

Université Badji Mokhtar
Faculté de technologie
Département de génie mécanique
Spécialité : Génie des matériaux



جامعة باجي مختار - عنابة
كلية التكنولوجيا
قسم الهندسة الميكانيكية
تخصص هندسة المواد

Mémoire
Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master II

Thème :

Contrôles non destructifs par ultrasons

Présenté par : BEDDIAR ANIS

Encadré par : Pr. BOURENANE RABAH

DEVANT LE JURY

Mr. BOURENANE

Mr. GHELLOUDJ

Mr. BOUGOFFA

Année Universitaire : 2023/2024

Remerciement

Avant toute chose, je remercie Dieu de m'avoir donné la force et la patience pour mener à bien ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à mon encadrant Pr. BOURENANE RABAH pour sa bienveillance, sa disponibilité et ses conseils avisés qui ont largement contribué à l'avancement de ce projet.

Mes remerciements s'adressent également à l'équipe pédagogique de département de génie mécanique pour leur accompagnement tout au long de ma formation.

Mes sincères remerciements vont aussi à Mr. Farid Rachdi responsable des tests de CND par ultrasons et toute l'équipe de l'unité de TSS pour leur soutien technique et leur accueil.

Enfin, je remercie du fond du cœur ma famille et mes amis, pour leur soutien constant, leurs encouragements et leur présence durant toutes les étapes de ce parcours.

Sommaire

Introduction Générale.....	8
Chapitre I : Partie théorique	11
I.1. Introduction	12
I.2. Rôle du CND	12
I.3. Différentes méthodes de CND.....	12
I.4. Méthode de CND par ultrasons (US)	13
I.5. Fonctionnement d'un appareil à ultrasons :.....	14
I.6. Principe de fonctionnement de l'appareil à ultrasons :.....	16
I.7. Technologie du palpeur	18
I.7.1. Le palpeur droit	20
I.7.2. Les palpeurs à bi-éléments	21
I.7.3. Les palpeurs d'angle.....	21
I.7.4. Les palpeurs à angle variable	21
I.8. Choix du milieu de couplage	22
I.9. Base de temps	23
I.10. Production des ultrasons	23
Chapitre II : CND et L'unité TSS	25
I.11. Introduction	26
II.1. Historique du service TSS (Tubes Sans Soudure).....	26
II.2. L'organisation du TSS.....	27
II.3. Introduction au contrôle par ultrasons	28
II.4. Défauts recherchés.....	28
II.5. Pourquoi utiliser l'US ?	30
II.5.1. Sensibilité et précision élevées.....	30
II.5.2. Grande profondeur de pénétration.....	30
II.5.3. Méthode non destructrice et sécurisée	30
II.5.4. Résultats instantanés et traçabilité.....	31
II.5.5. Automatisation et portabilité	31
II.5.6. Mesures quantitatives	31
II.5.7. Conformité aux normes internationales	32
II.5.8. Rapport performance / coût avantageux.....	32
Chapitre III : La production des tubes sans soudure	33

III.1. Introduction	34
III.2. Types de tubes fabriqués	34
III.3. Étapes de fabrication d'un tube sans soudure à chaud	35
III.4. Objectifs de l'essai pratique	37
III.5. Matériel et normes	38
III.6. Les commandes principales.....	38
Chapitre IV: Partie Pratique	39
IV.1. Introduction	40
IV.2. Contrôle magnétoscopique (MT).....	40
IV.3. La commande et le contrôle par ultrasons	42
IV.3.1. Cahier de charge.....	43
IV.3.2. Étapes du contrôle CND-U	46
IV.3.3. Cas pratique 1 : Tube non conforme	47
IV.3.4. Cas pratique 2 : Tube conforme	49
Conclusions	50

Liste de figures

Figure 1.Schéma représente les différentes bandes de son	14
Figure 2.Schéma représente Fonctionnement d'un appareil à ultrasons.....	15
Figure 3.Schéma représente le principe de l'appareil à ultrason	17
Figure 4.Image représente les différents types des palpeurs.....	19
Figure 5.Schéma représente palpeur angle et bi-élément	20
Figure 6.Plan de masse de la TSS	27
Figure 7.L'organisation du service TSS.....	27
Figure 8.Tuyaux Line-Pipe	34
Figure 9.Tuyaux Casing	35
Figure 10.Un tube sans soudure entrain de fabrication.....	36
Figure 11.Application du champ magnétique	41
Figure 12.Détection des défauts visuels.....	41
Figure 13.Les pics rouges sur l'écran du logiciel qui présente les défauts.....	47
Figure 14.Fissure transversale.....	47
Figure 15.Fissure longitudinale.....	47
Figure 16.Le coup à chaud	48
Figure 17.Aucun pic rouge (aucun défaut détecté)	49

Liste des tables

Tableau 1. Différente méthode de CND	13
Tableau 2. Les défauts recherchés par le contrôle de CND par ultrasons	28
Tableau 3. Matériel et normes utilisé	38
Tableau 4. Les commandes principales	38

Résumé

Ce mémoire présente une étude approfondie du contrôle non destructif (CND), en mettant l'accent sur la méthode par ultrasons (US) appliquée aux tubes sans soudure produits au sein de l'unité TSS de SIDER El Hadjar. Il combine un volet théorique expliquant les principes, technologies et normes du CND, et une partie pratique illustrée par des cas réels de contrôle en production. L'objectif est de démontrer l'efficacité du contrôle US dans la détection des défauts internes, la conformité aux normes et la garantie de la qualité industrielle. Cette expérience a renforcé mes compétences techniques et ma compréhension des exigences du secteur sidérurgique.

