vos inspections. L'appareil est équipé d'un écran transflectif lumineux en couleurs, entièrement VGA (640 x 480), qui offre un A-scan à haute résolution et une bonne visibilité sous tous les éclairages, y compris au soleil direct. L'EPOCH LTC est aussi conçu pour être conforme à la norme IP67, ce qui assure un bon fonctionnement de l'appareil dans les conditions de travail difficiles, fréquentes sur les chantiers de CND.

4.4 Caractéristiques :

- Boîtier scellé, conforme à la norme IP67 pour assurer la résistance sur le terrain
- Conformité à la norme EN12668-1
- Poids de seulement 0,96 kg
- Écran VGA transflectif en couleurs
- Port USB instantané pour échange avec un PC et impression directe
- Stockage sur carte de mémoire flash miniature et stockage intégré avec enregistreur de données alphanumérique standard
- DAC/TVG dynamique standard
- Récepteur numérique à haute dynamique avec filtres numériques
- Émetteur carré réglable de haute performance

4.5 Performance remarquable dans un appareil compact :

L'appareil de recherche de défauts EPOCH LTC est doté de nombreuses fonctions standard qui lui permettent de répondre aux besoins d'inspection. Parmi ces fonctions on trouve un émetteur d'ondes carrées, les courbes DAC/TVG dynamiques, les filtres numériques réglables, une gamme de gains de 0 dB à 110 dB, une image de référence, une résolution de mesure de 0,01 mm et une porte dotée d'alarmes programmables. De plus, l'appareil offre, en option, plusieurs fonctions spécifiques aux applications : option embarquée de diagramme AVG, contrôle PRF manuel, ajustement de la largeur d'impulsion, PORTE 2, correction de la surface courbe et le logiciel GageView Pro pour un contrôle et une performance améliorés.

- Émetteur d'ondes carrées standard avec la technologie PerfectSquare™
- Filtre de réception standard : réglage pour bande large et passe-haut
- Quatre affichages de mesure entièrement personnalisables pour répondre aux exigences d'inspection. On choisit parmi les mesures de porte pour chaque zone d'affichage.
- Résolution de la mesure de l'amplitude jusqu'à 0,25 % de la pleine hauteur de l'écran
- Auto-étalonnage pour l'épaisseur, le parcours ultrasonore et la profondeur d'angle
- Mesure de l'amplitude de 0 % à 110 % de la pleine hauteur de l'écran

- Fréquence de récurrence contrôlée automatiquement de 10 Hz à 500 Hz. Le contrôle manuel est en option.
- Modes d'affichage des grilles :
 - Standard de 1 à 10
 - Parcours ultrasonore
 - Mode demi-bond pour l'inspection angulaire
 - Affichage vertical réglable de 100 % ou 110 %

4.6 Avantages du contrôle par ultrasons :

- Méthode très sensible à la détection des défauts plans correctement orientés
- Détection précise des défauts dans l'épaisseur de la pièce
- Accès sur une seule face pour contrôler la totalité du volume
- Souplesse d'utilisation sur les chantiers
- Automatisation possible du procédé
- Numérisation et traçabilité possible avec un traitement d'images

4.7 Inconvénients du contrôle par ultrasons :

- Utilisation obligatoire d'un couplant (eau, gel) entre le palpeur et la pièce
- Difficulté de mise en oeuvre sur faibles épaisseurs
- Mise en oeuvre délicate sur matériau à structure métallurgique hétérogène (gros grains, fonte, moulé, centrifugé)
- Zone morte ou aveugle en surface de contact du palpeur
- Sensibilité de détection liée à l'orientation du défaut vis à vis de la propagation des ondes acoustiques
- Les opérateurs doivent être qualifiés et très expérimentés

5/ le contrôle par le courant de Foucault :

5.1 Principe de courant de Foucault

Le Contrôle par le courant de Foucault est une technique de détection de défauts (comme les fissures) basée sur la mesure d'un champ magnétique en surface induit par un courant uniforme.

Elle utilise la mesure des distorsions du champ magnétique à l'aide de capteurs pour détecter et dimensionner les fissures en longueur et en profondeur.

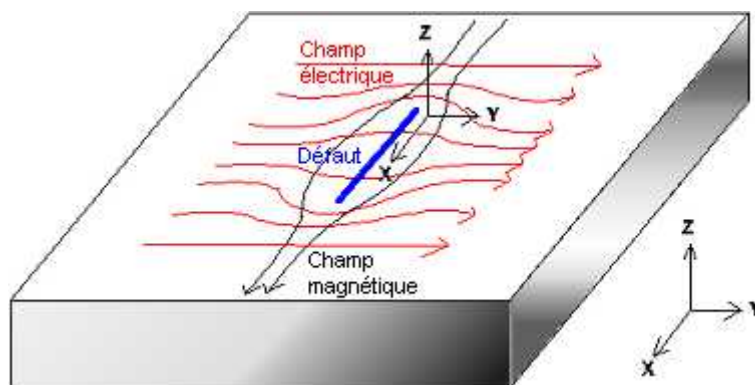


Fig. 11 : La déviation du champ de courant électrique sur les cotés du défaut

Le champ de courant électrique va se comporter de la manière suivante au alentour du défaut.

Il sera dévié sur les côtés du défaut générant une rotation des lignes de courant qui induit un champ magnétique dans la direction Z (signal BZ)

Au centre du défaut, les lignes de courant seront déviées en dessous ce qui va réduire la concentration de champ magnétique dans la direction X en surface de la pièce (signal BX).

- BX est utilisée pour estimer la profondeur du défaut.
- BZ est utilisée pour estimer la longueur du défaut.

