



*Université de Ghardaïa*

N° d'ordre :  
N° de série :

Faculté des Sciences et Technologies  
Département des Sciences et Technologie

**Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de**

## **MASTER**

**Domaine :** Sciences et Technologies

**Filière :** Électromécanique

**Spécialité :** Maintenance industrielle

**Par :**

**M<sup>r</sup>: BOUAMAMA Merabet**

**M<sup>r</sup>: FARES Chraa**

## **Thème**

***ETUDE COMPARATIVE ENTRE LES METHODES  
DE CND POUR LA DETERMINATION DES  
DEFAUTS : APPLICATION AUX CORDONS DE  
SOUDURE***

***( Contrôle par ultrasons et radiographie à l'entreprise ALFAPIPE )***

**Soutenu publiquement le : 20/06/2018**

**Devant le jury :**

**M<sup>r</sup> : Mohamed ALLALI**

Maître Assistant B

Univ. Ghardaïa

**Président**

**M<sup>r</sup>: Fouzi AKERMI**

Maître Assistant A

Univ. Ghardaïa

**Examineur**

**M<sup>r</sup>: Soufian MOUATE**

Maître Assistant B

Univ. Ghardaïa

**Examineur**

**M<sup>r</sup>: Brahim KTILO**

Cadre au Direction  
du Commerce

Univ. Ghardaïa

**Encadreur**

**Année universitaire 2017/2018**

# DEDICACES

*Au nom de Dieu le clément et le miséricordieux*

*Je dédie ce mémoires a :*

- *Mes très chers parents.*
- *Mes très chers frères.*
- *Tous mes amis (es) que j'aime.*

**M .BOUAMAMA**

*Je dédie ce mémoires a :*

- *Mes très chers parents.*
- *Mes très chers frères et ma sœur.*
- *Tous mes amis (es) que j'aime.*

**C .FARES**

# Remerciements

Notre remerciement s'adresse en premier **Allah** le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il nous a donné durant ces longues années.

Notre exprimons notre profonde gratitude a monsieur **K.BRAHIM** maître assistante A à faculté science et technologie d'université Ghardaïa pour l'aide précieuse, les conseils éclairés et les encouragements continu qu'elle nous a prodigués durant tout ce projet.

Nous adressons nos remerciements, a tout le personnel de l'entreprise ALFAPIP (Unité de Ghardaïa) et leur dynamisme ainsi que l'ambiance chaleureuse, surtout le chef Service de contrôle qualité **L.TIAR**

Nous exprimons vifs remerciements également au monsieur **WALID AMLLOUL** et **TOUFIK ZIADI** pour toute l'aide et l'intérêt qu'ils n'ont cessé de témoigné a nos égard.

Nous tenons également à remercier les membres du jury, qui auront a examiner et évaluer notre modeste contribution.

Enfin, nous remercierons tous les étudiants master 2 maintenances industrielles.

### ملخص:

مع التطور التقني و التكنولوجيا في المراقبة الغير متلفة و الاعتماد الكبير عليها في الصيانة الوقائية تعتمد معظم الشركات الصناعية في مختلف أنحاء العالم على طريقتين أساسيتين لا يمكن الاستغناء عنهما هما المراقبة بالفحص الإشعاعي و المراقبة بالأمواج فوق صوتية. حيث تستعمل بشكل واسع في اللحام و التحقق من سلامة الهياكل و المركبات، فنجد أن هاتين الطريقتين في أغلب الحالات مكملتين لبعضهما البعض على حسب درجة الحماية المطلوبة. و ترتبط مدى فعالية كل من الفحص الإشعاعي و المراقبة بالأمواج فوق صوتية بمدى درجة الحماية المطلوبة من المستهلك.

### Résumé :

Avec le développement technique et technologique en contrôle non destructive et la grande dépendance à la maintenance préventive, La plupart des entreprises industrielles du monde comptent sur deux méthodes indispensables, elle est la radiographie et l'ultrason. Ce qui est largement utilisé dans la soudure et la vérification de la sécurité des structures et des véhicules, Dans la plupart des cas, ces deux méthodes se complètent en fonction du degré de sécurité requis. L'efficacité de contrôle radiographie et l'ultrason est liée au degré de protection requis du consommateur.

### Abstract:

With technical and technological development in Non-destructive testing and the high dependence on preventive maintenance, most industrial companies around the world rely on two basic methods that cannot be dispensed with: X-ray and ultrasound inspections.

Where they are widely used in welding and checking the integrity of structures and vehicles, we'll find that these two methods in most cases complement each other depending on the degree of protection required.

The effectiveness of both X-ray and ultrasound inspections is related to the degree of protection required of the consumer.



# ***SOMMAIRE***



## Liste des Tableaux

N° Tableau	Titre	Page
Tableau N°1	des défauts de soudure groupe n° 1 - fissures	25
Tableau N°2	des défauts de soudure groupe n° 2 - cavités	26
Tableau N°3	des défauts de soudure groupe n° 3 - inclusions solides	27
Tableau N°4	des défauts de soudure groupe N° 4 manque de fusion et de pénétration	28
Tableau N°5	des défauts de soudure groupe n° 5 - défauts de forme	29
Tableau N°6	Les Différents sons et leurs fréquences	33
Tableau N°7	Exemples de vitesses des ultrasons (ondes longitudinales) dans la matière	41
Tableau N°8	Influence de la fréquence sur la longueur d'onde (en mm) dans différents milieux	56
Tableau N°9	Choix du type de palpeur	56
Tableau N°10	Les Défaut et leur Apparence radiographique	67
Tableau N°11	Spécifications techniques du tube gaz et pétrole en spirale selon API 5L	75
Tableau N°12	Spécifications techniques du tube hydraulique en spirale selon API 5L	75
Tableau N°13	Nombre de tube fabriquée sur le projet R-GG1	78
Tableau N°14	Paramètres Ultrason de Tube de Référence (TUBE TEST).	80
Tableau N°15	Paramètres physique de palpeurs.	81
Tableau N°16	répartition des tubes RàS en fonction de nombre des défauts sur tube.	82
Tableau N°17	répartition des tubes réparée en fonction de nombre des défauts sur tube.	83
Tableau N°18	désignation de défaut	85

<b>Tableau N°19</b>	Classification des défauts détectés par UT (Tubes RàS) selon l'interprétation radiographique.	87
<b>Tableau N°20</b>	Classification des défauts détectés par UT (Tubes Réparée) selon l'interprétation radiographique.	88

## *Liste des Figures*

<b>N° Figure</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
<b>Figure N°1</b>	Les différentes opérations de CND	6
<b>Figure N°2</b>	Champ d'application du CND	9
<b>Figure N°3</b>	les trois phases essentielles	11
<b>Figure N°4</b>	Principe du contrôle de ressuage	13
<b>Figure N°5</b>	Principe du contrôle de La magnétoscopie	15
<b>Figure N°6</b>	Examen par radiographie	17
<b>Figure N°7</b>	Principe du contrôle de radiographie	18
<b>Figure N°8</b>	Schématisation de la détection d'une fissure par courants de Foucault	20
<b>Figure N°9</b>	Théorie de l'opération Impact-Echo	22
<b>Figure N°10</b>	Processus de détection et traitement des défauts	30
<b>Figure N°11</b>	Représentation des vibrations du son (sinusoïde)	33
<b>Figure N°12</b>	Ondes longitudinales	34
<b>Figure N°13</b>	Modèle élastique d'un solide	35
<b>Figure N°14</b>	Ondes transversales	35
<b>Figure N°15</b>	Ondes de surface	36
<b>Figure N°16</b>	Production d'ondes US	37
<b>Figure N°17</b>	Un transducteur est un convertisseur d'énergie	38
<b>Figure N°18</b>	a : Cristal libre.    b: Cristal sous contrainte. c : Cristal non	38





<b>Figure N°49</b>	Principe de la radiographie Rayon X et Rayon $\gamma$	60
<b>Figure N°50</b>	Absorption des rayons ionisants	61
<b>Figure N°51</b>	Images radiographiques	63
<b>Figure N°52</b>	L'atome	64
<b>Figure N°53</b>	Composition de la matière	65
<b>Figure N°54</b>	Expérience de Young	66
<b>Figure N°55</b>	Amplitude de l'onde en fonction du temps	66
<b>Figure N°56</b>	Structure du film radiographique	68
<b>Figure N°57</b>	Indicateurs de qualité d'image	69
<b>Figure N°58</b>	Indicateurs de qualité d'image à fils NF EN 462.1	70
<b>Figure N°59</b>	Détermination du temps de pose	71
<b>Figure N°60</b>	stock des bobines	74
<b>Figure N°61</b>	-A-Machine coupe le début de la bobine -B- machine dressage de la bobine	74
<b>Figure N°62</b>	processus dressage de la bobine	77
<b>Figure N°63</b>	teste par UT d'un tube	81
<b>Figure N°64</b>	diagramme représente la répartition des tubes en fonction de nombre des défauts sur tube	82
<b>Figure N°65</b>	diagramme représente la répartition des tubes en fonction de nombre des défauts sur tube	83
<b>Figure N°66</b>	représente un film prise par radiographie	86
<b>Figure N°67</b>	diagramme représente le nombre des défauts détectés par UT (Tubes RàS) en fonction l'interprétation radiographique.	87
<b>Figure N°68</b>	diagramme représente le nombre des défauts détectés par UT (Tubes Réparée) en fonction l'interprétation radiographique.	89

## *Liste des Abréviations*

<b>Abréviation</b>	<b>Désignations</b>
<b>CND</b>	Contrôle Non Destructif
<b>UV</b>	Ultra Violet
<b>Hz</b>	Hertz
<b>µm</b>	micromètre
<b>nm</b>	nanomètre
<b>W</b>	Watt
<b>m</b>	mètre
<b>CEN</b>	Comité Européen Normalisation
$\lambda$	longueur d'onde
<b>f</b>	fréquence de l'onde
<b>T</b>	période de l'onde
<b>C</b>	Célérité de l'onde
<b>O.L</b>	Ondes Longitudinales
<b>E</b>	module d'Young
°C	Degré Celsius.
$\mu$	la masse volumique
<b>O.T</b>	Ondes Transversales
<b>UT</b>	Ultrasons
<b>E.M.A.T</b>	Effet Electro Magnéto-Acoustique
<b>A.D.P</b>	Le Phosphate D'ammonium Déshydrogéné
$\rho$	masse spécifique du matériau
$\nu$	coefficient de Poisson
<b>Ar</b>	l'amplitude de l'onde réfléchie
<b>Ai</b>	l'amplitude de l'onde incidente
<b>At</b>	l'amplitude de l'onde transmise
$\omega$	pulsation
<b>Co</b>	Cobalt

<b>Cs</b>	Césium
<b>IQI</b>	Indicateurs Qualité Image
<b>RT</b>	Radiographie
<b>API</b>	American Pétroleum Institute
<b>E</b>	Interception de soudure extérieure
<b>Y</b>	Interception de soudure intérieure
<b>Prc</b>	Poches de retassures en chaîne
<b>SCVE</b>	Soudure concave
<b>SD</b>	Soudure désaxée
<b>F</b>	caniveau
<b>Ba</b>	Inclusion de laitier
<b>Aa</b>	Inclusion de gaz
<b>Ea</b>	Fissure longitudinal
<b>Eb</b>	Fissure transversal
<b>DL</b>	Manque de liaison
<b>AN</b>	Nid de soufflure
<b>GC</b>	Génie civil
<b>R&amp;D</b>	Research and development
<b>RàS</b>	Rien à signaler

## *Table des matières*

Liste des tableaux.....	I
Liste des figures .....	II
Liste des abréviations .....	V
Introduction générale .....	2

### Chapitre I : Généralités Sur Les Contrôles CND

I.1. Introduction .....	5
I.2. Le contrôle non destructif .....	6
I. 3. Historique .....	7
I.4. champ d application du contrôle non destructif .....	8
I.4.1.Le contrôle en cours de fabrication .....	8
I.4.2.Le contrôle de réception .....	8
I.4.3.Le contrôle en service .....	9
I.5. Les techniques du CND .....	10
I.5.1. Examen visuel .....	10
I.5.1.1. Principe du contrôle .....	10
I.5.1.2. Mise en œuvre du contrôle .....	11
I.5.2.Le ressuage .....	12
I.5.2.1.Principe du contrôle .....	12
I.5.2.2.Méthode de contrôle .....	13
I.5.3.La magnétoscopie .....	15
I.5.3.1.Principe du contrôle .....	15
I.5.3.2. Méthode de contrôle .....	16
I.5.4. Radiographie .....	17
I.5.4.1. Principe du contrôle .....	18
I.5.4.2. Méthode de contrôle .....	18
I.5.5. Courants de Foucault .....	20

I.5.5.1. Principe du contrôle .....	20
I.5.5.2. Signaux d'excitation et d'exploitation .....	21
I.5.6. Ultrason .....	21
I.5.6.1. Principe du contrôle .....	22
I.6. Défauts et leurs origines .....	23
I.6.1. Défauts internes .....	23
I.6.2. Défauts de surface .....	24
I.6.3. Défauts de soudure .....	24
I.6.3.1. Fissures .....	24
I.6.3.2. Cavités .....	25
I.6.3.3. Inclusions solides .....	27
I.6.3.4. Manque de fusion et de pénétration .....	27
I.6.3.5. Défauts de forme .....	28
I.6.4. Principe de détection d'un défaut .....	30
I.7. Conclusion .....	31

## Chapitre II : Généralité Sur L'ultrason

II.1. Introduction .....	32
II.2. Les ondes ultrasons .....	32
II.3. Les divers types d'ondes ultrasonores .....	34
II.3.1. Ondes de Compression .....	34
II.3.2. Ondes de Cisaillement .....	35
II.3.3. Ondes guidées .....	36
II.4 Production des UT .....	36
II.4.1. L'effet direct .....	38
II.4.2. L'effet indirect .....	39
II.5. Vitesse de propagation .....	40
II.6. Transmission et réflexion des ondes .....	41
II.6.1. Impédance acoustique .....	41
II.6.1.1. Réflexion – réfraction .....	42
II.7. Principe de contrôle par ultrasons .....	44
II.8. Constitution d'un palpeur ultrasonore .....	45
II.9. Quelques caractéristiques des ondes UT .....	46
II.9.1 Champ d'un émetteur UT .....	46

II.9.2. Atténuation d'un faisceau UT .....	47
II.10. Le CND par UT.....	48
II.10.1. Principe de fonctionnement de l'appareil à UT .....	48
II.10.2 Méthode par écho .....	50
II.10.2.1. Notion de "ZONE MORTE" .....	50
II.10.3. Utilisation de palpeurs obliques .....	52
II.10.3.1. Sabot d'angle .....	52
II.10.3.2. Détection et localisation d'un défaut .....	53
II.10.3.3. Méthodes connexes .....	55
II.10.4.Méthode par transmission .....	55
II.10.5.Quelques éléments sur les choix des traducteurs .....	55
II.10.5.1. Choix de la fréquence .....	55
II.10.5.2. Choix du type de palpeur et de la méthode .....	56
II.10.6 Notions sur le dimensionnement d'un défaut .....	57
II.11. Conclusions .....	57

### Chapitre III :Généralité Sur Radiographie

III.1.Introduction .....	58
III.2.Le principe de la radiographie .....	58
III.3.Loix de propagation des rayonnements ionisants .....	60
III.3.1.Nature et propriétés principales .....	60
III.3.2.Phénomène d'absorption .....	61
III.4.Mise en œuvre .....	62
III.5.Rayonnements et atténuation .....	63
III.5.1.L'atome .....	63
III.5.2.Les rayonnements électromagnétiques .....	65
III.5.2.1Aspect ondulatoire de la lumière .....	65
III.6.Méthode de contrôle .....	67
III.7.Structure du film radiographique .....	68
III.7.1.Qualité du contrôle .....	69
III.8.Procédure de contrôle .....	70
III.9.Champ d'application .....	71
III.10.Avantages et Inconvénients .....	71
III.10.Conclusion .....	72

---

---

**Chapitre IV : Analyse et Comparaison entre la méthode RT et UT**

<b>IV.1. Introduction</b> .....	<b>73</b>
<b>IV.2. Présentation de sociétés ALFA PIPE</b> .....	<b>74</b>
<b>IV.2.1. Les avantages et caractérisations du tube</b> .....	<b>74</b>
<b>IV.2.2. Spécifications techniques du tube en spirale</b> .....	<b>74</b>
<b>IV.2.3. Domaine d'application</b> .....	<b>76</b>
<b>IV.2.4. Procède de fabrication et métal</b> .....	<b>77</b>
<b>IV.2.4.1 Procédé de fabrication</b> .....	<b>77</b>
<b>IV.2.4.2. Métal</b> .....	<b>77</b>
<b>IV.3. Les données du projet et choix d'échantillon</b> .....	<b>78</b>
<b>IV.4. Procédé de contrôle par UT</b> .....	<b>79</b>
<b>IV.4.1. définition du procédé UT utilisé</b> .....	<b>79</b>
<b>IV.4.1.1. Appareil de contrôle</b> .....	<b>79</b>
<b>IV.4.1.2. Procédé de travail</b> .....	<b>80</b>
<b>IV.4.1.3. Résultats des testes de Ultrason</b> .....	<b>81</b>
<b>IV.5. Procédé de contrôle par RT</b> .....	<b>84</b>
<b>IV.5.1. Définition du procédé RT utilisé</b> .....	<b>84</b>
<b>IV.5.1.1. Appareil de contrôle</b> .....	<b>84</b>
<b>IV.5.1.2. Procédé de travail</b> .....	<b>84</b>
<b>IV.5.1.3. Films utilisés</b> .....	<b>84</b>
<b>IV.5.1.4. Nomenclature des défauts</b> .....	<b>85</b>
<b>IV.5.1.5. Résultats des testes de Radiographie</b> .....	<b>86</b>
<b>IV.6. Analyses des résultats et discussion</b> .....	<b>89</b>
<b>IV.7. Discussion</b> .....	<b>90</b>
<b>IV.8. Conclusion</b> .....	<b>90</b>
<b>Conclusion</b> .....	<b>90</b>
<b>Référence bibliographique</b> .....	<b>92</b>
<b>Annexes</b> .....	<b>97</b>

### - Introduction générale :

Le processus de maintenance s'avère être l'un des principaux leviers d'action sur la performance globale des systèmes industriels, et dans lequel le Contrôle Non Destructif (CND) constitue une pièce maîtresse.

Le CND prend une place de plus en plus importante dans tous les secteurs industriels de pointe. Les enjeux économiques associés au CND sont toujours très importants. Dans certains secteurs, comme l'industrie des pipelines, le nucléaire ou les transports, en particulier aéronautiques et maritimes, ils se doublent d'un enjeu majeur lié à la sécurité du public.

Les techniques utilisées en CND sont diverses (ultrasons, courants de Foucault, rayons X, radiographie, ressuage, inspections visuelles...). Elles dépendent à la fois de la nature du matériau, de la précision requise et de la géométrie à contrôler. Ces techniques peuvent être classées en deux familles : les techniques de volume et les techniques de surface .

C'est en volume ou proche de la surface des pièces que sont amorcées la majorité des défauts de soudure constatés en cours de la fabrication : fissure, soufflure , inclusion .....etc . C'est pour cette raison que les techniques de volume sont très largement appliquées.

Parmi elles, le Contrôle par ultrason (UT) et le contrôle par radiographie (RT) prennent des places privilégiées.

Le CND par UT et RT est utilisé pour détecter et quantifier divers défauts volume dans les matériaux , tels que les fissures et les hétérogénéités chimiques ou microstructurales. Le besoin grandissant de fiabilité et de rapidité pour les opérations de contrôle requiert le développement de nouvelles structures, outils et stratégies pour atteindre ces objectifs.

La capacité de détecter les défauts résultant des procédés de soudage , est d'une importance vitale, car elle conditionne la sécurité d'emploi des produits finaux .

Dans un réacteur nucléaire par exemple, la gaine du combustible constitue un facteur d'une importance capitale pour la sûreté de l'installation (cœur). En effet, les nombreux incidents qui ont marqué et marquent encore le fonctionnement de ces réacteurs sont dus à la fissuration et à la rupture de ces gaines. De même, la présence de fissures est inadmissible sur les disques de turbomachines, telles que les turbines à gaz et les turbo-réacteurs d'avions [YAN 99, HEL 06, HUR 10].

Ainsi donc, l'une des missions essentielles du contrôle non destructif consiste à détecter et à caractériser les défauts présents dans les produits les organes critiques des machines et installations industrielles.



La conception, le développement des procédés de CND sont rendus possibles grâce à la comparaison entre ces méthodes qui se répand de plus en plus, que ce soit pour la mise au point des procédures de contrôle, la compréhension des phénomènes ou bien la démonstration de performances. Néanmoins, la fiabilité de ces méthodes .

Beaucoup de travaux ont été réalisés sur la fiabilité du CND . Aussi, beaucoup de logiciels commerciaux ou de laboratoire ont vu le jour, tels que CIVA, FLUX, ANSYS, COMSOL

et qui continuent d'évoluer. Ces logiciels constituent une plateforme pour toute modélisation du CND visant à caractériser des défauts. Néanmoins, tous les efforts consentis à caractériser les défauts ne parviennent cependant pas à palier tous les besoins en CND des différents secteurs de l'industrie et des transports. En effet, jusqu'aujourd'hui des crashes d'avions continuent de se produire dans le monde à une moyenne de 35 crashes par an [CRA 01]. L'une des causes essentielles de ces crashes est la rupture en cours de vol et surtout en décollage ou en atterrissage, de pièces critiques telles que des aubes ou disques de turboréacteurs [WIT 06]. Ces ruptures sont dues essentiellement aux fissures mal évaluées en cours de révision ou de maintenance.

L'objectif de notre travail est jugé la fiabilité d'une méthode de contrôle pour permettant une meilleure analyse des défauts présentes dans des pièces fabriquées. Le principe fondamental et de traitées des défauts détectés par UT suivi par un contrôle RT au cour de la fabrication des pipelines.

L'exploitation du CND par RT et US en des temps rapides devient une nécessité capitale, et c'est la raison pour laquelle il devient indispensable de juge la fiabilité d'une méthode disposer pour économisé le cous de fabrication des tubes sans influencer sur la qualité.

Généralement cette études se fait à travers une investigation expérimentale par analyse des testes de contrôle en US et RT au cour de la chaine de fabrication des tubes .

Nous proposons un choix d'échantillon stratifié aléatoire des tubes représentatif a l'ensemble des tubes fabriqués, puis transmettre les deux teste dans des tableaux pour étudier les résultats de la méthode US et RT et donne une comparaison entre eux.

Enfinement et sur la base des données, nous établissons une stratégie de contrôle en vue jugé complètement les deux méthodes .

Le travail de cette thèse est présenté sous forme de 4 chapitres.

Dans le premier chapitre, nous présentons Aperçu de contrôle non destructif et leurs différentes méthodes, limites, Avantages et inconvénients de chaque méthode.

Le deuxième chapitre est une présentation de contrôle par UT et tout ce qui concerne (les équations, les ondes ultrasonores,...)

Le troisième chapitre est consacré aux contrôle par radiographie et tout ce qui concerne (les lois des propagations, les rayonnement ionisante, les films radiographiques, ...)

Le quatrième chapitre pour partie pratique et le comparaison entre les deux méthodes UT et RT dans l'Enterprise ALFAPIPE.

ainsi, les chapitres de cette thèse sont intitulés comme suit :

**Chapitre 1 : Généralité sur le control CND.**

**Chapitre 2 : Généralité sur l'ultrason.**

**Chapitre 3 : Généralité sur radiographie.**

**Chapitre 4 : Comparaison entre les méthodes RT et UT.**



*Chapitre I*  
*Généralités sur les contrôles*  
*CND*



### I.1. Introduction :

Les contrôles non destructifs sont nés de la nécessité devant laquelle se sont trouvés les ingénieurs de devoir garantir la sécurité des personnes et des matériels. Ainsi, les industries de pointes telles que l'industrie aéronautique et l'industrie nucléaire sans implantées des techniques sophistiquées pour « débusquer » dans le stade final de l'élaboration des produits, les dernières imperfections de la matière [1].

Dans la pratique, les spécialistes en contrôle non destructif chargés de l'inspection sont davantage confrontés à des problèmes d'interprétation des résultats de contrôle par rapport à des critères établis en liaison avec le concepteur de la pièce. Dans cet esprit, la définition suivante des contrôles non destructifs apparaît plus proche de la réalité industrielle : il s'agit de « qualifier, sans nécessairement quantifier, l'état d'un produit, sans altération de ses caractéristiques par rapport à des normes de recette».

En ce sens, le contrôle non destructif (CND) apparaît comme un élément majeur du contrôle de la qualité des produits. Il se différencie de l'instrumentation de laboratoire et industrielle puisque l'objet est de détecter des hétérogénéités et anomalies plutôt que de mesurer des paramètres physiques tels que le poids ou les cotes d'une pièce [2].

## I.2. Le contrôle non destructif :

Le CND met en œuvre des techniques d'évaluation permettant d'apprécier sans destruction l'état des pièces et ainsi de formuler un avis sur leur aptitude à remplir la fonction à laquelle elles sont destinées. Ainsi, le CND vise des aspects d'assurance qualité, d'aptitude au bon fonctionnement et de sécurité. Ces derniers nécessitent une bonne connaissance de tous les phénomènes mis en jeu, en particulier de la nocivité des défauts et de leur évolution dans le temps. Dans le secteur du CND, il en va tout autrement car il s'agit d'assurer le bon fonctionnement d'une installation et donc la sécurité, en réalisant des contrôles ponctuels de certaines pièces de cette installation. Le CND intervient en laboratoires, en ateliers, sur chantiers et sur sites de production, et ce, en phase de conception, de fabrication et de surveillance de l'installation [3].

L'examen visuel est le plus simple et le plus général des procédés CND, il est aussi le point final de la majorité des autres procédés non destructifs. Voir la figure (1).

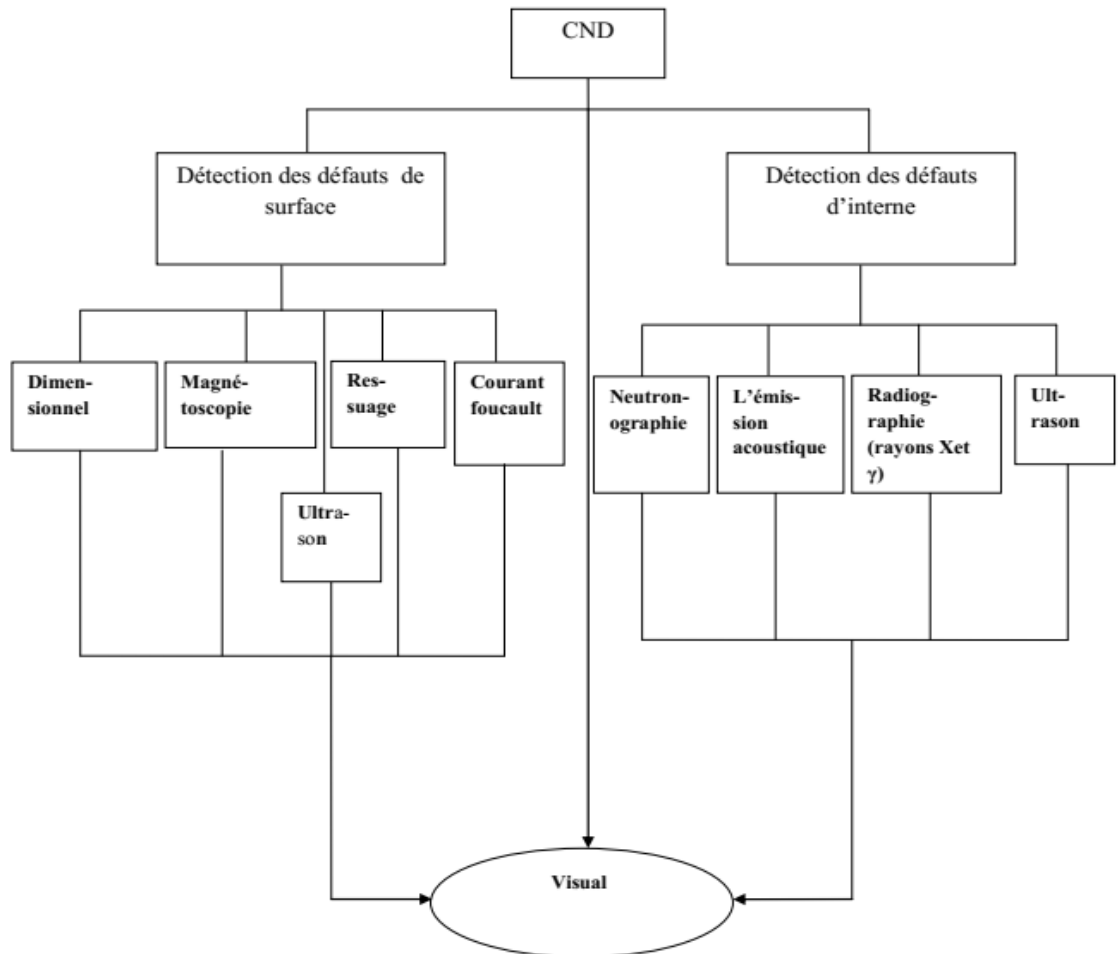


Figure (1): Les différentes opérations de CND. [3].

### I.3. Historique:

L'introduction des contrôles non destructifs (CND) des matériaux en génie civil remonte à la fin des années 1940, lors de la période de reconstruction qui a suivi la fin de la deuxième guerre mondiale. À cette époque, les ingénieurs avaient besoin de techniques pour suivre l'évolution de la résistance à la compression du béton à jeune âge afin, par exemple, de savoir quand procéder au décoffrage ou à l'application de la post-tension. Différentes techniques ont été développées à cette fin, dont la plupart ont été normalisées dans les années 1970. Plus tard, dans les années 1980, les besoins des ingénieurs ont évolués. Ces ingénieurs avaient non seulement toujours besoin de techniques pour l'estimation de la résistance du béton à jeune âge, mais également, compte tenu du vieillissement des ouvrages, de techniques pour l'évaluation de la résistance des matériaux âgés et pour la détection et la caractérisation des défauts dans ces matériaux. Force est de constater que la pratique du CND était peu développée à cette époque en génie civil (GC) contrairement à l'industrie mécanique où chaque pièce est régulièrement contrôlée car tout défaut non détecté peut avoir des conséquences dramatiques (ex. accident de challenger, 28/01/1986).

