

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DE BLIDA 1

Institut d'Aéronautique et des Etudes Spatiales

Département de Construction Aéronautique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de **MASTER** en Aéronautique

Spécialité : *Propulsion Avions*

***Développement des Techniques de Contrôle
Non Destructif et élaboration des Procédures
d'inspection et d'entretien***

Présenté par :

- Mr. AKEBLERSANE Mohammed Amine
- Mr. MOUAICI Nour El-Islam

Dirigé par :

Mr. ABDALLAHEL HIRTSI Ahmed

Promotion : 2014/ 2015

Remerciements

*Nous adressons nos remerciements à notre promoteur, Monsieur **Abdellah el Hirtsi ahmed** enseignant à l'institut d'aéronautique de Blida, pour son aide appréciable et sa contribution à l'élaboration de ce projet et l'intérêt qu'il a toujours témoigné à l'égard de notre travail, et les précieux conseils et encouragements qu'il nous a prodigués.*

*Nous voudrions exprimer nos reconnaissances également à **Mr.Bennoui Farid**, et **Mr.Grada Amine** , et **Mr.Niati Amine** pour leur aide appréciable à l'élaboration de ce travail.*

*Nos remerciements vont à tous les enseignants de l'Institut d'Aéronautique et ceux qui ont contribué de près ou de loin à notre formation et particulièrement **Mr.L.amtout**, **Mme Hayet Boudjellal**, **Mr T.Elaichi**,**Mr Renane Rachid** et **Mr. M.Azzazen**.*

*Nos remerciements vont enfin à tous nos amis qui nous ont soutenus pendant tout le long de ce modeste travail : **Promotion Aéro 2014-2015 Propulsion**.*



➤ A.Mohammed Amine
➤ M.Nour El-Islam

Dédicaces

Je dédie ce travail :

- *A mes très chers parents qui m'ont aidé et soutenu durant tout le long de mes études.*
- *A mes chères frères et sœurs.*
- *A mes oncles toufik, abderrahim et mohammed.*
- *A mes cousins Ali, youcef et smain.*
- *A toute ma famille.*
- *A mes amis nassim, mohamed, hamza, salim et noureddine.*

Nour-el-Islam

Je dédie ce travail :

- *A ma femme.*
- *A mon fils Si Abdellatif*
- *A mes chères frères et sœurs.*
- *A toute ma famille.*
- *A mes amis : Broche, Benmessaoud, Abid, Bennoui, Achar, Benyoucef.*

Amine

SOMMAIRE

Liste des figures et tableaux	1
Introduction générale	2

Chapitre I Généralités sur le Contrôle Non Destructif

I.1 Définition	4
I.2 Applications Et Tendances	5
I.2.1 Champ d'Application Actuel	5
I.2.2 Tendances Et Évolution	5
I.2.3 Périmètre d'Application	5
I.3 Secteurs Concernés	6
I.3.1 Aéronautique – Aérospatiale	6
I.3.2 Energie – Pétrochimie	7
I.3.3 Ferroviaire	7
I.3.4 Fonderie	7
I.3.5 Produits En Acier	8
I.3.6 Autres Secteurs	8
I.4 Les Objectifs Du CND	8
I.4.1 La Rapidité d'Exécution	8
I.4.2 Le Coût	8
I.4.3 La Reproductibilité	9
I.4.4 La Fiabilité	9
I.4.5 La Sensibilité	9
I.4.6 La Résolution	9
I.5 Principes De Détection Des Défauts	9
I.6 Différentes Techniques Du CND	10
I.6.1 Examen Visuel Et Contrôle Optique Automatique	10
I.6.2 Ressuage	11
I.6.3 Magnétoscopie	13

I.6.4 Ultrasons	15
I.6.5 La Radiographie	16
a- Principe De l'Examen Radiographique	17
b- Désavantages De La Radiographie	17
c- Radioprotection	18
d- Appareillage Individuel	17
e- Appareillage Portatif	18
f- Tomographie X	18
I.6.6 Thermographie	19
I.6.7 CND Par Courants De Foucault	20
I.7 Choix Du Type De Contrôle	19
I.7.1 La Typologie De Discontinuité Attendue	20
I.7.2 Les Limites Intrinsèques De Chaque Méthode	21
I.7.3 Les Conditions Opérationnelles	21
I.7.4 Le Type De Matériau à Contrôler	21
I.8 Fiabilité Des Contrôles Non Destructeurs	21
I.9 Comparatif Des Principales Techniques De CND	22
I.10 Processus d'Évaluation	22

Chapitre II

Métaux Et Leurs Propriétés

II.1 Introduction	24
II.2 Propriétés Mécaniques Des Matériaux	25
II.2.1 Propriétés d'Usage	25
II.2.2 Essai De Traction	25
II.2.3 R_e, R_m, $R_{e0,2}$	26
II.2.4 Courbe Réelle Ou Rationnelle	26
II.2.5 Influence De La Température Sur R_e et R_m	27
II.2.6 Effet De Masse	27
II.2.7 Autres Caractéristiques Mécaniques	28
II.2.7.1 Allongement à La Rupture (A)	28
II.2.7.2 Module De Young (E)	28

II.2.7.3	Valeur Spécifique Du Module	28
II.2.7.4	Coefficient De Poisson (ν)	29
II.2.7.5	Module De Cisaillement (G)	29
II.2.7.6	La Résilience	29
II.2.8	La Ténacité	29
II.3	Métaux Ferreux	30
II.3.1	Définitions	30
II.3.2	Classement Des Aciers	30
II.3.3	Désignation Normalisée	30
II.3.4	Avantages / Inconvénients / Comparaison	31
II.4	L'Aluminium	32
II.4.1	Caractéristiques Générales De L'Aluminium	32
II.4.2	Aluminium Et Alliages d'Aluminium	32
II.4.3	Définition De La Série 2000 (Al Cu et Al-Cu-Mg)	33
II.5	Le Titane	33
II.5.1	Caractéristique Mécanique Du Titane	33
II.5.2	Le Titane Et Ces Alliages	34
II.6	Traitements Thermiques	36
II.7	Défauts De Matériaux	39
II.7.1	Défauts Ponctuels (Dimension 0)	39
II.7.2	Défauts Linéaires (Dimension 1)	39
II.7.3	Défauts Surfacciques (Dimension 2)	40
II.7.4	Défauts Volumiques (Dimension 3)	41
II.8	Les Défauts De Soudage	42
II.8.1	Les Fissures	42
II.8.1.1	Orientation Des Fissures	42
II.8.1.1.1	Les Fissures Longitudinales	43
II.8.1.1.2	Les Fissures Transversales	43
II.8.1.2	Types De Fissures	43
II.8.1.2.1	Fissures De Gorge (Throat Cracks)	43
II.8.1.2.2	Fissures De Racine	43
II.8.1.2.3	Fissures De Cratère	43
II.8.1.2.4	Fissures Au Raccordement	44

II.8.1.2.5	Fissures Sous -Cordon (ou de Zone Affectée Thermiquement)	44
II.8.1.3	Fissure a Chaud (ou de solidification)	44
II.8.1.4	Fissures a Froid (Fissures d'Hydrogène)	44
II.8.1.5	Fissuration Lamellaire	45
II.8.2	Manques De Fusion	45
II.8.2.1	Manque De Fusion Dans Le Flanc De La Soudure	45
II.8.2.2	Manque De Fusion Entre Passes	45
II.8.2.3	Manque De Fusion à La Racine De La Soudure	45
II.8.3	Manques De Pénétration	45
II.8.3.1	Manque De Pénétration à La Racine	46
II.8.3.2	Manques De Pénétration Dans La Soudure	46
II.8.4	Inclusions Gazeuses	46
II.8.4.1	Porosités Vermiculaires	46
II.8.4.2	Porosités De Reprise	46
II.8.4.3	Porosités Uniformes	46
II.8.5	Inclusions Solides	46
II.8.5.1	Inclusions De Laitier	47
II.8.5.2	Inclusions De Tungstène	47
II.8.5.3	Inclusions De Cuivre	47
II.8.6	Excès De Matière	47
II.8.6.1	Excès De Pénétration	47
II.8.6.2	Surépaisseur	47
II.8.6.3	Recouvrements Non Fusionnés (Débordements)	47
II.8.7	Dénivellement	47
II.8.8	Cratère	47
II.8.9	Défauts De Surface	48
II.8.9.1	Morsures/Caniveaux	48
II.8.9.2	Effondrement	48
II.8.9.3	Amorces d'Arc	48
II.8.9.4	Projections Sur Le Métal De Base	48
II.8.9.5	Défaut d'Aspect	48

Chapitre III

La Radiographie

III.1 Principe De Fonctionnement	49
III.2 Radiographie Industrielle	50
III.2.1 Moyens De Détection	50
III.2.2 Applications	50
III.2.3 Avantages De La Radiographie Industrielle	50
III.2.4 Désavantages De La Radiographie Industrielle	51
III.3 Spectre Electromagnétique	51
III.3.1 Energie	51
III.3.2 Longueur d'Onde	51
III.4 Structure De La Matière	51
III.4.1 Numéro Atomique	52
III.4.2 Numéro De Masse	52
III.4.3 Isotope	52
III.5 Effet Du Rayonnement	52
III.5.1 Ionisation	52
III.5.2 Effets	53
III.5.2.1 Effet Photoélectrique	53
III.5.2.2 Effet Compton	53
III.5.2.3 Effet Production De Paire	53
III.6 Radiation	53
III.6.1 Les Rayons X	54
III.6.1.1 Le Milli Ampérage	54
III.6.1.2 Le Kilo Voltage	54
III.6.1.3 Le Tungstène (MW184) - Filament Et Cible	54
III.6.1.4 Capacité Des Appareils à Rayon X Pour l'Acier	55
III.7 Facteurs Radiographiques	55
III.8 Éléments De Radiographie	56
III.8.1 La Densité (Noircissement Du Film)	56
III.8.2 La Sensibilité	56
III.8.3 La Définition	56

III.8.4 Le Contraste	57
III.8.5 La Latitude	58
III.8.6 Le Film	58
III.8.6.1 Image Latente	59
III.8.6.2 Courbe Caractéristique Du Film	59
III.8.6.3 Classification Et Caractéristiques Du Film	60
III.8.7 Les Ecrans	60
III.8.8 Les Indicateurs De Qualité d'Image (IQI) / Les Pénétrètres	61
III.9 Les Techniques d'Exposition	61
III.9.1 La Cueillette Des Informations	61
III.9.2 Les Eléments De La Technique	62
III.9.3 Le Temps d'Exposition	62
III.10 L'Interprétation Des Radiogrammes	63
III.10.1 Interprétation Des Discontinuités	63
III.10.2 L'Objectif	64
III.10.3 La Cueillette d'Informations	64
III.10.4 Aides à l'Identification Des Indications	64
III.11 La Radioprotection- Moyens	64
III.11.1 Le Temps De Pose	64
III.11.2 La Distance	64
III.11.3 Le Blindage	65
III.12 Les Unités De Dose De Rayonnement	65
III.12.1 Le Coulomb Par Kilogramme	65
III.12.2 Le GRAY	65
III.12.3 Le Facteur De Qualité Q	65
III.12.4 Le Sievert	66
III.13 Choix De La Méthode vs Type De Défauts	66

Chapitre IV

Développement De La Méthode De Radiographie

IV.1 Introduction	67
IV.2 Interface	67
IV.3 Caractéristiques	68
IV.4 Energie Max	68
IV.5 Diagrammes Du Temps d'Exposition	69
IV.6 Interface De Programme	73
IV.7 Calcul Des Durées d'Exposition	76
IV.8 Affichage Des Paramètres	77
IV.9 Impression Des Paramètres	77
IV.10 Exemple De Manipulation	78

Chapitre V

Application de Radiographie

V.1 Application 01	79
V.2 Application 02	85
V.3 Application 03	88
Conclusion	91

Liste Des Figures Et Tableaux

Chapitre I Généralités sur le Contrôle Non Destructif

- Figure (I.1) : Les principales techniques du CND**
Figure (I.2) : Processus mis en jeu lors d'un examen visuel
Figure (I.3) : Principe de contrôle par ressuage
Figure (I.4) : Indication obtenues à l'aide de liquides pénétrants
Figure (I.5) : Principe de la magnétoscopie
Figure (I.6) : Indication obtenues à l'aide de magnétoscopie
Figure (I.7) : Examen magnétoscopique
Figure (I.8) : Poussières magnétiques et Appareils de magnétisation
Figure (I.9) : Principe des ultrasons
Figure (I.10) : Principe de la radiographie
Figure (I.11) : Image de pellicule impressionnée par un contrôle radiographique
Figure (I.12) : Principe de la tomographie X
Figure (I.13) : Schéma de principe du CND par courant de Foucault
Figure (I.14) : Types de discontinuité
Figure (I.15) : processus d'évaluation des contrôles non destructif
- Tableau (I.3) : Comparatif des principales techniques de CND**
Tableau (I.2) : Le degré de fiabilité des différentes méthodes de CND
Tableau (I.1) : Les techniques du control non destructif

Chapitre II

M é t a u x E t L e u r s P r o p r i é t é s

- Figure (II.1) : diagramme de traction**
Figure (II.2) : Courbe de traction avant striction pour des aciers inoxydables
Figure (II.3) : Courbe réelle ou rationnelle
Figure (II.4) : Evolution de R_e et R_m pour un acier en fonction de la température (selon L'essai de traction)
Figure (II.5) : Transition fragile/ductile. Acier 18NCD laminé.
Figure (II.6) : Aluminium non allié
Figure (II.7) : Aluminium allié
Figure (II.8) : Résistance spécifique de différents matériaux de construction aéronautique en fonction de la température

Figure (II.9) : Domaines de températures d'austénitisation et d'autres traitements thermiques des aciers au carbone.

Figure (II.10) : Diagramme de revenu de l'acier 40NiCrMo6. Évolution des propriétés en fonction de la température de revenu (température de trempe 840 °C)

Figure (II.11) : Défauts ponctuels et déplacements atomiques associés.

Figure (II.12) : Les dislocations

Figure (II.13) : Les interfaces cohérentes et incohérentes

Tableau (II.1) : les caractéristiques de deux aciers ayant une trempabilité respective moyenne et forte

Tableau (II.2) : propriété mécanique en fonction du traitement thermique l'acier martensitique 34 Cr Mo 4

Tableau (II.3) : Caractéristiques mécaniques de l'Al 2024

Tableau (II.4) : Composition et propriétés mécaniques de quelques alliages de Titane

Tableau (II.5) : Quelques valeurs typiques d'énergie d'interface pour les métaux et alliages (mJ/m²)

Chapitre III

La Radiographie

Figure (III.1) : L'interrelation entre source de rayonnement, spécimen et film.

Figure (III.2) : Application de la radiographie

Figure (III.3) : Le spectre électromagnétique.

Figure (III.4) : Constitution d'un atome

Figure (III.5) : Atome d'hélium ionisé

Figure (III.6) : Courbe caractéristique du film.

Tableau (III.1) : Influence du voltage en radiographie.

Tableau (III.2) : Capacité des appareils à rayon X pour l'acier

Tableau (III.3) : Choix de la méthode vs type de défauts

Chapitre IV

Développement De La Méthode De Radiographie

Figure (IV.1) : Energie max en fonction de l'épaisseur

Figure (IV.2) : diagramme du temps d'exposition

Figure (IV.3) : diagramme du temps d'exposition

Figure (IV.4) : diagramme du temps d'exposition

Figure (IV.5) : Icône du programme

Chapitre V

Application de Radiographie

Figure (V.1) : Vis sans fin

Figure (V.2) : Mécanisme vis-écrou

Figure (V.3) : Calcule des paramètres a partir du logiciel

Figure (V.4) : Mécanisme neuf

Figure (V.5) : Mécanisme usé

Figure (V.6) : Calcule des paramètres a partir du logiciel

Figure (V.7) : Mécanisme neuf

Figure (V.8) : Mécanisme usé

Figure (V.9) : Cross bar

Figure (V.10) : Contrôle radiographique du cross bar

Figure (V.11) : Calcule des paramètres a partir du logiciel

Figure (V.12) : Résultats obtenus

Figure (V.13) : Résultats obtenus

Figure (V.14) : Pièce d'assemblage

Figure (V.15) : Contrôle radiographique de la pièce d'assemblage

Figure (V.16) : Calcule des paramètres a partir du logiciel

Figure (V.17) : Résultats obtenus

Figure (V.18) : Résultats obtenus

Nomenclature

CND (NDT) :	Contrôle Non Destructif
AT :	Emission acoustique
ET :	Courant de Foucault
LT :	Etanchéité
MT :	Magnétoscopie
PT :	Ressuage
RT :	Radiographie
UT :	Ultrasons
VT :	Examen visuel
ST :	Interférométrie
IT :	Thermographie
R_e :	la limite de proportionnalité ou limite élastique(MPa)
R_m :	la résistance limite à la traction
A :	L'allongement à la rupture
E :	le module d'Young
v :	le coefficient de Poisson
G :	Le module de cisaillement
K :	la ténacité
Z :	Le numéro atomique (nombre de proton)
A :	Le numéro de masse (nombre de proton+le nombre de neutrons)
N :	Le nombre de neutrons ($N = A - Z$)
I_i :	La lumière transmise par le film
I_t :	La lumière incidente sur le film
U_g :	L'imprécision géométrique
F :	La dimension de la source
d :	La distance du dessus du spécimen au film
D :	La distance du dessus du spécimen à la source
IQI :	Indicateur de Qualité d'Image
M :	L'intensité de la source de rayonnement
T :	Le temps de pose
I :	l'intensité de rayonnement
Gy :	Le GRAY
Q :	Le facteur de qualité
API :	Interface de programmation(<i>Application Programming Interface</i>)
E_{max} :	L'énergie maximale
FFD_{min} :	La distance minimale entre la source et le film

Bibliographie

Ouvrages :

- [1] **BENAROUS Mohamed - Yamani Institute of Technology**
Introduction aux CND - Edition 2013
- [2] **THESE (Défauts de matériaux) I.A.B 2009.**
- [3] **A-F. Gourques - Lorenzon et J - M. Haudin**
Matériaux pour l'Ingénieur - Avril 2010
- [4] **BENCHARIF.K.Mohamed - Yamani Institute of Technology**
Défauts des Matériaux - Edition 2013
- [5] **Yamani Institute of Technology**
RADIOGRAPHIE NIVEAU II – ASNT CORPORATE PARTNER – Edition 2013
- [6] **Balteau NDT - GFD 165 & Unités de commande.**
MANUEL D'UTILISATION ET DE MAINTENANCE
- [7] **Balteau NDT – CERAM 35 & Unités de commande.**
MANUEL D'UTILISATION ET DE MAINTENANCE

Encyclopédies scientifiques :

Encyclopédie Encarta
Wikipedia Encyclopédie

Sites Internet :

<http://izibook.eyrolles.com>
<http://www.pressesdesmines.com>
<https://hal-mines-paristech.archives-ouvertes.fr>
mms2.ensmp.fr

RESUME

Notre travail à pour objectif de développer un programme qui calcule le temps d'exposition des pièces sous le bombardement du rayon X et de faire des expériences réels qui confirment la validation du programme. Les résultats obtenus sont très satisfaisantes.

ABSTRACT

Our work aims to develop a program that calculates the exposure time of the parts under the bombardment of X-ray and to make real experiments that confirm the validation of the program. The results obtained were very satisfactory.

ملخص

إن الهدف من هذا العمل هو تطوير برنامج الذي يقوم بحساب مدة عرض قطع غيار للأشعة السينية و القيام بتجارب حقيقية من أجل التأكد فعالية ودقة البرنامج. النتائج المتحصل عليها جد مرضية.

Introduction

Avions et hélicoptères civils et militaires, moteurs, lanceurs, satellites, missiles, équipements ... l'industrie aéronautique et spatiale propose une gamme complète de produits qu'il faut contrôler tout au long de leur cycle de vie dans une optique de qualité et de sécurité.

Entre l'augmentation du trafic aérien et de la durée de vie des aéronefs, la réduction de leur poids (nouveaux matériaux) et l'apparition d'une forte sensibilité écologique, l'industrie aéronautique et spatiale dans certains pays a su se placer en leader mondial sur de nombreux programmes. L'utilisation des **Contrôles Non Destructifs**, en pleine augmentation est l'une des clés de cette réussite.

Le **Contrôle Non Destructif (C.N.D.)** est un ensemble de méthodes qui permettent de caractériser l'état d'intégrité de structures ou de matériaux, **sans les dégrader**, soit au cours de la production, soit en cours d'utilisation, soit dans le cadre de maintenances. On parle aussi d'« Essais Non Destructifs » (END) ou d'« Examens Non Destructifs ».

Lors de la fabrication, les différents éléments composites du fuselage, des ailes, des voilures et des moteurs sont contrôlés pour vérifier et maîtriser l'apparition de défauts au cours de l'exploitation. Avant tout assemblage, divers examens/contrôles sont réalisés, allant du ressuage à la magnétoscopie en passant par la radiographie et les ultrasons. Les matériaux les plus utilisés dans ce secteur étant des composites, des alliages complexes ou même des céramiques, cela rend les examens et contrôles plus fastidieux à réaliser.

Le secteur du contrôle non destructif dans le domaine de l'aéronautique est régi par la réglementation internationale, ainsi la norme PREN 4179 se propose de décrire la procédure qui établit les exigences minimales de qualification et de certification du personnel impliqué dans le contrôle non destructif (CND). Ces exigences sont relatives à la formation, à l'expérience et aux examens pour le personnel qui exécute le CND dans les industries aérospatiales de fabrication de matériel neuf, de prestations, d'entretien et de réparation.

Après plus de trente années de service, la majorité des avions sont toujours exploités. Pour garantir la sécurité des passagers et des membres de l'équipage en vol, les CND permettent en amont de prédire la résistance des composants face aux diverses dégradations qu'ils peuvent subir ; les deux plus courantes étant la **fatigue** et la **corrosion**.

Certains examens fréquents se déroulent directement sur le tarmac tandis que d'autres nécessitent démontage voire retour en usine. Généralement, on applique des méthodes 'conventionnelles' aux pièces mécaniques des moteurs, train d'atterrissage, tringlerie de commande, etc.

En ce qui concerne les zones d'attache des ailes, des moteurs ou certaines parties du fuselage, les contrôles s'effectueront plus par **radiographie**. Grâce à l'imagerie numérique, il est possible de réduire les doses de rayonnement et ainsi augmenter la surface accessible au personnel.

Les **courants de Foucault** sont utilisés dans les zones rivetées pour principalement déceler la fissuration ou la corrosion dans les panneaux métalliques ou sandwich. Pour détecter des zones corrodées, l'**émission acoustique** peut également être mise en place.

Dans ce travail on va se concentrer sur le contrôle par radiographie, où on va améliorer (faciliter) les étapes de contrôle pour Le personnel qualifié en CND dans le domaine de l'aéronautique.

Nous avons partagé notre travail en cinq chapitres :

- Chapitre I : Intitulé « **Généralités sur le Contrôle Non Destructif** », dans ce chapitre on va présenter une introduction générale sur le contrôle non destructif et ses différentes techniques.
- Chapitre II : « **Les Métaux Et Leurs Propriétés** » Dans cette partie on va jeter un coup d'œil sur les différents matériaux utilisés en industrie aéronautique et leurs propriétés, on parlera aussi des différents défauts de matériaux existants et qui peuvent apparaître de la production à l'exploitation.
- Chapitre III : « **La Radiographie** » Ce chapitre est consacré à la présentation de la technique de radiographie et plus précisément de la méthode des rayons X.
- Chapitre IV : « **Développement De La Méthode De Radiographie** » Dans ce chapitre nous allons présenter notre méthodologie qu'on propose au personnel certifiés en CND.
- Chapitre V : « **Application De Radiographie** » Finalement on procède à une application de radiographie, en interprétant les résultats obtenues.

Chapitre I

Généralités sur le Contrôle
Non Destructif

I.1 Définition

Le **Contrôle Non Destructif (C.N.D)** est un ensemble de méthodes qui permet de caractériser l'état d'intégrité de structures industrielles (y compris des ponts par exemple), sans les dégrader, soit au cours de la production (par exemple : les pièces qui sortent des fonderies ne sont jamais exemptes de défaut), soit en cours d'utilisation (apparition de défaut).

Il faut donc déterminer (à la casse, de façon empirique) quelle taille de défaut est acceptable et ensuite pouvoir les détecter, sans casser la pièce, et la remplacer si besoin est.

On parle aussi d'**Essais Non Destructifs** ou d'**Examen Non Destructifs (E.N.D)**.

Les Contrôles Non Destructif (CND) sont des essais physiques pour l'individuation de l'éventuelle présence de défauts dans une pièce sans l'abîmer ou la détruire en évitant ainsi de la rendre inutilisable.

Les CND ont pour but de localiser les défauts d'une certaine importance et de consentir d'émettre un jugement d'acceptabilité sur les pièces examinées.

La possibilité d'étendre les contrôles à toutes les pièces d'une construction donnée permet de prévenir les incidents.

Voilà qui explique la grande importance et diffusion que les CND ont eue dernièrement.

Le contrôle d'un matériel ou d'un produit peut être effectué non seulement pour détecter des défauts, mais aussi pour la détermination des caractéristiques physiques, l'examen de la structure, l'analyse de la composition. [1]



I.2 Applications et tendances

I.2.1 Champ d'application actuel

À travers son objectif, on aura compris que le contrôle non destructif est essentiel pour la bonne marche des industries qui fabriquent, mettent en oeuvre ou utilisent les matériaux, les produits, les structures de toutes natures. À l'heure où la qualité est devenue un impératif difficilement contournable, le champ d'application des CND ne cesse de s'étendre au-delà de son domaine d'emploi traditionnel constitué par les industries métallurgiques et les activités où la sécurité est primordiale, telles que le nucléaire et l'aéronautique. Après le contrôle des biens d'équipements, vient celui des biens de consommation. La nature des défauts que l'on cherche à détecter se diversifie du même coup ; on recherche les défauts technologiques ponctuels graves, comme ceux inhérents à la fabrication et à l'utilisation des métaux (fissure de fatigue), mais aussi désormais des défauts d'aspect (taches sur une surface propre) et des corps étrangers nuisibles (éclats de verre dans un emballage alimentaire).

I.2.2 Tendances et évolution

Le domaine des CND, largement intégré à la politique qualité d'une entreprise, évolue en se rapprochant de celui de l'instrumentation car il ne suffit plus aujourd'hui de détecter un défaut mais il est nécessaire de le caractériser et le dimensionner. Il faut aussi imaginer des techniques et procédés non destructifs aptes à mettre en évidence des hétérogénéités physiques complexes ou des irrégularités de propriétés telles que, par exemple, des variations de microstructure dans un métal, des variations de texture ou de rugosité sur une surface, des variations de propriétés électromagnétiques sur une bande.

Il en résulte l'arrivée sur le marché, d'année en année, d'appareillages plus performants, plus fiables et surtout plus faciles à utiliser dans le cadre du respect de procédures de contrôles très strictes, bien que tous ses objectifs soient souvent difficiles à atteindre pour des raisons physiques ou économiques.

I.2.3 Périmètre d'application

De nos jours, la qualité et la gestion des risques sont deux paramètres que les industriels fabriquant, mettant en oeuvre ou utilisant les matériaux, les produits ou les structures de toutes natures ne peuvent négliger. Les CND sont donc devenus essentiels en quelques dizaines d'années ce qui explique que leur périmètre d'application ne cesse de s'accroître au-delà du domaine d'emploi traditionnel constitué par les industries métallurgiques et les activités où la sécurité est primordiale, telles que le nucléaire et l'aéronautique. Pour en savoir plus sur les secteurs concernés...

Bien que la nature des défauts recherchés à détecter se soit également diversifiée, le contrôle non destructif d'un produit ou d'un objet peut toujours être effectué à trois stades différents de son cycle de vie, conduisant ainsi à plusieurs types d'application se différenciant à la fois par le contexte industriel et par la nature du contrôle lui-même.

En amont de toute fabrication, le CND peut être utilisé pour analyser un ouvrage, une installation, un lot de pièces et ainsi vérifier ses spécifications de qualité en comparaison de celles définies dans le cahier des charges. Qu'il s'agisse du choix du procédé, du choix des paramètres de réglage, de l'étalonnage, de la présentation et de l'archivage des résultats obtenus, c'est avant tout l'aspect procédure de la démarche qui est important. À ce stade, il s'agit de détecter des défauts mais aussi bien souvent d'en définir la nature et les dimensions.

Au cours de la fabrication, le CND joue le rôle d'outil de contrôle d'un procédé souvent automatisé et impliquant un appareillage installé sur la ligne de production. Il présente alors une grande robustesse, une réaction rapide, un coût d'exploitation faible et, malgré tout, une bonne fiabilité. Dans ce type de contrôles, les défauts sont généralement bien identifiés et le fonctionnement aboutit à un repérage ou un tri des produits défectueux.

Lorsque l'appareil de CND ne peut pas être installé sur la ligne de production, des bancs de contrôles annexes, important en taille et en coût d'investissement, peuvent être utilisés.

Durant son utilisation, le CND s'effectue lors de maintenance ou à la suite de détection d'anomalies de comportement du matériel. A la vue de l'importance des conséquences dues à une non détection d'un défaut grave, il est primordial qu'il soit d'une très grande fiabilité. Pour ce type de contrôle, il convient de pouvoir estimer le mieux possible la nature et les dimensions des défauts pour pouvoir en apprécier la nocivité ; il faut disposer aussi d'une grande reproductibilité de l'examen non destructif, de façon à pouvoir suivre l'évolution du dommage au cours du temps.[1]

I.3 Secteurs concernés

I.3.1 Aéronautique – Aérospatiale

Avions et hélicoptères civils et militaires, moteurs, lanceurs, satellites, missiles, équipements ... l'industrie aéronautique et spatiale propose une gamme complète de produits qu'il faut contrôler tout au long de leur cycle de vie dans une optique de qualité et de sécurité.

Entre l'augmentation du trafic aérien et de la durée de vie des aéronefs, la réduction de leur poids (nouveaux matériaux) et l'apparition d'une forte sensibilité écologique, l'industrie aéronautique et spatiale de quelques pays a su se placer en leader mondial sur de nombreux programmes. L'utilisation des Contrôles Non Destructifs, en pleine augmentation est l'une des clés de cette réussite.



Lors de la fabrication, les différents éléments composites du fuselage, des ailes, des voilures et des moteurs sont contrôlés pour vérifier et maîtriser l'apparition de défauts au cours de l'exploitation. Avant tout assemblage, divers examens/contrôles sont réalisés, allant du ressuage à la magnétoscopie en passant par la radiographie et les ultrasons. Les matériaux les plus utilisés dans ce secteur étant des composites, des alliages complexes ou même des céramiques, cela rend les examens et contrôles plus fastidieux à réaliser.