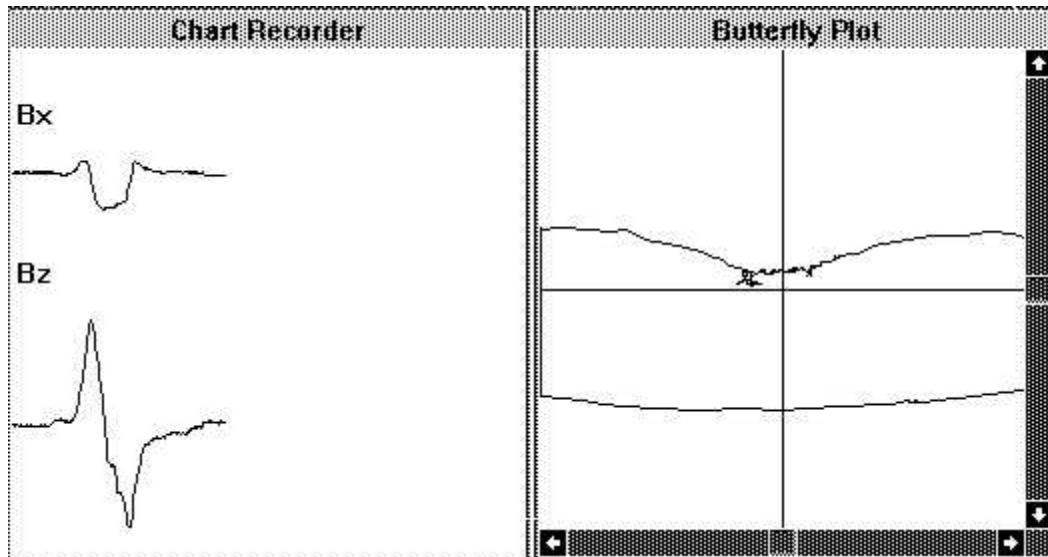


Fig.12 : La détermination de la profondeur et la longueur du défaut selon BX.BZ

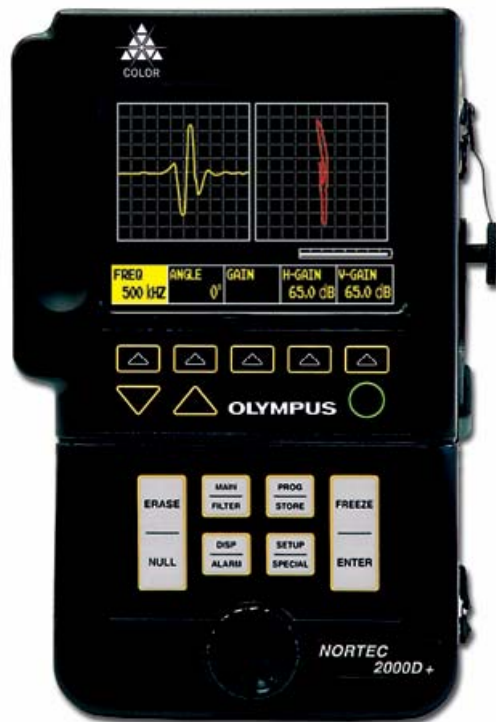
5.2 Application du courant de Foucault :

Cette technique permet de détecter des défauts plans débouchants en surface de type fissure et de les dimensionner.

Elle est utilisable sur tous les matériaux métalliques (acier ferritique, acier inoxydable, aluminium, duplex). L'état de surface des pièces à contrôler (rouille, calamine) et les revêtements surfaciques (peinture) ne sont pas préjudiciables à la qualité de détection.

- Ballons de raffinerie H₂S
- Grues et portiques de levage
- Structures métalliques
- Réservoirs de stockage

5.3 Appareil de recherche des défauts par courants de Foucault :



Le Nortec 2000D+ offre une gamme de fréquences de 50 Hz à 12 MHz pour toute une série d'applications allant de la détection de fissures dans des tubes ou des structures jusqu'au repérage de défauts minuscules dans des superalliages aéronautiques. En fréquence simple ou double, avec une conductivité numérique facile à utiliser et un support pour des scanners rotatifs, il est l'appareil idéal pour de nombreuses applications de CND en aéronautique.

Des affichages interchangeables par l'utilisateur offrent la meilleure visibilité dans toutes les conditions d'éclairage. Une sortie VGA permet de brancher un afficheur à tête haute pour les contrôles dans les endroits exigus, un grand moniteur de bureau ou un appareil de projection pour les salles de formation. À

moins de 1,8 kg, la construction robuste du boîtier de retenue (FOD) permet d'affronter les conditions difficiles du terrain ou des milieux de production. Une sangle ajustable et des pieds antidérapants permettent de le placer tout près de la zone de contrôle.

5.4 Caractéristiques techniques :

- Bande de fréquences de 50 Hz à 12 MHz
- Batterie unique aux ions de lithium
- Léger, moins de 1,8 kg
- Conductivité numérique en International Annealed Copper Standard (% IACS) ou en Méga Siemens par mètre (MS/m)
- Mesure d'épaisseur des revêtements non conducteurs en millimètres ou en pouces
- Accueil de plusieurs scanneurs
- Bobines de compensation internes pour sondes absolues
- Affichages interchangeables par l'utilisateur :
 - ❖ électroluminescent à haute intensité
 - ❖ à cristaux liquides monochromes
 - ❖ à cristaux liquides en couleurs
- Double fréquence
- Sortie VGA
- Gel de l'écran pour figer le signal de défaut

- Technologie PowerLink™ : Reconnaissance automatique de la sonde et réglage de l'appareil
- Écran fractionné avec touches de paramètres à code de couleurs
- Affichage à l'écran de la mémoire de référence pour les applications tout ou rien
- 120 programmes de réglage intégrés
- Affichage en cascade
- Logiciel Eddy Master™ sous Windows

5.5 Avantages de la méthode :

- ❖ Rapidité de palpation et de détection
- ❖ Pas de nécessité d'étalonnage de l'appareil, une simple calibration est suffisante
- ❖ Détection possible à travers un revêtement surfacique
- ❖ Qualité de détection indépendante de la vitesse de palpation
- ❖ Traitement informatique avec stockage des données de modélisation

5.6 Inconvénients de la méthode :

- ❖ Effet de bords des pièces produisant des signaux parasites
- ❖ Détection de défauts débouchant en surface
- ❖ Importance du positionnement de la sonde par rapport au défaut existant

- ❖ Le revêtement de surface doit être non magnétique et isolant électriquement
- ❖ Formation théorique et pratique des utilisateurs et intervenants

6 / Contrôle par émission acoustique :

6.1 Principe du contrôle par émission acoustique :

L'émission acoustique est le phénomène de libération d'énergie sous forme d'ondes élastiques transitoires résultant des micro déplacements locaux internes au sein d'un matériau soumis à sollicitation.

La pertinence de cette technique repose sur l'association de plusieurs disciplines et le fruit de 15 années de recherche :

- Intelligence artificielle et réseaux de neurones
- Traitement du signal
- Analyse et traitement des données
- Physique des matériaux
- Instrumentation en émission acoustique

Cette technologie permet de traiter en priorité :

- La détection et la localisation de l'endommagement
- Le contrôle de la corrosion
- L'identification des défaillances
- L'auscultation des structures sous contraintes
- La surveillance dans le temps
- La détection des fuites et le contrôle d'étanchéité