Le CND a atteint aujourd'hui un stade de développement notable en GC. C'est notamment grâce au leadership des américains qui s'est concrétisé au début des années 1990 par des investissements de plusieurs millions de dollars en R&D et par la création de 13 centres de recherches spécialisés dans ce domaine: "One of the greatest challenges we face is to rehabilitate and maintain the huge stock of infrastructure facilities already in place. With this in mind, the Administration will consider establishing an integrated program of research designed to enhance the performance and longevity of existing infrastructure.....

This program would systematically address issues of assessment technology and renewal engineering"Clinton-Gore: Technology for America's Economic Growth – Feb. 1993 [4].

### **I.4. champ d application du contrôle non destructif :**

Le contrôle non destructif est essentiel pour la bonne marche des industries qui fabriquent, mettent en œuvre ou utilisent les matériaux, les produits et les structures de toutes natures. A 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 des défauts d'aspect (taches sur une surface propre) et des corps étrangers nuisibles (éclats de verre dans un emballage alimentaire).

On peut, par ailleurs, considérer que le contrôle non destructif d'un produit ou d'un objet peut être effectué à trois stades différents de sa vie, conduisant à trois types d'applications [2].

#### **I.4.1.Le contrôle en cours de fabrication :**

Le système utilisé dans ce cas est souvent automatisé ceci nécessite alors un appareillage installé et fonctionnant en ligne de fabrication. On cherche dans ce cas à satisfaire à la fois les critères de robustesse, avec la rapidité de la réaction et un coût d'exploitation faible. Les défauts recherchés sont généralement bien identifiés, le fonctionnement est automatique aboutissant à un repérage ou un tri des produits défectueux. Quand le détecteur de défauts ne peut pas être installé en ligne de fabrication, on utilise dans l'industrie des bancs de contrôle correspondant bien souvent à des équipements importants en taille et en coût [5].

#### **I.4.2.Le contrôle de réception :**

Le contrôle de réception d'un lot de pièces, d'une installation, d'un ouvrage au moment de la livraison procède d'une philosophie de respect de conformité à des spécifications de qualité définies auparavant.

Si l'aspect coût et productivité peut avoir encore une certaine importance à ce stade de contrôle, c'est surtout l'aspect procédure de la démarche qui devient primordial, 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. À ce stade, il s'agit de détecter des défauts mais aussi souvent d'en définir la nature et les dimensions.

### I.4.3. Le contrôle en service :

Le contrôle en service s'effectue sur pièces ou structures lors d'opérations de maintenance ou à la suite de détection d'anomalies de comportement. On en attend une très grande fiabilité car les risques de non-détection d'un défaut sont graves.

Le contrôle en service s'effectue sur pièces ou structures lors d'opérations de maintenance ou à la suite de détection d'anomalies de comportement. On en attend une très grande fiabilité car les risques de non-détection d'un défaut sont graves [2].

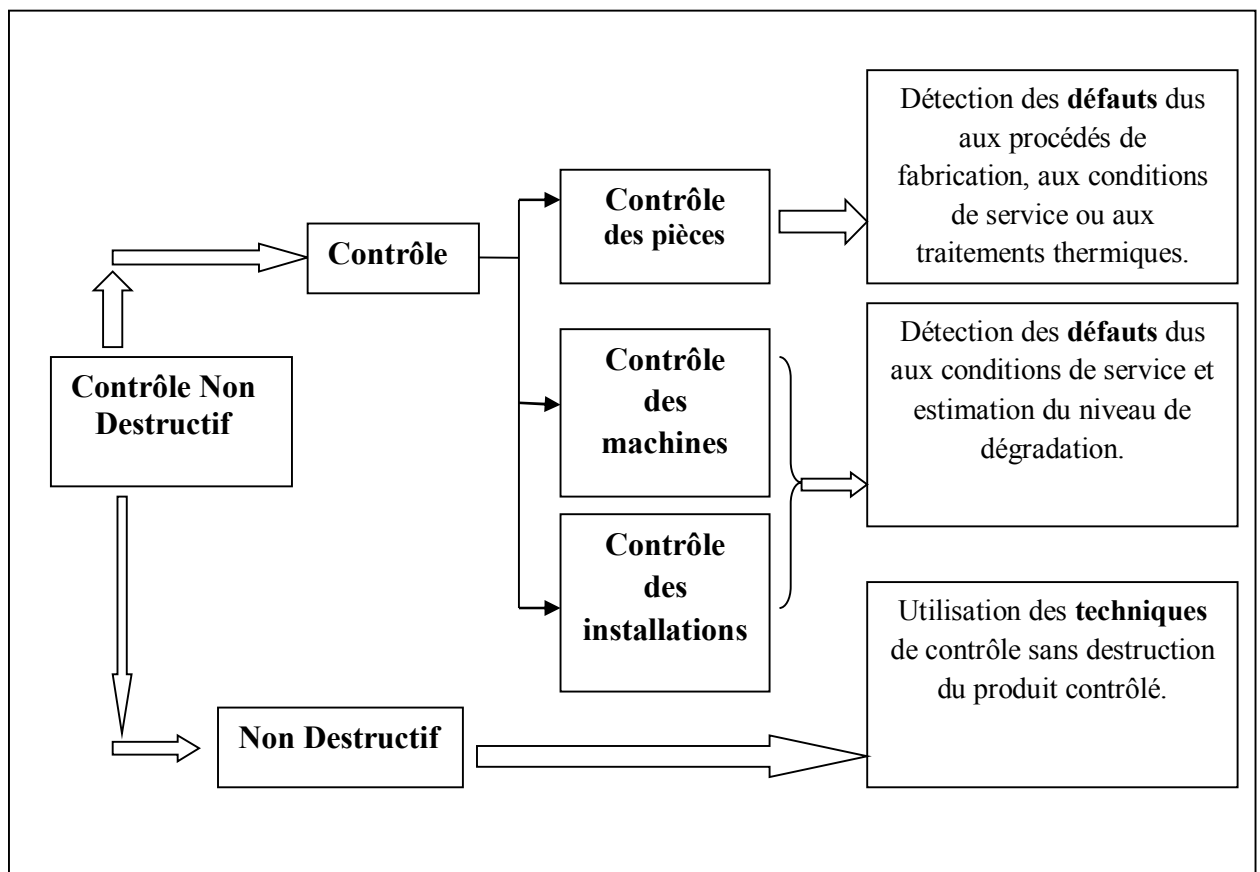


Figure (2): Champ d'application du CND [2].



### I.5. Les techniques du CND:

Les techniques de CND utilisées sont diverses. Le choix d'une méthode dépend de :

- la pièce à contrôler (nature du matériau, forme,...).
- le type de contrôle à effectuer (détection de défauts, mesure d'épaisseur,...).
- les conditions dans lesquelles le contrôle doit être effectué [11].

#### I.5.1. Examen visuel :

Cet examen permet l'appréciation de nombreux paramètres (forme, couleur, défauts externes) [6].

##### I.5.1.1. Principe du contrôle :

L'examen visuel est le premier des procédés de contrôle, le plus simple et le plus général puisque c'est aussi le point final de la majorité des autres procédés non destructifs. L'examen visuel direct des pièces peut constituer un contrôle suffisant pour la détection des défauts débouchant en surface et surtout des **hétérogénéités locales et superficielles** (taches de différentes natures) constituant des défauts d'aspect réhilitaires pour des produits plats du types tôles, tissus, verre, etc. Toutefois l'examen purement visuel présente des limitations de différentes natures [7].

Le processus mis en jeu (illustré par la figure ci-dessous) se décompose en 3 phases essentielles :

- **La phase d'excitation** qui consiste à produire le faisceau lumineux.
- **La phase de perturbation** qui consiste à placer la pièce dans le champ optique du faisceau et rechercher son orientation la plus favorable pour la mise en évidence d'éventuels défauts de surface.
- **La phase de révélation** qui consiste à placer l'œil dans le champ du faisceau réfléchi par la surface de la pièce [8].

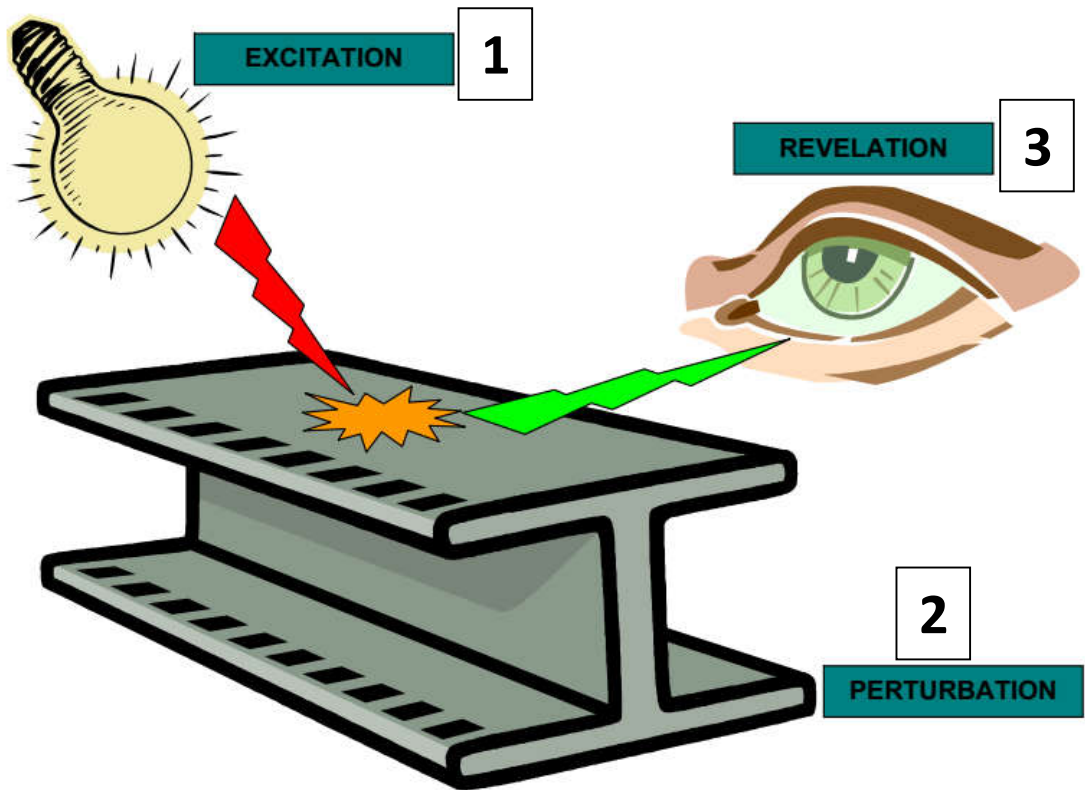


Figure (3):les trois phases essentielles [8].

### I.5.1.2. Mise en œuvre du contrôle :

- ❖ **Eclairage :** Dans tous les cas d'observation d'un objet, les conditions d'éclairage sont essentielles pour la fiabilité du contrôle optique. Il s'agit d'abord de se placer dans les conditions énergétiques, luminosité et longueur d'onde permettant à l'œil de travailler avec la meilleure acuité ; ainsi un éclairement de plus de 300 lux en lumière vert-jaune à  $0,55 \mu\text{m}$  est optimal. Il s'agit ensuite d'adapter le type et l'orientation de l'éclairage à la nature des défauts en vue d'améliorer le contraste. L'éclairage diffus, fourni par exemple par un ensemble de sources lumineuses placées derrière un écran dépoli, est utilisé dans la recherche de défauts variés, sans orientation définie.
- ❖ **L'œil et ses limitations :** L'œil est un capteur optique certes remarquable à bien des points de vue mais possédant toutefois des limitations dont il faut tenir compte en contrôle non destructif [7].

### **I.5.2.Le ressuage :**

Il consiste à faire pénétrer dans les fissures débouchantes, un liquide mouillant et à révéler la présence du liquide par une méthode appropriée (poudre, rayonnement UV...) ; la pièce étant ensuite examinée visuellement [6].

#### **I.5.2.1.Principe du contrôle :**

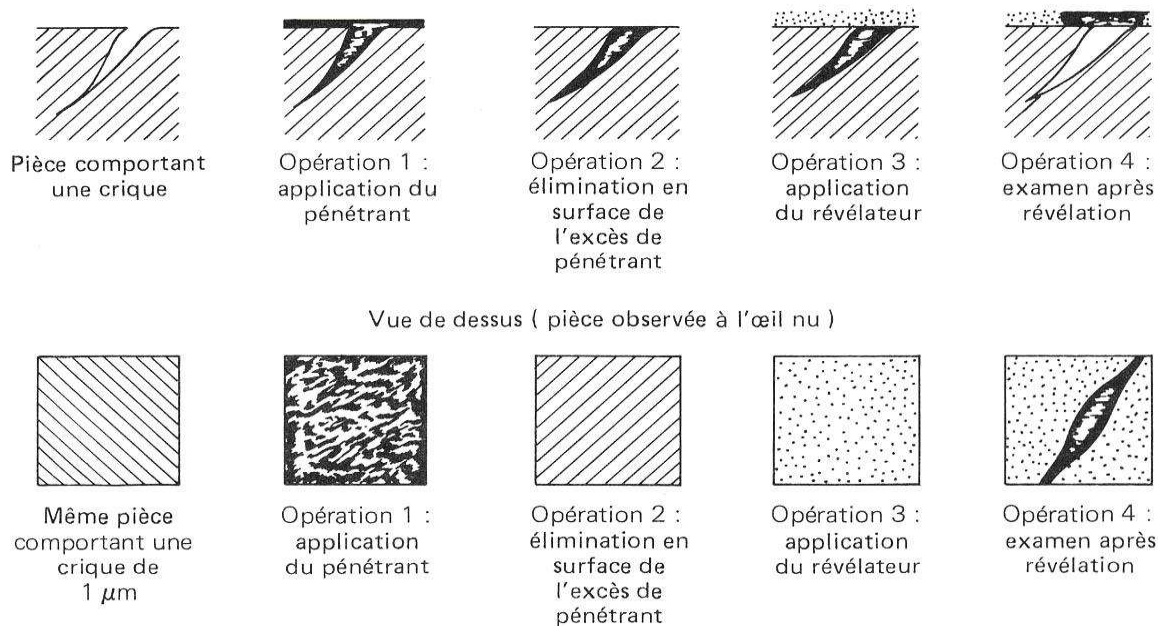
Le contrôle par ressuage a pour but de révéler la présence de défauts débouchant à la surface d'une pièce. Ces discontinuités ne peuvent généralement pas être décelées par un examen visuel.

Le contrôle par ressuage peut être considéré comme une méthode globale pour tous les défauts débouchant en surface, quelle que soit la nature du matériau. A partir du moment où les conditions opératoires sont satisfaites, on n'a pas de besoin de connaître l'orientation du défaut pour le détecter et un seul essai peut suffire.

Comme par ailleurs ce sont les discontinuités débouchantes qui peuvent nuire le plus lors de l'utilisation de la pièce, on voit tout de suite le grand intérêt que peut présenter cette méthode.

L'essai de ressuage peut être résumé en 4 phases, décrites ci-dessous :

1. La surface propre de la pièce à contrôler, exempte de pollution susceptible de colmater les défauts débouchants, est mise en contact avec un produit liquide contenant des traceurs colorés ou fluorescents (liquide d'imprégnation ou de pénétration). Par capillarité, ce liquide pénètre dans tous les défauts débouchants (opération 1).
2. Après une période d'attente (temps d'imprégnation), l'excès de pénétrant sur la surface de la pièce est éliminé (opération 2).
3. On applique alors un produit révélateur sur la surface de la pièce, de manière à absorber le liquide d'imprégnation présent dans les discontinuités. En diffusant dans le révélateur, le pénétrant forme une tache colorée à la surface de la pièce (opération3).
4. L'apparition de ces taches indique au contrôleur la présence de défauts débouchant (opération 4) [8].



**Figure (4):** Principe du contrôle de ressuage [8].

### I.5.2.2.Méthode de contrôle :

- **Le dégraissage** : par solvants chlorés en phase vapeur, par alcalins ou encore au jet d'eau chaude, s'effectue dans des installations adaptées et est complété, si nécessaire, par une opération de séchage.
- **La déposition du pénétrant** : peut se faire par trois techniques correspondant bien entendu à du matériel différent : immersion dans une cuve adaptée à la taille des pièces ou des paniers de pièces, installation de pulvérisation électrostatique (technique très intéressante en particulier pour l'économie de produit qu'elle entraîne), installation de pulvérisation conventionnelle.
- **L'élimination de l'excès de pénétrant** : correspondant à un rinçage, qui peut se faire en cuve avec agitation d'eau par air comprimé, en cuve avec pulvérisation par rangées de buses ou en pulvérisation par pistolet air-eau ; on adjoint à l'équipement de rinçage une lampe à ultraviolets de façon à pouvoir contrôler l'efficacité de l'opération.
- **Le séchage intermédiaire** : s'effectue en étuve à circulation d'air réglée entre 65 et 80 ° C
- **L'application du révélateur** : se fait dans une enceinte appropriée lorsqu'il s'agit d'un révélateur sec se présentant sous forme d'une poudre qu'il faut agiter, ou dans une cuve chauffée lorsqu'il s'agit d'un révélateur en suspension aqueuse.

➤ **Le poste d'inspection visuelle** : doit être conçu pour répondre aux meilleures conditions d'observation en lumière blanche ou en fluorescence UV. Dans le premier cas, il faut réunir deux facteurs : un contraste maximum et un éclairage correct, les normes indiquant un minimum de 350 lux pour ce paramètre qui devra être vérifié avec un luxmètre. Pour l'examen sous rayonnement ultraviolet, le poste d'inspection doit être isolé de la lumière blanche ; il doit être très propre et exempt de surfaces réfléchissantes, moyennant quoi l'œil sera attiré par les petites sources de fluorescence pour lesquelles on choisit d'ailleurs la zone spectrale la plus appropriée, le jaunevert à 555 nm. Le rayonnement UV d'excitation se situe vers 365 nm, raie intense de la décharge dans la vapeur de mercure. L'intensité des tubes luminescents UV à basse pression est insuffisante pour fournir la densité énergétique requise de 8 W/m<sup>2</sup> minimum (15 W/m<sup>2</sup> souhaitable) à la surface de la pièce. Il faut donc utiliser un projecteur à vapeur de mercure à haute intensité, muni d'un filtre incorporé à la source pour arrêter les UV courts et la lumière visible [7].

❖ **Avantages :**

- Simple à mettre en œuvre et relativement sensible aux fissures ouvertes (et en surface).
- Elle n'est pas automatisable et les résultats restent à l'appréciation de l'opérateur. De plus elle peut être effectuée sur toutes sortes de matériaux non poreux et non rugueux de géométrie et dimensions quelconques.
- Facilité de mise en œuvre (pour pénétration pré émulsionnée).

❖ **Inconvénients :**

- Il est nécessaire de faire un décapage et un dégraissage soigné avant l'inspection : L'interprétation des résultats est subjective: Il est impossible de déterminer les dimensions exactes des défauts.
- Nécessite l'utilisation de produits non récupérables, voire contaminés après utilisation (ex: centrale nucléaire où cette technique va être complètement abandonnée pour des raisons de normes de dépollution).
- Danger des solvants toxiques, corrosifs, inflammable [9].

### I.5.3. La magnétoscopie :

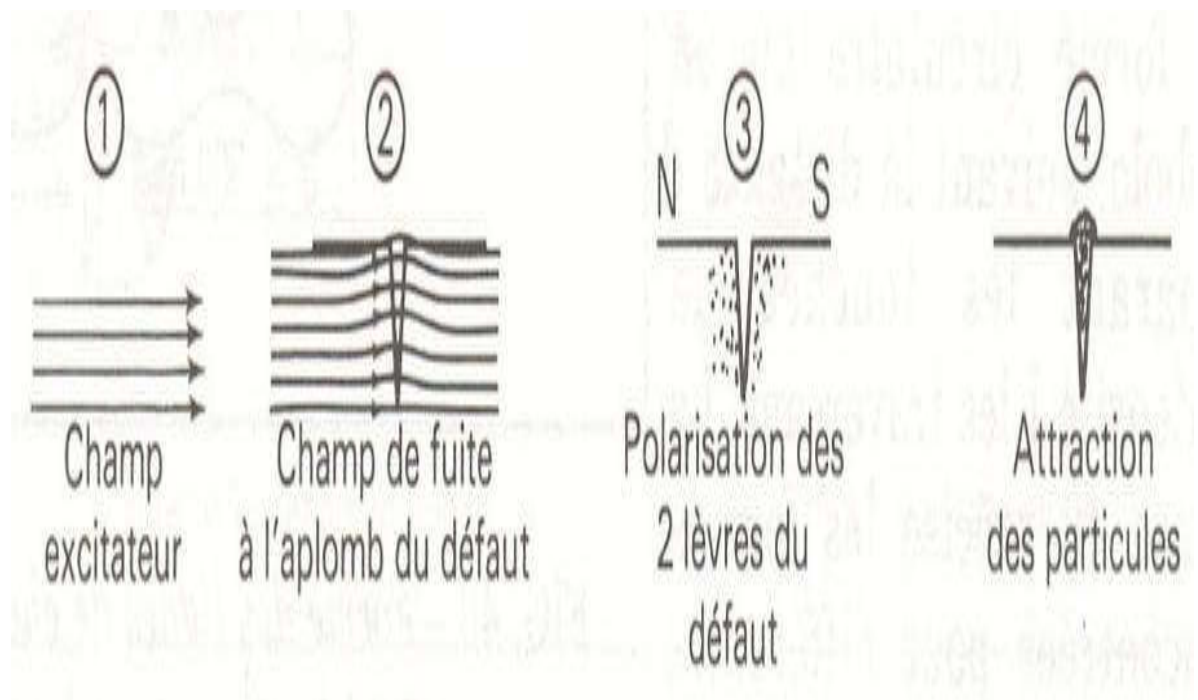
Cette méthode permet en plus, par rapport au ressuage, de mettre en évidence des défauts non débouchant mais proche de la surface. Pour cela, on applique un fort champ magnétique ou un fort courant sur la pièce et on visualise à l'aide d'une poudre métallique les lignes de champ au droit des défauts. L'examen des pièces se fait le plus souvent sous éclairage UV [6].

#### I.5.3.1. Principe du contrôle :

Cette méthode consiste à soumettre un matériau ferromagnétique à l'action d'un champ magnétique qui va ainsi créer des lignes de forces à l'intérieur du matériau.

Ces lignes vont être perturbées par l'existence d'un champ de fuite dû à la présence d'un défaut de la pièce. Ces champs de fuite pourront être mis en évidence et localisés en saupoudrant sur la surface de la pièce des particules ferromagnétiques qui viendront s'accumuler sur la zone d'attraction que représente le champ de fuite.

Cette méthode n'est utilisable que sur des matériaux ferromagnétiques et permet de détecter des défauts débouchant ou sous-jacents (environ 1mm sous la surface). Il y a nécessité de procéder à une démagnétisation de la pièce après le contrôle [8].



**Figure (5):** Principe du contrôle de La magnétoscopie [8].

### I.5.3.2. Méthode de contrôle :

La nature et l'orientation générale du champ magnétique vont dépendre de celles du courant électrique utilisé pour le produire soit par magnétisation directe à l'aide d'un électroaimant, soit par le passage du courant lui-même dans la pièce à contrôler (délivrant un champ circonférentiel). Un courant continu produira un champ magnétique continu favorable à la détection des défauts sous-cutanés. En pratique, on cherche à utiliser des générateurs économiques, et cela conduit à l'emploi de courants alternatifs redressés sur une ou deux alternances. L'utilisation d'un courant, donc d'un champ magnétique alternatif, est fréquente dans ce cas, la présence d'un effet de peau renforce le champ magnétique à la surface de la pièce et accroît, toutes choses égales par ailleurs, le pouvoir de détection des très fines fissures débouchâtes. En magnétoscopie, on utilise la fréquence industrielle de 50 Hz, alors que certains procédés de flux de fuite utilisent des fréquences nettement plus élevées, de quelques milliers de hertz.

#### ➤ La nature du champ magnétique

Les formes de courants utilisés sont les suivantes :

- Monophasé sinusoïdal,
- Monophasé redressé une ou deux alternances,
- Triphasé redressé une ou deux alternances.

La forme d'onde agit sur la pénétration des courants (Effet de peau en courant alternatif).

Plus on se rapproche du courant continu, plus la pénétration est importante.

#### ➤ L'intensité du champ magnétique

Une valeur trop importante provoque la saturation du matériau.

#### ➤ La direction du champ magnétique

On peut utiliser une magnétisation longitudinale, transversale ou oscillante de façon à s'adapter à l'orientation des défauts [7].

#### ❖ Avantages :

- facilité à mettre en oeuvre manuellement.
- économique;
- résultats quasi immédiats;
- détection des défauts débouchant et des défauts sous-jacents [9].

### ❖ Inconvénients :

- Méthode ne s'appliquant qu'aux matériaux ferromagnétiques.
- Sensibilité dépendant de l'orientation des défauts par rapport à la direction générale des lignes d'induction.
- Ne permet pas une appréciation de la profondeur et l'interprétation dans la phase de révélation est délicate.
- L'automatisation de la phase de révélation n'a pas encore abouti industriellement
- Désaimantation obligatoire des pièces [8].

### I.5.4. Radiographie :

La radiographie est une technique basée sur le bombardement d'un corps (un tube, une pièce) par les rayons X ou  $\gamma$ . Applicable généralement dans le domaine de médecine, mais actuellement elle s'applique dans d'autres domaines (mécanique, électrotechnique, matériaux); c'est en effet souvent la technique retenue lorsqu'il s'agit de mettre clairement en évidence et de dimensionner des hétérogénéités nocives à l'intérieur des objets de toutes natures, aussi bien au stade de la fabrication qu'à celui de contrôle de maintenance [9].

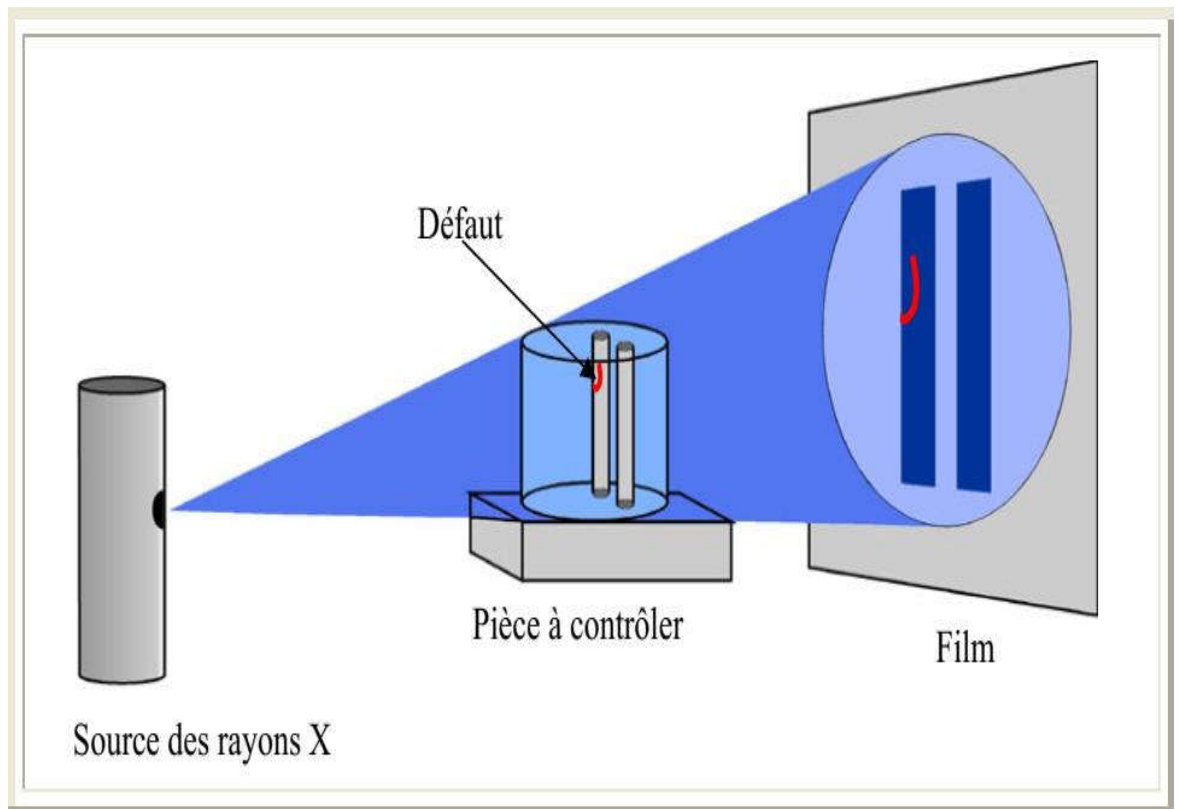


Figure (6): Examen par radiographie [9].



### I.5.4.1.Principe du contrôle :

La radiographie peut être décrite comme étant un examen qui utilise un faisceau de radiations électromagnétiques pénétrantes dirigé vers la pièce à inspecter. Suivant la nature et la géométrie de la pièce, une portion du faisceau est absorbée et/ou déviée.

En créant une image à partir de l'intensité de la radiation derrière la pièce, des variations d'intensité sont donc observées. Ces variations correspondent à l'ombrage produit par les différentes structures (internes et externes) de la pièce inspectée. [8].

