

ANNABA BADJI MOKHTAR UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA



جامعة باجي مختار
عنابة

Faculté des Sciences de l'Ingénierat
Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER

**ÉTUDE COMPARATIVE DES EPAISSEURS DES TUBES SANS SOUDURE
AVANT ET APRES TRAITEMENT PAR ULTRASONS**

Option

Productique mécanique

Par :

MERDES Mohamed Seghir Khaldoune

ENCADRE PAR: M. TADJINE KAMEL

Devant le jury composé de :

Président :	PR. BOUCHELAGHEM A/A	UBMA
Examineurs :	PR. HAMADACHE A/H	UBMA
	MCA. LAGRED A	UBMA
	MCA. BOULAKROUCHE R	UBMA
	MCA. BOURENNEN R	UBMA

JUIN 2015

Dédicaces

Nous dédions ce modeste travail :

À nos parents

À nos familles

À nos enseignants

À notre cher grand frère et le père Dr :

Jadjine Kamal

À tous ceux qui nous ont aidés

À toutes la promotion de 5^{ème} année

mécanique

Bouzerza Rochdi

Merah Cherif

Kecib nasr eddine

Remerciements

Avant tous,

Je remercie le dieu qui m'a éclairé mon chemin pour réaliser ce mémoire.

Mes remerciements s'adressent particulièrement au Dr. « Tadjine Kamel » ;

Encadreur de ce mémoire, qui grâce à sa disponibilité, ses corrections et ses conseils, En a permis la réalisation effective.

Ma reconnaissance est également formulée Envers tout mes enseignants et tous les employés de l'administration de département de génie mécanique.

Ma gratitude s'adresse aussi à mes amis **Alam Faouzi, souaidi hichame, qui m'ont été dans grand soutien tout au long de mon parcours universitaire.**

Sans oublier de remercier l'ensemble du personnels de l'unité Arcilor mittal. ELHADJAR(Annaba).

En fin je remercie profondément ma famille pour le soutien morale, sans oublier aussi mes amis pour les encouragements et pour le temps agréable que nous avons passé ensemble et tous mes amis qui m'ont apporté aide et soutien pour la réalisation de mon projet.

Merci a tous

Liste des figures

Titre	Page
Figure Chapitre I	
Fig 1: Plan de masse de L'AMPTA	5
Fig 2: Présentation de L'AMPTA	6
Fig 3: organigramme de L'AMPTA	8
Fig 4: Les étapes de fabrication	9
Fig 5: organigramme de process	10
Fig 6: La chauffe du Lingot à 1 300°	11
Fig 7: Presse à percer de 1200 tonnes	12
Fig 8: Four à plateau	12
Fig 9: Laminoir Oblique	13
Fig 10: Train 14"	14
Fig 11: Four à longerons avant calibreur	15
Fig 12: Calibreur à 5 cases	15
Fig 13: Dresseuse rotative	16
Fig 14: Contrôle CND (Contrôle Non Destructif)	17
Fig 15: Tronçonneuse BARDONS	17
Fig 16: Banc d'épreuve hydraulique	18
Fig 17: Fileteuses numériques PT	19
Fig 18: Fileteuses semi-automatique TS430	19
Fig 19: Brossage, Peinture	20
Figure Chapitre II	
Fig 1 : principe du contrôle non destructif	28
Fig 2 : Éclairage directif et observation dans une direction proche de la réflexion Spéculaire.	29
Fig 3 : La détection des défauts de surface	31
Fig4 : Contrôle non destructif d'un roulement à bille employé en aéronautique	34
Fig 5 : Equipement de radiographie gamma.	35
Fig 6 : Film du contraste thermique relevé sur un plaque de carbone-époxy ayant reçu un impact.	36
Fig 7 : -Détection par thermographie IR de corrosion simulée dans tôle d'aluminium	37
Figure Chapitre III	
Fig1 :Principe de l'examen par ultrasons	45
Fig2 ;Exemple de mouvement oscillant mécanique	47
Fig3 :Amplitude du mouvement d'un élément de matière en fonction du temps	47
Fig4: Longueur d'onde	48
Fig5 : Représentation spectrale des US	49
Fig6 : Domaine d'application courant des CND	49
Fig7 : Eprouvette de traction e notionde contrainte	50
Fig8- Onde sinusoïdale d'amplitude A et de longueur d'onde λ .	59

Fig 9 : Interactions avec la matière réflexion / réfraction/ diffusion / absorption	61
Fig 10 - Type d'onde et mode de propagation des ultrasons dans solide.	66
Fig11 – Divergence du faisceau d'ultrasons	68
Fig12– Intensité acoustique sur l'axe du faisceau	68
Fig13– Distribution de l'amplitude perpendiculairement	69
Figure 14– Réflexion et réfraction des ondes ultrasonores en incidence oblique	71
Fig15– Structure d'un palpeur ultrasonore	74
Figure 16 – Différents types de palpeurs piézo-électriques	76
Figure 17 – Contrôle ultrasonore par échographie (ondes longitudinales)	78
Figure 18 – Contrôle des soudures par la méthode tandem (ondes transversales)	79
Figure 19 – Différents modes de présentation d'un sondage à ultrasons	79
Figure 20 – Schéma de principe d'un appareil classique de contrôle par ultrasons détecter des Défauts soit transversale ou longitudinale.	83

Liste des Tableaux

N°	Titre	Page
01	Tableau 1 : les méthodes de contrôle non destructif et leurs caractéristiques	40
02	Tableau 2 : ARCHITECTURE DES NORMES EUROPEENNES EN CND	46
03	Tableau 3 :Exemple pour quelque tissu	62
04	Tableau 4 : Module de Young	63
05	Tableau 5 : La Célérité pour quelque milieu traversée	64
06	Tableau6 : Vitesses et impédance acoustique (Valeurs moyennes arrondies	67
07	Tableau 7 : Commentaire des graphes avant TTH et après TTH.	87
08	Tableau 8 : Interprétation des valeurs des épaisseurs sur une même génératrice du tube sur les graphe .	92

Sommaire

Introduction Générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I : Présentation générale de l'AMPTA

I.1. Introduction	3
I. 2. Présentation du complexe	3
I. 2. 1. Historique	3
I. 2. 2. Situation géographique du complexe.....	4
I. 2. 3. Activité du complexe	5
I. 3. Présentation de L'AMPTA	6
I. 3.1. Les principaux produits de cette unité sont	6
I. 3.2. Les ateliers de production	6
a- LAT	6
b-PAT	6
I. 3. 3. Localisation du site et l'environnement	7
a. SITE.....	7
b. Environnement.....	7
c. Organisation de L'AMPTA.....	7
I. 3. 4. Ingénierie et technologie	9
a. Capacité théorique.....	9
b. Technologie utilisée et configuration des ateliers	9
c. organigramme de procès	10
I. 3. 5. Description des installations	11
▪ Parc à lingots	11
▪ Four à sole tournante	11
▪ Presse à percer de 1200 tonnes	12
▪ Four à plateau	12
▪ Presse à centrer	13
▪ Laminoir Oblique	13
▪ Laminoirs pèlerins	13
▪ Four à longerons avant calibreur	14
▪ Calibreur à 5 cases	15
▪ Four à longerons avant LRE.....	15
▪ Laminoir réducteur étireur (LRE)	15
▪ Finissage	16
a. Dresseuse rotative	16
b. Dresseuse alternative (petits tubes)	17
c. Contrôle CND (Contrôle Non Destructif)	17
d. Tronçonneuse BARDONS.....	17
e. Banc d'épreuve hydraulique	18

1. Parachèvement : (divisé en deux lignes)	18
2. Traitements thermiques	18
3. Types de refoulement : EU (External up set)	19
4. Contrôle	19
5. Fileteuses numériques PT 5	19
6. Fileteuses semi-automatique TS430	19
7. Banc d'épreuve hydraulique de 500 Tonnes.....	20
8. Conditionnement et finition du produit	20
9. Contrôle MPI	20
▪ Pour l'atelier des manchons	20
❖ Zone de Phosphatation	21
❖ Dimensions.....	21
❖ Types de filetage	21
I. 4. Conclusion	22

Chapitre II : Généralités sur le contrôle non destructif

II.1. INTRODUCTION: Terminologie et histoire des ultrasons.....	23
II.1.1. Introduction	23
II.1.2. HISTORIQUE DE LA METHODE.....	23
• Une vue d'ensemble des différentes techniques.....	24
• Quelle technique pour quel contrôle	25
1. Le contrôle non destructif : un large champ d'application.....	25
➤ applications et tendances	25
• Champ d'application actuel	25
➤ Principes de détection des défauts	26
• Hétérogénéités et défauts	26
• Procédure de CND	27
• Principe de la détection d'un défaut	27
➤ Les différentes méthodes de contrôle non destructif	28
• Procédés optiques	28
✓ Examen visuel	29
✓ Éclairage	29
✓ L'œil et ses limitations	30
➤ La détection des défauts de surface	30
• Le ressuage	31
• Les courants de Foucault	32
• La magnétoscopie	32
➤ La détection des défauts volumique	33
• Contrôle par ultra-sons	33
• Le contrôle par radiographie	35
• Contrôle par thermographie	36
2. Le contrôle de la structure interne des matériaux	38

➤ La mesure du bruit barkhausen	38
➤ Le courant de foucault	38
➤ Le contrôle par ultrason	39
3. Classement et performances des procédés de CND	39
➤ Utilisation des procédés de CND.....	41
• Les procédures d'emploi	42
• Les études préalables	42
• Le personnel de contrôle	42
II.2. Conclusion	44

Chapitre III : Le Contrôle non destructif par ultrasons

III.1. PRINCIPE PHYSIQUE DOMAINE D'APPLICATION	45
III.1.1. ULTRASONS	45
III.1.1.1. PRINCIPE.....	45
III.1.1.2. DOMAINE D'APPLICATION	45
a/ Matériaux contrôlables.....	45
b/ Recherche et caractérisation des défauts dans les soudures.....	46
III.1.2. NORMALISATION	46
III.1.2.1.NORMES GENERALES.....	46
III.2.GENERALITES.....	48
III.2.1. VIBRATION MÉCANIQUE.....	48
1. PRESENTATION.....	48
2. GRANDEURS CARACTERISTIQUES D'UN MOUVEMENT PERIODIQUE.....	48
a/ Définitions.....	48
b/ Relations usuelles	49
c/ Conclusion : choix de la fréquence.....	49
III.2.2. CARACTERISATION DES MATERIAUX ELASTIQUES.....	50
III.2.2.1. CONTEXTE ET DEFINITIONS.....	50
III.2.2.2. ESSAI DE TRACTION.....	51
III.2.2.3.CONSTANTES ELASTIQUES USUELLES.....	51
a/ Module de YOUNG E ou module d'élasticité longitudinal.....	51
b/ Coefficient de POISSON.....	52
III.2.2.4. MODULE DE COULOMB OU MODULE D'ELASTICITE TRANSVERSALE.....	52
III.2.2.5.VARIATION DES CARACTERISTIQUES	53
III.2.3. PROPRIETES DES ULTRASONS.....	58
1- THEORIE VIBRATOIRE.....	58
2- Mode de propagation.....	59
✓ Onde longitudinale ou de compression	59
✓ Onde transversale ou de cisaillement	59
3- Interactions avec la matière.....	59

III.3. Le procédé ultrasons dans le contrôle et détection des défauts	64
1. Historique	65
1.1. Différents types d'ondes.....	65
1.2. Changement de milieu : réflexion, transmission	70
1.3. Réfraction. Transformation de mode. Focalisation	71
2. Production et détection des ultrasons.....	73
2.1 Effet piézoélectrique	73
2.2 Palpeurs piézoélectriques	74
2.3 Palpeurs EMA.....	75
2.4 Palpeurs lasers.....	75
3. Méthodes de contrôle ultrasonore.....	76
3.1 Échographie ultrasonore.....	76
3.2 Méthode par transmission.....	77
3.3 Imagerie ultrasonore.....	77
4. Mise en œuvre. Appareillage de contrôle. Étalonnage.....	78
4.1 Couplage acoustique.....	78
4.2 Palpeur	80
4.3 Appareillage d'émission-réception.....	80
4.4 Étalonnage.....	81
5. Champ d'application et évolution du contrôle ultrasonore.....	81
5.1 Détection des défauts internes.....	81
5.2 Localisation des défauts en profondeur.....	81
5.3 Dimensionnement des défauts.....	82
5.4 Champ d'application	83
5.5 Évolution	84
III.4. Conclusion.....	85

Chapitre IV : Pratique des CND par ultrasons

1. Introduction	86
2. Préconisation	86
3. Fiche technologique du traitement	86
4. Remarque sur la relève du graphe de tubes à NDT	86
5. Commentaire des graphes avant TTH et après TTH.....	87
6. Interprétation des valeurs des épaisseurs sur une même génératrice du tube sur les graphe	92
7. Variation des épaisseurs avant TTH et après TTH sur quelques points.....	93
8. Conclusion	94
Conclusion générale	95
Références Bibliographiques.....	96

Chapitre I :

Présentation Générale de l'AMPTA

I.1. Introduction :

L'industrie mécanique est un facteur très important dans l'économie d'un pays et c'est une des contraintes au progrès et au développement. Elle représente le niveau d'évolution et de la modernité d'un pays.

La fabrication mécanique a une grande importance dans le domaine économique, elle participe à l'amélioration et au développement d'un pays et au développement des moyens de production locaux.

La nouvelle stratégie industrielle mondiale est basée sur la haute technologie moderne acquise par les grands constructeurs internationaux. Pour améliorer la qualité du produit, la productivité, le prix de revient et le temps d'exécution etc.....

L'Algérie est comme les autres pays du monde, essaye de construire une base industrielle suffisante pour rattraper le retard dans ce domaine qui compte chaque jour des avancées extraordinaires.

I. 2. Présentation du complexe :**I. 2. 1. Historique :**

L'entreprise national de sidérurgie (**ENS**) a été créé par la société bônoise sidérurgie (**SBS**) en 1959 suite à la mise en application du plan de Constantine crée le 4 septembre 1964, la **SNS** a été chargée de construire un complexe sidérurgique a **EL HADJAR**. En exécution d'une politique définie et exprimée par le gouvernement. Les minerais seront acheminés par les chemins de fer depuis les mines du **l'OUENZA**, a 150km, de la coke également sera acheminé depuis le port de Annaba.

Issue de la restructuration de la société national de sidérurgie **SNS**, l'entreprise (**SNS**) par abréviation **SIDER** a été créé par décret (**n°83-628**) du 05 novembre 1983 et apprêt mittal Steele Annaba le 25 juin 2005, et devenir Arcelor mittal Annaba le 6 mars 2007.

I. 2. 2. Situation géographique du complexe :

Le complexe sidérurgique d'**EL HADJAR** situé de 15km au sud de la ville d'Annaba, occupe une superficie de 800 hectares qui se repartit en trois zones, figure N° 01 :

- 1er Zone : Les ateliers de production «300Hectares».
- 2ème Zone : Les superficies de stockage «300 Hectares».
- 3ème Zone : surface de service«200 Hectares».

Le complexe a pour mission de valoriser le minerai de fer national et de fabriquer des demi- produits sidérurgiques nécessaires aux autres branches du secteur de l'industrie. En outre, pour ses besoins d'énergie et de fluides, le complexe est équipé de dispositif tel que :

- Trois (3) centrales thermiques d'une capacité totale de 65mW/h.
- Quatre (4) centrales à oxygène d'une capacité totale de 3500m³ /h.
- Trois (3) usines à eau d'une capacité de 28400 m³ /h.

Le complexe dispose au niveau du périmètre du port d'Annaba les installations suivantes :

Un quai sidérurgique équipé de grues dont 5 d'une capacité de 25tonne et deux de 40 tonnes. On distingue trois phases:

- ✓ Une phase allant du démarrage du premier (**HF N°1**) jusqu'à 1974, année de mise en service des premières installations du LAF (**laminoir réversible**) de capacité de 400000 tonnes d'acier liquide.
- ✓ Une phase dite (**Extension des Gammes**) entre 1974 et 1977 il s'agit de la construction de la filière tube sans soudure pour une meilleure sécurité du complexe et structuré par organigramme de produit l'approvisionnement en tube à pétrole pour **SONATRACH** et du laminoir à fils rond.
- ✓ Une phase dite 2.000.000 de Tonnes entre 1978 et 1981 caractérisée par l'installation du haut fourneau de 120.000 Tonne de fonte, l'adjonction d'une cokerie, l'extension de la zone produit plat à une capacité de 1.300.00 Tonnes d'acier liquide et la création d'une filière produit long, d'une capacité de 540.000 Tonnes suite à la construction d'une aciérie à billettes.

Dès 1966, la **SNS** a participé à la création des centres de formation d'ouvriers techniciens et agents de maîtrises.

1. Centre de formation ouvrière (**4 RSS**).
2. Centre de formation professionnelle des adultes des (**LAURIER ROSES**).
3. Centre entreprise de formation de techniciens et agents de maîtrise (**CITAM**).

L'ensemble de ces activités est regroupé en 1978 dans un seul centre (**CEFOS**) créée à 2km de l'usine dans la localité de **SIDI AMAR**, Pour la formation de 1200 ouvrier professionnels contre maître et techniciens.



Figure N° 01: Plan de masse de L'AMPTA

I. 2.3. Activité du complexe :

L'entreprise nationale de sidérurgie (SIDER) est charger de :

- ✓ La recherche ;
- ✓ Le développement ;
- ✓ L'exploitation ;
- ✓ La production ;
- ✓ La distribution des produits relevant de la sidérurgie et de la métallurgie de base ;
- ✓ L'élaboration de l'acier et des produits ferreux tel que les zincs, l'aluminium, le cuivre...etc.

I. 3. Présentation de L'AMPTA :

L'AMPTA implantée sur le site du complexe Arcelor Mittal Annaba, a pour mission principale la production des tubes sans soudure, (figure n° 02). destinés principalement à l'industrie du pétrole et du gaz, son démarrage a eu lieu en 1974.



Figure N° 02: Présentation de L'AMPTA

I. 3.1. Les principaux produits de cette unité sont :

- Les tubes casing pour le coffrage des puits de pétrole ;
- Les tubes Tubings pour la production ;
- Les Tubes line-pipe pour le transport des hydrocarbures liquide et gazeux ;
- Les Tubes pour usage hydraulique ;
- Les Tubes Tarifs et Divers.

I. 3.2. Les ateliers de production :

a)-LAT : Le laminoir à tubes qui permet la fabrication des tubes avec un large éventail des diamètres et différentes épaisseurs.

b)-PAT : Le parachèvement à Tubes spécialisé dans le traitement thermique des aciers et dans le filetage et la finition des extrémités des tubes et manchons.

I. 3. 3. Localisation du site et l'environnement :

Les ateliers de production AMPTA se trouvent implantées dans l'enceinte du complexe sidérurgique d'el- HADJAR.

a. SITE:

Le site de la tuberie sans soudure a une superficie de 31,5 ha. Des surfaces couvertes atteignent 81 300 m² dont :

- Ateliers de productions : 78 000 m²
- Blocs socio administratifs : 3300 m²

La surface des routes, parking et aires de stockage sont de : 233 700 m².

b. Environnement:

AMPTA est située dans un environnement industrialisé et viabilisé bénéficiant de toutes les infrastructures indispensables à la bonne marche industrielle.

c. Organisation de L'AMPTA:

L'AMPTA est structurée en tête par une direction générale, elle est composée de quatre directions, trois départements et plusieurs services, la structure de L'AMPTA peut se schématiser selon l'organigramme suivant, figure n° 03.

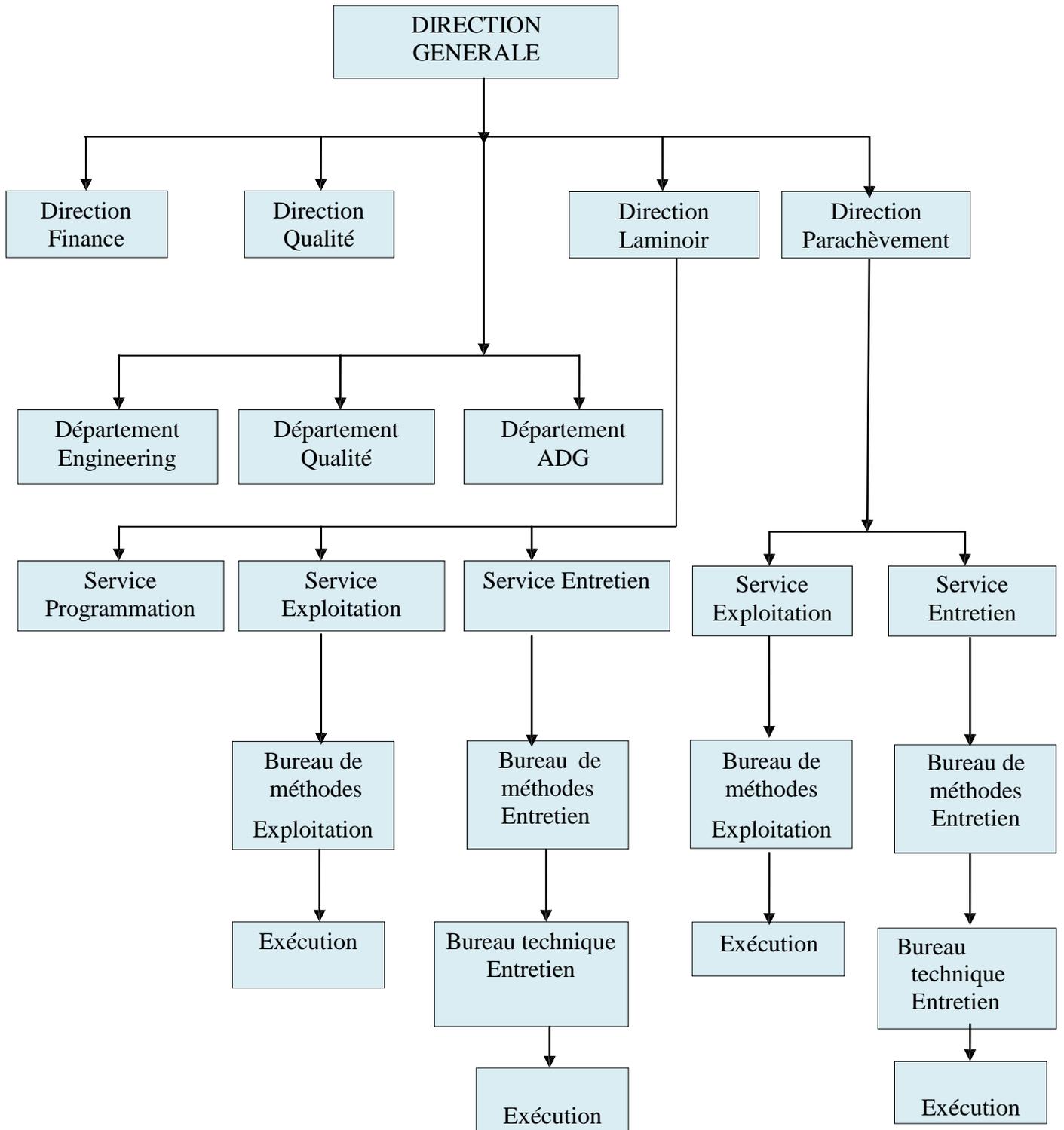


Figure N° 03: organigramme de L'AMPTA

I. 3. 4. Ingénierie et technologie :

a. Capacité théorique:

La capacité de production installée théorique est de 70 000 tonnes/an pour une exploitation des installations en 2x8. Cette capacité théorique calculée par le constructeur n'a jamais été atteinte durant presque 30 années d'exploitation.

b. Technologie utilisée et configuration des ateliers :

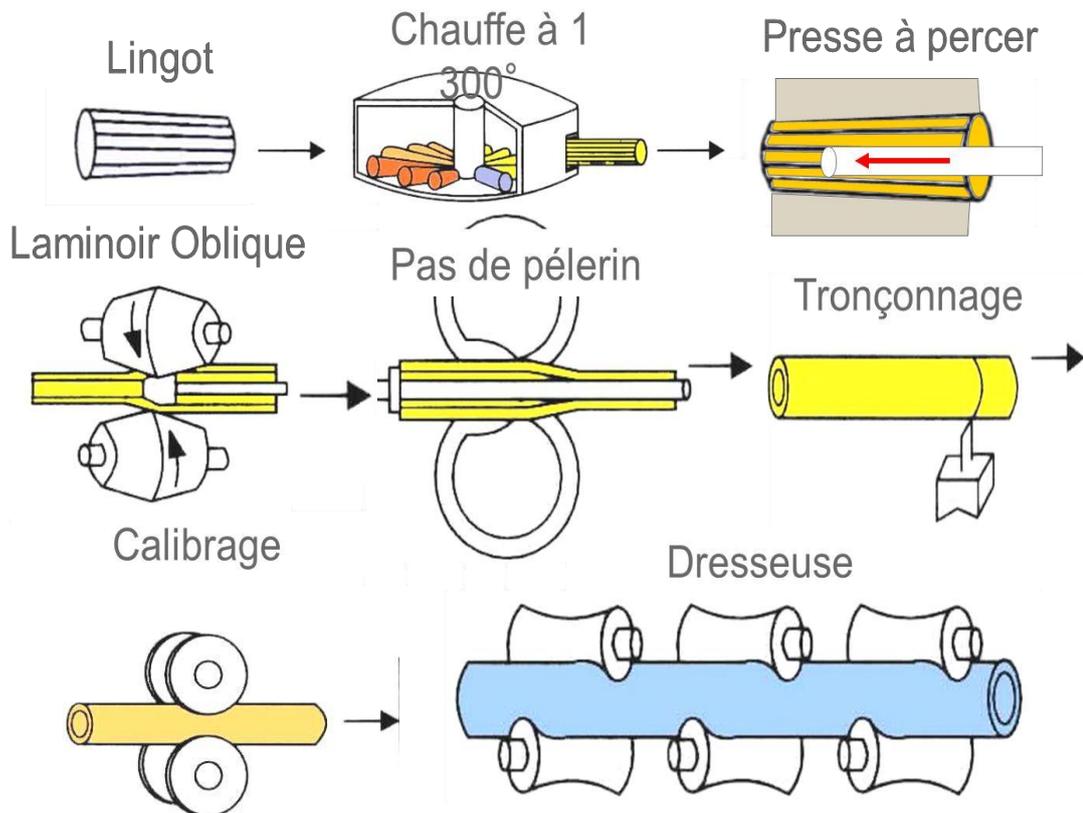


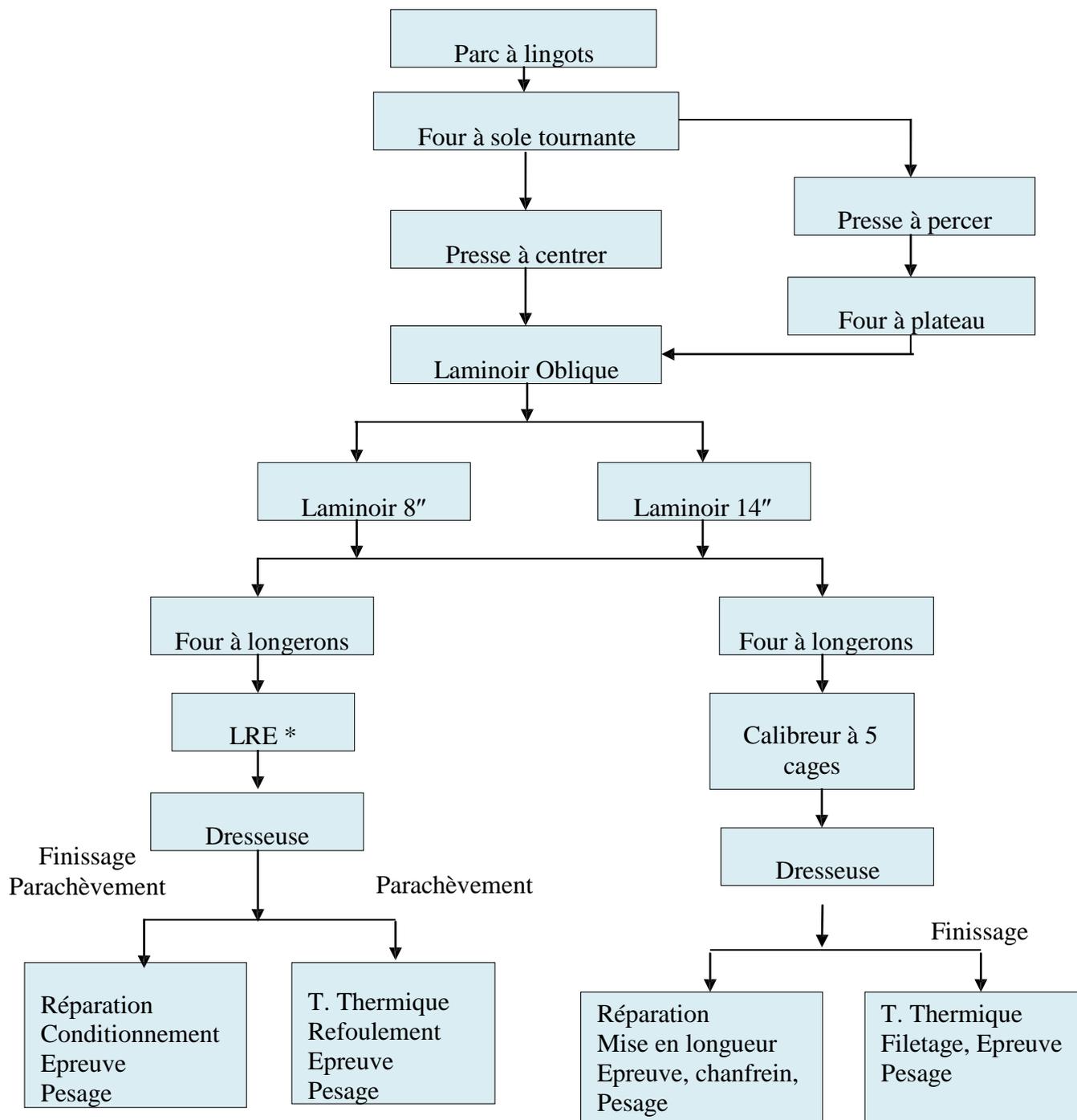
Figure N° 04: Les étapes de fabrication

Pour la fabrication de ses produits l'AMPTA exploite des installations complexes et utilise le procédé à pas de pèlerin, (figure n° 04). comme procédé technologique qui exige une maintenance élaborée.