ملخص

يعرض هذا البحث دراسة معمقة حول التفتيش غير الإتلافي (CND)، مع التركيز على طريقة الموجات فوق الصوتية (US) المطبقة على الأنابيب الفولاذية غير الملحومة المنتجة في وحدة TSS بمركب سیدار الحجار. يجمع البحث بين جزء نظري يشرح المبادئ والتقنيات والمعايير المرتبطة بتقنيات التفتيش غير الإتلافي، وجزء تطبيقي مدعوم بحالات واقعية لعمليات التفتيش أثناء الإنتاج. الهدف من هذا العمل هو إثبات فعالية طريقة US في الكشف عن العيوب الداخلية، والتأكد من مدى مطابقة الأنابيب للمعايير، وضمان جودة المنتجات الصناعية. وقد مكنتني هذه التجربة من تعزيز مهاراتي التقنية وفهمي لمتطلبات قطاع صناعة الفولاذ.

Abstract

This research presents an in-depth study of non-destructive testing (NDT), with a specific focus on the ultrasonic testing (UT) method applied to seamless steel tubes produced at the TSS unit of SIDER El Hadjar. It combines a theoretical section explaining the principles, technologies, and standards of NDT, with a practical section illustrated by real-life case studies conducted during production. The objective is to demonstrate the effectiveness of ultrasonic testing in detecting internal defects, ensuring compliance with standards, and guaranteeing industrial product quality. This experience significantly strengthened my technical skills and deepened my understanding of the requirements of the steel manufacturing sector.

Introduction Générale

Introduction Générale

La fiabilité, la sécurité et la performance opérationnelle sont indispensables dans les industries modernes (aéronautique, automobile, énergie, construction navale, pétrole et gaz, etc.). Dans ce contexte exigeant, le contrôle non destructif (CND) s'impose comme un allié essentiel pour évaluer la qualité et l'intégrité des matériaux sans les abîmer. Les essais non destructifs garantissent « une évaluation précise de l'intégrité des matériaux sans compromettre leur performance », car ils permettent de détecter les défauts potentiels avant qu'ils ne deviennent critiques. Cette approche préventive renforce la confiance dans les pièces inspectées et minimise les risques de défaillance, tout en évitant des réparations coûteuses ou des arrêts non planifiés.

Le CND regroupe plusieurs méthodes complémentaires adaptées à chaque application. Parmi les plus courantes figurent l'inspection visuelle (VT), le ressuage (PT), la magnétoscopie (MT), la radiographie (RT), les courants de Foucault (ET) et la thermographie infrarouge (IRT). Qu'elles utilisent des ondes électromagnétiques, des ondes acoustiques, des champs magnétiques ou des liquides pénétrants, ces techniques fournissent toutes des informations cruciales sur l'état interne des pièces sans altérer leur structure. Comme elles ne modifient pas les pièces testées, elles peuvent être mises en œuvre à tous les stades (fabrication, maintenance, surveillance) et maximisent la disponibilité des installations en réduisant les arrêts et les coûts liés aux pannes imprévues.

Parmi ces méthodes, le contrôle par ultrasons occupe une place centrale. Il repose sur l'émission d'ondes acoustiques haute fréquence capables de pénétrer profondément dans le matériau, ce qui en fait un outil précieux pour inspecter et évaluer l'intégrité des structures sans les endommager. Les ondes ultrasonores réfléchies révèlent la présence de fissures, de vides, de délaminations, de corrosion ou d'autres défauts internes. Cette technique est très sensible : elle détecte même de petits défauts et offre une grande précision de localisation. De plus, sa mise en œuvre est rapide et peut être automatisée, fournissant des résultats en temps réel. Polyvalente, l'inspection ultrasonore est utilisée dans des secteurs exigeants (aéronautique, automobile, énergie, pétrole et gaz) où l'on recherche à la fois précision et efficacité.

Au total, le contrôle non destructif – et en particulier l'ultrason – joue un rôle clé dans la prévention des risques industriels. En détectant précocement les défauts potentiellement dangereux, ces techniques permettent de prévenir les accidents et d'assurer la continuité des opérations. C'est pourquoi les normes industrielles (API, ISO, etc.) intègrent systématiquement le CND pour garantir la sécurité et la

qualité des installations. Grâce à ces inspections non invasives, les ingénieurs peuvent maintenir les équipements en bon état, en conformité avec les exigences réglementaires, et ainsi prolonger leur durée de vie tout en assurant un haut niveau de performance.

Chapitre I : Partie théorique

I.1. Introduction

Les contrôles non destructifs (CND) sont devenus indispensables dans l'industrie pour garantir la qualité et la fiabilité des matériaux sans nuire à leur intégrité. Ils permettent de détecter des défauts invisibles à l'œil nu, tout en préservant la pièce inspectée. Ce chapitre présente les principes généraux des CND, leurs différentes méthodes, ainsi qu'un focus particulier sur le contrôle par ultrasons (US), largement utilisé pour l'inspection interne des matériaux métalliques. [1]

I.2. Rôle du CND

Le Contrôle Non Destructif (CND) regroupe un ensemble de techniques permettant de vérifier l'intégrité, la qualité et la conformité d'un matériau, d'un composant ou d'un assemblage sans altérer ses propriétés ni le détruire.

Le rôle principal du CND est de détecter les défauts internes ou de surface, évaluer les propriétés mécaniques ou structurelles et garantir la fiabilité d'un produit tout au long de son cycle de vie.

Il est largement utilisé dans les industries critiques telles que :

- l'aéronautique
- la pétrochimie
- la construction navale
- la sidérurgie (comme dans l'unité TSS – tubes sans soudure)

Les objectifs du CND sont donc :

- Assurer la sécurité des installations et des personnes.
- Réduire les coûts liés aux réparations ou aux arrêts de production.
- Optimiser la qualité de fabrication et la durée de vie des produits.