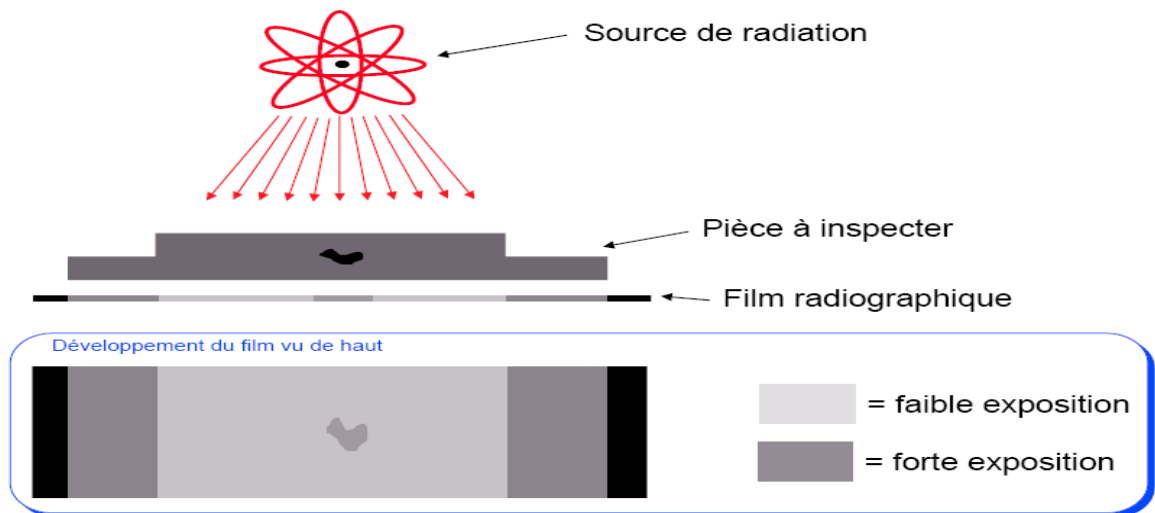


Figure (7): Principe du contrôle de radiographie [8].

### I.5.4.2.Méthode de contrôle :

Le contrôle détecte la différence d'absorption provoquée par la présence du défaut par rapport au reste de la pièce. Cette différence peut être mise en évidence par :

- L'impression de films photographiques,
- L'utilisation d'écrans fluorescents et caméras de télévision,
- L'utilisation de détecteurs de rayonnements.

Par la suite, nous ne traiterons que le cas de la radiographie. Pour chaque contrôle, il existe un cahier des charges ou une norme à respecter. Le lecteur se reportera aux normes

NF EN 444, NF EN 462-1, NF EN 462-2, NF A 89-550, NF A 89-551, NF A 89-552, NF A 89-562, NF A 89- 565.

### ➤ **Le film radiographique :**

Les films sont constitués d'un support plastique recouvert sur les deux faces d'une émulsion de sels d'halogénures d'argent dans une couche de gélatine. Une des caractéristiques des films est la taille du grain. Les films à gros grains sont plus rapides que les films à grains fins, mais la définition des images est plus faible.

### ➤ **Visibilité des défauts :**

Cette visibilité des défauts est déterminée par les facteurs suivants :

- La nature et l'épaisseur traversée par le rayonnement du défaut.
- Les facteurs géométriques (distance du foyer de la source au film par exemple) qui vont conditionner la netteté des contours du défaut (problème de flou).
- Les propriétés du film (granulation, voile de base, présence d'écrans filtrants et (ou) de renforçateurs).
- La qualité du rayonnement utilisé [7].

### ❖ **Avantages :**

- fournir une image constituant directement un document archivable du contrôle montrant l'absence présumée ou la présence d'un défaut dont on peut éventuellement apprécier la nature et la taille.
- garantir, dans une certaine mesure, la fiabilité de l'examen et le respect des procédures.

### ❖ **Inconvénients :**

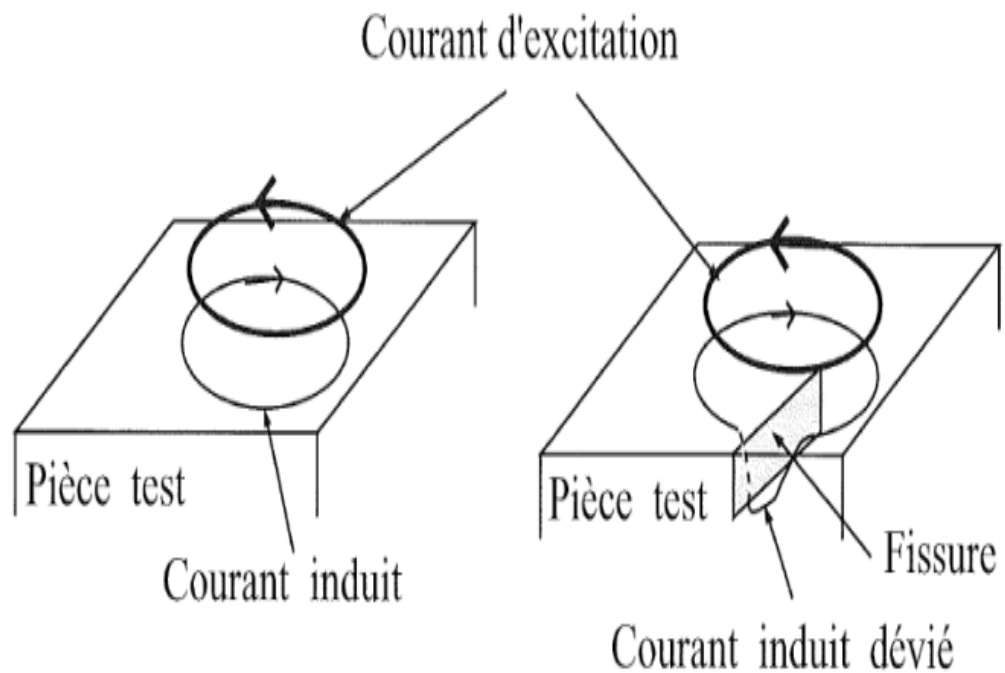
- toutefois, l'interprétation des images demande un fort niveau d'expertise de la part de l'opérateur. De plus, cette technique est extrêmement coûteuse et impose des conditions de sécurités pour l'opérateur et l'environnement, qui rendent son utilisation en industrie complètement inadaptée.
- la nécessité de mettre en oeuvre des dispositifs et procédures de protection du personnel.
- le risque de ne pas détecter les fissures se présentant selon l'axe du faisceau.
- la faible productivité alliée à un coût élevé lorsqu'il s'agit de faire de multiples examens systématiques avec films [9].

### I.5.5. Courants de Foucault :

Ce type de contrôle s'effectue en illuminant par un champ magnétique variable la surface d'une pièce métallique. Toute perturbation par un défaut des courants induits dans la pièce va se traduire par une modification de l'impédance vue aux bornes du capteur. En agissant sur la fréquence du courant d'excitation et la géométrie des bobines, plusieurs contrôles peuvent être réalisés [6].

#### I.5.5.1. Principe du contrôle :

Un courant d'excitation variable, soit harmonique soit pulsé, induit dans la pièce à contrôler les courants de Foucault s'opposant, d'après la loi de Lenz, au flux d'excitation figure (8). Si une fissure est présente dans la pièce, les courants de Foucault sont déviés.



**Figure (8):** Schématisation de la détection d'une fissure par courants de Foucault [10].

Le flux de réaction est alors modifié, modifiant ainsi l'induction à l'extérieur de la pièce. Soit à partir d'une pièce saine de référence, soit en déplaçant la bobine d'excitation, on peut alors mesurer cette variation d'induction. La mesure peut être locale ou bien par le flux

à travers une bobine. Dans le cas d'un déplacement de la bobine, les variations en fonction de la position de la bobine constituent la signature de la fissure [10].

### **I.5.5.2. Signaux d'excitation et d'exploitation :**

Il existe trois types d'excitation pour les capteurs à courants de Foucault :

- L'alimentation mono fréquence.
- L'alimentation multi fréquentielle.
- L'alimentation par des courants pulsés [11].

### **❖ Avantages et inconvénients :**

- Méthode rapide et facilement automatisable.
- Vitesses de défilement élevées.
- Les bobines ne sont pas en contacts avec le produit.
- Enregistrement (numérique, graphique, magnétique).
- Haute sensibilité en détection, mais indications parasites existantes.
- Appréciation de la profondeur possible.
- Appareillage relativement coûteux.
- Limitation aux matériaux conducteurs (métaux).
- Méthode peu performante sur matériaux ferromagnétiques car la limitation aux défauts proches de la surface (même fermés) ou aux parois minces (exemple : aéronautique)
- La surface doit être propre et régulière (peinture ok)
- Faible capacité de dimensionnement en profondeur
- Sensibilité influencée par l'entrefer existant entre la bobine et le produit [8].

### **I.5.6. Ultrason :**

Cette technique est parmi les méthodes les plus répandue. Elle consiste à détecter les défauts en balayant la pièce à contrôler et en observant les échos réfléchis sur les discontinuités de la matière [6].

### I.5.6.1.Principe du contrôle :

Le principe fondamental du contrôle non destructif par ultrasons réside dans l'analyse de l'influence des défauts, de type localisés ou inhomogénéités, sur la propagation des ondes vibratoires dans le matériau : réflexion, réfraction et diffraction sur les interfaces, atténuation dans la matrice liée aux phénomènes d'absorption et de diffusion , La vitesse de propagation est variable selon les directions.

Une bonne connaissance des phénomènes liés à la propagation des ultrasons est donc une base indispensable à la pratique de ce type de contrôle alors on déduit que l'ultrason est basé sur la transmission, la réflexion, et l'absorption d'une onde ultrasonore, qui se propage dans la pièce à contrôler figure (9) [11].

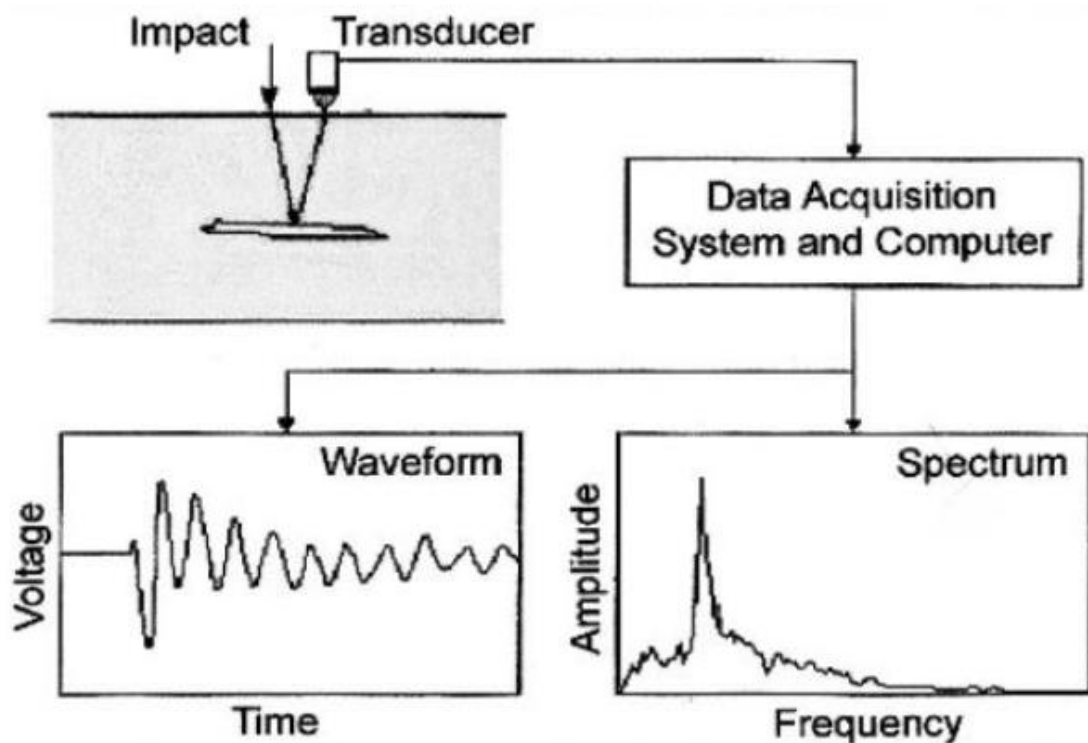


Figure (9): Théorie de l'opération Impact-Echo [11].

#### ❖ Avantages :

- grand pouvoir de pénétration (plusieurs mètres dans l'acier forge).
- haute sensibilité de détection des défauts, notamment pour la recherche des défauts plans (dépend de la fréquence de l'onde ultrasonore);

- localisation et dimensionnement des défauts;
- examen à partir d'une seule face souvent suffisant;
- détection instantanée, se prête bien à l'automatisation.

### ❖ Inconvénients :

- pour les contrôles "manuels" une grande expérience des opérateurs est nécessaire.
- méthode impliquant un très haut niveau de technicité.
- sensible à la géométrie (forme, rugosité).
- sensible à la nature et à l'orientation des défauts.
- technique souvent très coûteuse (investissement, temps de contrôle) [9].

### **I.6. Défauts et leurs origines :**

Détecter un défaut dans une pièce c'est mettre en évidence physiquement une hétérogénéité de matière, une variation locale de propriétés physiques ou chimiques préjudiciable au bon emploi de celle-ci. Cela peut être des porosités fissures, défauts liés à des soudures, délaminages,...

Vu la complexité et la variété des défauts liées à une variété de conditions de service et les modes de défaillance dans de nombreuses circonstances différentes

De nombreux travaux ont étudié l'importance et l'évaluation des défauts des systèmes. Ils passent en revue l'état de l'industrie et des renseignements disponibles pour déterminer la présence, l'identification, la taille, l'emplacement des défauts dans ces systèmes. La plupart de ces directives industrielles sont disponibles.

Il s'agit notamment des informations résumées par le comité européen de normalisation CEN, de l'American Society for Mechanical Engineers ASME, l'organisation internationale de normalisation ISO et de diverses autres sources [12] [13].

Dans la littérature, différentes catégories de défauts ont été établies et détaillées. En effet, la classification des défauts peut se faire suivant un ou plusieurs critères choisis (emplacement, nature, taille,...). A titre d'exemple, une classification liée à l'emplacement des défauts dans les pièces inspectées est souvent adoptée, on trouve alors deux grandes catégories : défauts internes et défauts de surface [14].

#### **I.6.1. Défauts internes :**

Il s'agit de tous les défauts localisés dans le volume du corps à contrôler qu'il s'agisse de pièces moulées, forgées, laminées ou soudées. Leur nomenclature est spécifique à chaque branche d'activité technologique et industrielle. Dans l'industrie des métaux il peut s'agir

par exemple de porosité, de soufflures ou d'inclusions. Dans tous les autres cas, il peut s'agir de la présence d'un corps étranger au sein d'une pièce ou d'un produit. Pour ce type de défauts le contrôle visuel et exclu d'office [14].

### **I.6.2. Défauts de surface :**

Accessible a l'observateur direct mais pas toujours visible à l'œil nu, ils peuvent se classer en deux catégories distinctes :

- Défauts ponctuels correspondent aux défauts les plus nocifs sur le plan technologique puis qu'il s'agit des crique, fissures et craquelures généralement aptes à provoquer a terme la rupture de la pièce, en initiant par exemple des fissures de fatigue. Les méthodes de contrôle non destructif les plus sensibles sont les mieux adaptées pour ce type de défauts (ressuage, magnétoscopie, courants de Foucault).
- Défauts d'aspect correspondent à une variation de paramètre géométriques ou physiques qui rend le produit inutilisable (rugosité, taches diverses). Pour ce type défauts le contrôle visuel est possible mais on cherche à le remplacer par des contrôles optiques automatiques [14].

### **I.6.3. Défauts de soudure :**

Il existe plusieurs types de défauts de soudure ainsi que différentes méthodes pour le prévenir et les corriger. vise à identifier et à décrire les défauts les plus courants en fonction du métal travaillé ou du procédé de soudage utilisé [15].

De nombreux modes de classifications sont envisageables, celle de la NF EN ISO 6520-1 définit 5 groupes :

- GROUPE N° 1 . Fissures
- GROUPE N° 2 . Cavités
- GROUPE N° 3 . Inclusions solides
- GROUPE N° 4 . Manque de fusion et de pénétration
- GROUPE N° 5 . Défauts de forme

#### **I.6.3.1. Fissures :**

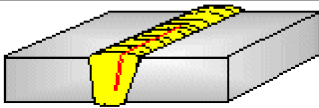
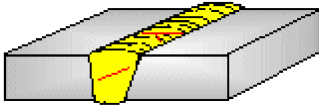
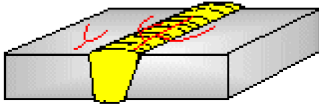
- **Fissure longitudinale :**

Fissure sensiblement parallèle de l'axe de la soudure. Elle peut se situer :

- dans le métal fondu.

- dans la zone de liaison.
- dans la zone thermiquement affectée.
- dans le métal de base.
- **Fissure transversale :**  
Fissure sensiblement transversale à l'axe de la soudure. Elle peut se situer :
  - dans le métal fondu.
  - dans la zone thermiquement affectée.
  - dans le métal de base.
- **Fissures rayonnantes :**  
Groupe de fissures issues d'un même point. Il peut se situer :
  - dans le métal fondu.
  - dans la zone thermiquement affectée.
  - dans le métal de base. [16].

**Tableau(1) :** des défauts de soudure groupe n° 1 - fissures

Numéro	Désignation	Illustration
<b>GROUPE N° 1 - FISSURES</b>		
101	FISSURE LONGITUDINALE	
102	FISSURE TRANSVERSALE	
103	FISSURES RAYONNANTES	

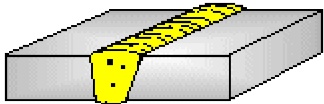
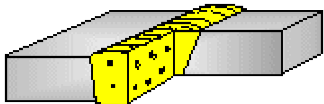
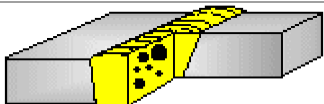
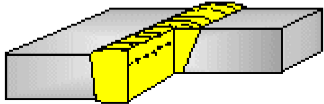
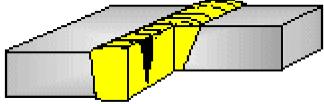
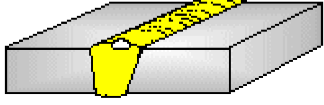
### I.6.3.2. Cavités :

- **Soufflure sphéroïdale :** Soufflure de forme sensiblement sphérique.
- **Soufflures sphéroïdales uniformément réparties :** Soufflures sphéroïdales essentiellement distribuées régulières dans le métal fondu. A différencier des soufflures alignées (2014) et nid de soufflures (2013).



- **Nid de soufflures** : Groupe de soufflures réparties de manière quelconque.
- **Soufflures alignées** : Soufflures réparties suivant une ligne parallèle à l'axe de la soudure.
- **Soufflure vermiculaire** : Soufflure en forme de galerie de ver dans le métal fondu résultant du cheminement des gaz. La forme et la position de ces soufflures sont déterminées par le mode de solidification et l'origine des gaz. Elles sont généralement groupées en nids et disposées en arêtes de poissons. Certaines soufflures vermiculaires peuvent déboucher en surface de la soudure.
- **Piqûre** : Soufflure débouchant en surface de la soudure. [16].

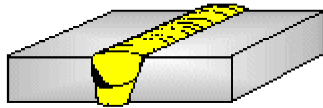
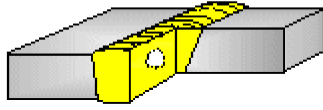
**Tableau(2)** : des défauts de soudure groupe n° 2 - cavités

Numéro	Désignation	Illustration
<b>GROUPE N° 2 - CAVITÉS</b>		
2011	SOUFFLURE SPHÉROÏDALE	
2012	SOUFFLURES UNIFORMÉMENT REPARTIES	
2013	NID DE SOUFFLURES	
2014	SOUFFLURES ALIGNÉES	
2016	SOUFFLURE VERMICULAIRE	
2017	PIQÛRE	

**I.6.3.3. Inclusions solides :**

- **Inclusion de laitier :** Laitier emprisonné dans le métal fondu. On peut rencontrer, suivant les conditions de leur formation, des inclusions de laitier :
  - alignées.
  - isolées.
  - en nid.
- **Inclusion métallique :** Particule de métal étranger emprisonné dans le métal fondu. Il peut s'agir d'inclusions de :
  - tungstène.
  - cuivre.
  - autre métal [16].

**Tableau(3) :** des défauts de soudure groupe n° 3 - inclusions solides

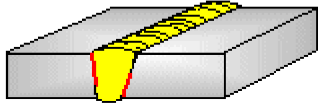
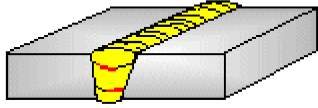
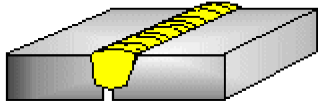
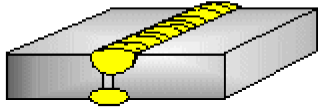
Numéro	Désignation	Illustration
<b>GROUPE N° 3 - INCLUSIONS SOLIDES</b>		
301	INCLUSION DE LAITIER	
304	INCLUSION MÉTALLIQUE	

**I.6.3.4. Manque de fusion et de pénétration :**

**Manque de fusion (collage) :** Manque de liaison entre le métal déposé et le métal de base ou entre deux couches contiguës de métal déposé. Un des manques suivants est possible :

- le manque de fusion de bords.
  - le manque de fusion entre passes.
  - le manque de fusion à la racine<sup>1)</sup>.
- **Manque de pénétration :** L'un ou les deux bords de la racine ne sont pas fondus.
  - **Manque d'interpénétration :** Différence entre la pénétration réelle et la pénétration nominale [16].

**Tableau(4) :** des défauts de soudure groupe N° 4 manque de fusion et de pénétration










Numéro	Désignation	Illustration
<b>GROUPE N° 4 - MANQUE DE FUSION</b>		
4011	MANQUE DE FUSION DES BORDS	
4012	MANQUE DE FUSION ENTRE PASSES	
<b>GROUPE N° 4 - MANQUE DE PÉNÉTRATION</b>		
402	MANQUE DE PÉNÉTRATION	
402	MANQUE D'INTERPÉNÉTRATION	

### I.6.3.5. Défauts de forme :

- **Caniveau :** Caniveau d'une longueur importante d'un seul tenant.
- **Morsure :** Caniveau de faible longueur apparaissant par intermittence le long de la soudure.
- **Caniveau à la racine :** Caniveaux apparaissant de chaque côté de la passe de fond.
- **Surépaisseur excessive :** Épaisseur excessive du métal fondu à la surface d'une soudure bout à bout.
- **Excès de pénétration :** Excès de métal faisant saillie à la racine d'une soudure. Il peut s'agir de :
  - Excès de pénétration locale.
  - Excès de pénétration continue.
  - Pleine pénétration.
- **Défaut d'alignement :** Non alignement de deux pièces soudées, se traduisant par une dénivellation, leurs surfaces étant néanmoins parallèle. Il peut s'agir de :

- défaut d'alignement entre tôles, les pièces sont des tôles.
- défauts d'alignement entre tubes, les pièces sont des tubes.
- **Déformation angulaire** : Non alignement de deux pièces soudées, se traduisant par la formation d'un angle entre leurs surfaces ou non respect de l'angle prévu.
- **Manque d'épaisseur** : Insuffisance continue ou intermittente du métal déposé conduisant à un profil de cordon en retrait par rapport au profil correct.
- **Retassure à la racine** : Manque d'épaisseur à la racine d'une soudure bout à bout dû au retrait du métal fondu [16].

**Tableau(5)** : des défauts de soudure groupe n° 5 - défauts de forme

Numéro	Désignation	Illustration
<b>GROUPE N° 5 - DÉFAUTS DE FORME</b>		
5011	CANIVEAU	
5012	MORSURE	
5013	CANIVEAU A LA RACINE	
502	SURÉPAISSEUR EXCESSIVE	
504	EXCÈS DE PÉNÉTRATION	
507	DÉFAUT D'ALIGNEMENT	
508	DÉFORMATION ANGULAIRE	
511	MANQUE D'ÉPAISSEUR	
515	RETASSURE A LA RACINE	

**I.6.4. Principe de détection d'un défaut :**

Les méthodes de contrôle non destructif sont fondées sur la déformation du champ d'une grandeur physique par une discontinuité. On exploite donc un phénomène physique pour détecter une hétérogénéité dans un matériau.

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

Les techniques du CND diffèrent généralement par l'énergie employée : énergie mécanique.

(ultrasons, ressuage) ; électromagnétique (radioscopie, courants de Foucault,...) ou thermique (thermographie infrarouge,...). Cependant, quelle que soit la méthode employée, un processus de détection des défauts est généralement mis en place. Il est constitué de deux étapes principales figure(10) : 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 type des défauts) [14].

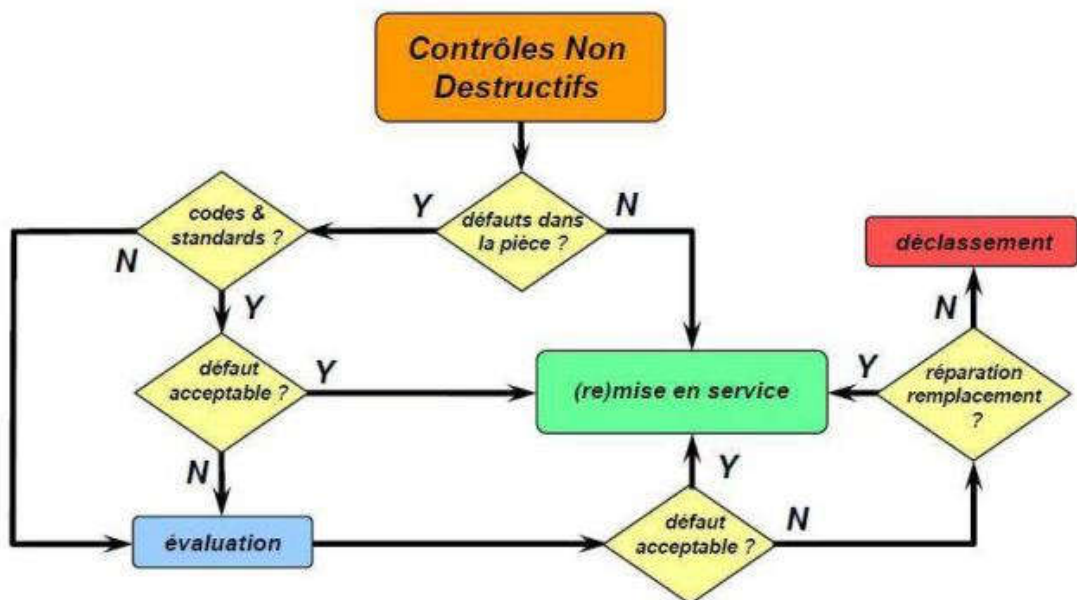


Figure (10): Processus de détection et traitement des défauts [14].

### **I.7. Conclusion :**

Dans ce chapitre, les techniques du CND les plus répandues ont été présentées d'une manière succincte. Un aperçu global des différents défauts et structures à inspecter rencontrés dans l'industrie montre la complexité et la difficulté de mettre en œuvre une technique universelle.

En effet, les méthodes de CND ont été développées pour répondre aux différentes problématiques rencontrées. Le choix d'une technique dépend d'un grand nombre de facteurs tels que la nature des matériaux inspectés, des phénomènes utilisés (thermique, électromagnétique,...) et de la nature de la réponse recherchée.

Dans ce contexte, nous nous sommes intéressés à une nouvelle méthode couplée dite technique thermo-inductive. Notre travail porte sur le développement d'un outil de support pour la mise au point des procédures de la technique, de la qualification des processus de conception et d'optimisation et d'aide à l'expertise pour la détection des défauts. Dans cette optique, les phénomènes physiques impliqués dans la technique ont été détaillés. Une discussion sur le choix du mode de stimulation a été développée en fonction des performances et limitations de ces derniers [14].



*Chapitre II*  
*Généralité sur l'ultrason.*



### II.1. Introduction :

Omniprésents dans notre vie de tous les jours, les sons sont des sensations auditives dues à des vibrations acoustiques. On appelle ultrasons, des sons de fréquence supérieure à 20000 Hz, inaudibles par l'oreille humaine.

Les ondes sonores de hautes fréquences peuvent être entendues et émises par certains animaux tels que les chauves souris, qui émettent des ultrasons leur permettant de percevoir leur environnement.

Les ultrasons sont également utilisés dans de nombreuses applications : en technologie pour la recherche de défauts de fabrication par exemple, pour la détection et la communication sous marine, mais aussi en télémétrie pour mesurer des distances ...

Dans cette chapitre, on expose quelques principes liés à la propagation des ondes ultrasonores appliqués au CND. Dans un premier temps, on fait un rappel de la physique des ondes élastiques ainsi que de la propagation linéaire dans les fluides et les solides élastiques et isotropes. Enfin, on décrit quelques principes liés au CND concernant la représentation des données ultrasonores et les différentes techniques pour la détection et le dimensionnement des défauts. La propagation ultrasonore utilisée dans ce domaine sera considérée comme linéaire. Il s'agit en fait d'une approximation valable si les déplacements générés par les ondes en question restent négligeable devant la longueur d'onde, ce qui est le cas en imagerie ultrasonore en CND comme pour des applications d'imagerie médicale [17].

### II.2. Les ondes ultrasons:

Les ondes ultrasonores sont des vibrations mécaniques dont la fréquence est supérieure au domaine audible d'une oreille humaine normale (16 Hz à 16 KHz). Elles se propagent à l'intérieur des matériaux avec des vitesses qui dépendent du milieu lui-même et du type d'onde[18].

Dans les matériaux métalliques, les fréquences d'utilisation courante vont de quelques centaines de kilohertz à quelques dizaines de mégahertz. Dans ce domaine de fréquence, l'amortissement dans l'air est tel qu'elles ne s'y propagent pratiquement pas.

Le phénomène initial du son ou d'un ultrason est toujours produit par un corps élastique animé de vibrations mécaniques dues par exemple à un choc (diapason), à une impulsion électrique (tonnerre) ou à un jet gazeux interrompu (sirène). Les sons d'une manière générale sont des ondes élastiques. Elles ne se diffèrent entre eux que par leurs fréquences. [17].



Tableau(6) : Les Différents sons et leurs fréquences [18].

0 à 16 Hz	16 Hz à 16.10 <sup>3</sup> Hz	16.10 <sup>3</sup> Hz à 150.10 <sup>6</sup> Hz	> 150.10 <sup>6</sup> Hz
<b>Infrasons</b>	<b>Zone audible</b>	<b>Ultrasons</b>	<b>Hyper sons</b>

En contrôle non destructif par ultrasons, la plage utilisée est comprise entre 10<sup>5</sup> Hz et 20.10<sup>6</sup> Hz.

On parle généralement d'onde lorsqu'il s'agit d'un phénomène qui se répète après un certain temps (T) appelé période. [18].