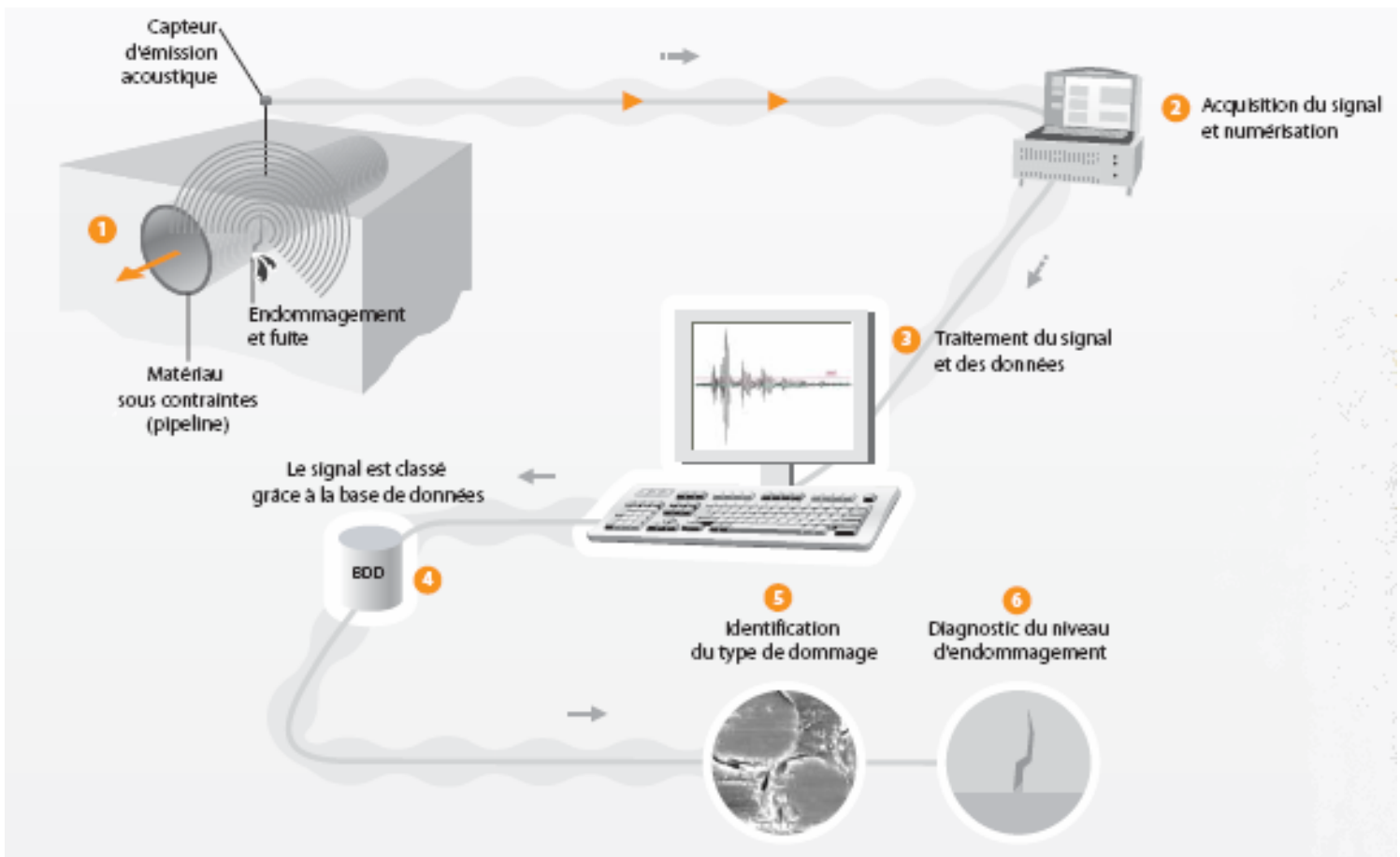


Fig. 13 : Le principe et les étapes du Contrôle par émission acoustique

6.2 Avantages du contrôle par émission acoustique :

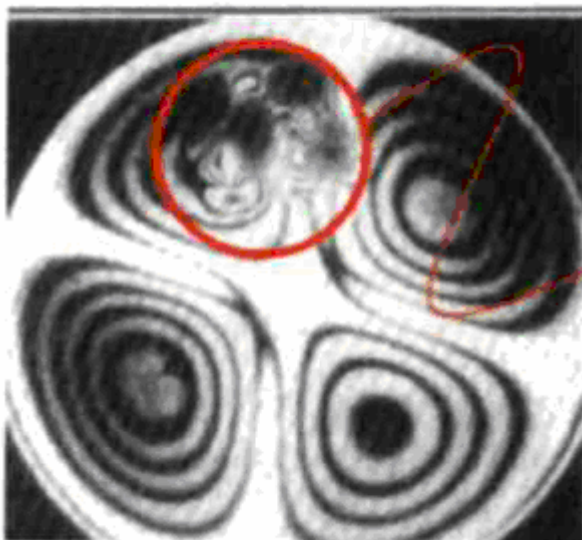
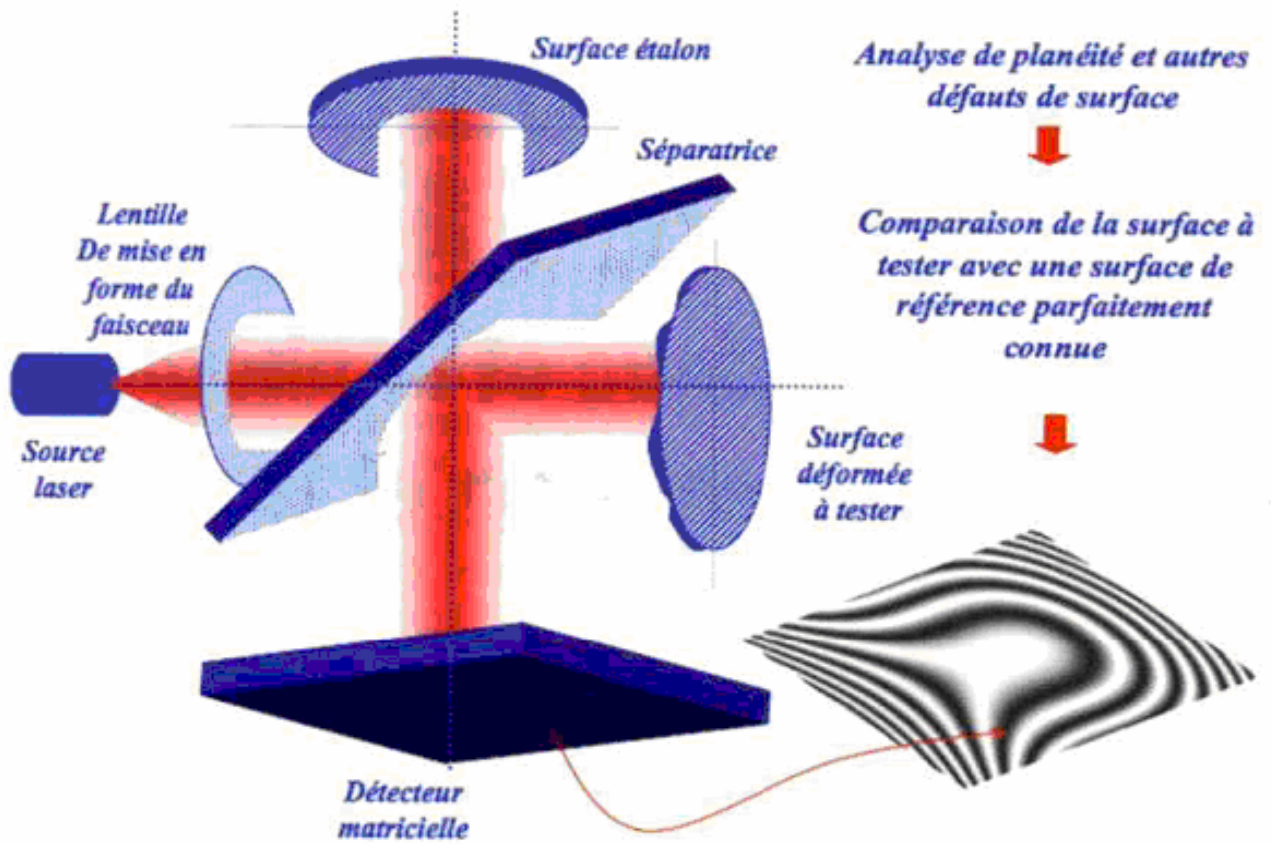
- ❖ Une technologie à la mise en oeuvre souple
- ❖ Le respect des normes et des réglementations françaises, Européennes et internationales,
- ❖ Méthode globale

6.3 Inconvénients du contrôle par émission acoustique :

- ❖ défauts non évolutifs invisibles
- ❖ méthode coûteuse
- ❖ Formation théorique et pratique des utilisateurs et intervenants

7 / Contrôle par la méthode optiques :**7.1 Principe de contrôle par la méthode optique :**

Les techniques holographiques optiques mesurent des déformations sur la surface de l'objet testé. La mesure des déformations est effectuée en comparant le front d'onde d'un faisceau lumineux après réflexion sur l'objet testé avec le front d'onde de ce même faisceau enregistré préalablement sur un hologramme, dans une configuration de référence . La lumière employée pour illuminer la surface du spécimen doit être cohérente et monochromatique. La source lumineuse généralement employée est alors un laser. Les films à haute résolution sont une autre nécessité pour l'holographie. Un défaut peut être détecté si en soumettant l'objet à une contrainte, cette contrainte crée une déformation anormale de la surface autour du défaut.