I.3. Différentes méthodes de CND

Plusieurs méthodes complémentaires existent pour repérer les défauts, chacune adaptée à certains matériaux et types de défauts. Parmi les principales : [2]

Tableau 1. Différente méthode de CND

Méthode	Abréviation	Principe de base	Application typique
Radiographie	RT	Rayons X ou gamma traversant la matière	Détection de défauts internes profonds
Magnétoscopie	MT	Champs magnétiques + particules ferromagnétiques	Fissures de surface sur matériaux ferromagnétiques
Ressuage	PT	Liquide coloré/pénétrant + révélateur	Fissures de surface, porosités
Courants de Foucault	ET	Courants induits dans le métal par induction	Fissures de surface ou subsurface
Ultrasons	US	Ondes ultrasonores réfléchies à travers la matière	Fissures internes, corrosion, inclusions
Visuel	VT	Inspection à l'œil nu ou avec aides optiques	Défauts visibles externes

I.4. Méthode de CND par ultrasons (US)

En avril 1912, le naufrage du Titanic et la disparition de ses 1500 passagers ont profondément marqué les esprits. Ce drame, causé par une collision avec un iceberg, a poussé les scientifiques du monde entier à rechercher des moyens permettant de détecter des obstacles invisibles, afin de prévenir de telles

catastrophes. Le chercheur russe Sokolov fut l'un des premiers à proposer l'utilisation des vibrations ultrasonores pour la détection de défauts dans les matériaux.

Dans une publication datant de 1929, il expose ses travaux portant sur la génération et la propagation des ondes ultrasonores à travers différents milieux, en mettant particulièrement l'accent sur les métaux. En poursuivant ses recherches, il testa divers échantillons de fonte et d'acier, et suggéra que « les vibrations ultrasonores pourraient venir en complément des essais réalisés par rayons X ».

Les ultrasons sont des vibrations élastiques de nature mécanique, qui ne peuvent se propager que dans des milieux matériels solides ou liquides, à l'exclusion des gaz et du vide.

Ils possèdent la même nature que les sons audibles, mais se distinguent par une fréquence beaucoup plus élevée.

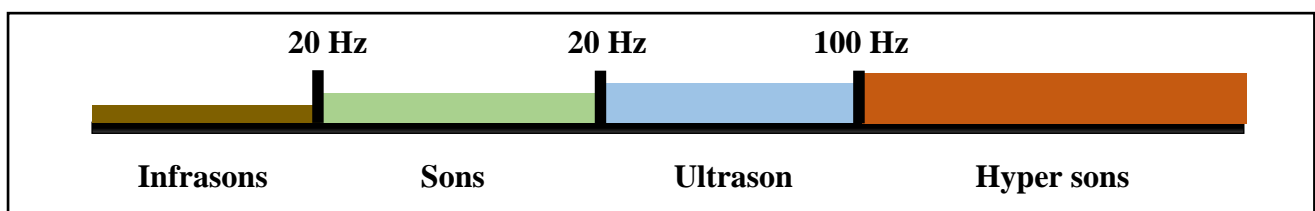


Figure 1.Schéma représente les différentes bandes de son

Les longueurs d'onde des ultrasons sont comparables à celles des ondes hertziennes de type millimétrique, ce qui explique qu'ils partagent plusieurs propriétés physiques : propagation en ligne droite, réflexion, réfraction, diffusion, interférences ainsi que la formation de zones d'ombre en présence de défauts ou d'obstacles. [1]

I.5. Fonctionnement d'un appareil à ultrasons :

L'émission des ondes ultrasonores se fait par impulsions successives, afin de permettre la réception des échos entre deux impulsions. Un générateur envoie ces

impulsions (de l'ordre de 100 V chacune) à une fréquence de répétition notée μ , régulée par une horloge.

Lors de la réception, le signal d'écho est extrêmement faible (environ 0,01 V) et doit donc être amplifié (avec un gain pouvant atteindre 100 dB) pour être visible sur l'écran d'un tube cathodique.

Dans une représentation de type A, l'horloge pilote une base de temps qui applique aux plaques de déviation horizontales du tube une tension proportionnelle au temps de parcours de l'onde ultrasonore. Ainsi, le spot lumineux s'allume et s'éteint à la fréquence μ .

Les plaques de déviation verticale, quant à elles, sont reliées au signal de sortie de l'amplificateur, permettant d'afficher l'intensité de l'écho reçu.