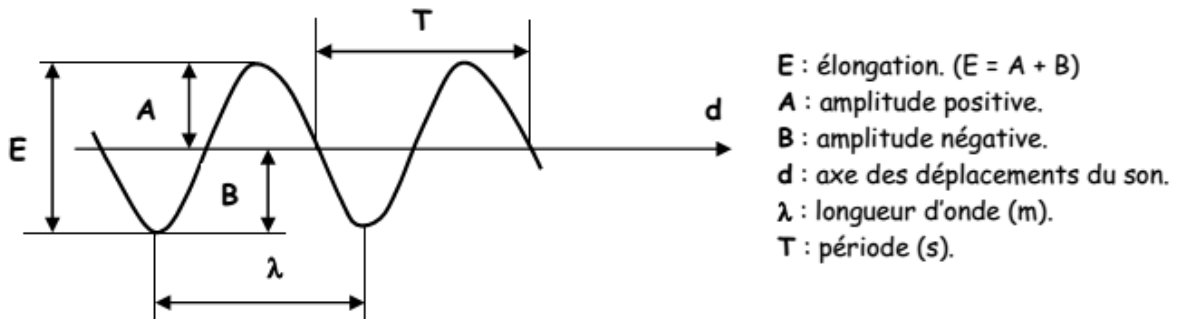


Figure (11): Représentation des vibrations du son (sinusoïde) [19].

- On rappelle que la longueur d'onde, la célérité (= vitesse de propagation) et la fréquence sont reliées par :

$$\lambda = C \cdot T = \frac{C}{f}$$

λ : longueur d'onde en m.

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

T : période de l'onde, en seconde (s) et T = 1 / f.

C : célérité de l'onde, en m/s.

- En contrôle non destructif, pour qu'on puisse détecter un défaut, il faut que celui-ci ait une taille au moins égal à λ/2. C'est pourquoi, on utilise des fréquences élevées, comprises en général entre 1 et 20 MHz. [17].

### II.3. Les divers types d'ondes ultrasonores:

#### II.3.1. Ondes de Compression :

- Elles se propagent parallèlement à la direction de vibration.

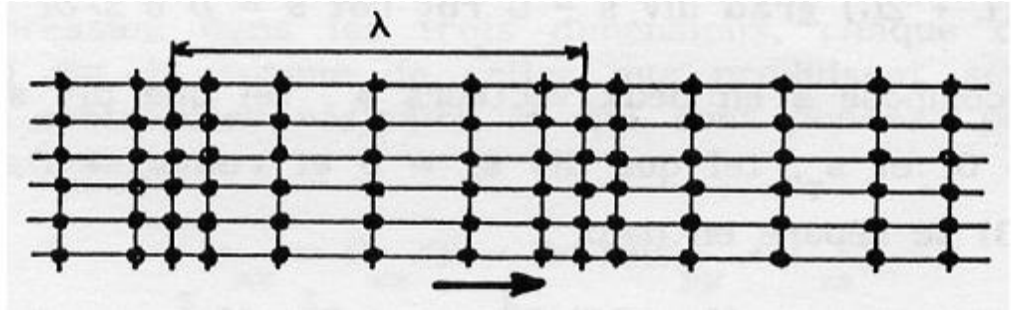


Figure (12): Ondes longitudinales [19].

- Dans le cas de surfaces d'ondes planes (ce qui est le cas sur la figure 12), on parle alors d'ondes LONGITUDINALES. (O.L.)

- Célérités des O.L. :

La célérité de ces ondes (usuellement notée  $C_L$ ) dans un milieu homogène, isotrope et illimité, est indépendante de  $f$  mais dépend de la nature du matériau [18].

Exemples :	Air (20°C)	340 m.s <sup>-1</sup>	Fer	≈5900 m.s <sup>-1</sup>
	Eau (20°C)	1480 m.s <sup>-1</sup>	Cuivre	≈4700 m.s <sup>-1</sup>
			Plexiglas	≈2700 m.s <sup>-1</sup>

Pour les matériaux solides, la célérité est liée à la masse volumique  $\mu$ , au module d'Young  $E$  et au coefficient de Poisson  $\sigma$  par la relation :

$$C_L = \sqrt{\frac{E \cdot (1 - \sigma)}{\mu \cdot (1 + \sigma) \cdot (1 - 2\sigma)}}$$

- Ci-contre (figure 13) une image très simpliste d'un matériau solide. On comprend intuitivement le mécanisme de propagation et l'influence des caractéristiques (masses des atomes, "raideurs" des liaisons interatomiques) sur la vitesse de propagation [19].

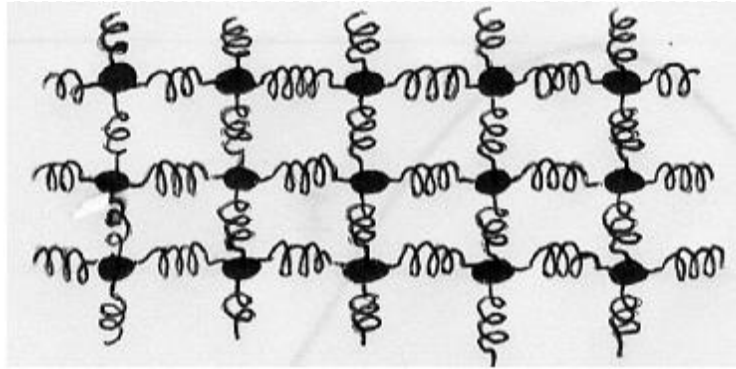


Figure (13): Modèle élastique d'un solide. [19].

### II.3.2 Ondes de Cisaillement :

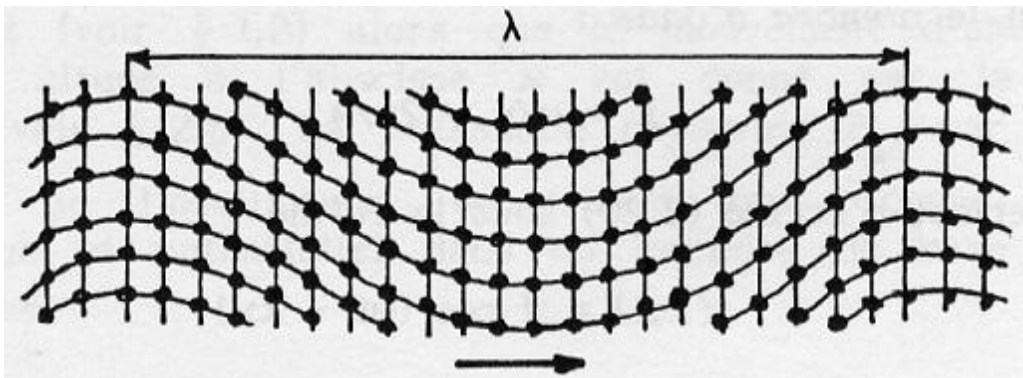


Figure (14): Ondes transversales [19].

- La direction de vibration est perpendiculaire à la direction de propagation.
- Dans le cas de surfaces d'ondes planes (ce qui est le cas sur la figure 14)  
On parle alors d'ondes TRANSVERSALES (O.T.).
- Seuls les matériaux solides (éventuellement les fluides très visqueux) sont susceptibles de propager ce type d'ondes. [19].
- Célérités des O.T. :

Exemples : Fer 3230 m.s<sup>-1</sup>      Cuivre 2260 m.s<sup>-1</sup>      Plexiglas 1430 m.s<sup>-1</sup>

On a également une relation en fonction des caractéristiques élastiques du matériau :

$$C_T = \sqrt{\frac{E}{2 \cdot \mu \cdot (1 + \sigma)}}$$

### II.3.3 Ondes guidées :

Lorsque le milieu de propagation ne peut pas être considéré comme illimité, surtout dans les solides, les ondes sont alors guidées par les côtés limitant le milieu. En contrôle non destructif, on distingue en général deux types d'ondes guidées :

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

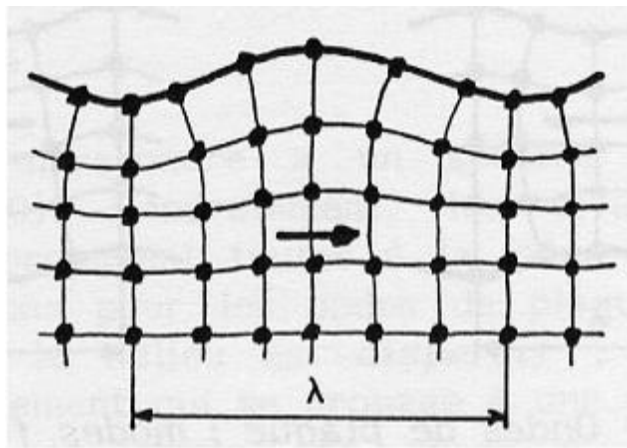


Figure (15) : Ondes de surface [19].

**b- les ondes de plaque :** ou ondes de Lamb qui affectent toute l'épaisseur  $e$  d'une plaque quand cette épaisseur est de l'ordre de quelques longueurs d'onde. Contrairement aux différents cas ci-dessus, la vitesse de propagation dépend alors de la fréquence ; on dit qu'il y a dispersion [17].

### II.4 Production des UT :

Pour créer une onde mécanique il faut une excitation mécanique :

L'onde peut être générée par un impact ou une force vibratoire externe. L'onde se propage ensuite de proche en proche grâce à l'oscillation des particules autour de leur position au repos. [19].

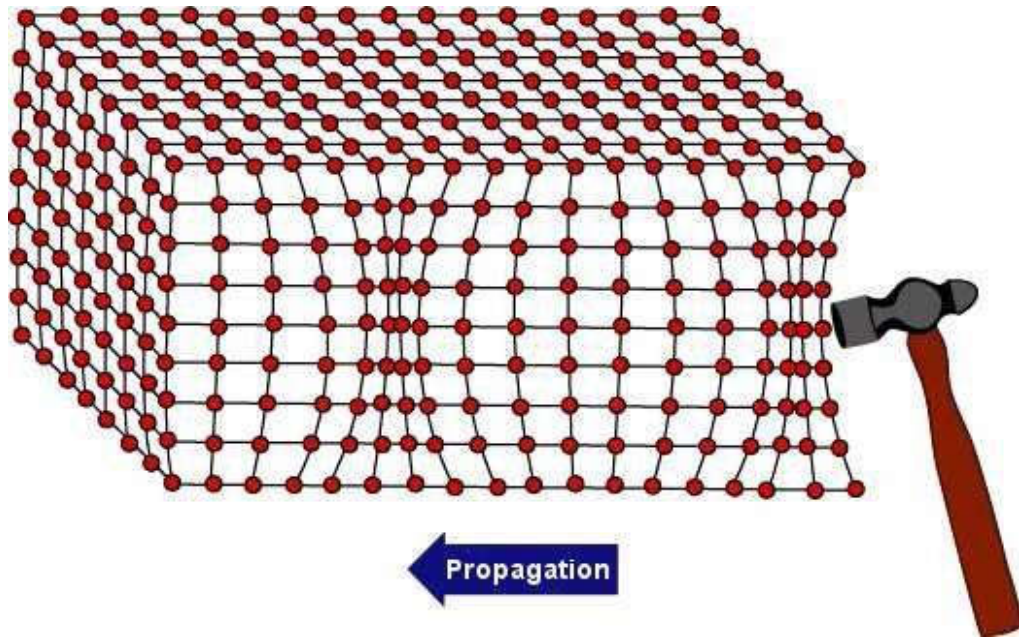


Figure (16) : Production d'ondes UT [19].

- Plusieurs phénomènes permettent de produire des ondes UT.
- Le plus utilisé est la piézo-électricité.
- La piézoélectricité est la propriété que possèdent certains corps de se polariser électriquement sous l'action d'une contrainte mécanique (effet direct) et, réciproquement, de se déformer lorsqu'on leur applique un champ électrique (effet inverse).
- L'effet piézoélectrique a été découvert en 1880 par Pierre et Jacques Curie.

On appelle transducteur tout système qui permet de convertir une forme d'énergie en une autre forme d'énergie.

Exemples :

- convertir de la lumière en électricité par l'intermédiaire d'une cellule photoélectrique,
- convertir de l'électricité en énergie mécanique par l'intermédiaire d'un moteur électrique [19].

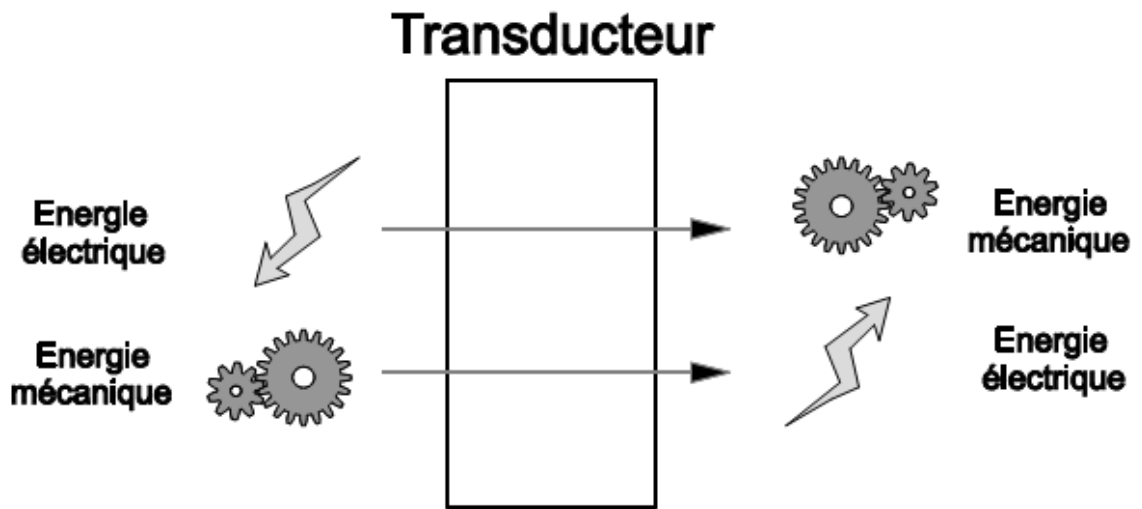


Figure (17) : Un transducteur est un convertisseur d'énergie [18].

Les transducteurs ultrasonores couramment utilisés permettent de transformer l'énergie électrique délivrée par un générateur en énergie acoustique. On utilise également le phénomène inverse, c'est à dire la conversion énergie mécanique - énergie électrique.

Cette transformation d'énergie peut se faire selon plusieurs principes physiques qui sont :

- - la piézo-électricité,
- - la ferroélectricité ou l'électrostriction,
- - la magnétostriction,
- - l'effet électro magnéto-acoustique (E.M.A.T.). [19].

#### II.4.1 L'effet direct :

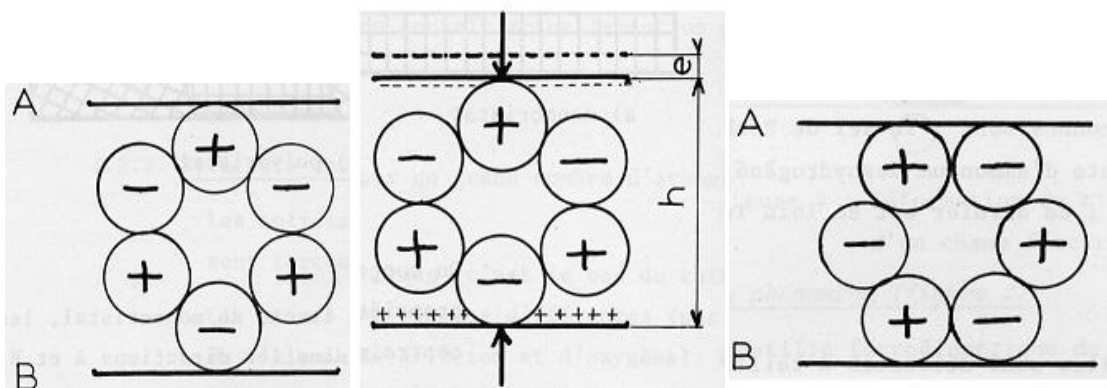


Figure (18) a : Cristal libre. Figure (18) b: Cristal sous contrainte. Figure (18) c : Cristal non piézoélectrique. [19].

- Quand on exerce une pression sur une des faces de la lame de cristal (Figure 18a) = Les ions positifs se rapprochent globalement de la face B qui se charge donc positivement. Phénomène similaire pour la face A qui se charge négativement.
- On montre que la différence de potentiel  $U$  qui se manifeste ainsi est proportionnelle à la pression appliquée.
- Rq : La taille du cristal par rapport à sa structure cristalline est essentiel (voir Figure 18 c).
- Si un cristal piézoélectrique reçoit une pression acoustique alternative, il se met à vibrer de manière alternative et génère alors entre les 2 faces une tension alternative. Ce phénomène est utilisé lors de la réception d'une onde UT par un palpeur. [17].

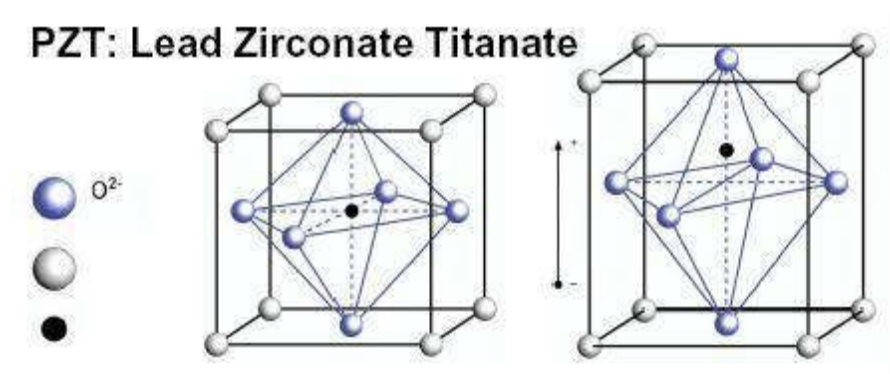
### II.4.2 L'effet indirect :

- Si on applique une tension électrique entre les faces A et B d'un cristal du type de celui de la Figure 18, les ions attirés ou repoussés vont contribuer à déformer le cristal.
- La déformation est proportionnelle à la tension appliquée.
- Si on applique une tension alternative à un cristal piézoélectrique, celui-ci se met à vibrer au même rythme que celui de la variation de la tension alternative. Ce phénomène est utilisé pour la génération des UT par un palpeur.

### II.4.3 L'effet indirect :

L'effet piézo-électrique a été mis en évidence la première fois en 1880 par les frères CURIE.

Ils ont pu remarquer qu'en exerçant une pression sur une lame de quartz taillée convenablement, celle-ci se polarisait : apparition de charges positives et négatives sur les faces opposées. [17].



**Figure (19)** : Influence de l'application d'un champ électrique sur la structure cristallographique du PZT [19].

Il existe de nombreuses substances piézo-électriques, les plus connues étant le quartz, le sulfate de lithium, le sel de Rochelle, la tourmaline, le phosphate d'ammonium déshydrogéné (A.D.P.). [17].

### II.5. Vitesse de propagation :

Une bonne connaissance des phénomènes liés à la propagation des ultrasons est donc une base indispensable à la pratique de ce type de contrôle. Les principes fondamentaux du contrôle non destructif par ultrasons résident dans l'analyse de l'influence des défauts, du type d'hétérogénéités de structure, sur la propagation des ondes vibratoires dans le matériau : réflexion, réfraction et transmission sur les interfaces, atténuation dans la matrice liée aux phénomènes d'absorption et de diffusion, vitesses de propagation variables selon les directions. La vitesse de l'onde dépend de la nature de matériaux que la transporte et de type d'onde :

**- Onde longitudinale :**

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

**- Onde transversale :**

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

**- Onde de surface :**

$$V_S = 0,9 V_T$$

- E : Module d'Young du matériau (N/m<sup>2</sup>).
- ρ : masse spécifique du matériau (Kg/m<sup>3</sup>).
- ν: coefficient de Poisson. [19].



**Tableau(7) : Exemples de vitesses des ultrasons (ondes longitudinales) dans la matière [18].**

<b>Vitesses et impédances acoustiques</b>				
<b>Matériau</b>	<b>Masse volumique (10<sup>3</sup> Kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Vitesse des ondes longitudinales (m/s)</b>	<b>Vitesse des ondes transversales (m/s)</b>	<b>Impédance acoustique (10<sup>6</sup> Kg/m<sup>2</sup> s)</b>
<b>Aciers</b>	7.8	5 900	3 250	46
<b>Fontes</b>	7.2	4 600	2 150	33
<b>Aluminium</b>	2.7	6 300	3 100	17
<b>Cuivre</b>	8.9	4 700	2 250	42
<b>Laiton</b>	8.5	4 500	2 100	38
<b>Béton</b>	2.5	4 500		11
<b>Muscle</b>	1.0	1 600		1.6
<b>Araldite</b>	1.2	2 500	1 050	3
<b>Plexiglas</b>	1.2	2 700	1 100	3.2
<b>Verre</b>	2.6	5 650	3 400	14
<b>Huile</b>	0.8	1 500		1.2
<b>Glycérine</b>	1.3	1 900		2.5
<b>Eau</b>	1.0	1 480		1.5
<b>Mercure</b>	13.6	1 450		20
<b>Quartz</b>	2.7	5 750		15
<b>Titane de baryum</b>	5.7	4 400		35
<b>Air</b>	1.3 10 <sup>-3</sup>	330		4 10 <sup>-4</sup>

## **II.6 Transmission et réflexion des ondes :**

### **II.6.1 Impédance acoustique :**

C’est la propriété qui détermine la transmission des ultrasons à travers la ligne adjacente à deux milieux. Elle correspond à la masse ébranlée par un faisceau ultrasonore de 1 m<sup>2</sup> de section pendant une seconde. Pour un matériau donné elle est égale au produit de la masse spécifique du matériau par la vitesse de l’onde (  $Z= \rho.V$  ) [17].

**II.6.1.1 Réflexion – réfraction :**

**a- Incidence normale :**

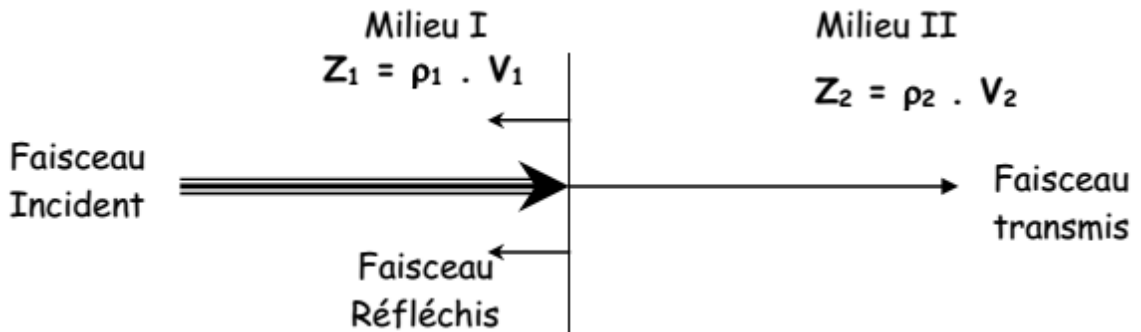


Figure (20) : Incidence normale [19].

- 1<sup>er</sup> cas :  $Z_1 = Z_2$  → transmission totale.
- 2<sup>ème</sup> cas :  $Z_1 \cong Z_2$  → transmission partielle.
- 3<sup>ème</sup> cas :  $Z_1 \gg \gg \gg Z_2$  → réflexion totale.

On note par :

- $A_r$  : l'amplitude de l'onde réfléchie.
- $A_i$  : l'amplitude de l'onde incidente.
- $A_t$  : l'amplitude de l'onde transmise.

Alors on a :

$$\frac{A_t}{A_i} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

et

$$\frac{A_r}{A_i} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2}$$

**b- Incidence oblique :**

Une onde incidente arrive à la surface de séparation de deux milieux sous un angle  $\hat{i}$  autre que l'angle droit, l'onde réfléchie forme un angle  $r$  par rapport à la normale est égal à  $\hat{i}$ . [19].

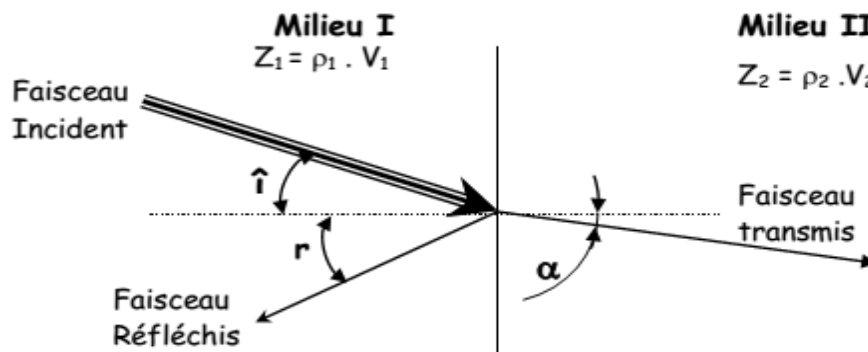


Figure (21) : Incidence oblique [18].

Lorsqu'une onde incidente franchie obliquement une interface séparant les deux milieux elle subit un changement brusque de direction si la vitesse de propagation des ongles est différente dans les deux milieux. L'onde réfractée dans le milieu II, forme un angle  $\alpha$  par rapport à la normale cet angle est appelé angle de réfraction.

La loi de Descartes est :

$$\frac{\sin(i)}{V1} = \frac{\sin(\alpha)}{V2}$$

**c- Double réflexion – double réfraction :**

Lorsqu'une onde plane longitudinale ou transversale rencontre sous incidence oblique une surface de deux milieux I et II, il apparaît les ondes suivantes :

- L1 : une onde longitudinale réfléchie.
- T1 : une onde transversale réfléchie.
- L2 une onde longitudinale réfractée.
- T2 : une onde transversale réfractée.

La relation qui relie ses différentes grandeurs est connue sous la loi de sinus ou la loi de « Snell », on a alors : [19].

$$\frac{\sin(i)}{VL1} = \frac{\sin(\alpha L1)}{VL1} = \frac{\sin(\alpha T1)}{VT1} = \frac{\sin(\alpha L2)}{VL2} = \frac{\sin(\alpha T2)}{VT2}$$

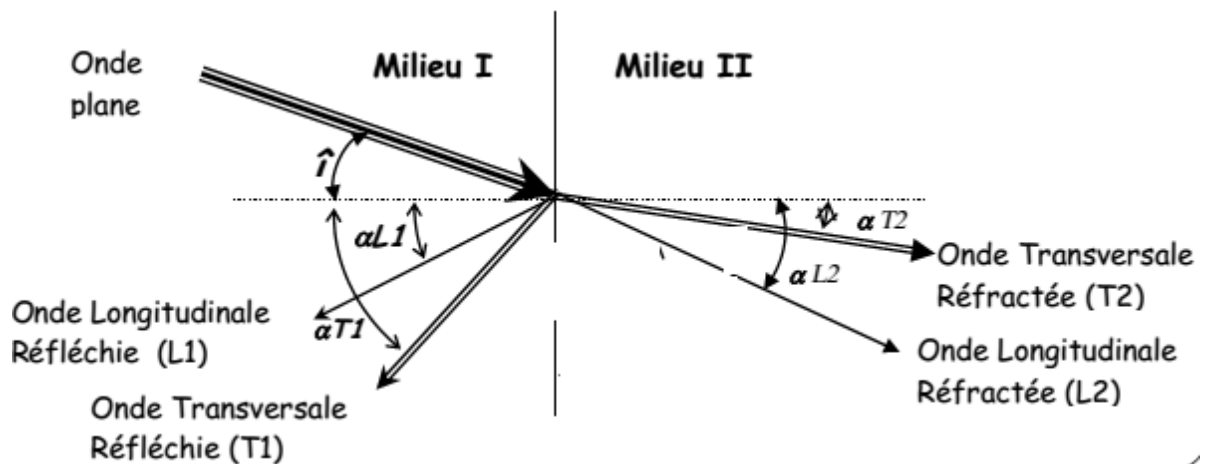


Figure (22) : Double réflexion – double réfraction [19].

### II.7 Principe de contrôle par ultrasons :

Les ultrasons sont des ondes mécaniques qui se propagent dans les milieux élastiques. Lorsque ces ondes rencontrent une interface entre deux milieux de nature différente de celle du milieu de propagation, il y aura réflexion de tout ou partie de l'onde incidente. L'énergie réfléchie est captée en surface par l'élément (traducteur) qui lui a donné naissance. Cette énergie mécanique transformée en signal électrique, engendrera sur un oscilloscope, une déflexion de la trace horizontale.

La position de la déflexion de la trace va permettre de localiser l'interface réfléchissante. [20].

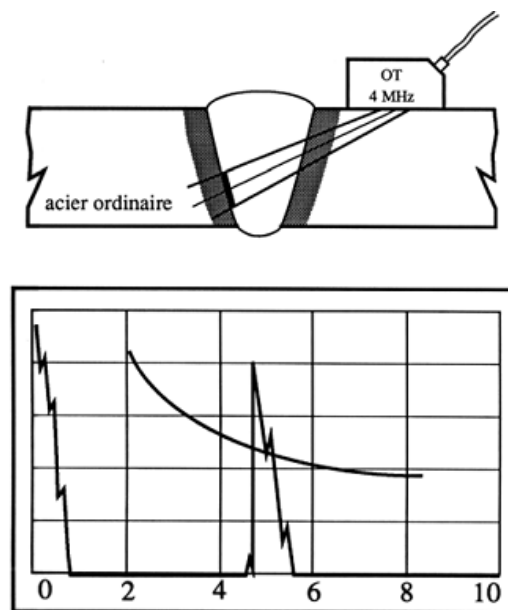


Figure (23) : Principe de l'examen par ultrasons [17].

La vibration mécanique engendrée par l'élément piézo-électrique du traducteur se propage dans la section de la pièce en se réfléchissant sur les faces. Une partie du faisceau acoustique est interceptée par le défaut et renvoyée vers le traducteur qui convertit la vibration en signal électrique.

L'œil observe sur l'écran de visualisation un écho caractéristique apparaissant à une distance donnée sur la base de temps.

Il est alors possible de détecter la présence du défaut, d'évaluer sa position et son étendu. L'amplitude de l'écho reçue dépend de l'étendu et de l'orientation de la surface réfléchissante.