Signature d'un défaut structurel

7.1 Avantages des méthodes optiques :

- Inspection rapide.
- Large zone d'inspection.
- Sans contact.

7.2 Inconvénients des méthodes optiques :

- Détection des défauts en surface.
- Nécessite un opérateur expérimenté.
- Importance de la qualité du mouchetis et du calibrage.

Le contrôle par les méthodes couplées :**1) Contrôle par ultrasons multiéléments :**

Le contrôle par ultrasons multiéléments est une méthode spécialisée de contrôle par ultrasons qui utilise des traducteurs multiéléments perfectionnés. Un logiciel puissant sert à orienter des faisceaux sonores à haute fréquence dans la pièce et à cartographier les échos qui en reviennent, ce qui produit des images détaillées des structures internes semblables aux images médicales obtenues par ultrasons (par échographie). Cette méthode est utilisée pour inspecter les métaux essentiels des structures, les soudures des pipelines, les composantes aérospatiales et dans d'autres applications semblables où l'information supplémentaire qu'apportent les contrôles par ultrasons multiéléments revêt de l'importance.

2) Méthodes par acousto-ultrasons : (Ultrasons et Emission acoustique)

Ultrasons : L'utilisation d'un "couplant" entre la sonde et la pièce est souvent nécessaire. La détection des défauts est possible à l'intérieur des matériaux. Il existe également plusieurs moyens de tester la pièce : notamment en transmission ou en réflexion.

Émission acoustique : Localisation de la zone de dégradation (réalisation d'une cartographie) et évaluation de son intensité en fonction de la sollicitation imposée (l'objet doit être déformé).

Ces deux méthodes permettent de sonder un matériau en profondeur. Dans certaines conditions de continuité de la matière, il n'est pas nécessaire d'avoir un accès direct. Le sondage en réflexion est adapté à la problématique de contrôle.

3) Thermographie infrarouge :

Les méthodes de CND par thermographie infrarouge utilisent, d'une part, une caméra infrarouge et, d'autre part, un système d'illumination permettant de transmettre à la pièce à contrôler un échauffement. Les caméras utilisées sont sensibles dans les deux bandes principales de longueur d'ondes, infrarouge court (3 à 5 (µm)) et infrarouge long (8 à 12 (µm)). Pour le contrôle de matériaux constitués de verre-résine, les systèmes d'illumination sont constitués de tubes à quartz rayonnants, de puissance électrique variant entre 1 et 20 kW.

3.1 Principe de fonctionnement :

Lorsque l'on éclaire une structure composite avec un flux lumineux bref, la lumière est absorbée en surface et transformée en chaleur. La diffusion de la chaleur s'opère dans le volume de la pièce et les éventuels défauts agissent comme des barrières à cette diffusion, ce qui a pour effet de donner naissance en surface à des points chauds au droit des défauts. Lorsque la caméra observe la face arrière de la structure (par rapport à l'illumination) la présence des barrières thermiques, liées aux défauts, se manifeste par des points froids.

4) Méthode vibrothermographique :

La vibrothermographie est une nouvelle méthode de contrôle non destructif. Contrairement à la thermographie infrarouge classique, elle n'est pas limitée aux matériaux composites et organiques. Elle permet également de détecter les défauts des matériaux métalliques.

La méthode est globale, sans contact et relativement simple à mettre en oeuvre, mais il est toujours préférable de l'associer à un contrôle ultrasonore si l'on souhaite affiner le diagnostic.

4.1 Avantages des méthodes vibrothermographiques :

La vibrothermographie associe les avantages d'une excitation ultrasonore à ceux de la thermographie

4.2 Domaines d'application :

La vibrothermographie ouvre la voie à de nombreuses applications qu'il n'était pas possible d'envisager avec les méthodes traditionnelles (ultrasons, thermographie ou ressuage). C'est par exemple la seule technique de contrôle non destructif permettant de contrôler des pièces de fonderie comportant un jeu faible (inférieur au micron).

Chapitre III: Détection des critiques

1. Définition d'une crique :

Le terme de crique de compression désigne une anomalie de structure présente sous la forme d'une fracture ténue perpendiculaire aux fibres du bois dont l'aspect à l'échelle microscopique est dû à une rupture en compression avec une déformation importante des cellules accompagné de nombreuses fissures transversales dans les parois. Le résultat est l'apparition de rides irrégulières à la surface du matériau dans le sens perpendiculaire à celui des fibres.

Elle engendre dans la majorité des cas une très faible résistance à la rupture en traction longitudinale. Notons que le terme anglais équivalent est « compression failure ». Elle a pour origine une déformation des fibres résultant d'une contrainte en compression excessive, au-delà de la résistance à la rupture, dans le sens des fibres soit en compression pure soit en flexion. Il s'agit d'un flambement localisé (micro-flambement) des fibres et des autres éléments du bois. Les criques de compression indiquent une rupture définitive du matériau causée par une charge ou un choc excessif dans le sens des fibres du bois.

2. Domaine d'application :

A330-200 est équipé de 2 réacteurs General Electric CF6-80E1A3. Une inspection visuelle effectuée sur place a révélé la présence d'une importante crique longue d'environ quatre pouces dans le joint soudé du support de bougie d'allumage et d'injecteur de carburant situé à l'arrière de la chambre de combustion. La tuyère gauche était elle aussi criquée au niveau de la soudure se trouvant du côté avant du carter extérieur de la chambre de combustion, à quelque six pouces du sommet. La tuyère avait également été endommagée par un impact qui semblait provenir de l'intérieur du moteur. Il n'y avait aucun dommage visible résultant de l'importante indication de dépassement de la température de sortie turbine (TOT) qui avait précédé l'autorotation. Le moteur grinçait lorsque les aubes mobiles étaient tournées à l'envers.

Des échantillons de carburant et d'huile ont été prélevés, et aucune anomalie flagrante n'a été décelée. Le détecteur de limaille inférieur était propre, et l'huile ne contenait aucune particule métallique évidente. Le compresseur ne présentait aucun signe de dommage causé par un corps étranger, mais il était impossible de le faire tourner à la main. Le moteur totalisait 6694,4 heures de fonctionnement depuis sa mise en service initiale. Les temps en service des composants modulaires sont donnés à l'annexe A et sont accompagnés d'un résumé des récentes opérations de maintenance et de réparation du moteur. Après démontage du moteur, plusieurs pièces de ses composants ont été envoyées au Laboratoire technique pour y faire l'objet d'un examen plus poussé et d'une analyse. Il a été établi que l'élément

déclencheur qui avait mené à la panne moteur avait été la fracture d'une aube mobile sur la roue de turbine du deuxième étage. Les débris métalliques résultant de cette fracture ont causé les dommages secondaires au moteur qui sont décrits plus bas.