Les tubes sans soudure sont produits dans des laminoirs à partir de lingots coulés en source dans une aciérie électrique située à proximité. L'AMPTA est équipée de trois laminoirs à chaud:

- ✓ Un laminoir à pas de pèlerin 14".
- ✓ Deux laminoirs à pas de pèlerin 8".

C. Organigramme du process :



(*) LRE : Laminoir Réducteur Etireur (laminoir à l'arrêt).

Figure N° 05: organigramme de process

I. 3. 5. Description des installations :

Les équipements de productions AMPTA sont répartis dans les ateliers suivants :

- Le laminoir à tubes ;
- Le parachèvement des tubes ;
- Atelier de fabrication des manchons.

Ces ateliers sont desservis par les principales installations annexes suivantes :

- ✓ Station de pompage ;
- ✓ Station de traitement des eaux ;
- ✓ Sous stations électriques.

Les ateliers principaux comprennent pour le laminoir à tube:

→ Parc à lingots :

Deux types de lingots en provenance de l'aciérie sont stockés dans ce parc

- ✓ Lingot rond : \varnothing 190 ; \varnothing 225 ; \varnothing 270 ; \varnothing 345.
- ✓ Lingots dodécagonaux : \varnothing 300 ; \varnothing 350 ; \varnothing 410 ; \varnothing 500.

Nuances: Gr. A- Gr. B -X42 X52 —X60-N80 -L80-P110- J55 K55.

→ Four à sole tournante :

Capacité de 45 tonnes par heure, il est destiné pour le chauffage des lingots à une température de 1300 °C avec une bonne homogénéisation de température, figure n° 06.

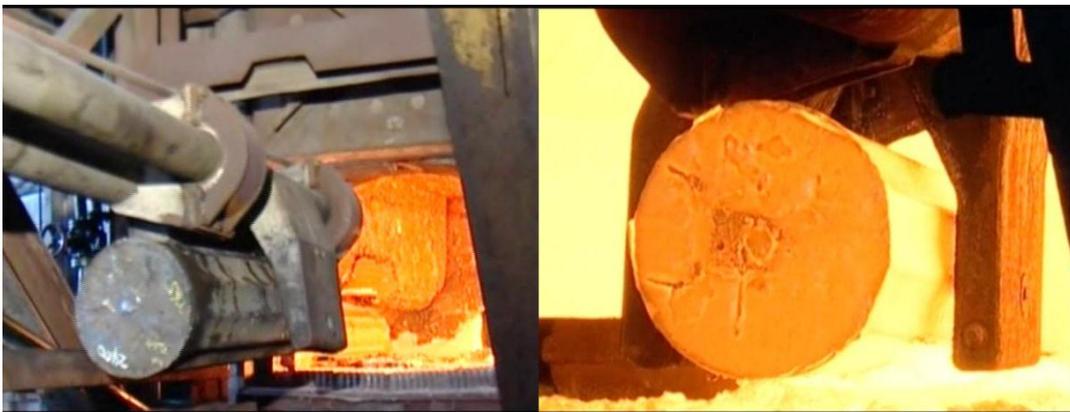


Figure N° 06: La chauffe du Lingot à 1 300°

→ Presse à percer de 1200 tonnes :

Perçage des lingots en doigt de gants, (figure n°07). La presse est alimentée à partir d'une

centrale
hydropneumatique.

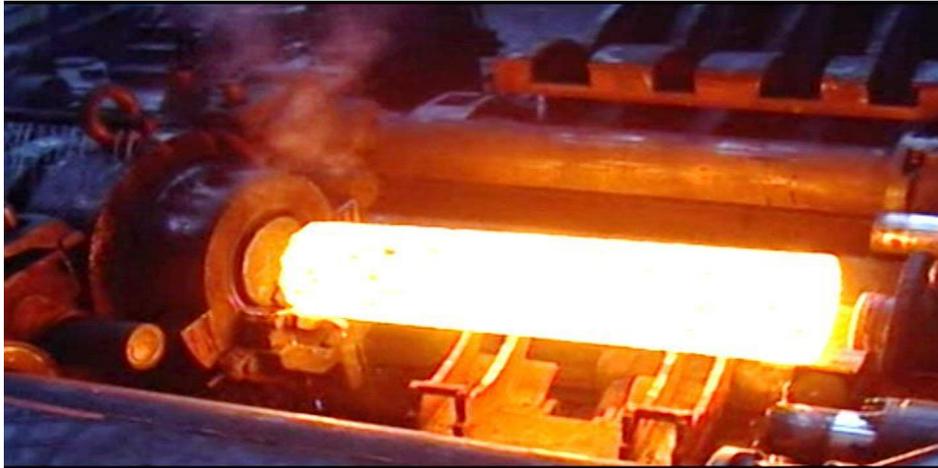


Figure N° 07: Presse à percer de 1200 tonnes

- ✓ Capacité : $\varnothing 214 \div \varnothing 500$ mm ;
- ✓ Longueur lingot : $\varnothing 800 \div \varnothing 1800$ mm ;
- ✓ Coefficient d'allongement : 1,15 ;
- ✓ Température mini : 1200 °C.

→ Four à plateau :

Pour réchauffage des ébauches pressées à une température de 1300 °C, figure n°08.



Figure N° 08: Four à plateau

→ Presse à centrer :

Elle assure le centrage des lingots ronds qui ne nécessitent pas le passage par la presse à percer.

→ Laminoir Oblique :

Figure N° 09: Laminoir Oblique

Transformation des lingots ronds ou ébauches creuses produites par la presse : en ébauches percées, figure n° 09.

- ✓ Longueur max. sortie : 3700 mm ;
- ✓ Allongement max : 1,75 ;
- ✓ Taux de réduction : 23 %.

→ Laminaires pèlerins :

Les deux trains (8" et 14") sont composés de trois parties : la cage, l'appareil de présentation

et son chariot ainsi que le circuit des mandrins.

• Train 8"

- ✓ Diamètre produit de 120 à 254 mm ;
- ✓ Poids ébauche et mandrin : 2100 Kg ;
- ✓ Longueur min / max : 7,5 à 33 m ;
- ✓ Epaisseur mini / maxi : 6 à 26 mm.

- **Train 14"**
 - ✓ Diamètre produit de 168 à 372 mm ;
 - ✓ Poids ébauche et mandrin 5700 Kg ;
 - ✓ Longueur min / Max : 8 à 33 m ;
 - ✓ Epaisseur mini / maxi : 6 à 26 mm.



Figure N° 10: Train 14"

➔ **Four à longerons avant calibreur :**

Réchauffage des tubes laminés de longueur maximale 15 m à haute cadence de production, (110 tubes/heure) avec une bonne homogénéité de température. Température de défournement 850° à 875 °C ,figure n° 11.



Figure N° 11: Four à longerons avant calibreur

→ Calibreur à 5 cases :

Calibrage de mise à dimension par réduction de diamètre et calibrage cylindrique des tubes bruts produits par les laminoirs pèlerins 8" et 14", figure n° 12.



Figure N° 12: Calibreur à 5 cases

→ Four à longerons avant LRE:

Réchauffage des ébauches des laminoirs pèlerins de longueur maximale de 22 m à haute cadence de production.

→ Laminoir réducteur étireur (LRE):

Ensemble de 20 cages, chacune équipée de trois galets à 1200.

- ✓ Pour petits tubes de diamètre 60,3 à 139,7 mm ;
- ✓ Réduction Max du diamètre (20 cages) : $\leq 60 \%$;
- ✓ Réduction d'épaisseur : $\leq 20 \%$;
- ✓ Vitesse d'entrée : 0,75 à 1,2 m/s ;
- ✓ Vitesse de sortie : 3,5 m/s ;
- ✓ Epaisseurs maximales possibles (en fonction de lasérie et dela nuance).

→ Finissage :**a. Dresseuse rotative :**

Dressage à froid des tubes venant du calibreur.

- ✓ Diamètre tubes : 140 à 406 mm ;
- ✓ Longueur tubes : 5 à 16 m ;
- ✓ Epaisseur max. : 14 mm pour le tube 339,7 de nuance J55, Figure N° 13.



Figure N° 13: Dresseuse rotative

b. Dresseuse alternative (petits tubes) :

Diamètres tubes : 60,3 à 113,3 mm

c. Contrôle CND (Contrôle Non Destructif) :

- ✓ Tuboscope (un pour gros tubes et un pour petits tubes) ;
- ✓ Magna poudre (contrôle visuel des tubes magnétisés.



Figure N° 14: Contrôle CND (Contrôle Non Destructif)

d. Tronçonneuse BARDONS:

Mise en longueur et coupe des viroles pour les essais mécaniques, figure n° 15.



Figure N° 15: Tronçonneuse BARDONS

e. Banc d'épreuve hydraulique :

- ✓ Un pour petits tubes (60,3 à 114,3 mm) : 25 Tonnes ;
- ✓ Un pour gros tubes (114,3 à 372 mm) : 225 Tonnes.



Figure N° 16: Banc d'épreuve hydraulique

→ Produits à la sortie du Finissage:

- ✓ Tubes Casing et Tubing expédiés vers le parachèvement à tubes ;
- ✓ Tubes Line Pipe et divers (lisses) expédiés vers les clients.

1. Parachèvement : (divisé en deux lignes) :

- ✓ Une ligne pour gros tubes (114,3 à 339,7 mm) ;
- ✓ Une ligne pour petits tubes (60,3 à 114,3 mm).

2. Traitements thermiques :

- ✓ Four de trempe (capacité 24t/h) ;
- ✓ Four de revenu (capacité 24t/h) ;
- ✓ Calibreur à trois cages : Calibrage de mise à dimension par réduction de diamètre et calibrage cylindrique des tubes (mise au rond) ;
- ✓ Dresseuse rotative gros tubes (la même que celle du Finissage LAT) ;
- ✓ Dresseuse alternative petits tubes ;
- ✓ Four de réchauffage des extrémités à refouler ;
- ✓ Presse à refouler et à calibrer de 300 tonnes (Tubing et autres).

3. Types de refoulement : EU (External up set)

NU (Non up set)

IU (Internal up set)

4. Contrôle :

Dimensionnel des extrémités, dureté, aspect extérieur et intérieur, ainsi que le contrôle par ultrason CND (100 / 400) et PMO (Poste Mobil d'Observation).

5. Fileteuses numériques PT 5 :

Figure N° 17: Fileteuses numériques PT

6. Fileteuses semi-automatique TS430 :

Exécution des filetages sur tubes : Types de filetages API long et court, VAM, NEW VAM et BUTRESS, figure n° 18.



Figure N° 18: Fileteuses semi-automatique TS430

7. Banc d'épreuve hydraulique de 500 Tonnes :

Tubes éprouvés à une certaine pression en fonction des dimensions et nuances et un temps exigé par le client. Passage tampon : contrôle du diamètre intérieur des tubes sur toute sa longueur.

8. Conditionnement et finition du produit :

Brossage, Lavage, Peinture, Pesage – Métrage, Marquage.

9. Contrôle MPI :

Dernier contrôle avant expédition. Parc de stockage pour expédition des tubes Casing et Tubing.



Figure N°19: Brossage, Peinture

→ Pour l'atelier des manchons :

- ✓ Tronçonnage des viroles sur BARDONS ;
- ✓ Pré alésage des ébauches manchons pour filetage sur GT 150 ;
- ✓ Cylindrage éventuel des manchons pour les diamètres forts ;
- ✓ Filetage (CDM Commande Numérique) ;
- ✓ Formage des bagues (protecteurs) ;
- ✓ Filetage des protecteurs.

❖ Zone de Phosphatation :

Phosphatation des manchons : mettre une couche de phosphate de zinc

Huilages des protecteurs.

❖ Types de filetage :

✓ API (FILET ROND et BUTTRESS) ;

✓ VAM.

Les manchons et protecteurs sont expédiés vers le parachèvement pour être montés sur les tubes.

I. 4. Conclusion :

Couvrant un secteur stratégique en plein développement le marché des tubes sans soudure restera longtemps fortement demandé. Les besoins exprimés par le marché algérien des tubes sans soudure en perpétuelle expansion dépassent largement les capacités pratiques de l'AMPTA. La tuberie sans soudure possède des réelles possibilités et capacités d'adaptation aux besoins du marché en termes de qualité de produit. La tuberie sans soudure a obtenu la certification selon le référentiel **ISO 9001** depuis Décembre 1999 et propose depuis **1985** son produit fabriqué sous le **monogramme API** (American Petroleum Institut).

Chapitre II

Généralités sur le contrôle non destructif

II.1. INTRODUCTION: Terminologie et histoire des ultrasons**II.1.1. 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 ce document, 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.

II.1.2. HISTORIQUE DE LA METHODE :

On sait depuis longtemps que des animaux comme les chauves-souris, les baleines ou les dauphins émettent des ultrasons pour localiser des objets.

Dans les années 1920, on commença à fabriquer des appareils à ultrasons : les sonars.

Les premières études sur les ultrasons n'étaient pas spécialement destinées aux humains. Elles visaient à permettre

la détection des sous marins et ont débuté à l'occasion de la première guerre mondiale. En 1918, Langevin utilise des ultrasons pour mesurer la profondeur des océans et détecter les icebergs, il invente le sonar.

Il faudra attendre le début des années 1970 pour que les ultrasons s'appliquent à la médecine avec WILD et REID

qui présentent les premières images de coupes échographiques. Ils sont aujourd'hui appliqués en obstétrique le plus souvent pour surveiller le bon déroulement d'une grossesse, mais on peut aussi échographier: la thyroïde, les seins, les muscles et tendons ainsi que tous les organes mous comme le foie, le cœur, le pancréas,...

Dans l'industrie, par exemple pour les essais non destructifs de matériaux, pour la coupe ou soudure des thermoplastiques (non-tissé, ruban, sangle, PE et PP), la soudure des métaux non ferreux (Cuivre/aluminium par exemple) nettoyage par U.S l'une des toutes premières applications industrielles: en alimentaire pour la découpe des fromages, des pâtes, viandes, poissons, gâteaux à très haute vitesse et sans pertes.

- **Une vue d'ensemble des différentes techniques**

De nos jours, la qualité et la gestion des risques sont deux paramètres que ne peuvent négliger les industries.

Situé aux frontières de la métrologie, de l'instrumentation industrielle, scientifique et médicale, le domaine des CND constitue un secteur spécifique d'activité scientifique et industrielle. Dans les projets où la qualité et la gestion des risques priment, le recours aux CND apparaît comme un élément majeur pour assurer la sécurité des personnes et des biens.

Initialement développées vers les années 1960 pour répondre aux besoins des secteurs de pointe tels que le nucléaire, les méthodes de contrôle non destructif (CND) ont vu leur emploi se généraliser à l'ensemble du monde industriel. Elles sont utilisées lors des différentes étapes de la fabrication de produits, pour contrôler la conformité de produits finis ou bien encore lors d'opérations de maintenance ou suite à la détection d'anomalies de fonctionnement. L'objectif premier du contrôle non destructif est de détecter, de localiser et de dimensionner les défauts nocifs pouvant être présents en surface ou au cœur des matériaux (porosités, inclusions, fissures, piqûres...) de façon non intrusive, voire sans contact. Ces techniques permettent également de mesurer des variations de structures ou de propriétés mécaniques au sein des matériaux (grosseur de grains, précipités, présence de contraintes résiduelles,...) ou encore de déterminer la nature du matériau contrôlé.

Il existe un grand nombre de techniques pouvant être utilisées pour réaliser du contrôle non destructif radiographie, ultrasons, ressuage, thermographie, bruit Barkhausen, courants de Foucault... Pour la plupart de ces méthodes, les moyens d'acquisition ont été automatisés, permettant ainsi le stockage et le traitement numérique d'un très grand nombre de données.

La confédération Française pour les Essais Non Destructifs (COFREND) a pour mission de gérer le système national de certification de compétences des personnels effectuant les essais non destructifs et de favoriser l'enseignement et la formation. Les modalités de certification sont régi es par la norme NF EN 473. Ce dossier présente, sans être exhaustif, quelques unes des possibilités du contrôle non destructif dans différents domaines d'application et pour différents types de matériaux (céramiques, métaux, polymères, composites).

- quelle technique pour quel contrôle ?

1. Le contrôle non destructif : un large champ d'application :

➤ applications et tendances :

- **Champ d'application actuel :**

À travers son objectif, on aura compris que le contrôle non destructif est essentiel pour la bonne marche des industries qui fabriquent, mettent en œuvre ou utilisent les matériaux, les produits, les structures de toutes natures. À l'heure où la qualité est devenue un impératif difficilement contournable, le champ d'application des CND ne cesse de s'étendre au-delà de son domaine d'emploi traditionnel constitué par les industries métallurgiques et les activités où la sécurité est primordiale, telles que le nucléaire et l'aéronautique. Après le contrôle des biens d'équipements, vient celui des biens de consommation.

La nature des défauts que l'on cherche à détecter se diversifie du même coup: on recherche les **défauts technologiques ponctuels graves**, comme ceux inhérents à la fabrication et à l'utilisation des métaux (fissure de fatigue), mais aussi désormais des **défauts d'aspect** (taches sur une surface propre) et des **corps étrangers nuisibles** (éclats de verre dans un emballage alimentaire).

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'application se différenciant à la fois par le contexte industriel et par la nature du contrôle lui-même.

-Le contrôle en cours de fabrication procède de la philosophie de l'instrumentation industrielle en tant qu'outil de contrôle d'un procédé souvent automatisé et impliquant alors un appareillage installé à demeure en ligne de fabrication présentant une grande robustesse, une réaction rapide, un coût d'exploitation faible et, malgré tout, une bonne fiabilité.

Les défauts recherchés sont ici 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 d'investissement.

-Le contrôle en recette 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 bien souvent d'**en définir la nature et les dimensions**.

- **Le contrôle en services** effectuée sur pièces ou structures lors d'opérations de maintenance ou à la suite de détection d'anomalies de comportement du matériel. On en attend une très grande fiabilité, eu égard à l'importance des risques encourus par la non-détection d'un défaut grave. Pour ce type de contrôle, il convient de pouvoir estimer le mieux possible la **nature et les dimensions des défauts** pour pouvoir en apprécier la nocivité ; il faut disposer aussi d'une grande reproductibilité de l'examen non destructif, de façon à pouvoir **suivre l'évolution du dommage au cours du temps**.

Tendances et évolution :

Globalement, en tant qu'outil majeur de la politique qualité d'une entreprise, les techniques de CND continueront à élargir leur champ d'application vers de nouveaux secteurs d'activité économique. On constate aussi que l'objectif du contrôle non destructif évolue en rapprochant ce domaine de celui de l'instrumentation ; il ne suffit plus aujourd'hui de détecter un défaut, il faut aussi le caractériser et le dimensionner ; il faut aussi imaginer des techniques et procédés non destructifs aptes à mettre en évidence des **hétérogénéités physiques complexes** ou des **irrégularités de propriétés** telles que, par exemple, des variations de microstructure dans un métal, des variations de texture ou de rugosité sur une surface, des variations de propriétés électromagnétiques sur une bande. Ces objectifs sont souvent difficiles à atteindre, car les lois de la physique sont ce qu'elles sont et ainsi, dans ce domaine, les progrès sont lents.

Il n'en va pas de même pour l'**automatisation des CND** qui bénéficie pleinement des progrès de l'informatique ; il en résulte l'arrivée sur le marché, d'année en année, d'appareillages plus performants, plus fiables et surtout plus faciles à utiliser dans le cadre du respect de procédures de contrôles très strictes. L'évolution des CND doit prendre toutefois en compte l'aspect coût, ce dernier pouvant freiner l'essor de nouvelles techniques très performantes, comme c'est le cas actuellement pour la tomographie X.

➤ **Principes de détection des défauts :**

- **Hétérogénéités et défauts ;**

Le terme *défaut* est ambigu, relatif et peu précis, mais sa connotation négative évoque bien le rôle que joue le contrôle non destructif dans la recherche de la qualité. En fait, détecter un défaut dans une pièce, c'est physiquement, mettre en évidence une **hétérogénéité de matière**, une **variation locale de propriété physique ou chimique** préjudiciable au bon emploi de celle-ci.

Cela dit, on a l'habitude de classer les défauts en deux grandes catégories liées à leur emplacement : les défauts de surface, les défauts internes.

- **Les défauts de surface**, accessibles à l'observation directe mais par toujours visibles à l'œil nu, peuvent se classer en deux catégories distinctes : les défauts ponctuels et les défauts d'aspect.

La première catégorie (**défauts ponctuels**) correspond aux défauts les plus nocifs sur le plan technologique, puisqu'il s'agit des criques, piqûres, fissures, craquelures, généralement aptes à provoquer à terme la rupture de la pièce, en initiant par exemple des fissures de fatigue. Dans les pièces métalliques, l'épaisseur de ces fissures est souvent infime (quelques μm) et elles peuvent être nocives dès que leur profondeur dépasse quelques dixièmes de millimètre, ce qui implique l'emploi pour leur détection de méthodes non destructives sensibles, telles que le ressuage, la magnétoscopie, les courants de Foucault, les ultrasons.

La seconde catégorie correspond aux **défauts d'aspect**, c'est-à-dire à des plages dans lesquelles une variation de paramètres géométriques ou physiques (rugosité, surépaisseur, taches diverses) attire le regard et rend le produit inutilisable. Ici, le contrôle visuel est possible, mais on cherche à le remplacer par des contrôles optiques automatiques.

- **Les défauts internes** sont des hétérogénéités de natures, de formes, de dimensions

Extrêmement variées, localisées dans le volume du corps à contrôler. Leur nomenclature est très étoffée et spécifique à chaque branche d'activité technologique et industrielle.

Dans les industries des métaux, il s'agira de criques internes, de porosités, de soufflures, d'inclusions diverses susceptibles d'affecter la santé des pièces moulées, forgées, laminées, soudées. Dans d'autres cas, il s'agira simplement de la présence d'un corps étranger au sein d'une enceinte ou d'un produit emballé. Ici le contrôle visuel est généralement exclu d'office et l'on utilisera donc l'un ou l'autre des grands procédés du CND que sont la radiographie, le sondage ultrasonore, ou encore des techniques mieux adaptées à certains cas comme l'émission acoustique, l'holographie, l'imagerie infrarouge, la neutronographie.

- **Procédure de CND**

L'opération de contrôle non destructif d'un objet ne se borne généralement pas à la **détection** d'éventuels défauts.

En effet, même si le choix du procédé, de la méthode et du matériel a été effectué au préalable, il faut envisager toute une **procédure** ayant les objectifs suivants : fiabilité de l'examen, reproductibilité, localisation des défauts, identification, caractérisation de ceux-ci, en particulier par leur taille, classement, présentation visuelle, décision concernant l'affectation de l'objet, enfin archivage des résultats et des conditions d'examen.

Ce sont des opérations d'étalonnage, de calibrage, de balayage de la sonde, de traitement des données qui permettent d'atteindre ces objectifs désormais dans de bonnes conditions, grâce à l'apport intensif de l'informatique en temps réel.

- **Principe de la détection d'un défaut :**

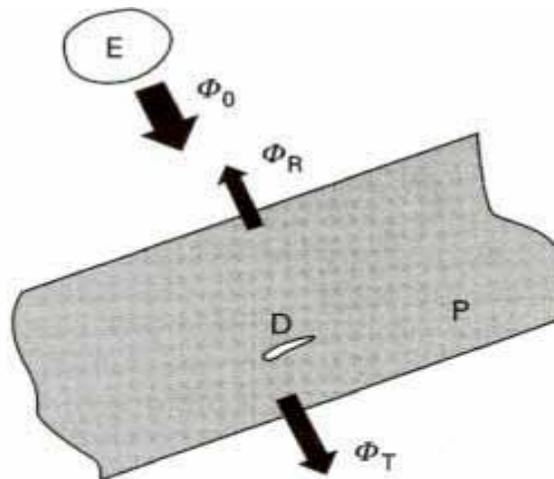
Le principe de la détection d'un défaut consiste à exciter celui-ci et à recueillir sa réponse. Schématiquement, on peut généralement distinguer les étapes suivantes, quelle que soit la méthode employée :

1. mise en œuvre d'un processus physique énergétique.
2. modulation ou altération de ce processus par les défauts.
3. détection de ces modifications par un capteur approprié.
4. traitement des signaux et interprétation de l'information délivrée.

Différents types d'énergie sont employés en pratique : énergie mécanique (ultrasons, ressuage), électromagnétique (radioscopie, observation dans le visible, flux magnétique...). On peut schématiquement distinguer deux groupes de méthodes de détection :

- **les méthodes de flux**, avec une excitation et une détection **de même nature** et pour lesquelles le défaut introduit une perturbation de flux qui peut être relevée soit directement dans le flux transmis (radiographie) ou le flux rediffusé (ultrasons), soit par un effet de proximité (bobine de sonde à courants de Foucault, flux de fuite magnétique): figure 1: la grande majorité des procédés du contrôle non destructif se réfère à ce groupe de méthodes.

- les méthodes pour lesquelles l'excitation et la détection sont **de natures différentes**, chacune mettant en jeu un processus original et spécifique ; l'excitation la plus employée est la sollicitation mécanique ; elle conduit aux techniques d'analyse de vibrations mécaniques ou de microdéformations (interférométrie holographique) ou encore à une technique d'émission provoquée dont la plus connue est l'émission acoustique.