On peut distinguer deux types de méthodes par Ultrasons:

1. Les Ultrasons dit « classiques » permettant de déceler des indications au cœur de la matière en utilisant des transducteurs de type Ondes longitudinales ou à Ondes inclinées.
2. Les mesures d'épaisseurs qui permettent de vérifier l'épaisseur restante d'un matériel (on peut établir une cartographie des zones examinées et étudier son évolution dans le temps). [20].

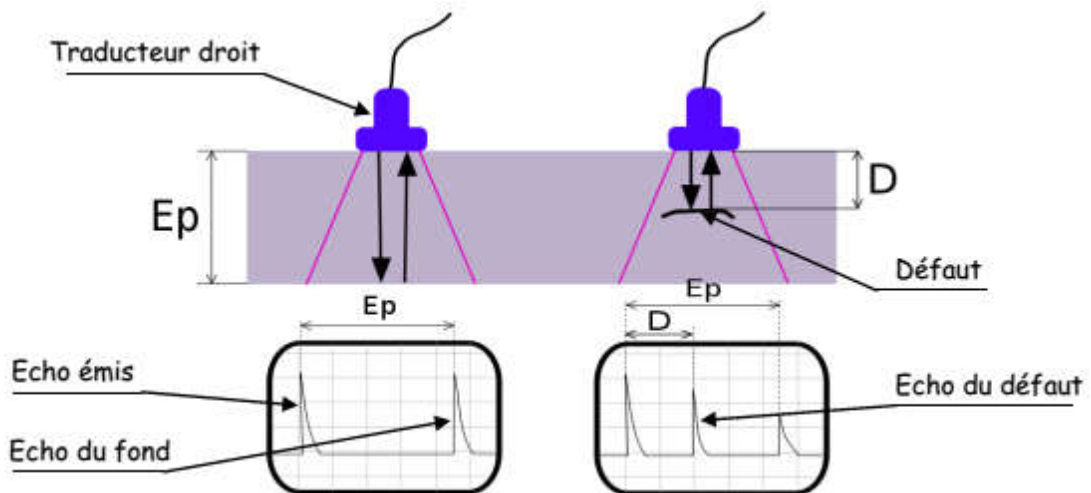


Figure (24) : Principe de contrôle par ultrasons [19].

Les fréquences utilisées pour le contrôle des métaux sont de l'ordre de 1 à 10 MHz.

### II.8. Constitution d'un palpeur ultrasonore :

Un palpeur (Syn. Transducteur) ultrasonore est un dispositif permettant d'émettre et de recevoir des UT.

- La fréquence d'émission dépend de l'épaisseur de l'élément piézoélectrique.
- Tension d'alimentation : 100 à 400 V généralement.
- Dans le but d'avoir une amplitude de vibration maximale, on utilise le phénomène de résonance en prenant une épaisseur égale à la demi-longueur d'onde des OL qui se propagent dans la céramique.
- Le niveau du signal à la réception est faible ( $\sim 10$  mV)  $\rightarrow$  Il faut amplifier le signal. Sur un appareil courant, le gain max est de 100 dB ce qui correspond à une amplification d'un facteur  $10^5$ . [20].

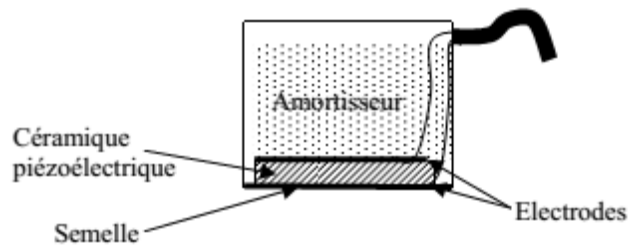


Figure (25) : Constitution d'un palpeur [19].

## II.9. Quelques caractéristiques des ondes UT :

### II.9.1 Champ d'un émetteur UT :

En comparaison du son, les ultrasons sont relativement directifs (voir Figure 26 ci-dessous)

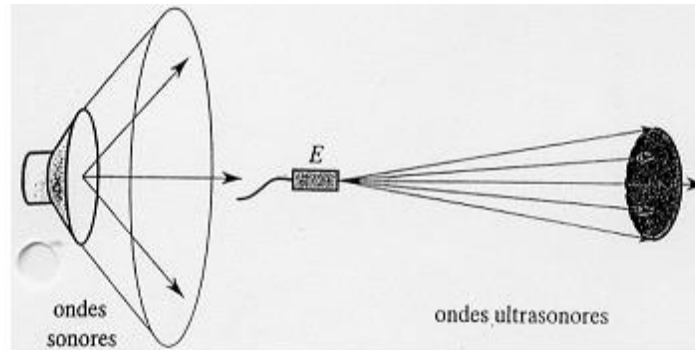


Figure (26) : Directivité des UT [20].

- Pour quantifier la directivité d'un faisceau ultrasonore, on relève un diagramme de rayonnement  $I=f(\theta)$ .

$I$  : intensité ultrasonore. Correspond à une énergie par unité de surface et de temps

$$I = \frac{1}{2} \cdot \rho_0 \cdot c \cdot \omega^2 \cdot X^2$$

$\rho_0$  : masse volumique du milieu de propagation

$c$  : vitesse des UT

$\omega$  : pulsation  $\omega=2\pi f$

$X$  : amplitude du mouvement des particules par rapport à leur position au repos.

Plus concrètement, on dira que l'intensité  $I$  est proportionnelle au carré de l'amplitude du signal électrique reçu au niveau du palpeur (récepteur). [18].

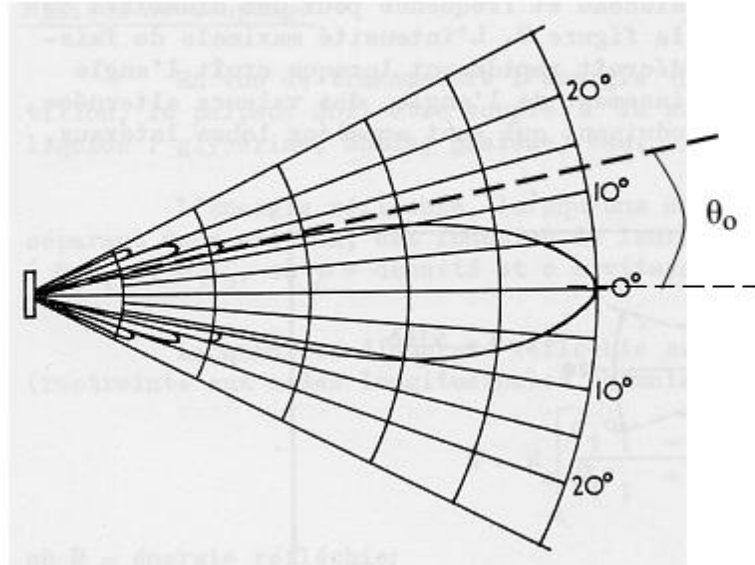


Figure (27) : Diagramme de rayonnement d'un palpeur UT [18].

- $\theta_0$  : angle de divergence.  
= angle de demi-ouverture du lobe principal (les lobes secondaires sont de très faibles intensités : pas détectables en TP).

On montre que :

$$\sin \theta_0 = 1,22 \cdot \frac{\lambda}{D}$$

D : diamètre du palpeur

- Il existe des procédés de focalisation (l'équivalent de lentilles en optique).

### II.9.2. Atténuation d'un faisceau UT :

L'atténuation d'un faisceau UT est lié à 2 phénomènes :

- La divergence du faisceau (voir Figure 27)
- Au matériau traversé. Ce phénomène peut être modélisé par une loi de type Beer-Lambert:

$$I = I_0 \cdot e^{-\alpha \cdot x}$$

x : épaisseur traversée

$\alpha$  : coefficient d'atténuation

Deux causes principales :

- l'absorption de l'onde par le milieu (= pertes thermomécaniques). Cette absorption est proportionnelle à la fréquence.
  - la diffusion de l'onde (= énergie déviée de sa direction) suite aux imperfections du matériau (joints de grains, dendrites,...) [20].
- L'atténuation peut être exprimé en % de  $\frac{I}{I_0}$  ou plus souvent en décibels.

$$1dB = 10 \cdot \log\left(\frac{I}{I_0}\right) = 20 \cdot \log\left(\frac{A}{A_0}\right)$$

A : amplitude

### II.10. Le CND par UT :

#### II.10.1 Principe de fonctionnement de l'appareil à UT :

Principe de base = mesurer le temps écoulé entre l'émission d'une impulsion UT et la réception de celle-ci.

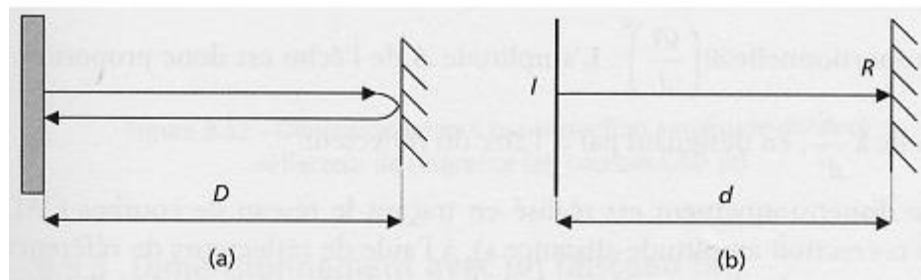


Figure (28) : (a) Temps de vol (b) Temps de parcours [18].

- L'émission des UT (par ex de fréquence 5 MHz) se fait par impulsions (trains d'ondes) envoyées à une certaine fréquence dite de "récurrence" (de 50 à 1000 Hz typiquement) [19].



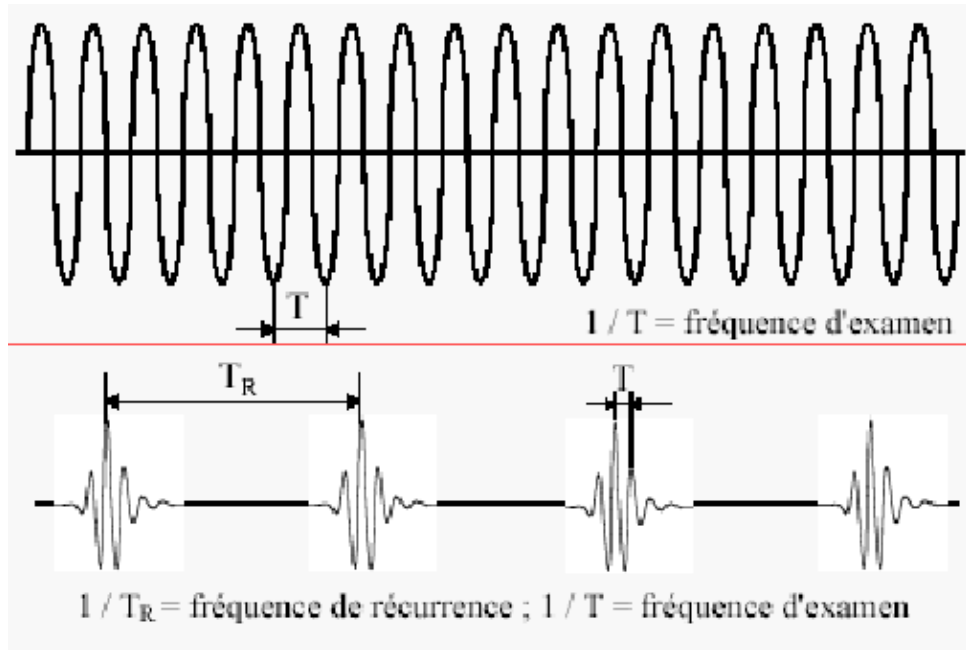


Figure (29) : Fréquence d'examen et fréquence de récurrence [19].

- Tout signal reçu est amplifié et visualisé sur un écran.

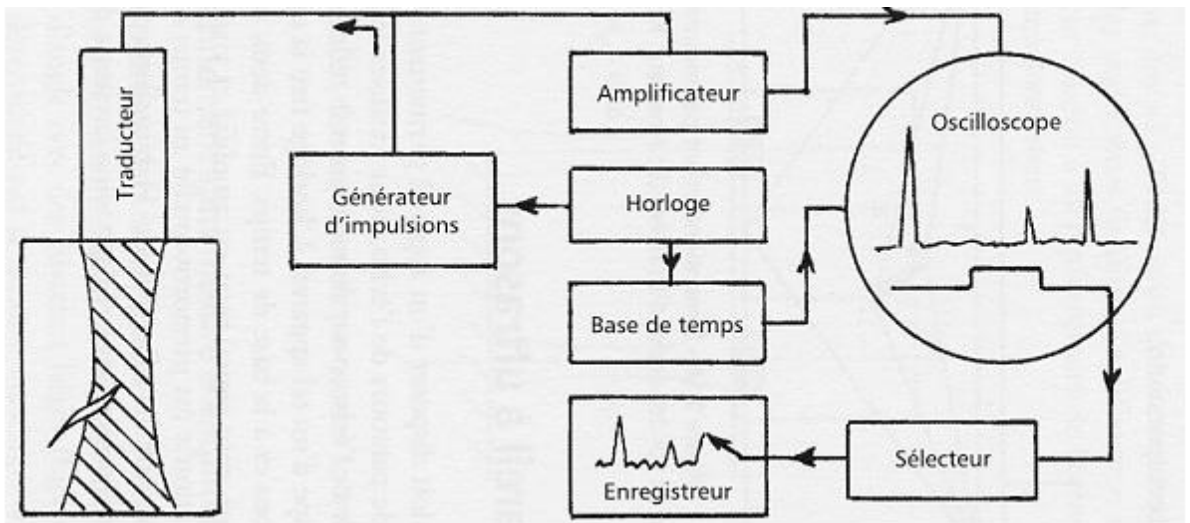
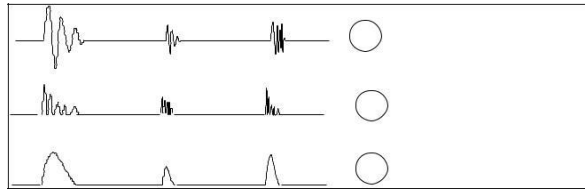


Figure (30) : Principe d'un appareil à UT [19].

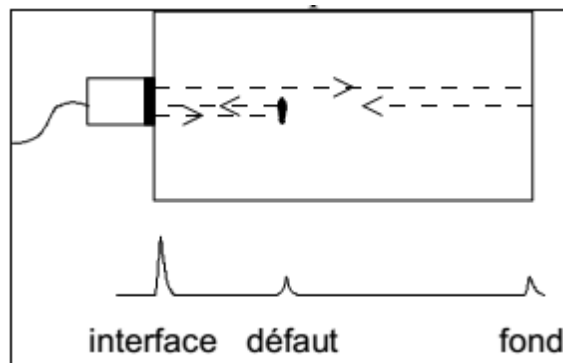
- Pour être exploité plus facilement, les signaux reçus sont redressés puis filtrés.



**Figure (31)** : Dispositif de présentation du signal [19].

### II.10.2. Méthode par écho :

- Méthode de loin la plus utilisée en contrôle UT
- Utilisation d'un transducteur en émetteur/récepteur. [18].



**Figure (32)** : Méthode par écho. [19].

- La position de l'écho du défaut entre le pic d'émission et l'écho de fond est proportionnelle à sa profondeur.
- L'amplitude du pic donne une indication sur la taille du défaut.
- La technique permet aussi de mesurer l'épaisseur d'un objet.

#### II.10.2.1 Notion de "ZONE MORTE" :

Si la surface réfléchissante (le défaut ou le fond) est située trop près de la surface de sondage, l'écho peut se superposer avec l'impulsion initiale. Le palpeur est dit "aveugle". [20].

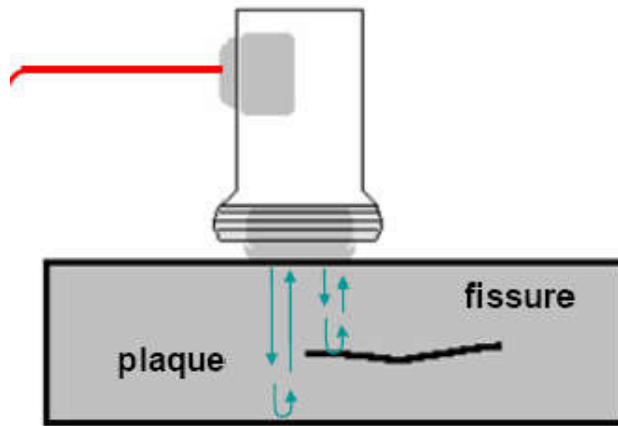


Figure (33) : La zone morte [19].



Figure (34) : Palpeur avec lame de retard [17].

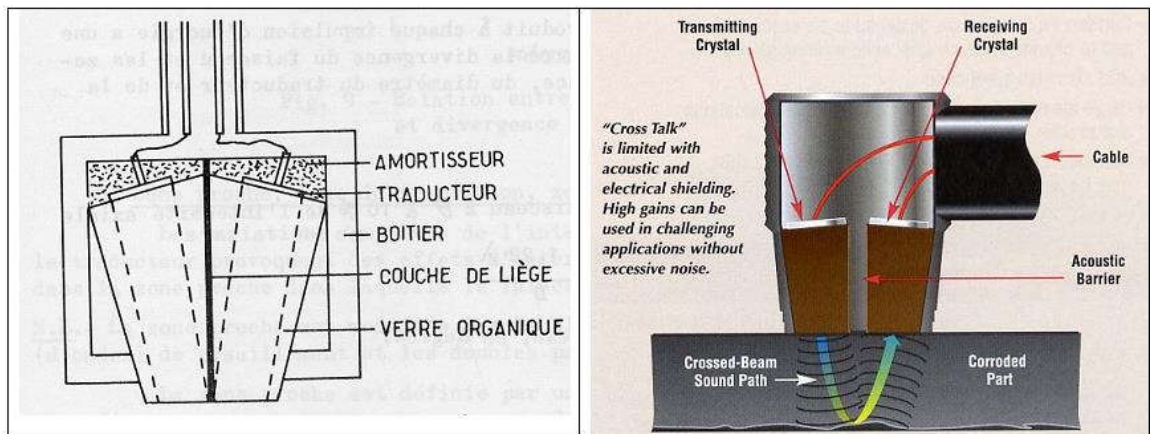


Figure (35) : Palpeur bi-éléments [17].

- Technique par écho avec immersion dans l'eau (voir Figure 36) Le couplage est assuré par l'eau.

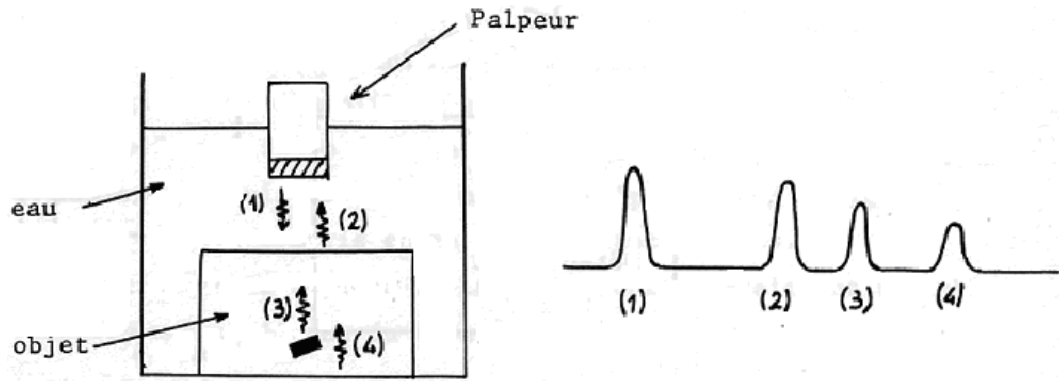


Figure (36) : Technique par immersion. [17].

### II.10.3 Utilisation de palpeurs obliques :

Pour que l'écho revienne sur le palpeur (voir figure 37), il faut que la direction du réflecteur (défaut) soit orthogonale au faisceau et Pour des défauts très désorientés par rapport à la parallèle à la surface, il faut travailler en tir d'angle. [19].

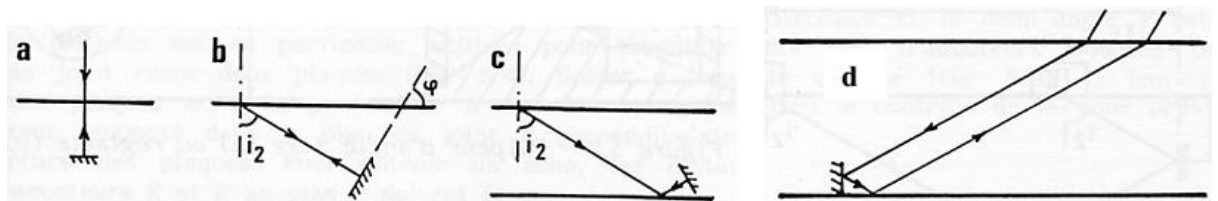


Figure (37) : (a) Tir droit, (b) Tir d'angle, (c) Tir avec rebond, (d) Effet de coin [17].

#### II.10.3.1 Sabot d'angle :

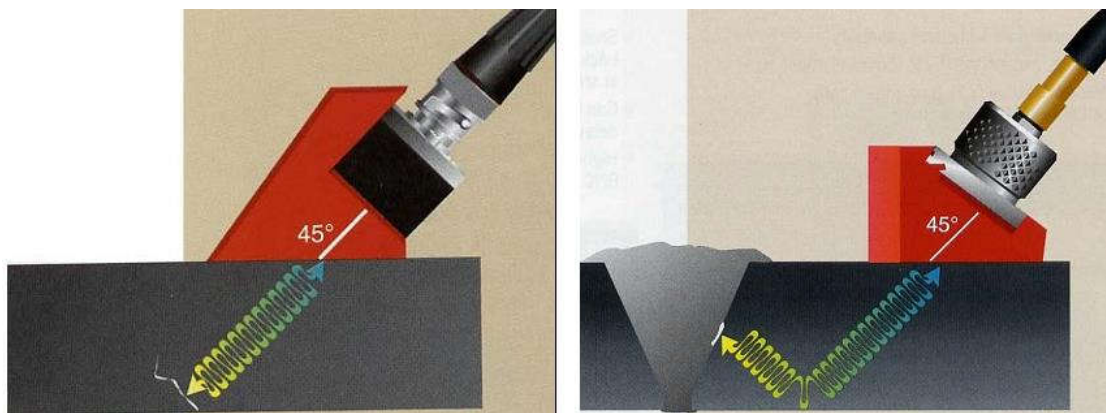


Figure (38) : Utilisation de palpeurs d'angles [17].

- Les sabots sont généralement en matières plastiques (PVC, plexiglas).
- On choisit généralement des angles d'incidences de manière à n'avoir que des O.T. dans le matériau à contrôler. [18].

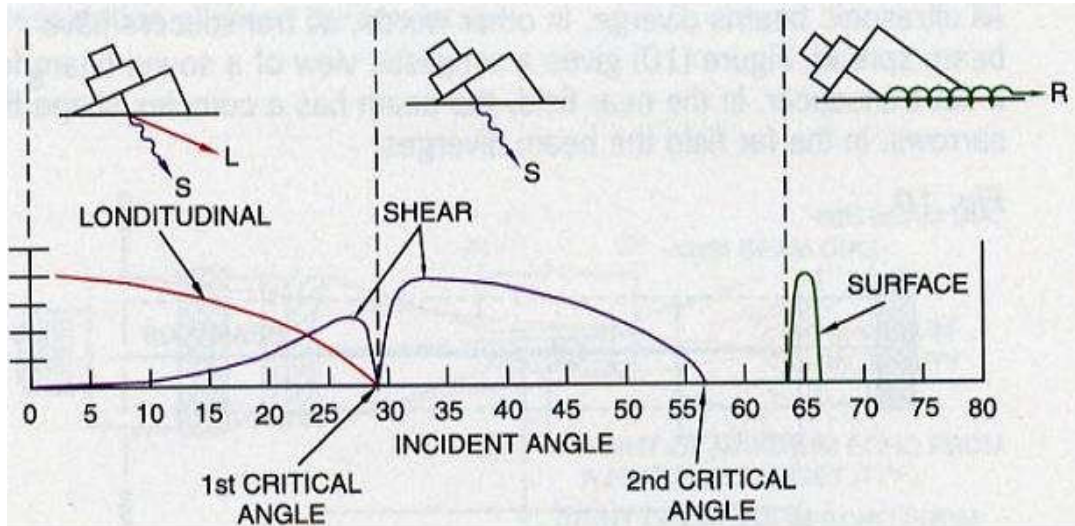


Figure (39) : Evolution des coefficients de transmission en fonction de l'angle d'incidence sur une interface plexiglas/acier [18].

### II.10.3.2 Détection et localisation d'un défaut :

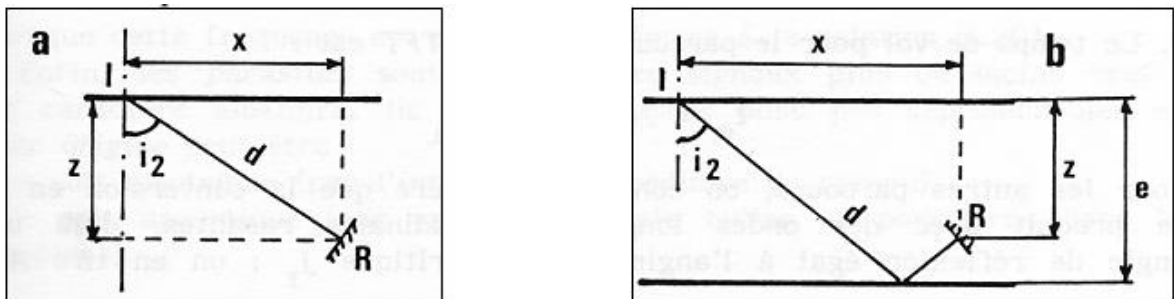


Figure (40) : Localisation d'un réflecteur (schémas explicatifs). [18].

L'appareil UT mesure un temps de vol qui est ensuite traduit une distance  $d$ . A partir de la donnée de l'angle, l'appareil indique alors les coordonnées  $(x,z)$  du réflecteur R. [20].

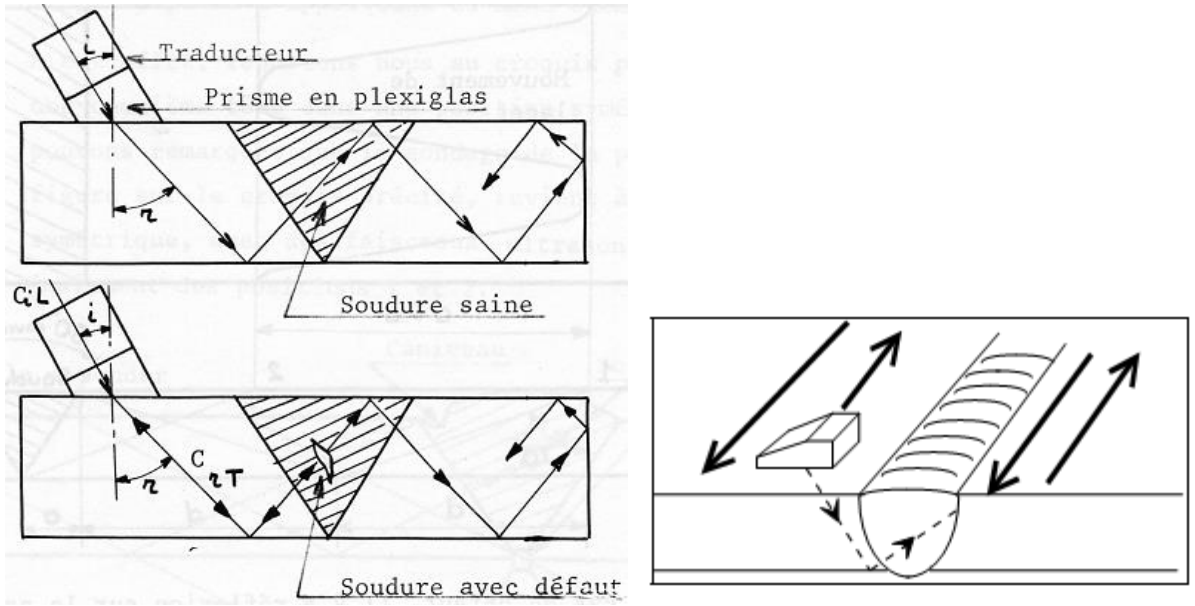


Figure (41) : Contrôle des soudures. [18].

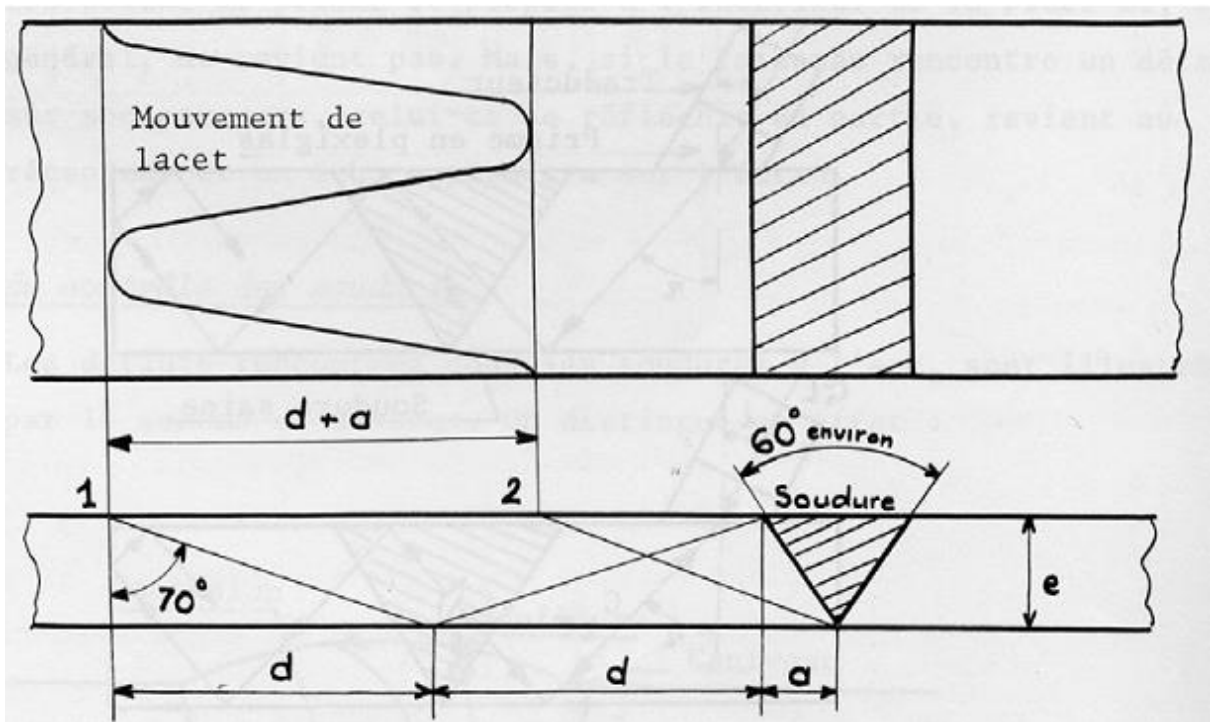


Figure (42) : Zone d'exploration d'une soudure [18].