2.1. L'examen de la turbine :

L'examen du premier étage :

L'examen visuel : la roue du premier étage de la turbine a révélé de nombreuses criques de type A et environ quatre criques de type B sur la couronne des aubes mobiles. Des criques de type A sont des criques dans la plate-forme, la surface entre les aubes mobiles. Quant aux criques de type B, il s'agit de criques qui s'étendent depuis le bord de la couronne jusqu'à la surface de cette dernière, mais sans dépasser 0,060 pouce. Si les criques dépassent 0,060 pouce dans la Couronne, la roue de turbine est rejetée. S'il est jugé normal de trouver des criques dans la région de la couronne, aucune crique n'est toutefois permise dans les aubes mobiles.

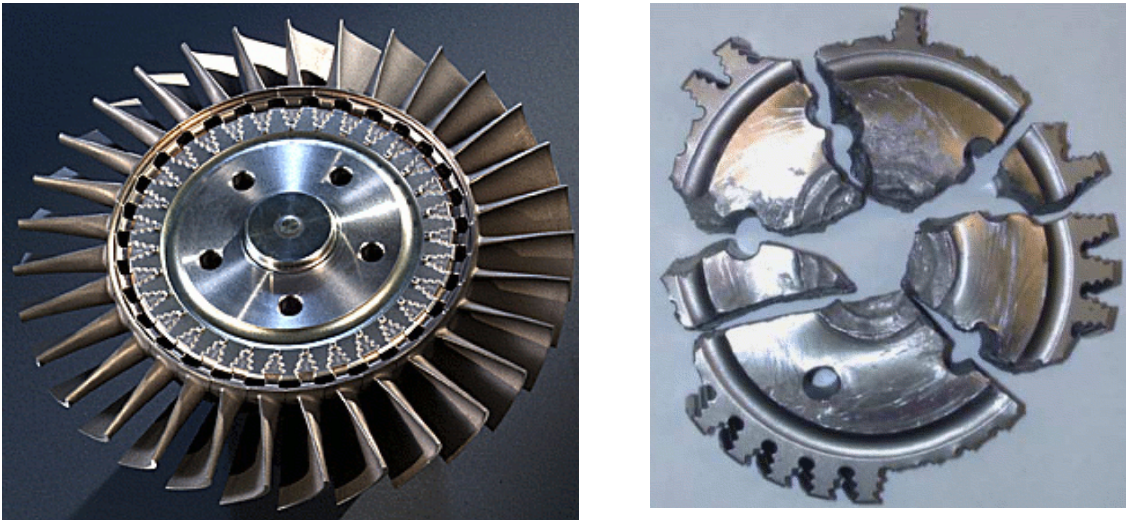


Fig. 1 : Résultat d'une propagation d'une crique

La crique de type B la plus importante qui a été observée se trouvait sur le bord d'attaque de la couronne et mesurait environ 0,030 pouce, aucune crique de type B n'étant par ailleurs observée sur le bord de fuite de cette même couronne. Des dommages par frottement ont été constatés sur l'extrémité de plusieurs aubes mobiles couvrant un arc d'environ 180°. De la même façon, des dommages par frottement observés sur le joint intérieur de cet étage couvraient également un arc de 180°. De plus, une certaine usure de contact était présente sur l'accouplement de type curvic.

L'examen du deuxième étage :

Chapitre III

Détection des criques

L'examen du deuxième étage de la turbine a révélé la présence d'une aube mobile brisée (voir la figure 2). la roue du deuxième étage de la turbine avait accumulé 375,8 heures de fonctionnement depuis sa mise en service initiale sur une durée de vie utile possible de 1775 heures.



Fig.2 : Une aube mobile brisée du deuxième étage de la turbine

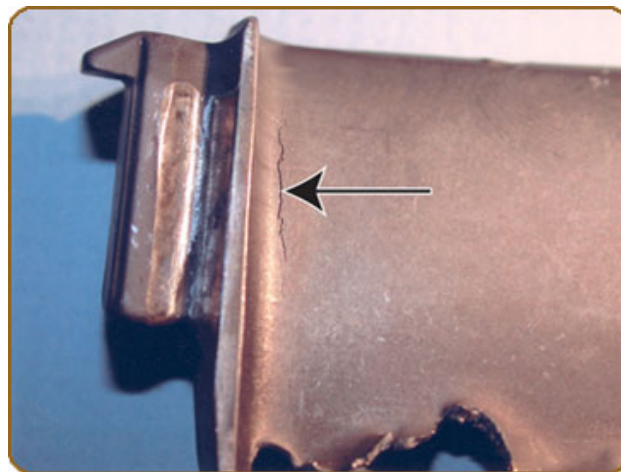


Fig. 3 : craque dans une aube s'étant propagée à partir de multiples origines sur les surfaces convexe et concave de l'aube, ce qui est le signe de charges cycliques en flexion inversée

L'examen optique :

Un examen optique a montré que la rupture de l'aube mobile était le résultat d'une craque de fatigue à points de départ multiples sur le côté convexe de l'aube mobile.

Chapitre III

Détection des criques

La crique de fatigue comptait pour environ 75 % de la fracture, le reste étant dû à une rupture en surcharge instantanée.

Si la majorité de la surface de la fracture était perpendiculaire à l'axe de l'aube mobile, la région de l'origine était quasiment parallèle à l'axe de l'aube mobile ou radiale par rapport à la roue de la turbine. L'aube mobile suivant celle qui s'était rompue avait fléchi dans le sens contraire à celui de la rotation. La flexion de cette aube mobile avait eu comme effet d'en réduire la longueur totale et de l'empêcher de frotter à son extrémité avant l'incident.

Un examen plus poussé de l'aube mobile fléchie a révélé la présence d'un frottement minimal à son extrémité ainsi que l'absence de bleuissage ou de champignonage.

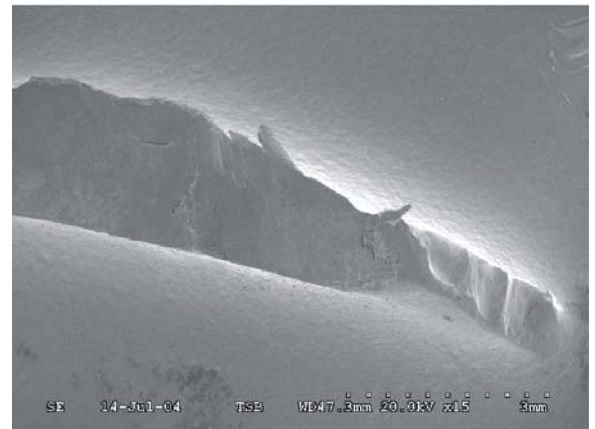
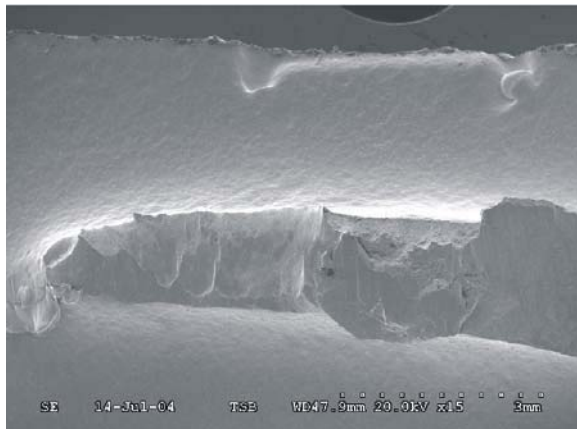


Fig. 4 : Une vue optique d'une crique

L'examen microscope :

Chapitre III

Détection des criques

Un examen au microscope électronique à balayage de la fracture de l'aube mobile de la roue du deuxième étage de la turbine a révélé la présence de multiples régions d'origine adjacentes.