Après plus de trente ans de service, la majorité des avions sont toujours exploités.

Pour garantir la sécurité des passagers et des membres de l'équipage en vol, les CND permettent en amont de prédire la résistance des composants face aux diverses dégradations qu'ils peuvent subir ; les deux plus courantes étant la fatigue et la corrosion.

Certains examens fréquents se déroulent directement sur le tarmac tandis que d'autres nécessitent démontage voire retour en usine. Généralement, on applique des méthodes 'conventionnelles' aux pièces mécaniques des moteurs, train d'atterrissage, tringlerie de commande, etc.

En ce qui concerne les zones d'attache des ailes, des moteurs ou certaines parties du fuselage, les contrôles s'effectueront plus par radiographie. Grâce à l'imagerie numérique, il est possible de réduire les doses de rayonnement et augmenter la surface accessible.

Les courants de Foucault sont utilisés dans les zones rivetées pour principalement déceler la fissuration ou la corrosion dans les panneaux métalliques ou sandwich. Pour détecter des zones corrodées, l'émission acoustique peut également être mise en place.

Pour compléter la gamme de contrôles, la shearographie et l'interférométrie laser sont, lors de l'application d'une contrainte mécanique ou thermique, largement employées. [1]

I.3.2 Energie – Pétrochimie

Sur ce marché très concurrentiel de l'Énergie et de la Pétrochimie, les différents acteurs de la production énergétique (nucléaire, énergies fossiles, énergies renouvelables) ont aujourd'hui plus que jamais recours aux CND pour assurer une qualité et une sécurité maximale de leurs produits et installations.

Dans le contexte actuel d'une maîtrise des risques et de la qualité de plus en plus importante, le secteur de l'énergie et de la pétrochimie des pays développés a su se placer en leader mondial sur de nombreux projets. L'utilisation des Contrôles Non Destructifs, en pleine augmentation est l'une des clés de cette réussite.

En effet, qu'il soit question d'énergies nucléaire, fossiles ou renouvelables, les matériaux et structures de production/extraction doivent être contrôlés durant l'ensemble de leur cycle de vie.

Dès la production, de nombreux contrôles sont réalisés sur les pièces fabriquées, allant du ressuage (ex. de pièces/éléments) aux courants de Foucault (ex. de pièces/éléments) en passant par la magnétoscopie (ex. de pièces/éléments), les ultrasons (ex. de pièces/éléments) et l'émission acoustique (ex. de pièces/éléments).

En phase d'utilisation, divers cycles de maintenance sont effectués pour s'assurer de la bonne tenue dans le temps des structures et installations et ainsi garantir une qualité optimum et une sécurité permanente des opérateurs. Une fois de plus, toute la palette CND est sollicitée. Contrôle de ... (ex. de structures/méthode) en parallèle de ... (ex. de pièces/éléments).

I.3.3 Ferroviaire

La moindre défaillance du matériel assurant le roulement et le guidage pouvant conduire à une catastrophe, la nécessité de vérifier et déceler d'éventuelles dégradations grâce aux CND, est depuis des années une constante du ferroviaire.

Dans le contexte actuel d'une maîtrise des risques et de la qualité de plus en plus importante, le secteur ferroviaire a eu une grande évolution sur de nombreux projets. L'utilisation des Contrôles Non Destructifs, en pleine augmentation est l'une des clés de cette réussite.

I.3.4 Fonderie

Née avec les civilisations, la fonderie a accompagné leurs progrès jusqu'à nos jours.

Toujours d'avant-garde sur les grands marchés tels que l'aéronautique, l'automobile, l'énergie ou le ferroviaire, elle l'est aussi dans le domaine des CND.



Dans le contexte actuel d'une maîtrise des risques et de la qualité de plus en plus importante, le secteur de la Fonderie mondial sur de nombreux projets. L'utilisation des Contrôles Non Destructifs, en pleine augmentation est l'une des clés de cette réussite.

I.3.5 Produits en acier

L'acier est un alliage métallique constitué essentiellement de fer (typiquement très majoritaire et représentant plus de 98% du métal) et de carbone (typiquement moins de 2% du métal), auxquels sont ajoutés en faibles quantités d'autres composants minoritaires en fonction des propriétés recherchées. En fonction de ses caractéristiques chimiques, l'acier peut être rangé en trois catégories, à savoir :

- l'acier au carbone ;
- l'acier inoxydable ;
- l'acier spécial ou allié.



Dans le contexte actuel d'une maîtrise des risques et de la qualité de plus en plus importante, le secteur des Produits en Acier français a su se placer en leader européen et mondial sur de nombreux projets. L'utilisation des Contrôles Non Destructifs, en pleine augmentation est l'une des clés de cette réussite.

I.3.6 Autres secteurs

Autant de secteurs pour lesquels les CND s'avèrent indispensable à la qualité, la sécurité et la compétitivité comme :

Automobile, Bâtiment, travaux publics, chaudronnerie, construction navale, forge, mécanique, métallurgie, métiers de l'art, nucléaire, sidérurgie, etc....

I.4 Objectifs du CND

Le contrôle non destructif a pour objectif, comme son nom l'indique, de contrôler l'état des pièces industrielles sans pour autant que les examens correspondants ne puissent nuire à leur utilisation future. Ceci peut correspondre à deux types de contrôles : l'estimation d'un paramètre constitutif de la pièce comme par exemple l'épaisseur d'une paroi, la distance à un objet, les propriétés électromagnétiques constitutives du matériau ; la recherche d'une rupture de ces paramètres. Dans le deuxième cas, il s'agit en général de défauts, qui peuvent être par exemple des fissures, des inclusions, des porosités, des effets de la corrosion ou de la fatigue mécanique. Cette procédure de contrôle se produit souvent plusieurs fois au cours de la vie d'une pièce et doit satisfaire au mieux les critères suivants :

I.4.1 Rapidité d'exécution

Il faut que le contrôle soit rapide pour qu'il ne soit pas trop pénalisant à la fois en termes d'immobilisation physique de chaque pièce, mais aussi au niveau des coûts que sont le temps de travail de la main-d'oeuvre ou les frais de fonctionnement de l'usine.

I.4.2 Coût

Le contrôle qualité représente sur les pièces complexes un coût non négligeable et qui doit être minimisé dans la mesure du possible.

I.4.3 Reproductibilité

La mesure ne doit pas souffrir des circonstances extérieures : une même pièce contrôlée plusieurs fois doit toujours donner le même résultat.

I.4.4 Fiabilité

Le contrôle doit remplir son cahier des charges, et par exemple détecter tous les défauts qu'il est censé être capable de détecter, indépendamment des conditions d'inspection.

I.4.5 Sensibilité

La sensibilité est le rapport des variations de la mesure et du mesurande. Plus la sensibilité est grande, plus les petites variations du mesurande sont détectables, comme par exemple les défauts de faibles dimensions.

I.4.6 Résolution

La résolution est la plus petite variation de signal pouvant être détecté, par exemple la dimension du plus petit défaut. Usuellement est défini le pouvoir de résolution, ici la dimension du plus petit défaut visible. Le pouvoir de résolution est fort si cette dimension est petite. Parmi ces six critères, il est naturel de penser que la rapidité, la reproductibilité et la sensibilité sont respectivement fortement liées au coût, à la fiabilité et à la résolution. Il est très souvent nécessaire de consentir à des compromis entre les trois groupes ainsi définis.

I.5 Principes De Détection Des Défauts

Les méthodes de contrôle non destructif sont fondées sur la déformation du champ d'une grandeur physique par une discontinuité. Les phénomènes physiques comme l'atténuation ou diffraction des rayons X, réflexion ou diffraction des ultrasons, perturbation des courants de Foucault ; sont à la base des essais non destructifs où ils peuvent servir à caractériser les matériaux. En effet, par CND on sous-entend toujours qu'il ne s'agit non pas d'une simple mesure d'une grandeur physique, mais d'un contrôle d'homogénéité. 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.

La norme EN 473 définit un certain nombre de symboles pour les méthodes usuelles (ci-dessous). Ces symboles correspondent généralement à l'abréviation de la désignation anglaise de la méthode, par exemple, le symbole **PT** pour le ressuage vient de **P**énétrant **T**esting. La norme EN 473 une norme AFNOR européenne (EN) et française (NF) ayant pour objet la qualification et l'agrément du personnel pour les contrôles non destructifs, en date d'avril 2006, dans la série Aérospatiale. Elle a pour équivalence NAS 410, une nouvelle norme mondiale unique en vigueur.[1]

Méthode END	symbole
Emission acoustique	AT
Courants de Foucault	ET
Etanchéité	LT
Magnétoscopie	MT
Ressuage	PT
Radiographie	RT
Ultrasons	UT
Examen visuel	VT
Interférométrie de Speckle	ST
Thermographie	IT

Tableau (I.1) : Les techniques du control non destructif

I.6 Différentes techniques du CND

Les techniques CND diffèrent généralement par l'énergie employée : énergie mécanique (ultrasons, ressuage), électromagnétique (magnétoscopie, courants de Foucault) ou thermique (thermographie infrarouge). Cependant, quelle que soit la méthode employée, un processus de détection de défauts est généralement mis en place. Il est constitué de deux étapes principales : la détection et la localisation des défauts (décider que le système est en défaut ou non et déterminer quelle partie du système est affectée) et l'identification (estimer l'ampleur et le types des défauts).

Le terme défaut est ambigu, relatif et peu précis, mais sa connotation négative évoque bien le rôle que joue le contrôle non destructif dans la recherche de la qualité.

En fait, détecter un défaut dans une pièce, c'est physiquement, mettre en évidence une hétérogénéité de matière, une variation locale de propriété physique ou chimique préjudiciable au bon emploi de celle-là. Cela dit, on a l'habitude de classer les défauts en deux grandes catégories liées à leur emplacement : les défauts de surface, les défauts internes.

Du fait que les origines et les types des défauts sont multiples, plusieurs techniques du CND ont été développées pour répondre aux différentes problématiques rencontrées. Le choix d'une méthode du CND dépend d'un grand nombre de facteurs tels que la nature des matériaux constituant les pièces à contrôler, la nature de l'information recherchée (détection ou mesure, position ou forme de défaut...), le type du contrôle à effectuer (contrôle en ligne sur pièce mobile, possibilité de contact ou non avec la pièce...) et les problèmes économiques.

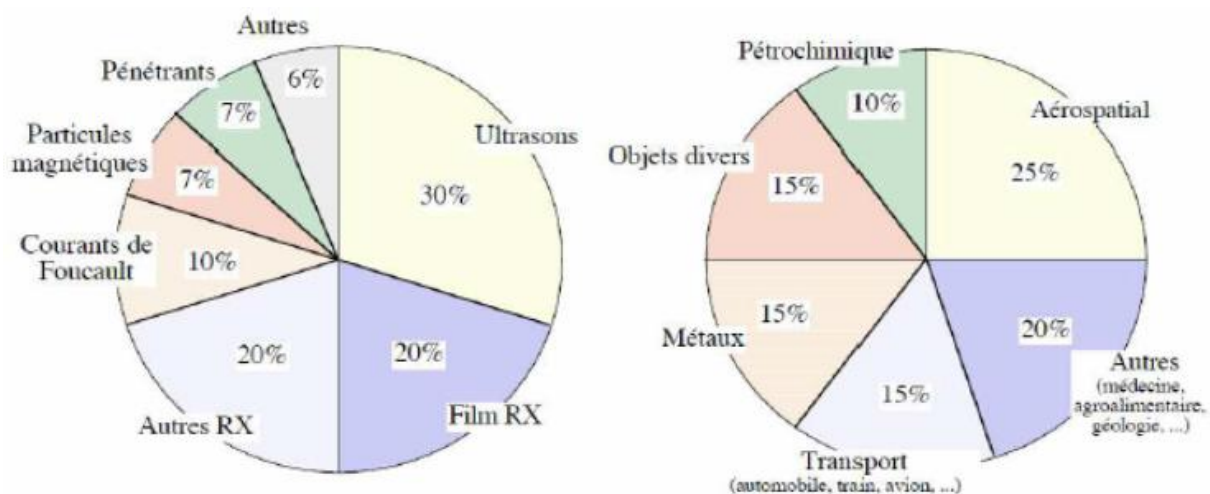


Figure (I.1) : Les principales techniques du CND

I.6.1 Examen visuel et contrôle optique automatique

Les procédés optiques constituent un type de techniques qu'il convient de séparer en deux catégories, selon que le contrôle soit automatisé ou non. L'examen visuel, contrôle ancestral le plus élémentaire, il est le plus ancien des contrôles non destructifs et la base des contrôles optiques non automatisés. Il peut être aidé, par un éclairage laser ou classique, une loupe binoculaire, ou un système de télévision.

Il reste cependant sujet aux inconvénients liés à l'œil humain, c'est-à-dire une faible productivité et une certaine subjectivité, entraînant un manque de fiabilité. De façon automatique, sont réalisées en général des acquisitions d'images par balayage laser ou par

utilisation de barrettes de capteurs optiques, suivies de traitement d'images tel que le seuillage ou la reconnaissance de formes. Ce type de contrôle, beaucoup plus efficace, est cependant beaucoup plus complexe à mettre en œuvre et par conséquent restreint à des applications très particulières.

L'examen visuel est une méthode de contrôle non destructif dont la mise en œuvre est souvent simple mais qui est très riche d'enseignements car elle permet d'expliquer le mécanisme d'un contrôle.

Il s'agit d'observer la surface d'un objet pour y déceler d'éventuelles anomalies.

Cette observation nécessite une source de lumière d'intensité et de longueur d'onde compatibles avec l'aptitude naturelle de l'œil de l'opérateur exécutant l'examen.

Cette technique est essentielle lors du contrôle non destructif. L'état extérieur d'une pièce peut donner des informations essentielles sur l'état de celle-ci : des défauts évidents (comme des pliures, des cassures, de l'usure, de la corrosion ou fissures ouvertes). Des défauts cachés sous-jacents présentant une irrégularité sur la surface extérieure peut être une indication de défaut plus grave à l'intérieur. Cette technique est essentielle lors du contrôle non destructif. L'état extérieur d'une pièce peut donner des informations essentielles sur l'état de celle-ci : des défauts évidents (comme des pliures, des cassures, de l'usure, de la corrosion ou fissures ouvertes). Des défauts cachés sous-jacents présentant une irrégularité sur la surface extérieure peut être une indication de défaut plus grave à l'intérieur.

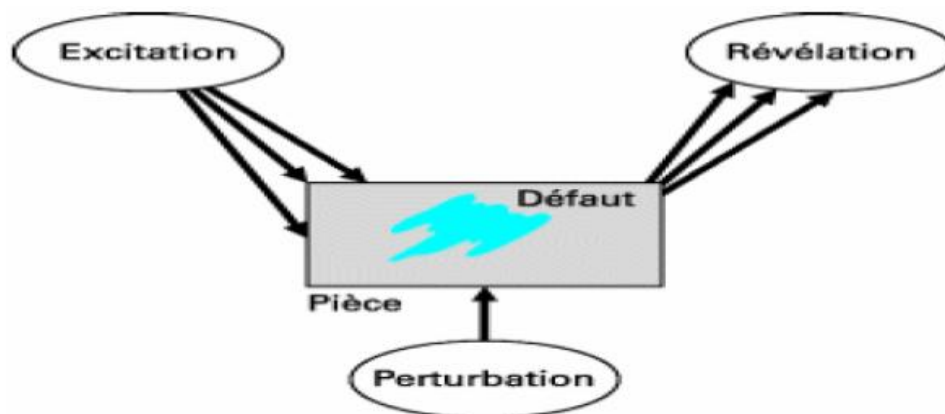


Figure (I.2) : Processus mis en jeu lors d'un examen visuel

I.6.2 Ressuage

Cette méthode complète l'examen visuel en faisant apparaître des défauts de surface dans un contraste coloré ou fluorescent. Son principe est relativement simple et se déroule en plusieurs étapes. La première consiste à bien nettoyer la pièce à contrôler.

Un liquide coloré ou fluorescent dit "pénétrant" est ensuite appliqué sur la surface à contrôler.

Il va s'infiltrer à l'intérieur des anomalies (fissures, porosités...).

L'excès de pénétrant est ensuite éliminé par un lavage adapté. La surface est alors recouverte d'une fine couche de "révélateur" qui absorbe le pénétrant contenu dans les anomalies et donne une tache colorée en surface plus large que l'anomalie, permettant ainsi de la localiser.

On dit alors que le révélateur fait "ressuer" le pénétrant. Ces indications sont alors visibles à l'œil nu. Dans certaines industries, on utilise un pénétrant fluorescent qui est révélé par un éclairage sous UV.

Le champ d'application du ressuage est très vaste car le procédé est simple d'emploi et permet de détecter la plupart des défauts débouchant en surface sur les matériaux métalliques non poreux, ainsi que sur d'autres matériaux, à condition toutefois qu'ils ne réagissent pas chimiquement avec le pénétrant.

La méthode (par ressuage) est basée sur la capacité de certains liquides de:

- pénétrer par capillarité dans les défauts affleurant à la surface de la pièce examinée.
- possibilité de relever les endroits de la surface de la pièce où le liquide a pénétré.

Le principe de l'examen est le suivant :

- sur la surface de la pièce on applique un liquide coloré particulier (pénétrant), qui s'insinue dans les discontinuités superficielles présentes;
- par la suite, après avoir nettoyé la surface de l'excès de pénétrant, on applique une substance (révélateur), qui absorbe le pénétrant lequel en s'insinuant dans les discontinuités, crée un signal porteur d'information sur la discontinuité elle-même.

Le contrôle non destructif par ressuage a pour objectif de détecter des défauts débouchant en surface sur des matériaux non absorbants.

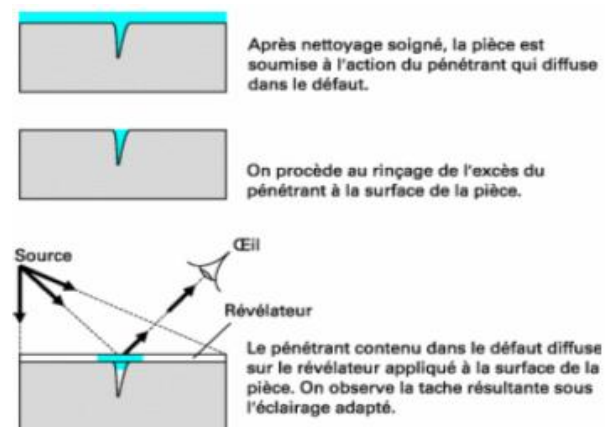
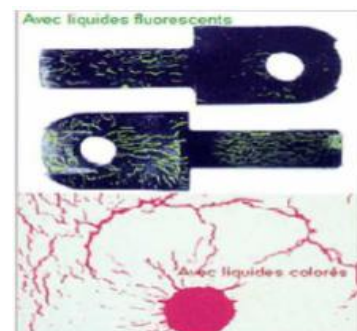


Figure (I.3) : Principe de contrôle par ressuage

Figure (I.4) : Indication obtenues à l'aide de liquides pénétrants



La méthode requiert l'utilisation de:

- liquide pénétrant en mesure de pénétrer par capillarité dans les défauts affleurant à la surface de la pièce en examen (et non pas grâce à la force de gravitation);
- révélateur (substance qui, appliquée à la pièce après l'examen et l'élimination du pénétrant, permet la fuite du pénétrant resté dans le défaut).

Les principaux avantages de la méthode sont:

- elle est applicable à tous les matériaux (ferromagnétiques et non);
- elle peut être exécutée aussi sur pièces ou détails peu accessibles;
- elle est d'exécution et d'interprétation relativement faciles;
- elle nécessite d'un équipement de coût très réduit.

Les principales limites de l'examen par ressuage sont:

- Il décèle seulement des discontinuités aboutissant à la surface;
- Les discontinuités contenant des substances étrangères (saletés, oxydes, ...) ne sont pas décelées (car le liquide ne peut pas y pénétrer);
- La surface de la pièce doit être préparée plus soigneusement que les autres méthodes.

Les limitations du contrôle par ressuage sont liées au matériau lui-même : trop forte rugosité de surface, impossibilité d'employer les produits classiques qui endommageraient sa surface. Les défauts non débouchant ne peuvent être vus, de même que les fissures renfermant des corps susceptibles d'interdire l'entrée du pénétrant tels que peintures, oxydes.

Le procédé lui-même est relativement lent, coûteux en temps. Il faut enfin prendre en compte, dans le coût du contrôle, la consommation des produits de ressuage dont l'utilisation peut nuire à l'environnement.

I.6.3 Magnétoscopie

C'est une technique qui révèle les défauts débouchant ou sous-cutanés. Toutefois, elle ne s'applique qu'aux matériaux et alliages ferromagnétiques (fer, acier, fonte...).

L'examen par magnétoscopie consiste à soumettre la pièce à un champ magnétique de valeur définie en fonction de la pièce. Une poudre magnétique est ensuite projetée à la surface et se répartit de façon homogène si la pièce est saine. Les discontinuités superficielles provoquent à leur endroit des fuites magnétiques.

Lorsqu'un défaut est présent dans la pièce au voisinage de la surface, l'orientation du flux de l'induction magnétique est modifiée localement et son intensité augmente en surface. Il apparaît alors une concentration de particules magnétiques qui révèle la présence du défaut comme l'illustre la figure.

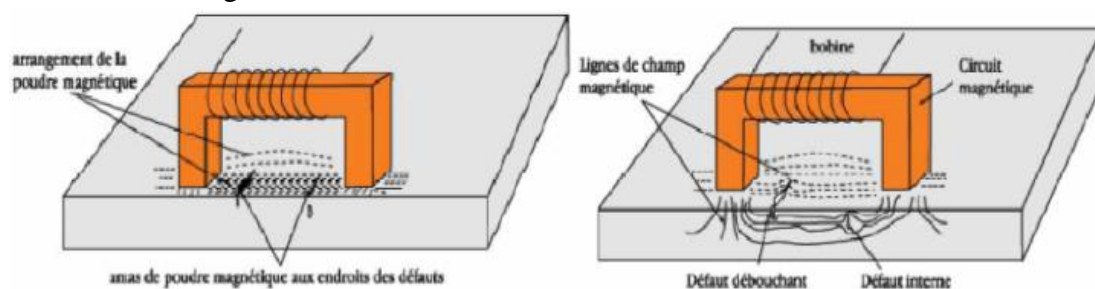


Figure (I.5) : Principe de la magnétoscopie

Le contrôle non destructif par magnétoscopie a pour objectif de détecter les défauts de surface ou sous-jacents.

Figure (I.6) : Indication obtenues à l'aide de magnétoscopie



Le contrôle non destructif par particules magnétiques est basé sur le fait que lorsque la pièce à examiner est magnétisée en coïncidence de discontinuités superficielles ou sub-superficielles on obtient une fuite de flux magnétique (flux dispersé).

Le flux dispersé a une intensité suffisante pour produire, en utilisant des révélateurs spéciaux, l'indication de la discontinuité elle-même sous forme d'une trace visible à l'œil nu.

Grâce à cette méthode, des discontinuités qui généralement ont des surfaces très rapprochées, ou bien même en contact intime et donc difficilement perceptibles à l'œil nu, deviennent visibles grâce à l'accumulation du révélateur (particules magnétiques).



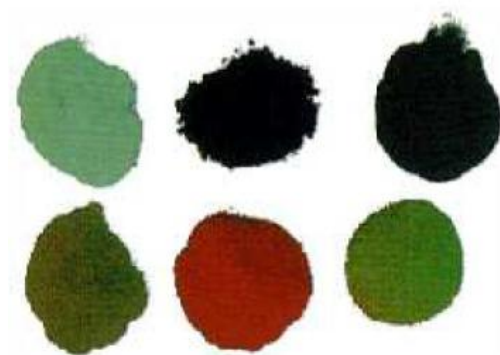
Figure (I.7) : Examen magnétoscopique

L'examen magnétoscopique, applicable seulement à des matériaux magnétisables, est basé sur les facteurs suivants:

- ✓ possibilité de magnétiser la pièce en examen;
- ✓ variations de champ magnétique générées par les discontinuités dans la pièce ;
- ✓ possibilité de relever les variations superficielles et sub-superficielles du champ magnétique dans la pièce.

La méthode requiert l'utilisation de:

- appareils pour la magnétisation de la pièce;
- poussières (particules) magnétiques à pulvériser sur la pièce pour relever les variations de champ magnétique.



Poussières magnétiques



Appareils de magnétisation (électro-aimant)

Figure (I.8) : Poussières magnétiques et Appareils de magnétisation

I.6.4 Ultrasons

Les ultrasons sont des vibrations mécaniques qui se propagent dans la matière. Le principe consiste à émettre une onde ultrasonore (par un transducteur) qui se propage dans la pièce à contrôler et se réfléchit, à la manière d'un écho, sur les obstacles qu'elle rencontre (défauts, limites de la pièce). Les échos sont analysés sur un écran ou traités dans une chaîne de mesure. Le signal est maximal lorsque le défaut est perpendiculaire aux ondes émises.

Les ultrasons consistent en une onde de pression qui se propage dans le matériau. Il existe plusieurs types d'ondes, qui ont des déplacements et des propriétés différentes comme par exemple :

- les ondes P (principales)
- les ondes S (secondaires)
- les ondes de Rayleigh

Les ondes principales sont les plus « classiques », ce sont avec elles que sont effectués les tests par écho. Les ondes secondaires, qui arrivent temporellement après, sont des ondes de cisaillements, conséquence des ondes principales. Les ondes de Rayleigh sont quant à elles des ondes n'existant qu'en surface des matériaux. Elles ont comme propriété d'avoir une vitesse de propagation proportionnelle au module de Young (le module de Young est la constante qui relie la contrainte de traction ou de compression et la déformation pour un matériau élastique isotrope).

Pour générer ces ondes ultrasonores, il existe plusieurs techniques :

- les transducteurs mono élément
- les transducteurs multiéléments
- le laser
- les EMAT (Electro Magnetic Acoustic Transducer)

Les transducteurs mono élément sont souvent des piézoélectriques, dont la vibration crée l'onde ultrasonore. Pour la transmettre au milieu à contrôler, il faut un contact parfait entre le piézoélectrique et le matériau. Afin d'assurer ce contact, un liquide de couplage est utilisé.

Les transducteurs multi éléments sont également des piézoélectriques. La combinaison des ondes de chacun des éléments permet de créer une nouvelle onde focalisée permettant une localisation plus précise. Comme dans le cas des mono éléments, un liquide de couplage est utilisé pour assurer un contact entre le matériau à inspecter et le transducteur.

Les ultrasons par laser est une technique de génération à distance. Le laser va chauffer en un point du matériau, provoquant une dilatation et créant ainsi l'onde sonore.

La technologie EMAT permet de générer des ondes ultrasonores au sein du matériau et de créer une onde sonore se propageant perpendiculairement à la surface du matériau. A priori c'est une technique sans contact, mais en pratique, afin de limiter les pertes liées à la distance, la sonde est placée en contact avec la pièce.

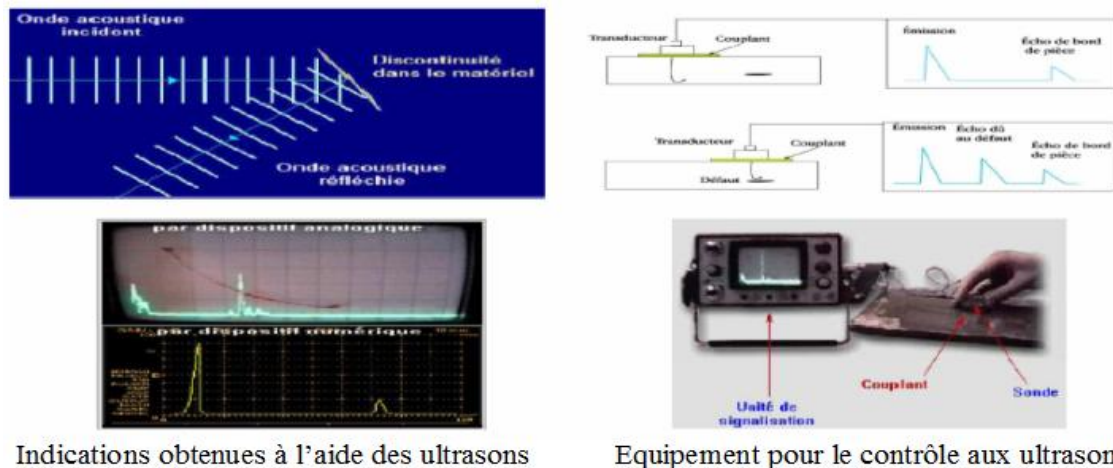


Figure (I.9) : Principe des ultrasons

Le contact entre le transducteur et la cible n'est jamais parfait; il existe une couche d'air les séparant. La quasi-totalité de l'énergie émise par le transducteur à l'interface air matériau ne pénètre pas à l'intérieur du matériau. Il y a ainsi nécessité de déposer un couplant (eau, huile par exemple) entre le transducteur et le matériau.

Le contrôle aux ultrasons est basé sur les phénomènes de la réflexion qu'une onde sonore subit quand, en voyageant à l'intérieur d'un matériau, elle rencontre un obstacle à sa propagation.

L'examen requiert l'utilisation d'un système de contrôle composé de:

- une sonde (émet les faisceaux sonores)
- une unité de signalisation (révèle sur écran la réflexion du faisceau)

Le faisceau d'ultrasons émis par la sonde traverse la pièce et, une fois atteint la paroi du fond, il se reflète, retourne à la sonde et l'écran le signale.

Si durant son trajet le faisceau rencontre une discontinuité, celle-ci est mise en évidence par la réflexion anticipée qui en résulte.

La technique par ultrasons permet un examen immédiat de la pièce en des temps d'exécution extrêmement réduits.

Elle est de facile exécution et résulte particulièrement adaptée à la réalisation de systèmes automatiques ou semi-automatiques en ce que la discontinuité est décelée par la présence ou absence du signal des ondes réfléchies.

Les principaux désavantages du contrôle par ultrasons sont:

- requiert une bonne accessibilité à la pièce à contrôler;
- faible précision dans l'évaluation de la hauteur de la discontinuité;
- difficulté à repérer des discontinuités superficielles;
- non adaptée au contrôle de matériaux à haute atténuation acoustique.

I.6.5 Radiographie

La radiographie par transmission consiste à envoyer un rayonnement de haute énergie dans le matériau à étudier. La quantité de rayonnement absorbé dépend de la densité du matériau traversé. L'image de la zone radiographiée donne donc la densité totale traversée par le rayonnement. Un matériau étranger, une absence de matériau ou des inhomogénéités importantes seront donc révélés à travers ce système.

Le principe de la radiographie est le même que pour le domaine médical. La méthode met à profit l'absorption par la matière des rayonnements électromagnétiques ionisants.