- E émetteur du flux Φ_0 émis vers la pièce P à tester
- Φ_R flux réfléchi
- Φ_T flux transmis
- Φ_R ou Φ_T sont les vecteurs de l'information utilisés par le contrôleur
- D défaut

Fig1– principe du contrôle non destructif

➤ Les différentes méthodes de contrôle non destructif ;

- Procédés optiques :

✓ **Examen visuel ;**

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.

En examen préalable, l'inspection visuelle d'un objet, d'une structure, d'un assemblage tel qu'une soudure permettra de guider un observateur expérimenté dans la définition d'une autre technique : choix de l'angle de tir en radiographie, direction de magnétisation, fréquence ultrasonore.

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 rédhibitoires pour des produits plats du types tôles, tissus, verre, etc. Toutefois l'examen purement visuel présente des limitations de différentes natures que nous allons examiner et qui justifient l'éclosion de toute une gamme de procédés de contrôle optique, dont les principaux sont décrits plus loin

✓ **Éclairage :**

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 éclairage de plus de 300 lux en lumière vert-jaune à 0,55 µm 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.

Par contre, pour détecter facilement les défauts du type rayures orientées sensiblement dans la même direction, on doit préférer l'utilisation d'un **éclairage directif** associé à une observation de la surface sous un angle voisin de celui de la réflexion spéculaire (figure 2) ; enfin les défauts présentant un certain relief sont en général bien mis en évidence grâce à un **éclairage rasant**.

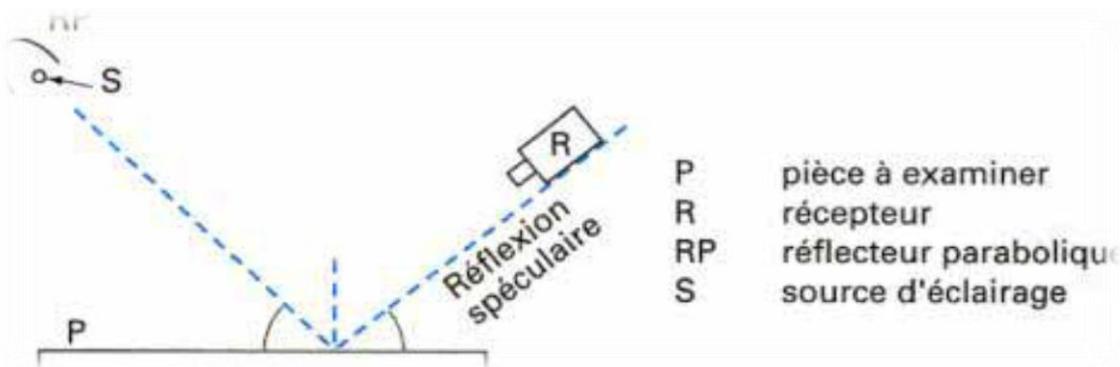


Fig2– Éclairage directif et observation dans une direction proche de la réflexion Spéculaire.

✓ **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. La lecture d'une image associe en fait l'œil et le cerveau de l'observateur, initiant ainsi à la fois des problèmes objectifs et des problèmes subjectifs. Les premiers concernent l'aspect optique avec un paramètre principal qui est l'**acuité**, c'est-à-dire le pouvoir séparateur de l'œil ; on le situe entre 0,5 et 1 minute d'angle soit environ 50 μm à une distance d'observation de 25 cm. Mais il ne s'agit là que d'une valeur moyenne, car l'acuité visuelle dépend de la nature de l'image (éclairage et contraste), ainsi que de l'individu à travers son pouvoir d'accommodation à la distance et à la luminance, pouvoir dont on connaît la décroissance avec l'âge de celui-ci (presbytie).

Les performances et les limitations d'ordre subjectif sont plus difficiles à analyser, à mesurer et à prendre en compte ; il s'agit de perception et de conscience de l'image observée. Ainsi par exemple, la perception n'est pas indépendante de la nature de l'image (perception des figures géométriques) ou de celle de « l'état d'esprit » de l'observateur, qui verra mieux s'il sait déjà la nature de ce qu'il recherche. Cela montre d'ailleurs l'importance d'une éducation préalable du contrôleur quant à la genèse et la nature des défauts recherchés pour une pièce donnée.

On doit enfin prendre en considération d'autres facteurs physiologiques et psychiques susceptibles de dégrader la fiabilité du contrôle visuel : la rémanence de l'œil rend problématique le contrôle des objets en mouvement, la fatigue oculaire dégrade les performances dans le temps, de même que la fatigue nerveuse ou la distraction de l'observation.

▪ On peut classer les méthodes de contrôle non destructif en deux grandes familles : les techniques d'inspection de surface et celles de contrôle en profondeur, dans le volume du matériau.

➤ **La détection des défauts de surface :**

Différentes techniques peuvent être utilisées pour détecter de nombreux types de défauts superficiels (criques, piqûres, fissures, inclusions, piqûres de corrosion...) dont notamment le ressuage, la magnétoscopie et les courants de Foucault. Certaines méthodes utilisées pour l'inspection des matériaux en volume sont également performantes pour la détection de défauts débouchant. Celles-ci seront traitées dans la deuxième partie du dossier. Voici un aperçu des domaines d'application des techniques de contrôle de défauts en surface :

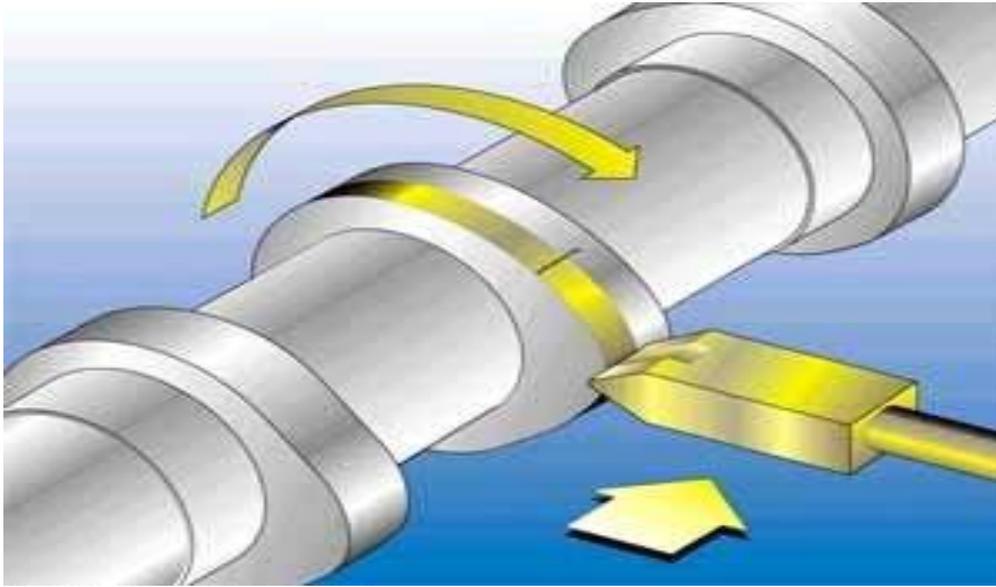


Fig 3 : La détection des défauts de surface

- **Le ressuage :**

Cette méthode est utilisée pour révéler la présence de défauts débouchant en surface de pièces et s'applique à une grande variété de matériaux compacts et non poreux (matériaux métalliques, plastiques, composites...). Elle consiste à appliquer sur la surface de la pièce nettoyée un liquide coloré ou fluorescent, qui va s'infiltrer à l'intérieur des défauts. Après élimination par lavage de l'excès de liquide, la surface est recouverte d'un révélateur qui, agissant comme un buvard, «aspire» le liquide contenu dans les défauts et donne une tache colorée.

La sensibilité de détection des défauts est souvent déterminée par le mode de préparation des surfaces. Il est nécessaire d'effectuer un dégraissage et un décapage préliminaires soignés. Cette méthode peut mettre en évidence des défauts de 80 μm en largeur et 200 μm profondeur avec un pénétrant coloré et 1 μm en largeur pour 20 à 30 μm en profondeur avec un pénétrant fluorescent. Le champ d'application du ressuage est très vaste car le procédé est simple d'emploi et permet de détecter la plupart des défauts débouchant en surface sur les matériaux non poreux et ne présentant pas une trop grande rugosité.

Le ressuage est une méthode que l'on peut utiliser à la fois pour le contrôle de pièces de sécurité en petite ou moyenne série et en contrôle de pièces à l'unité, au cours de leur fabrication ou d'opérations de maintenance. Pour pallier les limitations du contrôle visuel par un opérateur, des systèmes de contrôle optique automatique ou semi-automatique ont été développés.

- **Les courants de Foucault :**

Cette méthode s'applique à tous les matériaux conducteurs de l'électricité. Elle consiste à créer dans ces matériaux des courants induits par un champ magnétique variable.

Ces courants induits, appelés **courants de Foucault**, circulent localement dans le matériau. Leur distribution et leur répartition dépendent du champ magnétique d'excitation, de la géométrie, de la conductivité électrique et de la perméabilité magnétique de la structure examinée.

La présence d'une anomalie dans la pièce contrôlée perturbe la circulation des **courants de Foucault**, entraînant une variation de l'impédance apparente du capteur qui est fonction de la nature de l'anomalie et de ses dimensions.

Les capteurs peuvent fonctionner en **mode absolu**, en **mode absolu avec référence externe** et en **mode différentiel**. Le mode différentiel nécessite un mouvement relatif entre la pièce et le capteur (mesure dynamique). Particulièrement adapté pour la détection de défauts courts (fissures, soufflures, inclusions, piqûres de corrosion...), il est peu sensible à l'influence de paramètres perturbateurs tels que les variations locales de propriétés électromagnétiques, de distance ou de température. Le choix des conditions de réglage doit se faire après essais sur un échantillon représentatif de façon à mettre en évidence les différents paramètres perturbateurs.

Les courants de Foucault constituent un moyen de contrôle **particulièrement fidèle**.

Cette caractéristique est intéressante pour la maintenance des matériels, notamment pour suivre leur évolution lors des contrôles périodiques. Le contrôle en fabrication des tubes, barres et fils en matériaux ferreux et non ferreux est couramment effectué par courants de Foucault pour détecter des défauts superficiels de nature variée (criques, piqûres, ...), soit par des capteurs encerclant les pièces à contrôler, soit par des sondes tournantes.

Ces dernières, plus sensibles mais plus fragiles, permettent de détecter des défauts dont la profondeur est de l'ordre de 0,1 mm à 0,4 mm dans le cas de l'acier. Le contrôle de surfaces planes est également possible.

Il s'effectue par **déplacement d'un capteur** sur le matériau à contrôler. Toutefois, celui-ci est limité à des surfaces de faibles dimensions, cette méthode étant peu adaptée à un balayage rapide.

- **La magnétoscopie :**

La magnétoscopie est une méthode de contrôle non destructif pour la détection des défauts débouchant ou sous jacents (de 1 à 2 mm de la surface) dans les matériaux ferromagnétiques. Elle consiste à créer un flux magnétique intense dans les structures entraînant, au droit des défauts, des flux de fuite.

Ces flux sont mis en évidence par des révélateurs magnétiques finement micronisés et déposés à la surface des matériaux ou, de façon plus marginale, par une mesure directe avec des capteurs. Il s'agit, dans la majorité des cas, d'une inspection visuelle réalisée par un opérateur.

La sensibilité de détection est liée en partie à la granulométrie des poudres magnétiques utilisées, qui doivent être très homogènes. Le contrôle peut se faire de façon automatisée sur des pièces de forme simple, en particulier toutes les pièces axisymétriques du type barres et tubes, à l'aide de **capteurs électriques sensibles aux champs magnétiques**.

Il faut noter que les défauts ne peuvent être détectés que s'ils sont orientés pour tout ou partie perpendiculairement aux lignes de champ. La magnétisation est certainement le point le plus important du contrôle par magnétoscopie. Les deux méthodes utilisées sont la **magnétisation directe** c'est-à-dire l'insertion de la pièce à examiner dans un champ magnétique existant et la **magnétisation par passage de courant**. La première méthode permet de produire un champ parallèle à la direction longitudinale de la pièce pour détecter des **défauts transversaux**, la seconde produit un champ de révolution autour de l'axe de la pièce, ce qui convient à la détection des **défauts longitudinaux**.

Pour des pièces pouvant avoir des défauts de toutes orientations, l'utilisation conjointe des deux types de magnétisation est complémentaire.

Après arrêt de la magnétisation, les pièces conservent une aimantation rémanente qui peut être gênante pour leur utilisation ultérieure. Il convient donc de procéder à une désaimantation.

L'examen de flux de fuite magnétique se révèle d'une grande **sensibilité** pour la détection des défauts de surface très fins sur les pièces en acier au carbone et autres alliages ferromagnétiques. Cette technique de contrôle est notamment utilisée pour le contrôle des pièces moulées (criques dans les congés de raccordement, réseaux de fissures superficielles...) des pièces forgées (criques correspondant à des déchirures superficielles, tapures ou fissures survenant au refroidissement, retassures comportant des fissures de décohésion ...), des produits laminés et étirés (dédoublers débouchâtes, reliures, fissures ...). Elle permet également la détection de défauts après traitement thermique ou sur des soudures (fissures, retassures de cratères, manques de pénétration...).

➤ **La détection des défauts volumique :**

Certaines techniques de contrôle permettent de localiser et de dimensionner des défauts présents dans la masse des matériaux (criques internes, porosités, inclusions...). Il s'agit notamment du contrôle par ultrasons, de la radiographie, la thermographie, ou de la mesure du bruit Barkhausen.

Voici un aperçu de ces techniques :

- **Contrôle par ultra-sons :**

Le contrôle par ultrasons est basé sur la génération d'ondes ultrasonores à l'intérieur du matériau, par des transducteurs piézoélectriques et sur l'analyse de leur propagation. Cette technique

s'applique à de nombreux matériaux pourvu qu'ils ne présentent ni une trop forte atténuation ni une anisotropie importante. Les matériaux métalliques, thermoplastiques, composites, céramiques peuvent être contrôlés par ce procédé.

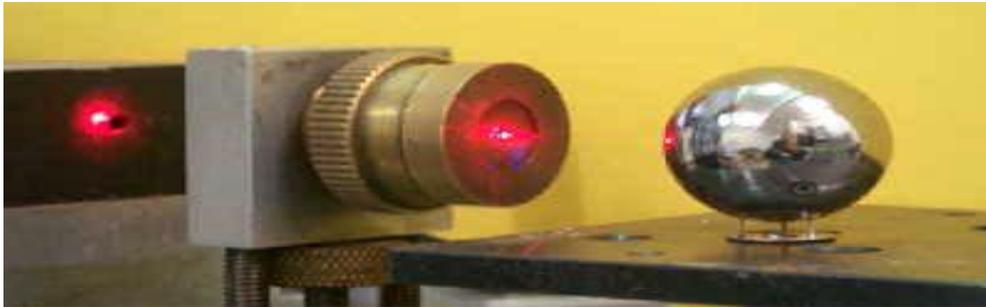


Fig4 : Contrôle non destructif d'un roulement à bille employé en aéronautique
L'onde ultrasonore est générée dans la pièce par un laser.

Les techniques ultrasonores présentent l'avantage d'offrir une grande sensibilité de détection, sur des pièces d'épaisseur importante. De plus, elles ont la particularité de pouvoir se prêter facilement au contrôle automatisé et peuvent être intégrées sur une ligne de production. La sensibilité de détection dépend notamment de la fréquence des ultrasons utilisés, et peut atteindre par exemple 1 mm à 0.2 mm dans le cas de l'acier.

La méthode la plus employée dans le contrôle ultrasonore est l'échographie. Elle consiste à utiliser un seul transducteur en émetteur-récepteur (appareil portable) et permet une inspection du matériau en n'accédant que par un de ses côtés. Les ultrasons émis par le transducteur sont transmis au composant testé par un milieu de couplage tel que de l'eau, de l'huile ou un gel. Le contrôle peut également avoir lieu en cuve d'immersion dans laquelle la pièce est entièrement plongée. Dans ce cas, les palpeurs ne sont plus situés au contact de la pièce mais fixés sur des bras manipulateurs permettant une rotation selon plusieurs axes et des translations dans les trois dimensions.

L'énergie ultrasonore est réfléchiée par le fond de la pièce et par d'éventuelles fissures et discontinuités présentes dans le matériau. On obtient un échogramme, appelé A-Scan (signal brut). La position de l'écho de défaut permet sa localisation dans la profondeur de la pièce et l'amplitude relative des différents échos permet d'avoir des indications sur l'importance du défaut. Les défauts trop proches de la surface sont difficilement détectables.

Il est possible d'obtenir des cartographies de la répartition des défauts soit dans un plan contenant l'axe du palpeur, appelées B-Scan (vue en coupe), soit dans un plan perpendiculaire, alors dénommées C-Scan (vue en plan), ce qui permet une bonne localisation des défauts dans les trois dimensions. Les limitations de cette méthode proviennent du milieu de couplage entre le matériau et les ultrasons qui ne permettent pas l'analyse de matériaux chauds ou poreux. Le contrôle de pièces avec des surfaces contaminées ou en mouvement rapide pose aussi des problèmes. Cette méthode est également assez lente car un balayage mécanique complet de la pièce à contrôler est nécessaire. Pour pallier les problèmes posés par le milieu de couplage, des méthodes ultrasonores sans contact ont été développées.

La génération des ultrasons se fait directement dans le matériau à contrôler par différents moyens susceptibles d'activer les particules du milieu (forces électromagnétiques, impact laser...).

La génération et la détection des ultrasons par laser permettent par exemple d'inspecter des structures à grande distance (plusieurs mètres) et de détecter des défauts de surface. La méthode EMAT, utilisant des forces électromagnétiques, est quant à elle plus appropriée pour les mesures sur site mais elle nécessite une surface conductrice de l'électricité et une faible distance avec l'objet inspecté. Les méthodes ultrasonores sans contact peuvent être utilisées pour l'inspection de pièces chaudes, de géométries complexes ou de structures poreuses ou hydrophobes

- **Le contrôle par radiographie :**

Le contrôle par radiographie consiste à faire traverser le matériau par un rayonnement ionisant (rayons X ou γ) et à recueillir le signal atténué sur un récepteur (film photographique ou capteur électronique) qui convertit ce rayonnement en une image visible. Les rayonnements subissent une absorption proportionnelle à l'épaisseur et à la masse volumique du milieu traversé.



Fig5 : Equipement de radiographie gamma.

Ce contrôle peut s'appliquer à de très nombreux types de matériaux pour mettre en évidence et dimensionner des hétérogénéités telles que des porosités, des soufflures, des amas d'inclusions, des criques, des fissures, des manques de pénétration en soudure..., au stade de la production ou en maintenance. Les défauts se présentant perpendiculairement à la direction du faisceau sont plus difficilement détectables.

La sensibilité de détection dépend de l'énergie du rayonnement, de l'orientation des défauts et de l'épaisseur de la pièce. Elle est classiquement de l'ordre de 1 % à quelques % de l'épaisseur de la

pièce pour les défauts volumiques. De meilleures sensibilités peuvent être obtenues selon la configuration du défaut.

Un des avantages des techniques radiographiques est de fournir une image directement exploitable et archivable. Un examen en temps réel est également possible et le contrôle peut être réalisé avec des équipements portables.

L'utilisation de la radiographie nécessite des précautions particulières en termes de protection des opérateurs contre les rayonnements, conformément à la réglementation en vigueur. C'est une technologie qui s'avère relativement coûteuse et demande une formation des opérateurs de niveau élevé ainsi qu'une grande expérience pour l'interprétation des radiogrammes.

La radiographie ne permet pas d'obtenir de l'information sur la localisation des défauts en profondeur dans la pièce examinée. Il faut pour cela réaliser plusieurs clichés sous des angles différents, ce qui n'est pas toujours possible. La tomographie industrielle, qui repose sur les mêmes principes que la radiographie (atténuation d'un rayon X), permet de construire une image 2D d'une coupe du produit examiné. Cette technique nécessite des investissements importants en matériel, ce qui limite son utilisation au contrôle de grandes séries de pièces ou de composants particuliers dans des industries de pointe (nucléaire, aéronautique, spatial).

- **Contrôle par thermographie :**

Cette technologie est applicable pour le contrôle de défauts volumiques et de défauts de surface.

Le contrôle par thermographie consiste à produire dans la structure à tester un échauffement local homogène à observer l'évolution de la température après un certain temps de latence. Les défauts présents constituent des obstacles à la transmission de la chaleur dans le matériau et donnent naissance en surface à des anomalies thermiques pouvant être détectées par une caméra infrarouge. L'observation et la stimulation peuvent s'effectuer sur la même face (face avant) ou de part et d'autre de la pièce (face arrière). Cette technique est particulièrement bien adaptée à la détection de défauts dans les structures composites à matrice polymère (délaminages) et pour le contrôle de matériaux céramiques, qui sont des conducteurs de chaleur relativement médiocres.

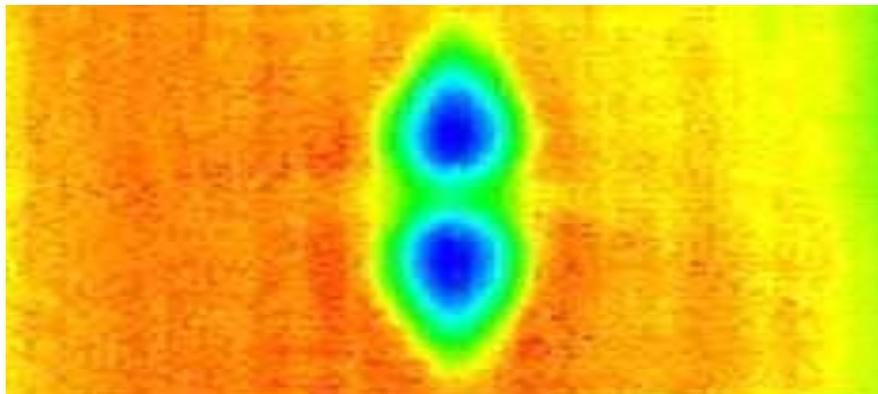


Fig6 : Film du contraste thermique relevé sur un plaque de carbone-époxy ayant reçu un impact.

On distingue la thermographie passive, qui suppose une élévation de température due à un apport de chaleur extérieur, et la thermographie active, qui implique le chauffage de la structure à contrôler par une sollicitation mécanique.

La thermographie infrarouge stimulée (TSI) consiste à chauffer rapidement la surface du matériau inspecté au moyen, par exemple, de lampes flashes et à mesurer l'élévation de température résultante avec une caméra infrarouge. En plus de la détection des défauts, cette technique peut aider à les caractériser. Par l'analyse de l'évolution dans le temps du contraste thermique,

on peut identifier, point par point, la profondeur du défaut qui a donné naissance à ce contraste. L'ONERA a développé une méthode originale d'identification de la profondeur des défauts qui est basée sur l'émergence du contraste. Le résultat de l'analyse donne une carte topographique du volume endommagé dans le matériau.

**Image en contraste inverse
obtenue 0,06 s après le flash**

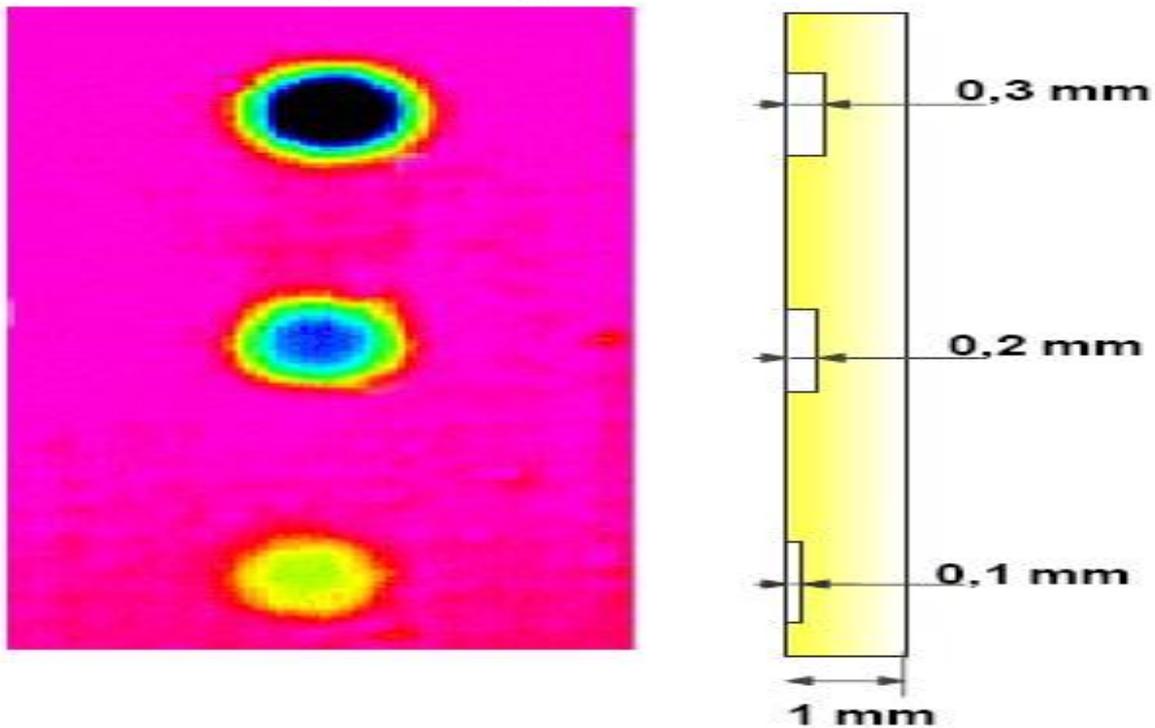


Fig7 : -Détection par thermographie IR de corrosion simulée dans tôle d'aluminium.

La thermographie peut également être utilisée pour détecter des défauts de surface. Une caméra photo thermique combinant un détecteur infra rouge et un laser peut détecter des défauts débouchant de quelques microns à la surface de matériaux métalliques.

La surface à inspecter est dans ce cas chauffée localement au moyen d'un rayon laser focalisé et l'émission infra rouge de la surface à proximité du point de chauffage est mesurée par un réseau de détecteurs.

Une mesure en continu lors du balayage de la pièce permet de reconstituer une image de la surface à examiner sur laquelle apparaissent les défauts. Ce système permet de réaliser un contrôle automatique et à distance (jusqu'à 2 m) mais présente un coût élevé.

2. Le contrôle de la structure interne des matériaux :

Les techniques de contrôle non destructif peuvent être utilisées pour détecter des variations de propriétés ou de structures métallographiques. Parmi celles-ci on trouve la mesure du bruit Barkhausen, les courants de Foucault ou encore le contrôle par ultrasons.

➤ La mesure du bruit barkhausen :

L'effet Barkhausen est dû à une émission locale d'ondes électromagnétiques qui se créent au cœur même des cristaux d'un matériau sous l'effet d'un champ magnétique. Basée sur la microstructure magnétique et sa réorganisation, la technique Barkhausen est très proche du matériau et permet ainsi d'avoir des informations précises sur son **état métallurgique** et son **niveau de contraintes résiduelles**.

Les émissions Barkhausen peuvent être mesurées par l'intermédiaire de sondes en cerclantes ou de sondes de côté constituées de bobines plates posées à la surface de l'échantillon. Le bruit Barkhausen est généralement représenté par sa courbe enveloppe, tracée en fonction du champ appliqué, et qui a la forme d'un pic.

Cette technique, qui s'applique uniquement sur des **matériaux ferromagnétiques**, est notamment utilisée pour le contrôle de traitements superficiels thermiques (trempe) ou physico-chimiques (nitruration). La sensibilité de la technique Barkhausen à la microstructure des aciers offre la possibilité d'estimer l'épaisseur traitée.