L'examen de la surface de la crique montrait une couche d'oxydation servant à délimiter une tendance sous-jacente claire aux stries de fatigue.

La topographie de la fracture à l'emplacement d'origine était cohérente avec un criquage en fatigue oligocyclique comme mode de défaillance initial, compte tenu de l'observation de marques concentriques et des stries largement espacées.

Le criquage en fatigue oligocyclique a progressé radialement vers l'intérieur, en direction du moyeu, avant de virer perpendiculairement à l'axe de l'aube mobile, progressant alors en mode mégacyclique. L'aube mobile a fini par se rompre à la suite de l'allongement en surcharge de la crique de fatigue mégacyclique.

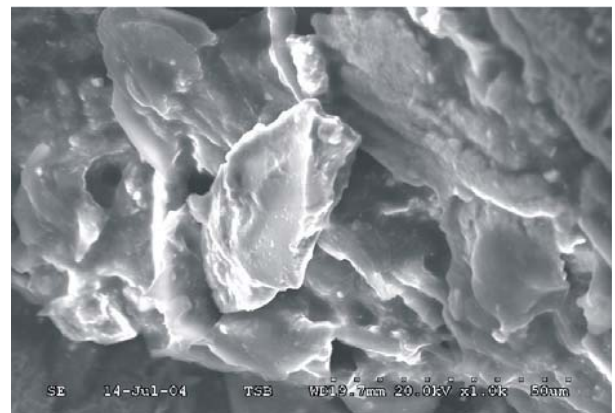
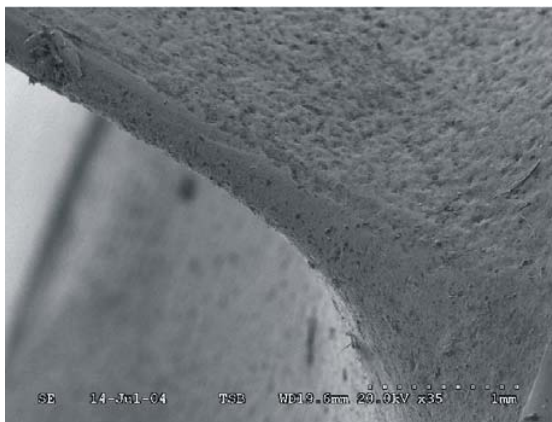


Fig. 5 : Une vue microscopique d'une crique de fatigue

L'examen rayons X :

Chapitre III

Détection des criques

Une analyse par rayons X à dispersion d'énergie a montré que le matériau constituant l'aube mobile correspondait grosso modo au matériau spécifié, à savoir l'IN 713C. Une section transversale a été prélevée à l'origine de la fracture de l'aube mobile de la roue du deuxième étage de la turbine et montée en vue d'une analyse métallurgique. Deux criques secondaires ont été découvertes dans le congé, sous la fracture. Un décapage chimique a révélé la présence d'une microstructure typique avec une phase gamma prime visible et des joints de grain bien définis. Des sections additionnelles prélevées au talon des aubes mobiles adjacentes ont montré des criques similaires dans le rayon du congé. La répartition uniforme de la phase gamma prime indiquait qu'il n'y avait pas eu de surchauffe. Des essais directs de dureté Rockwell ont donné un résultat moyen de 40 à l'échelle Rockwell « C » (HRC) (ce qui équivaut à une résistance à la traction de 182 000 lb/po²), ce qui se trouve dans les limites de la résistance maximale de 42 HRC spécifiée par le constructeur. Aucune anomalie d'ordre métallurgique n'a été constatée.

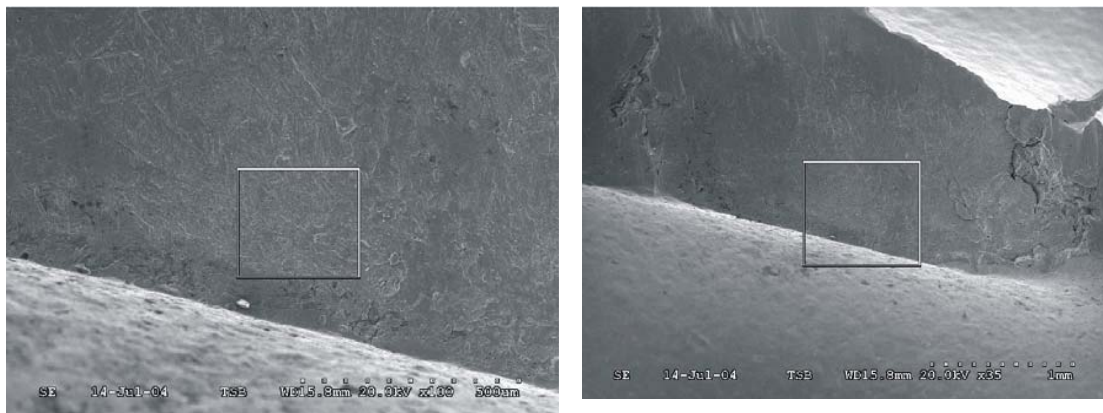


Fig. 6 : Une crique sous les rayons X

2.2 L'examen de la chambre de combustion :

Chapitre III

Détection des criques

Le carter extérieur de la chambre de combustion présentait une crique ouverte de quatre pouces le long de la soudure du bossage, sous les orifices d'injection de carburant et d'allumage. Cette fracture présentait des caractéristiques correspondant à une fatigue oligocyclique récente qui a été considérée être le résultat des vibrations du moteur consécutives à la rupture de l'aube mobile du deuxième étage de la turbine.



Fig. 7: une rupture du carter de chambre de combustion sur toute sa longueur et sur une partie de sa circonférence. Cette rupture est à l'origine d'une crique située à un point de soudure se trouvant à l'intérieur.

3. Analyse :

Les éventuels scénarios pouvant expliquer l'apparition de la fatigue dans l'aube mobile de la roue du deuxième étage de la turbine comprennent le frottement de

l'extrémité de cette aube, la présence de défauts physiques ou métallurgiques, un criquage de fatigue mégacyclique du aux vibrations (flottement des aubes mobiles) et un criquage de fatigue thermique. L'absence de toute trace importante de frottement, de bleuissage ou de champignonage sur l'extrémité de l'aube mobile adjacente, combinée à une analyse dimensionnelle acceptable du distributeur du deuxième étage, permet de penser que le frottement de l'extrémité de l'aube mobile n'a pas été un élément déclencheur. De plus, un frottement de l'extrémité d'une aube mobile va se manifester sous la forme d'un criquage de fatigue mégacyclique perpendiculaire à l'axe de l'aube mobile.