L'examen de la structure ou de l'état interne d'un objet par radiographie consiste à le faire traverser par un rayonnement électromagnétique de très courte longueur d'onde (rayon X, ou γ) et à recueillir le rayonnement résiduel non absorbé sur un récepteur approprié, un film dans la plupart des cas ou capteur électronique du type amplificateur de brillance ou autre. [1]

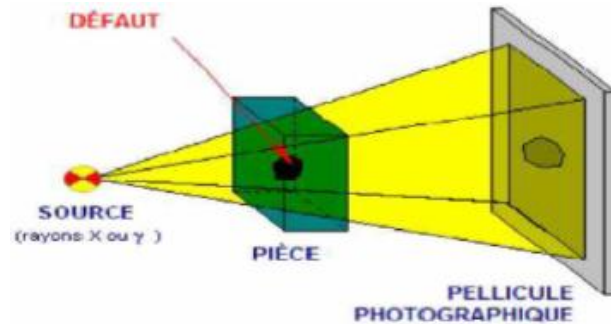


Figure (I.10) : Principe de la radiographie

a- Principe de l'examen radiographique :

L'examen à raide de radiations est basé sur les facteurs suivants:

- capacité des radiations de traverser la matière
- absorption différente des radiations de la part du corps en examen
- possibilité d'évaluer ces différences d'absorption.

L'examen comporte donc l'utilisation de:

- une source de radiations.
- un révélateur de radiations (pellicule, ..).

La radiographie est un document constitué d'une pellicule photographique sur laquelle est enregistrée l'image d'un objet traversé par des radiations.

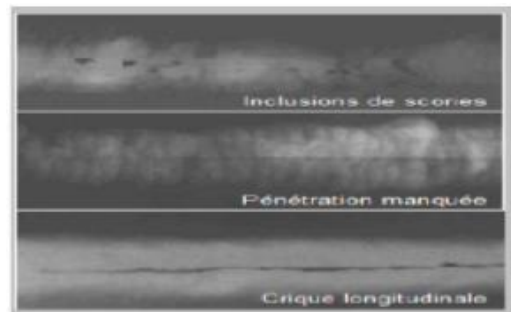


Figure (I.11) : Image de pellicule impressionnée par un contrôle radiographique

La technique radiographique permet une réelle vision de la section de la pièce (image photographique), permettant l'examen de nombreux types de matériaux, même d'épaisseurs très élevées.

b- Désavantages de la radiographie :

Les principaux désavantages de la technique radiographique sont:

- requiert l'accessibilité de la pièce des deux côtés pour pouvoir mettre en position la source et la pellicule;
- non adaptée à mesurer la profondeur de la discontinuité et à repérer les discontinuités bidimensionnelles si elles sont obliques par rapport à l'axe du faisceau;
- la procédure du processus de développement résulte plutôt lente par rapport à la technique avec ultrasons;

- requiert des équipements complexes;
- problèmes de sécurité par la présence de radiations et sources radioactives.

c- Radioprotection :

Les rayonnements ionisants sont susceptibles d'avoir des effets nocifs sur l'organisme et demandent d'autant plus d'attention que ces effets ne sont pas immédiats.

Les pouvoirs publics ont mis en place tout un dispositif réglementaire visant à protéger les personnes contre les dangers des rayonnements. En contrôle par radiographie, les risques sont essentiellement liés à l'irradiation. En conséquence des précautions prises dans la fabrication des sources radioactives à base de radioéléments, les risques de contamination sont nuls. Les moyens de protection nécessitent la mesure des rayonnements par divers moyens.

d- Appareillage individuel :

Les personnes affectées à des travaux sous rayonnement ionisant doivent porter lorsqu'elles sont exposées, au moins un film dosimétrique au niveau de la poitrine et, dans certains cas, un second au niveau des poignets. Ce film doit être choisi en fonction des types de rayonnements auxquels le personnel est soumis. Ces films dosimétriques sont développés une fois par mois. Cela permet de comptabiliser les doses totales reçues par le personnel sur une longue période de temps mais il est clair que la sécurité exige de pouvoir disposer de moyens permettant de suivre les doses reçues avec une fréquence beaucoup plus rapprochée, notamment de faire le point à l'issue de toute utilisation importante. Pour ce faire, les constructeurs spécialisés proposent toute une gamme de dosimètres individuels permettant de mesurer les débits de dose instantanée, la dose reçue au cours d'une intervention, enfin, la dose journalière. Ces données peuvent être transférées via un lecteur approprié vers un micro-ordinateur pour exploitation et archivage.

e- Appareillage portatif :

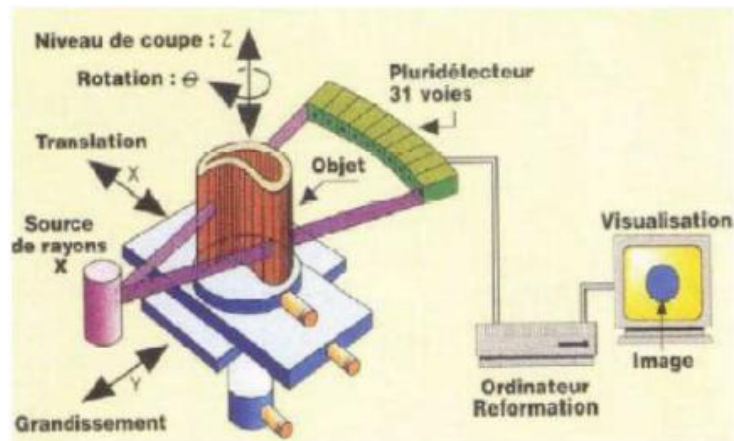
Ces appareils permettent de mesurer des débits de dose, ce qui, au-delà des besoins de la radioprotection, peut servir aussi au calcul des temps de pose. Les plus utilisés sont les appareils à base de chambres d'ionisation, dont le principe physique est la mesure du niveau d'ionisation d'un gaz, constituées en général par un volume de quelques dizaines à quelques centaines de centimètres cubes d'air ou d'un autre gaz contenus dans une cavité dont les parois sont équivalentes en absorption aux tissus humains. Il existe d'autres type d'appareils pour mesurer ces débits de dose basés soit toujours sur le principe d'ionisation d'un gaz (compteurs Geiger Müller, compteurs proportionnels), soit sur celui de la conversion photon X ou γ – photon lumineux (compteurs à scintillations).

f- Tomographie X :

De par son principe, la radiographie ne permet pas d'avoir d'information sur la localisation du défaut en profondeur dans la pièce examinée. Il faut pour cela réaliser plusieurs clichés sous des angles de tir différents, ce qui n'est pas toujours possible.

Un autre moyen est la tomographie industrielle. Elle a le même principe que le scanner médical. Elle consiste à reconstruire une coupe de la pièce par des algorithmes complexes à partir d'une succession d'acquisitions suivant des angles différents. La répétition de ce processus selon différentes hauteurs de tir permet d'obtenir une image 3D virtuelle complète de l'objet.

Figure (I.12) : Principe de la tomographie X



L'essor de cette méthode est essentiellement dû aux progrès de l'informatique et à l'augmentation des capacités de traitement, que ce soit dans le domaine médical ou industriel.

Le champ d'application de la radiographie est très vaste ; c'est en effet la technique retenue lorsqu'il s'agit de mettre clairement en évidence et de dimensionner des hétérogénéités à l'intérieur des objets de toute nature, aussi bien au stade de la fabrication qu'à celui des contrôles de maintenance.

Les inconvénients principaux de cette technique sont :

- Coût de mise en oeuvre des dispositifs et procédures de protection du personnel;
- Réglementation souvent très contraignante (transport et stockage des sources radioactives,...).

I.6.6 Thermographie

La thermographie repose sur l'étude de la diffusion de la chaleur dans la cible à contrôler.

Une quantité de chaleur est une quantité d'énergie stockée dans la matière et la température en est un indicateur mesurable. La thermographie consiste en l'interprétation des cartes thermiques (thermogrammes) des surfaces observées.

Une distinction est faite entre la thermographie passive qui résulte de la simple observation des gradients thermiques sur une pièce, et la thermographie active lorsqu'une perturbation thermique a été volontairement générée pour le contrôle (par une source laser par exemple). Les discontinuités dans la pièce se traduisent par des différences de température sur l'image. L'acquisition des images thermiques s'obtient alors à l'aide d'une caméra thermographique.

La thermographie consiste à mesurer la répartition de température au sein d'une pièce.

En cela il existe deux principes : la thermographie passive, l'environnement fournit les variations de température et la thermographie active ou dynamique, où c'est l'utilisateur qui génère l'excitation thermique. C'est la thermographie dynamique qui nous intéresse principalement. Alors que l'excitation optique ne touche que la surface du matériau, l'excitation par ultrasons permet d'élever la température des fissures par frictions, les mettant ainsi en évidence. L'excitation thermique par courant de Foucault permet, comme les ultrasons, de générer une source de chaleur au sein même du matériau, présentant un avantage non négligeable face à la méthode optique. [1]

I.6.7 CND par courants de Foucault

Le CND par courants de Foucault n'est applicable que sur les pièces réalisées, du point de vue électrique, en matériaux conducteurs. L'élément essentiel est le capteur. Celui-ci est une bobine ou formé d'un ensemble de bobines. Ces dernières sont parcourues par un courant d'excitation variable dans le temps. Le capteur génère un champ magnétique d'excitation variable qui dépend de la géométrie et des caractéristiques électromagnétiques de son entourage. Si un matériau conducteur d'électricité baigne dans ce champ, il sera le siège des courants de Foucault.

Ces courants induits créent à leur tour un champ magnétique de réaction négative. Le champ résultant donnera l'image de la répartition et de la valeur des courants induits. La mesure de ce champ ou des courants induits n'est pas directement accessible à l'expérience.

On passe par la mesure d'une grandeur dérivée : l'impédance aux bornes du capteur.

Cette grandeur nous permettra de caractériser le matériau en ce qui concerne sa conductivité, sa perméabilité, sa géométrie et son état de santé. Suivant ces caractéristiques et les fréquences utilisées, les variations des champs créées par ces courants permettent d'examiner le matériau en surface ou en profondeur. [1]

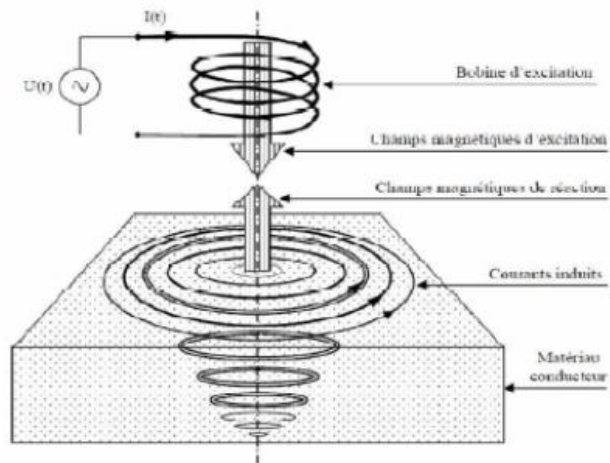


Figure (I.13) : Schéma de principe du CND par courant de Foucault

I.7 Choix du type de contrôle

Le choix du type de contrôle à effectuer sur une pièce dépend de différents facteurs, dont les principaux sont:

I.7.1 Typologie de discontinuité attendue

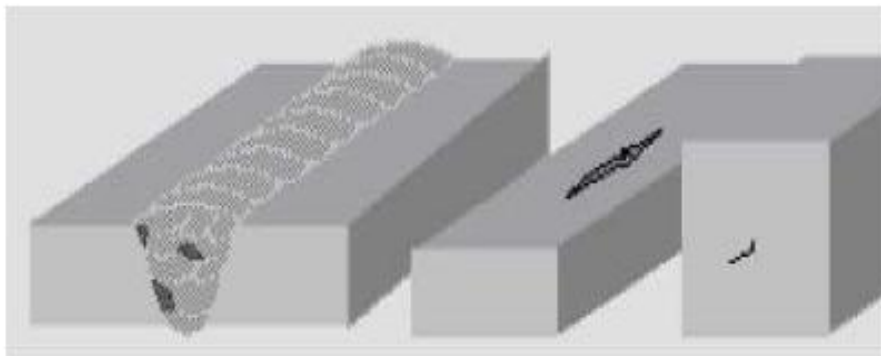


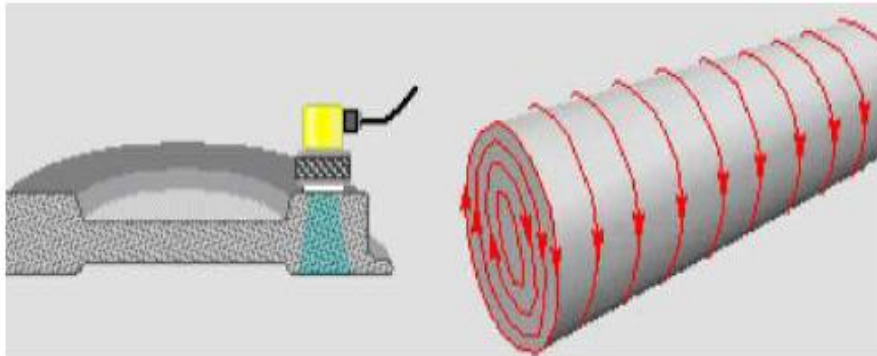
Figure (I.14) : Types de discontinuité

La forme, la position et l'orientation de la discontinuité influent sur les choix de la méthode de contrôle.

De fait, il n'existe pas une méthode en mesure de relever tous les types de discontinuité.

Par exemple, les discontinuités profondes ne sont pas décelables par les liquides pénétrants ni par la magnétoscopie, alors que des discontinuités orientées parallèlement aux faisceaux de radiations ne seront pas décelées par le contrôle radiographique.

I.7.2 Limites intrinsèques de chaque méthode



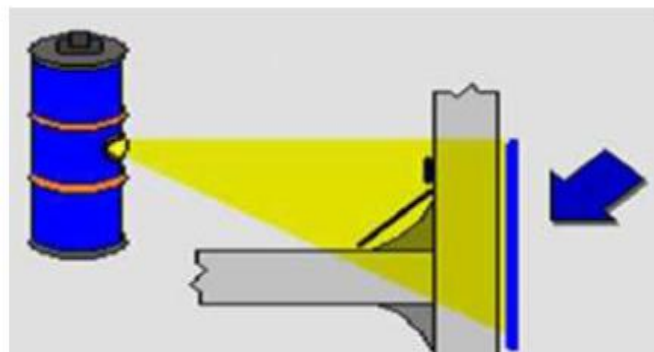
Chaque méthode a des limites intrinsèques qui en limitent les domaines d'application.

Par exemple, la magnétoscopie ne peut pas être utilisée pour examiner des pièces non magnétisables, alors que les ultrasons ne sont pas adaptés au contrôle de matériaux à forte absorption acoustique.

I.7.3 Conditions opérationnelles

Le choix d'une méthode dépend parfois aussi des conditions opérationnelles dans lesquelles s'effectue l'examen.

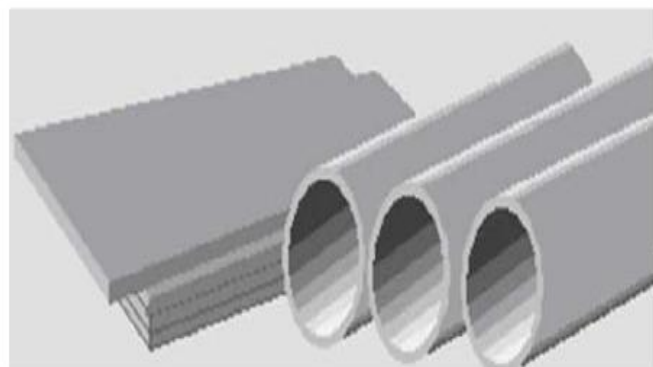
Certains Contrôles nécessitent d'une source de force motrice, la radiographie impose de pouvoir accéder à la pièce des deux côtés afin de positionner la source de radiation et la pellicule, ce qui n'est pas toujours possible.



I.7.4 Type de matériau à contrôler

Pour choisir la méthode de contrôle il faut considérer aussi l'élément « Pièce à contrôler ».

En fait, les dimensions et l'épaisseur de la pièce peuvent être déterminantes pour les choix entre une méthode et l'autre. Tout comme les types de matériel qui compose la pièce.



La densité, la conductibilité électrique et thermique, la perméabilité magnétique, l'impédance acoustique sont des propriétés physiques déterminantes dans le choix de la méthode.

Tout comme la forme de la pièce pourrait être telle qu'elle empêche un certain type de méthode.

I.8 Fiabilité des contrôles non destructeurs

Le degré de fiabilité des différentes méthodes de contrôle non destructif peut être résumé dans le tableau suivant ainsi que pour chaque méthode le degré de détection et l'évaluation des dimensions (longueur et hauteur) pour les discontinuités superficielles (ou affleurantes) et pour les discontinuités internes est reporté dans le tableau.

Méthode	Dimensions			DISCONTINUITÉ			
	Affleurante			Interne			
	Détection	Évaluation longueur	Évaluation hauteur	Détection	Évaluation longueur	Évaluation hauteur	Évaluation profondeur
Ressuage	Efficacité discrète	Efficacité discrète	Non Applicable	Non Applicable	Non Applicable	Non Applicable	Non Applicable
Magnétoscopie	Efficacité discrète	Efficacité discrète	Applicable avec limites	Faible Efficacité	Faible Efficacité	Non Applicable	Non Applicable
Ultrasons	Applicable avec limites	Faible Efficacité	Faible Efficacité	Efficacité discrète	Satisfaisante	Faible Efficacité	Efficacité discrète
Radiographique	Efficacité discrète	Efficacité discrète	Non Applicable	Efficacité discrète	Satisfaisante	Faible Efficacité	Applicable avec double exposition et calcul

Tableau (I.2) : Le degré de fiabilité des différentes méthodes de CND

I.9 Comparatif des principales techniques de CND

	Rapidité	Coût	Reproductibilité	Fiabilité	Sensibilité	Résolution
Optique automatisé	--	+	-	--	--	-
Optique non automatisé	++	-	+	-	-	+
Ressuage	++	++	-	-	--	-
Radiographie	++	-	+	+	-	-
Ultrasons	+	+	-	-	++	+
Flux magnétique de fuite	+	+	-	-	++	+
Courants de Foucault	+	+	++	+	+	-

Tableau (I.3) : Comparatif des principales techniques de CND

I.10 Processus d'évaluation

Le schéma synthétise le processus d'évaluation depuis la phase de contrôle proprement dite jusqu'à l'acceptabilité ou non de la pièce en examen.

Le processus d'évaluation des CND est une activité complexe qui requiert une connaissance appropriée des matériaux et de leur structure, une maîtrise des techniques de préparation et d'examen en plus d'une connaissance appropriée de l'appareillage utilisé.

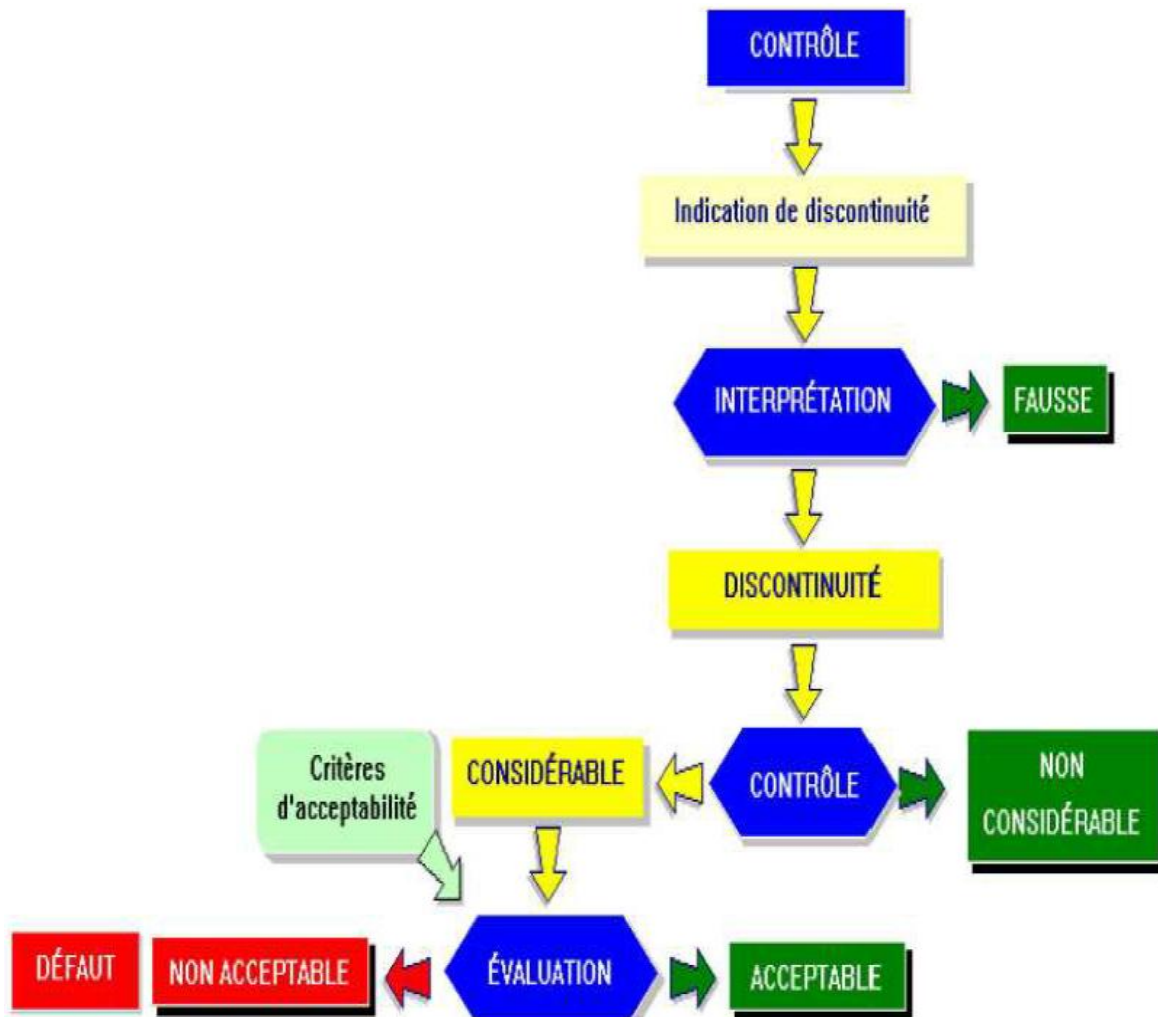


Figure (I.15) : processus d'évaluation des contrôles non destructif

Pour chaque application de contrôle non destructif, il faut savoir choisir la méthode à appliquer. Pour cela il faut se poser les bonnes questions en matière de contraintes venant :

- ✓ de l'environnement
- ✓ du processus de fabrication
- ✓ du produit
- ✓ du capteur

La grande variété de capteurs s'explique par le fait que pour chaque environnement il faut adapter son capteur. En effet, il faut tenir compte des paramètres tels que les plages de valeurs à capter, la sensibilité et autres « on n'utilise pas un thermomètre à mercure pour mesurer la température de lave en fusion. » Un capteur n'est valable que dans un cas d'application dans un environnement donné. Viennent s'ajouter à cela les contraintes de dimensions du capteur; Il doit être adapté en volume à l'élément que l'on souhaite mesurer.

La difficulté d'aborder un sujet tel que celui-ci est bien la multitude d'éléments à prendre en compte. [1]

Chapitre II

Métaux Et Leurs
Propriétés

II.1 INTRODUCTION

Les matériaux utilisés en aéronautique sont des matériaux spéciaux qui doivent résister aux conditions extrêmes (résistance à la variation de température, de pression,...), pour cela nous avons choisis quelques matériaux comme :

L'aluminium, c'est un métal blanc, le plus léger des métaux usuels après le magnésium, c'est pour cela il est très utilisé dans le domaine aéronautique et d'autre domaine comme la mécanique d'automobile, génie civil.....Etc. Il est classé parmi les métaux non ferreux magnétiques, sa perméabilité est inférieure à 1, il résiste bien à la corrosion, c'est un bon conducteur de la chaleur et d'électricité. Le seul défaut est sa faible résistance mécanique qui vaut de 70Mpa à 100Mpa, mais cet inconvénient est réglé en ajoutant du cuivre, manganèse et magnésium. Son point de fusion est 658°C, ce qui facilite sa métallurgie, il est très malléable et très ductile, mais pas très dur. La résistance à la rupture de l'aluminium ordinaire est de 8Kg/mm², celle de l'aluminium écroui peut atteindre 20Kg/mm².

Le titane, c'est un élément fort abondant dans l'écorce terrestre, ce n'est que vers 1950 qu'on a commencé à l'utiliser sous forme métallique, à l'état pur ou à l'état allié. Ceci découle des difficultés liées à sa métallurgie extractive et des problèmes posés par sa mise en œuvre, faits qui expliquent par ailleurs son prix élevé par rapport à celui des autres métaux. Les caractéristiques tout à fait particulières du titane et de ses alliages en font un métal de choix pour de nombreuses utilisations, notamment dans les domaines de l'aéronautiques et aérospatial et dans l'industrie chimique.

L'acier, un alliage métallique qui offre la plus large gamme de propriétés mécaniques et la plus large possibilité de variation de ses caractéristiques par les traitements thermiques, ce qui explique son succès en mécanique. Il présente également un bon compromis entre résistance et rigidité élastique (modules d'élasticité), que les matériaux dits nouveaux, (plastiques et composites) ne permettent pas d'atteindre.

Il existe une très large gamme d'aciers disponibles faisant l'objet d'une classification normalisée que l'on peut diviser en deux grandes catégories :

- **Aciers fortement alliés :**
- destinés à l'outillage (pour travail à froid, à chaud et pour coupe rapide) ;
- inoxydables (austénitiques, martensitiques, ferritiques, austéno-ferritiques);
- réfractaires.

- **Aciers de construction non alliés et faiblement alliés :**

Parmi lesquels on distingue les aciers spéciaux destinés aux traitements thermiques. Les normes recommandent certaines nuances pour un emploi particulier (exemples : aciers pour chaîne, pour roulements, pour boulonnerie...) ou pour un traitement spécifique (exemples : aciers pour cémentation et carbonitruration, pour nitruration, pour trempe superficielle....).

II.2 Propriétés Mécaniques Des Matériaux

Le comportement d'un métal est fonction des forces extérieures appliquées et traduit les évolutions de la cohésion de l'édifice cristallin. Pour les métaux, les forces qui assurent cette cohésion résultent de l'ionisation des atomes du métal qui perdent des électrons de valence et circulent entre les ions.

Les propriétés mécaniques dépendent de la température d'utilisation, de l'état de surface, des conditions d'application des efforts, de la vitesse de déformation... Elles sont déterminées, avec un certain intervalle de précision, au moyen d'essais normalisés. [2]

II.2.1 Propriétés d'Usage

Elles peuvent être séparées en deux catégories:

Celles qui font l'objet d'une garantie: R_m , R_e , A , à 20°C, ou la limite élastique à chaud R_{tp} , la résilience à température donnée K_c .

Celles données à titre indicatif: résistance au fluage (allongement donné, de 0,5 ou 1% à température donnée, en un temps donné : 10000 ou 100000 heures), à la fatigue (limite d'endurance dépendant de nombreux facteurs pour 10^7 cycles pour les aciers).

Les mesures sont effectuées sur des éprouvettes normalisées prélevées dans les matériaux à tester. Les conditions de prélèvement et d'essais sont définies par les normes. [2]

II.2.2 Essai De Traction

Il consiste à imposer un allongement à une éprouvette de section initiale S_0 et de longueur utile L_0 . La courbe type obtenue pour un matériau ductile est la suivante:

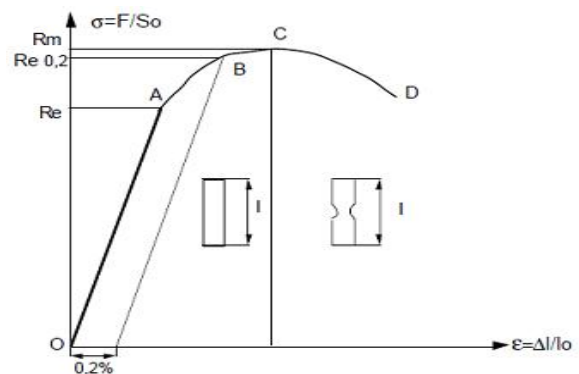


Figure (II.1) : diagramme de traction

La droite OA correspond à la déformation élastique réversible.

La courbe AC est le domaine de déformation plastique homogène: si on supprime la force de traction, il y a un retour élastique suivant une parallèle à OA et il reste une déformation permanente.

Pour CD, la force nécessaire pour déformer le matériau diminue alors que l'allongement continue d'augmenter : cette instabilité est appelée instabilité plastique. La striction apparaît. En D il y a rupture de l'éprouvette.

II.2.3 R_e , R_m , $R_{e0,2}$

R_e (MPa) est la limite de proportionnalité ou limite élastique. Elle est bien marquée pour les matériaux ductiles. R_e correspond au seuil d'écoulement plastique.

R_m est la résistance limite à la traction. Cette valeur est utilisée pour estimer la limite d'endurance à la fatigue (Figure (II.1)).

R_e est atteint quand on observe la première chute de l'effort lors de l'essai.

En l'absence de ce phénomène, quand OA n'est pas rectiligne, on doit utiliser la limite conventionnelle d'élasticité $R_{e0,2}$ qui correspond à un allongement plastique de 0,2% (voir Figure (II.1)).

Les aciers austénitiques ont une limite élastique plus faible qui conduit en pratique à utiliser $R_{e0,2}$.

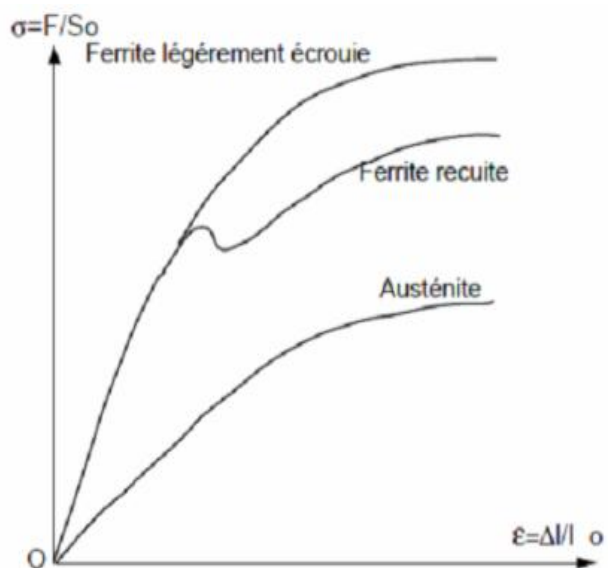


Figure (II.2) : Courbe de traction avant striction pour des aciers inoxydables

Dans le cas des aciers ferritiques recuits, les interactions carbone - dislocations peuvent induire une anomalie de limite d'élasticité (crochet: voir figure (II.2)).