La profondeur des traitements de cémentation est plus difficile à apprécier car les structures sont proches (martensite en surface et bain à cœur) avec un gradient très progressif de la teneur en carbone. Pour chaque état métallurgique, une interprétation du signal Barkhausen est réalisée en termes de hauteur, de position et de forme du pic.

➤ Le courant de foucault :

Le contrôle par courants de Foucault, présenté dans la partie consacrée à la détection des défauts de surface, peut également être utilisé pour caractériser **la microstructure des matériaux**. Parmi les paramètres qui influent sur les courants de Foucault, certains sont liés au matériau lui-même. Il s'agit de la conductivité électrique et de la perméabilité magnétique. Dans la mesure où il existe des relations entre la structure métallographique (nature des phases, dimension des différentes phases dans les structures multi phasées...) et les valeurs prises par les paramètres physiques influant sur les courants de Foucault, il devient possible de remonter aux microstructures correspondantes ou, tout au moins, à

leurs variations locales. Un domaine important d'applications concerne l'analyse de **systèmes multi phases** pour lesquels les phases en présence possèdent des propriétés électriques et magnétiques significativement différentes.

Il est ainsi possible de mesurer le taux d'austénite résiduelle dans une matrice erratique ou le taux de martensite d'écrouissage produite lors de la mise en forme à froid d'aciers inoxydables austénitiques instables. On peut également mettre en évidence des modifications de structure induites par des traitements thermiques ou thermomécaniques.

Le contrôle par courants de Foucault permet également d'apprécier les variations de conductivité et de perméabilité apportées par un traitement de surface ou un revêtement et par conséquent d'évaluer l'épaisseur affectée. Il est possible par cette méthode de mesurer l'épaisseur de revêtements conducteurs sur substrats conducteurs, de revêtements isolants sur substrats conducteurs et de revêtements conducteurs sur substrats isolants (cuivre sur époxy). Il est également possible de mesurer l'épaisseur de couches nitrurées lorsque ces dernières se différencient du substrat (par exemple couche nitrurée sur acier inoxydable).

➤ **Le contrôle par ultrason :**

Certaines des interactions entre les ondes ultrasonores et la matière peuvent être mises à profit pour caractériser de manière non destructive **l'état microstructural et l'état de contrainte des matériaux**. Ainsi, la mesure de l'atténuation d'ondes ultrasonores dans l'épaisseur d'une tôle peut par exemple permettre de remonter à la **taille de grains**. La méthode appliquée en laboratoire et utilisant des ondes toutefois transversales permet de déterminer la grosseur des grains sur des aciers au carbone avec une précision d'environ 0,5 ASTM. Des transpositions en ligne sont possibles. À noter que le principe mis en œuvre conduit à un moyen-âge sur l'épaisseur et donne donc une valeur moyenne de taille de grains. Des modèles permettent également de relier les vitesses de propagation des ondes aux valeurs **des contraintes**.

Cette méthode, appelée biréfringence **acoustique**, est utilisée industriellement, par exemple dans le cas du contrôle des roues ferroviaires : des précisions de l'ordre de 20 MPa sur le niveau des contraintes sont couramment avancées. Il faut toutefois remarquer qu'une des difficultés de l'utilisation des ultrasons pour ce type de mesure est la présence d'une anisotropie du matériau qui induit des effets similaires, voire plus importants, sur la vitesse de propagation des ondes. Diverses méthodes sont développées pour séparer les deux phénomènes.

3. Classement et performances des procédés de CND :

Les procédés de contrôle non destructif résultent de la mise en œuvre des principes et techniques physiques précédents. Ils sont assez nombreux. Certains sont anciens, d'autres récents ; certains sont simples, d'autres complexes ; certains sont très employés, d'autres peu. On les classe habituellement en deux familles selon qu'ils favorisent la détection des défauts de surface ou des défauts internes. Le tableau **1** dresse la liste des procédés actuellement utilisés en contrôle industriel et

résume leurs principes et leurs champs d'application spécifiques. Les performances des procédés de contrôle non destructif résultent à la fois de considérations théoriques et pratiques.

Méthode	Défauts détectés	Matériaux contrôlés	Avantages et limites
Ressuage	Default débouchant Sensibilité: 80µm /200µm (pénétrant coloré) et 1µm/30µm (pénétrant Fluorescent)	Métaux plastique Céramique composites	Pour des matériaux compacts Et non poreux
Courants de Foucault	Défauts de surface Caractérisation de la Microstructure du Matériaux	Matériaux conducteurs électriques	Contrôle fidèle Contrôle en continu possible (utilisé pour le contrôle en fabrication des tubes et barres)
Magnéto-scopie	Défauts débouchant et sous cutané	Matériaux ferromagnétique	Grandes sensibilités. Importance de l'orientation Des défauts par rapport aux Lignes de champs. Contrôle unitaire. Désaimantation des pièces Après contrôle.
Ultrasons	Défauts internes. Caractérisation de la microstructure du matériau et des niveaux de contrainte	Métaux plastique céramique composites	Appareils portables. Contrôle en continu possible Cartographie de la préparation Des défauts. nécessite d'un milieu de couplage pour les méthodes classiques méthodes sans contact disponible.

radiographie	Défauts interne	Métaux plastiques Céramique composites	Contrôle unitaire importance de l'orientation des défauts perméabilité aux rayonnements ionisants protection des opérateurs contre les rayonnements
thermographie	Défauts interne et de surface	Composites Plastique Métaux Céramique	bien adapté pour le contrôle des composites, polymères ou céramique (délaminage).
Bruits de barkhausen	Caractérisation de la structure métallurgique et de niveau de contrainte	Matériaux ferromagnétique.	Contrôle des traitements Superficiels thermique ou physico-chimiques.

Tableau 1 : les méthodes de contrôle non destructif et leurs caractéristiques

Remarque:

D'après le tableau précédent on remarque que ;

- le champ d'application de contrôle non destructif (CND) est très large.
- chaque méthode de (CND) elle a leur domaine d'utilisation.
- diversité dans les types des défauts une méthode et d'autre.
- chaque méthode de (CND) ayant des matériaux spécifiques qui peuvent les contrôler.

➤ **Utilisation des procédés de CND :**

Au-delà de la mise en œuvre propre à chacun des procédés de contrôle décrits plus haut, un projet ou une réelle opération de contrôle implique un certain nombre de considérations et de facteurs dont l'ignorance pourra conduire à des échecs tels qu'une mauvaise **fiabilité** de la méthode, du matériel utilisé ou des résultats annoncés, ou encore une rentabilité économique insuffisante de l'opération de contrôle, ces deux aspects allant d'ailleurs souvent de paire. C'est ainsi qu'il s'agit en fait de prendre en compte, non seulement les paramètres physiques et techniques mais aussi l'importance du **facteur**

humain et des **procédures d'emploi** et la nécessité éventuelle d'avoir à financer des **travaux préalables** de mise au point ou de faisabilité du procédé retenu.

- **Les procédures d'emploi :**

Des procédures précises et bien suivies doivent guider l'utilisation des procédés dans une opération de contrôle. Elles permettent de garantir l'objectivité, la reproductibilité les performances limites, sinon la fiabilité totale d'un contrôle.

Les procédures doivent être établies tant pour le matériel utilisé que pour les paramètres et conditions de son utilisation. Elles résultent généralement d'un accord commun entre les diverses parties concernées par le contrôle ; elles sont nombreuses mais on cherche en fait à éviter la confusion en édictant des **normes** et **spécifications** à caractère plus général. Il en est ainsi, par exemple, pour les procédures de qualification des palpeurs ultrasonores, pour les étalons de certains défauts artificiels, pour le réglage des paramètres des appareillages de contrôle à ultrasons, à courants de Foucault (choix de la fréquence, du seuil de détection significatif, etc.).

Les spécifications peuvent de même concerner le choix du procédé, de la méthode, de la préparation de la pièce à contrôler, de la façon d'effectuer les sondages lorsqu'il s'agit d'un contrôle purement manuel, enfin de la façon d'interpréter et de consigner les résultats obtenus. Le contrôle automatique n'exclut pas totalement la notion de procédure qui, dans ce cas, doit concerner plus spécialement les étalonnages et le réglage du matériel.

- **Les études préalables :**

Des mises au point sont souvent indispensables lorsqu'on se trouve en présence d'un nouveau type de contrôle à effectuer. L'expérience aidant, si le choix du procédé est évident, on pourra se contenter d'un essai de faisabilité réalisé éventuellement avec le concours d'un fabricant ou d'un distributeur de matériel. S'il s'agit d'un problème difficile dont on estime qu'il est peu probable de trouver une solution avec le matériel et les méthodes couramment disponibles, il faudra recourir à une étude préalable et même éventuellement à des recherches devant aboutir à la mise au point de nouveaux procédés. Cette dernière démarche est, par exemple, couramment pratiquée dans les laboratoires des industries pour lesquelles les opérations de contrôle non destructif constituent des défis quant à la sécurité (industrie nucléaire) ou à la productivité (sidérurgie....).

- **Le personnel de contrôle :**

Des compétences adaptées, de la méticulosité et si possible une bonne expérience constituent des conditions indispensables pour concevoir, organiser, préparer, réaliser et conclure une opération de contrôle non destructif avec succès. Les compétences nécessaires s'appuient sur une bonne connaissance des techniques et procédés de contrôle.

mais aussi sur une connaissance approfondie du matériau contrôlé quant à sa structure, son mode de fabrication la nature des défauts susceptibles d'être décelés, leur localisation probable. C'est ainsi que les techniques de contrôle ont souvent leur utilisation décrite en détail par nature de produits et nous renvoyons le lecteur aux ouvrages et articles spécialisés cités en référence : contrôle des pièces métalliques moulées, forgées, laminées ; contrôle des soudures, des brasures, des collages contrôle des non-ferreux, des plastiques, des composites, des bétons, etc.

Le niveau de connaissance requis pour chacune des 3 catégories d'intervenants en contrôle non destructif est garanti dans chaque pays par une procédure de certification.

en France, c'est la Confédération Française pour les Essais Non Destructifs, la **COFREND** qui délivre ces certificats sur la base d'examens théoriques et pratiques organisés à la fois par méthodes et par domaines d'applications industrielles.

La formation en contrôle non destructif est assurée par des organismes reliés à l'université aux grands centres techniques professionnels ou encore à des sociétés de service et de diffusion du matériel spécialisé.

II.2. Conclusion :

Les perspectives d'extension du champ d'application des procédés de contrôle non destructif sont très grandes, en particulier en direction des secteurs industriels plus proches de la consommation courante que de la haute technologie.

Chapitre III :

Le contrôle non destructif par ultrasons

III.1. PRINCIPE PHYSIQUE DOMAINE D'APPLICATION

III.1.1. ULTRASONS

III.1.1.1. PRINCIPE

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 trace horizontale.

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

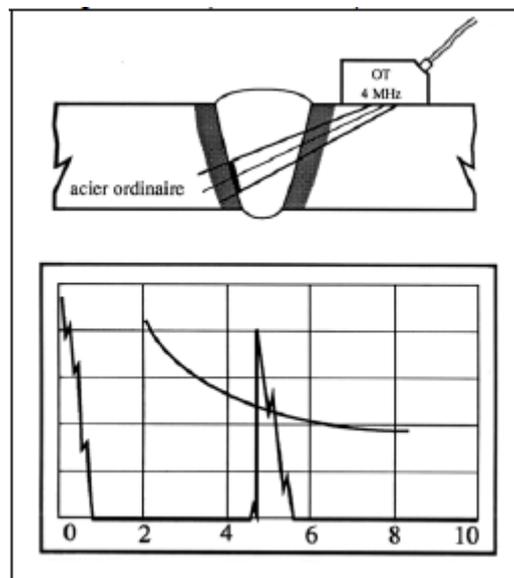


Fig1 :Principe de l'examen par ultrasons

III.1.1.2. DOMAINE D'APPLICATION

a/ Matériaux contrôlables

Si tous les matériaux sont susceptibles de propager des vibrations mécaniques, leurs structures et notamment l'amortissement interne, l'hétérogénéité et l'anisotropie qu'elles induisent peuvent réduire les possibilités d'utiliser les méthodes de contrôle ultrasonore.

Les aciers non alliés et faiblement alliés ne présentent pas ces inconvénients. De par l'étendue de leurs emplois comme constituant de structure, ils font l'objet de la majorité des recherches de défauts dans les soudures.

Le contrôle des alliages légers, des fontes, des alliages cuivreux, des aciers alliés et plus particulièrement des aciers inoxydables austénitiques est délicat en raison de la structure grossière de ces matériaux. L'emploi de techniques et de matériel spécifique est souvent nécessaire.

Les matériaux composites sont difficilement contrôlables de par l'hétérogénéité de leurs constituants.

b/ Recherche et caractérisation des défauts dans les soudures

La recherche de l'adéquation entre la sécurité et le coût du contrôle d'une structure conduit à réduire le champ d'investigation. Ainsi, par exemple, la recherche des défauts transversaux n'est pas systématique. Ce sont les normes, codes et spécifications qui fixent les modalités du contrôle et son étendue. La localisation des défauts et la détermination de leurs longueurs sont des opérations relativement aisées et précises.

L'identification d'une anomalie et l'estimation de sa hauteur, constituent, lors d'un contrôle manuel classique, des opérations dont le résultat peut être entaché d'erreurs importantes.

Des techniques récentes sont susceptibles de faire évoluer favorablement la situation dans ces deux derniers domaines.

III.1.2. NORMALISATION

III.1.2.1. NORMES GENERALES

NF EN 473 Qualification et certification du personnel en contrôles non destructifs Principes généraux (août 2008)

NF EN ISO 6520-1 Classification des défauts dans les soudures par fusion des métaux (septembre 2007)

NF EN 25817 Assemblages en aciers soudés à l'arc (novembre 1992)

Guide des niveaux d'acceptation des défauts

4.2.2 ARCHITECTURE DES NORMES EUROPEENNES EN CND

<p>NF EN 12062 (octobre 97) Contrôles non destructifs des assemblages soudés Règles générales pour les matériaux métalliques</p>



<p>NF EN 1330 Contrôles non destructifs Terminologie</p>	<ul style="list-style-type: none"> -1 : liste des termes généraux -2 : termes communs aux méthodes d'essais non destructifs -3 : termes pour le contrôle radiographique industriel -4 : termes utilisés en contrôle ultrasonore -5 : termes utilisés en contrôle par courants de Foucault -8 : terminologie -9 : termes utilisés en émission acoustique
---	--

Technique	Contrôle visuel	Ressuage	Magnétoscopie	Radiographie	Ultrasons	Courants de Foucault
Méthode	EN 970	EN 571-1	EN 1290	EN 1435	EN 1714	EN 1711
Niveau d'acceptation	EN 25817 EN 30042	EN 1289	EN 1291	EN 12517	EN 1712	

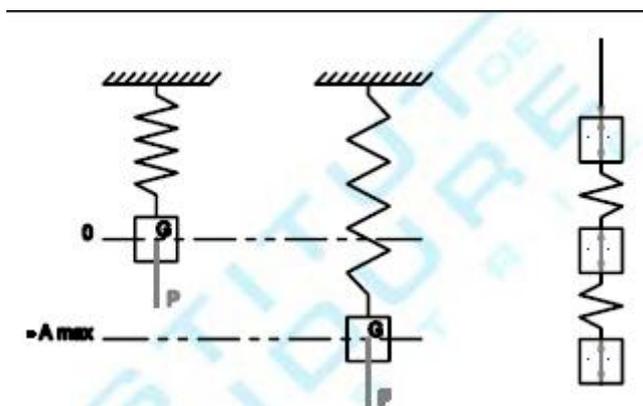


Fig2 ;Exemple de mouvement oscillant mécanique

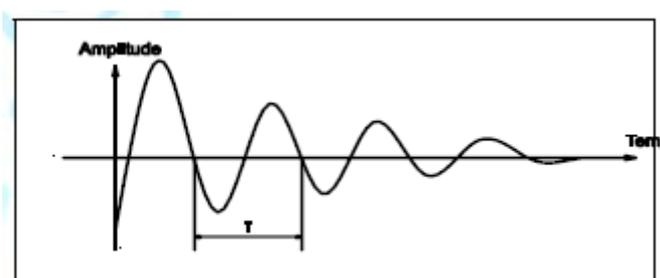


Fig3 :Amplitude du mouvement d'un élément de matière en fonction du temps

III.2.GENERALITES

III.2.1. VIBRATION MÉCANIQUE

1. PRESENTATION

Les ondes ultrasonores sont des vibrations mécaniques qui se propagent dans les milieux élastiques tels que les solides ou les fluides.

L'atome étant électriquement neutre, comporte autant de protons (charge électrique positive) que d'électrons (charge électrique négative).

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).

2. GRANDEURS CARACTERISTIQUES D'UN MOUVEMENT PERIODIQUE

a/ Définitions

Période T (en s) : La période d'une onde sinusoïdale est la durée au bout de laquelle la situation d'un point quelconque sur la courbe sinusoïdale redevient la même.

Longueur d'onde λ (en m) : La longueur d'onde est la distance parcourue par la vibration pendant une période. Elle dépend du matériau dans lequel l'onde se propage.

Fréquence f (en Hz) : La fréquence est le nombre d'événements se produisant par seconde, c'est donc l'inverse de la période. La fréquence est la grandeur usuelle en ultrasons.

Vitesse de propagation de l'onde (en m/s) : Elle ne dépend que du matériau et du type d'onde.



Fig4: Longueur d'onde

b/ Relations usuelles : $V = \frac{\lambda}{T}$ ou $\lambda = V \cdot T$ $\lambda = \frac{V}{f}$ ou $V = \lambda \cdot f$

c/ Conclusion : choix de la fréquence

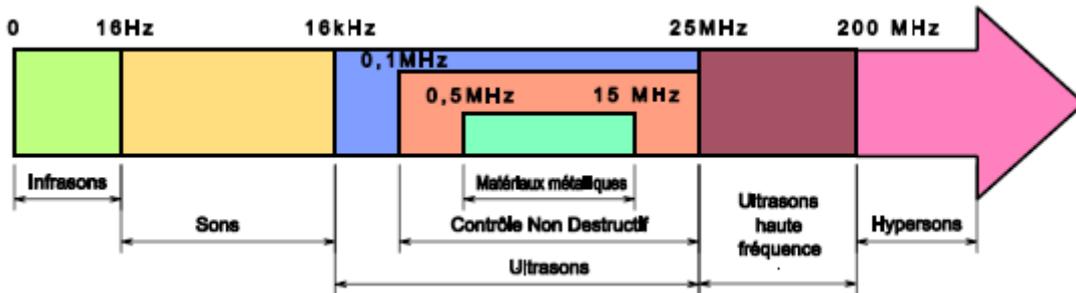


Fig5 : Représentation spectrale des US



Fig6 : Domaine d'application courant des CND

La détection est conditionnée par le rapport $r = \frac{l_{min}}{\lambda}$ min l dimension de la discontinuité et longueur d'onde.

Par convention, en contrôle manuel, il est d'usage de considérer que la détection est possible si le rapport r est supérieur à 2. Ainsi une discontinuité doit présenter une longueur minimale l inde l'ordre de la demi-longueur d'onde pour perturber la propagation des ondes, et donc pour être détectée : $l_{min} = \frac{\lambda}{2} = \frac{V}{2 \cdot f}$

La recherche de petits défauts nécessite donc l'emploi de fréquences élevées. Celles-ci sont d'autant plus sensibles aux discontinuités structurelles du milieu de propagation (joints de grains) et sont donc rapidement atténuées en générant des indications parasites. Le choix de la fréquence de contrôle est: donc fonction du type de défauts recherchés, de la profondeur de sondage, du matériau et de sa structure. Ainsi pour l'acier, en onde de type longitudinale, la détection des défauts dont l'ordre de grandeur est le millimètre nécessite la mise en œuvre d'une fréquence au moins égale à :

*

$$f = \frac{V}{2 \cdot l_{min}} = \frac{6000}{2 \times 1 \times 10^{-3}} = 2 \text{ MHz}$$

La détection de défauts extrêmement petits nécessite l'emploi de fréquences très élevées, parfois très supérieures à 25 MHz. En pratique c'est le plus souvent la norme, le code ou la spécification qui fixe la fréquence à utiliser.

III.2.2. CARACTERISATION DES MATERIAUX ELASTIQUES

III.2.2.1. CONTEXTE ET DEFINITIONS :

Dans le cadre de ce manuel, nous nous limiterons à quelques éléments de résistance des matériaux ; notions qui nous permettront d'introduire les connaissances de base nécessaires à la pratique du contrôle ultrasonore.

Nous prendrons les hypothèses suivantes relatives au matériau considéré :

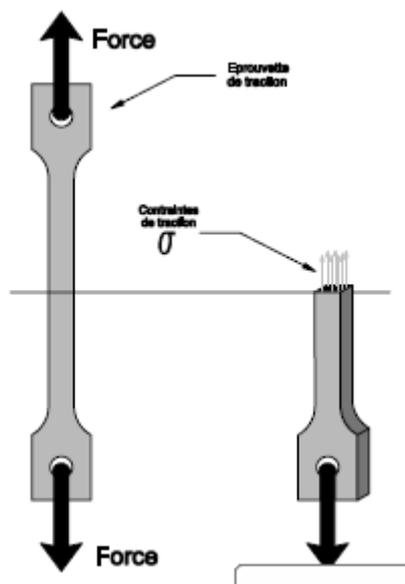


Fig7 : Eprouvette de traction e notionde contrainte

- Continuité** : Sans défauts, sans changement de nature.
- Homogénéité** : Mêmes caractéristiques en tout point.
- Isotropie** : Mêmes caractéristiques dans toutes les directions.

Notion de contrainte : La contrainte se définit comme une force par

unité de surface : $\sigma = \frac{F}{S}$

σ contrainte en Pascal (Pa), unité usuelle le Mpa

F force en Newton (N).

S surface en mètres carrés (m^2).

5.2.2 MASSE VOLUMIQUE

La masse volumique ou masse propre se définit comme la masse par unité de volume : $\rho = \frac{M}{V}$

masse volumique en kilogramme par mètre cube : $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$.
 M masse en kilogramme (kg).

V volume en mètre cube m^3

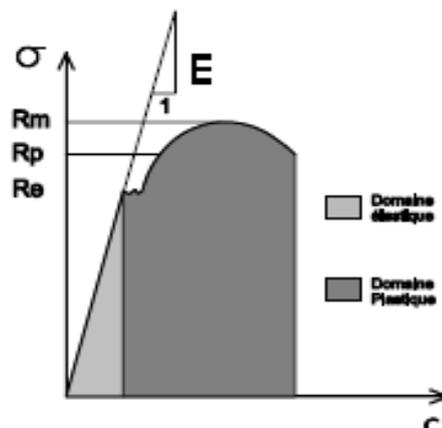
III.2.2.2. ESSAI DE TRACTION

L'essai de traction est un des essais mécaniques les plus répandus. Son analyse permet de déterminer des propriétés élastiques simples pratiques et usuelles.

Comme il est illustré sur la figure en regard, on applique un effort de traction croissant sur une éprouvette calibrée usinée dans le matériau à tester et on enregistre l'allongement et le rétrécissement correspondant.

L'application des formules de base permet de tracer la courbe caractéristique de l'essai que l'on appelle courbe de traction ainsi que le calcul de certaines propriétés élastiques :

- le module de Young.
- Les limites R_e , R_{m} , R_p
- le coefficient de Poisson.



III.2.2.3. CONSTANTES ELASTIQUES USUELLES

a/ Module de YOUNG E ou module d'élasticité longitudinal

Dans le domaine élastique (cf. figure en regard), la contrainte est proportionnelle à l'allongement. La relation contrainte déformation est définie par la loi de HOOKE dans laquelle E caractérise l'allongement relatif en fonction de la contrainte : $\sigma = E \cdot \epsilon$

σ Contrainte normale en Pa ou MPa.

E Module de YOUNG ou module d'élasticité longitudinal en Pa ou MPa.

L et L_0 Déformation longitudinale (sans dimension) : $\epsilon_L = \frac{L}{L_0}$

Pour les aciers, E est de l'ordre de 200000 MPa.

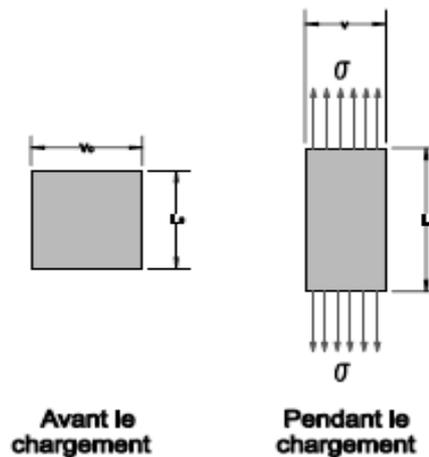
b/ Coefficient de POISSON

Le coefficient de POISSON caractérise la contraction en fonction de l'allongement :

ν Coefficient de POISSON (sans dimension).
$$\nu = \frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_L}$$

L ε Déformation longitudinale (sans dimension) :
$$\varepsilon_L = \frac{L - L_0}{L_0}$$

T ε Déformation transversale (sans dimension) :
$$\varepsilon_T = \frac{V - V_0}{V_0}$$

**III.2.2.4. MODULE DE COULOMB OU MODULE D'ELASTICITE TRANSVERSALE**

Le module de COULOMB, noté G ou μ caractérise le glissement relatif ou déviation dans le domaine élastique :

$$\tau = G \cdot \frac{\Delta y}{\Delta x}$$

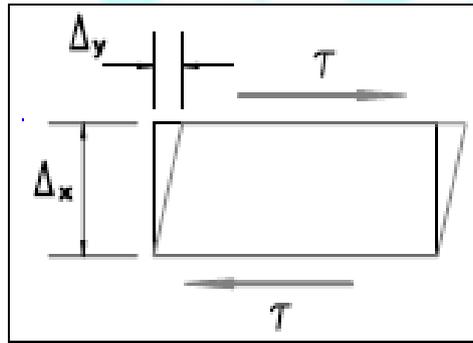
G Module de COULOMB en Pa ou MPa.

τ Contrainte tangentielle ou de cisaillement en Pa ou MPa.

y Δ Sans dimension, voir figure.

x Δ Sans dimension, voir figure.

Pour les aciers, le module de G est de l'ordre de 80000 Mpa.



III.2.2.5.VARIATION DES CARACTERISTIQUES :

a/ Influence de la température La température influence directement les caractéristiques suscitées, ainsi lorsque la température augmente :

- La masse volumique diminue.
- Le module de YOUNG et le module de COULOMB baissent.
- Le coefficient de POISSON augmente.

Ces variations influencent directement le contrôle par ultrasons et deviennent sensibles à partir de 200°, température à partir de laquelle il faut préchauffer les pièces de référence.

b/ Influence du mode d'obtention de la pièce et de sa structure Nous avons supposé que le matériau était homogène, isotrope et continu. Le matériau réel à contrôler présente à des degrés divers des hétérogénéités, des discontinuités structurales, et des caractéristiques différentes en fonction de la direction de sollicitation (moyen d'obtention tel que laminage ou forgeage par exemple).

En conséquence il sera nécessaire d'ajuster les pièces de référence aux matériaux contrôlés ainsi qu'à la direction de propagation des trains d'onde.

Ainsi, pour certaines applications sensibles, les pièces de référence sont usinées dans des échantillons identiques à l'assemblage contrôlé aussi bien en matière qu'en géométrie et mode opératoire de soudage.