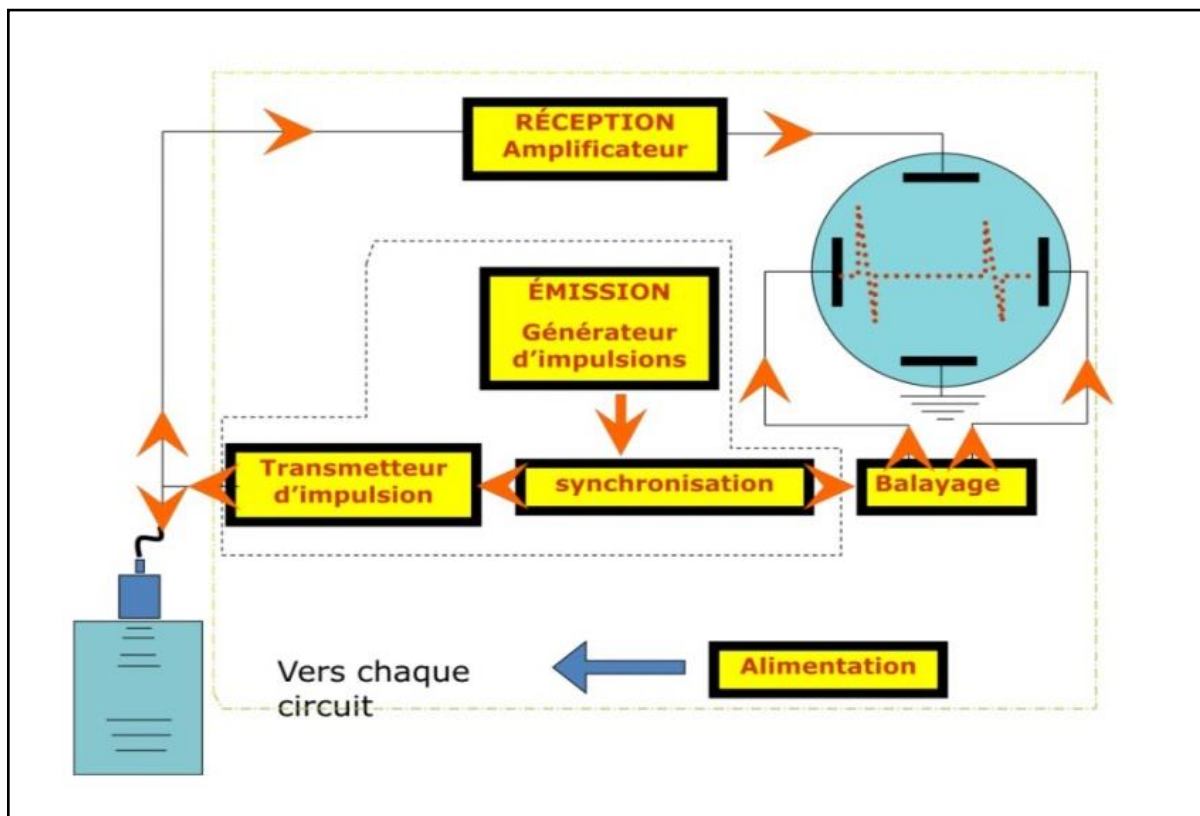


Figure 2. Schéma représente Fonctionnement d'un appareil à ultrasons

I.6. Principe de fonctionnement de l'appareil à ultrasons :

Pour illustrer simplement le principe d'un appareil à ultrasons, on peut se baser sur la méthode par impulsion-écho. Ce dispositif comporte un générateur qui émet des impulsions électriques vers le palpeur. Simultanément, ce signal est affiché sur l'écran sous forme d'un pic lumineux, appelé "top d'émission".

Le palpeur convertit immédiatement cette impulsion électrique en une onde ultrasonore, qui se propage à l'intérieur de la pièce à inspecter. Lorsque cette onde atteint la face opposée de la pièce, elle est réfléchi à l'interface pièce-air, agissant comme un miroir acoustique. Les ondes reviennent alors vers le palpeur. [3]

Pendant ce processus, le spot lumineux sur l'écran de l'appareil se déplace horizontalement. Dès que le signal réfléchi revient au palpeur, celui-ci le reconvertit en impulsion électrique, visible sur l'écran par une nouvelle déflexion horizontale appelée "écho de fond".

La distance entre le top d'émission et cet écho de fond représente le temps de parcours aller-retour de l'onde ultrasonore à travers le matériau, ce qui permet d'en déduire son épaisseur.

➤ **Que se passe-t-il en présence d'un défaut ?**

Si un défaut se trouve sur le trajet du faisceau ultrasonore, une partie des ondes est réfléchi prématurément vers le palpeur, avant même d'atteindre le fond de la pièce. Cela se traduit par l'apparition d'un écho intermédiaire sur l'écran. L'amplitude de cet écho dépend de la taille et de l'orientation du défaut. La distance entre le top d'émission et cet écho correspond alors à la position du défaut dans la pièce. [3]

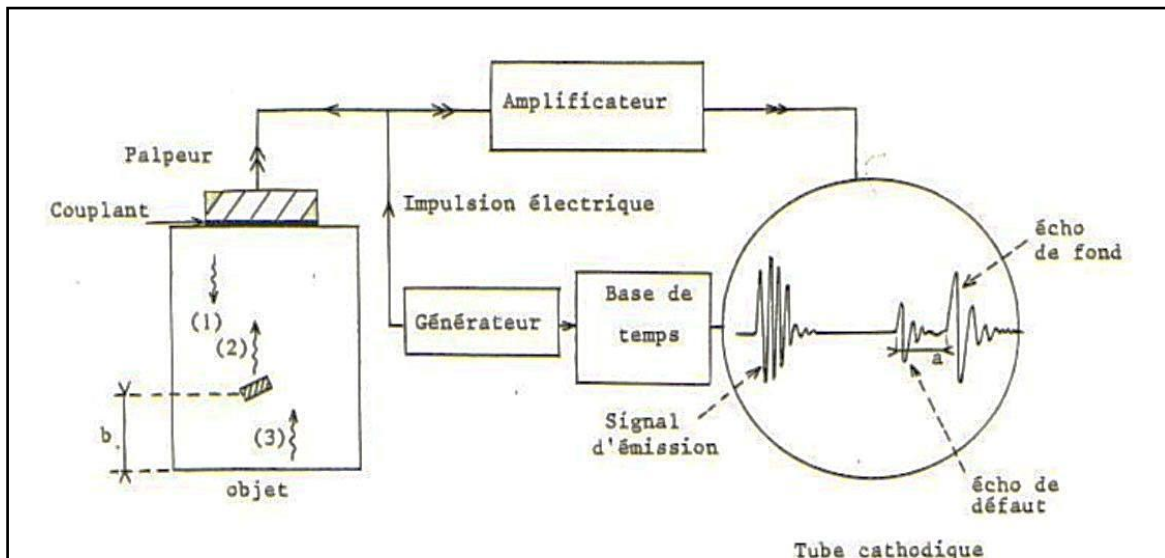


Figure 3. Schéma représente le principe de l'appareil à ultrason

L'utilisation d'un appareil à ultrasons exige des opérations d'étalonnage préalables, visant à régler l'appareil et ses accessoires conformément aux normes en vigueur. Ces réglages sont réalisés à l'aide de cales étalon ou d'échantillons de référence. Ils doivent être parfaitement maîtrisés par l'opérateur pour garantir la fiabilité du contrôle.

L'analyse de l'oscillogramme affiché à l'écran est déterminante : c'est elle qui permettra d'identifier la présence éventuelle de défauts dans le matériau examiné.