II.2.4 Courbe Réelle Ou Rationnelle

Dans la réalité, la section varie à chaque instant et s'éloigne de sa valeur initiale. Il en va de même pour l'allongement relatif réel.

On peut tracer la courbe de traction vraie, ou rationnelle, qui utilise les sections et déformations réelles à chaque instant et met en évidence le durcissement du matériau (écrouissage) au cours de la déformation plastique. [2]

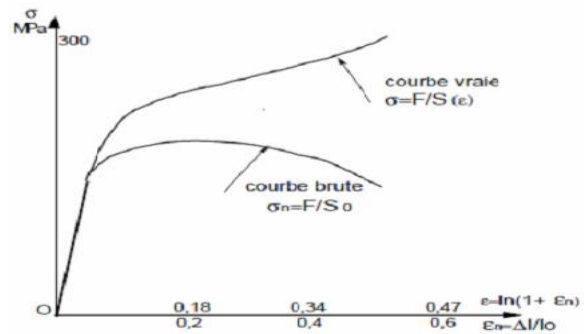


Figure (II.3) : Courbe réelle ou rationnelle

II.2.5 Influence De La Température Sur R_e et R_m

Les définitions de R_e ou R_m sont conventionnelles car elles dépendent de la section initiale de l'éprouvette (surtout R_m), de la qualité de l'extensomètre (R_e), de la vitesse de mise en charge et de la température d'essai: ce ne sont pas des contraintes vraies. [2]

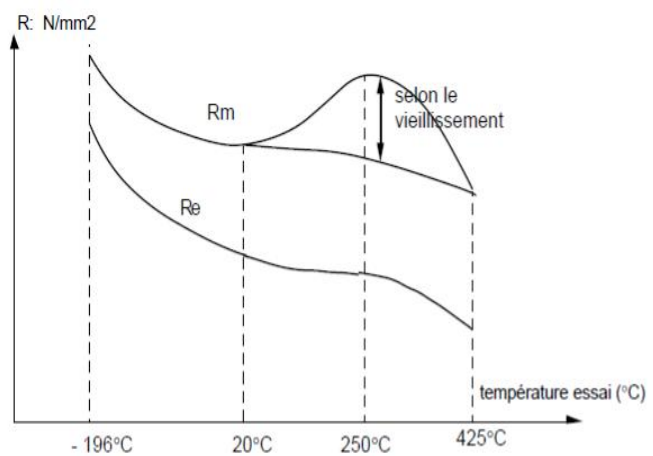


Figure (II.4) : Evolution de R_e et R_m pour un acier en fonction de la température (selon L'essai de traction)

II.2.6 Effet De Masse

Pour les aciers traités, un effet de masse apparaît. Il se traduit par une diminution des caractéristiques de la surface vers le cœur quand la taille des pièces augmente.

Le tableau suivant donne les caractéristiques de deux aciers ayant une trempabilité respective moyenne et forte. Les éprouvettes sont prises à 12,5 mm de la surface.

Dimension du barreau traité (en mm)	35 CD4			35 NCD16		
	R_e	R_m	A%	R_e	R_m	A%
$d < 16$	80	110	11	105	135	9
$16 < d < 40$	68	100	12	105	105	9
$40 < d < 100$	57	87	14	95	95	10

Tableau (II.1) : les caractéristiques de deux aciers ayant une trempabilité respective moyenne et forte

II.2.7 Autres Caractéristiques Mécaniques (A, E, G, v ; variations en fonction de la température)

II.2.7.1 Allongement à La Rupture (A)

L'allongement à la rupture est le rapport $A = 100 \cdot (l_d - l_0) / l_0$ où l_d est la longueur de l'éprouvette à la rupture en D.

II.2.7.2 Module De Young (E)

La pente de la partie linéaire OA (Figure I-1) représente le module d'Young E (en Mpa ou en GPa) ou module d'élasticité.

On appelle loi de Hooke la relation : $\sigma_{\text{élastique}} = E \cdot \epsilon_{\text{élastique}}$.

La mesure de E est obtenue à l'aide d'un extensomètre.

Le module d'Young à 20°C va de 4 Mpa pour le caoutchouc à 500 GPa pour les céramiques (SiC).

Cette variation importante est due aux intensités très variables des forces de liaison entre les atomes ou molécules au sein des matériaux: liaisons covalentes, ioniques.

La rigidité d'une structure en traction, compression, flexion, est proportionnelle au module d'Young. La valeur de ce dernier, pour les matériaux isotropes, est indépendante de la direction de l'effort. Par contre, pour les matériaux anisotropes, tels les stratifiés, les composites orientés, les monocristaux, E varie avec l'orientation.

E décroît quand la température augmente : environ 10^{-4} par degré pour les métaux, les céramiques et les verres. Il varie de façon beaucoup plus importante en fonction de la température dans le cas des polymères et des composites à matrice organique.

II.2.7.3 Valeur Spécifique Du Module

Il est intéressant d'utiliser le rapport du module et de la densité du métal. La valeur de E/ρ est la valeur spécifique du module: c'est un indice de performance qui tient compte de la déformation élastique et de l'allégement.

Les métaux peuvent être classés en deux catégories :

- Aluminium, fer, magnésium, titane (les plus performants) $26 < E/\rho < 27$ (en 10^9 N.mm.Kg⁻¹)
- Cuivre et zinc (les moins performants) $14 < E/\rho < 15$.

II.2.7.4 Coefficient De Poisson (ν)

L'éprouvette subit aussi des déformations latérales: le coefficient de Poisson, ou coefficient de contraction latérale dans le domaine élastique est le rapport sans dimension $\nu = (d_0 - d) / d_0$

Ce coefficient, compris selon les matériaux entre 10^{-2} et $4 \cdot 10^{-1}$, dépend légèrement de la température.

II.2.7.5 Module De Cisaillement (G)

Le module de cisaillement G ou module de Lamé ou module de Coulomb, exprimé en Mpa ou Gpa, définit le cisaillement élastique consécutif à l'application d'une sollicitation de cisaillement. Il varie sensiblement comme E en fonction de la température et le type de matériau. Pour les matériaux isotopes, on a la relation : $G = E / 2(1 + \nu)$

II.2.7.6 La Résilience

On mesure l'énergie qui provoque la rupture en flexion d'une éprouvette entaillée en U ou V (K_{cu} ou K_{cv}). L'essai de résilience (essai Charpy) permet de déterminer la température de transition d'un matériau qui sépare la rupture ductile, à énergie élevée, et la rupture fragile du type clivage, de faible énergie.

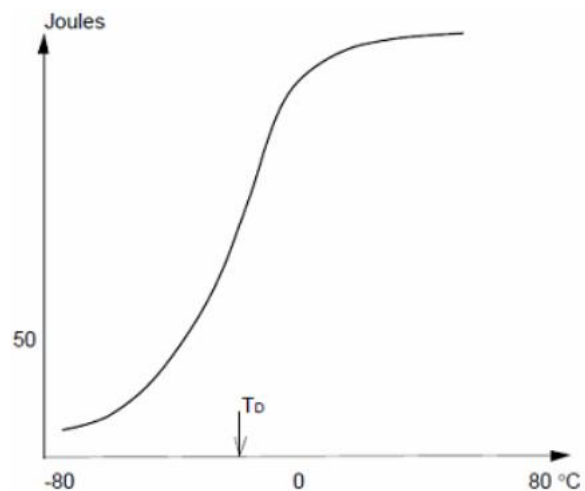


Figure (II.5) : Transition fragile/ductile.
Acier 18NCD laminé.

Les ruptures ductiles sont fibreuses, tourmentées (déformation plastique); les ruptures fragiles sont plates ou cristallographiques TD: température moyenne de transition.

II.2.8 La Ténacité

C'est une caractéristique, à la base du concept de tolérance au dommage dans les structures, qui est basée sur la formulation des contraintes et déplacements au voisinage d'une fissure de géométrie connue. Le chargement est statique ou dynamique.

Ces conditions déterminent le facteur d'intensité de contraintes K, calculé, qui caractérise l'accroissement des contraintes et des déformations provoqué par la fissure.

K_c est déterminé expérimentalement au moyen d'éprouvettes pré-fissurées. Elle correspond à la valeur critique de K pour laquelle se produit une propagation brutale d'une fissure de longueur a_c sous une charge P_c , et K_d est la ténacité dynamique qui correspond à la valeur critique de K sous un choc.

II.3 Métaux Ferreux

II.3.1 Définitions

Les aciers sont des alliages à base de fer qui titrent moins de 2% de carbone, contrairement aux fontes qui en contiennent plus de 2%. [2]

II.3.2 Classement Des Aciers

Les aciers ont été classés en fonction de la composition et le niveau de qualité.

- Ainsi on distingue les aciers
 - ❖ non alliés (<1% d'alliage)
 - ❖ peu alliés (teneur de chaque élément d'alliage < 5%)
 - ❖ très alliés
- Et, en fonction de la garantie donnée aux propriétés d'usage
 - ❖ les aciers de base
 - ❖ de qualité
 - ❖ les aciers spéciaux.
- Ces derniers sont placés dans trois familles
 - ❖ les aciers de construction mécanique (peu ou non alliés)
 - ❖ les aciers à outils (peu ou très alliés)
 - ❖ les aciers inoxydables.

II.3.3 Désignation Normalisée

La norme NF A 02-025 a été remplacée par la norme européenne NF EN 10-020. Les règles générales pour la désignation symbolique sont les suivantes :

- Aciers de base: $R_m > 690$ Mpa, $R_e > 360$ Mpa, $A\% > 26$, $C\% > 0,1$...
- Aciers désignés à partir de leurs applications et caractéristiques.

Une lettre indique le domaine d'application S, acier de construction, P, acier pour appareil à pression (garantie de limite élastique), E acier de construction mécanique, L acier pour tubes... [2]

Une valeur de la limite élastique est indiquée. D'autres symboles correspondent à des propriétés garanties ou à des conditions de fabrication (L, emploi à basse température, Q, trempé et revenu, M, laminage thermomécanique...). **Ex:** S355 acier de construction, $R_e > 355$ Mpa.

Aciers désignés selon la composition :

- Aciers non alliés $Mn < 1\%$: lettre C suivie de la teneur en carbone multipliée par cent. **Ex :** C 35 (0,35% de carbone).
- Aciers non alliés $Mn > 1\%$ ou aciers peu alliés, aucun élément supérieur à 5% : le premier chiffre donne la teneur en C multipliée par 100. Les lettres suivantes donnent les symboles chimiques dans l'ordre des concentrations des principaux éléments. Le ou les chiffres donnent les teneurs, multipliées par 4 (Cr, Co, Mg, Mn, Ni, Si, W) ou 10 (Al, Mo, Nb, Pb, Ti, V, Cu) ou 100 (N, S, P). **Ex:** 100 Cr 6 (1% de C, 1,5% de Cr); 10 Cr Mo 9 10 (0,1% de C, 2,25% de Cr, 1% de Mo).
- Aciers très alliés : ils sont désignés par la lettre X, la teneur en C multipliée par 100 les principaux éléments suivis de leur teneur en %. **Ex:** X 6 Cr Ni 18 10 (0,06% de C 18% de chrome et 10% de nickel).
- Aciers rapides : le symbole HSS est suivi des chiffres donnant dans l'ordre les concentrations (en %) en W, MO, V, Co.

II.3.4 Avantages / Inconvénients / Comparaison

Ces alliages possèdent 2 caractéristiques favorables: leurs propriétés mécaniques sont élevées et leur prix est faible. Par contre, leur densité de l'ordre de 7,8 est élevée et leur résistance à la corrosion est médiocre, sauf pour les aciers inoxydables. [2]

Les performances mécaniques d'un acier dépendent :

- de la teneur en carbone qui conditionne la valeur de R_m .
- de sa structure qui dépend de la façon dont l'austénite formée à haute température se transforme lors du retour à la température ambiante.
- Variations des propriétés en fonction du traitement thermique.

Les propriétés mécaniques varient selon les conditions des traitements thermiques.

Température de revenu	R_m (MPa)	A%
200°C	1800	5,5
400°C	1500	7
600°C	1050	13

Tableau (II.2) : propriété mécanique en fonction du traitement thermique l'acier martensitique 34 Cr Mo 4.

II.4 L'Aluminium

II.4.1 Caractéristiques Générales De l'Aluminium

La masse volumique de L'aluminium : est de 2700Kg/m³, on utilise l'aluminium dans le cas où il faut réduire la masse de la structure, c'est le cas des avions par exemple, ou pour réaliser des économies d'énergie, on cherche à diminuer la charge à vide, afin d'augmenter la charge utile. Résistance à la corrosion : les alliages d'aluminium résistent bien à la corrosion, grâce à la couche d'oxyde (Al₂O₃) qui se forme à leur surface. [2]

Conductivité électrique. Propriétés mécaniques : puisque l'aluminium et ses alliages ont une structure cristalline cubique à face centrées, ils font preuve à l'état recuit d'une excellente ductilité, et ce à toute température.

II.4.2 Aluminium Et Alliages d'Aluminium

Il existe de nombreux alliages d'aluminium que soient corroyé ou de fonderie.

Les alliages corroyés : sont classés en alliages non rampants des séries 1000,3000 et 5000 ainsi que les alliages à durcissement structural des séries 2000, 6000 et 7000.

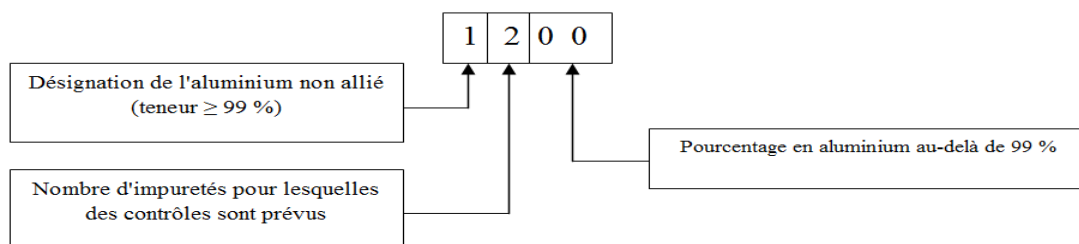


Figure (II.6) : Aluminium non allié

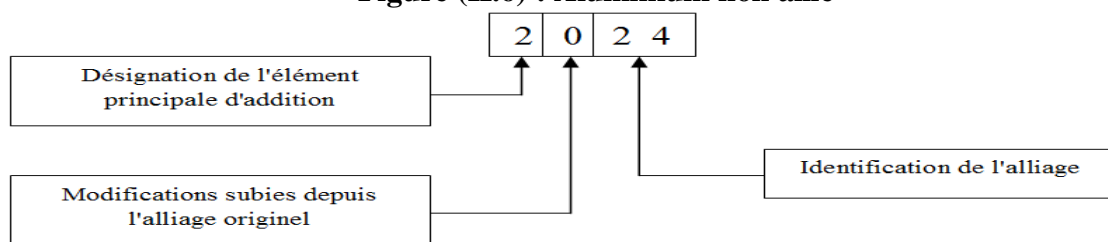


Figure (II.7) : Aluminium allié

Désignation des éléments principale

- 2 : Cuivre
- 3: Manganèse
- 4: Silicium
- 5: Magnésium
- 6: Magnésium et silicium
- 7: Autres éléments

II.4.3 Définition De La Série 2000 (Al Cu et Al-Cu-Mg)

❖ Eléments de base :

Les teneurs en Cu sont comprises entre 2,6 et 3,6% et, quand ils en contiennent, leurs teneurs en magnésium varient de 0,5 à 1,5%.

Le durcissement structural qui est dû à la précipitation de formes transitoires des composés d'équilibre CuAl_2 et CuMgAl_2 , leur confère d'excellentes propriétés mécaniques.

❖ Additions diverses :

L'addition de Silicium et de manganèse, à des teneurs inférieure à 0,8%, favorise la formation de composés quaternaires qui, par dispersion, améliorent les propriétés de la matrice. La présence du Fer est souvent nuisible, car, à cause de la formation de Cu_2FeAl_7 , le Fer diminue la quantité de cuivre nécessaire au durcissement structural.

Si on plus de Fer, on ajoute du Nickel, il y a une formation du composé Al_9FeNi , qui donne à l'alliage une bonne tenue mécanique jusqu'à 230°C (par exemple Al2618 qui est utilisable pour la fabrication des moteurs à turbine et des structures d'avions supersonique).

A cause de la présence de précipités cathodiques par rapport à la matrice, les alliages de cette série font preuve d'une résistance médiocre à la corrosion à l'état trempé et vieilli.

Les caractéristiques mécaniques de cette série est motionnés dans ce tableau:

	Etat	$R_{e0.2}$ (Mpa)	R_m (Mpa)	A (%)	Résistance à la fatigue	Principaux domaines d'utilisations	e (mm)
2024 4,4Cu- 1,5Mg- 0,6Mn	O	105	190	20	90	Aéronautique, charpentes, visseries.	0,35- 3,2
	T3	320	460	20	140		0,35- 6

Tableau (II.3) : Caractéristiques mécaniques de l'Al 2024

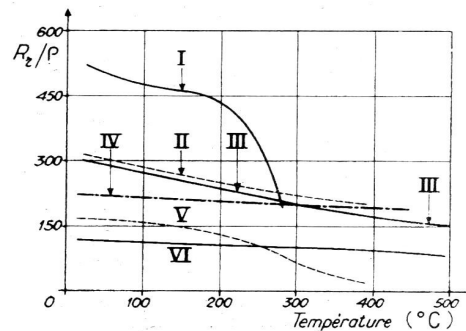
II.5 Le Titane

II.5.1 Caractéristique Mécanique Du Titane

- Numéro atomique/Masse –atomique22/47,90
- Masse volumique4,507 g/cm³
- Température de fusion/T d'ébullition.....1 670 °C/3535°C
- Capacité thermique massique522,5 J .kg-1. °C-1

- Conductivité thermique16,7 W.m-1. °C-1
- Résistivité électrique à 20°C.....47,8 X 10-8 Ω
- Coefficient de dilatation linéique à 25°C8,5 X 10-6 par °C
- Susceptibilité magnétique massique3.2 x 10-6 cm3.g-1 (paramagnétique)
- Module d'élasticité110000 MPa
- Coefficient de Poisson0,33
- Température de transformation allotropique.....882 °C

En dessous de cette température, la maille est de type hexagonal compact ($a=0,295$ nanomètre; $c=0.468$ nanomètre) ; elle est de type cubique centré ($a=0,332$ nanomètre à 900 °C) aux températures supérieures.



R_t/P rapport de la charge de rupture, exprimée en N/mm^2 (ou MPa), à la masse volumique du matériau considéré, exprimée en g/cm^3

I	plastique renforcé	IV	acier maraging
II	alliage de titane à haute résistance	V	alliage d'aluminium
III	béryllium	VI	acier à 12% en masse de chrome

Figure (II.8) : Résistance spécifique de différents matériaux de construction aéronautique en fonction de la température

II.5.2 Le Titane Et Ces Alliages

❖ Titane non allié:

À haute température, la structure cristalline du titane est cubique centrée (titane β) à 882 °C, le titane subit une transformation allotropique : sa structure devient alors hexagonale compacte (titane α). La transformation $\beta \rightarrow \alpha$ se fait par transformation martensitique (transformation cristallographique) et non par un mécanisme de germination et de croissance par diffusion, comme c'est le cas pour la transformation allotropique du fer ($\gamma \rightarrow \alpha$). Ce phénomène exerce une très grande influence sur les microstructures du titane et de ses alliages, comme nous le verrons plus loin. [2]

Grâce au rapport c/a de la maille hexagonale du titane ($c/a = 1,587$), il y a suffisamment de systèmes de glissement (sur les plans de base et sur les plans prismatiques) pour que ce métal soit ductile à toute température et qu'il ne présente aucune transition ductile-fragile. Bien que la limite d'endurance du titane ne soit pas définie, sa limite de fatigue à 108 cycles est bonne (elle est au moins égale à la moitié de sa résistance en traction).

❖ Alliages de Titane:

Dans les alliages de titane, les éléments d'addition exercent une influence sur la stabilité des phases α et β . On distingue en général les éléments alphagènes (l'aluminium et les éléments en solution d'insertion O, C et N), qui ont pour effet d'augmenter la température de transformation $\alpha \rightarrow \beta$, des éléments bêtagènes, qui, au contraire, abaissent cette température de transformation. Les éléments bêtagènes peuvent être isomorphes (V, Mo, Nb et Ta) ou eutectoïdes (Fe, Cr, Mn et Si). Certains éléments (Sn et Zr) sont par ailleurs neutres. Les alliages industriels de titane comportent au moins deux éléments d'addition ; on les classe, selon leur structure à la température ambiante, en alliages alpha, en alliages alpha-bêta et en alliages bêta. [2]

– Alliages alpha :

Les alliages alpha contiennent essentiellement des éléments alphagènes et neutres ; ils peuvent en outre contenir de petites additions d'éléments bêtagènes, qui entraînent alors l'apparition d'une faible quantité de phase β (alliages super-alpha). Les alliages alpha résistent bien au fluage (jusque vers 650 °C) et à l'oxydation (jusque vers 1100 °C), ce qui permet de les mettre en forme par forgeage. Cependant, ils sont peu déformables à froid et ne répondent pas (ou répondent peu) aux traitements thermiques. [2]

– Alliages alpha-bêta :

Les alliages alpha-bêta, biphasés, sont les plus utilisés. Ils acquièrent, après traitements thermiques, des propriétés mécaniques élevées, ce qui ne les empêche pas de conserver une assez bonne ductilité. Leur résistance au fluage s'étend jusque vers 550 °C. [2]

– Alliages bêta :

Les alliages bêta contiennent essentiellement des éléments bêtagènes. À la température ambiante, ils se prêtent bien à la déformation mais, du fait de leur structure cubique centrée, ils présentent une transition ductile-fragile vers -60 °C. On peut difficilement les utiliser à chaud, car leur structure β devient instable vers 350°C. [2]

Alliage (type)	Composition Moyenne (%)	état	R _{e0.2} (MPa)	R _m (MPa)	A (%)
α	99,2 Ti	R	450	525	25
α	5 Al-2,5 Sn	R	800	900	20
Super α	8 Al-1 Mo-1 V	TR	950	1000	15
$\alpha+\beta$	6 Al-4 V	R	950	1000	15
		TR	1120	1200	10
$\alpha+\beta$	6 Al-6 V-2 Sn	R	1000	1100	14
		TR	1200	1300	10
β	13 V-11 Cr-3 Al	TR	1200	1250	8

Tableau (II.4) : Composition et propriétés mécaniques moyennes de quelques alliages de Titane.

II.6 Traitements Thermiques

Par traitement thermique, on désigne toute opération faite à chaud, destinée à modifier la microstructure d'un métal pour lui donner de nouvelles caractéristiques. Pour les aciers au carbone et les aciers faiblement alliés, certains traitements sont quasi obligatoires pour obtenir une performance optimale. Ces traitements sont la trempe et le revenu. Ils permettent de modifier et d'ajuster les propriétés mécaniques: limite d'élasticité, résistance à la traction, ténacité, dureté et résilience aux besoins de l'utilisation. D'autres traitements, normalement désignés comme recuits, visent à amener le métal vers un équilibre structural et mécanique. Prenant l'exemple de La Trempe Des Aciers Au Carbone Et Des Aciers Faiblement Alliés, elle se déroule en trois étapes :

❖ L'austénitisation :

L'austénitisation consiste à chauffer l'acier puis de le maintenir pendant environ 30 minutes dans son domaine austénitique, à au moins quelques degrés (30-50°C) au-dessus de son point de transformation, la structure de l'acier s'homogénéise en transformant les éléments microstructuraux ferritiques (α , cc) en austénite (α , cfc) et en dissolvant la cémentite et les carbures dans l'austénite.

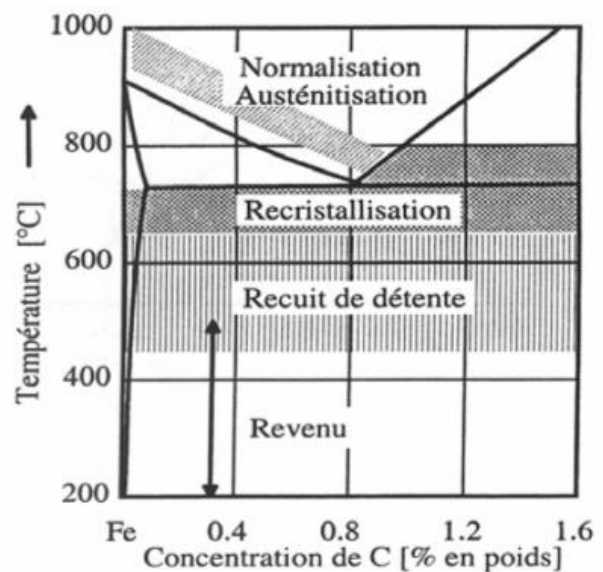


Figure (II.9) : Domaines de températures d'austénitisation et d'autres traitements thermiques des aciers au carbone.

❖ Trempe :

La trempe consiste en un refroidissement rapide d'un acier austénitisé et a pour but de donner à l'acier la plus grande dureté possible par formation de la martensite ou de la perlite fine. La température d'austénitisation, aussi appelée "température de trempe", dépend de la teneur en carbone de l'acier; elle doit être située dans le domaine austénitique du diagramme Fe-C. La trempe s'effectue en général soit à l'eau, à l'huile ou à l'air. Le milieu de trempe est choisi surtout en fonction de la trempabilité de l'acier (cf. essai Jominy). Pour les aciers au carbone, la trempe se fait dans l'eau de 20-40°C. En ajoutant environ 10 % de chlorure de sodium à l'eau, on obtient une trempe plus efficace qu'avec de l'eau pure. Il est évident que les couches d'oxyde adhérent à la pièce et les bulles de vapeur qui se sont formées à la surface diminuent le transfert de chaleur, donc la vitesse de refroidissement. Le refroidissement rapide par trempe ne permet ni la germination ni la croissance des nouvelles phases. La diffusion à longue distance, nécessaire à la ségrégation du C et des éléments d'alliage, aurait besoin de plus de temps pour produire un effet notable. L'austénite n'étant pas stable à basse température et la ferrite n'étant pas capable de dissoudre suffisamment de carbone, la transformation martensitique se produit. Elle est beaucoup plus rapide, car elle s'opère sans aucune diffusion. Elle commence sur certains plans cristallographiques particuliers, appelés plans d'accolement, et avance par rabattement des atomes dans les plans voisins de même orientation. Un plan d'accolement est un plan cristallographique dans lequel la disposition des atomes est aussi identique que possible dans l'ancienne et la nouvelle structure (minimum de distorsion). L'effet d'une trempe sur un acier se laisse très fortement influencer par sa teneur en carbone et le pourcentage des éléments d'alliages. Les éléments ajoutés au Fe modifient profondément la cinétique de la transformation $\alpha - \gamma$. Pour mettre en évidence cette cinétique, on se sert des diagrammes TTT (diagramme de transformation de l'austénite en conditions isothermes, Température -Temps- taux de Transformation, fig. 3) et surtout des TRC (diagramme de Transformation en Refroidissement Continu, voir fig. 4) dans le cas des trempes. [2]

❖ Revenu :

Un acier trempé est dur, mais beaucoup trop fragile pour être utilisé directement. Le revenu consiste à chauffer une pièce qui vient d'être trempée à une température inférieure au point de transformation, à la maintenir à cette température, puis à la refroidir généralement à l'air, parfois à l'eau. Le revenu a pour but d'éliminer les contraintes résiduelles provenant de la trempe et d'augmenter la ténacité.

Les contraintes résiduelles se forment en raison des grandes différences de température entre le cœur et la surface de la pièce lors de la trempe. La dilatation thermique provoque des contraintes qui dépassent la limite d'écoulement plastique et parfois même la résistance à la rupture (fissures de trempe).

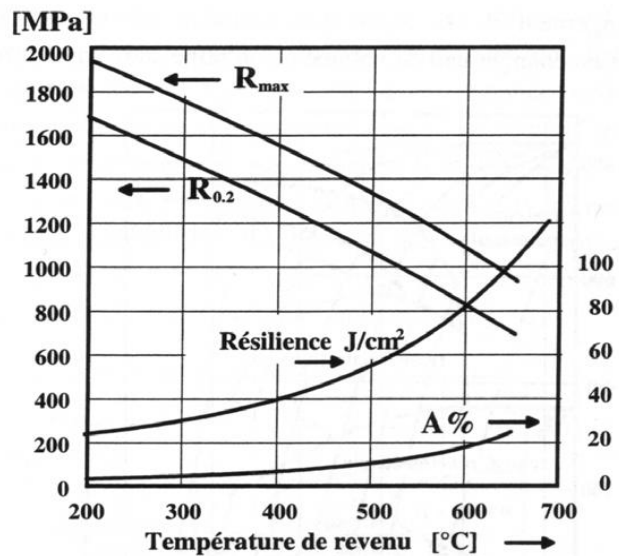


Figure (II.10) : Diagramme de revenu de l'acier 40NiCrMo6. Évolution des propriétés en fonction de la température de revenu (température de trempe 840 °C)

D'autres contraintes résiduelles, qui varient fortement d'un grain à l'autre, prennent naissance lors de la transformation martensitique et ont pour origine le changement de la forme (cisaillement des atomes le long des plans cristallographiques) et le changement de volume qu'entraîne cette transformation.