**II.10.3.3. Méthodes connexes :**

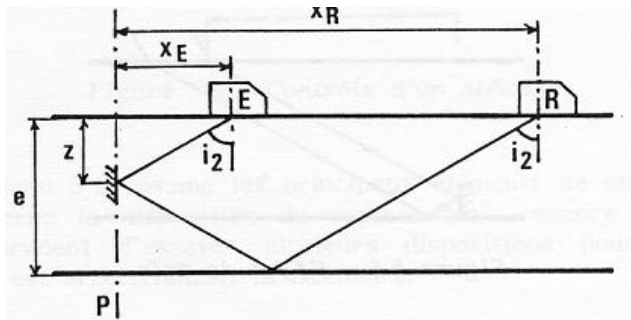


Figure (43) : Méthode tandem

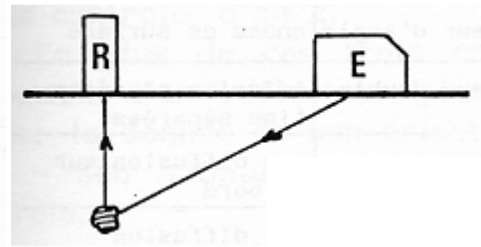


Figure (44) : Méthode par diffraction [18].

**II.10.4. Méthode par transmission :**

On utilise 2 palpeurs droits.

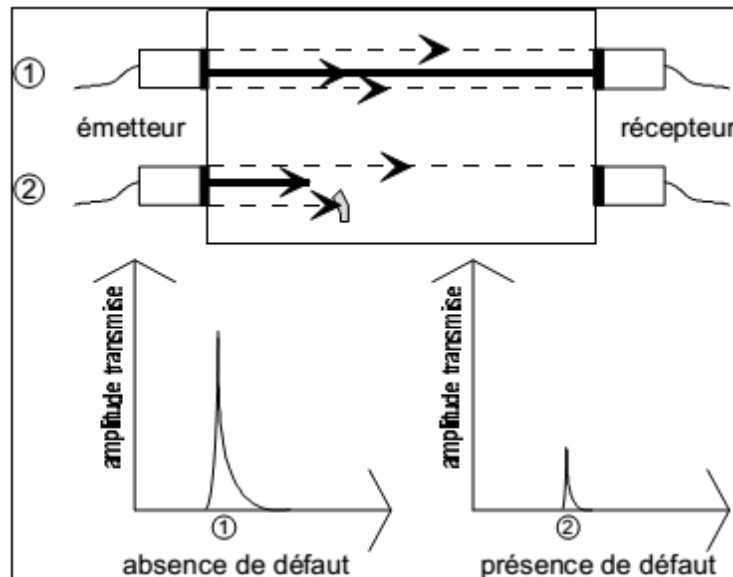


Figure (45): Méthode par transmission. [17].

- Quand le signal intercepte un défaut, une partie de l'énergie est arrêtée → L'énergie parvenant au récepteur diminue.

**II.10.5. Quelques éléments sur les choix des traducteurs :**

**II.10.5.1. Choix de la fréquence :**

Le choix du palpeur est subordonné au contrôle à effectuer. Quelques éléments :











- Défaut fin.
- Repérage de la position exacte.
- Si fortes épaisseurs ou matériaux de structures grossières [17].

**Tableau(8) :** Influence de la fréquence sur la longueur d'onde (en mm) dans différents milieux. [19].

	1 MHz	2 MHz	3 MHz	5 MHz
Air	0,331	0,166	0,110	0,066
Acier	5.85	2,93	1,95	1,16
Aluminium	6,22	3,11	2,07	1,24
Cuivre	4,70	2,35	1,57	0,94
Plexiglas	2,7	1,35	0,90	0,54
Fonte grise	4,60	2.30	1,53	0,92

**II.10.5.2. Choix du type de palpeur et de la méthode :**

**Tableau(9) :** Choix du type de palpeur [19].

OBJET	RÉFLECTEUR	CAPTEUR	MÉTHODE
massif	 parallèle à la surface	1 traducteur droit	ondes longitudinales
	 incliné par rapport à la surface	1 traducteur d'angle	ondes transversales
	non directement accessible	1 traducteur d'angle	par rebond sur une paroi
	 superficiel	1 traducteur d'angle	ondes de surface
	 parallèle et proche de la surface	1 traducteur double Ou Avec une lame de retard	émission et réception séparées
	 incliné et proche de la surface	2 traducteurs d'angle	par diffusion sur le bord
	 globulaire	1 traducteur d'angle + 1 traducteur droit	par diffusion
à faces parallèles	 parallèle à la surface	2 traducteurs droits	par transmission
	 incliné par rapport à la surface	2 traducteurs d'angle	tandem
	 adjacent à une paroi	1 traducteur d'angle	par effet de coin
	 devant un fond	1 traducteur droit	par effet d'ombre
mince	quelconque	1 traducteur d'angle	ondes de plaque
avec un alésage	quelconque	1 traducteur droit + 1 miroir	avec miroir



II.10.6 Notions sur le dimensionnement d'un défaut :

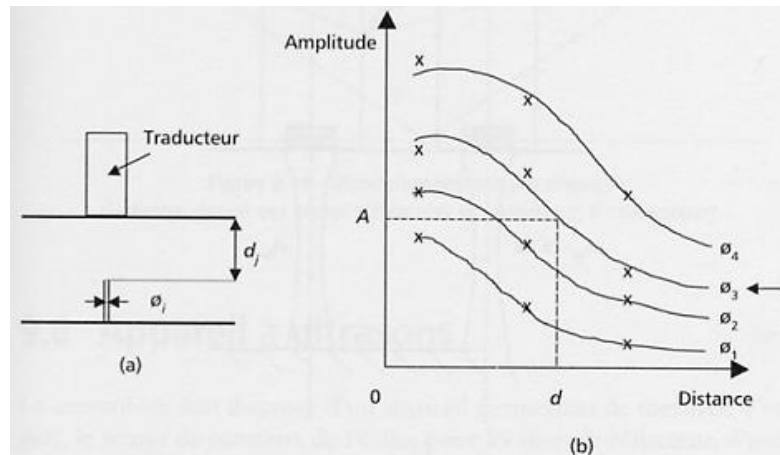


Figure (46) : Dimensionnement par Correction Amplitude-Distance [20].

(a) réflecteur de référence (b) Courbes CAD

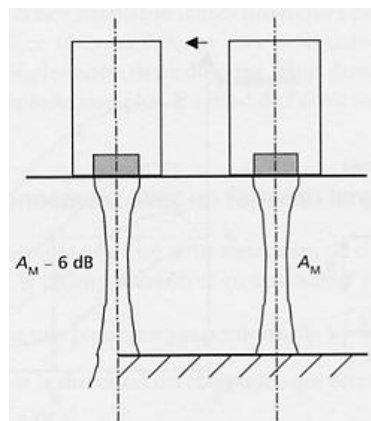


Figure (47) : Dimensionnement par contour à  $-6 \text{ dB}$  [20].

II.11. Conclusions :

Le contrôle par ultrasons demande une bonne expérience de la part des agents chargés de sa mise en œuvre. Il peut être réalisé de façon manuelle ou automatique.

Des progrès importants ont été obtenus grâce à l'introduction de l'informatique et l'électronique qui ont contribué fortement à faire évoluer les matériels et les modalités d'application et de traitement [20].



*Chapitre III*  
*Généralité sur radiographie.*



### III.1. introduction :

L'utilisation de la radiographie comme outil important d'essai non destructif a été bien établie en 1940. De grandes améliorations ont été faites dans les sources et détecteurs de rayonnements qui sont maintenant disponibles pour diverses applications. Ce manuel porte sur les méthodes couramment appliquées et les techniques utilisées quotidiennement dans les domaines de fabrication tels que la construction navale, les récipients sous pression, les pipelines, les ouvrages d'art et les constructions en mer.

On a conçu des appareils pour qu'ils émettent des rayons X, afin de vérifier à partir d'une image radiographique, l'intégrité de structures ou de composants, on appelle cette technique radiographie non destructive ou radiographie industrielle. On utilise trois types de rayonnement ionisant en radiographie industrielle :

1. les rayons gamma émis par des substances radioactives comme l'iridium 192( $^{192}\text{Ir}$ ), le césium 137( $^{137}\text{Cs}$ ) et le cobalt 60( $^{60}\text{Co}$ ), on parle dans ce cas de gammagraphie.
2. les rayons X émis par des tubes à rayons X traditionnels.
3. les neutrons produits dans des réacteurs ou par d'autres moyens (accélérateurs, isotopes radioactifs), on parle dans ce cas de radiographie par neutron ou de neutronographie [21].

### III.2. Le principe de la radiographie :

La radiographie est une méthode d'essai non destructif qui permet d'analyser et de visualiser les défauts internes d'une pièce.

L'intensité du rayonnement incident issu d'un générateur de rayons X ou d'un radioélément artificiel est modifiée lors de son passage à travers un matériau par les discontinuités qu'il renferme; ce phénomène est appelé "**absorption différentielle**" [22].

Un récepteur radiographique placé sous l'objet examiné fixe le rayonnement émergent, ce qui se traduit par une différence de noircissement (densité) sur le film développé par voie chimique. Cette différence de densité fixe le contraste de l'image radiographique. Ce contraste permet à l'interprète de distinguer les zones d'absorption différentes et d'en déduire la présence ou non de défauts. La qualité d'image radiographique est prépondérante pour la détection des défauts.

Remarque :

Pour des applications bien spécifiques, le film peut être avantageusement remplacé par un système convertissant le rayonnement X émergent en une image vidéo; cette technique s'appelle la radioscopie [21].

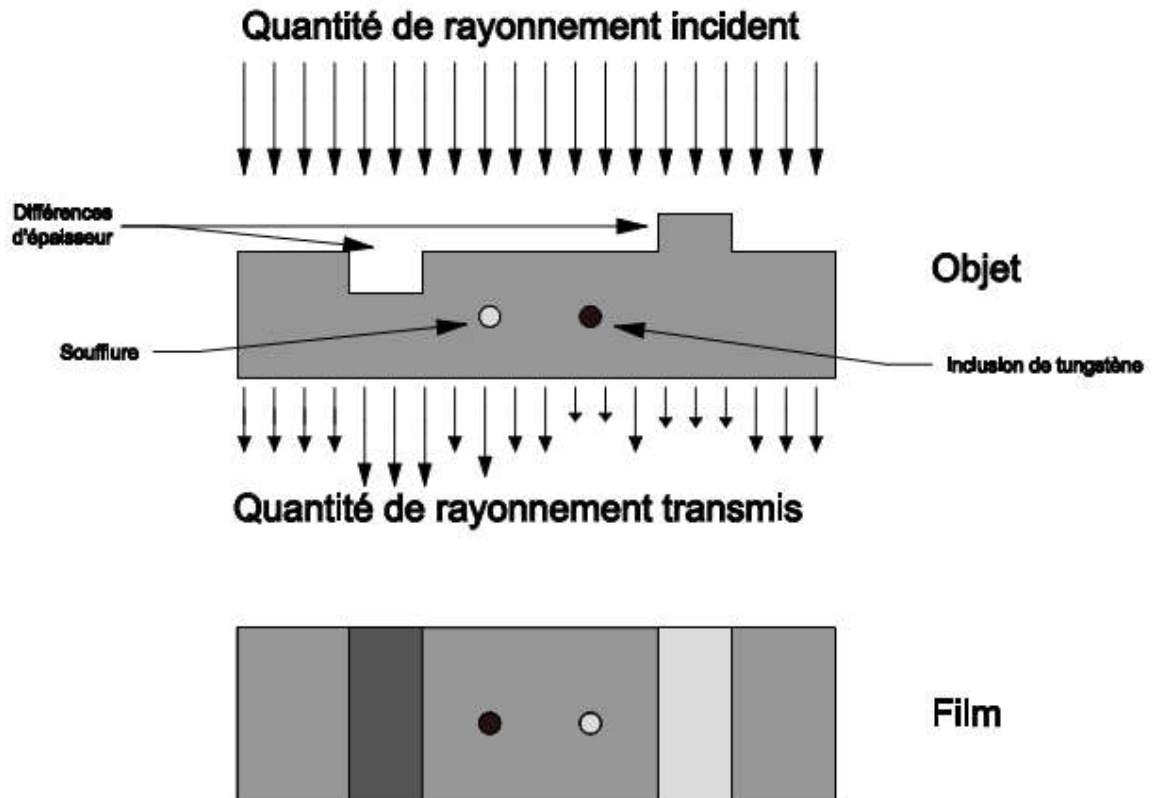


Figure (48) : Principe de la radiographie [21].

Lors de la traversée de la matière, les éventuels défauts contenus dans celle-ci constituent des obstacles qui absorbent plus aux moins le rayonnement. Les différences d'absorption peuvent être soit visualisées sur un écran fluorescent (par exemple : la radiographie utilisée dans le domaine médical), soit enregistrées sur un film spécial (cas de radiographie industrielle). [21].

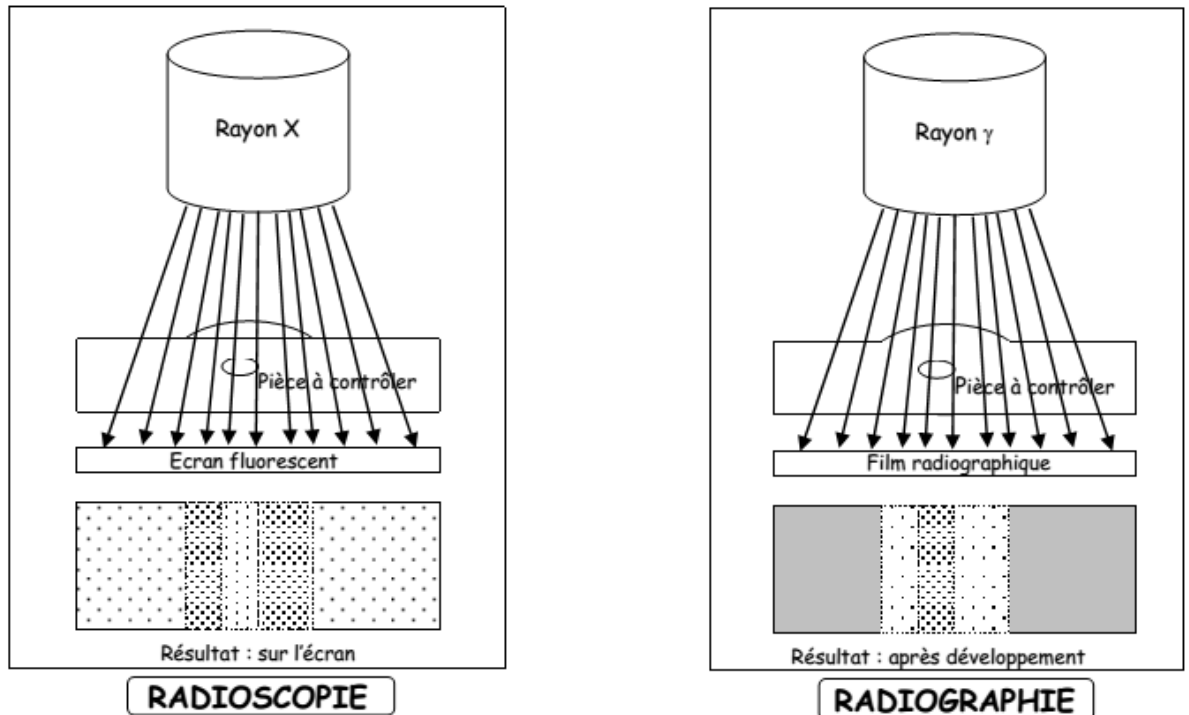


Figure (49): Principe de la radiographie Rayon X et Rayon  $\gamma$  [22].

- La pièce est placée entre la source de radiation et le film.
- Plus le matériau traversé est dense, plus il absorbe le rayonnement.
- L'intensité de gris du film est proportionnelle à l'intensité du rayonnement [22].

### III.3. Lois de propagation des rayonnements ionisants :

Ce mode de contrôle utilise des rayonnements électromagnétiques de faible longueur d'onde (ordre de grandeur de l'angström) pour traverser des matériaux opaques à la lumière[22].

#### III.3.1 Nature et propriétés principales :

Les rayons X ou  $\gamma$  qui sont employés en contrôle ont les propriétés suivantes :

- Ils se propagent en ligne droite à la vitesse de la lumière.
- Ils sont invisibles.
- Ils traversent la matière et sont partiellement absorbés au cours de la transmission.
- Ils peuvent endommager ou détruire les cellules vivantes.
- Ils ionisent les milieux gazeux. [22].

### III.3.2 Phénomène d'absorption :

Lors de la traversée d'un matériau, le rayonnement électromagnétique subit un affaiblissement par :

- Effet photo-électrique.
- Effet Compton.
- Formation de paires d'ions. [22].

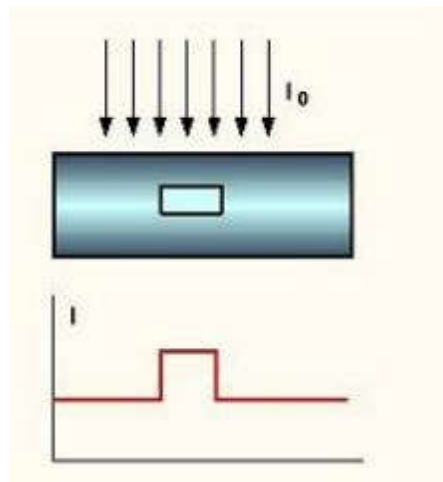


Figure (50): Absorption des rayons ionisants [22].

- ❖ D'une façon schématique, on peut écrire (en rayonnement monochromatique) :

$$I = I_0 e^{-\mu e}$$

avec

$I$  : intensité en sortie.

$I_0$  : intensité incidente.

$\mu$  : coefficient d'absorption.

$e$  : épaisseur du matériau.

- ❖ Le coefficient d'absorption prenant la forme :

$$\mu = k l^3 Z^3$$

avec

$k$  : fonction de la masse volumique du matériau.

$l$  : longueur d'onde du rayonnement.

$Z$  : numéro atomique de l'élément

❖ L'absorption peut aussi s'exprimer par :

- L'épaisseur de demi-absorption :  $I = I_0/2$

- L'épaisseur de déci-transmission :  $I = I_0/10$  (utilisée en radioprotection)

### III.4 Mise en œuvre :

Le contrôle par radiographie nécessite un choix approprié du matériel, de la procédure et des conditions d'examen. En fait, pour obtenir une image nette et contrastée pour révéler les défauts recherchés, on doit suivre certaines étapes:

- Le rayonnement, et donc la source, doit être de puissance suffisante pour pouvoir traverser la pièce sans dégrader le contraste lié au rayonnement diffusé. L'intensité de ce rayonnement, c'est à dire l'activité de la source, sera choisie la plus grande possible pour réduire les durées d'exposition tout en limitant le flou géométrique.
- La prise de vue doit être définie en termes de conditions géométriques, position et orientation relative de la source, de l'objet et du film. L'emploi d'un certain nombre d'accessoires permet d'améliorer les résultats par exemple : diaphragme en plomb, filtres disposés devant ou derrière l'objet, sans oublier les écrans renforceurs qui sont des convertisseurs de rayonnement pour améliorer la sensibilité du film.
- Le choix du film résulte aussi d'un compromis entre rapidité d'impression et résolution, en égard au type de défaut recherché et aux conditions de prise de vue. La détermination du temps de pose se fait en pratique à l'aide d'abaques prenant en compte les paramètres de la source et les conditions de prise de vue. L'exploitation des clichés se fait, après développement, fixage (fixage : procédé d'insensibilisation à la lumière d'une image par élimination des sels d'argent, après développement) et lavage, par un examen du film par transparence sur des boîtes à lumières normalisées, les négatoscopes, conçus pour que la luminance émergente du cliché soit de l'ordre de 100 cd/m<sup>2</sup>, ce qui exige des appareils particuliers pour l'examen des clichés à haute densité optique. La fiabilité de l'examen est liée à l'acuité visuelle de l'observateur, elle-même fonction de sa vue mais aussi des conditions optiques présentes. [21].

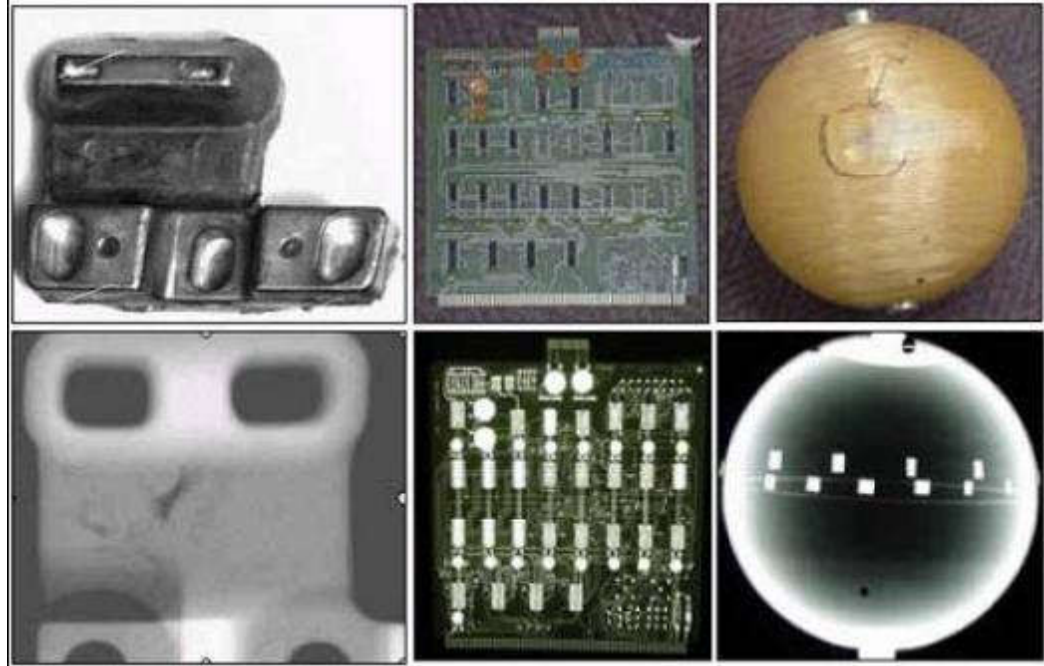


Figure (51): Images radiographiques [22].

Le contrôle de la qualité des radiographies est indispensable pour pouvoir tirer des conclusions sur la qualité de la pièce elle-même, car il permet de savoir si le cliché a été pris dans de bonnes conditions, compatibles avec la sensibilité recherchée pour l'examen.

Plusieurs moyens peuvent être utilisés : outre la référence à un cliché pris sur une pièce identique avec défauts naturels ou artificiels connus, on utilise très couramment la technique des indicateurs de qualité d'image I.Q.I. Il s'agit d'une petite pièce que l'on applique sur le métal côté source, composée de gradins percés de petits trous de diamètres égaux aux épaisseurs réparties en progression géométrique, selon l'I.Q.I normalisé en France. Ces indicateurs fournissent une information globale qualitative sur les résultats obtenus. Notons enfin la nécessité impérative d'effectuer une identification et un repérage des radiogrammes à l'aide de chiffres ou lettres en alliage de plomb disposés sur la pièce en examen. [22].

### III.5. Rayonnements et atténuation :

#### III.5.1. L'atome :

L'atome, système solaire miniature est composé d'un noyau autour duquel gravitent des électrons (noté  $e^-$ ), répartis en couches (ou niveaux d'énergie) successives K, L, M... Le



nombre d'électrons maximal par couche répond à la relation  $2n^2$ ,  $n$  étant le numéro d'ordre de la couche. [21].

K : 2 électrons maxi

L : 8 électrons maxi

M : 18 électrons maxi

Le noyau contient un ensemble de charges électriques positives, équilibrées par autant de charges négatives dont sont porteurs les électrons.

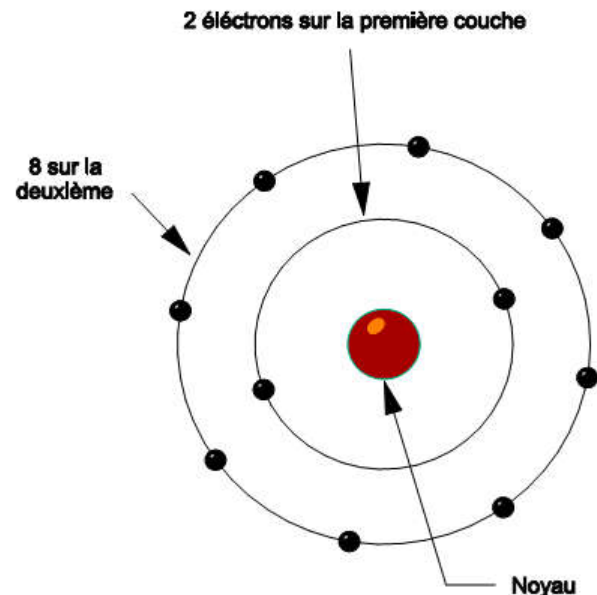


Figure (52): L'atome [21].

Sur l'orbite qui lui est propre, un électron donné est lié au noyau par une énergie dite **énergie de liaison**. Elle prend une valeur négative, le signe négatif exprimant la liaison. Il semble évident que l'électron le plus proche du noyau sera également le plus fortement lié. Pour que l'électron quitte son orbite, il faudra donc lui communiquer une énergie extérieure naturellement supérieure à l'énergie de liaison. [21].

Les composants du noyau portent le nom de **nucléons**. Il y a deux types de nucléons : les protons et les neutrons. La cohésion du noyau est assurée par la force forte ou force nucléaire. Le vecteur de cette interaction est une particule virtuelle appelée Méson  $\pi$ . L'atome étant électriquement neutre, comporte autant de protons (charge électrique positive) que d'électrons (charge électrique négative). [22].

Dans le cas où cet équilibre n'existe plus, l'atome s'appellera ion. Ioniser un atome consiste soit à lui retirer un électron, auquel cas, on se trouve en présence d'un ion positif (cation); soit à lui rajouter un électron, auquel cas, l'ion est négatif (anion). [23].

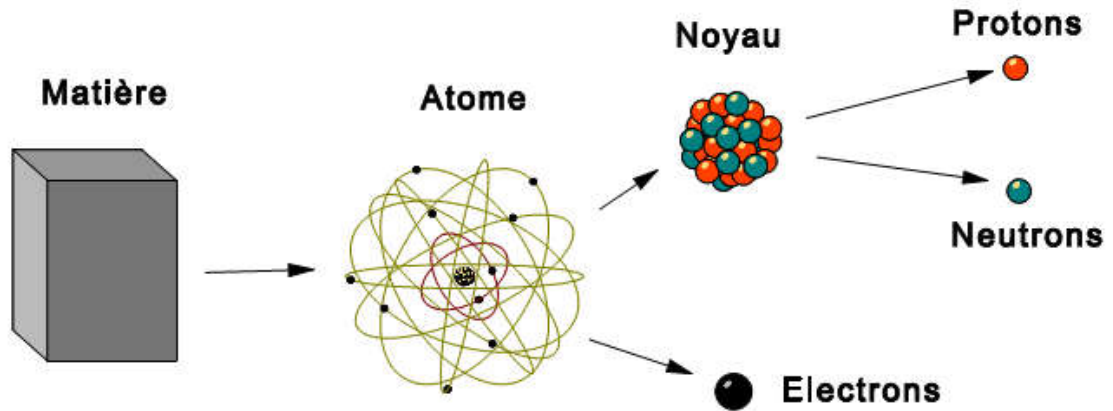


Figure (53): Composition de la matière [21].

### III.5.2 Les rayonnements électromagnétiques :

Les rayonnements électromagnétiques se distinguent entre eux par leur origine et leur énergie. Parmi eux, nous pouvons citer :

- les ondes hertziennes ou ondes radio.
- la lumière blanche composée de 7 couleurs : violet, indigo, bleu, vert, jaune, orange, rouge.
- les ultraviolets, les infrarouges.
- les rayons X et Gamma. [22].

#### III.5.2.1 Aspect ondulatoire de la lumière :

Une onde électromagnétique est composée d'un champ électrique associé à un champ magnétique en régime sinusoïdale se déplaçant en même temps et à la même vitesse. Elle se propage dans le vide à la célérité  $c = 3.10^8$  m/s.

L'aspect ondulatoire de la lumière se manifeste le plus clairement dans l'expérience de Young. Young divise, au moyen de deux fentes microscopiques, un faisceau lumineux issu d'une source ponctuelle. [23].

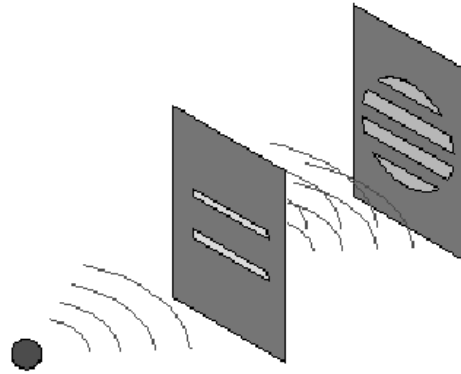


Figure (54): Expérience de Young [21].

L'éclairement sur l'écran d'observation passe par des minima et des maxima. Ces franges d'interférence s'interprètent facilement si l'on considère que la lumière est une onde :

- Opposition de phase  $\Rightarrow$  Annulation des ondes, donc pas d'éclairement.
- En phase  $\Rightarrow$  Superposition des ondes donc éclaircissement.