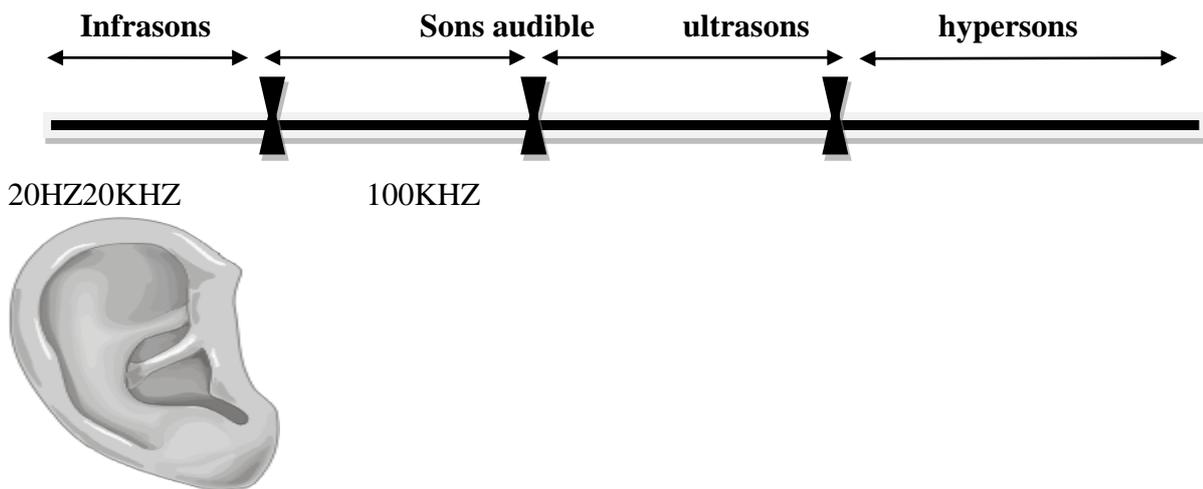
❖ Les ultrasons :

✓ Rappelle : Sons et ultrasons

1) Le son :

Le son est une perturbation d'un milieu matériel élastique en général consécutive à l'action d'une source qui impose au milieu des vibrations forcées de fréquence égale à celle de la source.

20 Hz < fréquence des sons < 20 kHz

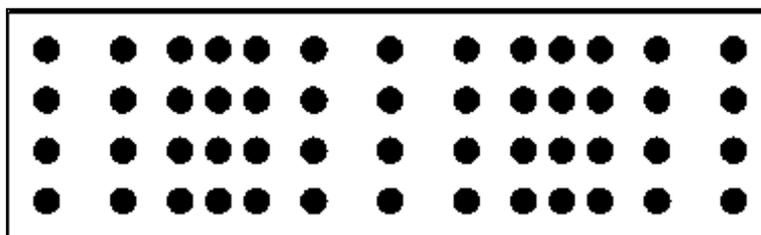


✓ L'onde acoustique :

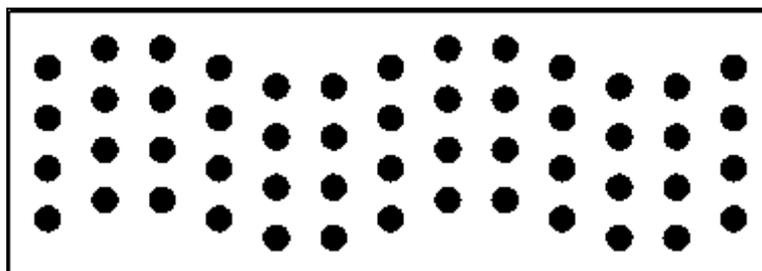
.Onde de vibration longitudinale se propageant de proche en proche dans un milieu matériel (solide, liquide, gaz).

.Les sons se propagent dans les milieux élastiques, qui transmettent l'état de compression ou de dilatation de proche en proche, sans qu'il y ait transport de matière à distance.

Sens de propagation de l'onde



Onde longitudinale



Onde transversale

Propriétés physiques :

- Les sons ne se propagent pas dans le vide.
- Il n'y a pas de transport de matière.
- mouvements vibratoires des particules de part et d'autre de leur position d'équilibre.
- phénomènes de compression et de relaxation successifs transmis aux molécules voisines.

Les sons :

- Deux paramètres des vibrations acoustiques sont particulièrement importants :

.La fréquence

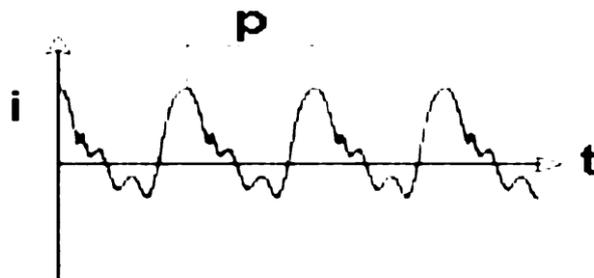
.L'intensité

Les différents types de sons :

Son pur ;

– Onde sinusoïdale plane

– Vibration caractérisée par une seule fréquence.



Son musical

Son complexe :

– Résultent de l'association de plusieurs ondes acoustiques de fréquences, de phases et/ou d'amplitudes différentes

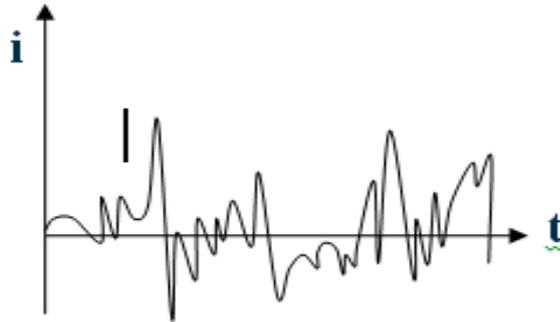
– deux types

- Sons complexes **périodiques**

-Somme de fonctions sinusoïdales de fréquences multiples entières d'une fréquence dite fondamentale.

- Fréquences multiples s.

- Sons complexes **non périodiques** ou bruits (tambour,...)

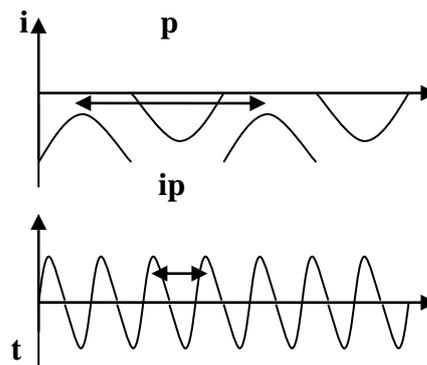
**Bruit**

❖ Hauteur ou tonie :

- Qualité physiologique qui fait dire si un son est grave ou aigu
- Fréquence $f = 1/T$
 - Nombre de cycles d'oscillations par seconde produites par une source sonore et les Particule du milieu.
 - Exprimée en seconde-1 ou hertz (Hz)
- Kilohertz (kHz) : 1 000 cycles par seconde

- Liée à la fréquence d'un son

- Sons graves: fréquences basses
- Sons aigus : fréquences élevées



- Oreille humaine : 16 à 20 000 Hz.
- Moins de 16 Hz: infra-sons (vibrations trop lentes).
- Plus de 20 000 Hz: ultra-sons (vibrations trop rapides).
- Conversation : 100 à 8 000 Hz.
- Musique: 64 à 12 000 Hz.
- Evolution avec l'âge chez l'homme : la presbyacousie

– Réduction de la perception des hautes fréquences supérieures à 12 kHz.

- Différent chez l'animal

– le chat peut percevoir des sons jusqu'à 25 kHz.

– le chien jusqu'à 40 kHz.

– le dauphin jusqu'à 100 kHz.

– la chauve-souris jusqu'à 160 kHz.

❖ Force sonore ou sonie

- Qualité d'un son qui fait dire qu'il est fort ou faible.

- Amplitude = puissance acoustique = intensité du son mesurée en watt/m^2 , puissance/surface

- **Sonie**, sensation liée

– essentiellement à la **puissance acoustique surfacique (PAS)** du son ou W

– mais aussi à la fréquence F du son

- 2 sons de même PAS mais de fréquences différentes ont en général une sonie différente

– Sensation de sonie exprimée en phone (unité physiologique sans dimension)

❖ Puissance acoustique : le décibel (dB)

– **Puissance acoustique surfacique (PAS)**

- La puissance est proportionnelle au carré de la pression :

$$W = P^2/Z \quad (Z \text{ impédance acoustique})$$

- le **seuil** d'audibilité à 1000 Hz exprimé est obtenu pour une puissance surfacique

de 10^{-12} W/m^2

– **Pression acoustique**

- Dans l'air, la pression acoustique liminaire à 1 000 Hz est de $2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$

($1 \text{ Pa} = 1 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-2}$)

- Dans l'air la gamme des pressions acoustiques s'étend de $2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$ à 20 Pa

– **l'intensité acoustique**

L'intensité acoustique exprimée en décibels (dB), est égale à: $I_{\text{dB}} = 10 \log (W/W_0)$

- W : puissance acoustique surfacique

- W_0 : puissance acoustique surfacique de référence qui est par convention de l'échelle

Des dB SPL: $W_0 = 10^{-12} \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} = 10^{-12} \text{ watt} \cdot \text{m}^{-2}$

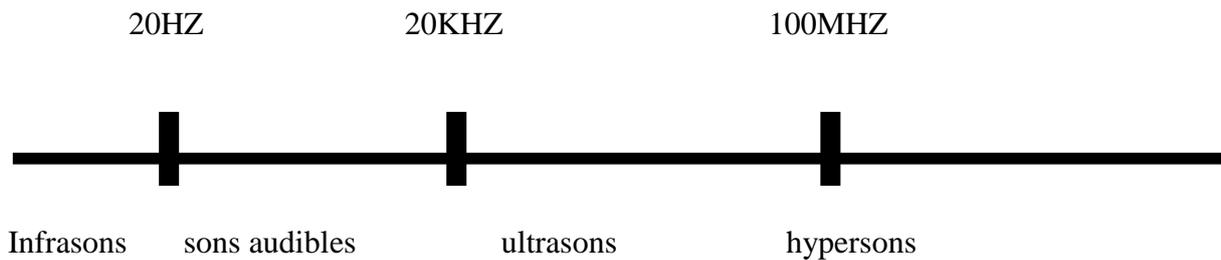
- Ainsi pour :

$$W = 10^{-12} \text{ watt} \cdot \text{m}^{-2} \quad \longrightarrow \quad I = 10 \log (10^{-12} / 10^{-12}) = 10 \log 1 = 0 \text{ dB}$$

2) L'onde Ultrasons :

Les ultrasons sont des vibrations élastiques d'origine mécanique qui se propagent dans les milieux matériels fluides ou solides, jamais dans le vide. Les ultrasons sont de même nature que les sons mais de fréquence plus élevée.

20KHZ < fréquence de l'onde ultrason < 100MHZ



En C.N.D. on utilise la bande de 0,5 à 25 MHz

- Les longueurs d'onde des ultrasons sont identiques à celles des ondes hertziennes millimétriques, cela explique certaines propriétés communes (propagation en ligne droite, phénomènes de réflexion, réfraction, diffusion, interférence, zones d'ombre dues aux lacunes-obstacles).
- Les ultrasons génèrent aussi des densités d'énergie importantes: application industrielle (soudage) et médicale (chauffage de tissus).
- La pression acoustique considérable trouve elle aussi un large domaine d'application (augmenter par cavitation le pouvoir oxydant de l'eau, dégazage des bains de fusion en métallurgie, obtention de nouveaux alliages en rendant miscibles des métaux réputés non miscibles, augmentation de la dureté et de la profondeur de trempé dans les traitements thermiques, etc....).

III.2.3. PROPRIETES DES ULTRASONS :

1- THEORIE VIBRATOIRE

- ♦ Une onde est le lieu géométrique des particules dans le même état vibratoire.
- ♦ Tout mouvement ondulatoire répond à l'équation suivante:

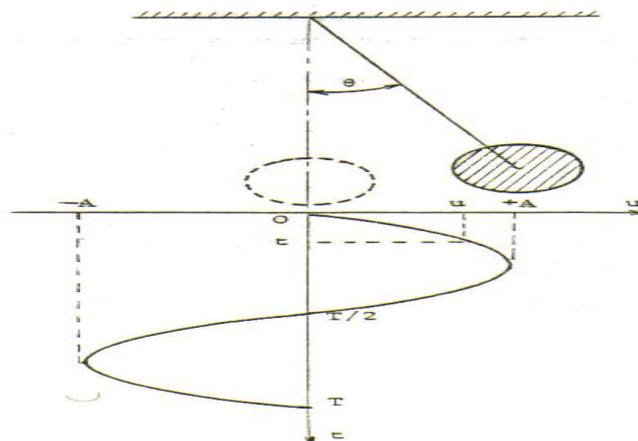
$$u = A \sin \omega t$$
- ♦ Le temps nécessaire à une oscillation est la **période T**
- ♦ Le nombre d'oscillations par seconde est la **fréquence F**.

u = élongation instantanée

A = élongation maximale

ω = pulsation

T = temps



- La distance parcourue par l'onde pendant une période s'appelle longueur d'onde λ . C'est aussi la distance parcourue pendant une oscillation : $\lambda = C.T = C/F$

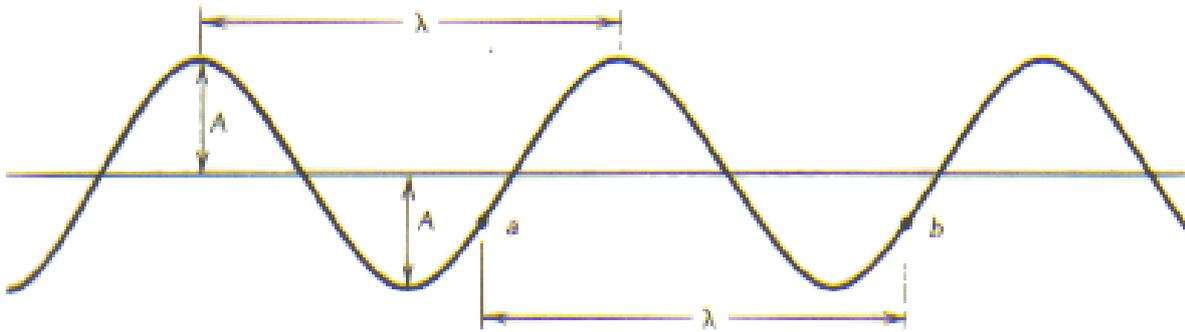
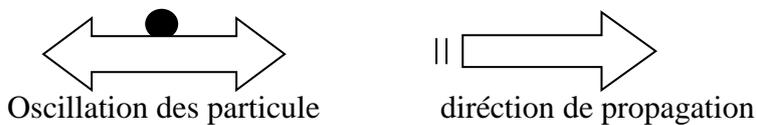


Fig8- Onde sinusoïdale d'amplitude A et de longueur d'onde λ .

2) Mode de propagation

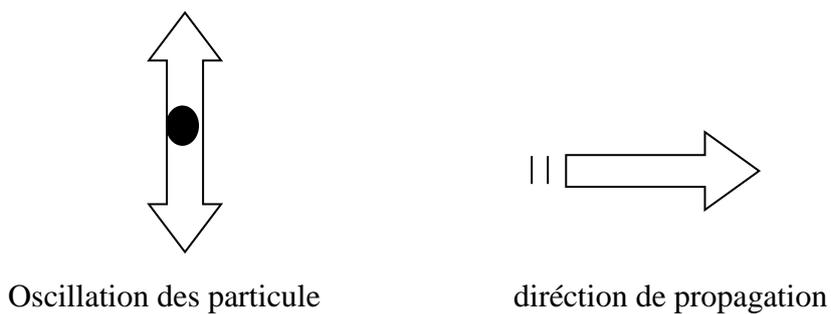
✓ Onde longitudinale ou de compression :

Les particules du milieu vibrent suivant la direction de propagation de l'onde .



✓ Onde transversale ou de cisaillement :

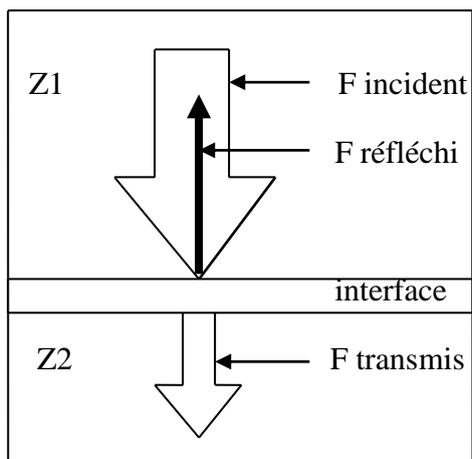
Les particules du milieu vibrent suivant l'axe perpendiculaire à la direction de propagation.



3) Interactions avec la matière

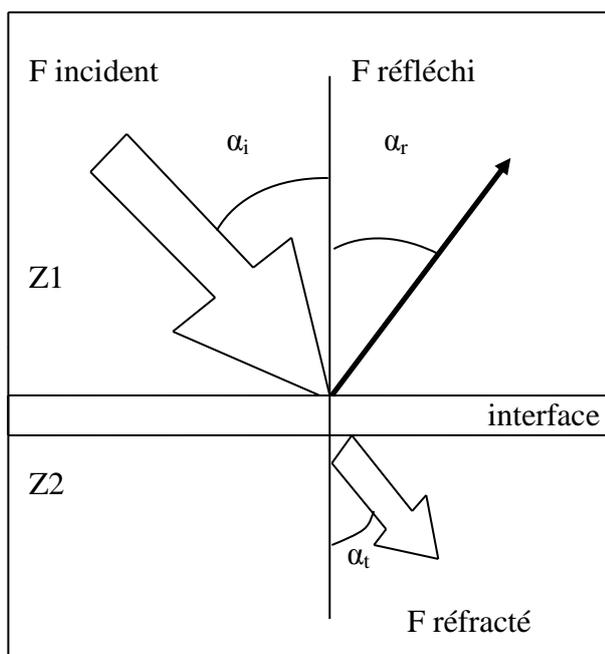
- réflexion / réfraction
- diffusion
- absorption

réflection :



- Incidence normale

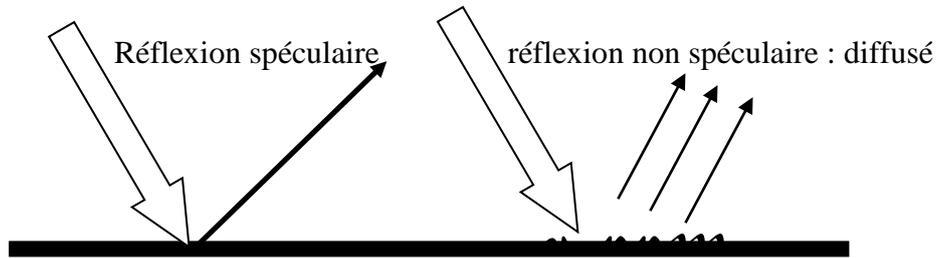
✓ **réfraction :**



- Incidence oblique

$$\frac{\sin \alpha_i}{\sin \alpha_t} = \frac{C_1}{C_2}$$

✓ **Diffusion**



Monodirectionnelle Fort amplitude

pluridirectionnelle faible amplitude

✓ **Absorption**

- Loi exponentielle : $I = I_0 e^{-\alpha x}$
- x est l'épaisseur traversée
- α est le coefficient d'absorption (en dB/Cm/Mhz)

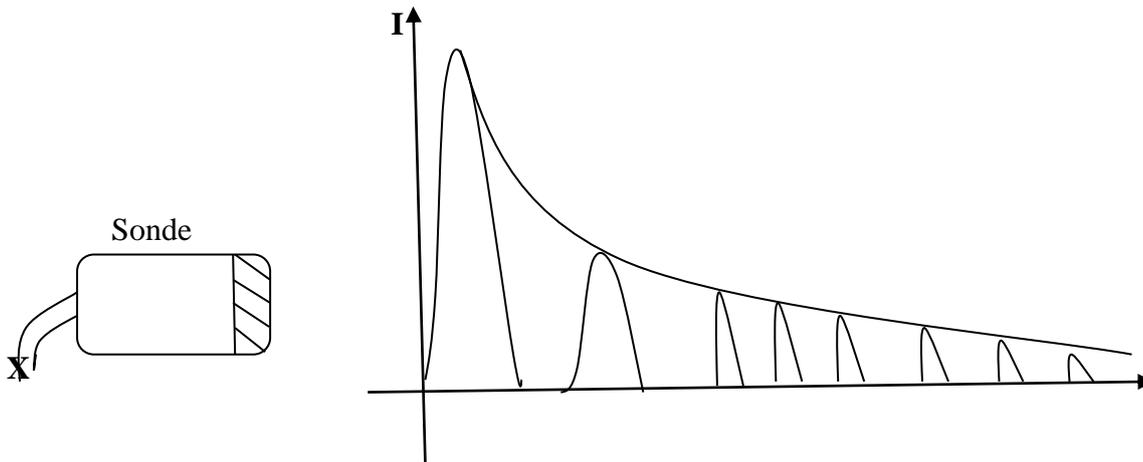


Fig 9 : Interactions avec la matière réflexion / réfraction/ diffusion / absorption

Exemple pour quelque tissu :

Tissu	A
Sang	0.1
graisse	0.5
Foie	1
muscle	1.5
Os	10
poumon	20

1) **L'impédance acoustique** : Tapez une équation ici.

• l'impédance acoustique Z_a est le rapport de la pression effective sur la vitesse de l'onde :

$$Z_a = P_a / V_a$$

• le coefficient de réflexion $R = I_r / I_i = \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_2 + Z_1} \right)^2$

• le coefficient de transmission $T = I_t / I_i = \frac{4 \cdot Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2}$

• notons que $R + T = 1$

Exemple pour quelque tissu :

Tissu	ρ (Kg / m ³)	Z (kg / m ² . s)	C (m / s)
Cerveau	1.03 .10 ³	1.60 .10 ⁶	1555
Foie	1.06 .10 ³	1.66 .10 ⁶	1566
Eau	1.00 .10 ³	1.52 .10 ⁶	1500
Poumon	0.4 .10 ³	0.26 .10 ⁶	650
Squelette	1.6 .10 ³	5.50 .10 ⁶	2500 - 4000
*Air *	1.293	4.28 .10²	331

2) Célérité :

- La célérité est la vitesse de propagation de l'onde ultrasons dans le différent milieu traversée.

▪ Dans les fluides :

- $\rho = \text{masse volumique} = (\text{kg.m}^{-3})$
- $X = \text{coefficient de compressibilité adiabatique} (\text{Pa}^{-1})$

$$\text{Célérité ; } C = \sqrt{\frac{1}{\rho X}}$$

▪ Dans les solides :

- E : module de Young (Pa) correspond à la contrainte mécanique qui doublerait la longueur du matériau.
- Plus E est grand plus le matériau est rigide

$$\text{Célérité ; } C = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

• Module de Young :

Milieu traversé	Module de Young M. Pa
Acier	210 000
Aluminium	63 000
Bambou	20 000
Plomb	18 000
Fémur	17 200
Brique	14 000
Cartilage	24

- La Célérité pour quelque milieu traversée :

Milieu traversé	Vitesse c (m /s)
Air	330
Vapeur d'eau	400
Alcool	1180
Eau	1430
Eau de mer	1510
Tissu	1600
Plombe	2200
Glace	4100
Cuivre	4600
Acier	6000

Remarque : la célérité est d'autant plus grande que le milieu est plus dense et rigide

III.3. Le procédé ultrasons dans le contrôle et détection des défauts

Les tests par ultrasons représentent environ le tiers des essais non destructifs de matériaux ou de structures en tout genre, et dans des secteurs d'applications très diversifiés (Aéronautique, industries des transports, de l'énergie, Génie Civil, etc...). Parmi ces tests, on peut distinguer les contrôles non destructifs (CND) et les évaluations non destructives (END). Les premiers concernent la détection, la localisation voire le dimensionnement d'inhomogénéités (craques, fissures, délaminages, etc...) pouvant constituer des défauts préjudiciables ou pas, selon certains critères d'acceptabilité et de tolérance aux dommages.

Les secondes visent à quantifier certaines propriétés physiques d'un matériau (densité, raideur, perméabilité, etc.) pour s'assurer de sa conformité par rapport à un cahier des charges.

Les techniques les plus courantes sont maintenant bien rodées et ont été mises au point pour tester des éléments métalliques, donc isotropes et élastiques. L'emploi de plus en plus répandu des matériaux composites, ou encore le développement des procédés d'assemblages par collage qui suppriment vis, boulons ou rivets, forcent les méthodes de CND/END à évoluer pour s'adapter aux forts changements des milieux. En effet, la plupart des matériaux composites sont anisotropes (raideur plus forte dans le sens des fibres par exemple) viscoélastiques (notamment les matrices à base de polymères) et hétérogènes (fibres, plis).

La propagation des ondes ultrasonores est par conséquent bien différente par rapport aux métaux, et les techniques ultrasonores classiques s'avèrent souvent inadaptées : déviation des faisceaux par l'anisotropie, atténuation par effet thermo viscoélastique, diffraction par les interfaces entre plis, etc... Il est donc indispensable d'ajuster plusieurs paramètres (fréquence, focalisation, positions des palpeurs, milieu de couplage, etc...) pour adapter les procédés de CND/END existants ou encore de redéfinir de nouveaux procédés.

1. Historique :

En continuation de la gamme sonore, les ultrasons correspondent à des fréquences oscillatoires supérieures à la limite d'audibilité humaine et s'étendant dans une large gamme allant de 15 kilohertz (nettoyage) à plus de 100 MHz (microscopie acoustique, application électronique). La gamme 1 à 10 MHz couvre la grande majorité des applications des ultrasons en contrôle non destructif industriel. Cela n'est pas un hasard car ces fréquences correspondent, pour les matériaux courants, à des longueurs d'onde ultrasonore de l'ordre du **millimètre**, valeur réalisant un bon compromis entre directivité, absorption, détectabilité des petits défauts, facilité de réalisation d'appareillages électroniques et de transducteurs fiables et économiques.

1.1. Différents types d'ondes

Les ondes ultrasonores, vibrations élastiques de la matière, ont des propriétés liées aux caractéristiques élastiques du support matériel.

Ainsi, dans les **liquides et les gaz**, qui sont des milieux n'offrant aucune résistance au cisaillement, les ondes ultrasonores sont essentiellement des **vibrations longitudinales**, les particules matérielles se déplaçant, par rapport à leur position d'équilibre, parallèlement à la direction de propagation de l'onde, engendrant des fronts de compression-décompression, eux-mêmes perpendiculaires à cette direction. Ce type d'onde se retrouve dans les **solides** et est d'ailleurs le plus utilisé en pratique. Toutefois, un autre mode, utilisant le cisaillement, peut exister : mode d'**onde transversale** pour lequel les vibrations des particules s'exercent perpendiculairement à la direction de propagation.

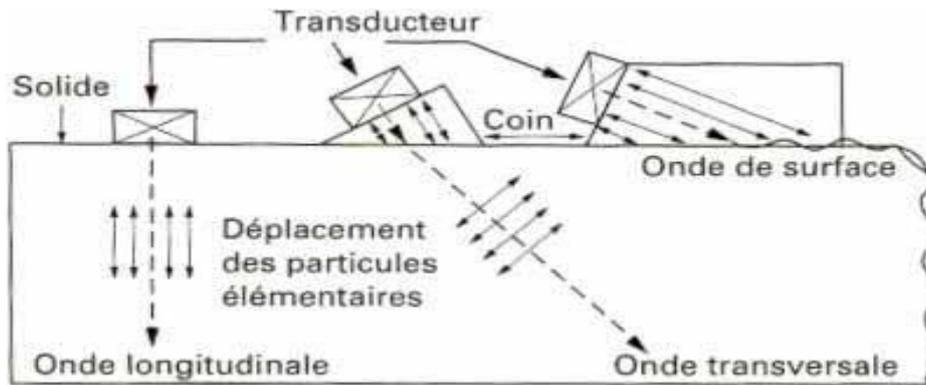


Fig 10 - Type d'onde et mode de propagation des ultrasons dans solide.