Voici quelques cas typiques d'interprétation :

1. Présence d'impuretés microscopiques :

On constate une atténuation de l'écho de fond accompagnée d'une perturbation irrégulière de la ligne horizontale, appelée « herbe ».

2. Pièce saine comportant une soudure :

Le faisceau ultrasonore de 4 MHz traverse la pièce et est réfléchi normalement sur la face opposée.

Mais si une défectuosité est présente sur le parcours, une réflexion a lieu en amont et un écho de défaut apparaît à l'écran. Son amplitude varie en fonction de la dimension et de l'orientation du défaut.

La distance entre le top d'émission et cet écho correspond à la profondeur du défaut.

Même dans les pièces apparemment saines, la présence d'inclusions se manifeste par la disparition ou l'atténuation de l'écho de fond, due à l'effet de masque généré par ces inclusions, qui absorbent ou diffusent l'onde ultrasonore. [4]

I.7. Technologie du palpeur

Les palpeurs sont des éléments essentiels dans un système de contrôle par ultrasons. Leur sélection, en fonction de l'application visée, doit être effectuée avec une attention particulière, en prenant en compte à la fois leurs capacités théoriques et les résultats attendus.

Au cœur du palpeur se trouve l'élément piézoélectrique, chargé de générer les ondes ultrasonores. Un autre composant tout aussi crucial est l'amortisseur, qui influence fortement la résolution du signal. Les performances globales du palpeur dépendent donc de l'association de ces deux éléments, ainsi que de leur configuration et de leur positionnement à l'intérieur du boîtier du palpeur, qui conditionnent ses usages spécifiques. [4]

➤ Types de palpeurs

Parmi les modèles les plus couramment utilisés, on distingue deux grandes familles :

1. **Les palpeurs droits**, qui génèrent des **ondes longitudinales**. On en trouve plusieurs variantes :
 - Le palpeur droit classique
 - Le palpeur à bi-éléments
 - Le palpeur à ligne de retard
 - Le palpeur focalisé

- Et les palpeurs adaptés aux contrôles par immersion
2. **Les palpeurs d'angle**, destinés à produire des **ondes transversales** ou des **ondes de surface**. Parmi ceux-ci :
- Les palpeurs d'angle standards
 - Les palpeurs à onde de surface (réfraction à 90°)
 - Les palpeurs à angle variable, y compris ceux permettant la génération d'ondes de Lamb



Figure 4. Image représente les différents types des palpeurs

➤ **Fonctionnement et caractéristiques techniques**

La fonction principale du palpeur est de convertir une énergie électrique en énergie mécanique ultrasonore, et inversement. Il agit donc à la fois comme émetteur et récepteur d'ondes ultrasonores.

Tous les palpeurs sont construits selon un principe commun, mais doivent être choisis en fonction :

- Du type de pièce à contrôler,
- Des défauts que l'on souhaite détecter,
- Et des conditions de contrôle (épaisseur, accessibilité, géométrie...).

La fréquence des ultrasons émis dépend de l'épaisseur du cristal piézoélectrique :

- Un cristal très fin génère des ultrasons à haute fréquence (meilleure résolution, faible pénétration),
- Tandis qu'un cristal plus épais produit des ondes à fréquence plus basse (meilleure pénétration, résolution moindre).

Afin de permettre au palpeur de passer rapidement en mode réception juste après l'émission, il est nécessaire de réduire la durée des oscillations. Cela est rendu possible grâce à un amortisseur, souvent constitué de matériaux tels que le liège, la sciure de bois, ou le plomb, associés à un liant.

L'élément sensible est généralement recouvert d'une fine couche de protection et l'ensemble est intégré dans un boîtier robuste, assurant la protection mécanique et la durabilité du palpeur.

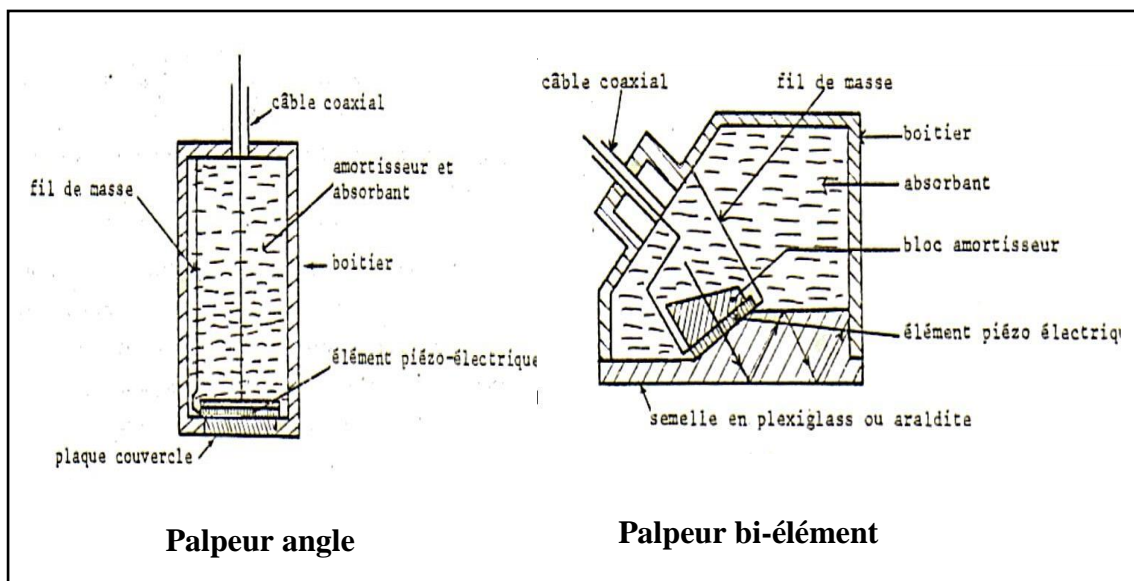


Figure 5. Schéma représente palpeur angle et bi-élément

I.7.1. Le palpeur droit

Les palpeurs droits sont conçus pour générer des ondes longitudinales. Bien qu'ils soient largement utilisés pour leur simplicité, leur principal inconvénient réside

dans leur incapacité à détecter les défauts situés dans la zone morte, c'est-à-dire très proche de la surface de contact. [4]

I.7.2. Les palpeurs à bi-éléments

Ces palpeurs se composent de deux éléments piézoélectriques distincts : l'un assure l'émission, l'autre la réception des ondes. Cette configuration permet une meilleure détection des défauts proches de la surface. Il existe également des versions conçues pour générer des ondes transversales. On distingue aussi les palpeurs focalisés, qui offrent une meilleure résolution et permettent une détection plus précise d'un défaut ciblé.