Le revenu permet de transformer graduellement l'état martensitique - métastable - vers un état d'équilibre, caractérisé par la coexistence de ferrite et de cémentite. L'augmentation de la température permet la germination et la croissance de la cémentite et, le cas échéant, des carbures. La martensite s'appauvrit ainsi en carbone et sa maille cristalline se transforme continuellement dans la maille CC de la ferrite. Les distorsions du réseau cristallin, caractéristiques pour les microstructures martensitiques, et avec eux les contraintes résiduelles, à l'origine de la fragilité, sont relâchées. Les propriétés mécaniques que l'on obtient après un revenu de 30 min sont représentées dans le diagramme de revenu et qui est normalement fourni par le fabricant de l'acier. Le diagramme montré en fig. 5 correspond à celui d'un acier d'amélioration que l'on utilise pour la réalisation des pièces de construction fortement sollicitées (arbres, engrenages). En particulier il s'agit de l'acier 40NiCrMo6 qui a la composition : 0.4% C, 1.4% Ni, 0.8% Cr et 0.4% Mo. [2]

II.7 Défauts De Matériaux

Les structures cristallines sont en réalité très rarement parfaites. On y trouve une grande variété de défauts qui jouent un rôle fondamental envers les propriétés des matériaux. Ils sont décrits ici sans préjuger, pour le moment, des avantages et inconvénients liés à leur existence. Les défauts sont généralement classés selon le nombre de dimensions de l'espace qui sont concernées. Tous possèdent une énergie propre qui gouverne leur apparition et leur agencement dans le cristal. [3]

II.7.1 Défauts Ponctuels (Dimension 0)

Ce sont des perturbations du réseau à l'échelle atomique. Parmi les défauts atomiques (Figure II.11) on trouve les lacunes (sites vacants sur le réseau), les interstitiels (atomes situés entre les atomes du cristal), les atomes d'une espèce chimique différente en solution de substitution (dans le réseau) ou d'insertion (interstitiels). Parmi les défauts électroniques on trouve les paires électron/trou. Dans les solides ioniques ou iono-covalents, les défauts (y compris les lacunes) peuvent être chargés et on trouve fréquemment des associations de défauts qui préservent la neutralité électrique : défauts de Schottky (lacune de cation + lacune d'anion), défauts de Frenkel (lacune et interstitiel de charges opposées). Parmi les propriétés influencées par les défauts ponctuels on trouve le comportement mécanique à chaud, les propriétés de percolation et de transport (diffusion de matière, de chaleur), ainsi que la conductivité électrique. [3]

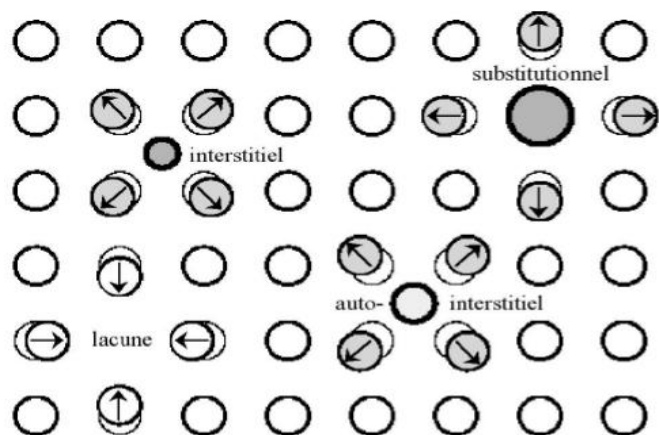


Figure (II.11) : Défauts ponctuels (lacunes, solutés en insertion et en substitution) et déplacements atomiques associés.

II.7.2 Défauts Linéaires (Dimension 1)

Ce sont les dislocations, qui représentent des distorsions locales du réseau. On distingue les dislocations « coin » (frontière d'un demi-plan « supplémentaire » de l'espace), les dislocations « vis » et les dislocations mixtes (caractère à la fois coin et vis) (Figure 7a). Les dislocations sont caractérisées localement par deux vecteurs : le vecteur ligne, qui suit localement la ligne de la dislocation et le vecteur de Burgers, qui caractérise le défaut. Pour déterminer le vecteur de Burgers, on trace un circuit fermé dans le cristal contenant la

dislocation, et faisant le tour de celle-ci, puis on trace un circuit équivalent (mêmes déplacements unitaires, mais cette fois-ci dans le cristal parfait). Ce nouveau circuit n'est plus fermé et le « défaut de fermeture » est appelé le vecteur de Burgers (Figure 7b). C'est un vecteur du cristal parfait, qui s'exprime par ses indices de Miller. Il est indépendant du circuit choisi et constant le long de la dislocation. Les dislocations assurent en particulier la déformation plastique des matériaux, ce qui explique la grande déformabilité de nombreux métaux, dans lesquelles les dislocations se multiplient et se déplacent beaucoup plus facilement que dans les solides covalents, ioniques ou iono-covalents (liaisons fortes), ainsi que dans les polymères (très faible libre parcours moyen). [3]

II.7.3 Défauts Surfacciques (Dimension 2)

Ce sont par exemple les surfaces libres (perturbation du voisinage des atomes de surface qui ont perdu certains de leurs voisins) et les interfaces entre grains ou entre phases différentes. Elles peuvent être cohérentes, semi cohérentes (c'est-à-dire cohérentes « presque partout » moyennant un réseau de défauts) ou incohérentes (Figure (II.13)). L'énergie d'interface est faible pour les interfaces cohérentes (distorsion élastique) et très élevée pour les interfaces incohérentes et les surfaces libres (forte perturbation du voisinage des atomes). Cette énergie d'interface joue un rôle considérable dans la formation et l'évolution de la structure des matériaux. On trouve aussi les fautes d'empilement, qui sont des perturbations de l'empilement des plans atomiques, et les joints de macles, qui sont des plans de symétrie (généralement denses) entre deux « grains » possédant une désorientation particulière. Quelques valeurs typiques d'énergies d'interface sont données dans le Tableau (II.5).

L'épaisseur de la zone perturbée étant faible (de l'ordre de quelques distances inter atomiques), les interfaces occupent généralement un volume très faible de la matière; ceci n'est cependant plus le cas dans un matériau possédant une très forte densité d'interfaces, comme les matériaux « nanocristallins » qui peuvent contenir jusqu'à 10 ou 15% en volume de zones « interfaciales », ce qui entraîne une modification importante de leurs propriétés. [3]

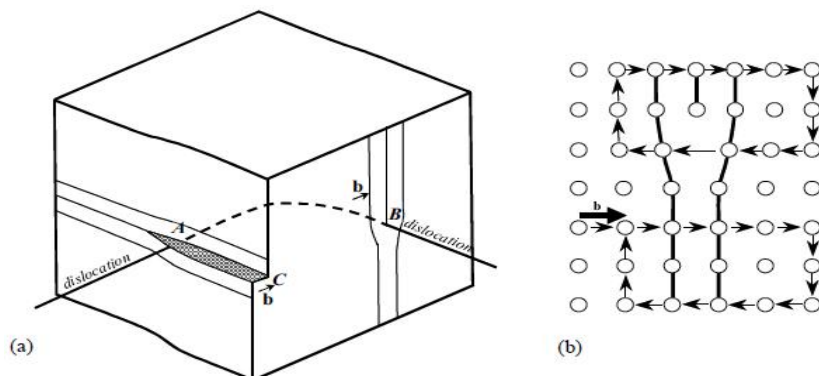


Figure (II.12) : Les dislocations

- (a) Ligne de dislocation présentant un caractère coin en B et vis en A-C.
- (b) Circuit de burgers (en haut, dans le cristal avec la dislocation ; en bas le même circuit dans le cristal parfait), le défaut de fermeture étant le vecteur de burgers b . On a surligné certaines rangées cristallographiques afin de mieux visualiser la dislocation.

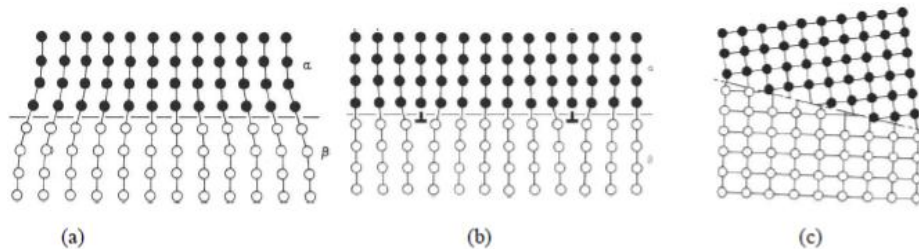


Figure (II.13) : Les interfaces cohérentes et incohérentes

- (a) cohérente (remarquer les distorsions élastiques pour accommoder l'écart de paramètre de maille entre les phases α (atomes blancs) et β (atomes noirs)) ;
- (b) semi cohérente (remarquer les dislocations d'accommodation géométrique) ;
- (c) incohérente (remarquer la structure très perturbée à l'interface).

Citons quelques exemples de matériaux pour l'automobile où les joints de grains jouent un rôle très important :

Alliages de plomb pour les batteries plomb-acide (réglage de la résistance des joints de grains à la rupture fragile), ainsi que certains thyristors et varistors (propriétés contrôlées par les résistances relatives des grains et des zones proches des joints de grains).

Métal ou alliage	Surfaces libres ($T = T_f$)	Joints de grains	Joints de macles incohérents	Joints de macles cohérents	Défauts d'empilement
Al	1080 (660°C)	324 (450°C)		100	200
Ag	1136 (961°C)	375 (950°C)	126	8	25
Au	1400 (1063°C)	378 (1000°C)		15	30 à 50
Cu	1710 (1083°C)	615 (925°C)	498	23	40 à 55
acier inox.	2088 (1421°C)	835	209	7 à 19	15
W	2634 (3410°C)	1080 (2000°C)			

T_f : température de fusion du matériau ; « acier inox. » : acier inoxydable de type AISI 304

Tableau (II.5) : Quelques valeurs typiques d'énergie d'interface pour les métaux et alliages (mJ/m²)

II.7.4 Défauts Volumiques (Dimension 3)

Les défauts dits « volumiques » sont essentiellement des cavités, des phases non désirées, des inclusions (morceaux de matière étrangère, provenant de l'élaboration, par exemple particules venant d'un creuset). Ils proviennent notamment de l'élaboration du matériau (frittage des céramiques, métallurgie des poudres ou capillaires de fluide pour les

cavités) ou de l'endommagement de celui-ci lors de son utilisation. On trouve aussi des défauts géométriques tels que les « cordes » dans les verres ou l'hétérogénéité de taille des bulles dans les matériaux mousseux.

Chacun de ces défauts a une probabilité d'apparition qui est gouvernée par des considérations thermodynamiques (énergie de formation) et cinétiques; à titre d'exemple, la fraction volumique de lacunes, qui augmente fortement avec la température à cause du terme d'entropie dans l'enthalpie libre de Gibbs, ne dépasse cependant pas 0.1% même lorsque l'on s'approche de la température de fusion.

Les interactions entre défauts sont fréquentes, souvent connues, parfois utilisées. Citons par exemple le drainage d'atomes de soluté par les dislocations, l'épinglage des joints de grains (au cours de leur migration à haute température) par les précipités, la présence d'un gradient de potentiel électrique près de joints de grains des solides iono-covalents, etc... Un exemple : les régulateurs d'injection électronique à base de TiO_2 non stoechiométrique, appelés sondes lambda. La conductivité électrique (par électrons) de ce matériau dépend de la pression d'oxygène, ce qui permet de régler la stoechiométrie du mélange air-carburant et de décomposer à la fois CO et les oxydes d'azote, limitant ainsi la pollution. [3]

II.8 Les Défauts De Soudage

II.8.1 Les Fissures

Les fissures sont définies comme des discontinuités de type fracture caractérisées par une extrémité en pointe et à haut rapport de longueur/largeur. Elles peuvent se produire dans le métal fondu, la zone affectée thermiquement, et le métal de base lorsque des contraintes localisées dépassent la résistance maximum du matériau, la fissuration est souvent initiée par des concentrations de contraintes causées par d'autres discontinuités mécaniques ou à proximité d'entailles associées à la configuration du joint. Les contraintes qui provoquent la fissuration peuvent être soit résiduelles ou appliquées. Les contraintes résiduelles se développent en raison de restrictions issues de l'opération de soudage et de la contraction thermique qui suit la solidification de la soudure. Si une fissure est décelée durant le soudage, celle-ci doit être complètement éliminée avant de poursuivre le soudage. [4]

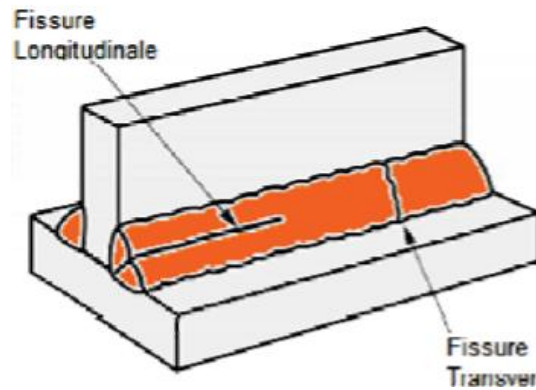
Le soudage sur une fissure supprime rarement la fissure.

II.8.1.1 Orientation Des Fissures

Les fissures peuvent être décrites comme étant longitudinales ou transversales, en fonction de leur orientation.

II.8.1.1.1 Les Fissures Longitudinales

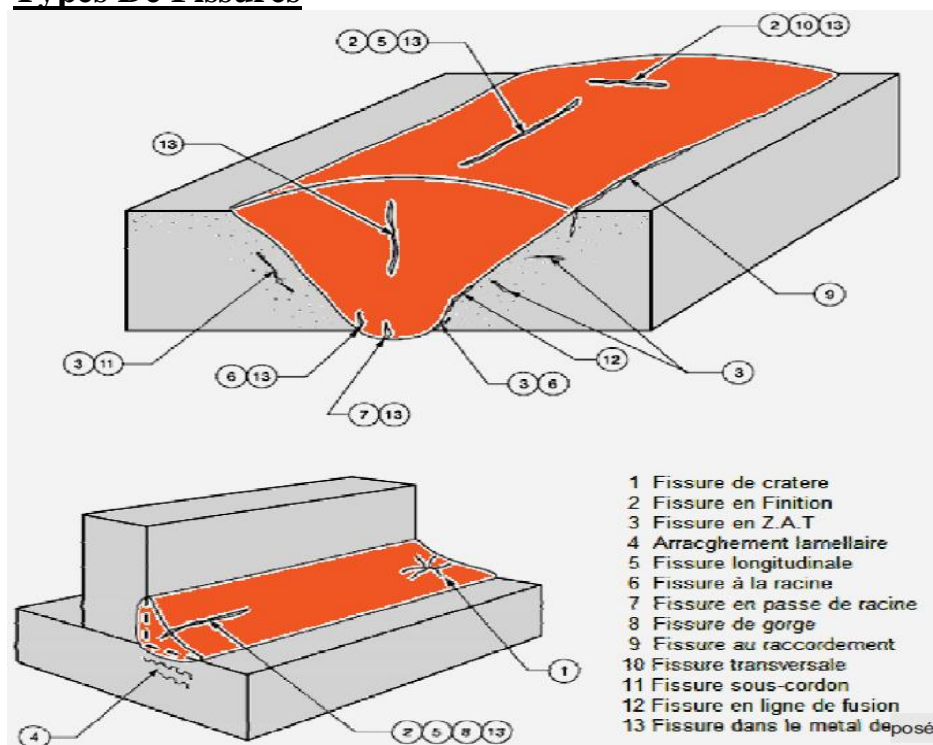
Quand une fissure est parallèle à l'axe de la soudure, elle est appelée fissure longitudinale. Les fissures longitudinales de la zone affectée thermiquement sont généralement causées par de l'hydrogène dissous. [4]



II.8.1.1.2 Les Fissures Transversales

Sont perpendiculaires à l'axe de la soudure. Celles-ci peuvent être limitées en taille et contenues entièrement dans le métal de soudure ou bien se propager dans la zone adjacente affectée par la chaleur puis dans le métal de base à partir du métal de soudure. [4]

II.8.1.2 Types De Fissures



II.8.1.2.1 Fissures De Gorge (Throat Cracks): Ce sont des fissures longitudinales orientées le long de la gorge des soudures d'angle. Elles sont généralement des fissures à chaud.

II.8.1.2.2 Fissures De Racine: Ce sont des fissures longitudinales à la racine de la soudure ou de la surface de la racine. Elles peuvent être des fissures à chaud ou à froid.

II.8.1.2.3 Fissures De Cratère: Elles se produisent dans le cratère formé à la fin d'un cordon de soudure lorsque la soudure est mal terminée (coupure trop rapide de l'arc). Elles sont parfois appelées fissures en étoile. Les fissures de cratère sont en général des fissures à chaud formant un réseau en étoile.

II.8.1.2.4 Fissures Au Raccordement: Ce sont des fissures à froid, elles apparaissent et se propagent depuis l'extrémité de la soudure où les contraintes de retrait sont concentrées. Les fissures au raccordement apparaissent à peu près à la normale de la surface du métal de base.

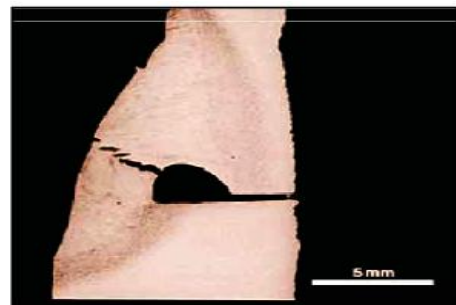
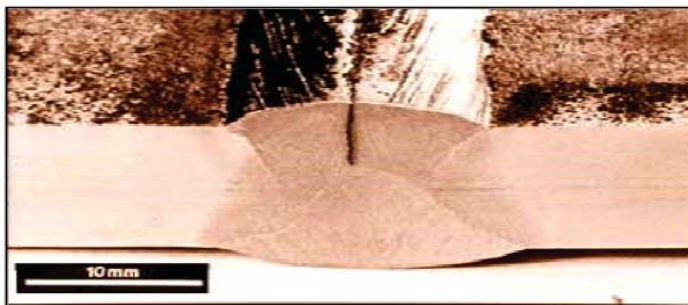
II.8.1.2.5 Fissures Sous -Cordon (ou de Zone Affectée Thermiquement). Les deux appellations sont utilisées de façon interchangeable. Ce sont généralement des fissurations à froid qui se forment dans la zone affectée par la chaleur du métal de base. Les fissures sous cordon peuvent se produire lorsque trois éléments sont présents simultanément:

- (1) Hydrogène
- (2) Une microstructure de ductilité relativement faible
- (3) De fortes contraintes résiduelles

Ces fissures peuvent être longitudinales et transversales.

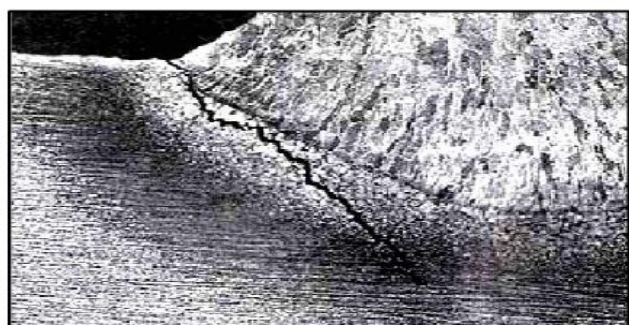
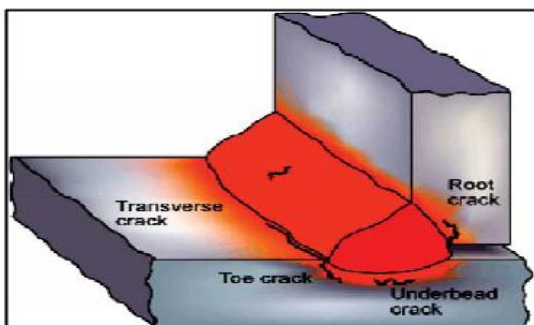
II.8.1.3 Fissure a Chaud (ou de solidification)

C'est une fissure localisée normalement au centre de la coupe transversale d'une soudure, qui peut déboucher en surface et se propager dans le sens longitudinal. Elle se forme lors de la solidification du métal déposé à température élevée. [4]



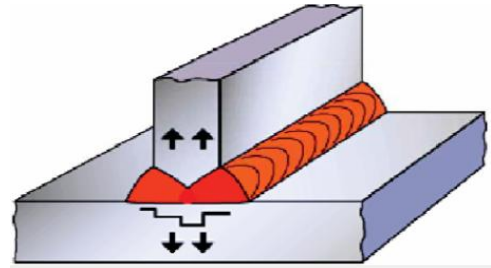
II.8.1.4 Fissures a Froid (Fissures d'Hydrogène)

Ce sont des fissures qui apparaissent à la suite de contraintes dans le métal aux alentours de la température ambiante. Ces fissures sont toujours localisées dans des zones de transition avec structure de trempe et peuvent déboucher dans la soudure même. La diffusion d'hydrogène est toujours un facteur contribuant. [4]



II.8.1.5 Fissuration Lamellaire (ou Arrachement Lamellaire)

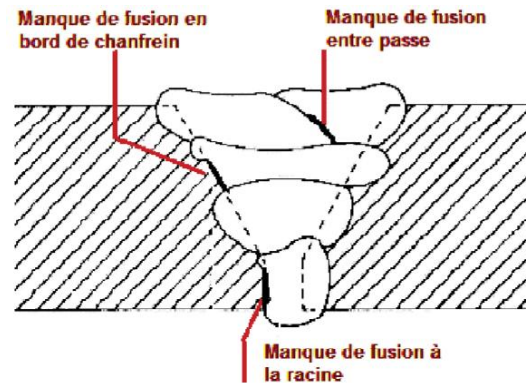
L'arrachement lamellaire (ou fissure lamellaire) peut se produire sous la soudure spécialement dans les tôles laminées à faible ductilité dans le sens de l'épaisseur.



II.8.2 Manques De Fusion

Les manques de fusion peuvent apparaître :

- Soit dans le flanc de la soudure entre métal de base et métal déposé
- Soit entre passes de soudage
- Soit à la racine de la soudure entre métal de base et métal déposé.



II.8.2.1 Manque De Fusion Dans Le Flanc De La Soudure

Manque de cohésion moléculaire entre métal d'apport et métal de base au flanc de la soudure

II.8.2.2 Manque De Fusion Entre Passes

Manque de cohésion moléculaire entre les passes d'une soudure multi-passes

II.8.2.3 Manque De Fusion à La Racine De La Soudure

Manque de fusion moléculaire entre métal d'apport et métal de base à la racine de la soudure. Cette faute est souvent accompagnée d'un manque de pénétration.

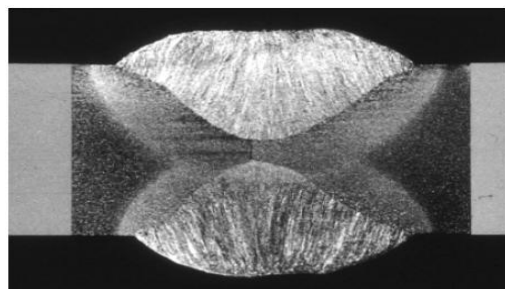
II.8.3 Manques De Pénétration

Le manque de pénétration peut être localisé :

- A la racine de la soudure (soudure en « V »)



- A l'intérieur de la soudure (soudure avec reprise à revers « X »)



II.8.3.1 Manque De Pénétration à La Racine

Le métal d'apport n'atteint pas la racine du chanfrein.

II.8.3.2 Manques De Pénétration Dans La Soudure

Le métal d'apport n'atteint pas le milieu du chanfrein en X.

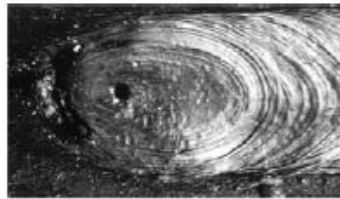
II.8.4 Inclusions Gazeuses

Les inclusions gazeuses peuvent se présenter sous 3 formes :

- Porosités vermiculaires



-Porosités de reprise



-Porosités uniformes



II.8.4.1 Porosités Vermiculaires

Cavités allongées formées par des gaz enfermés pendant la solidification du cordon. Elles peuvent se présenter isolées ou groupées (elles ont souvent une forme caractéristique d'arête de poisson suivant les séquences de solidification des dendrites).

II.8.4.2 Porosités De Reprise

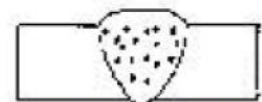
Porosités limitées à une petite partie du cordon et qui apparaissent lors d'un soudage électrique manuel ou automatique lors de l'amorce d'une passe.

II.8.4.3 Porosités Uniformes

Porosités qui sont distribuées uniformément dans le cordon.

II.8.5 Inclusions Solides

Des inclusions solides peuvent être de 3 types différents :



Nid de Soufflures



Chapelet de Soufflures

II.8.5.1 Inclusions De Laitier

Du laitier qui a été enfermé dans le cordon de soudure. Ces inclusions peuvent avoir :

- Un aspect linéaire: les inclusions sont alors groupées en parallèle à l'axe du cordon.
- Un aspect quelconque: elles sont alors isolées

II.8.5.2 Inclusions De Tungstène

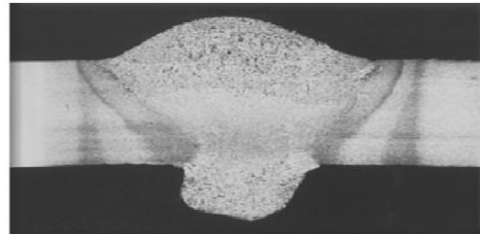
Parties fusionnées de l'électrode en tungstène qui est utilisée dans le procédé TIG (US= GTAW).

II.8.5.3 Inclusions De Cuivre

Une inclusion accidentelle de cuivre dans le bain de fusion qui peut provoquer des fissures dans la zone de soudage.

II.8.6 Excès De Matière

Un excès de matière peut se présenter la racine du cordon (excès de pénétration) ou à la surface (surépaisseur) éventuellement accompagné de recouvrements du métal de base non fusionnés.



II.8.6.1 Excès De Pénétration

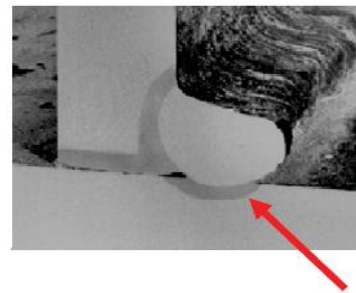
Pénétration excessive du métal d'apport à la racine du cordon.

II.8.6.2 Surépaisseur

Un apport excessif de métal qui cause, de la convexité dans les soudures d'angle, et des épaisseurs supérieures à celles du métal de base pour les soudures bout à bout.

II.8.6.3 Recouvrements Non Fusionnés (Débordements)

L'écoulement d'un excès de métal d'apport sur la surface du métal de base, soit à la racine de la soudure, soit à la surface supérieure sans fusion avec ce métal de base.



II.8.7 Dénivellement

Un alignement incorrect des bords à souder dans une soudure bout à bout. Ceci mène à des contraintes locales qui peuvent surtout être nocives en sollicitations cycliques (fatigue).

II.8.8 Cratère

Une dépression de retrait à la fin d'une passe où la source de chaleur a été enlevée.



II.8.9 Défauts De Surface

II.8.9.1 Morsures/Caniveaux

Un creux irrégulier à la surface du cordon juste au contact du métal d'apport et du métal de base. [4]

II.8.9.2 Effondrement

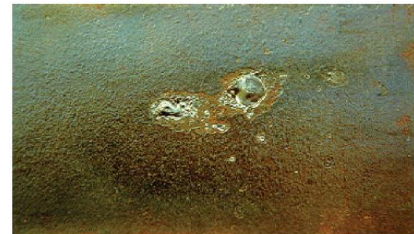
L'effondrement L effondrement est le résultat de l'affaissement du métal déposé dû à une fusion excessive. On distingue différents types d'effondrements. [4]



II.8.9.3 Amorces d'Arc

Des points de métal fondu où l'électrode, la pince d'électrode ou la masse ont touché par hasard le métal de base et ont provoqué un arc de courte durée.

Ceci peut créer localement une structure de trempe qui peut être à la base de fissures. [4]



II.8.9.4 Projections Sur Le Métal De Base

De petites gouttes du matériau d'électrode qui ont été projetées sur le métal de base et qui sont fusionnées avec ce métal. [4]

II.8.9.5 Défaut d'Aspect

Une pauvre technique de soudage est la cause habituelle de ces imperfections:

- Dimension de l'électrode pour la passe de finition trop grande.
- Vitesse de soudage trop lente.
- Courant de soudage trop faible.
- Tension d'arc trop basse (SAW et GMAW).
- Une mauvaise manipulation de l'électrode.
- Un positionnement/placement incorrect du cordon de soudure. [4]



Chapitre III

La Radiographie

III.1 Principe de fonctionnement

Le principe fondamental de la radiographie est de mesurer les différences de densité et/ou d'épaisseur dans un matériau. Pour être capable d'effectuer une radiographie trois éléments de base sont requis : [5]

- Source de rayonnement
- Spécimen
- Enregistrement (film)

Le tableau suivant indique l'interrelation entre ces trois éléments :

Spécimen (Densité physique)	Radiation (intensité de radiation qui attaque le sel d'argent)	Film (densité optique)
1- Plus dense (tungstène)	Moins de radiation	Région la plus pâle
2- Plus épais (soudure)	Un peu moins de radiation	Région pâle
3- Epaisseur uniforme	Radiation uniforme	Densité uniforme
4- Moins épais ou moins dense (porosité)	Plus de radiation	Région plus foncée

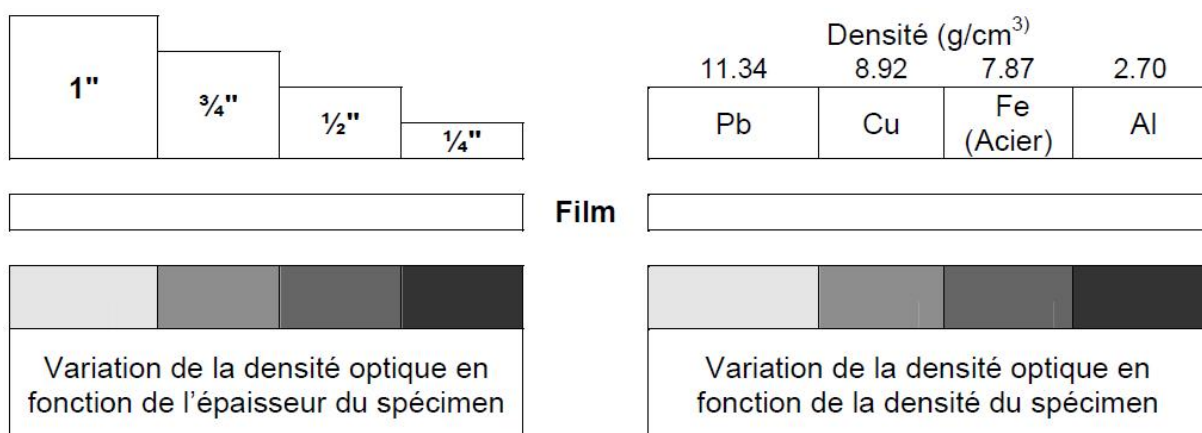


Figure (III.1) : L'interrelation entre source de rayonnement, spécimen et film.

III.2 Radiographie industrielle

La radiographie industrielle est définie de la façon suivante :

L'utilisation d'énergie de rayonnement sous forme de rayon X ou GAMMA dans l'inspection non destructive d'objets opaques pour produire une radiographie sur des films radiographiques. L'image ainsi produite est utilisée pour obtenir des informations sur l'homogénéité de la pièce sous examen. [5]

III.2.1 Moyens de détection

- En mesurant l'ionisation produite par des rayonnements par l'utilisation de compteurs de radiation ;
- En mesurant l'effet de scintillement ou la quantité de lumière émise de certains matériaux lorsqu'ils sont bombardés par des rayonnements. Cette méthode s'appelle fluoroscopie et est surtout utilisée surtout en médecine ;
- En déterminant son effet sur un film photographique.