L'examen optique :

Un examen optique a montré que le criquage de fatigue initial suivait une direction radiale vers le moyeu. L'analyse métallurgique n'a rien révélé d'anormal au niveau de la fabrication ou des matériaux qui aurait pu contribuer à l'apparition de la fatigue. Bien que quelque peu masqués par la présence d'une couche d'oxydation, l'espacement entre les stries de fatigue et l'endroit où est apparue la fatigue (à mi-corde plutôt qu'au bord de fuite) semblent indiquer que le mode initial de défaillance a pris la forme d'un criquage de fatigue oligocyclique.

Une fois le criquage lancé, sa présence a servi de concentrateur de contraintes, si bien que les contraintes normalement présentes en cours d'utilisation ont pu alors mener à un criquage de mode mégacyclique.

Un criquage de fatigue causé par un phénomène thermique apparaît quand une dilatation rapide de la couronne de la roue de turbine produit momentanément d'importantes contraintes de compression circonférentielles. De telles contraintes se développent lorsque la couronne essaie de se dilater, mais qu'elle n'y parvient pas à cause du matériau du moyeu qui est plus froid. Ces contraintes de compression mènent à un affaiblissement localisé du matériau de la couronne de la roue de turbine. Par la suite, les températures de fonctionnement stabilisées entraînent des contraintes de traction dans la couronne qui donnent naissance à un criquage de fatigue. L'emplacement et l'orientation des criques dans la roue de turbine du deuxième étage sont considérés comme étant le résultat d'une fatigue thermique.

4. Faits établis quant aux risques :

1. L'instrumentation de cet avion n'enregistre pas les surchauffes au démarrage et celles-ci risquent de ne pas être enregistrées avec précision par un exploitant, quand bien même elles seraient détectées. Il peut y avoir des défaillances de roue de turbine si des surchauffes au démarrage et des puissances transitoires passent inaperçus, ou si leurs effets ne font l'objet d'aucune vérification.

2. La roue du premier étage de la turbine présentait de nombreuses criques de type A et environ quatre criques de type B sur la couronne des aubes mobiles, et des criques dans le rayon du congé des aubes mobiles peuvent mener à des défaillances de la turbine. Aucune inspection régulière n'est prescrite pour détecter de telles

criques, mais une inspection spéciale de la turbine est recommandée en cas de dépassement des limites de température de sortie turbine. Aucune crique n'est permise dans les aubes mobiles.

5. conclusion :

Toute présence de criques dans un moteur peuvent provoquer une panne dans ce dernier , réduire la puissance d'un moteur, provoquer des températures élevées à l'intérieur d'une turbine et donner lieu à des avertissements d'incendie si des gaz de combustion dont la température est élevée s'échappent par ces criques et pénètrent dans le compartiment moteur. Il peut y avoir roussissement local et/ou incendie. Et pour éviter l'apparition des criques il faut suivre les programmes d'entretien de chaque avion et de chaque pièces du moteur.

L'entretien d'un avion a pour but de le maintenir aussi longtemps que possible en bon état de marche. Ce bon état peut-être altéré de plusieurs manières est l'une d'elle c'est :

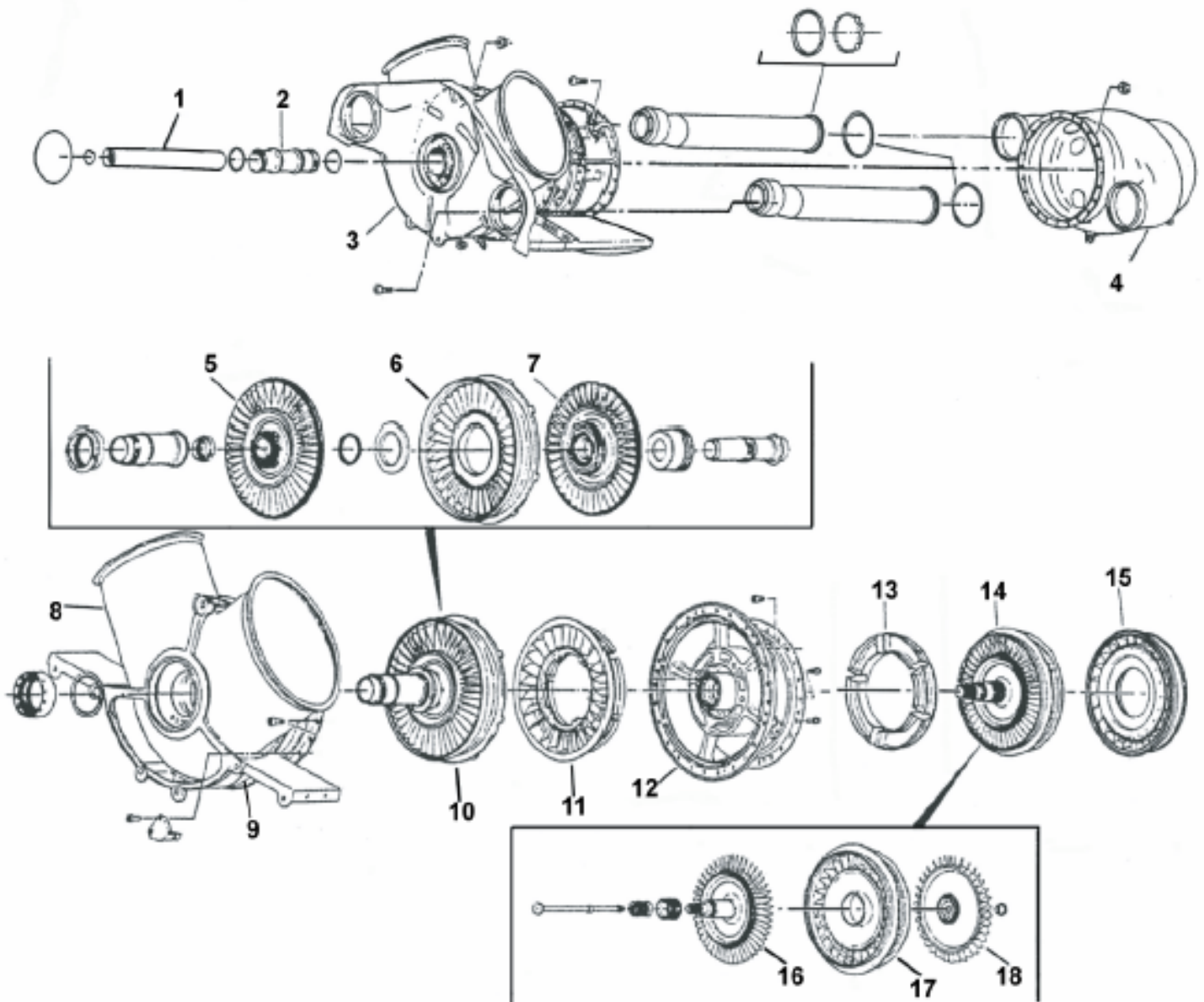
La fatigue : C'est le cas des éléments supportant des taux de vibration élevés (bras de liaison, bâti-moteur, pots d'échappement, hélices...etc.) ou un grand nombre de cycles sous efforts importants (longeron voilure en utilisation voltige par exemple).