I.7.3. Les palpeurs d'angle

De technologie similaire aux palpeurs droits, les palpeurs d'angle se différencient par la position de l'élément piézoélectrique, fixé sur un coin de plexiglass. Le phénomène de réfraction à l'interface plexiglass-pièce contrôlée provoque un changement de mode, générant des ondes transversales dans le matériau. Comme les palpeurs droits, ils se caractérisent par leur fréquence, les dimensions de leur élément sensible et leur angle de réfraction.

I.7.4. Les palpeurs à angle variable

Utilisés principalement en laboratoire pour des essais expérimentaux, ces palpeurs permettent à l'opérateur de choisir l'angle de réfraction le plus adapté à chaque situation.

Le choix du type de palpeur dépend :

- De la nature des défauts présumés

- De la géométrie de la pièce
- Et surtout de sa structure métallurgique

Par exemple :

- Une pièce moulée à gros grains nécessite une basse fréquence (0,5 à 2 MHz) pour éviter la confusion entre grains et défauts.
- Les matériaux standards comme l'acier à grains fins, les laminés ou forgés sont contrôlés à des fréquences de 2 à 5 MHz.
- Des fréquences supérieures à 5 MHz sont réservées aux matériaux à structure très fine, nécessitant une détection très précise.

I.8. Choix du milieu de couplage

Pour assurer une bonne transmission des ultrasons entre le palpeur et la pièce à contrôler, un milieu de couplage est indispensable. Celui-ci doit respecter plusieurs critères :

- a. Posséder de bonnes propriétés de mouillage
- b. Garder des caractéristiques stables tout au long du contrôle
- c. Être compatible avec la température et la position de travail
- d. Être identique lors de l'étalonnage et de l'examen
- e. Être facilement éliminable après le contrôle . [4]

➤ Couplants utilisés

Parmi les couplants les plus courants, on trouve :

- Pâtes de contact
- Huiles
- Graisses
- Colles additionnées d'eau

- Gel thixotropique
- Eau, avec ou sans agent mouillant

I.9. Base de temps

La base de temps correspond à la représentation graphique sur l'oscilloscope, où la distance parcourue par le spot lumineux est proportionnelle au temps mis par les ultrasons pour traverser le matériau.

Cas pratiques :

- **1er cas :**
écho de Si la fréquence de balayage est réglée à F_1 , on observe sur l'écran le **top d'émission** et un **fond**, correspondant à un **aller-retour des ultrasons** à travers l'épaisseur de la pièce (temps t_1).
- **2^e cas :**
En divisant cette fréquence par deux ($F_2 = F_1 / 2$), le spot met **deux fois plus de temps** à parcourir l'écran. Pendant ce laps de temps, les ultrasons parcourent **deux allers-retours**, soit **4 fois l'épaisseur** de la pièce. On voit apparaître **deux échos de fond**.
- **3^e cas :**
Si l'on divise encore la fréquence ($F_3 = F_1 / 4$), le temps d'affichage est multiplié, et l'écran montre alors **quatre échos de fond**, correspondant à **quatre aller-retour**.

I.10. Production des ultrasons

Il existe plusieurs méthodes de génération des ondes ultrasonores, mais en contrôle non destructif, seules les techniques fondées sur les effets piézoélectriques et ferroélectriques sont couramment utilisées. Ces méthodes

permettent de produire des ultrasons à fréquences adaptées au contrôle des matériaux.

En revanche, la magnétostriction, qui provoque des variations dimensionnelles d'un élément sous champ magnétique intense, est réservée à des applications comme le soudage ou le décapage, car elle génère des ultrasons de fréquence trop basse et de puissance excessive, inadaptés aux essais CND.

L'effet piézoélectrique :

Lorsqu'on applique une tension électrique ou une pression mécanique sur certains cristaux (comme le quartz), des charges électriques apparaissent à leur surface. L'amplitude de cette charge est proportionnelle à l'intensité de la pression ou de la tension.

Quand la force appliquée change de sens, les signes des charges s'inversent : c'est ce qu'on appelle l'effet piézoélectrique.

Chapitre II : CND et L'unité TSS

I.11. Introduction

Contrôler la qualité d'un produit sans l'endommager est essentiel, surtout lorsqu'il s'agit de pièces critiques comme les tubes sans soudure. Les contrôles non destructifs (CND) permettent de détecter les défauts internes tout en préservant l'intégrité des matériaux. Au service TSS de SIDER El Hadjar, ces techniques, notamment le contrôle par ultrasons, sont indispensables pour garantir la fiabilité et la conformité des tubes. Ce chapitre présente les bases des CND et les principes de la méthode ultrasonore.

II.1. Historique du service TSS (Tubes Sans Soudure)

Le complexe sidérurgique SIDER El Hadjar, situé près d'Annaba en Algérie, est l'un des piliers de l'industrie sidérurgique nationale. Il comprend plusieurs unités industrielles, dont le service TSS (Tubes Sans Soudure), spécialisé dans la fabrication de tubes en acier laminés à chaud sans soudure.

Le service TSS a été mis en place dans le but de produire des tubes destinés à des secteurs stratégiques comme :

- le transport de fluides (eau, gaz, pétrole),
- la construction mécanique,
- la pétrochimie.