On peut représenter cette onde en fonction du temps ou de la distance [21].

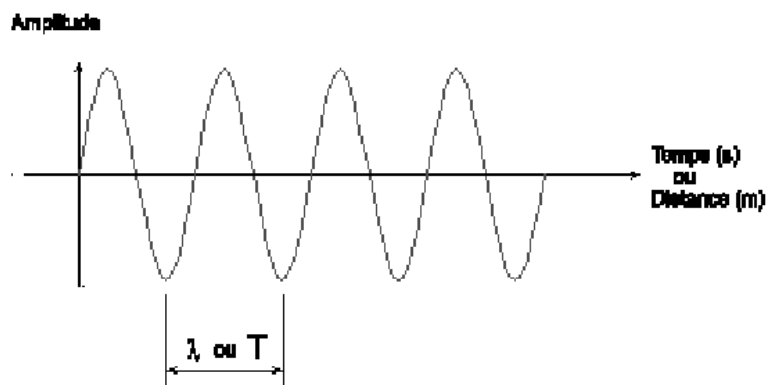


Figure (55): Amplitude de l'onde en fonction du temps [21].

L'onde est caractérisée par la longueur d'onde  $\lambda$  : distance séparant deux points en un même état.

On appelle  $T$  la période : temps mis par une particule pour parcourir une longueur d'onde à la célérité  $c$ . [22].

d'où

$$c = \frac{\lambda}{T} \quad \text{or la fréquence} \quad \nu = \frac{1}{T}$$

ainsi la fréquence est reliée à la longueur d'onde par :

$$v = \frac{c}{\lambda}$$

### III.6. Méthode de contrôle :

Le contrôle détecte la différence d'absorption provoquée par la présence du défaut par rapport au reste de la pièce. Cette différence peut être mise en évidence par : l'impression de films photographiques, l'utilisation d'écrans fluorescents et caméras de télévision, l'utilisation de détecteurs de rayonnements. [22].

Pour chaque contrôle, il existe un cahier des charges ou une norme (NF EN 444, NF EN 462-1...). [21].

Le tableau suivant donne quelques indications sur les apparences radiographiques de quelques défauts de soudure. [24].

**Tableau(10) :** Les Défaut et leur Apparence radiographique. [24].

Défaut	Apparence radiographique
Soufflures sphériques	Taches sombres à contours circulaires.
Soufflures vermiculaires	Taches sombres à contours allongés.
Inclusions de laitier	Taches sombres à contours irréguliers.
Cavités allongées	Lignes sombres plus ou moins interrompues et parallèles aux bords de la soudure.
Mauvaise reprise	Tache sombre isolée au niveau de la reprise.
Manque de fusion	Mince ligne sombre avec des bords nettement définis.
Manque de pénétration	Ligne sombre, continue ou intermittente au milieu de la soudure.
Fissures longitudinales Fissures longitudinales	Fines lignes sombres, rectiligne ou non.
Caniveau	Ligne sombre, large et diffuse le long du bord de la soudure.

### III.7. Structure du film radiographique :

Le film radiographique comporte deux couches qui confèrent au film une sensibilité accrue et permettent d'obtenir des images plus contrastées.

Il existe aussi des films monocouches offrant une netteté optimale en évitant le flou de surimpression, Ce type de film est particulièrement intéressant lorsqu'on a besoin de faire de très grands agrandissements. [21].

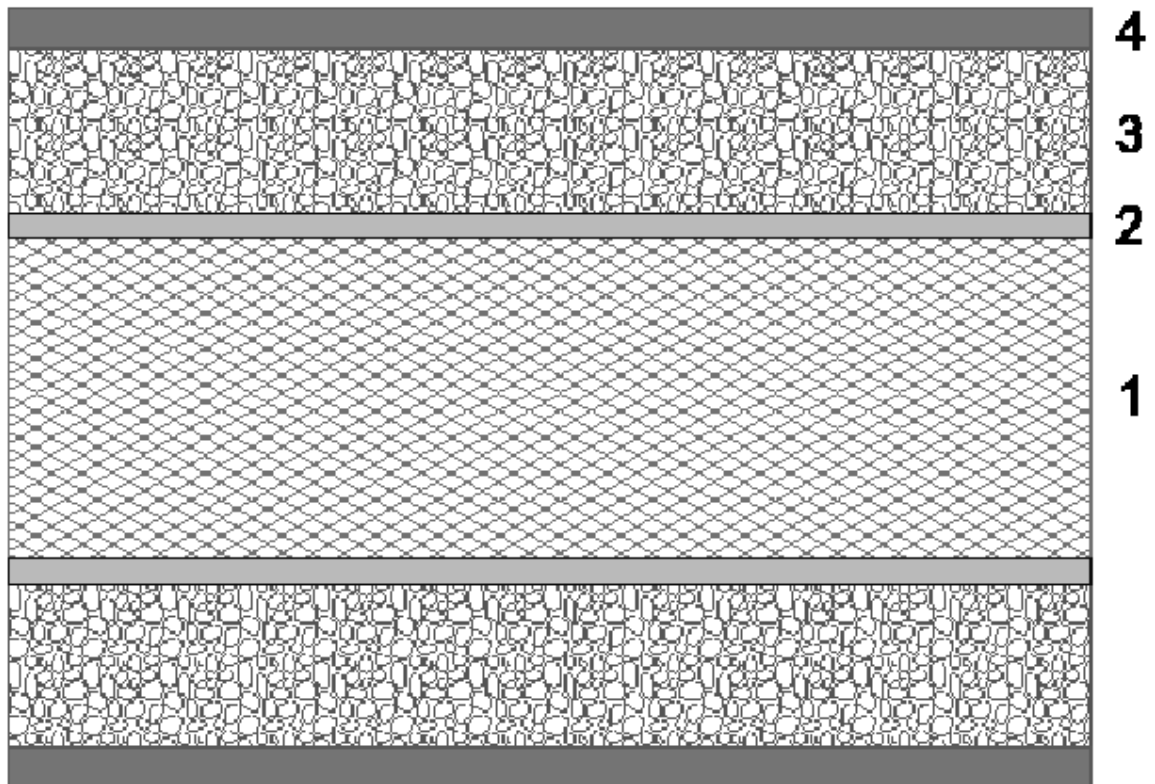


Figure (56): Structure du film radiographique [21].

- 1- Support plastique souple et transparent (polyester et tri acétate de cellulose)
- 2- Substratum : couche très mince assurant l'adhérence de l'émulsion au support
- 3- Emulsion : constituée d'une infinité de grains d'halogénure d'argent
- 4- Gélatine : matière durcissant qui protège l'émulsion. [21].

#### III.7.1 Qualité du contrôle :

Pour apprécier la qualité de l'image radiographique, il faut la traduire sous forme numérique.

Pour cela, on utilise des indicateurs de qualité d'image (IQI). Ils sont placés au contact de la pièce face à la source de rayonnement. L'image de l'IQI sur le film traduira la qualité de l'image.

Les principaux IQI utilisés sont les suivants :

- Indicateurs à fils (utilisé dans la plupart des pays européens).
- Indicateurs à gradins percés (utilisé surtout en France).
- Indicateurs à plaquettes percées (utilisé aux USA). [23].

Chaque IQI est constitué de 7 fils de numéros consécutifs, à savoir W1 à W7, W6 à W12, W10 à W16, W13 à W19, disposés parallèlement dans une enveloppe protectrice. La longueur des fils peut varier : 10 mm, 25 mm ou 50 mm. [21].

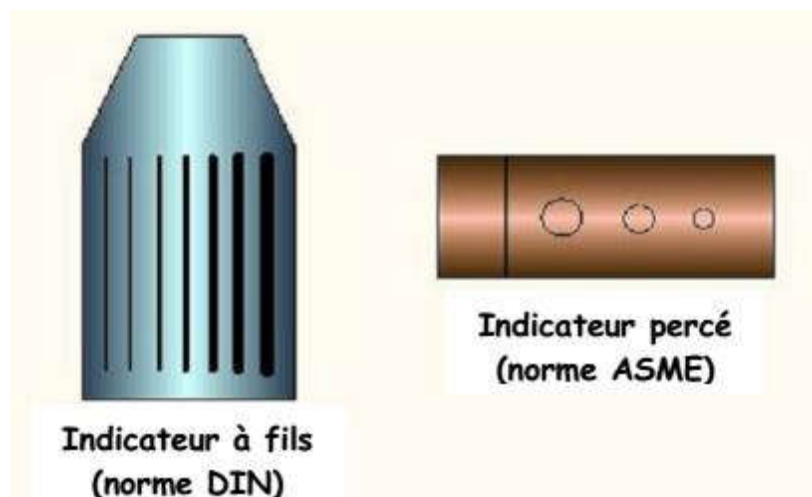


Figure (57): Indicateurs de qualité d'image [22].

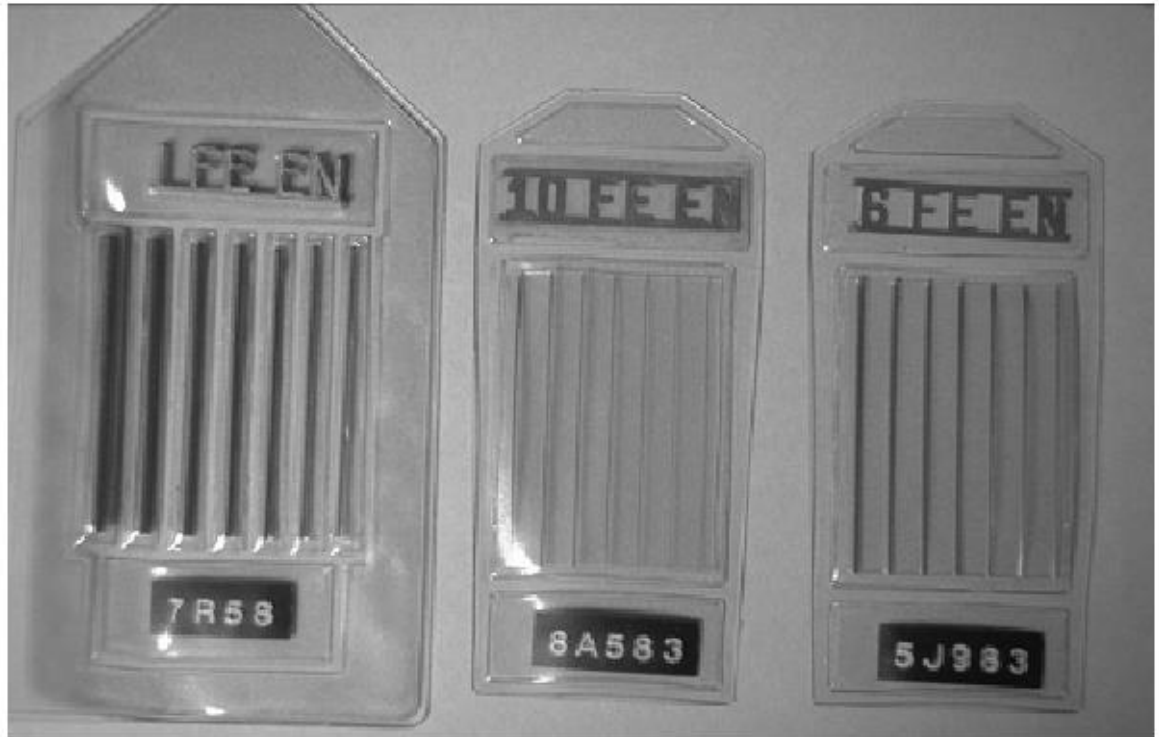


Figure (58): Indicateurs de qualité d'image à fils NF EN 462.1 [21].

### III.8. Procédure de contrôle :

La mise au point d'un contrôle par rayons X réclame le choix :

- De la tension anodique.
- Du courant cathodique.
- De la distance du film au foyer.
- Du type du film et éventuellement des écrans renforçateurs.
- Du temps de pose.

La détermination du temps de pose valable pour :

- Un matériau donné.
- Un domaine de tension.
- Une distance du film au foyer.
- Un type du film et d'écran renforçateur [23].

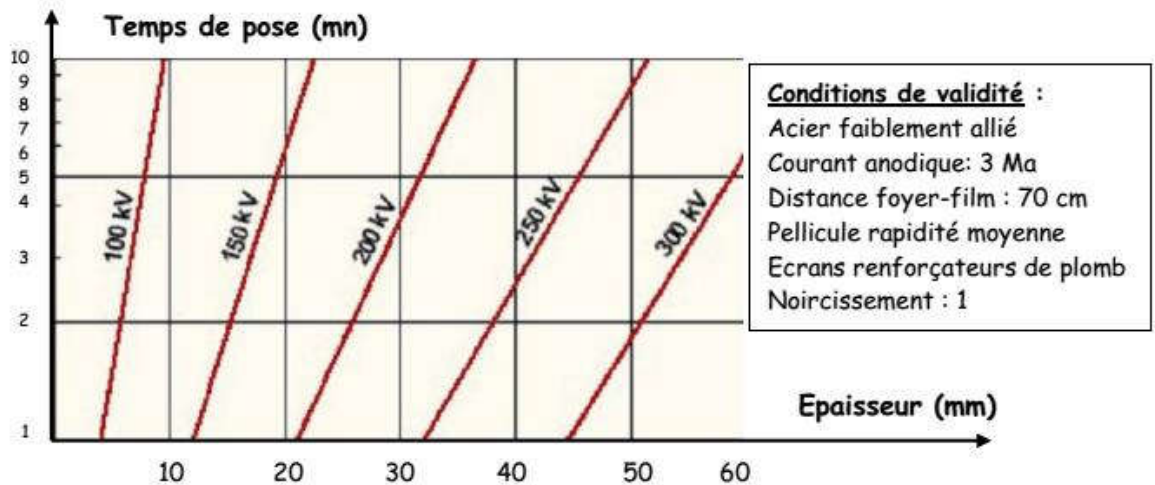


Figure (59): Détermination du temps de pose [23].

### III.9. Champ d'application :

Recherche d'anomalies internes :

- **Pièces moulées** : retassures, criques, restes de noyaux...
- **Soudures** : fissures, manques de fusion, manque de pénétration, soufflures, inclusions, défauts de formes.
- **Tuyauterie** : corrosions ou érosions internes, dépôts internes, défauts de soudure.
- **Parois en béton armé** : cavité, fissures, armatures ( $\emptyset$ , position).
- Position du clapet dans une vanne.
- Contrôle de jeux dans un assemblage emboîté.
- Vérification d'un assemblage monté en aveugle. [34]

### III.10. Avantages et Inconvénients de RT :

- **Avantages :**

- Détection des défauts de surface ou volumique dans tous les matériaux.
- Energies X disponibles.
- Possibilité de radiographier des formes complexes et des épaisseurs d'acier variant de quelques micromètres à 600 mm.
- Dimensionnement et identification possible des défauts.
- Sensibilité de détection des défauts très élevée pour certaines techniques.
- Sensibilité de détection de l'ordre de quelques  $\mu\text{m}$  avec grossissement.



- Examen possible en temps réel (radioscopie).
- Pas de zone morte sous la surface.
- Conservation possible des radiogrammes plusieurs dizaines d'années.
- Transportabilité (générateurs de rayons X de faibles énergies, appareils de radiographie gamma portatifs d'environ 20 Kg).

### - Inconvénients :

- La sensibilité de détection des défauts dépend des dimensions de la source et de son énergie, de la position et de l'orientation des défauts dans la pièce, de l'épaisseur de la pièce, de la sensibilité du film...
- Difficulté de localiser les défauts en profondeur.
- Coûts de fonctionnement élevés (sources de rayonnement, entretien du matériel, films radiographiques, contrôles obligatoires, radioprotection...).
- L'interprétation des radiogrammes est souvent délicate et nécessite une formation des opérateurs de niveau élevé ainsi qu'une grande expérience.

### - Inconvénients en Hygiène et Sécurité :

- Les rayonnements utilisés sont dangereux et peuvent provoquer des maladies professionnelles graves.
- Les opérateurs sont classés travailleurs de catégorie A et portent un dosimètre individuel.
- La réglementation est souvent très contraignante (transport et stockage des sources radioactives, déclarations, autorisations, travail des femmes...). [34]

### III.10. Conclusion :

la radiographie réside dans l'obtention d'une image bien définie de l'uniformité de matière d'une pièce. La détection des indications contrastées est facile et une distinction des différents types d'indications est possible. Par rapport aux méthodes ultrasonores, elle est relativement tolérante aux états de surface et à la structure interne du matériau. Elle est applicable à tous les types de matériaux (aluminium, acier, alliages cuivreux, titane, composites,..). Les limites de la méthode sont liées aux coûts des installations et des consommables ainsi qu'aux dangers des rayonnements ionisants imposant une réglementation et des consignes strictes.



***Chapitre IV***  
***Analyse et Comparaison entre***  
***la méthode RT et UT***



### IV.1. Introduction :

Notre travail dans ce chapitre consiste à donner une vision générale sur le lieu où se fait notre étude, le projet qui est réalisé par l'entreprise ou notre analyse se fait sur le produit de fabrication (tube soudé en spirale), cette fabrication est soumise à la norme de API 5L, Le projet que nous avons étudié et analysé c'est R-GG1 qui est réalisé le 19 septembre 2017 au 31 décembre 2017

Essentiellement, ce chapitre donne un résultat de comparaison entre les deux méthodes UT et RT dans l'entreprise ALFAPIPE

Notre analyse se fait sur deux catégories des tubes, les tubes réparés et les tubes RàS et on a choisie l'échantillon stratifié aléatoire dans cette étude,

Et pour tenter de voir à quel point ces deux méthodes sont efficaces Est-il possible de s'en passer ou non?

### IV.2. Présentation de sociétés ALFA PIPE :

Implantée à la zone industrielle de Bounoura à Ghardaïa, à 10 km du chef-lieu de wilaya, l'usine occupe une superficie de 230 000 m<sup>2</sup> et son effectif s'élève en moyenne à 500 employés. En production depuis 1977, ALFAPIPE Tuberie de Ghardaïa adopte la politique du changement dans la continuité. Sa spécialité est la fabrication de tubes en acier soudés en spirale (de diamètre 20 à 64 pouces, d'épaisseur 7,92 à 15 mm et d'une longueur de 7 à 13 m).

#### IV.2.1. Les avantages et caractérisations du tube :

- La construction de pipeline (gazoducs et oléoducs).
- Les grands transferts d'eau entre les barrages et les agglomérations.
- La construction métallique.
- le tube résiste le haut pression(le pétrole, le gaz, l'eau et tous autres liquides).

#### IV.2.2. Spécifications techniques du tube en spirale :

Tube Gaz et Pétrole selon norme API 5L Gamme de fabrication :



**Figure 61** :-2-A-Machine coupe le début de la bobine bobine



**Figure 61** :-2-B- machine dressage de la bobine

## Chapitre IV – Analyse et comparaison entre la méthode UT et RT

**Tableaux n°(11) : Spécifications techniques du tube gaz et pétrole en spirale selon norme API 5L**

Diamètre extérieur	Epaisseur	Longueur unitaire
20'' à 64''	7,92 à 14,30 mm	8 à 12,5 m

**Tableaux n°(11) : Spécifications techniques du tube gaz et pétrole en spirale selon norme API 5L**

Grade de l'acier	Limite élastique E 0,2 MPA	Résistance à la rupture MPA
X42 M	290	415
X46 M	320	435
X52 M	360	460
X56 M	390	490
X60 M	415	520
X70 M	485	570

**Tableaux n°(12) : Spécifications techniques du tube hydraulique en spirale selon API 5L**

Grade de l'acier	Tube hydraulique	Tube de construction
A partir du grade B Jusqu'à X70 M PSL 1 et PSL 2	Réemploi pour les usages dans le secteur de l'eau avec un profil d'utilisation : <ul style="list-style-type: none"> <li>- Résistance à des pressions jusqu'à 45 bars et plus sur commande.</li> <li>- Protection intérieure et extérieure anticorrosion de qualité.</li> <li>- Longue durée de vie.</li> </ul>	Réemploi pour les activités du BTP (poteaux, pieux battus pour fondation).

### IV.2.3. Domaine d'application :

#### ➤ Entendue de la spécification :

La présente spécification définit les exigences techniques concernant la fabrication, le contrôle (destructif et non destructif) et la fourniture des tubes en acier, destinées à la construction des ouvrages de transport d'hydrocarbures en service non corrosif. L'usine fabriquant les tubes devra bénéficier des certifications API Q1 et API, iso. Les tubes sont fabriqués selon norme API 5L 44<sup>ème</sup> édition et Spécification technique du client. Le règlement algérien de sécurité pour les canalisations de transport d'hydrocarbures.

#### ➤ les normes de confiance :

En dehors des dérogations ou des exigences particulières de la présente spécification et/ou de la commande, tous les tubes seront rigoureusement conformes aux :

- **API:** American Petroleum Institute Standards.
- **API 5L:** Specification for line Pipe, 44<sup>ème</sup> édition.
- **API Q1:** Specification for quality programs.
- **ASME:** American Society for Mechanical Engineers.
- **SNT-TC-1A :** Pratiques Recommandées pour la Qualification et la Certification du Personnel du Contrôle Non Destructif.
- **ASME Partie C:** Spécification Pour Baguettes d'Apport, Electrodes Métaux d'Apport.
- **ASNT:** American Society for Non-Destructive Testing.

### IV.2.4. Procède de fabrication et métal:

On prend comme exemple les procédés de fabrication des tubes utilisés dans le projet GAZODUC GK3 48" (HASSI R'MEL/SKIKDA/EL KALA)

#### IV.2.4.1 Procédé de fabrication :

##### ▪ Tube SAWH soudé à l'arc sous flux solide :

On ne fournira dans le cadre de la présentation que des tubes répondant à la définition du tube SAWH soudé à l'arc sous flux solide, connu également sous le nom de tube soudé en S.A.W Expansion à froid :

L'expansion à froid pour la fabrication des tubes en S.S.A.W soudé en spirale n'est pas acceptée.

Pour l'expansion à froid dans le cas de la fabrication des tubes en L.S.A.W

### IV.2.4.2. Métal :

Ne seront admis dans le cadre de la présente spécification que :

Les aciers élaborés au convertisseur basique à oxygène, Tout autre procédé doit être agréé par l'acheteur On élaborera un acier totalement calmé non effervescent au carbone, à grain fin et à basse teneur en hydrogène. En cas de recours à la coulée continue, n'utilisera des techniques permettant de minimiser la ségrégation centrale.

Le métal doit devra présenter une bonne texture cristalline et doit être net, sain et exempt de toute crique, feuilletage, soufflure, ou inclusion d'éléments étrangers. Le métal répond à la norme.

- **Métal de base :**

Les tubes soudés en S.A.W spiral seront obtenus à partir de feuillards enroulés à froid. La largeur des feuillards sera comprise entre 0.9 et 2.0fois le diamètre de 20'' au 64'' extérieur du tube.



**Figure 62** : processus dressage de la bobine.

**IV.3. les données du projet et choix d'échantillon :**

Chaque projet réalisé par l'entreprise a des données prédéterminé par le client ce données sont principalement caractérisés par :

**Nom du projet : R-GG1**

**Réalisation :** 19 septembre 2017 - 31 décembre 2017

**Linéaire commandés :** 20.000 km.

**Épaisseurs :** 20.60 mm

**Diamètre :**  $\phi = 1066.80$  mm ( 42" )

**Grade de l'acier :** X70 M PSL 2

**Fournisseur :** ARCELOR

**Nombre bobine engagées :** 408 Bobine **et Tonnage net :** 12289.45

**Nombre de tube fabrique :**

**Tableaux n°(13) :** Nombre de tube fabriquée sur le projet R-GG1

<b>Chuter</b>	<b>Réparé</b>	<b>R à S</b>	<b>dtp</b>	<b>Rebut</b>	<b>Totale</b>
<b>600</b>	<b>702</b>	<b>310</b>	<b>55</b>	<b>9</b>	<b>1897</b>

En déduit le nombre effectif des tubes fournit au client sont :

Tubes =600+702+310 = 1612



### Choix d'échantillon :

Notre analyse se fait sur deux catégories des tubes, les tubes réparés et les tubes RAS

Alors en déduit le nombre de tubes a analysés

$$\text{Tubes} = 702 + 310 = \mathbf{1012 \text{ Tube}}$$

$$\mathbf{\text{Tubes Réparée} = 702 \text{ Tube} = 69\%}$$

$$\mathbf{\text{Tubes RàS} = 310 \text{ Tube} = 31\%}$$

Puisque notre échantillon est de type stratifié aléatoire on prend **10%** des tubes c est a dire à l'équation suivant :

$$n = N * 0.1 = 1012 * 0.1 = 101.2 \approx 102$$

alors en déduit :

$$x1 = \frac{nN_1}{N}$$

A.N :

$$x1 = \frac{101 * 702}{1012}$$

$x1 = 70$  nombre des tube Réparé soumis a analysés

$x2 = 31$  nombre des tubes RàS soumis a analysés

### IV -4. Procédé de contrôle par UT :

#### IV -4.1 définition du procédé UT utilisé :

La procédé de contrôle par UT utilisé dans projet est définit comme suite :

##### IV.4.1.1 Appareil de contrôle :

Une machine nommée « Krautkramer » cette machine est désigné pour l'inspection ultrasonique automatisée de la soudure et de la zone affectée par la chaleur (HAZ) sur les tubes soudé à l'arc submergé en spirale (HSAW) répondant aux besoins d'API, de DNV et d'autres canalisations de transport de pétrole et de gaz standard, Krautkramer sont construits avec la technologie Phased Array de GE, ou en option avec des méthodes ultrasoniques

## Chapitre IV – Analyse et comparaison entre la méthode UT et RT

conventionnelles pour évaluer la qualité de la soudure pour le contrôle du procédé avant l'hydro testage, ainsi que pour le test de qualité final.

### IV.4.1.2 Procédé de travail :

Les défauts présents dans les soudures doivent être détectés le plus tôt possible, c'est-à-dire en cours de fabrication. Pour le contrôle des soudures et du métal de base, est fixé sur un montant élévateur avec console et décalage transversal ou sur un portique. Les mouvements verticaux sont assurés par des vérins pneumatiques et les mouvements horizontaux par des moteurs électriques, les supports de traducteurs à mouvement pendulaire sont fixés sur des barres de guidage.

Pour l'essai de réception de tubes soudés en spirale sous flux solide dans l'atelier de finition ne diffèrent pas de ceux pour le contrôle en cours de fabrication. Cependant, un contrôle des extrémités des tubes est également réalisé dans ce cas.

Les palpeurs est synchronisé avec un système de marquage par jet de peinture permet de localiser rapidement les défauts détectés.

### Paramètres Ultrason de Tube de Référence (TUBE TEST) :

Tableaux n°( 14 ) : Paramètres Ultrason de Tube de Référence (TUBE TEST).

DEFAUT	PALPEUR	GAIN (dB)	PORTES	ECRAN	f de répétition (1/s)
TROU	6+4	70	20/50%	80%	2500
N in M	3+5	65	20/50%	80%	2500
N in G	3+5	65	20/50%	100%	2500
N in D	3+5	65	20/50%	100%	2500
N ex M	5+4	P4(70) P5(65)	20/50%	100%	2500
N ex G	5	65	20/50%	100%	2500
N ex D	5	65	20/50%	100%	2500
T ex	7/8(E/R)	70	20/50%	80%	2500
T in	9/10(E/R)	70	20/50%	80%	2500

### Paramètres physique de palpeurs :

Tableaux n°(15) : Paramètres physique de palpeurs.

PALPEUR	FREQUANCE	ANGEL	CHAMPS PROCHE	ONDE	DIMENSION
3	4 Mhz	70°	30 mm	OT	24 mm
4	4 Mhz	70°	30 mm	OT	24 mm
5	4 Mhz	70°	30 mm	OT	24 mm
6	4 Mhz	70°	30 mm	OT	24 mm
7/8	4 Mhz	70°	30 mm	OT	24 mm
9/10	4 Mhz	70°	30 mm	OT	24 mm

### IV.4.1.3 Résultats des testes de Ultrason :

En note que lors de la détection des défauts par la machine ultrason elle indique l'emplacement de défaut sur le tube a laide d'un krachage de peinture l'endroit ou se trouve les défauts sans définit la taille et nature des défauts.