Ces deux types d'ondes, les plus couramment rencontrés en contrôle non destructif, sont des **ondes de volume** ; il est possible aussi de générer d'autres types d'ondes dont l'existence dépend en particulier de la configuration du support de propagation.

Il y a tout d'abord les **ondes de surface**, ondes composites constituées à la fois par des déplacements longitudinaux et transversaux, et dont les plus connues et utilisées sont les **ondes de Rayleigh** ; d'autres modes sont possibles et connus : ondes rampantes de Love, ondes de Bleustein – Gulyaev. Lorsque le support a des dimensions du même ordre de grandeur que la longueur d'onde, cela génère des modes vibratoires particuliers : **ondes de Lamb** dans les tôles, il s'agit d'ondes dispersives avec mode de vibration symétrique ou antisymétrique ; ondes guidées dans les tiges et barres. Les ondes de Lamb sont utilisées industriellement pour le contrôle des tôles minces métalliques et de certains composites.

Phénomènes de propagation :

Les lois physiques rappelées ici s'appliquent au cas simple d'une **onde monochromatique**, c'est-à-dire de fréquence unique. La réalité du contrôle ultrasonore est plus complexe, car les transducteurs génèrent des trains d'ondes correspondant à un spectre de fréquence d'une certaine forme et d'une étendue plus ou moins bien connues.

C'est une remarque qu'il ne faut pas perdre de vue, lorsque l'on veut mettre en pratique ces bases physiques par ailleurs indispensables à la bonne compréhension des mécanismes mis en jeu dans tout contrôle ultrasonore.

Vitesse, directivité, atténuation :

On démontre par la théorie des milieux élastiques que les vitesses de propagation des ondes ultrasonores longitudinales (V_L) transversales (V_T) et de Rayleigh (V_R), en m/s, sont liées aux caractéristiques du matériau par les relations suivantes

- $V_L = \sqrt{\frac{E(1-\sigma)}{\rho(1+\sigma)(1-2\sigma)}}$
- $V_T = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\sigma)}}$
- $V_R = 0.9V_T$

Avec ; E (Pa) module d'Young.

σ (sans dimension) coefficient de Poisson.

ρ (kg/m³) masse volumique.

Le tableau 4 donne quelques exemples de vitesses moyennes V_L et V_T pour les matériaux couramment utilisés en CND. Il s'agit de valeurs moyennes, car les paramètres élastiques des matériaux dépendent de l'état physique et chimique précis de ceux-ci (analyse et microstructure pour les métaux, par exemple)

Les ondes de Lamb sont des ondes dispersives ; leur vitesse dépend de la fréquence et, de plus, la vitesse de propagation du front d'onde (vitesse de phase) est différente de la vitesse de propagation de l'impulsion énergétique donnée par l'émetteur (vitesse de groupe).

Des diagrammes donnent ces valeurs en fonction du mode de vibration et du produit fréquence \times épaisseur de la tôle.

La longueur d'onde λ d'un train d'onde ultrasonore se déduit de la vitesse de propagation par la relation simple suivante :

$$\lambda = \frac{V}{f} \text{ où } f \text{ est la fréquence de la vibration.}$$

Tableau– Vitesses et impédance acoustique (Valeurs moyennes arrondies) :

Matériau	Masse volumique (10^3 kg/m^3)	Vitesse des ondes longitudinales (m/s)	Vitesse des ondes transversales (m/s)	Impédance acoustique ($10^6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)
Aciers	7.8	5900	3250	46
Fonte	7.2	4600	2150	33
Aluminium	2.7	6300	3100	17
Cuivre	8.9	4700	2250	42
Laiton	8.5	4500	2100	38
Béton	2.5	4500	-	11
Muscle	1	1600	-	1.6
Araldite	1.2	2500	1050	3
Plexiglas	1.2	2700	1100	3.2
Verre	2.5	5650	3400	14
Huile	0.8	1500	-	1.2
Glycérine	1.3	1900	-	2.5
Eau	1	1480	-	1.5
Mercure	13.6	1450	-	20
Quartz	2.7	5750	-	15
Titanate de baryum	5.7	4400	-	35
air	$10 \cdot 10^{-3}$	330	-	$4 \cdot 10^{-4}$

Cette longueur d'onde λ est à prendre en considération dans la propagation des ondes, en particulier vis-à-vis de l'étalement du faisceau ultrasonore (directivité) et de l'atténuation de l'onde par le milieu. Nous avons vu que les ultrasons utilisés en CND se situent dans la gamme des fréquences 1 à 10 MHz, ce qui correspond, dans l'acier par exemple, à des longueurs d'onde de 0,6 à 6 mm en mode longitudinal. À ces courtes longueurs d'onde, les ultrasons se propagent essentiellement en ligne droite selon un faisceau plus ou moins étalé, constitué d'un lobe principal dans lequel la plus grande partie de l'énergie est concentrée (figure 11). C'est cette propriété qui les rend utiles pour localiser les défauts. Près de la source ultrasonore, on peut démontrer que le faisceau est l'objet d'interactions vibratoires assez complexes donnant lieu à des maximums et des minimums d'énergie sur l'axe de propagation

(figures 12 et 13); il s'agit du champ proche ou **zone de Fresnel** dont la longueur ℓ est donnée par la relation : $\ell = \frac{D^2}{4\lambda}$

D'étant le diamètre de la source.

Ensuite, l'énergie devient monotone et le faisceau diverge selon angle d'étalement 2θ tel que : $\theta = 1.22 \lambda / D$

Fig11 – Divergence du faisceau d'ultrasons

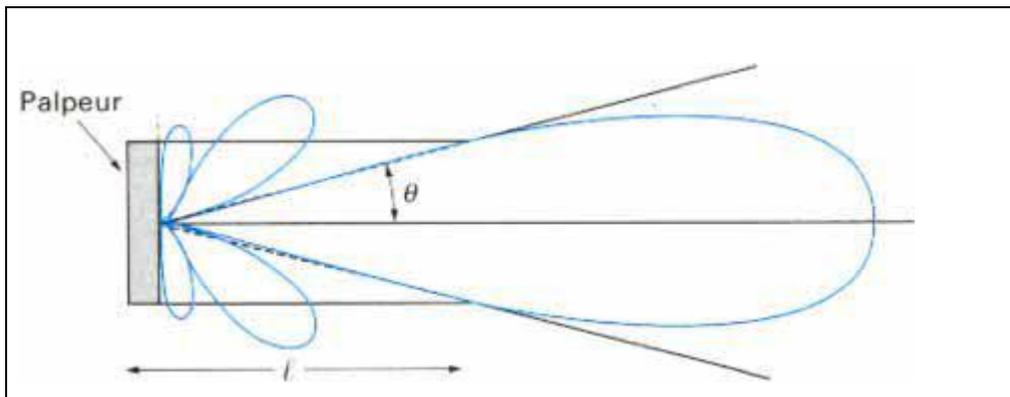


Fig12– Intensité acoustique sur l'axe du faisceau

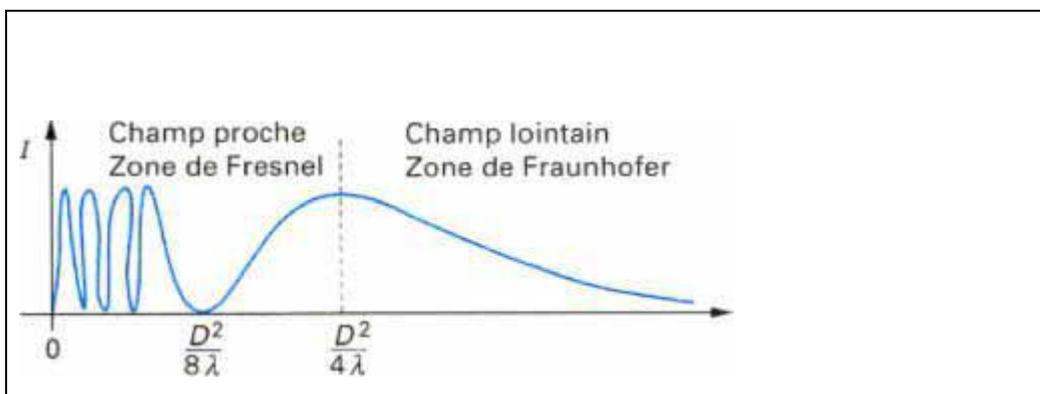
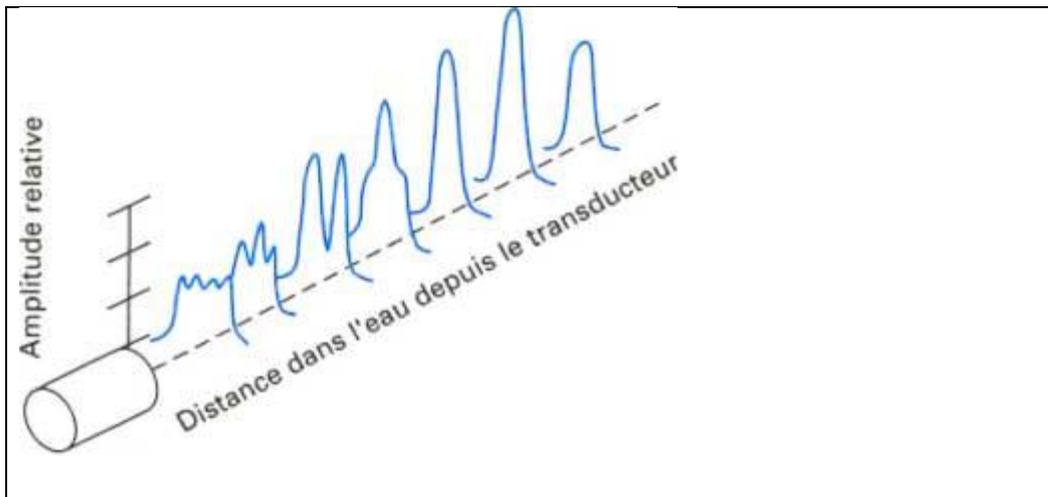


Fig13– Distribution de l'amplitude perpendiculairement à l'axe du faisceau ultrasonore en différents point de l'axe



Il s'agit du **champ éloigné** ou **zone de Fraunhofer**, située en pratique à quelques centimètres du transducteur et donnant lieu à un étalement en général inférieur à quelques dizaines de degrés d'angle. L'énergie dans l'axe décroît régulièrement à cause de l'**étalement du faisceau**, mais aussi à cause de l'**atténuation de l'onde** par le milieu.

- L'**atténuation ultrasonore** suit assez bien la loi exponentielle de la forme :

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

- x est l'épaisseur traversée
- α est le coefficient d'absorption (en dB/Cm/Mhz)

On peut considérer cette atténuation, en particulier dans les métaux, comme faible eu égard aux puissances et aux sensibilités de détection utilisables ; cela explique les grandes possibilités pratiques du contrôle par ultrasons. α varie de 1 dB/m pour l'eau à 5 à 200 pour les métaux et 500 pour le plexiglass (à 2 MHz).

- L'atténuation résulte de plusieurs effets:
- l'**absorption ultrasonore** par le milieu, proportionnelle à la fréquence et qui correspond à la dissipation thermique par frottement.
- la **diffusion ultrasonore** par le milieu, liée à sa structure, à son anisotropie, à son caractère parfois diphasique ; la longueur d'onde, donc la fréquence, est à prendre en compte pour définir les domaines et les lois d'atténuation par diffusion ; on montre ainsi que l'atténuation dans un solide poly cristallin simple, de diamètre de grain homogène d , est de la forme :

$$\alpha = a_1 f + a_2 d^2 f^4$$

si $\lambda \gg d$ (diffusion de Rayleigh).

On voit ici l'importance que jouent, à la fois, la fréquence ultrasons et la nature du matériau sur l'atténuation et donc sur la possibilité de mettre en œuvre le contrôle ultrasonore d'une pièce.

1.2. Changement de milieu : réflexion, transmission :

Lorsqu'un faisceau acoustique arrive en incidence normale sur l'interface entre deux milieux de natures différentes, tout comme en optique, une partie de l'onde incidente est **transmise** dans le second milieu, alors que l'autre partie est **réfléchi**e en sens inverse dans le premier milieu. Ces phénomènes de réflexion/transmission sont régis par un concept d'**impédance acoustique** $Z = \rho V$, produit de la masse volumique ρ du matériau par la vitesse V des ultrasons dans ce milieu considéré (noter que l'impédance acoustique utilisée dans le domaine sonore est définie différemment).

Les intensités acoustiques réfléchies (I_r) et transmises (I_t), relativement à l'intensité initiale I_0 , sont données par les relations suivantes :

$$\frac{I_r}{I_0} = \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2 \quad \frac{I_t}{I_0} = \frac{4 \cdot Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2}$$

. avec Z_1 et Z_2 impédances acoustiques des milieux 1 et 2, l'onde se propageant du milieu 1 vers le milieu 2.

Il est facile d'en déduire qu'une onde sera transmise intégralement si $Z_1 = Z_2$ c'est-à-dire si l'on a réalisé une parfaite adaptation d'impédance, condition bien connue en électronique des circuits. En fait, les couplages acoustiques en CND par ultrasons mettent souvent en jeu des matériaux à impédances acoustiques éloignées comme l'eau, l'acier, le plexiglas (voir tableau 4) ; on doit donc tolérer en pratique une perte importante d'énergie aux interfaces, perte qui devra être compensée par une grande sensibilité à la réception de l'onde en retour. Dans des cas particuliers, comme la microscopie acoustique, on devra choisir un couplant liquide mieux adapté, à forte impédance, comme le mercure par exemple.

Ces relations montrent, par ailleurs, et cette fois-ci de façon favorable, que la **sensibilité de la détection ultrasonore par échos sur un défaut est très grande**, puisqu'en général le rapport Z_1 / Z_2 de l'impédance du matériau solide testé (métal par exemple, avec ;

($Z_1 > 15 \cdot 10^6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) à celle du défaut (porosité ou fissure remplies d'air avec ;

$Z_2 = 10^{-3} \cdot 10^6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) sera très grande correspondante à une réflexion totale de l'énergie ultrasonore. De plus, l'expérience montre que cette réflexion reste totale même lorsque l'épaisseur de la fissure est infime et bien inférieure à la longueur d'onde λ .

1.3. Réfraction. Transformation de mode. Focalisation :

Lorsqu'un faisceau acoustique arrive avec une incidence non nulle α_1 sur une interface plane (sur la largeur utile du faisceau) entre deux milieux, on retrouve, comme ci-dessus, une décomposition de l'énergie en énergie réfléchie et énergie réfractée. Cependant, un second phénomène peut prendre naissance, c'est la création de plusieurs ondes réfractées (ou réfléchies) de modes différents (figure 14).

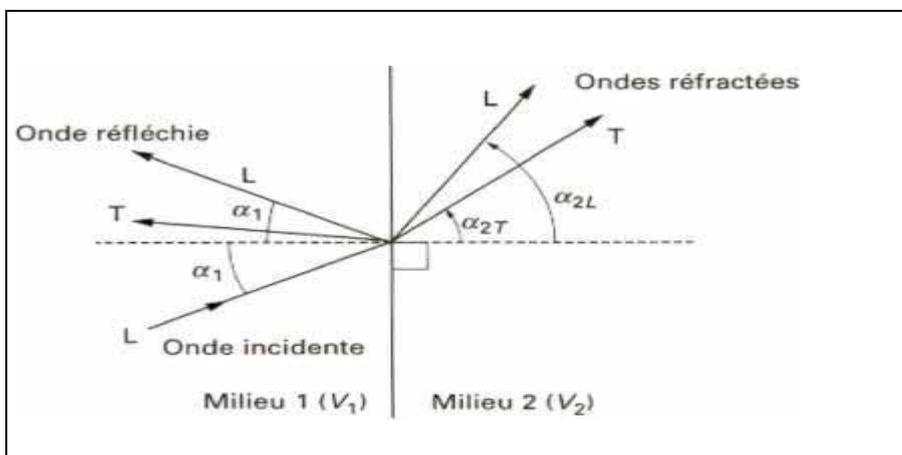
Les orientations des faisceaux d'ondes réfléchies et réfractées sont définies par les lois de Descartes (ou de Snell), bien connues en optique, et où l'indice optique est ici remplacé par la vitesse V des ondes acoustiques considérées. On a les relations entre angles de réfraction et vitesse de l'onde :

$$\frac{\sin \alpha_1}{V_1} = \frac{\sin \alpha_{2T}}{V_{2T}} = \frac{\sin \alpha_{2L}}{V_{2L}}$$

On en déduit qu'il est possible, à partir d'une onde longitudinale dans le milieu 1, de créer dans le milieu 2 à la fois des ondes longitudinales et des ondes transversales ayant des directions de propagation différenciées.

Le calcul de la condition sur les sinus montre qu'il peut exister des **angles d'incidence critiques** au-delà desquels les ondes réfractées ne peuvent exister.

Figure 14– Réflexion et réfraction des ondes ultrasonores en incidence oblique



Par exemple ;

Pour l'incidence d'une onde longitudinale entre eau et acier, selon la valeur de l'angle α , On a :

. Production de 2 modes L et T si :

$$\sin \alpha < \frac{V_1}{V_{2L}} = \frac{1\,500}{5\,850} \quad \text{soit } \alpha < 15^\circ$$

. Disparition de l'onde longitudinale pour $\alpha = 15^\circ$

. Présence de l'onde transversale seule de 15° à: $\text{arc sin } \frac{V_1}{V_{2L}} = \frac{1\,500}{3\,200} = 27^\circ, 30$

. Réflexion totale du faisceau dans l'eau pour $\alpha > 27^\circ, 30$, sauf pour l'angle ;

$$\alpha = \text{arc sin } \frac{V_1}{V_{2R}} = 31^\circ$$

Correspondant à la création des ondes de Rayleigh en surface.

Ces considérations sur les angles et les modes sont très importantes en pratique, à la fois pour générer des ondes transversales, maîtriser l'interprétation des échos de sondage, concevoir la géométrie des faisceaux utilisés pour le contrôle des pièces et des défauts particuliers.

Il faudrait, en toute logique, les compléter par les considérations sur la répartition de l'énergie entre les faisceaux en généralisant le cas simple traité .

On peut mettre à profit les lois de réfraction acoustique pour réaliser des **faisceaux d'ondes focalisés** permettant de combattre la divergence ou l'étalement naturel du faisceau (palpeurs focalisant) et, plus encore, de concentrer l'énergie ultrasonore dans une zone focale de taille inférieure au diamètre du transducteur, accroissant ainsi la sensibilité de la détection ultrasonore des petits défauts.

On peut utiliser pour cela une **lentille acoustique** de rayon R ; si n est son indice (rapport relatif des vitesses entre la lentille et le milieu de couplage), les lois précédentes nous permettront de calculer la **distance focale** f du faisceau selon :

$$f = \frac{R}{(1-n)}$$

Les dimensions de la tache focale, assimilables au diamètre d et à la longueur d'un cylindre dans lequel l'énergie acoustique est maximale et constante à 3 dB près, sont données par les relations suivantes :

$$- d = \lambda \frac{f}{D}$$

$$- \ell = 4 \lambda \left(\frac{f}{D} \right)^2$$

. avec D diamètre du transducteur et de sa lentille.

2. Production et détection des ultrasons

Il y a deux voies pour générer des ultrasons dans la pièce à contrôler :

- soit utiliser un oscillateur mécanique (transducteur électroacoustique), générateur de vibrations ultrasonores qui seront transmises à la pièce par couplage acoustique.
- soit générer les ultrasons à la surface de la pièce elle-même par tout moyen susceptible d'activer les particules du milieu (forces électromagnétiques, impulsions thermiques, ablation laser).

La mise en évidence de l'onde de retour peut se faire selon les mêmes voies :

- détection des vibrations à la surface de la pièce (interférométrie laser).
- couplage vers un transducteur spécifique (palpeur récepteur).

Nous examinons ces diverses solutions, sachant cependant qu'en pratique, la solution du **transducteur ultrasonore** (souvent appelé **palpeur**) est de très loin la plus utilisée.

2.1 Effet piézoélectrique :

La grande majorité des palpeurs ultrasonores utilisés en CND sont des **transducteurs piézoélectriques**.

C'est en 1880 que l'effet piézo électrique fut découvert par P. et J. Curie : production d'un potentiel électrique sous l'effet d'une compression appliquée à une lame de tourmaline taillée selon l'un des axes cristallographiques du monocristal. La réciprocité du phénomène (production d'une vibration mécanique à partir d'une impulsion de tension électrique) fut mise en évidence à la même époque, ouvrant la voie à la réalisation d'un transducteur ultrasonore.

Cet effet piézoélectrique, caractérisé par les paramètres g (constant de pression) et K (facteur de couplage) est minime pour les cristaux naturels comme le quartz. On l'a amélioré tout d'abord en développant des céramiques piézoélectriques de synthèse, dont la plus utilisée est le titanate de baryum, bien que deux autres variétés offrent des performances plus grandes : le PZT, titanate-zirconate de plomb et le métaniobate de plomb. De plus, on accroît notablement l'effet

piézoélectrique vibratoire en excitant le cristal ou le poly-cristal sur son mode de résonance mécanique ; en pratique, cela revient à utiliser une lame piézoélectrique d'épaisseur a telle que :

$$f_0 = \frac{V}{2a}$$

.avec ; f_0 fréquence fondamentale de vibration du transducteur,

Vitesse du son dans le matériau.

Les films polymères piézoélectriques, en particulier les membranes de PVDF (poly-fluorure de vinylidène), constituent une nouvelle famille de matériaux piézoélectriques aptes à avoir des applications pratiques dans le domaine des ultrasons.

Le fait que ces films soient déformables et éventuellement très minces en fait un constituant de choix pour la réalisation de sondes à barrettes de transducteurs pour l'échographie médicale ou celle de sondes à très hautes fréquences pour la microscopie ultrasonore.

2.2 Palpeurs piézoélectriques :

De façon générale, un palpeur ultrasonore comporte, outre la pastille céramique dont les faces sont métallisées et raccordées à un connecteur électrique, une face avant de protection et de couplage et un bloc amortisseur arrière pour, à la fois, dissiper l'énergie rayonnant vers l'arrière et moduler le spectre ultrasonore par amortissement de la résonance mécanique de la pastille transductrice. Une bobine électrique d'accord ou un transformateur adaptateur d'impédance peut être inclus dans le boîtier, constituant l'ensemble du palpeur qui est généralement utilisé en émetteur-récepteur (figure 15).

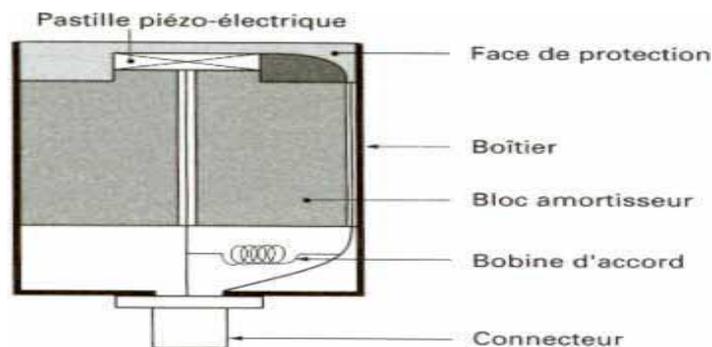


Fig15– Structure d'un palpeur ultrasonore

- Il existe plusieurs familles de palpeurs piézoélectriques adaptées aux différents modes d'utilisation : contrôle par contact ou en immersion, nature du produit à sonder, des défauts, etc. Les 4 types de palpeurs les plus utilisés dans l'industrie sont les suivants (figure 16) : palpeur droit cylindrique, palpeur d'angle à sabot, palpeur droit focalisé, palpeur droit double avec émission et réception séparées (palpeurs SE). Certaines applications particulières

font appel à des palpeurs spéciaux tels que les palpeurs droits rectangulaires, les palpeurs à focalisation cylindrique et les barrettes multi-palpeurs, nées dans le domaine médical et dont l'emploi se développe dans l'industrie.

- On caractérise un palpeur ultrasonore par les 2 paramètres à la base des lois de propagation rappelées précédemment : sa fréquence d'oscillation et son diamètre. On ajoutera la distance focale (dans l'eau) pour un palpeur focalisé, et l'angle de réfraction (dans l'acier) pour les palpeurs d'angle. Les caractéristiques électriques devront être connues pour adapter le matériel électronique et le câble de liaison. On se contente souvent de caractériser le spectre de fréquence par un classement qualitatif : large bande (palpeur amorti), bande étroite. La tendance est toutefois de mieux caractériser le matériel en relevant le spectre réel et surtout la **cartographie** du faisceau ultrasonore (dans l'eau) en régime impulsionnel.

2.3 Palpeurs EMA

Ce nouveau type de transducteur met en œuvre les interactions champ magnétique-courants de Foucault induits dans un métal pour créer des forces donnant naissance à des vibrations ultrasonores, d'où son appellation de **palpeur électro-magnéto-acoustique**(EMA).

L'effet étant réversible, on peut concevoir ainsi un palpeur émetteur récepteur utilisable sans contact avec le produit sondé et avant des possibilités très larges de réglage en fréquence et en largeur de bande ; cependant, sa faible sensibilité oblige à le maintenir à une très faible distance de la surface du produit à contrôler (quelques millimètres) et à utiliser une électronique particulière.

Ces handicaps font que son développement commercial est aujourd'hui très limité bien que des applications intéressantes existent en laboratoire et dans certaines industries comme la sidérurgie.

2.4 Palpeurs lasers

L'impact d'un faisceau laser impulsionnel de puissance sur la surface d'un matériau, et en particulier d'un métal, constitue une source ultrasonore généralement omnidirectionnelle et pouvant comporter un large spectre de fréquences vibratoires. On peut, par certains artifices, favoriser un mode de propagation et donner une certaine directivité au faisceau, obtenant ainsi un émetteur d'ultrasons sans contact.

La réception optique, sans contact, peut être réalisée par un interféromètre optique de haute sensibilité, détectant les infimes variations géométriques de la surface où émergent les ultrasons.

En pratique, il est difficile de réaliser un tel interféromètre apte à fonctionner hors du laboratoire, aussi pour l'instant ce type de transducteur, au demeurant beaucoup plus coûteux qu'un simple palpeur piézoélectrique, ne connaît pas d'application industrielle notable.