Depuis sa création, il s'est équipé de lignes de production performantes intégrant des systèmes de contrôle non destructif (CND) de dernière génération, notamment le contrôle par ultrasons (US), pour assurer la qualité et la conformité des tubes produits.



Figure 6. Plan de masse de la TSS

II.2. L'organisation du TSS

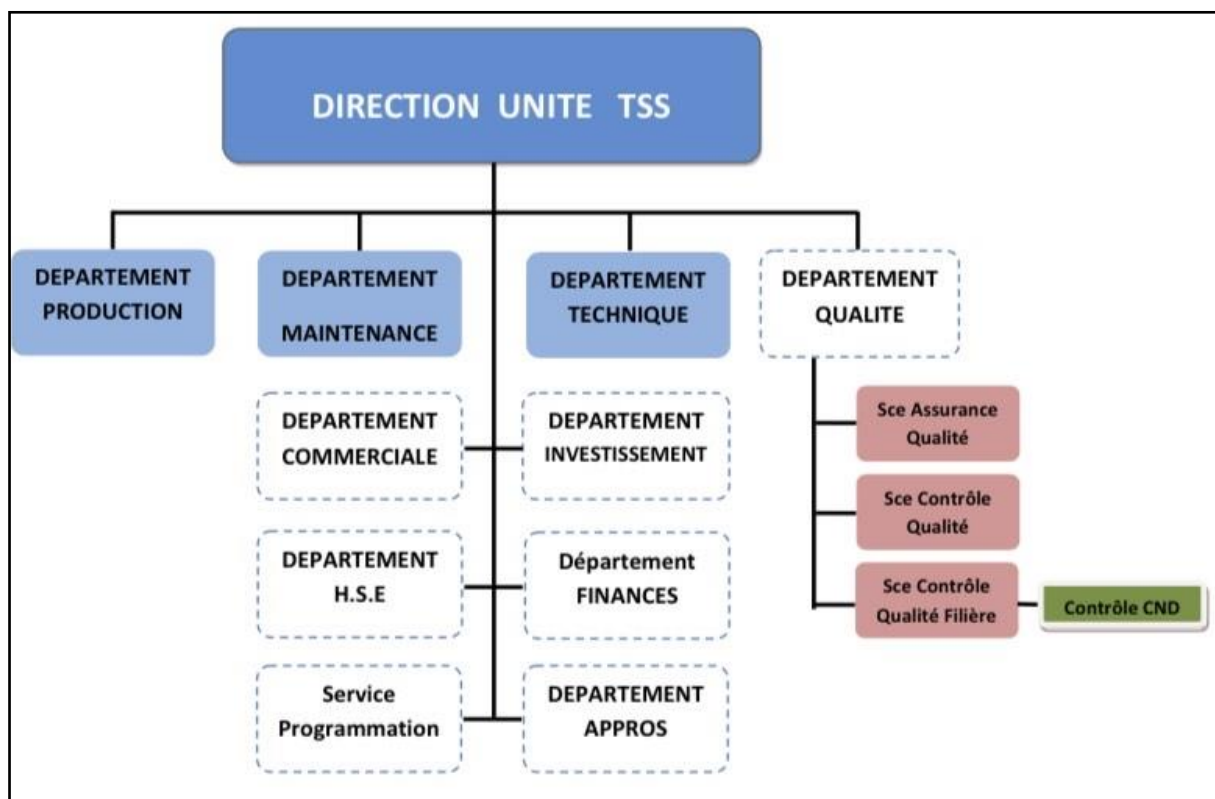


Figure 7. L'organisation du service TSS

II.3. Introduction au contrôle par ultrasons

Au sein du service TSS, le contrôle par ultrasons constitue une étape clé du processus de fabrication. Il est appliqué à différentes phases :

- en cours de production (après laminage à chaud et traitement thermique),
- en fin de chaîne, comme contrôle final avant expédition.

L'objectif est de :

- garantir l'intégrité interne des tubes (absence de fissures, soufflures, inclusions...),
- répondre aux normes internationales de qualité (API, ASTM, ISO...),
- assurer la traçabilité et la sécurité des produits destinés à des usages sous pression.
- Le contrôle US est réalisé automatiquement par des bancs de contrôle à haute sensibilité, équipés de sondes rotatives capables de scanner les tubes sur toute leur circonférence et longueur.

II.4. Défauts recherchés

Par le CND ultrasonore (et en général par CND) on cherche à détecter **tous types de discontinuités** susceptibles de compromettre la solidité : [5]

Tableau 2. Les défauts recherchés par le contrôle de CND par ultrasons

Code	Désignation	Code	Désignation
	Défauts Aciérie		Défauts Laminoir
10	Pailles d'Acier Extérieures	30	Pailles 1/4 De Tour
11	Tapures	31	Pinçon de Laminage
12	Pailles d'Inclusion	32	Empreintes 1/4 de Tour
17	Pailles de Retassure Intérieures	33	Frottements Cylindres
18	Dédoublures	34	Amorces + Coupures
	Défauts Laminoir (Presse à Percer & Obus)	35	Pailles d'Attaque

20	Marques Cylindres Latéraux	36	Pailles 1/4 App. de Présentation
21	Marques Cylindres Supérieurs	37	Rayures de Mandrin
22	Marques Patins guide	38	Ondulation
27	Rayures Bouchon presse	39	T.N.P.P.
28	Rayures Tête L.O		Défauts Calibrage & Dressage
29	Pailles intérieurs laminoir	40	Plat de Calibreur
	Défauts Dimensionnels	41	Crochettes
60	Épaisseur Forte	42	Marques de Dressage
61	Épaisseur Faible	43	Rectitude
62	Diamètre Fort		Défauts Divers
63	Diamètre Faible	50	Marques Pinch Roll
64	Longueur Mini (LP)	51	Marques Four à Longérons
65	Excentration	52	Coups à Chaud
66	Longueur Longue	53	Empreintes
67P	Ovalisation Côté Pavillon	54	Divers
67C	Ovalisation Côté Corps	55	Chanfrein
67B	Ovalisation Côté Balais	56	Défaut de manutention
	Défauts intérieur laminoir		
17B	Pailles intérieures balais		
17L	Pailles intérieurs laminoir		
61L	Epaisseur faible Après Réparation Défauts laminoir		

Modifications :

 : Les défauts les plus détectés

a : Création

b : Modification de la nomenclature des défauts suite à la modification de l'API ELI 44ed (applicable à partir du 01/10/2008)

c : Modification suite à un nouveau défaut résultant dans la production

d : Modification de l'indice suite au changement du statut de l'entreprise

II.5. Pourquoi utiliser l'US ?