La radiographie industrielle repose essentiellement sur l'utilisation d'un film photographique qui constitue un enregistrement « record » permanent appelé "radiographie". [5]

III.2.2 Applications

PERSONNEL ÉQUIPEMENTS PROCÉDURES TECHNIQUES	AVEC FILM	Pièces coulées
		Pièce forgées
		Soudures (90%)
		Pièces électroniques
		Béton (barre d'armatures)
	SANS FILM (Plaque fluoroscopique)	Adhérence (Bonding)
		Mesure d'épaisseur
		Corrosion (Recherche)
		Assemblage (Précision)
		Validation (procédure, processus)

Figure (III.2) : Application de la radiographie

III.2.3 Avantages de la radiographie industrielle

- Méthode volumétrique;
- Détection de défauts internes;
- Dossier permanent.

III.2.4 Désavantages de la radiographie industrielle

- Accès des deux cotés de la pièce;
- Mesures de sécurité importantes;
- Certain défauts (plans) ne sont pas détectés de façon fiable;
- Matériel encombrant et fragile (rayon X);
- Configuration de la pièce;
- Epaisseur des pièces.

III.3 Spectre électromagnétique

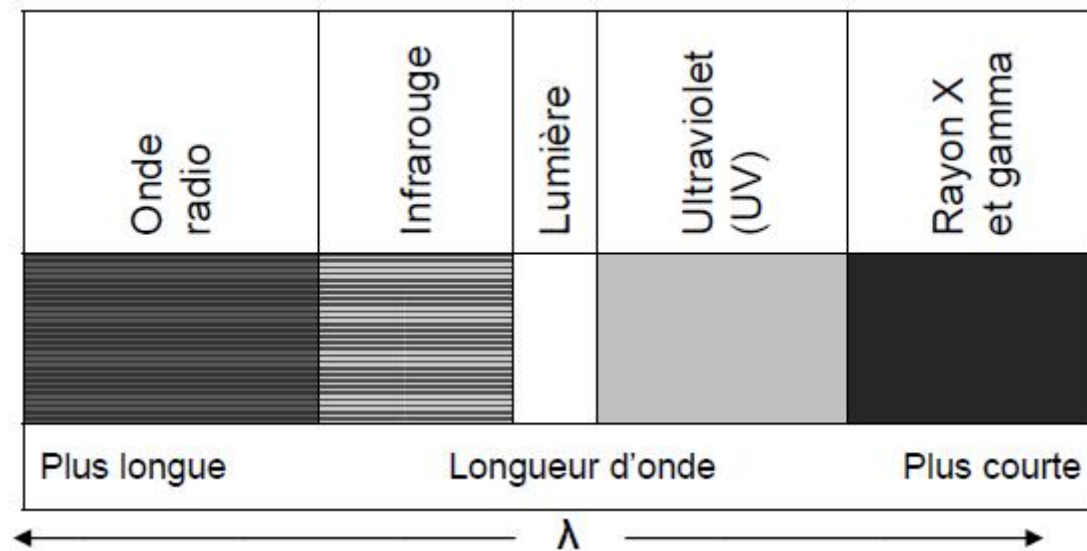


Figure (III.3) : Le spectre électromagnétique.

III.3.1 Energie

L'énergie des rayonnements est exprimée en électron-volts eV. Un électron-volt est un électron qui se déplace sous une différence de potentiel d'un volt. En radiographie industrielle l'énergie est exprimée en KeV (millier d'électron volts) ou en MeV (million d'électron volts).

Plus l'énergie est élevée plus la longueur est courte. [5]

III.3.2 Longueur d'onde

La longueur d'onde est en direct relation avec la capacité à pénétrer. Plus la longueur d'onde est courte plus le pouvoir de pénétration est grand.

III.4 Structure de la matière

La matière est formée de petites particules fondamentales appelées atomes.

Les atomes sont constitués de particules encore plus petites soient :

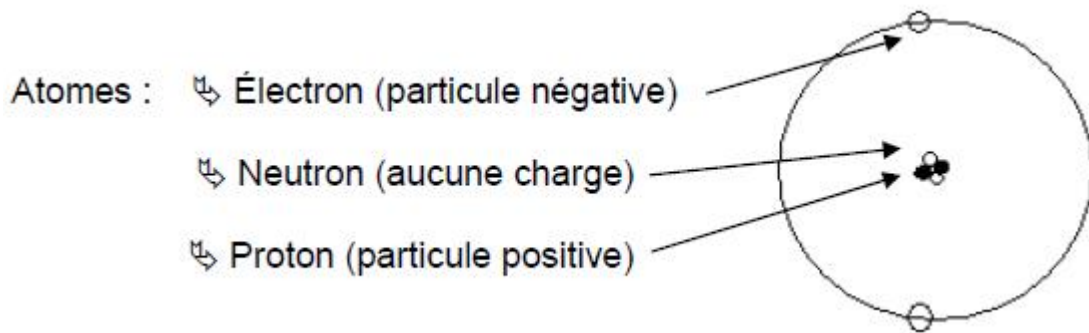


Figure (III.4) : Constitution d'un atome

III.4.1 Numéro atomique

Le numéro atomique correspond au nombre de proton et est représenté par la lettre Z.

III.4.2 Numéro de masse

Le numéro de masse correspond au nombre de proton + le nombre de neutrons et est représenté par la lettre A.

Le nombre de neutrons est représenté par la lettre N d'ou la formule :

$$A = Z + N \quad \text{ou} \quad N = A - Z$$

Particule	Symbole	Masse relative	Charge électrique
Proton	P	1	+ positive
Neutron	N	1	0 neutre
Électron	e	1/1840	- négative

III.4.3 Isotope

Un isotope est un atome dont le nombre de neutrons varie par conséquent ces atomes ont plus qu'un nombre de masse. **Ex :** l'uranium $^{235}_{92}\text{U}$ et l'uranium $^{238}_{92}\text{U}$.

Il existe différents types d'isotopes (Naturel neutre, Naturel stable, Artificielle (habituellement instable)). [5]

III.5 Effet du rayonnement

III.5.1 Ionisation

Lorsque les rayons X et gamma traversent la matière, ils peuvent entrer en collision avec des électrons. Sous l'impact l'électron est éjecté de l'atome formant une paire d'ions. Une paire d'ion est constituée d'une particule négative (l'électron) et une particule positive (l'atome ayant ainsi un électron en moins).

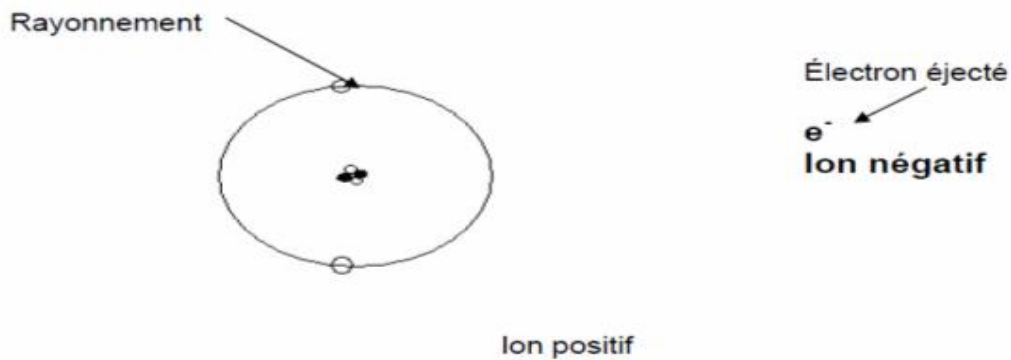


Figure (III.5) : Atome d'hélium ionisé

III.5.2 Effets

Trois types d'effets produisent l'ionisation:

- Effet Photoélectrique.
- Effet Compton.
- Production de pair.

III.5.2.1 Effet photoélectrique

Il se produit lors de l'ionisation, l'électron éjecté est appelé photoélectron. Cet électron a la propriété d'affecter l'halogénure d'argent contenue dans l'émulsion de film.

L'énergie du rayonnement est complètement absorbée. Il se produit à basse énergie (0.5MeV ou moins).

III.5.2.2 Effet Compton

Il se produit lorsque l'énergie du rayonnement n'est pas complètement absorbée lorsqu'il rentre en collision avec l'électron. Il en résulte un rayonnement diffusé de moindre énergie. Il se produit à haute énergie (0.1Mev à 3Mev). Sa trajectoire est à un angle différent du rayonnement primaire.

III.5.2.3 Effet production de paire

Il se produit lorsque le rayonnement se rapproche du noyau. Il en résulte de l'autre côté un électron négatif et un électron positif (positron). Il se produit à très haute énergie (1.2 Mev et plus). Il n'ont aucun intérêt pour la formation d'image radiographique.

III.6 Radiation

Les radiations peuvent être produit par :

- ❖ LES RAYONS X qui sont eux-mêmes produit par un courant électrique et ils sont poly chromatique (ils possèdent plusieurs longueurs d'ondes).
- ❖ LES RAYONS GAMMA produit par la désintégration de radio-isotope monochromatique.

Leurs caractéristiques sont les suivantes :

- ✓ ils pénètrent la matière, car ils ont de courtes longueurs d'onde (note 1).
- ✓ ils ionisent la matière (note 2).
- ✓ ils ne peuvent détecter par le sens humain.
- ✓ ils ne possèdent pas de masse.
- ✓ ils voyagent en ligne droite.
- ✓ ils n'ont aucune charge électrique.

III.6.1 Les Rayons X

La production de rayon X dépend de deux paramètres :

- milliampérage (intensité du faisceau).
- kilovoltage (énergie du rayonnement).

III.6.1.1 Le milli ampérage

Il influence seulement le temps de pose et n'a aucune incidence sur la qualité de l'image radiographique.

III.6.1.2 Le kilo voltage

Il joue sur la longueur d'onde des rayonnements émis et sur leur pouvoir de pénétration.

kv	RESULTATS				QUALITÉ
	ONDE	PÉNÉTRATION	CONTRASTE	SENSIBILITÉ	
+	PLUS COURTE	AUGMENTE	DIMINUE	DIMINUE	MÉDIOCRE (RAYON DUR)
-	PLUS LONGUE	DIMINUE	AUGMENTE	AUGMENTE	BONNE (RAYON MOU)

Tableau (III.1) : Influence du voltage en radiographie.

III.6.1.3 Le Tungstène (MW184) - filament et cible

Numéro atomique : 74 et numéro de masse : 184

Les caractéristiques du tungstène sont les suivantes :

- matériel dense, produit des rayons X à grand rendement.
- haut point de fusion.
- grande conductivité thermique.

C'est pour ces caractéristiques que la cible est fabriquée avec ce matériel parce que lors de la génération de rayon X 99% de l'énergie est transformé en chaleur. La cible est montée dans un bloc de cuivre pour dissiper cette chaleur. [5]

III.6.1.4 Capacité des appareils a rayon X pour l'acier

Tension (KV)	Épaisseur maximale d'acier	
	(mm)	(pouce)
80	4	0.15
100	7.5	0.30
150	19	0.75
200	25	1.00
250	50	2.00
400	75	3.00
1000	125	5.00
2000	250	10.00
15 000 à 24 000	500	20.00

Tableau (III.2) : Capacité des appareils à rayon X pour l'acier

III.7 Facteurs radiographiques

La qualité radiographique dépend de :

- Définition (facteurs géométrique et facteurs liés au film).

La définition dépend de trois facteurs :

- 1) le flou géométrique.
 - 2) la distorsion géométrique (manque de parallélisme entre le spécimen et le film) :
 - a. dimension de la source (plus petite possible).
 - b. distance source/film.
 - c. distance source/objet.
 - d. épaisseur de l'objet (objet/film).
 - 3) la granulation du film :
 - a. type de film.
 - b. énergie du rayonnement.
 - c. température de développement.
 - d. type d'écran.
- Contraste (du film et du spécimen).

Le contraste dépend du contraste du film lui-même et du contraste du spécimen. [5]

III.8 Éléments de radiographie

Les éléments de la radiographie sont les suivants :

- ✓ La densité.

- ✓ La sensibilité.
- ✓ Le contraste.
- ✓ La latitude.
- ✓ La définition.
- ✓ Le film.
- ✓ Les écrans.
- ✓ Les indicateurs de la qualité de l'image (IQI).

III.8.1 La densité (noircissement du film)

La densité du film est le degré de noircissement du film affecté par :

- a) Intensité du faisceau.
- b) Distance source/film.
- c) Rayonnement absorbé par le spécimen.
- d) Temps de pose.
- e) Film.

La densité du film est déterminée par la quantité de lumière transmise au film selon le rapport suivant :

$$T = \frac{I_i}{I_t}$$

I_i = lumière transmise par le film
 I_t = lumière incidente sur le film

La gamme de densité la plus demandée par les normes se situe entre 2.0 et 4.0.

III.8.2 La Sensibilité

La sensibilité est définie comme étant la plus petite variation en pourcentage de l'épaisseur que l'on puisse détecter.

Une sensibilité considérée comme normale est égale à 2% de l'épaisseur totale radiographiée.

La sensibilité est mesurée à l'aide d'un IQI. La sensibilité est directement proportionnellement à la définition et au contraste. [5]

III.8.3 La Définition

La définition radiographique est la netteté du contour de l'image.

Elle est fonction de :

- Dimension de la source.
- Distance source/objet.
- Distance objet/film.

- Épaisseur du spécimen.
- Distorsion géométrique.
- Grosseur des grains.

- La pénombre ou imprécision géométrique « U_g » est déterminée par la formule suivante :

$$U_g = \frac{F \times d}{D}$$

F = dimension de la source

d = distance du dessus du spécimen au film

D = distance du dessus du spécimen à la source

III.8.4 Le Contraste

Le contraste est la différence de densité entre deux régions adjacentes. Plus la densité optique de l'image du défaut et celle de la région adjacente du défaut est grande, plus il sera facile à le détecter et surtout à l'identifier. Le contraste est le résultat du contraste du film et du spécimen.

Le contraste du film est fonction de :

- ✓ Type de film.
- ✓ Durée de développement.
- ✓ Température de développement.
- ✓ Activité chimique du révélateur.
- ✓ Contamination du fixateur.
- ✓ Densité requise.
- ✓ Type d'écran.

Le contraste du spécimen est fonction de :

- Épaisseur de l'objet.
- Masse volumique du matériau.
- Énergie du rayonnement.
- Rayonnement diffusé.
 - Blocage.
 - Cache.
 - Filtres.
 - Écran.
 - Collimateur.

Les facteurs relatifs au film sont fonction de :

- Type de film :
 - a. sensibilité.

- b. granulation.
 - c. contraste inhérent du film.
 - d. voile du film.
- Énergie du rayonnement.
 - Température de développement.
 - Type d'écran ou sans écran.

III.8.5 La Latitude

La latitude est la gamme d'épaisseur que l'on peut enregistrer sur un film à l'intérieur de la gamme utile de densité. La latitude est inversement proportionnelle au contraste. Plus un film a une grande latitude moins grand sera le contraste. La latitude est en fonction de la grosseur des grains d'argent dans l'émulsion du film. [5]

III.8.6 Le Film

Les films ont été classés par la norme ASTM E142 en quatre catégories selon la grosseur du grain d'argent soient :

- Type 1 : grain très fin (D4, D5).
- Type 2 : grain fin (D6, D7).
- Type 3 : grain moyen.
- Type 4 : gros grain.

Les caractéristiques du film sont :

- La vitesse (Lente pour les gros grains et rapide pour les petits).
- Le contraste.
- La latitude.
- La granulation.

Le film radiographique est constitué d'un support transparent et flexible (cellulose) enduit de chaque côté d'une émulsion photosensible composée d'halogénure d'argent dans de la gélatine suivit d'une couche protectrice.

Couche protectrice : constituée uniquement de la gélatine.

Émulsion : composé d'halogénure d'argent en suspension dans de la gélatine.

Elles constituent la partie photosensible du film.

Substrat : constitué de gélatine et d'un solvant compatible avec la base du film.

Base : habituellement constitué de cellulose triacétate. De nouveaux matériaux sont aussi utilisés en polyester ou polycarbonate.

III.8.6.1 Image Latente

Lorsque les grains d'argent dans l'émulsion ont été exposés aux radiations mais non pas subit la réaction chimique avec le révélateur. La période latente est le temps entre l'exposition du film aux radiations et le temps que l'image est révélée c'est-à-dire lorsque le film sort du fixateur.

III.8.6.2 Courbe caractéristique du film

La courbe caractéristique du film est fournie par le fabricant. Elle exprime le rapport entre l'exposition auquel on le soumet et la densité qui en résulte.

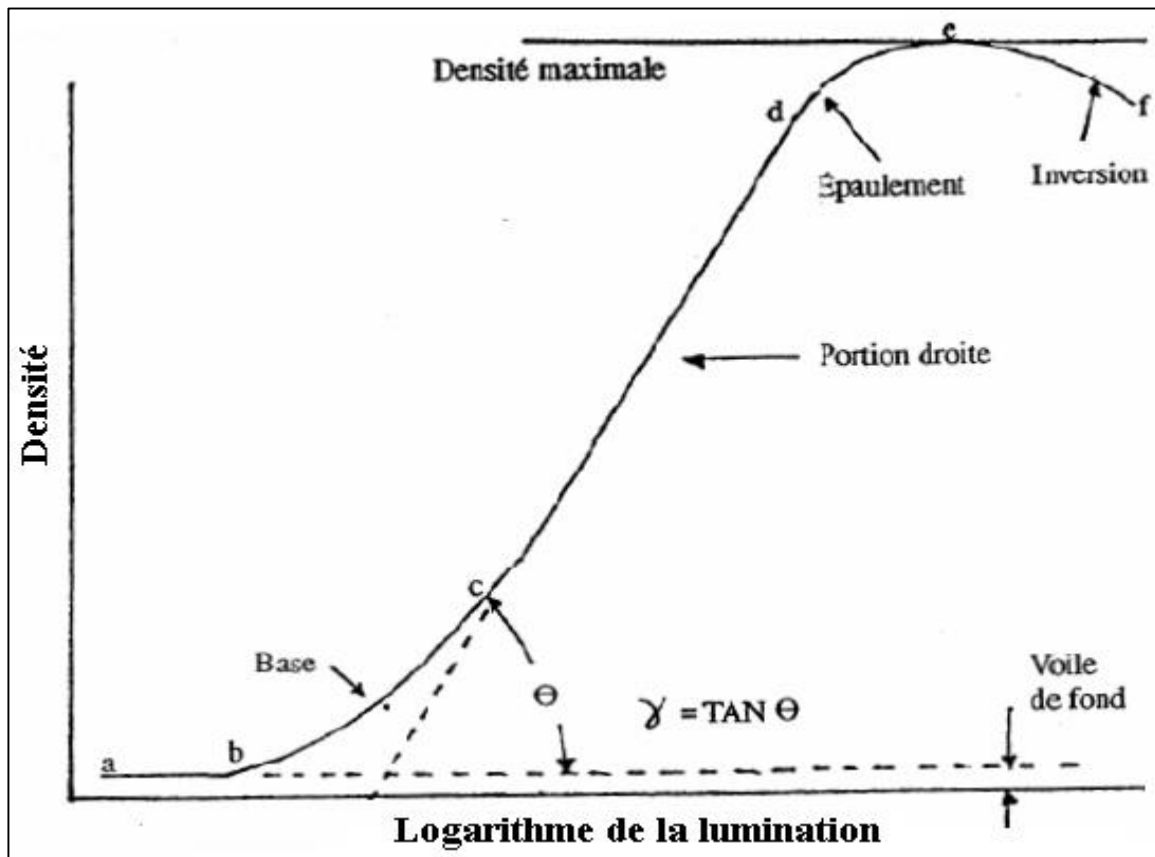


Figure (III.6) : Courbe caractéristique du film.

La courbe caractéristique du film est divisée en cinq segments, qui sont :

- Segment A-B (le voile) : région de faible intensité qui ne dépend pas de l'exposition
- Segment B-C (la base) : le point correspond à la première densité perceptible sur le film. Cette région représente peu en radiographie.
- Segment C-D (Portion droite) : c'est le segment le plus important. Dans cette région, la densité du film est proportionnelle au logarithme de l'exposition utilisée. Plus la courbe est inclinée le contraste est grand.
- Segment D-E (épaulement) : dans cette partie de la courbe, il n'y a pas relation linéaire entre la densité et l'exposition, par conséquent elle n'est pas utilisée en radiographie. Le point "e" représente la densité maximale que l'on peut obtenir de ce type de film.

Segment E-F (solarisation) : lorsque le film est surexposé sa densité atteint un point maximal ("e") et diminue par la suite.

III.8.6.3 Classification et caractéristiques du film

Le choix d'un film pour une exposition donnée dépend de plusieurs facteurs dont les principaux sont :

- a) Pièce à radiographiée à savoir, sa densité, sa forme, et les différences d'épaisseur.
- b) Type de rayonnement utilisé.
- c) L'énergie et intensité du rayonnement.
- d) Degré de sensibilité requis.

III.8.7 Les écrans

Des matériaux sous forme de feuillards sont presque toujours utilisés en radiographie. Ils sont de trois types soient :

- Fluorescent.
- Plomb.
- Renforçateur fluorométallique.

Lorsque des techniques à bas Kv (moins de 100 Kv) les écrans ne sont pas utilisés parce l'effet renforçateur devient inefficace sinon nul.

a. Écrans fluorescents

Remarque: Les flèches courtes représentent des photons de lumière visible.

Fait en tungstène de calcium, les écrans fluorescents réduisent de façon très significative le temps de pose cependant la qualité de l'image est très pauvre.

Ce type d'écran n'est pas accepté par la plupart des codes et normes.

b. Écrans de plomb

Les écrans de plomb ont trois fonctions :

- réduit le temps de pose (environ 30% avec Ir 192 et de 50% avec le Co 60).
- amplifie l'image (le contraste).
- dans une certaine mesure réduit le rayonnement diffusé.

Les épaisseurs des feuillards de plomb sont normalisées soient :

Rayons X : Avant : 0.005"

Arrière : 0.010"

c. Écran renforçateur fluorométalliques

Ils regroupent les avantages des écrans fluorescents et de plomb. Ils ont une excellente sensibilité et représente l'avantage de réduire le temps de pose. Ils sont particulièrement efficaces avec les rayons gamma.

III.8.8 Les Indicateurs de Qualité d'Image (IQI) / Les Pénétramètres

Les pénétromètre ou encore les indicateurs de la qualité d'image sont de trois types :

- pénétromètre plat.
- pénétromètre à échelle.
- pénétromètre à fils.

Le pénétromètre est utilisé pour évaluer la sensibilité des radiographies. Ils sont sélectionnés selon les épaisseurs à radiographier soient 2% de cette épaisseur. Les codes et normes ont habituellement leur propre table de sélection. [5]

Les pénétromètres à fils sont ceux qui sont les plus utilisés.

Trois exigences :

- ✓ représente 2% de l'épaisseur du matériel à radiographier.
- ✓ de même ou similaire au matériel à radiographier.
- ✓ soit placé du côté de la source.

III.9 Les techniques d'exposition

III.9.1 La cueillette des informations

Avant de procéder à une radiographie, Il est nécessaire de connaître différentes informations pour être en mesure réaliser une exposition conforme :

- Type de matériau (densité);
- Épaisseur ou gamme d'épaisseur;
- Norme(s) de référence(s);
- Spécification;
- Sensibilité;
- Échantillonnage;
- Densité requise;
- Géométrie du joint ou de la pièce;
- Type de défaut(s) recherché(s).

III.9.2 Les éléments de la technique

Avant de procéder à une radiographie, voici les éléments à considérer :

- L'énergie de rayonnement;
- Le type de film;
- La distance source/film;
- Le temps d'exposition;
- Localisation de la source de rayonnement;
- Le nombre d'expositions;
- Sélection, nombre et emplacement de l'IQI;
- Type d'écran;
- Angle de la source de rayonnement ;
- Intensité de la source de rayonnement.

III.9.3 Le Temps d'exposition

Le temps de pose est l'un des paramètres important lors de la mise au point d'une exposition radiographique. Les deux autres sont : l'intensité de la source de rayonnement et la distance. Le temps de pose à comme seul objectif de produire une radiographie de densité qui rencontre la gamme de densité spécifiée. [5]

Les formules utilisées sont :

Relation intensité/temps :

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{T_2}{T_1} \quad \text{Ou} \quad \begin{array}{l} M = \text{l'intensité de la source de rayonnement.} \\ T = \text{le temps de pose.} \end{array}$$

Relation intensité/ distance :

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{D_1^2}{D_2^2} \quad \text{Ou} \quad \begin{array}{l} M = \text{l'intensité de la source de rayonnement} \\ D = \text{le distance source/film} \end{array}$$

Relation temps/distance :

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{D_1^2}{D_2^2} \quad \text{Ou} \quad \begin{array}{l} T = \text{le temps de pose} \\ D = \text{le distance source/film} \end{array}$$

Facteur radiographique :

$$F.R = \frac{MT}{D^2} \quad \text{Ou} \quad \begin{array}{l} M = \text{l'intensité de la source de rayonnement} \\ T = \text{le temps de pose ; } D = \text{le distance source/film} \end{array}$$

La loi de réciprocité

La loi de réciprocité se réfère à deux différentes combinaisons d'exposition qui donne un même résultat en terme de densité.

$$\frac{M_1 T_1}{D_1^2} = \frac{M_2 T_2}{D_2^2} \quad \text{Ou} \quad \begin{array}{l} M = \text{l'intensité de la source de rayonnement} \\ T = \text{le temps de pose ; } D = \text{le distance source/film} \end{array}$$

III.10 L'Interprétation des radiogrammes

On peut observer les radiogrammes en se servant d'un appareil appelé négatoscope «Viewer » de préférence équipé d'un système de variation de l'intensité lumineuse. On ne peut pas bien interpréter un radiogramme en le tenant près d'une simple ampoule électrique ou d'une fenêtre! Le négatoscope doit être placé dans une salle d'observation spéciale possédant un éclairage tamisé, une bonne ventilation et possédant un endroit pour écrire. [5]

La personne qui visionne les radiogrammes avec les négatoscopes doit suivre les règles simples suivantes :

- Avant de retirer un radiogramme de l'appareil, glisser un autre radiogramme sous celui-ci ou éteindre la lumière au moyen de la pédale ou de l'interrupteur. Cela évite d'être ébloui par la lumière très forte.
- Atténuer l'éclat des parties les plus claires ou situées sur le pourtour du film en les masquant.
- La salle d'observation doit être éclairée par une lumière de faible intensité pour qu'il n'y ait pas de reflet de lumière sur le film.
- Avant de commencer l'interprétation, attendre cinq à dix minutes que les yeux s'habituent à la lumière tamisée quand on vient l'extérieur.

III.10.1 Interprétation des discontinuités

L'interprétation des radiogrammes est généralement confiée à un radiographe certifié, mais l'inspecteur est souvent appelé à observer des radiogrammes et doit être capable de reconnaître les images de défauts de soudure.

Lors de l'interprétation il faut se souvenir qu'un radiogramme illustre en deux dimensions (à plat), un objet tridimensionnel et que tous les défauts qui apparaissent sur l'épaisseur complète d'une soudure sont donc représentés sur un seul plan, celui du film. Ceci peut exagérer la densité apparente ou l'écartement du défaut. L'expérience et la connaissance du mode opératoire de soudage adopté permettent d'avoir une idée de la répartition verticale des défauts. [5]

III.10.2 L'Objectif

L'objectif de l'interprétation des radiographies est de porter un diagnostic sur la conformité ou non-conformité des soudures ou des pièces sous examen en regard de critères d'acceptabilité spécifiés par le client et/ou une norme de construction.

III.10.3 La Cueillette d'informations

Voici la liste des éléments à considérer avant de procéder l'interprétation de la radiographie :

- Procédé de fabrication ou de soudage.
- Géométrie du joint ou de la pièce.
- Technique de radiographie utilisée.
- Toute autre condition spécifique.

Plus la cueillette d'information est complète plus le diagnostic sera précis.

III.10.4 Aides à l'identification des indications

Sur le radiogramme, des indices peuvent aider à l'interprétation des défauts :

- ✓ Sa forme.
- ✓ Sa localisation.
- ✓ Sa densité.

III.11 La Radioprotection- moyens

III.11.1 Le Temps de pose

La dose reçue est directement proportionnelle à la durée d'exposition, par conséquent on doit choisir le temps d'exposition le plus court possible.

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{T_2}{T_1} \quad \text{Ou} \quad I = \text{l'intensité de rayonnement}$$

T = le temps de pose

III.11.2 La Distance

La distance est un des moyens très efficace et le plus économique pour réduire l'exposition aux rayonnements.

Les rayons X et gamma diminuent au carré de la distance, selon la loi inverse du carré de la distance, soit :

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{D_2^2}{D_1^2} \quad \text{Ou} \quad I_1 = \text{l'intensité de rayonnement initiale.}$$

I₂ = nouvelle distance.
D₁ = distance initiale.
D₂ = nouvelle distance.

III.11.3 Le Blindage

Le plus important et le plus coûteux des trois facteurs. Le blindage permet l'utilisation de sources de rayonnements très intenses avec une utilisation des lieux d'exposition durant de longues périodes. Les matériaux les plus utilisés sont le plomb, le béton, et l'acier parfois en combinaison avec le sable. Les facteurs d'atténuation de ces matériaux sont connus et l'épaisseur requise de blindage est calculée par leur CDA ou CAD.

$$CDA \rightarrow I = \frac{I_0}{2^n} \quad \text{Ou} \quad I = \text{intensité en un point donné.}$$

$$CAD \rightarrow I = \frac{I_0}{10^n} \quad I_0 = \text{intensité initiale.}$$

$$n = \text{nombre de couches de CDA ou de CAD.}$$

III.12 Les unités de dose de rayonnement

Il existe 4 unités pour évaluer la dose reçue d'un rayonnement :

- 1) Le coulomb par kilogramme (roentgen).
- 2) Le gray (rad).
- 3) Le facteur de qualité Q (EBR).
- 4) Sievert (rem).

III.12.1 Le Coulomb par kilogramme

Le coulomb par kilogramme est la quantité de rayonnement qui produit une unité électrostatique de charge pendant l'ionisation d'un centimètre cube d'air dans les conditions normales de température et de pression. L'ancienne unité d'exposition était le roentgen et équivaut à $2,58 \cdot 10^{-4}$ coulombs par kilogramme.

$$1 \frac{C}{Kg} = 3880R(\text{arrondi})$$

III.12.2 Le GRAY

Le gray (Gy) est une unité de dose absorbée, lorsque l'on considère le dommage dans un tissu vivant causé par le rayonnement dû à l'absorption d'énergie. Il représente l'énergie absorbée exprimée en joule par kilogramme. L'ancienne unité de dose absorbée était le rad.

$$1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad} = 1 \text{ J/kg}$$

$$1 \text{ rad} = 0.01 \text{ Gy}$$

III.12.3 Le Facteur de qualité Q

Pour une même dose absorbée (Gray), le taux de lésion biologique peut varier selon le type de rayonnement. Le facteur Q est le même pour les rayonnements X et gamma et est égale à 1. L'ancien facteur était le EBR.