Ces pièces sont à inspecter fréquemment aux endroits où elles sont le plus sollicitées et, en particulier, aux abords des trous, des angles, des discontinuités de section, des rayures, des soudures, des éléments d'assemblages... etc. Un état de fatigue avancé se manifeste par l'apparition des criques. Ces criques ne sont pas toujours visibles à l'œil nu. Leur détection ne peut s'effectuer qu'à la loupe, au

Chapitre III

Détection des criques

minimum, ou mieux, au ressuage fluorescent ou à la radio. Si une crique apparaît sur une pièce non critique et bien en vue (verrière, carénage... etc.) percé un petit trou de diamètre 2 ou 3 mm à son extrémité pour stopper son développement. Puis surveiller. Si, au contraire, elle apparaît sur une pièce vitale (bras de liaison, longeron, guignol...etc.) la remplacer de façon urgente et impérative.



- | | |
|--|---|
| 1. Accouplement turbine-compresseur | 10. Rotor de la turbine de travail |
| 2. Accouplement turbine-pignon d'entraînement | 11. Diffuseur du 3 ^e étage de la turbine |
| 3. Turbine | 12. Support de la turbine de travail |
| 4. Carter extérieur de la chambre de combustion | 13. Carter du diffuseur du 3 ^e étage de la turbine |
| 5. Roue du 4 ^e étage de la turbine | 14. Rotor de la turbine du générateur de gaz |
| 6. Diffuseur du 4 ^e étage de la turbine | 15. Diffuseur du 1 ^{er} étage de la turbine |
| 7. Roue du 3 ^e étage de la turbine | 16. Roue du 2 ^e étage de la turbine |
| 8. Support turbine et collecteur d'échappement | 17. Diffuseur du 2 ^e étage de la turbine |
| 9. Support générateur de gaz | 18. Roue du 1 ^{er} étage de la turbine |

Vue éclater d'un moteur General Electric CF6-80E1A3

Heures en service des composants modulaires et**Opérations récentes de maintenance et de****Réparation du moteur**

Type d'aéronef : A330-200

Immatriculation : C-FVIX

Numéro de série : 45139

Heures depuis mise en service initiale : 10 862,7 (cellule)

Modèle de moteur : General Electric CF6-80E1A3

Numéro de série : CAE-295208

Heures depuis mise en service initiale : 6694,4

Date d'installation : avril 1995, le moteur ayant 530 heures depuis mise en service initiale, et la cellule 4699

Date de l'incident : avril 2004, le moteur ayant 6694 heures depuis mise en service initiale, et la cellule 10862

Compresseur :

Référence : 23050833

Numéro de série : CAC-15103

Heures depuis mise en service initiale : 5724,0

Heures depuis révision : 2186,6

Heures depuis dernière réparation : 789,1

Dernière réparation : janvier 2003 chez ACRO Aerospace, bon de travail 23-17374

Compresseur inspecté pour espacement entre le rouet et le carter, conformément au manuel GTP5232-3

Installé en février 2003 à 10 073,6 heures cellule

Boîte de transmission :

Chapitre III

Détection des criques

Référence : 23035185

Numéro de série : CAG-15111

Heures depuis mise en service initiale : 5548,1

Heures depuis révision : N/P

Heures depuis dernière réparation : 1142,4

Dernière réparation : juillet 2002 chez ACRO, bon de travail 22-9630; réparée conformément au manuel

GTP5232-2, palier 2 ½ remplacé

Installée en juillet 2002 à 9720,3 heures cellule

Turbine:

Référence : 23038160

Numéro de série : CAT-38567

Heures depuis mise en service initiale : 6426,6

Heures depuis révision : 1744,6

Heures depuis dernière réparation : 375,8 (HMI)

Dernière réparation : juillet 2003 chez ACRO, bon de travail 23-25802

Turbine réparée conformément au manuel GTP5232-3, inspection aux 1750 heures effectuée Conformément au manuel GTP5232-2 et à la CSL 4035 R5

Installée en septembre 2003 à 10 486,9 heures cellule

Inspection régulière :

17 avril 2004 : inspection aux 300 heures effectuée conformément au programme d'inspection approuvé de VIH numéro P-0284, à 10 840,6 heures cellule

Composant	Référence	Numéro de série
Volute	6851574F	AP18581
Carter d.admission	6890530-B	22977
Support arrière	6851430	ER22658
Coquilles de carter	23057142	26792
Diffuseur avant	6870811	ER-29772
Arbre porte pignons à accouplement droit	23031922-C	CG124630
Boîtier de roulement	6893617-C260	17
Boulons et écrous divers	N/D	N/D
Roulement numéro 1	6898607	HAZ101
Roulement numéro 2	6889093	HAQ799
Bague d.appui du joint carbone	23034513B	63005SOCN
1er étage rotor du compresseur	6890501	KR69611
2e et 3e étages rotor du compresseur	23060422	C36140
4e étage rotor du compresseur	23060404	C34556
5e étage rotor du compresseur	23060405	ER41944
6e étage rotor du compresseur	23060406	ER41335
Rouet centrifuge	3058147-C	KR99876

Conclusion générale :

Le travail effectué dans ce mémoire avait pour objectif d'utiliser les techniques du contrôle non destructif pour détecter et suivre l'évolution de l'endommagement des matériaux et ce pour une meilleure estimation de leur durée de vie.

Dans un premier temps nous avons montré les potentialités de chaque méthode de contrôle pour la détection et la caractérisation de l'endommagement. On est arrivé à conclure qu'au cours de notre étude, chaque méthodes de contrôle a son domaine précis ou on ne peut pas favoriser une méthode à une autres .d'autre part les CND restent au cour de développement on découvrant des nouvelles méthodes pour mieux contrôler et pour faciliter le travail du contrôleur . L'industrie aéronautique est la mieux représentée. Le volume important de pièces à contrôler nécessite un important effort de développement suivant deux axes principaux :

- le contrôle à la construction

- le contrôle en service qui est soumis à des contraintes différentes et nécessite des moyens spécifiques (machines d'intervention, problèmes d'accessibilité),

Pour répondre à ces besoins, les organismes et sociétés concernés ont créé des sociétés filiales dont la mission est le développement d'appareillages et la prestation de service en CND.

Notre travail nous a permis en premier temps d'acquérir des connaissances techniques, scientifiques et pratiques de base concernant les champs magnétiques, électriques et électromagnétiques liées aux applications

Conclusion générale

industrielles principalement les techniques magnétiques de CND. D'autre part d'appliquer une démarche scientifique intégrant les connaissances fondamentales de façon synthétique et pragmatique de façon à maîtriser la mise en œuvre de techniques de CND. Acquérir les connaissances scientifiques essentielles par des méthodes qui associent intimement les résultats de l'expérience de terrain et l'approche théorique résumée sous forme de mémoire. Un recensement a été sur les développements récents : contrôle magnétoscopique assisté par caméra, la magnétisation sans contact par un champ magnétique tournant 2D et 3D, les techniques concurrentes et leur évolutions prévisible : courants de Foucault, ondes ultrasonores guidées, magnéto-optique, vibro-thermographie.... Les résultats très encourageants obtenus par les CND rendent l'intérêt de ces méthodes plus qu'académique. Puisqu'elles ouvrent des perspectives très intéressantes pour les contrôles non destructifs.

Conclusion

Annexe

Unités de mesures

A.....	Ampère
AH.....	Ampère Heure
°C.....	Degré Celsius
°F.....	Degré Fahrenheit
G.....	Gramme
Hz.....	Hertz
IN.....	Inch
K.....	Kilo
L/S.....	litres par seconds
M.....	mètre
N.....	Newton
Pa.....	Pascal
V.....	Volt
W.....	Watt
1pouce.....	2.540005 cm