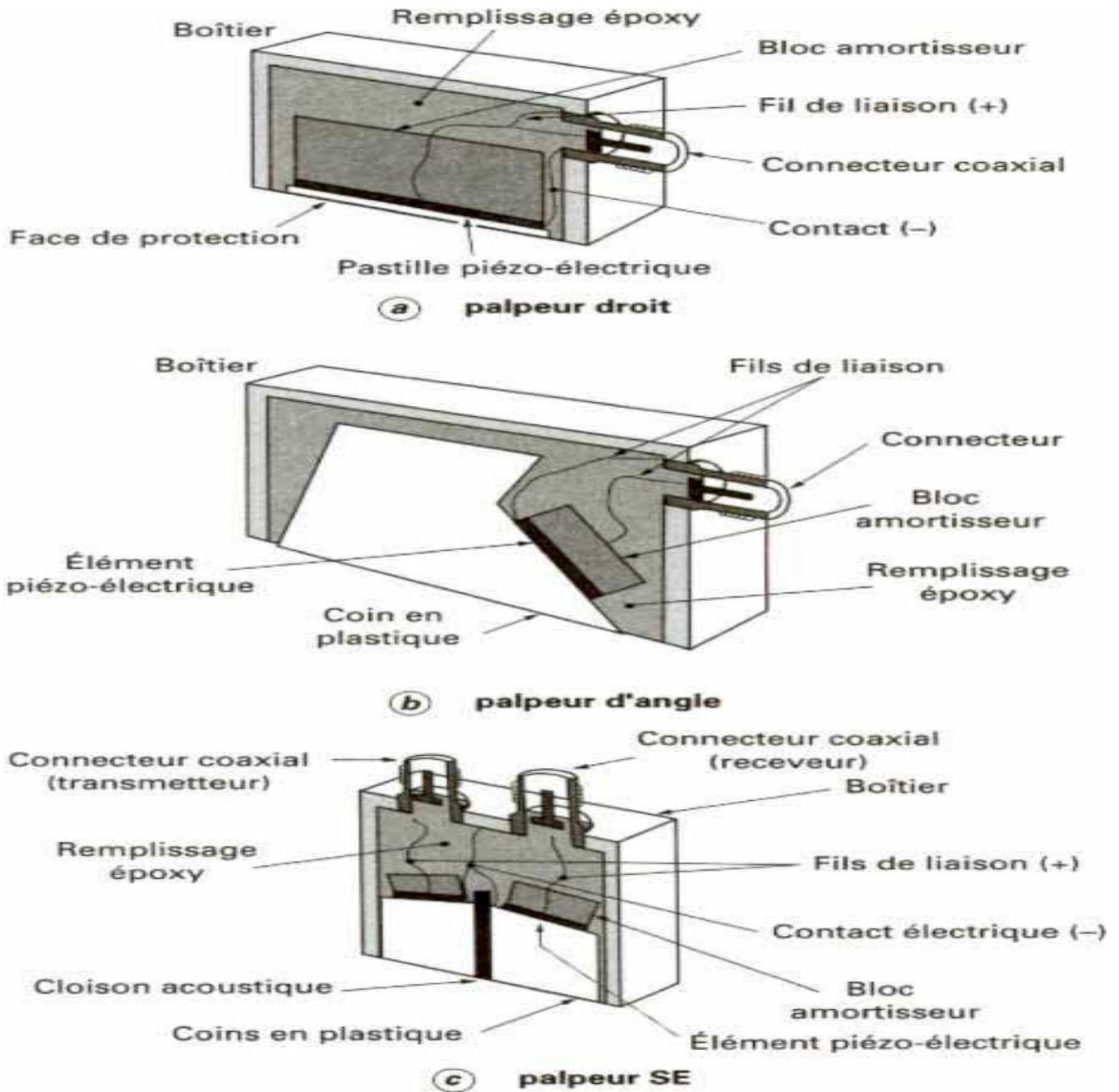


Figure 16 – Différents types de palpeurs piézo-électriques

3. Méthodes de contrôle ultrasonore

3.1 Échographie ultrasonore

Connue désormais de tout un chacun par son utilisation médicale, l'échographie est aussi la méthode de loin la plus employée dans le contrôle non destructif industriel.

Son principe, très simple, est celui du radar : on envoie, dans la zone à inspecter, de brèves impulsions ultrasonores et l'on recueille en retour des **échos** renvoyés par les diverses hétérogénéités

susceptibles de créer des ruptures d'impédance acoustique. On obtient ainsi un **écho gramme** comme cela est illustré dans un cas simple par la figure (17).

La distance entre échos correspond à des temps de propagation aller et retour de l'onde et permet donc de **localiser les défaut** en profondeur dans la pièce examinée.

L'amplitude relative des échos d'émission, de défauts et de fond permet d'avoir une estimation de l'importance du défaut. Il faut toutefois ici être prudent, même lorsque l'on applique des calculs de correction d'atténuation de propagation telle que la méthode AVG par exemple (§ 8.4.3).

Le parcours mis en œuvre pour essayer d'obtenir des échos de défaut peut être complexe et comporter des réflexions multiples, comme dans le cas du contrôle des soudures avec palpeur d'angle et ondes transversales par exemple (figure 18).

3.2 Méthode par transmission

Elle met en œuvre un faisceau ultrasonore reliant deux palpeurs disposés de part et d'autre de la pièce sondée. Bien que décrite dans tous les manuels, son emploi a pratiquement disparu, sauf dans quelques cas particuliers où l'atténuation ultrasonore est extrêmement forte et interdit l'utilisation de la méthode par échos. Son inconvénient majeur est en effet le risque qu'il y a à attribuer l'atténuation du signal à la présence d'un défaut alors que la cause peut être tout autre : rupture du couplage entre les palpeurs et la pièce, mauvais alignement, etc.

3.3 Imagerie ultrasonore

Partant des interactions locales perturbant un faisceau ultrasonore, on a très tôt imaginé de réaliser des **images ultrasonores** à l'instar des images radiographiques. Des caméras ultrasonores ont été développées, généralement basées sur la méthode par transmission en milieu immergé. La méthode par écho permet plus simplement, par rotation ou déplacement du palpeur sur la pièce, d'obtenir des **cartographies ultrasonores** en coupe (mode B) ou en plan (mode C), selon la figure 19.

Cette méthode simple de présentation échographique est très utilisée dans les contrôles ultrasonores en laboratoire et aussi désormais sur site.

Parallèlement, on cherche à adapter au contrôle ultrasonore certaines techniques récentes de reconstruction d'image telles que l'**holographie** empruntée à l'optique, l'**ouverture synthétique** (SAFT) empruntée aux procédés radar hyperfréquence ou enfin la **tomographie** empruntée à la radiologie. Des difficultés inhérentes à la nature des ultrasons font que le développement de ces nouveaux procédés de contrôle ultrasonore reste très modeste.

4. Mise en œuvre. Appareillage de contrôle. Étalonnage

4.1 Couplage acoustique

Plusieurs méthodes sont utilisées selon la nature du contrôle :

- Le **contrôle en cuve d'immersion**, remplie en général d'eau additionnée d'un agent mouillant, permet d'assurer un couplage satisfaisant entre le ou les palpeurs et la pièce à contrôler, tout en assurant une mobilité 3D à ces palpeurs, d'où des possibilités d'examen de pièces complexes grâce à un bras manipulateur programmé et aussi la facilité d'utiliser des palpeurs focalisés.

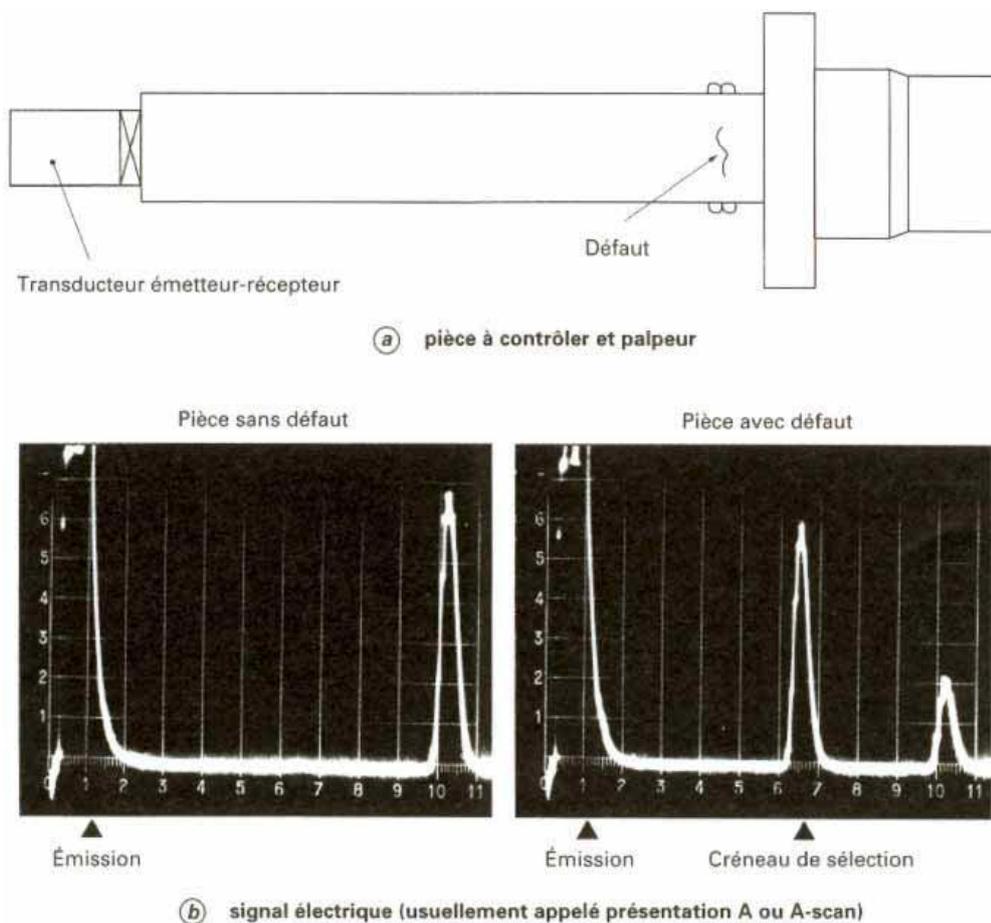


Figure 17 – Contrôle ultrasonore par échographie (ondes longitudinales)

Figure 18 – Contrôle des soudures par la méthode tandem (ondes transversales)

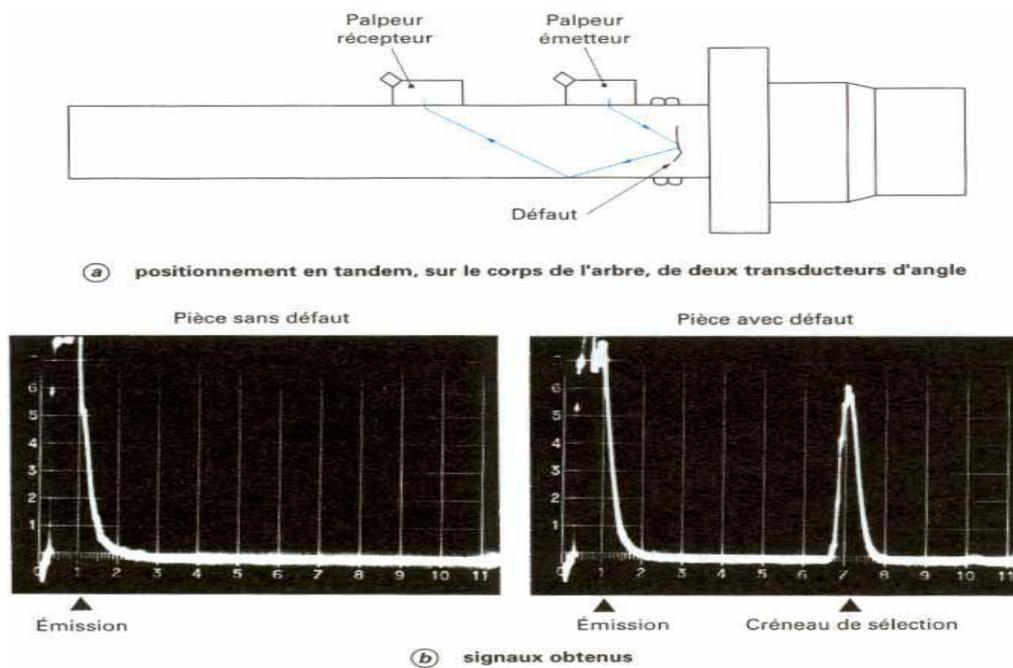
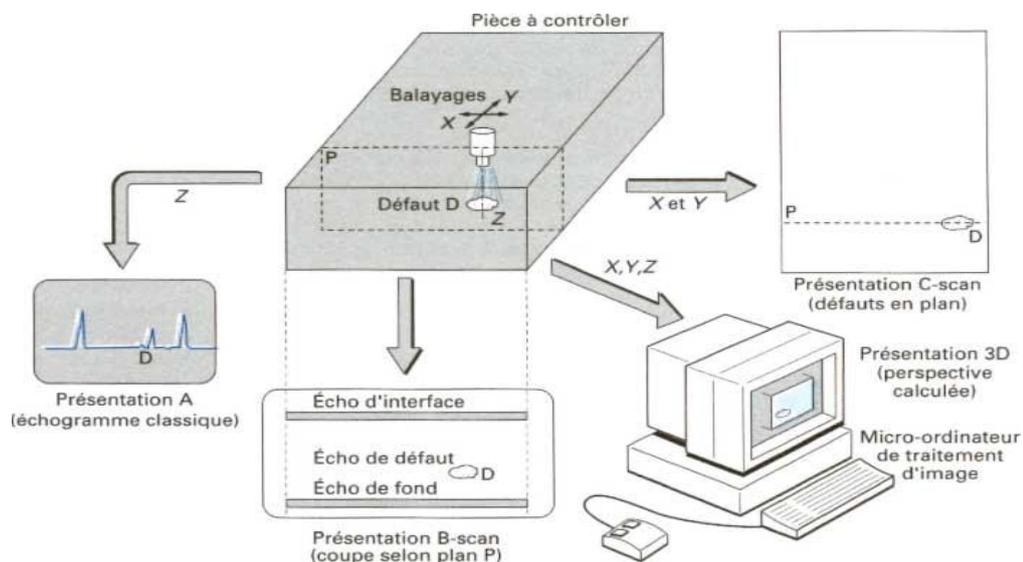


Figure 19 – Différents modes de présentation d'un sondage à ultrasons



- Le **contrôle au défilé** de produit plat ou long fait appel soit à l'EMA qui supprime la notion de couplage elle-même, soit à couplage par film ou jet d'eau ou d'huile, ou encore à une immersion partielle dans une boîte à eau abritant les transducteurs à ultrasons.
- En **contrôle manuel**, le contact direct à sec du palpeur sur la pièce n'est pas suffisant pour transmettre les ultrasons ; il faut utiliser un agent de couplage généralement plus visqueux que l'eau, tel que graisse, colle, etc

4.2 Palpeur

Le palpeur doit être adapté à la nature du contrôle et aux conditions de couplage : en contrôle par immersion, on surveillera son étanchéité ; en contrôle par contact, on s'assurera des performances anti-usure de la face avant. Le câble de liaison avec l'équipement électronique doit absolument être adapté à son emploi car, en cas contraire, des pertes de sensibilité et des distorsions spectrales peuvent rendre le sondage aléatoire.

4.3 Appareillage d'émission-réception

Dans un appareil à ultrasons classique, en général portable par ailleurs, on peut distinguer quatre modules principaux :

- un émetteur d'impulsions électriques brèves, aptes à exciter le palpeur piézoélectrique avec une énergie notable ; les tensions appliquées sont ainsi de plusieurs centaines de volts sous 50Ω avec des temps de montée souvent inférieurs à 30 ns ; la fréquence de répétition des impulsions est de quelques centaines de hertz.
- un système d'amplification des signaux piézoélectriques dus aux échos de retour du sondage ; ces signaux sont faibles (quelques millivolts), aussi doit-on disposer d'un amplificateur performant : faible bruit, large bande (réglable), bonne linéarité sur au moins 100 dB.
- un démodulateur et un écran de visualisation qui permet de présenter l'écho gramme en fonction du parcours des ultrasons dans la pièce sondée ; l'oscilloscope comportera donc une base de temps synchronisée par l'émetteur et réglable et programmable par affichage de la vitesse des ultrasons selon la matière auscultée et le mode de propagation choisi.
- un moniteur, fenêtre électronique de sélection d'une zone particulière dans l'écho gramme, dans laquelle il est possible de placer un seuil d'alarme au-delà duquel les échos (de défauts) déclenchent un signal lumineux ou sonore.

L'essor de la micro-informatique a favorisé l'éclosion de nouvelles générations d'appareillages à ultrasons (figure 20). D'abord, des appareillages mariant un système classique analogique d'émission réception à un micro-ordinateur recevant les signaux en vue de les traiter, de

les stocker ou de les éditer. Ensuite, une gamme d'appareils de contrôle ultrasonore (portables) bâtis autour d'un microprocesseur et ainsi aptes à assurer intrinsèquement des fonctions d'étalonnage, de réglage, de traitement telles que les compensations d'atténuation d'amplitude-distance (dites courbes AVG) qu'il était difficile de réaliser avec les appareils totalement analogiques.

4.4 Étalonnage

L'étalonnage de l'ensemble appareillage et palpeur ultrasonore présente une grande importance, dans la mesure où l'on cherche à fournir des résultats de contrôle pertinents.

On pourra, dans un premier temps, déterminer les caractéristiques de l'électronique et du palpeur : cela ne dispensera pas toutefois d'effectuer un tarage de l'ensemble, selon les procédures normalisées adaptées aux types de contrôles et d'industries concernés. Soit on utilisera un bloc étalon comme la cale AFNOR NF A 09.310 qui permet, en particulier, de vérifier aisément les caractéristiques des palpeurs d'angle, soit on fera appel à des pièces de référence du type de celles à contrôler et possédant des défauts connus, naturels ou artificiellement créés. Signalons qu'un large débat reste ouvert entre spécialistes quant aux mérites respectifs de ces deux catégories de défauts étalons.

5. Champ d'application et évolution du contrôle ultrasonore

5.1 Détection des défauts internes

La détection de défauts internes par ultrasons est très pratiquée en contrôle de fabrication, en contrôle de recette, en surveillance de structure en service, en maintenance. La remarquable sensibilité de l'échographie ultrasonore à la moindre discontinuité ou hétérogénéité interne dans les matériaux, en particulier métalliques, en fait une méthode de choix, concurrente ou parfois complémentaire de la radiographie. Toutefois, en échographie ultrasonore, le choix des paramètres de sondage et l'interprétation des signaux recueillis ne sont pas toujours aisés et requièrent l'intervention d'un personnel spécialement qualifié. Une certification existe en vue de valider ces compétences ; en France, il s'agit de la certification COFREND établie selon 3 niveaux de qualification des opérateurs (§ 9.1).

5.2 Localisation des défauts en profondeur

La localisation de défauts en profondeur est aisée lorsqu'on travaille en échographie.

Il existe toutefois une zone sous la surface de couplage pour laquelle l'écho de défaut peut être noyé dans l'écho d'émission ou d'interface, ce qui peut rendre à la fois la détection et la localisation aléatoires.

La localisation en plan se fera en relation avec le relevé manuel de la position du palpeur. Des équipements d'aide au son dag manuel par recopie du déplacement du palpeur permettent désormais l'utilisation des présentations B et C et favorise le dépouillement et la présentation des résultats.

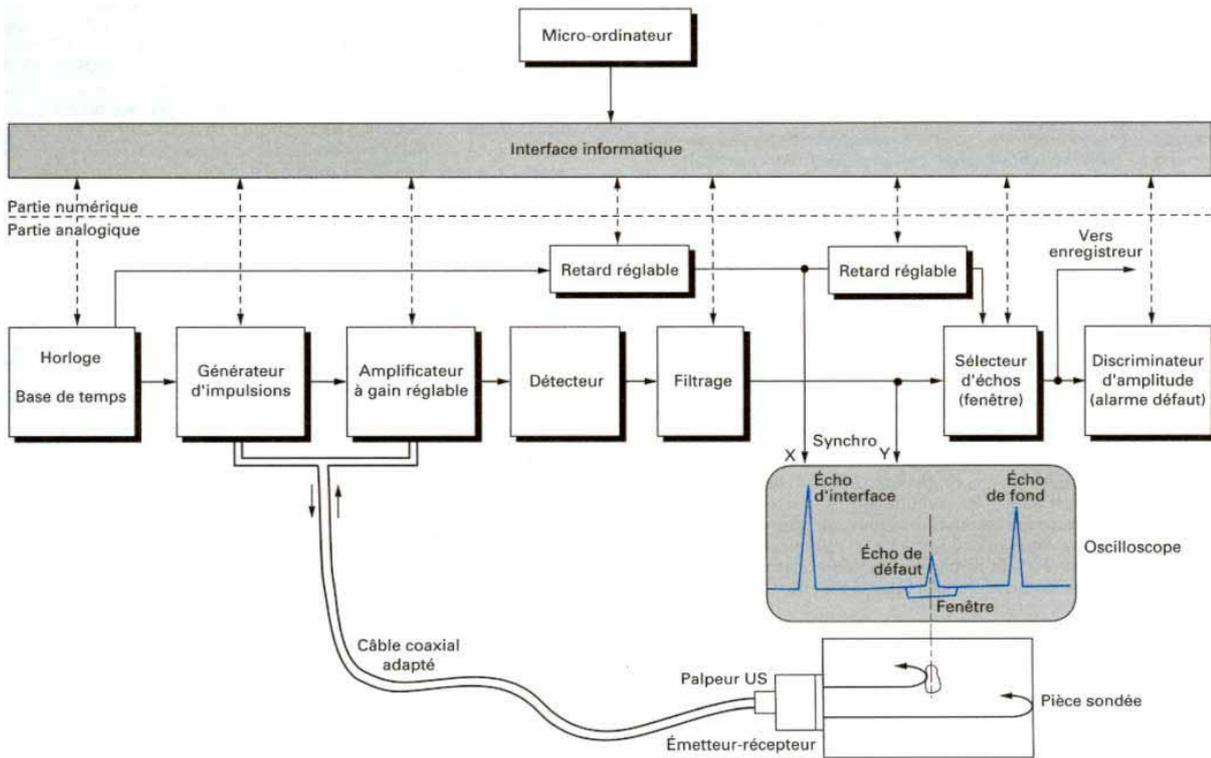
5.3 Dimensionnement des défauts

Le dimensionnement des défauts détectés est une préoccupation légitime du contrôleur en vue de les relier à des critères de nocivité technologique faisant en général l'objet d'une procédure normalisée ou spécifique. C'est un problème délicat auquel on peut toutefois donner des solutions pratiques simples. Deux cas se présentent en théorie, selon que le champ du palpeur est censé être supérieur ou inférieur à la dimension moyenne du défaut.

Dans le premier cas, tout le défaut est éclairé par le faisceau et l'on peut relier l'amplitude de l'écho de retour à la dimension du défaut à l'aide de diagrammes qui prennent en compte l'ensemble des paramètres ultrasonores du sondage. Cette méthode, souvent appelée **méthode AVG**, est intéressante mais délicate d'emploi, sur tout lorsque le défaut à dimensionner présente une orientation et une morphologie très éloignées des cas théoriques (généralement matérialisés par des réflecteurs constitués par des trous à fond plat forés dans les blocs d'étalonnage).

Lorsque le défaut est plus grand que le faisceau, ce que l'on peut parfois volontairement obtenir en utilisant l'étroit champ d'un palpeur focalisé, on trace son contour apparent, soit en repérant et en quantifiant le basculement entre écho de fond et écho de défaut (normes de contrôle de tôles fortes par exemple), soit en utilisant la règle « des - 6 dB » qui prend en compte un rapport 1/2 entre l'amplitude maximale de l'écho de défaut et celle obtenue lorsque les bords du défaut occultent environ à moitié la section du faisceau ultrasonore.

Figure 20 – Schéma de principe d'un appareil classique de contrôle par ultrasons



5.4 Champ d'application :

Le champ d'application du contrôle ultrasonore concerne principalement, outre bien entendu le domaine médical, l'examen des **pièces métalliques** et de leurs assemblages en fabrication et en service, donc l'ensemble des industries métallurgiques, mécaniques, nucléaires et aéronautiques. Ce champ s'élargit de plus en plus au contrôle des matériaux et assemblages non métalliques, céramiques, polymères, matériaux composites, béton ; cela s'effectue lentement, eu égard aux difficultés pratiques rencontrées et dues à la nature même de ces produits à structure peu homogène et anisotrope.

Il faut rappeler aussi qu'indépendamment de la défectologie, les ultrasons sont très employés pour les mesures d'épaisseur et, plus récemment, dans l'évaluation de certains paramètres métallurgiques comme les grosseurs de grains, les textures, les profondeurs de traitements thermo-chimiques superficiels sur les aciers, et enfin l'estimation des contraintes mécaniques.

5.5 Évolution :

L'évolution du contrôle ultrasonore va vers un plus grand recours à l'automatisation des opérations, avec l'objectif de simplifier, de fiabiliser les procédures, d'accroître la reproductibilité et la productivité des essais. Cela est rendu possible grâce aux progrès du matériel et des moyens de traitement de l'information. Il n'en reste pas moins que la **qualification du contrôleur** reste primordiale pour les raisons exprimées plus haut.

Notons enfin le développement de l'utilisation en laboratoire d'un nouvel outil d'investigation et d'étude de la microstructure des matériaux : le **microscope acoustique** utilisant de très hautes fréquences ultrasonores, ce qui conduit à un fort pouvoir de résolution (quelques micromètres) accompagné malheureusement d'une faible pénétration des ondes dans la matière (quelques dixièmes de millimètre).

III.4. Conclusion :

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 Défauts soit transversale ou longitudinale.

Chapitre IV :
Pratique des CND par ultrasons

Partie pratique

1. Introduction :

- Vu que le laminage ne peut en aucun cas garantir une épaisseur uniforme sur tout le corps du tube
Suite aux nombre important des tubes déclassés pour épaisseur faible après traitement thermique.

2. Préconisation :

Un essai pour en conclure l'influence du traitement thermique sur les tubes de nuance X52L'essai consiste à prélever 20 tubes de la commande en cours de dimension 10" X 7.84 de nuance X52 Q Les inspectés à NDT avant TTH de tracer la cartographie des tubes Puis un contrôle à NDT après TTH et étudier l'impact du traitement sur les épaisseurs des tubes de dimension

10" X 8.74 de nuance X 52 Q.