III.12.4 Le Sievert

Le sievert est l'unité de dose équivalente. Le sievert et le gray ont la même valeur numérique pour les rayonnements X et gamma. L'ancienne unité d'équivalent de dose est le Rem.

III.13 Choix de la méthode vs type de défauts

TYPE DE DÉFAUTS Pièces soudées	MÉTHODE D'INSPECTION				
	VISUELLE	RADIOGRAPHIE NOTE 1	ULTRASONS NOTE 2	MAGNÉTOSCOPIE NOTE 3	RESSUAGE NOTE 4
FISSURES	X	X	X	X	X
MANQUE DE FUSION	X	X	X	X	X
MANQUE DE PÉNÉTRAISON	X	X	X	X	X
POROSITÉ	X	X			X
INCLUSION DE LAITIER	X	X	X		
CANIVEAU	X	X			
RENFORCEMENT	X				
CONCAVITÉ	X	X			

TYPE DE DÉFAUTS Pièces coulées	MÉTHODE D'INSPECTION				
	VISUELLE	RADIOGRAPHIE NOTE 1	ULTRASONS NOTE 2	MAGNÉTOSCOPIE NOTE 3	RESSUAGE NOTE 4
FISSURES	X	X	X	X	X
REPRISES (Cold shut ou cold lap)	X	X	X	X	X
CRQUES (Hot Tearing)	X	X	X	X	X
GOUTTE FROIDE (Cold shut)		X	X		
MALVENUE (Misrun)	X	X	X	X	X
TAPURE À FROID (Cold tearing)	X	X	X	X	X
REPRISE SUR SUPPORT DE NOYAU (Unfused chapelet ou insert cold shut)	X	X	X	X	X
BAVURE DE JOINT, BARBE (Joint flash ou fins)	X	X	X	X	X
GALE (Scab)	X	X	X	X	X

Tableau (III.3) : Choix de la méthode vs type de défauts

Chapitre IV

Développement De La
Méthode De Radiographie

IV.1 Introduction

Notre logiciel est un soutien avancé de calculatrice de radiographie industrielle dont l'essai radiographique conventionnel effectué avec des tubes à rayon X et des films radiographiques standards.

Ce logiciel opère sur toutes les plates-formes Windows, et utilise le langage Delphi version Embarcadero.

IV.2 Interface

En informatique, une interface de programmation (souvent désignée par le terme **API** pour *Application Programming Interface*) est un ensemble normalisé de classes, de méthodes ou de fonctions qui sert de façade par laquelle un logiciel offre des services à d'autres logiciels.

Dans l'industrie, les applications informatiques se servent de nombreuses interfaces de programmation, la programmation se fait en réutilisant des *briques* de fonctionnalités fournies par des logiciels. Cette construction par assemblage nécessite pour le programmeur de connaître la manière d'interagir avec les autres logiciels, qui dépend de leur interface de programmation. Le programmeur n'a pas besoin de connaître les détails de la logique interne du logiciel.

Des logiciels tels que les systèmes d'exploitation, les systèmes de gestion de base de données, les langages de programmation, ou les serveurs d'applications comportent une interface de programmation.

Une interface de programmation est une façade clairement délimitée par laquelle un logiciel offre des services à d'autres logiciels. L'objectif est de fournir une porte d'accès à une fonctionnalité en cachant les détails de la mise en œuvre.

La création et l'utilisation des interfaces de programmation est un sujet incontournable de la programmation contemporaine. Une application se sert typiquement de nombreuses interfaces de programmation; mises en œuvre par des bibliothèques logicielles qui peuvent elles-mêmes se servir d'autres interfaces de programmation.

Les interfaces de programmation permettent de gagner du temps par la collaboration et la spécialisation des équipes de développement de logiciel.

Le langage Delphi, est un langage de programmation orienté objet basé sur Pascal est en voie de devenir multi plateforme. L'Embarcadero prévoit de développer la prise en charge de nouvelles technologies

IV.3 Caractéristiques

Le programme a les caractéristiques suivantes :

- Calcul des durées d'exposition pour les examens radiographiques effectués avec deux modèles des tubes à rayon X :
 - GENERATEUR : **GFD165**
 - GENERATEUR : **CERAM35**
- Base de données des tubes à rayon X où l'utilisateur peut présenter des paramètres d'exposition de ses tubes à rayon X.
- Base de données des matériaux examinés avec leurs facteurs d'équivalence radiographiques. Les facteurs sont utilisés pour le calcul des durées d'exposition en examinant des matériaux comme l'acier et l'Aluminium.
- Des fonctions de programme de base sont expliquées. On le prévoit pour donner aux utilisateurs la première impression de conception de programme et facilité d'utilisation sans entrer dans trop détails.

IV.4 Energie max

Tout en employant un plus grand épaisseur la capacité de pénétration de rayonnement a une importance majeure, c'est également dit: la dureté du rayonnement. Plus le rayonnement moins dispersé est dur commence le contraste est ainsi meilleur contre le rayonnement doux (énergie inférieure) les métaux légers comme l'aluminium et ses alliages ont relativement un bon contraste même pour plus grand épaisseur en comparaison d'acier tout en rayonnant par rayonnement doux. D'autre part les métaux lourds comme cuivre, le nickel exigent l'utilisation de plus haute (plus dur) d'énergie de rayonnement pour l'épaisseur sensiblement inférieure que pour l'acier.

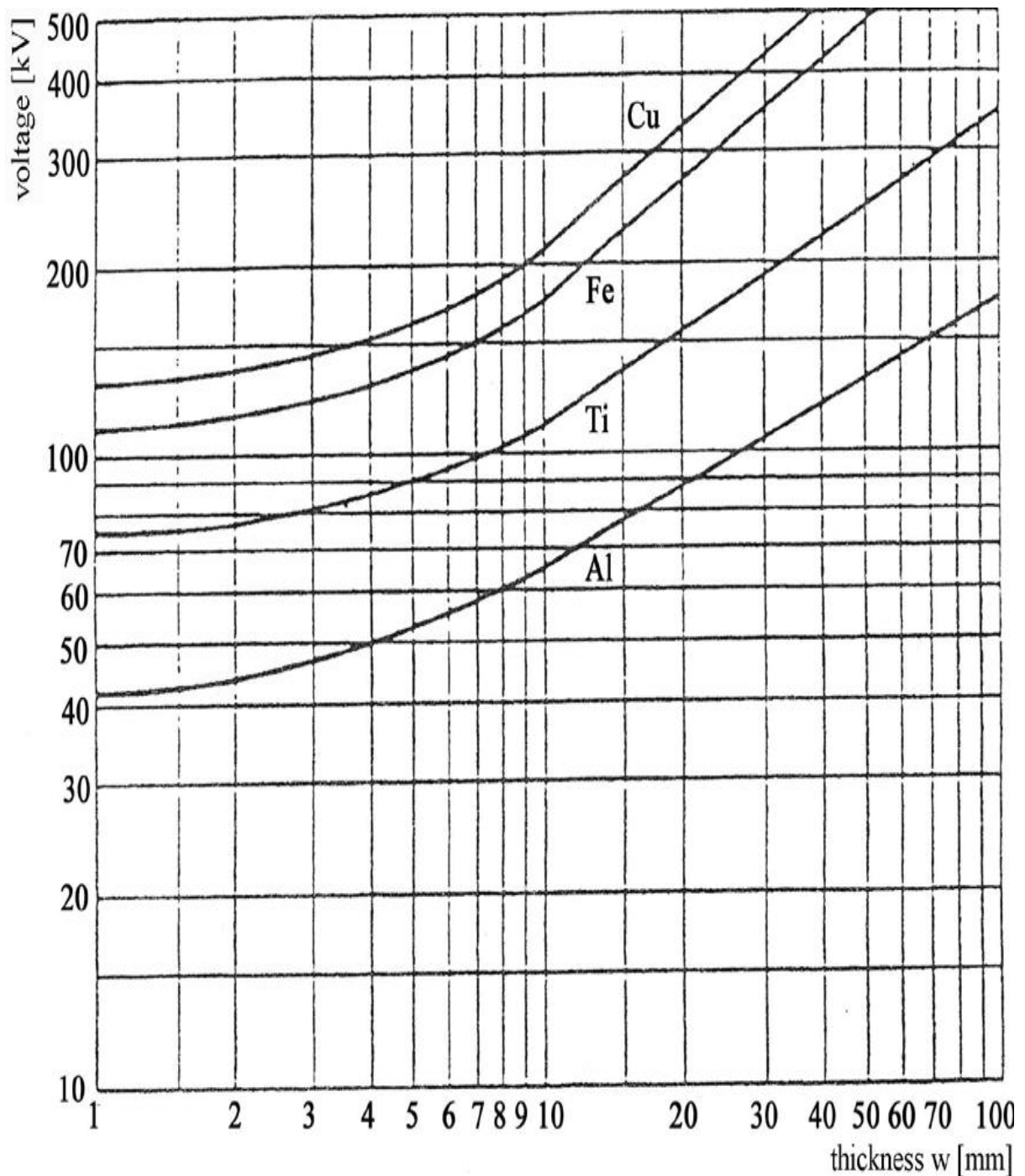


Figure (IV.1) : Energie max en fonction de l'épaisseur

IV.5 Diagrammes du temps d'exposition

Ce diagramme contient des droites qui représentent la variation du temps d'exposition en fonction des épaisseurs, une énergie bien spécifiée pour chaque droite. On marque que chaque tube à rayon X a son propre diagramme.

Pour le générateur cram35 : il n'existe que le diagramme du fer a cause des énergies élevées.

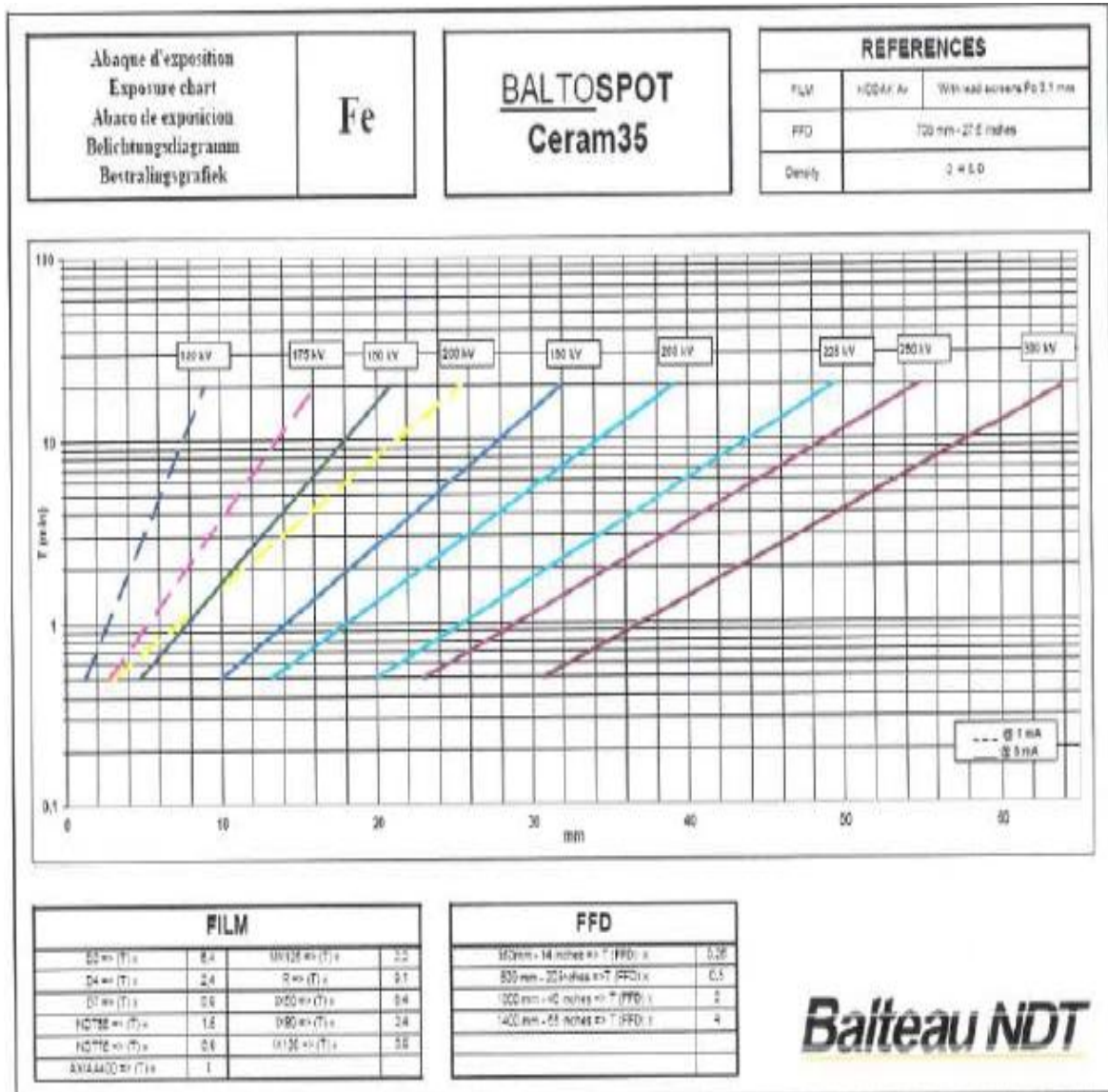


Figure (IV.2) : diagramme du temps d'exposition [7]

Pour le générateur GFD 165 : il existe un diagramme pour l'Aluminium:

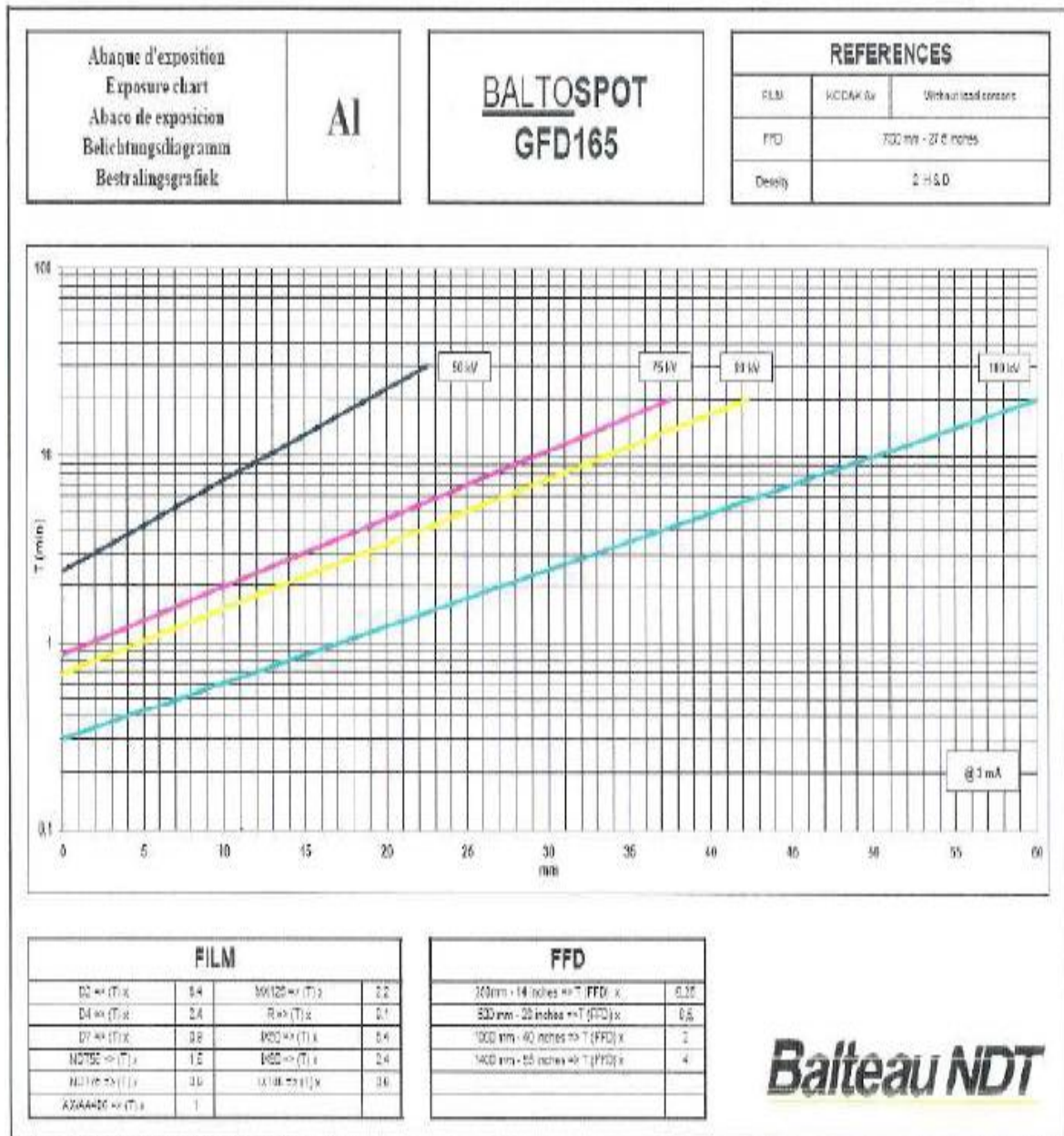


Figure (IV.3) : diagramme du temps d'exposition [6]

Il existe un autre diagramme pour le Fer rayonné par des faibles énergies :

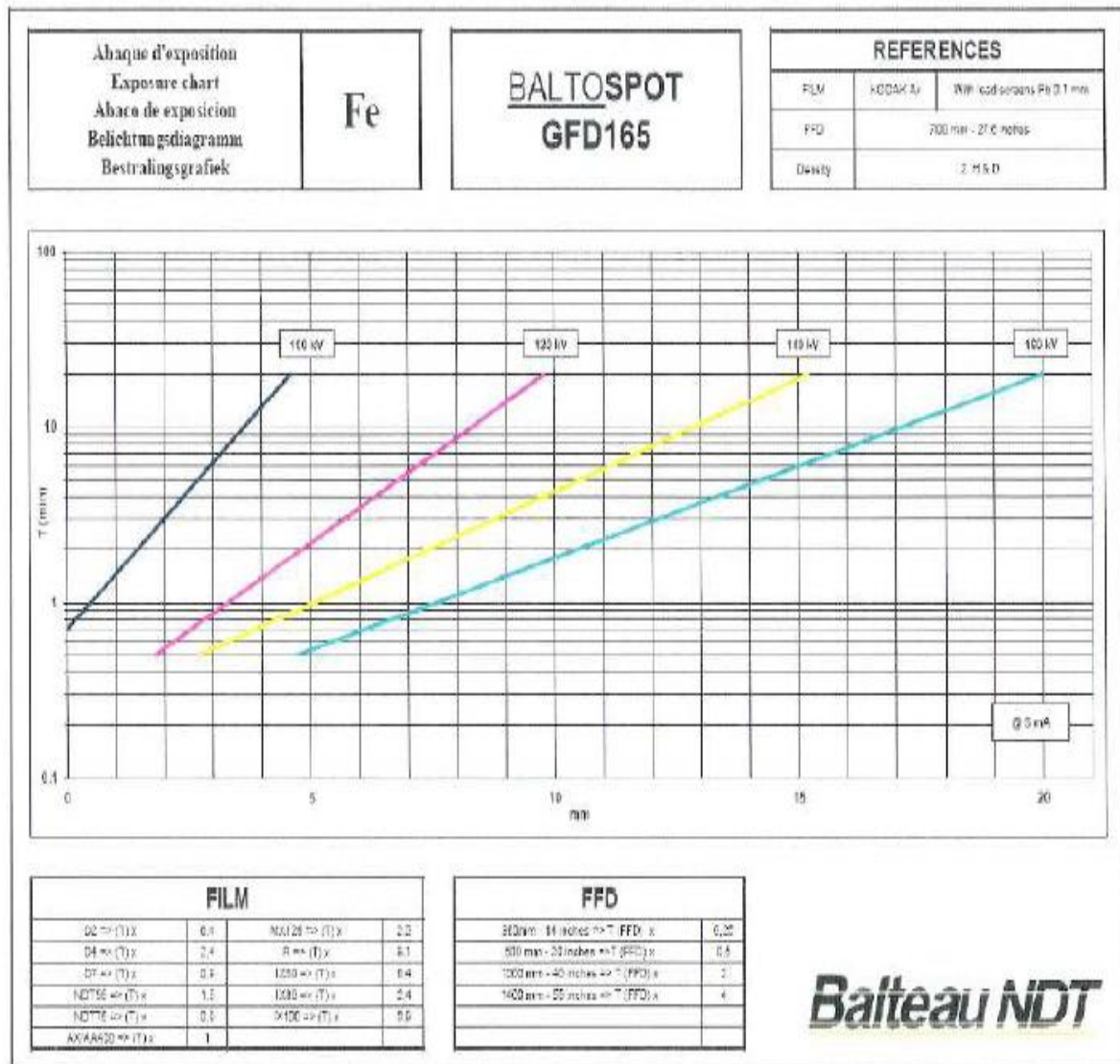


Figure (IV.4) : diagramme du temps d'exposition [6]

La fonction de chaque droite est de la forme : $B=10^{(a*w+b)}$

À cet effet nous pouvons déterminer les coordonnées de deux points sur chaque ligne.

Pour chaque ligne de diagramme nous devons déterminer sa tension et coordonnées (épaisseur et temps d'exposition) de deux points.

Vous devriez déterminer les données semblables pour chaque ligne indiquée sur le diagramme d'exposition.

IV.6 Interface de programme

Après installation et enregistrement du programme sur l'ordinateur on peut le commencer par le double cliquer sur l'icône de raccourci placée sur le bureau Windows.



Figure (IV.5) : Icône du programme

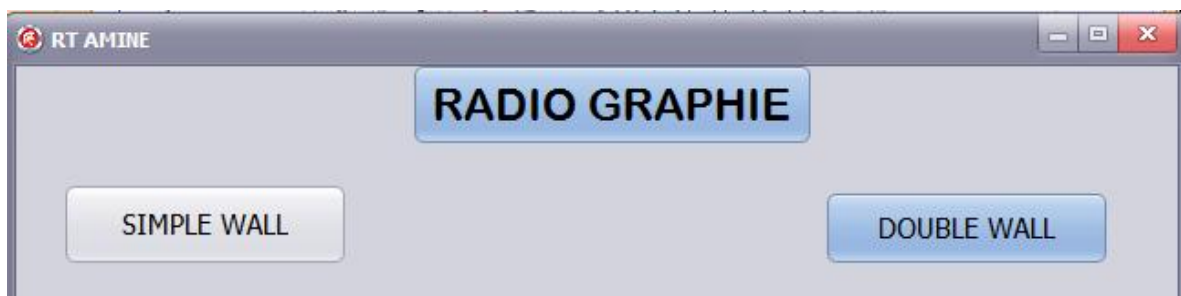
Quand le programme est exécuté sa fenêtre principale est montrée d'où nous pouvons atteindre toutes ses fonctions de base et options.

Pour démarrer le programme il faut cliquer sur le bouton radio graphie.

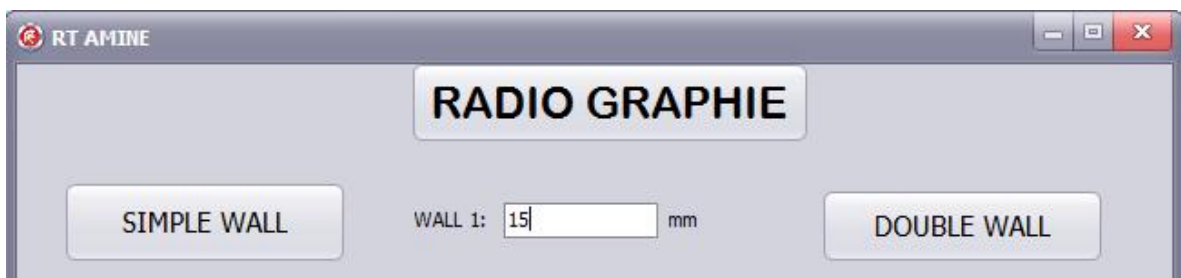


Puis on doit choisir selon notre cas entre :

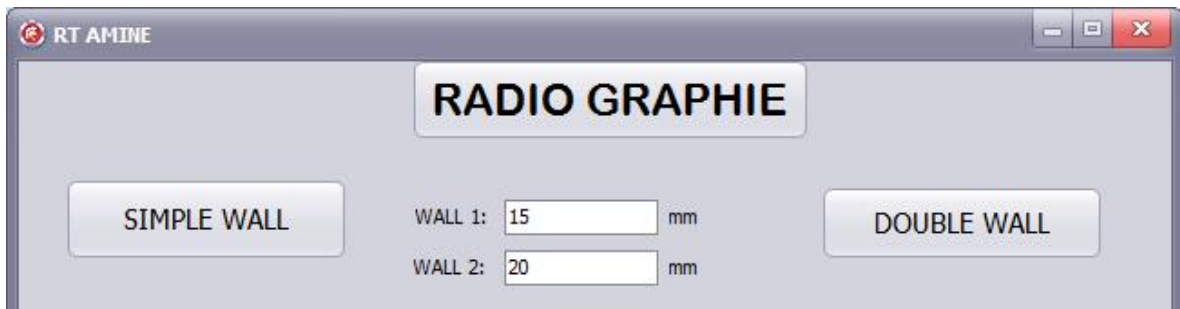
- Simple mure.
- double mure.



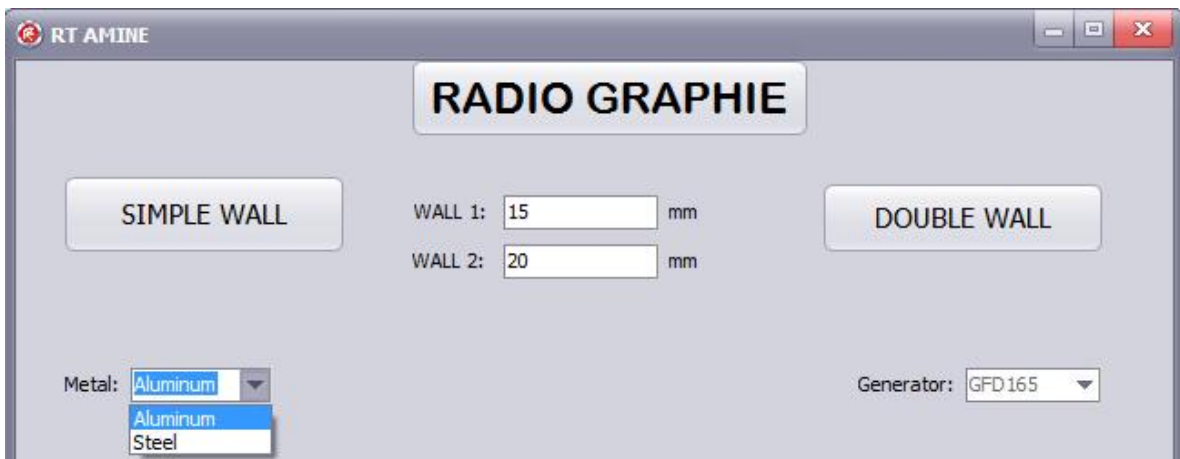
Dés que le choix est fait on fait entrer un seul épaisseur du métal (pour le choix de simple wall).



Ou bien deux épaisseurs (épaisseur de chaque mure ou parois pour double wall). Il signifie que pour doubles techniques de mur on doit également entrer épaisseur à mur unique.



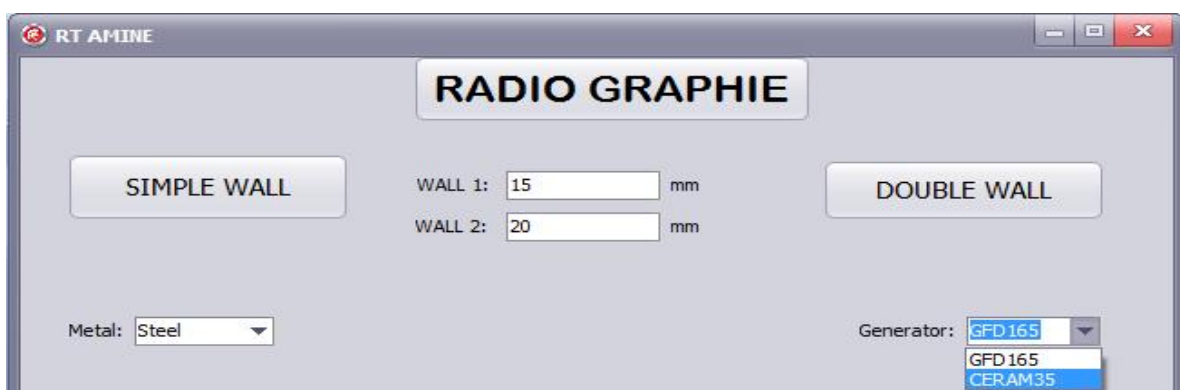
Après le remplissage des épaisseurs, on doit choisir le métal entre le fer et l'aluminium par un menu roulant sur la gauche.



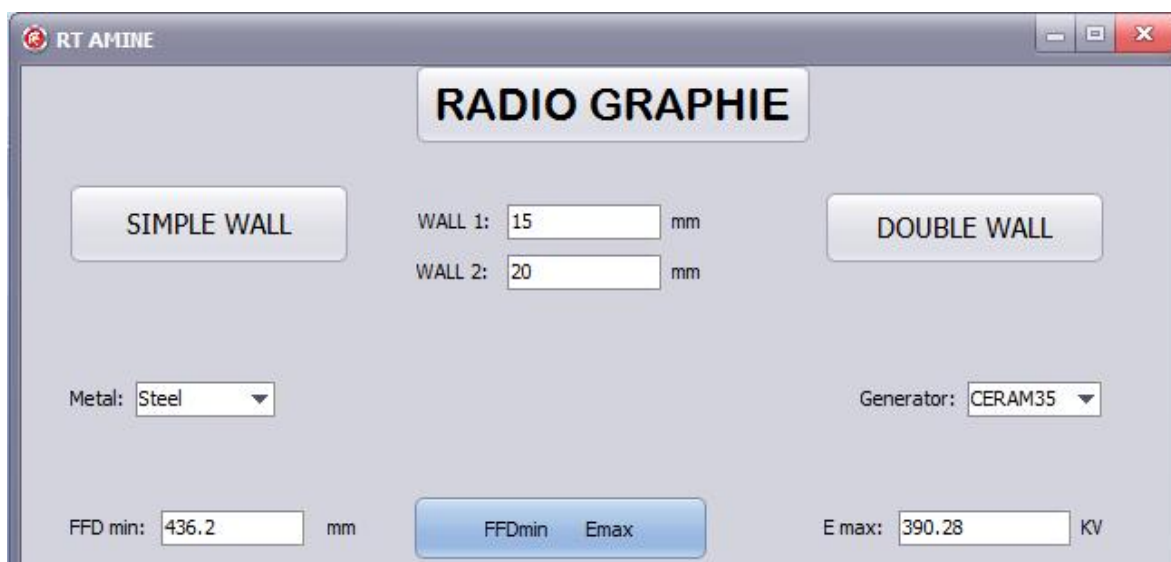
Sur la droite il existe un autre menu roulant pour le choix du générateur :

-si on choisi l'aluminium, le menu roulant du choix générateur devient inactif et le programme fonctionne directement avec le générateur GFD165.