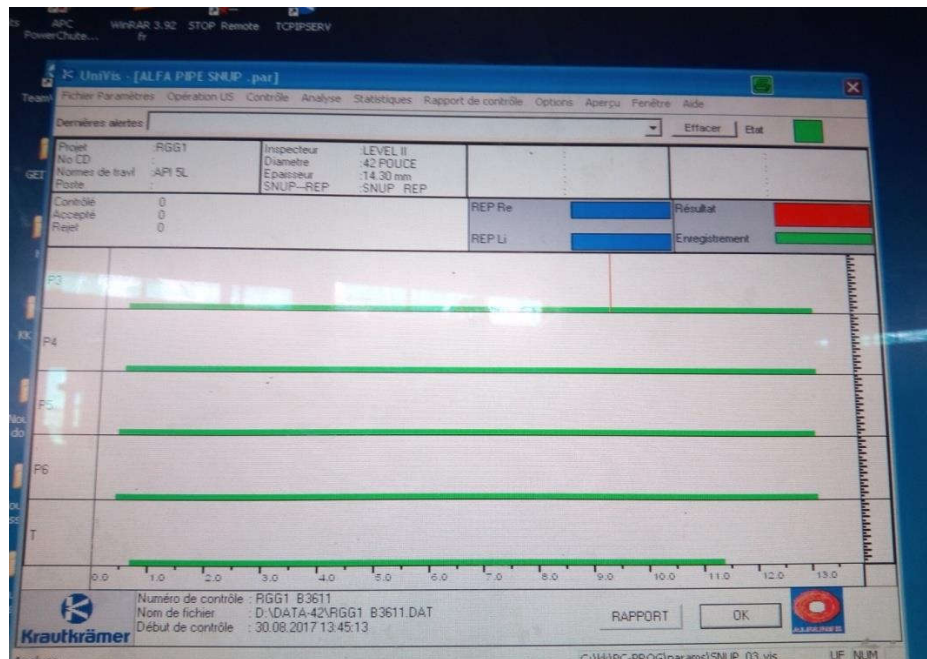


Figure 63 :teste par UT d'un tube

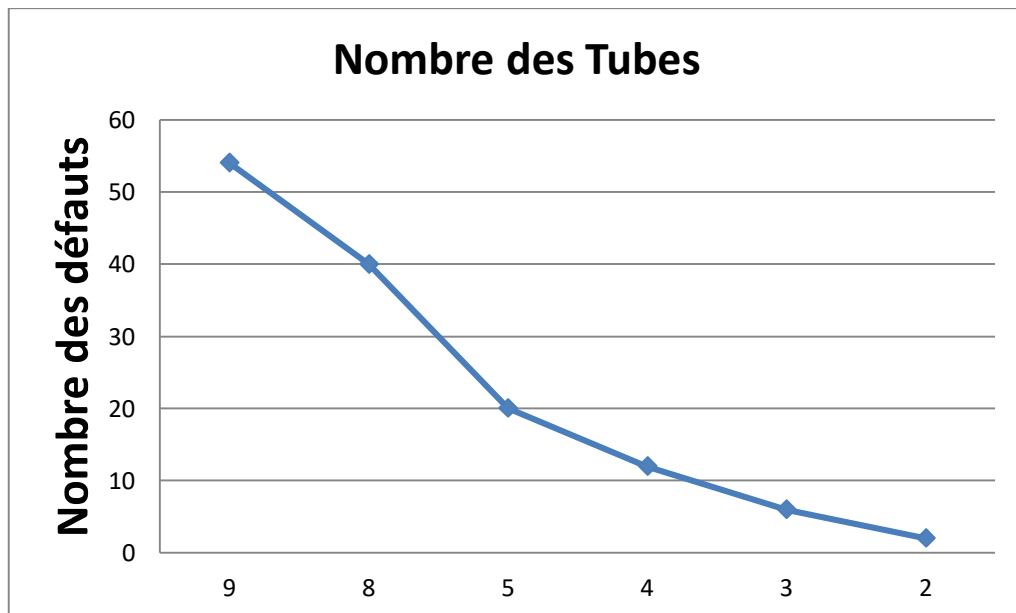
## Chapitre IV – Analyse et comparaison entre la méthode UT et RT

Les tableaux suivant représentent le classement des tubes en fonction de nombre des défauts détecter sur tube :

**Tube RàS :**

**Tableaux n°(16) :** répartition des tubes RàS en fonction de nombre des défauts sur tube.

Nombre de tube/nombre des défauts	Nombre de tube (%)	Nombre de détection des défauts / tube	Somme des défauts
9	29.03%	6	54
8	25.8%	5	40
5	16.12%	4	20
4	12.9%	3	12
3	9.67%	2	6
2	6.45%	1	2
Totale = 31	100%	/	134

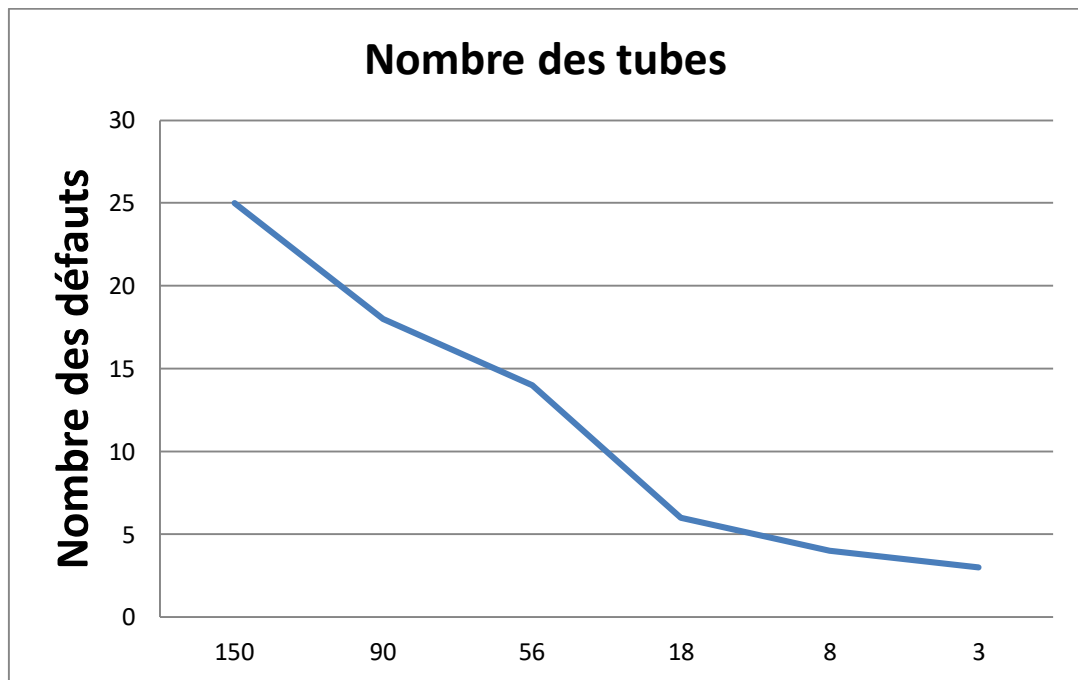


**Figure 64 :** diagramme représente la répartition des tubes RàS en fonction de nombre des défauts sur tubes

**Tubes Réparée :**

**Tableaux n°(17) :** répartition des tubes réparée en fonction de nombre des défauts sur tube.

Nombre de tube/ nombre des défauts	Nombre de tube (%)	Nombre de détection des défauts / tube	Somme des défauts
25	35.71%	6	150
18	25.71%	5	90
14	20%	4	56
6	8.57%	3	18
4	5.71%	2	8
3	4.28%	1	3
Totale = 70	100%	/	325



**Figure 65 :** diagramme représente la répartition des tubes Réparée en fonction de nombre des défauts sur tube

### IV -5. Procédé de contrôle par RT:

#### IV -5.1 définition du procédé RT utilisé :

La procédé de contrôle par RT utilisé dans projet est définit comme suite :

##### IV. 5.1.1 Appareil de contrôle :

Un générateur de rayons x constitué d'un générateur haut tension qui alimente un tube à rayons X. La haute tension accélère les électrons émis par la cathode du tube à rayons X et quand ceux-ci percutent la cible côté anodique, il se produit une émission de rayons X par rayonnement de freinage.

##### IV. 5.1.2 Procédé de travail :

Après avoir contrôler le tube par UT , chaque détection de défaut sur tube par exigence suivi d'un contrôle RT pour vérifier la nature de défaut en suite jugé si il est tolérer par apport au exigence recommander selon la norme appliquer, on note que les caractéristiques des paramètres de radiographier sont déterminés en fonction l'épaisseur du tube et distance source films ,les paramètres sont déterminés comme suite :

Tempe d'exposition : 54 secondes

Distance soure film : 556 mm

##### IV.5.1.3 Films utilisés :

« D7 ROLLPAC Pb » Film à grain fin, avec contraste et sensibilité élevé. Conçu pour une exposition directe ou avec des écrans de plomb. Pour une exposition avec des écrans de plomb, à l'aide de rayons X ou gamma.

- étanche à la lumière, à l'épreuve de l'humidité et étanche à la graisse.
- le film est intercalé entre 2 écrans de plomb de 0,027 mm.
- spécialement conçu pour une application sur des objets sphériques ou tubulaires.

Le développement des films se fait a laide dune machin automatique pour une durée de **4 minute** pour chaque films .

### IV.5.1.4 Nomenclature des défauts :

Les défauts le plus reconnue dans la procéder de fabrication des tube souder sont :

Tableaux n°( 18 ) : désignation de défaut.

Défauts	Désignation de défaut
<b>E</b>	<b>Interception de soudure extérieure</b>
<b>Y</b>	<b>Interception de soudure intérieure</b>
<b>EY</b>	<b>Interception de soudure extérieure et intérieure</b>
<b>Prc</b>	<b>Poches de retassures en chaine</b>
<b>SCVE</b>	<b>Soudure concave</b>
<b>SD</b>	<b>Soudure désaxée</b>
<b>F</b>	<b>caniveau</b>
<b>Ba</b>	<b>Inclusion de laitier</b>
<b>Aa</b>	<b>Inclusion de gaz</b>
<b>Ea</b>	<b>Fissure longitudinal</b>
<b>Eb</b>	<b>Fissure transversal</b>
<b>DL</b>	<b>Manque de liaison</b>
<b>AN</b>	<b>Nid de soufflure</b>

**IV.5.1.5 Résultats des testes de Radiographie :**

- Chaque film prise par radiographie contient les information suivante :
- Numéro de tube
- Nom de projet
- Désignation de défaut
- IQI



**Figure 66 :** représente un film prise par radiographie

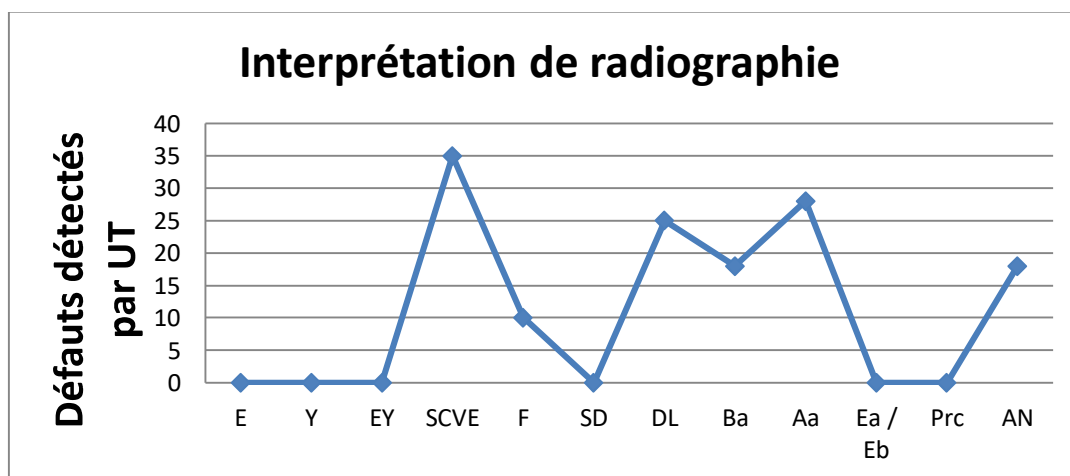


**Tubes RàS :**

Classification des défauts détectés par UT selon l'interprétation radiographique:

**Tableaux n°(19) :** Classification des défauts détectés par UT (Tubes RàS) selon l'interprétation radiographique.

Défauts détectés par UT	Interprétation de radiographie
0	E
0	Y
0	EY
00	SCVE
25	F
64	SD
15	DL
18	Ba
02	Aa
00	Ea / Eb
07	Prc
03	AN
Totale=134	



**Figure 67 :** diagramme représente le nombre des défauts détectés par UT (Tubes RàS) en fonction l'interprétation radiographique.

### Tubes Réparée :

**Tableaux n°(20) :** Classification des défauts détectés par UT (Tubes Réparée) selon l'interprétation radiographique.

<b>Défauts détectés par UT</b>	<b>Interprétation de radiographie</b>
80	E
80	Y
60	EY
49	SCVE
06	F
13	SD
18	DL
00	Ba
00	Aa
00	Ea / Eb
19	Prc
00	AN
Totale=325	

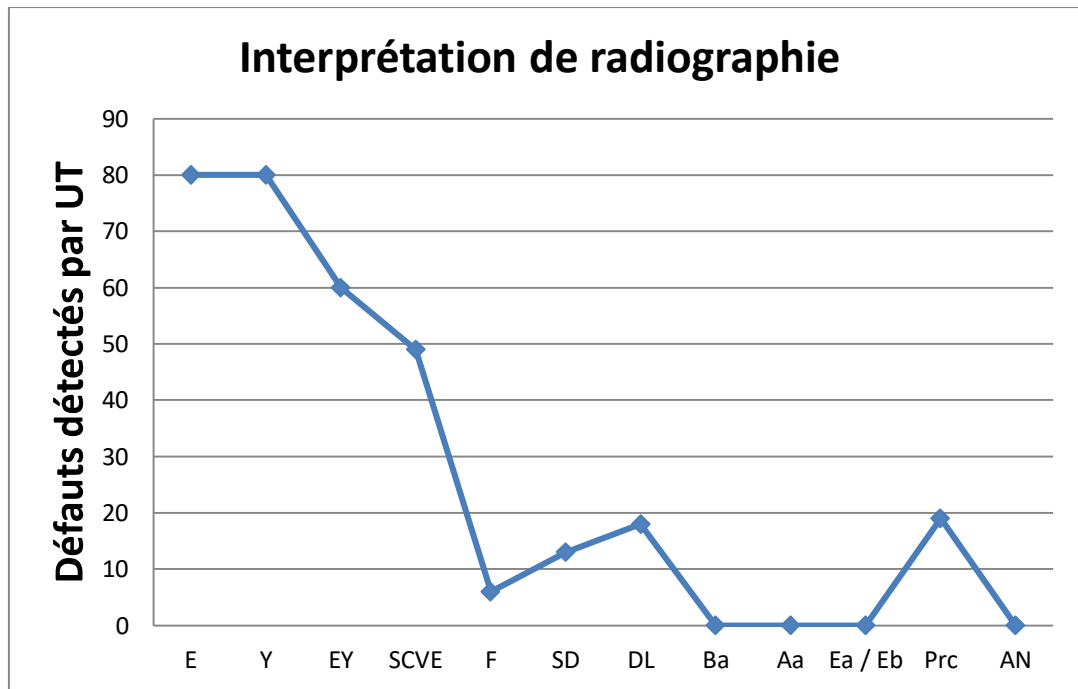


Figure 68 : diagramme représente le nombre des défauts détectés par UT (Tubes Réparée) en fonction l'interprétation radiographique.

#### IV.6. Analyses des résultats et discussion :

Après avoir confondu les résultats de UT avec les résultats de RT en remarque que :

Pour les tubes RàS :

La majorité des défauts détectés par UT sont des défauts de forme de géométrie de la soudure (SD) par contre les défauts visuellement inspecté sont nul, ainsi que les défauts interne ne sans pas majorités et selon l'interprétation des contrôleurs de radiographie ne sont pas d'influence sur la qualité de produit.

Pour les tubes Réparée :

En remarque que la majorités des défauts sont repartie sur des défauts inspecté visuellement comme E , Y, EY ,SCVE ,F , puis sur des défauts de forme comme SD , pour les défauts interne sont rarement détectés et si le cas ne sont pas d'influence sur la qualité de tube .

### IV.7. Discussion :

Grâce à ces statistiques et les résultats de l'échantillon étudié dans ce projet, on a constaté que la plupart des défauts détectés par le contrôle UT c'est une interruption de soudure extérieure (E) et interruption de soudure intérieure (Y), ces défauts on a pas besoin de suivre par ultrason, Parce que dans les deux cas ces Défauts C'est nécessaire de mettre des films radiographie .

nous devons considérer que le Pourcentage d'autre Défauts comme (soudure désaxage, fusions, inclusions, caniveaux,... ) est très faible, Cela signifie que le problème dans la procédé de soudage qui arrête beaucoup.

Avec le temps et les coûts perdu, dans le contrôle par ultrason on découvre le problème, qui est l'arrêt de soudage, Nous suggérons « là sondages » de sorte que 80 tube chaque Un passe dans le contrôle ultrasons.

### IV.8. Conclusion :

Enfin, cette étude reflète la situation de contrôle non destructif dans **ALFA PIPE** uniquement Parce que la fiabilité est différente dans d'autres endroits, dans les réacteurs nucléaires et avions, par exemple le rôle contrôle par ultrason est plus élevé et dans les tous cas elle dépend du degré de sécurité requis.

Le contrôle par ultrasons est souvent considéré comme complémentaire au contrôle radiographique. et à tendance à être remplacé dans la mesure du possible pour résoudre les problèmes de sécurité posés.

### - Conclusion générale :

Après on a rappelé brièvement la nature, le but et le domaine d'application du contrôle non destructif, d'abord nous avons évoqué les grands principes de détection des défauts et les bases physiques et leur performance ensuite qui la gouvernent les procédés. Nous avons ensuite décrit plus en détail les principes physiques, la réalisation et la mise en œuvre des 6 principales familles de procédés du contrôle non destructif, à savoir : les procédés optiques, le ressuage, les procédés par flux de fuite, les procédés par courants de Foucault, les procédés ultrasons, et enfin les procédés de contrôle par radiographiques.

Le choix d'une méthode de contrôle est très important , on ne peut pas choisir une méthode qu'une l'autre Cela dépend en grande partie du type des défauts nous cherchons et même le genre de cas que nous traitons, et le type et la dimension des défauts que l'on tolérera. Le type de défaut cherché permettra de choisir une (ou plusieurs) technique de contrôle (radiologie, ultrasons, etc.). La dimension des défauts tolérés déterminera la finesse du contrôle, au sein de chaque technique.

Finalement à selon notre étude on a trouvé que, Le pourcentage de protection varie en fonction de la demande des consommateurs, mais cela ne nous empêche pas de réduire les pertes de temps et coût qui peut coûter par des méthodes. Surtout si nous utilisons deux méthodes pour contrôler un produit.



## *Références Bibliographiques*



## *Références bibliographiques*

- [1] **Chalmond, B** : Diagnostic et évaluation des systèmes de production: contrôle non destructif.(2003).
- [2] **RABHI Mouldi** : contrôle non destructif CND. Institut Supérieur des Etudes Technologiques de GAFSA. 2017.
- [3] **SAFA Amel .KENNOUNA Ahmed** : Le contrôle non destructif (CND) et maintenance du moteur de fond hydraulique (PDM de Sperry-Sun). Université kasdi Merbah-Ouargla.2016.
- [4] **Auscultech**: <http://www.afnor.com/>.
- [5] **Site Web** : <http://www.uvt.rnu.tn/resources-uvt/cours/controle/Chapitre-1/Section-1-2.html>.
- [6] **Tarek Bouchala**: Modélisation Semi-Analytique des Courants de Foucault , Application au Contrôle Non Destructif par des Capteurs à Noyau de Ferrite. Université Elhadj Lakhder Batna . 2008.
- [7] **Belacel bahe eddine. Bouchria soufyane** : Mémoire .Contrôle des joints de soudure des pipelines par ultrasons. Université M’hamed Bougara Boumerdes. 2017.
- [8] **BTS MI** : stratégies de maintenance. Chapitre 27 : Les contrôles non destructif.
- [9] **Nabil Benhadda** : Mémoire.Modélisation des Capteurs Inductifs à Courants de Foucault. Université El Hadj Lakhdar Batna. 2006.
- [10] **Djamel Eddin ABDELLI** : Mémoire.Modélisation par les volumes finis d’un problème de contrôle non destructif de forme complexe. Université Mohamed Kheider – Biskra.2014.
- [11] **El Ghoul Islam Nacereddine** : Thèse. Réalisation D’un Banc D’essais Pour L’inversion Des Signaux En Contrôle Non Destructif Par Courants De Foucault. Université Mohamed Khider – Biskra.
- [12] **AFNOR Norme** : <https://www.afnor.org/>.
- [13] **ASTM Norme** : <https://www.astm.org/>.
- [14] **Brahim RAMDANE** : Thèse. Contribution à la modélisation tridimensionnelle de la technique thermoinductive de contrôle non destructif : Développement d’un outil de conception, d’analyse et d’aide à la décision. Université de nantes.2009.

- [15] **CSMOFMI** : Soudage et assemblage-soudage. Guide d'auto-apprentissage. Le Comité sectoriel de la main-d'œuvre dans la fabrication métallique industrielle (CSMOFMI), août 2010.
- [16] **Institut de Soudure Industrie** : Formation Professionnelle. Ultrasons Niveau 2 spécifique.2004.
- [17] **Institut De Soudure Industrie** : FORMATION PROFESSIONNELLE ULTRASONNS niveau 2 02/09.
- [18] Institut Supérieur des Etudes Technologiques de GAFSA CONTROLE NON DESTRUCTIF CND Chapitre 6 .
- [19] **D. KOLB** : Licence Pro Métrologie/Qualité - Initiation au contrôle des matériaux
- [20] **Chapitre 6** : La technique des Ultra Sons.
- [21] **IS RADIOGRAPHIE NIVEAU 2** : FORMATION PROFESSIONNELLE Janvier 2009.
- [22] Institut Supérieur des Etudes Technologiques de GAFSA « CONTROLE NON DESTRUCTIF CND » Chapitre 7.
- [23] Cours Contrôle Non Destructif « Radiographie X et Gammagraphie » Chapitre 2
- [24] **ultrasons techniques particulières de contrôle** : Cahiers de formation CETIM [2em édition 1996].
- [25] **jean pedijon** : le contrôle non destructif par ultrason [Éditions hermès 1993].
- [26] **J maily** : Pratique du contrôle ultrasonore des soudures.
- [27] **La norme API 1104** : American petroleum institue (septembre 1999).
- [28] **PAILLARD, S** : (2007), « Développement d'un modèle pour le contrôle non destructif par courants de Foucault de structures rivetées en aéronautique », thèse de doct., Université Paris-Sud 11.
- [29] **Yann LE BIHAN** : Conception et caractérisation d'un dispositif à courants de Foucault pour l'évaluation non destructive de l'épaisseur de paroi d'aubes de turbines creuses, Thèse de doctorat, Ecole Normale supérieure de Cachan, 2000
- [30] **B. Maouche**, « Elaboration de modèles par les Grandeurs Electromagnétiques Couplées. Application au Contrôle et à l'évaluation Non destructif par Courants de Foucault», Thèse de doctorat, Université de Ferhat Abbas de Setif, Algérie, 2007.



- [31] **L. Oukhlou** : «paramétrisation et classification de signaux en contrôle non destructif. Application à reconnaissance des défauts de rails par courants de Foucault», Thèse de doctorat, Paris-Sud, France.1998.
- [32] **V. Doirat** : « Contribution à la Modélisation des systèmes de Contrôles non Destructifs par Courants de Foucault, application à la caractérisation physique et dimensionnelle de matériaux de l'aéronautique», Thèse de doctorat, Nantes, France.
- [33] **P. Durouchoux** : « La recherche en contrôle non destructif», traitement du signal, Vol 2-N0 5 Sp, 1985.
- [34] **DUMONT-FILLON, J** : Controle non destructif (CND). technique d'ingénieure traité mesures et contrôle.
- [35] **AHMED S. & THOMPSON R.B**: Effect of Preferred Grain Orientation and Grain Elongation on Ultrasonic Wave Propagation in Stainless Steel, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 1992, Vol. 11, p. 1999-2006.
- [36] **APFEL A** : Modélisation de l'Orientation Cristalline des Soudures Multi-Passes en Acier Inoxydable Austénitique : Application au Contrôle Non Destructif Ultrasonore, Thèse de Doctorat. Marseille : Université de la Méditerranée, 2005.
- [37] **AUDOIN B. & ROUX J**: An Innovative Application of the Hilbert Transform to Time Delay Estimation of Overlapped Ultrasonic Echoes, Ultrasonics, 1996, Vol. 34, No. 1, p. 25-33.
- [38] **GUERJOURA R** : Characterization of Austenitic Stainless Steel Welds for Ultrasonic NDT, Review of Progress in Quantitative Non Destructive Evaluation, 1999, Vol. 19, p. 1325-1332.
- [39] **CHASSIGNOLE B** : Etude de l'Influence de la Structure Métallurgique des Soudures en Acier Inoxydable Austénitique sur le Contrôle Non Destructif par Ultrasons, Thèse de Doctorat. Lyon : INSA Lyon, 2000, 217 p.
- [40] **DUBUGET M** : Evaluation Non Destructive des Matériaux par Ultrasons : Caractérisation de l'Etat Initial et Suivi Sous Charge des Propriétés d'Elasticité Linéaire et Non Linéaire d'Alliages d'Aluminium, Thèse de Doctorat. Lyon : INSA Lyon, 1996, 194p.
- [41] **SELDIS T., PECORARI C. & BIETH M**: Measurement of Longitudinal Wave Attenuation in Austenitic Steel, 1st International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurised Components, Amsterdam, Netherlands, 1998, p. 769-777.

- [42] **R. Abd Essemmed, M. S. Aggoune, F. Z. Kadid** : *Magnétisme*, Physique, Tome III, Université de Batna, 1998.
- [43] **J. DUMONT-FILLON** : Contrôle non destructif (CND), technique de l'ingénieur R1400, 1996, pp. 1-42.
- [44] **I. N. El ghouli, A. Cheriet, S. Bensaïd** : Evaluation de l'épaisseur des plaques conductrices par la Méthode des Courants de Foucault, 4ème colloque que l'inductique CI'2015, Jijel, Algérie.
- [45] **Rimond Hamia** : Performances et apports des capteurs magnétiques à très haute sensibilité aux systèmes de Contrôle Non Destructif par Courant de Foucault, Thèse de Doctorat, Université de CAEN/BASSE NORMANDIE, 2011.
- [46] **J.-E. Holmström**, Exposure values for a 300 kV halfwave X-ray unit using three X-ray films of different film classes, NDT & E International, Vol. 31, Issue 1, 1998, pp. 33-41.
- [47] **V. Monebhurrin, B. Duchêne, D. Lesselier**: Three-dimensional inversion of eddy current data for non-destructive evaluation of steam generator tubes, Inverse Problems Vol. 14, 1998, pp.707–724.
- [48] **L. Oukhellou** : Paramétrisation et classification de Signaux en Contrôle Non Destructif : application à la reconnaissance des défauts de Rails par courants de Foucault, Thèse Doctorat à l'université de Paris-sud, France, 1997.
- [49] **T. P. Theodoulidis, E. E. Kriezis**, Eddy Current Canonical Problems (with Applications to Non destructive Evaluation), Tech Science Press, 2006.
- [50] **Chiara ZORNI**, Contrôle non destructif par courants de Foucault de milieux ferromagnétiques : de l'expérience au modèle d'interaction, Thèse de Doctorat, Université de Paris-sud 11, 2012.
- [51] **G. WACHE** : Contrôles non destructifs Traitements thermiques N°216-88 à 226-89.
- [52] **Normalisation française A 09-325** : Essais non destructifs Ultrason Faisceau acoustiques – Généralités Septembre 1987.
- [53] **Jean Perdijon** : Le contrôle non destructif par ultrasons, Traité des nouvelles technologies Hermes Science Publications, 1993.
- [54] **L'émission acoustique** : cours de contrôle et d'inspection des constructions soudées, Institut de Soudure, ESSA 1984.
- [55] **ESSA** : Contrôle des constructions soudées, contrôle par ultrasons, Institut de soudure, 1983.



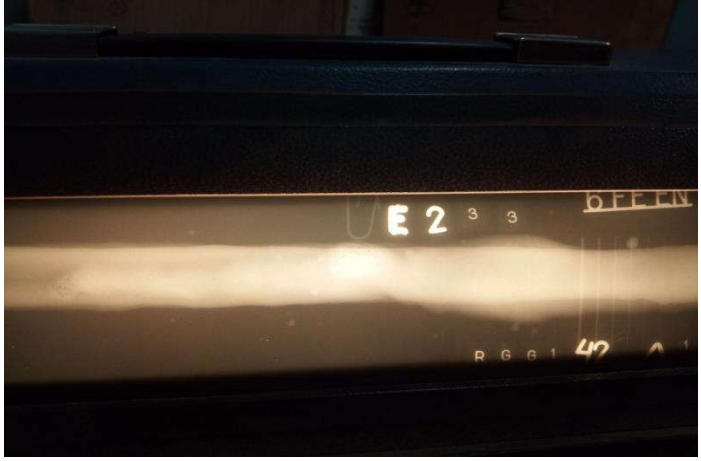

- **[56] Gilles Corneloup, Cécile Gueudré** : Le contrôle non destructif et la contrôlabilité des matériaux et structures,; Presses polytechniques et universitaires Romandes, 2016.
- **[57], Michel Bramat (Mayer, Villeneuve)** : Technologie des métaux, contrôles et essais des soudures de boeck, 2008.
- **[58] Jacques Dumont-Fillon** : ontrôle non destructif (CND), Techniques de l'Ingénieur, Traité Mesure et Contrôle.
- **[59] B. Brown et J.E. Goodman, Dunod** : Ultrasons de haute intensité, applications industrielles, , 1971.
- **[60] G. CHANTY, A. NOUVET** : Identification de la nature des défauts détectés aux ultrasons dans les joints soudés à franc-bord.
- **[61] J.L. ROSE, L. NIKLAS, P. MAST**: Flaw classification techniques in ultrasonic inspection. 8th World Conference on Non destructive Testing, Réf. 3H1 (1-8), Cannes, France, 6-11 Septembre 1976
- **[62] D.W. FITTING, L. ADLER**: Ultrasonic spectral analysis for non destructive evaluation. Plenum Press, New York" 1981.
- **[63] INSTITUT DE SOUDURE** : Recommandation concernant le contrôle manuel par ultrasons des soudures à pleine pénétration. Document IS. US. 319.21.2d"édition. Juin 1995. Publications du Soudage et de ses Applications.
- **[64] T.H. NGUYEN, M. GROZELLIE & M. BIETH** : Caractérisation semi automatique des défauts détectés par ultrasons dans les joints soudés. 6ème Colloque International sur les Méthodes de Contrôle Non Destructif (297-302), 1986.
- **[65] Classification des défauts dans les soudures par fusion des métaux, avec commentaires.**
- **[66] Confédération Française pour les Essais Non Destructifs** : <http://www.cofrend.com>.
- **[67] Isabelle Dufour** : Contribution à l'évolution des procédés de contrôle non destructif par capteurs inductifs : application au cas des matériaux composites carbone. Thèse de doctorat, Université Paris XI Orsay, 28 avril 1993.
- **[68] H.L. Libby** : Introduction to electromagnetic nondestructive test methods. New York : Wiley, 1971.
- **[69] M.-L. Zani** : CND par ultrasons : le "sans contact" est prêt mais... Mesures, avril 2001.
- **[70] Documents Technique** : CND. COSIDER. Biskra 2012.



# *Annexes*



Les tableaux suivant représentent des défauts détecter sur tube par à pour RT et UT :

<p>L'image correspondante représente de défaut détecter Interception de soudure extérieure et intérieure par à pour RT</p>	
<p>L'image correspondante représente de défaut détecter Nid de soufflure par à pour RT</p>	
<p>L'image correspondante représente de défaut détecter Soudure désaxée par à pour RT</p>	
<p>L'image correspondante représente de défaut détecter Fissure par à pour RT</p>	

L'image correspondante représente des défauts détectés par à pour UT