3. Fiche technologique du traitement :

Température du four de trempe : 920°C à 930°C

Température du four de revenu : 720°C

Pression d'eau de la déca lamineuse : 115 Bars

Pression d'eau de la trempe : 450 Bars

Temps de séjour Trempe: 34 mn

Temps de séjour Revenue: 46 mn

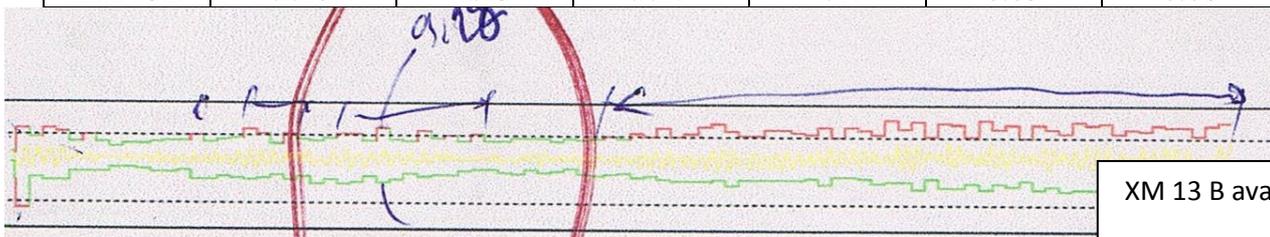
4. Remarque sur la relève du graphe de tubes à NDT

Rep.	Décision	Remarque avant TTH	Remarque après TTH	Décision
XL 32 B	BON	Tendance du laminage vers le maxi	Diminution des points maxi	BON
XM 33B	BON	Excentration à 1.5 m -5 m et 8 m	Tendance vers le mini sur les points d'excentrations	BON
XM 34C	BON	Excentration à 3.5 m -7 m et 10 m	Tendance vers le mini sur les points d'excentrations	BON
XM 38B	BON	Excentration à 3.5 m puis laminage régulier	Laminage régulier (aucun point maxi)	BON
XO 2B	BON	Excentration à 2 m et 10 m	Diminution des points maxi	BON
XM 35C	BON	Laminage régulier avec des points maxi	Aucun maxi (Les points max ont disparus)	BON

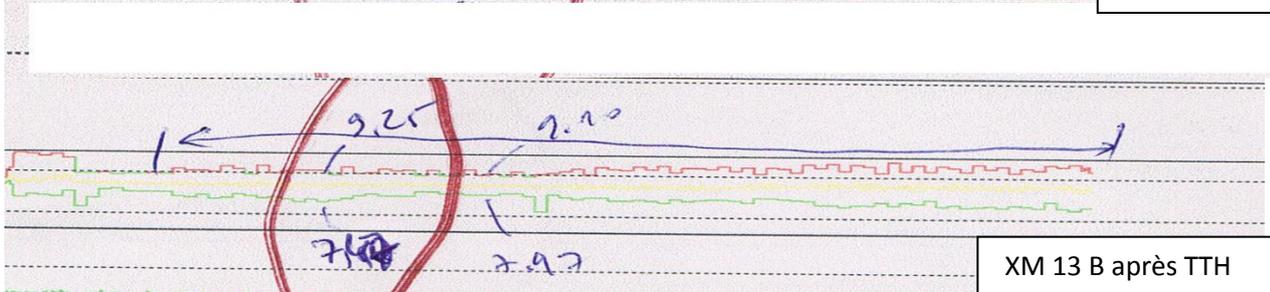
XM 31B	Déclasser	Ep 6.70 à 4.88m	2 zones faible à 2.5 m et 4.5 m	Déclasser
XM 34B	BON	Excentration à 2.5 m - 5.5 m et 8.5 m	Tendance vers le mini sur les points d'excentrations	BON
XM15 C	BON	Excentration à 6.5 m	Tendance vers le mini sur les points d'excentrations	BON
XM 16C	Déclasser	Ep 6.78 à 4.28 m et 6.70 à 5.32 m	3 points et une zone importante d'épaisseur faible	Déclasser
XM 11B	BON	Laminage régulier avec des points maxi	Laminage régulier	BON
XM 18C	BON	Excentration à 4 m- 7m et 9.5 m	Tendance vers le mini sur les points d'excentrations	BON
XM 19B	BON	Laminage régulier avec des points maxi	Laminage régulier sans les points maxi	BON
XM 17B	BON	Laminage régulier avec des points maxi	Laminage régulier	BON
XM 13B	BON	laminage vers le maxi	Laminage régulier avec des points maxi	BON
XM 12C	BON	Excentration à 3 m - 6 m et 9 m	Tendance vers le mini sur les points d'excentrations	BON

5. Commentaire des graphes avant TTH et après TTH

Repère	Epaisseur relevée Avant TTH		Epaisseur relevée Après TTH		Ecart maxi	Ecart mini
	9.28	7.53	9.25	7.47		
XM 13B	9.28	7.53	9.25	7.47	0.03	0.06

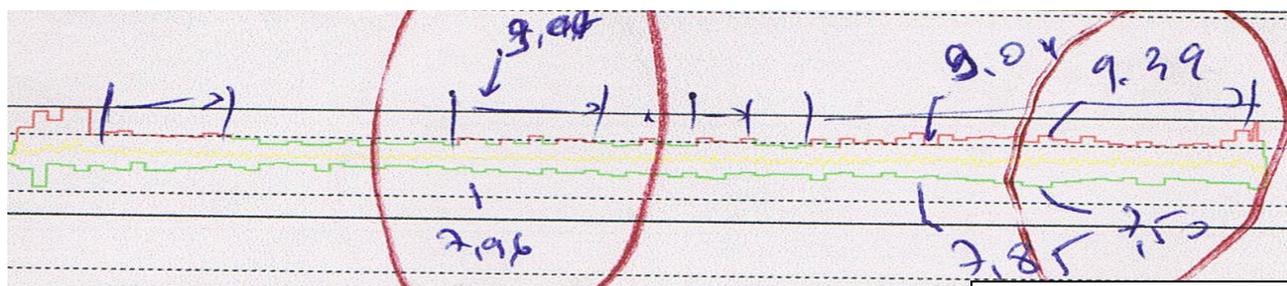


XM 13 B avant TTH

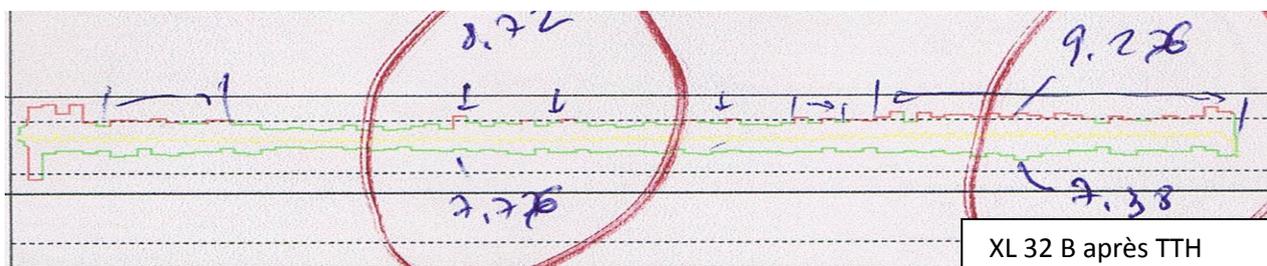


XM 13 B après TTH

Repère	Epaisseur relevée Avant TTH		Epaisseur relevée Après TTH		Ecart maxi	Ecart mini
XL 32B	9.07	7.98	8.80	7.76	0.27	0.22
	9.39	7.50	9.28	7.30	0.11	0.20

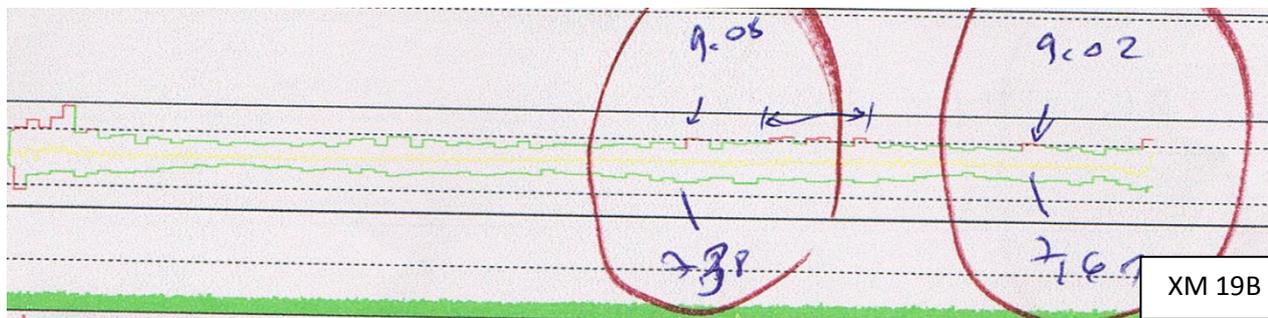


XL 32 B avant TTH

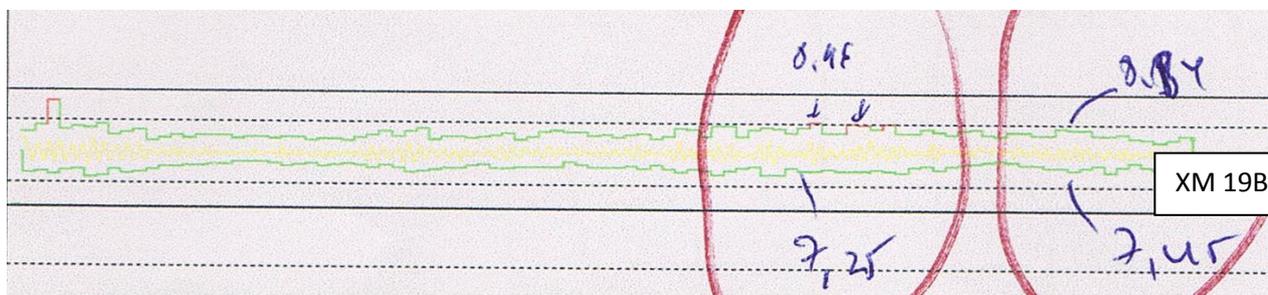


XL 32 B après TTH

Repère	Epaisseur relevée Avant TTH		Epaisseur relevée Après TTH		Ecart maxi	Ecart mini
XM 19B	9.08	7.38	8.96	7.25	0.08	0.07
	9.02	7.61	8.84	7.45	0.18	0.16

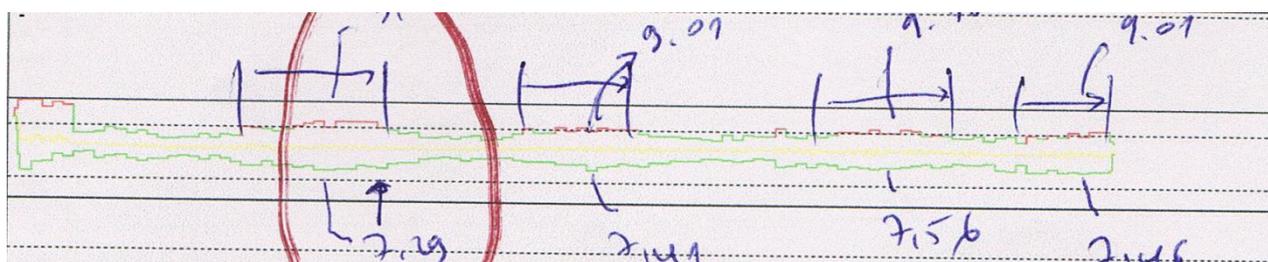


XM 19B Avant TTH



XM 19B Après TTH

Repère	Epaisseur relevée Avant TTH		Epaisseur relevée Après TTH		Ecart maxi	Ecart mini
XM 34C	9.04	7.29	9.00	7.02	0.04	0.27



XM 34 C avant TTH

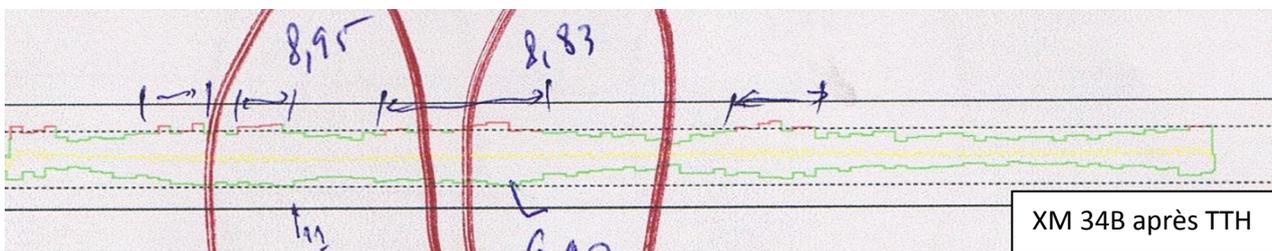


XM 34 C après TTH

Repère	Epaisseur relevée Avant TTH		Epaisseur relevée Après TTH		Ecart maxi	Ecart mini
XM 34B	8.99	7.08	8.90	6.93	0.09	0.15
	9.12	7.15	8.83	6.90	0.29	0.25

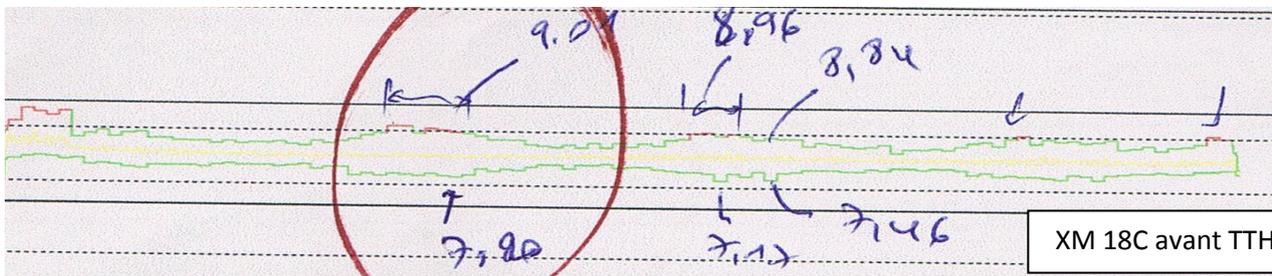


XM 34B avant TTH

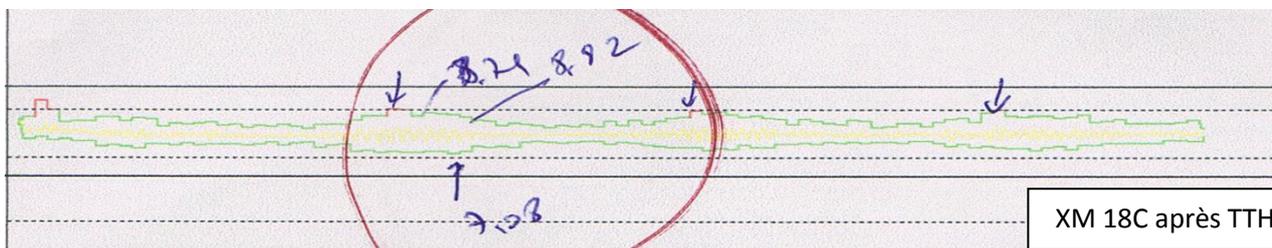


XM 34B après TTH

Repère	Epaisseur relevée Avant TTH		Epaisseur relevée Après TTH		Ecart maxi	Ecart mini
XM 18C	9.01	7.20	8.82	7.08	0.19	0.12

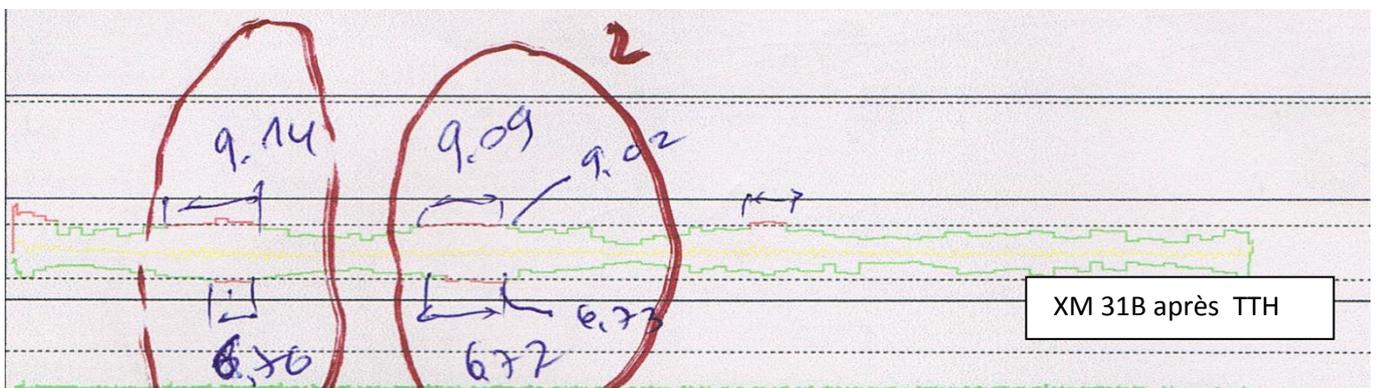
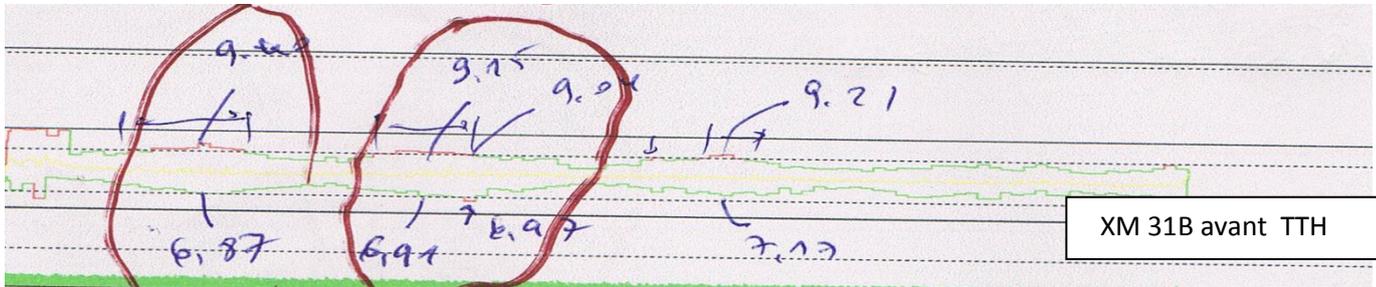


XM 18C avant TTH

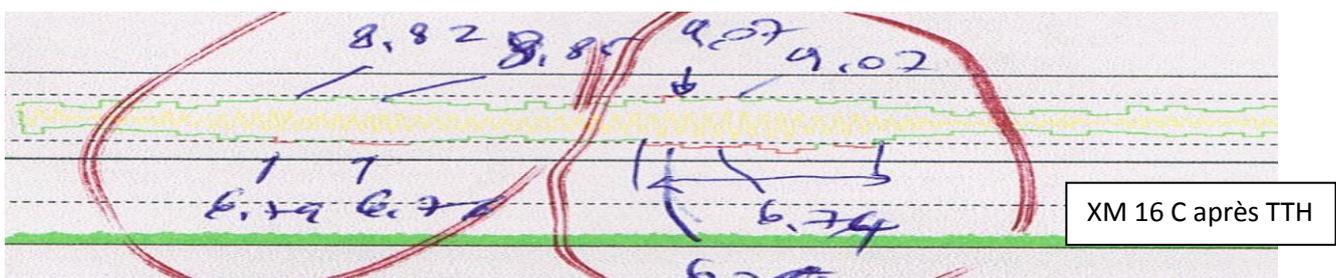
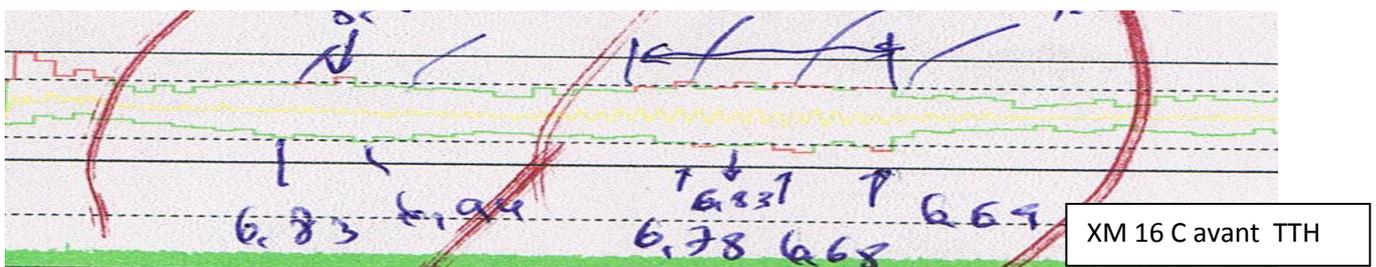


XM 18C après TTH

Repère	Epaisseur relevée Avant TTH		Epaisseur relevée Après TTH		Ecart maxi	Ecart mini
XM 31 B	9.20	6.87	9.14	6.76	0.06	0.09
	9.04	6.97	9.02	6.73	0.02	2.4



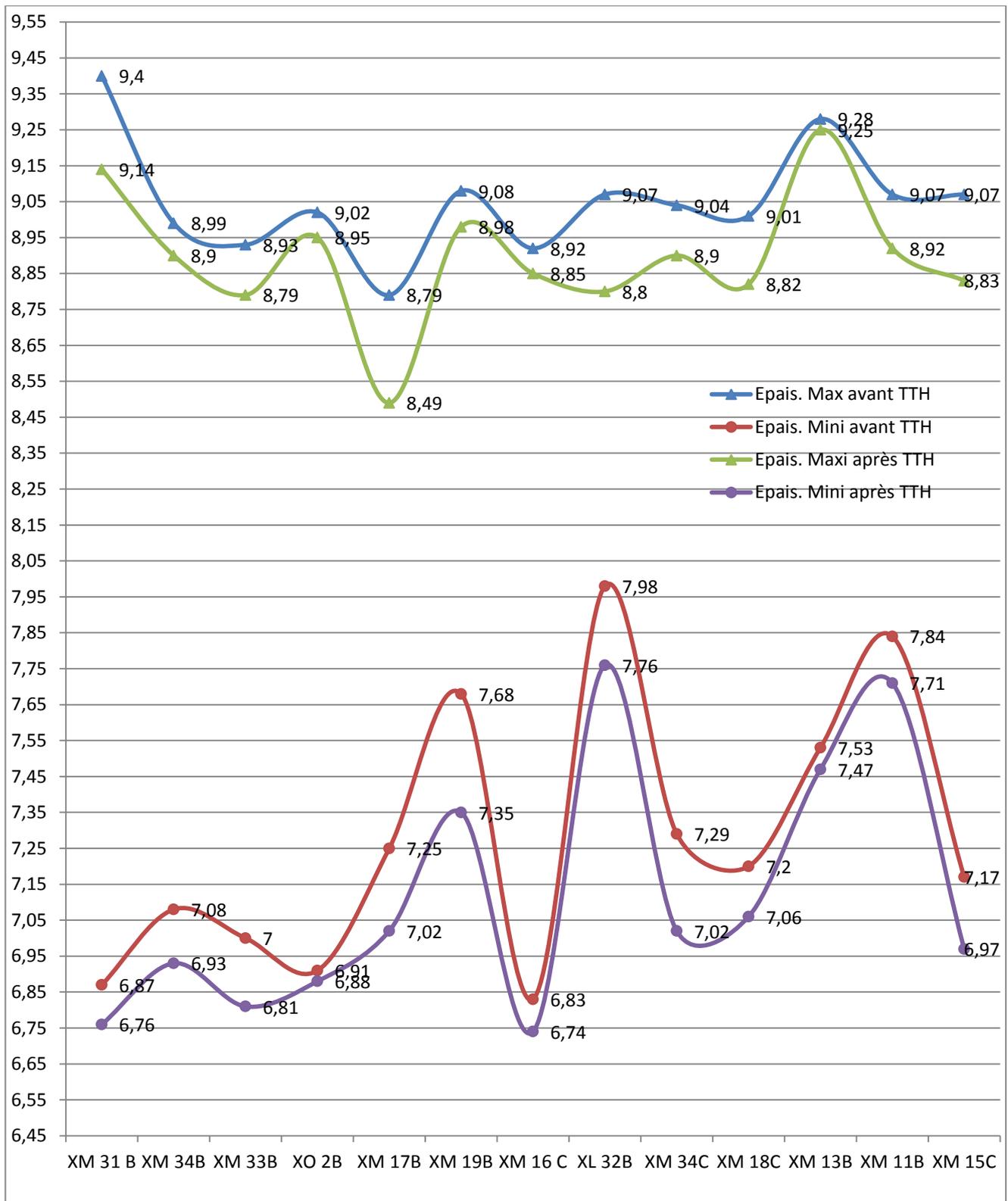
Repère	Epaisseur relevée Avant TTH		Epaisseur relevée Après TTH		Ecart maxi	Ecart mini
XM 16 C	8.92	6.83	8.85	6.78	0.07	0.05
	9.07	6.78	8.98	6.74	0.09	0.04



6. Interprétation des valeurs des épaisseurs sur une même génératrice du tube sur les graphes :

Repère	Epaisseur relevée Avant TTH (mm)		Epaisseur relevée Après TTH (mm)		Ecart des points maxi (mm)	Ecart des points mini (mm)
	Ep maxi(1)	Ep mini(2)	Ep maxi(3)	Ep min(4)	Point 1 –point3	Point 2 –point 4
XM 31 B	9.40	6.87	9.14	6.76	0.26	0.11
	9.20	6.97	9.02	6.73	0.18	0.24
XM 34B	8.99	7.08	8.90	6.93	0.09	0.15
	9.12	7.15	8.83	6.90	0.29	0.25
XM 33B	8.93	7.00	8.79	6.81	0.14	0.19
	8.93	7.18	8.79	7.01	0.14	0.17
XO 2B	9.02	6.91	8.95	6.88	0.07	0.03
	9.00	7.01	8.89	6.93	0.11	0.08
XM 17B	8.79	7.25	8.49	7.02	0.3	0.23
XM 19B	9.08	7.68	8.98	7.35	0.1	0.33
	9.02	7.61	8.84	7.45	0.18	0.16
XM 16 C	8.92	6.83	8.85	6.78	0.07	0.05
	9.07	6.78	8.98	6.74	0.09	0.04
XL 32B	9.07	7.98	8.80	7.76	0.27	0.22
	9.39	7.50	9.28	7.30	0.11	0.20
XM 34C	9.04	7.29	8.90	7.02	0.14	0.27
XM 18C	9.01	7.20	8.82	7.06	0.19	0.14
XM 13B	9.28	7.53	9.25	7.47	0.03	0.06
XM 11B	9.07	7.84	8.92	7.71	0.15	0.13
XM 15C	9.07	7.17	8.83	6.97	0.24	0.2

7. Variation des épaisseurs avant TTH et après TTH sur quelques points



Remarque :

On voit que les tubes mis en expérience que les diamètres maxi et mini après traitement thermique sont diminués et certains tubes de diamètres mini sont rejetés

8. Conclusion :

L'étude est faite sur partie des tubes d'essai et on remarque la réduction des épaisseurs sur les tubes ayant subit le traitement thermique.

NB : voir tableau des interprétations des épaisseurs

Conclusion générale :

Cette expérience a comme objectif de montrer l'application des ultrasons pour le contrôle qualité de fabrication des tubes sans soudures.

En particulier, nous proposons l'examen en par ultrasons des pièces contenant des défauts exemple :

XM 31 B ; XM 33B ; XM 13B.....

Après avoir rappelé brièvement la nature, le but et le domaine d'application du contrôle non destructif, nous avons tout d'abord évoqué les grands principes de détection des défauts et les bases physiques qui gouvernent les procédés et leur performance. Nous avons ensuite décrit plus en détail les principes physiques, la réalisation et la mise en œuvre des 8 principales familles de procédés du contrôle non destructif, à savoir : les procédés optiques, le ressuage, les procédés par bruit de barkausen, les procédés par courants de Foucault, les procédés radiographiques, les procédé par thermographie, les procédé par magnétoscopie, enfin les procédés de contrôle par ultrasons. Nous avons volontairement omis les procédés de **contrôle d'étanchéité** qui, bien que traditionnellement rattachés au domaine des essais non destructifs, Il en va de même pour les techniques de **l'émission acoustique** qui font l'objet d'un article complet et de la **thermographie infrarouge**. Enfin, nous avons laissé de côté tous les procédés qui s'apparentent plus nettement au domaine de l'instrumentation ou de l'analyse plutôt qu'à celui de la recherche de défauts (mesure de paramètres structuraux, géométriques, physiques, chimiques) et ceux qui, bien que décrits dans la littérature technique, sont trop récents, pas assez au point ou d'utilisation trop spécifique.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

1. Documentation technique AMPTA « service maintenance, bureau des méthodes, service électrique, la direction générale ».
2. Documents techniques de la pompe m21 de l'AMPTA.
3. PERDIJON (J.). – Le contrôle non destructif par ultrasons. Page 73, Éditions Hermès (1990).
4. PIODI (A.). – Le contrôle non destructif par interférométrie holographique. Revue Française de Mécanique, n° 70 (1979).
5. PERDRIX (M.). – Principe du contrôle non destructif par courants de Foucault. CAST, INSA de Lyon (Institut National des Sciences Appliquées).
6. www.iso.com
7. Qualité dans les Industries (CHRISTIANE JOFFIN).
8. Jean-François PILLOU. (Qualité-introduction). Article rédigé le 16 décembre 2004.
9. www.marposs.com
10. Documents MAG-MAT, N°20, Octobre- Décembre 2006.
11. C. CHENU, 'Génération d'ondes de Rayleigh par laser multi source', Thèse de L'Université Paris VII soutenue le 24 novembre 1997.
12. E. LAFOND, 'Etude de la génération et de la détection d'ultrasons par lasers en vue du contrôle non destructif, Thèse soutenue le 26 Octobre 1995 à l'Université Paris XI.
13. www.acs.psu.edu/drussell/demos.html
14. PERDRIX (M.). – Principe du contrôle non destructif par courants de Foucault. CAST, INSA de Lyon (Institut National des Sciences Appliquées).
15. SAGLIO (R.), ROULÉ (M.) et TOUFFAIT (A.M.). – Application des ultrasons focalisés à la mesure des dimensions des défauts. Proceeding 8^e Conférence Mondiale des essais non destructifs, Cannes (1976).