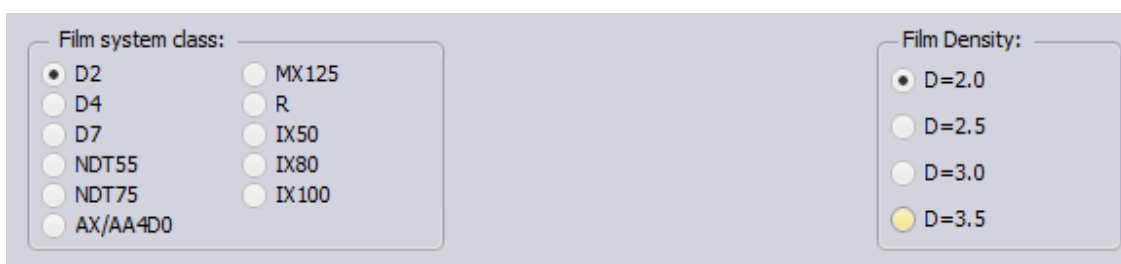
-si on choisi le fer, le menu roulant du générateur devient actif et on peut choisir entre les deux générateurs ceram35 ou GFD165 selon l'énergie.



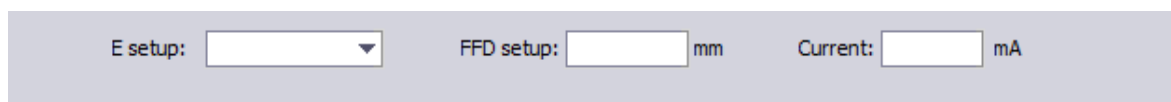
En utilisant le bouton central (FFDmin Emax) on peut calculer la distance minimale entre la source et le film dans une fenêtre sur la gauche et l'énergie maximale qu'on ne peut pas l'atteindre dans une autre fenêtre sur la droite.



Après la lecture des valeurs FFDmin et Emax on choisi le type du film parmi les neuf (9) types indiqués sur la fenêtre « film system class » à gauche, et la valeur de la densité parmi les quatre valeur indiqués sur la fenêtre « film density » à droite.

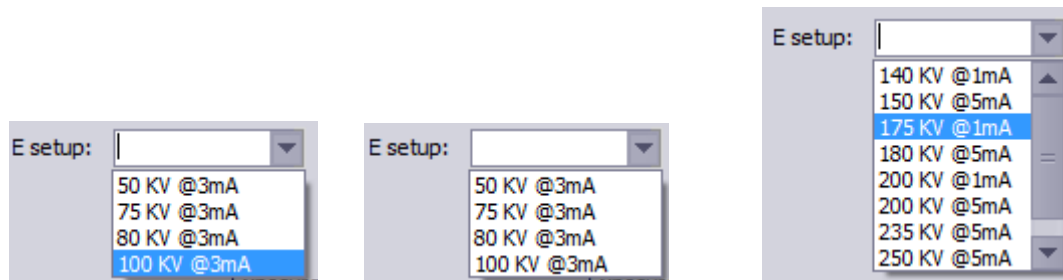


On arrivera donc à la phase de remplissage des valeurs E choisi, FFD choisi et courant choisi.



Pour l'FFD et le courant, le remplissage est une écriture directe mais pour l'énergie E, il existe trois menus roulants selon le métal et le générateur choisis,





Pour un bon fonctionnement du generateur et avoir un temps raisonnable on a buté chaque droite du diagramme du temps d'exposition par une valeur d'apaisseur min et max ce qui traduit dans le programme par un message d'avertissement qui apparaitre sur l'interface et nous aide à rechoisir la bonne valeur d'energie E soit :

-augmenter la valeur (use higher power setting)

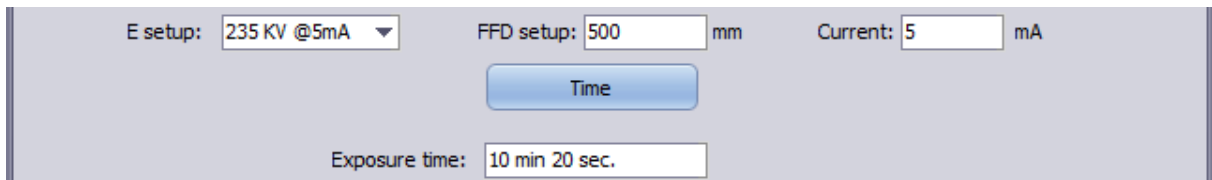


-deminuer la valeur(use lower power setting)



IV.7 Calcul des durées d'exposition

Les calculs des valeurs du temps d'exposition pour les examens radiographiques prévus est la fonction de base de ce programme. Pour effectuer cette tâche il faut cliquer sur le bouton the exposure time dans la fenêtre principale et définissent des paramètres de votre technique radiographique sous la forme de programme montrée au-dessous :



E setup: 235 KV @5mA FFD setup: 500 mm Current: 5 mA

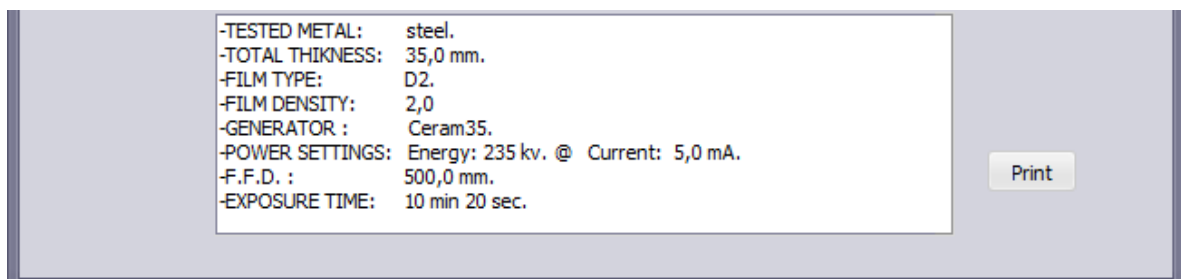
Time

Exposure time: 10 min 20 sec.

Dans l'exposition les calculs vous forment devraient entrer tous les paramètres de la technique radiographique. La durée d'exposition sera exprimé en quelques minutes et secondes.

IV.8 Affichage des paramètres

Tous les paramètres donnés ou résultats sont affichés dans une grande fenêtre au dessus de l'interface.



-TESTED METAL:	steel.
-TOTAL THICKNESS:	35,0 mm.
-FILM TYPE:	D2.
-FILM DENSITY:	2,0
-GENERATOR :	Ceram35.
-POWER SETTINGS:	Energy: 235 kv. @ Current: 5,0 mA.
-F.F.D. :	500,0 mm.
-EXPOSURE TIME:	10 min 20 sec.

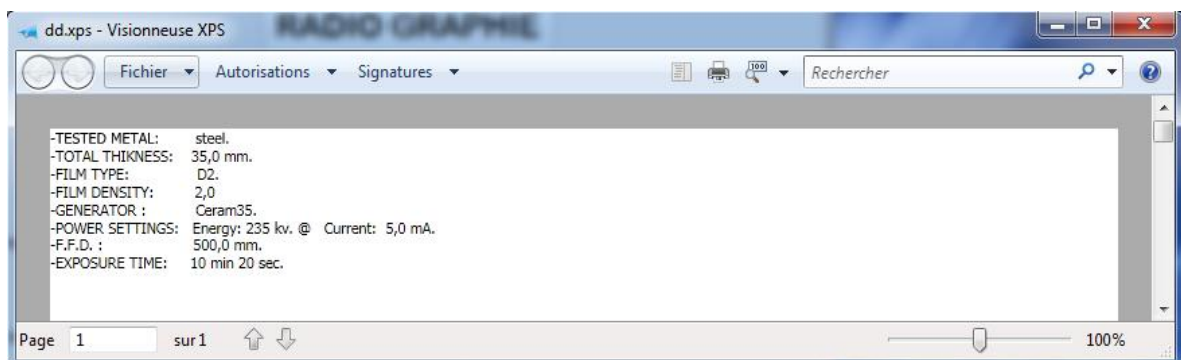
Print

IV.9 Impression des paramètres

On peut imprimer et enregistrer toutes les paramètres radiographiques indiqués dans la fenêtre d'affichage en cliquant sur le bouton **Print**.

Si l'ordinateur est connecté avec une imprimante, les paramètres affichés seront imprimés sur un papier.

Si on veut enregistrer les paramètres il suffit de cliquer sur le bouton **Print** et les enregistrer dans un fichier.



Ce document peut être remis aux techniciens comme fiches d'instruction du travail.

IV.10 Exemple de manipulation

RT AMINE
RADIO GRAPHIE

SIMPLE WALL

WALL 1: mm
 WALL 2: mm

DOUBLE WALL

Metal:

Generator:

FFD min: mm

E max: KV

Film system class:

- D2
- D4
- D7
- NDT55
- NDT75
- AX/AA4D0
- MX125
- R
- IX50
- IX80
- IX100

Film Density:

- D=2.0
- D=2.5
- D=3.0
- D=3.5

E setup:

FFD setup: mm

Current: mA

Exposure time:

```

-TESTED METAL: steel.
-TOTAL THICKNESS: 35,0 mm.
-FILM TYPE: D2.
-FILM DENSITY: 2,0
-GENERATOR : Ceram35.
-POWER SETTINGS: Energy: 235 kv. @ Current: 5,0 mA.
-F.F.D. : 500,0 mm.
-EXPOSURE TIME: 10 min 20 sec.
            
```

Chapitre V

Application De Radiographie

V.1 Application 01**Type de pièce: vis sans fin****Figure (V.1) : Vis sans fin****Condition de surface:**

Lice avec peinture

Matériau: acier (steel)

Dimension: 150mm *50mm*50mm.

Surface a contrôler:

Toute la surface (100%), spécialement la vis et l'écrou

**Figure (V.2) : Mécanisme vis-écrou**

Préparation de surface: nettoyage de toute la surface avec solvant

Source de radiation:

Balteau NDT, X-ray tube CERAM35

Focus size: 2mm*2mm

Max current: 5mA

Film:

Type: Agfa D4

Dimension: 60mm*200mm.

-le déroulement de cette phase est comme suit:

Après une inspection visuelle approfondie sur ce mécanisme ;on a procédé à des séries d'essais radiographiques avec des paramètres différents sur deux vis sans fin (l'un neuf et l'autre usé; comme un modèle d'étalonnage réel) pour établir une procédure de contrôle radiographique efficace qui nous donnera des images claires et convaincantes sur l'état interne du mécanisme.

À l'issue de cette étape on a conclu que le contrôle de ces vis nécessite deux tirs (bombardement par rayon X) pour chaque vis sans fin :

1.Le premier tir consiste à utiliser une énergie modérée, pour inspecter le jeu entre l'engrenage de transmission et le cylindre-écrou de ce mécanisme ainsi que l'état des dents d'engrenage et le filetage de la vis sans fin ; puisque les essais montrent l'existence d'une différence dans la répartition des zones de couleur dense (le noircissement) entre les films des deux vis sans fin neuf et usé.

Entrée des paramètres :

Voltage: 250 kv

Courant: 5mA

FFD: 600mm

Densité: 2

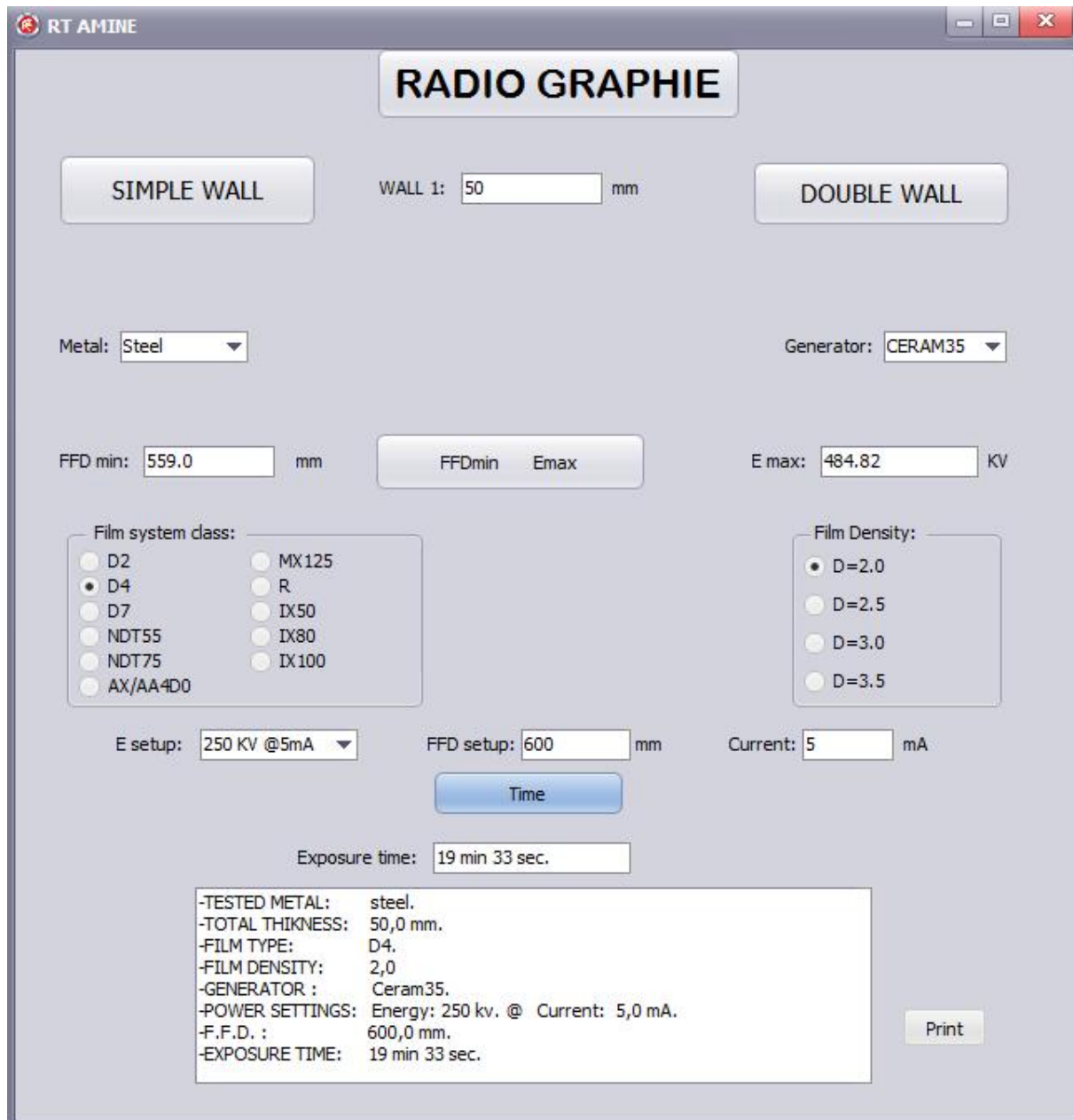


Figure (V.3) : Calcule des paramètres a partir du logiciel

Temps d'exposition: 19min 33sec

Résultats obtenus:



Figure (V.4) : MECANISME NEUF



Figure (V.5) : Mécanisme utilisé

2. Le deuxième tir consiste à utiliser une énergie haute, pour inspecter le taraudage (filetage interne) du cylindre-écrou de la vis sans fin qui présente l'état d'usure du mécanisme.

Entrée des paramètres :

Voltage: 300 kv

Courant: 5mA

FFD: 600mm

Densite: 2

RADIO GRAPHIE

SIMPLE WALL WALL 1: 50 mm DOUBLE WALL

Metal: Steel Generator: CERAM35

FFD min: 559.0 mm FFDmin Emax E max: 484.82 KV

Film system class:

- D2
- D4
- D7
- NDT55
- NDT75
- AX/AA400
- MX125
- R
- IX50
- IX80
- IX100

Film Density:

- D=2.0
- D=2.5
- D=3.0
- D=3.5

E setup: 300 KV @5mA FFD setup: 600 mm Current: 5 mA

Time

Exposure time: 7 min 5 sec.

-TESTED METAL: steel.
 -TOTAL THICKNESS: 50,0 mm.
 -FILM TYPE: D4.
 -FILM DENSITY: 2,0
 -GENERATOR : Ceram35.
 -POWER SETTINGS: Energy: 300 kv. @ Current: 5,0 mA.
 -F.F.D. : 600,0 mm.
 -EXPOSURE TIME: 7 min 5 sec.

Print

Figure (V.6) : Calcul des paramètres a partir du logiciel

Temps d'exposition: 7min 5sec

Résultats obtenus:



Figure (V.7) : Mécanisme neuf



Figure (V.8) : Mécanisme usé

- les films du mécanisme sont classés en deux catégories :
 - claire.
 - incertain : ce dernier nécessite un autre contrôle afin de voir l'état exacte de dégradation du taraudage et à partir de là, on peut se prononcer.
- Les causes et les fréquences de l'usure sont indéterminées, ce qui empêche de donner une garantie précise (calendaire ou horaire) pour les films clairs.

V.2 Application 02**Type de pièce:**

cross-bar (tow fitting assembly NLG)



Figure (V.9) : Cross bar

Condition de surface:

Lice avec peinture

Matériau: acier (steel)

Dimension: 200*150*10mm

Surface à contrôler:

Toute la surface (100%), spécialement autour du trou.

Préparation de surface: nettoyage de toute la surface avec solvant

NOTE:

À cote du cross bar on met aussi un step wedge standard avec trois fissures comme référence:
0.2 ,0.5 et 1 mm de profondeur

Source de radiation:

Balteau NDT, X-ray tube GFD165

Focus size: 1.5mm*1.5mm

Max current: 5mA



Figure (V.10) : Contrôle radiographique du cross bar

Film:

Type: Agfa D4

Dimension: 40cm*10cm.

Entrée des paramètres:

Voltage: 140 kv

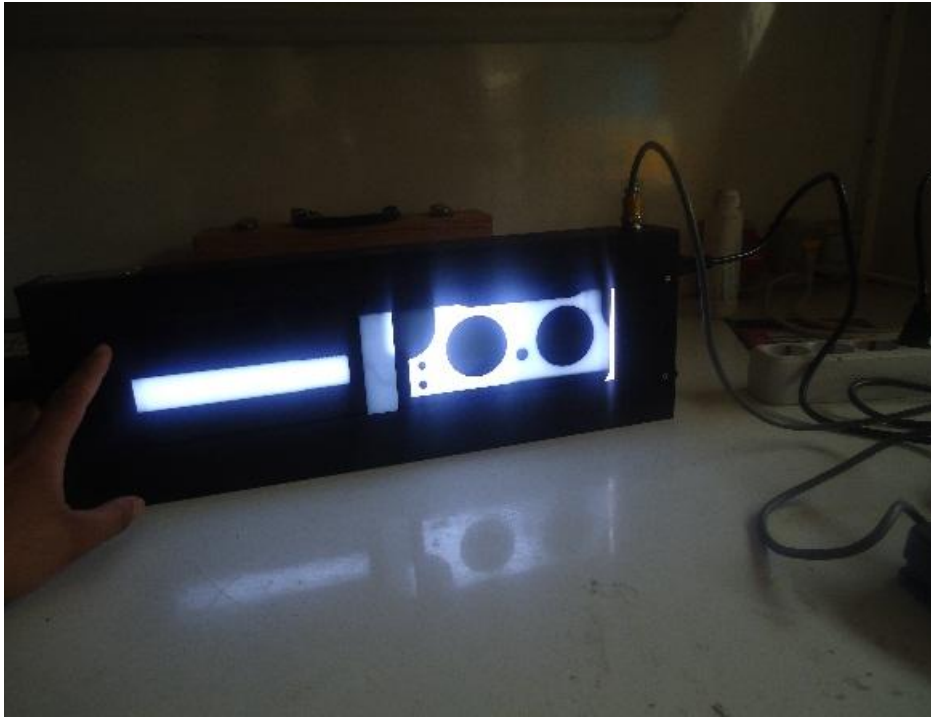
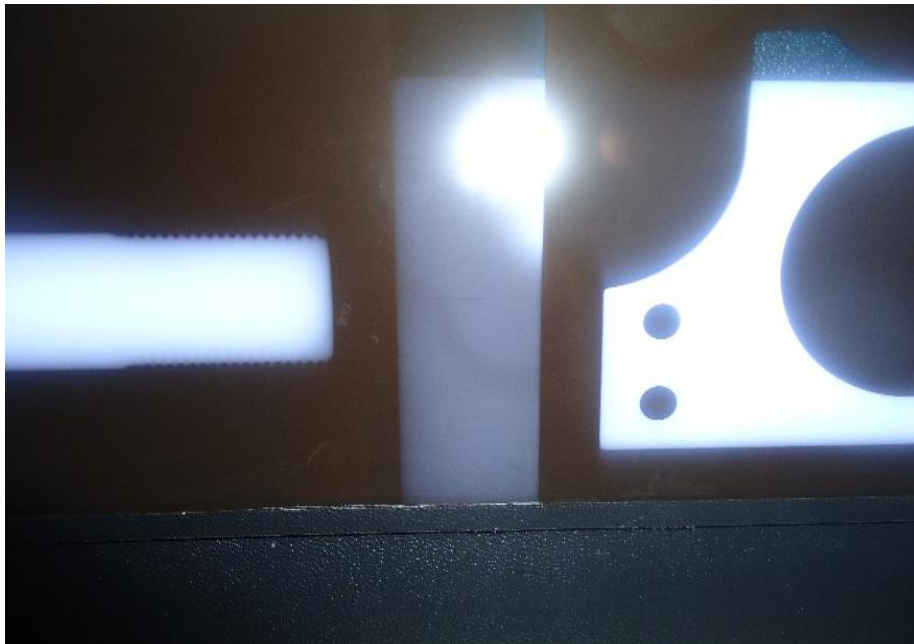
Courant: 5mA

FFD: 800mm

Densite: 2

The screenshot shows the 'RADIO GRAPHIE' software interface. It features several input fields and buttons for configuring radiographic parameters. The 'SIMPLE WALL' button is selected, with 'WALL 1' set to 10 mm. The 'Metal' is set to 'Steel' and the 'Generator' is 'GFD 165'. The 'FFD min' is 114.4 mm and the 'E max' is 177.91 KV. The 'Film system class' includes options like D2, D4 (selected), D7, NDT55, NDT75, AX/AA-4D0, MX125, R, IX50, IX80, and IX100. The 'Film Density' is set to D=2.0. The 'E setup' is 140 KV @5mA, 'FFD setup' is 800 mm, and 'Current' is 5 mA. A 'Time' button is present, and the 'Exposure time' is calculated as 13 min 13 sec. A summary box at the bottom lists: -TESTED METAL: steel, -TOTAL THICKNESS: 10,0 mm, -FILM TYPE: D4, -FILM DENSITY: 2,0, -GENERATOR: GFD 165, -POWER SETTINGS: Energy: 140 kv. @ Current: 5,0 mA, -F.F.D.: 800,0 mm, -EXPOSURE TIME: 13 min 13 sec. A 'Print' button is also visible.

Figure (V.11) : Calcule des parametres apartir du logiciel**Temps d'exposition: 13min 13sec**

Résultats obtenus:**Figure (V.12) : Résultats obtenus****Figure (V.13) : Résultats obtenus**

A l'issue de ce contrôle nous avons détecté :

- Une fissure de longueur 7mm et de profondeur plus de 2mm au niveau du trou du boulon de fixation gauche.

V.3 Application 03**Type de pièce:**

cross-bar (tow fitting assembly NLG)



Figure (V.14) : Pièce d'assemblage

Condition de surface:

Lice avec peinture

Matériau: Aluminium (Al)

Dimension: 400mm *180mm*15mm

Surface à contrôler:

Toute la surface (100%), spécialement autour des trous.

Préparation de surface: nettoyage de toute la surface avec solvant.

NOTE:

A cote du cross bar on met aussi un step wedge standard avec trois fissures comme référence: 0.2 ,0.5 et 1 mm de profondeur.

Source de radiation:

Balteau NDT, X-ray tube GFD165

Focus size: 1.5mm*1.5mm

Max current: 5mA

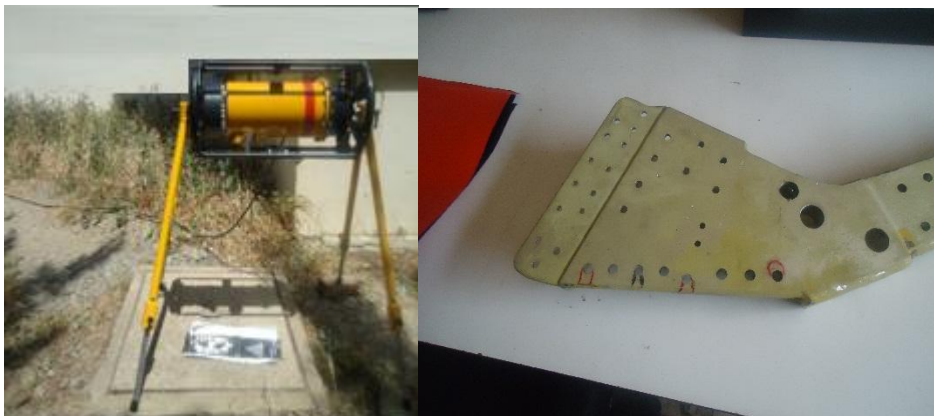


Figure (V.15) : Contrôle radiographique de la pièce d'assemblage

Film:

Type: Agfa D4

Dimension: 40cm*30cm.

Entrée des paramètres :

Voltage: 75 kv

Courant: 3mA

FFD: 1000mm

Densité: 2

RT AMINE

RADIO GRAPHIE

SIMPLE WALL WALL 1: 15 mm DOUBLE WALL

Metal: Aluminum Generator: GFD165

FFD min: 151.8 mm FFDmin Emax E max: 76.29 KV

Film system class:

- D2
- D4
- D7
- NDT55
- NDT75
- AX/AA4D0
- MX125
- R
- IX50
- IX80
- IX100

Film Density:

- D=2.0
- D=2.5
- D=3.0
- D=3.5

E setup: 75 KV @3mA FFD setup: 1000 mm Current: 3 mA

Time

Exposure time: 14 min 41 sec.

-TESTED METAL: Aluminum.
 -TOTAL THICKNESS: 15,0 mm.
 -FILM TYPE: D4.
 -FILM DENSITY: 2,0
 -GENERATOR : GFD165.
 -POWER SETTINGS: Energy: 75 kv. @ Current: 3,0 mA.
 -F.F.D. : 1 000,0 mm.
 -EXPOSURE TIME: 14 min 41 sec.

Print

Figure (V.16) : Calcule des paramètres a partir du logiciel

Temps d'exposition: 14min 41sec

Résultats obtenus:



Figure (V.17) : Résultats obtenus

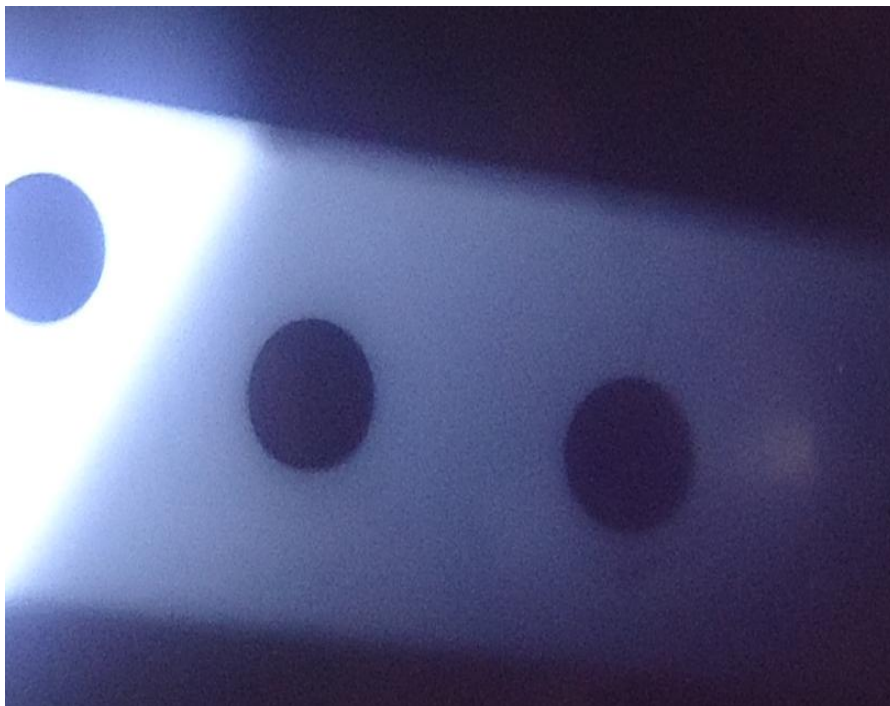


Figure (V.18) : Résultats obtenus

à l'issue de ce contrôle nous avons détecté :

- Deux fissures de longueur 12mm/5 mm et de profondeurs plus de 4mm

Conclusion

Le contrôle non destructif est très demandé dans l'industrie grâce au gain économique et au gain temporel en plus de l'augmentation de la durée de vie des pièces et de la minimisation du risque d'accident. La technique de contrôle par la radiographie rayon X est très importante pour résoudre des problèmes complexes dans l'aviation et d'autres domaines. Malgré les difficultés de cette technique, elle offre plusieurs avantages dans la détermination des fissures et corrosion.

Les résultats obtenus par l'interface ont prouvé par l'expérience. En effet toutes les pièces de formes géométriques et épaisseurs différents peuvent être diagnostiqué par cette technique.

En effet nous avons prouvé dans ce travail que la fatigue et les incidents et la mauvaise exploitation des appareils provoquent des fissures et que les rayons X permettent de les détecter. Sans oublier que la recherche et le développement dans cette technique nécessitent des générateurs et d'autres moyens couteux.

Les résultats obtenus permettent d'affirmer que le contrôle non destructif par les rayons X permettent un diagnostique approfondi sur les différentes structures et géométries.