L'US est un outil majeur pour satisfaire aux exigences de qualité et de sécurité.

II.5.1. Sensibilité et précision élevées

Les ultrasons mettent en œuvre des ondes acoustiques de fréquences élevées (généralement 0,5 à 25 MHz) qui pénètrent profondément dans le matériau et sont réfléchies par toute discontinuité interne. Cette finesse de détection permet de repérer des défauts très petits (quelques dixièmes de millimètre) ou peu profonds, aussi bien en surface qu'en sous-surface.

- **Détection de défauts variés** : fissures, inclusions, porosités, délaminations...
- **Localisation précise** : mesure du « temps de vol » de l'onde pour situer exactement chaque discontinuité.

II.5.2. Grande profondeur de pénétration

Les ondes ultrasonores traversent l'acier sur de longues distances sans atténuation excessive. Un seul point de couplage (contact ou immersion) suffit pour inspecter toute l'épaisseur du tube, ce qui est crucial pour des tubes de plusieurs centimètres d'épaisseur.

- **Inspection intégrale** : contrôle du volume complet du tube en un seul passage.
- **Accès limité** : ne nécessite qu'une seule face accessible.

II.5.3. Méthode non destructrice et sécurisée

Contrairement aux essais radiographiques, l'US n'implique aucune source radioactive et n'endommage pas la pièce. Le tube ressort intact, prêt à être livré ou remis en service.

- **Sans danger** pour l'opérateur et l'environnement.
- **Pas de retraitement** ou élimination de résidus radioactifs.

II.5.4. Résultats instantanés et traçabilité

Les modes de contrôle US modernes (pulse-echo, phased array) fournissent des retours en temps réel, avec affichage graphique des indications. Les résultats peuvent être tracés et archivés numériquement pour assurer la traçabilité qualité.

- **Décision rapide** : acceptation ou rejet immédiat.
- **Archivage** automatisé des données d'inspection.

II.5.5. Automatisation et portabilité

Les appareils US se déclinent en versions portatives pour interventions ponctuelles et en lignes automatisées (sondes rotatives, systèmes phased array) pour un contrôle continu en production.

- **Flexibilité** : du banc fixe à la sonde portable.
- **Intégration facile** sur chaîne de production pour des cadences élevées.

II.5.6. Mesures quantitatives

Au-delà de la détection, l'US permet de mesurer :

- La **taille** d'un défaut (dimensions longitudinale et transversale).
- La **profondeur** et la **zone exacte** (angle et position).

Ces données quantitatives facilitent l'évaluation de la gravité du défaut et la prise de décision (réparation, reparamétrage).

II.5.7.Conformité aux normes internationales

De nombreuses normes internationales cadrent l'US pour les tubes en acier :

- **ASTM E213** (pratique standard US pour tubes métalliques)
- **ISO 10893-10** (inspections périphériques automatiques)
- **API 5CT/5L** (spécifications pour tubages pétroliers)

Le respect de ces référentiels garantit la portabilité des résultats et la reconnaissance internationale des contrôles.

II.5.8. Rapport performance / coût avantageux

Bien que les équipements US (sondes, générateurs, systèmes phased array) représentent un investissement initial, leur longue durée de vie, la rapidité d'inspection, la réduction des rebuts et la minimisation des risques de défaillance en service font de l'US un choix économiquement judicieux sur le long terme.

Conclusion

Le contrôle non destructif par ultrasons combine sensibilité extrême, inspection volumique complète, sécurité, rapidité et traçabilité — autant d'atouts indispensables pour garantir la qualité et la fiabilité des tubes sans soudure produits à grande échelle. C'est pourquoi, dans l'unité TSS de SIDER El-Hadjar, l'US reste la méthode privilégiée et la plus performante pour détecter, quantifier et localiser les défauts internes, tout en s'intégrant harmonieusement dans une chaîne de production moderne et exigeante. [6]

Chapitre III : La production des tubes sans soudure

III.1. Introduction

Dans l'industrie pétrolière et gazière, les tubes sont classés en plusieurs familles selon leur fonction. Deux d'entre elles sont particulièrement critiques pour le transport et le forage : les tubes Line-Pipe et les tuyaux de tubage (casing). Les Line-Pipes (norme API 5L) sont destinés au transport sur de longues distances de fluides comme le pétrole brut, le gaz naturel ou le gaz de pétrole liquéfié. Ils sont utilisés dans des réseaux de pipelines terrestres et sous-marins ainsi que dans les réseaux de distribution de gaz. À l'inverse, les tubes de tubage (norme API 5CT) sont insérés et cimentés dans les puits de forage pour stabiliser les parois et isoler les zones productives. Les normes API 5L et API 5CT encadrent respectivement chaque famille en spécifiant les grades d'acier et les essais requis : l'API 5L définit les spécifications des Line-Pipe (grades A, B, X42... X80) avec deux niveaux de qualité PSL1/PSL2 tandis que l'API 5CT couvre les tubes de tubage (grades H40, J55, K55, N80, L80, C90, T95, P110, Q125, etc. selon l'application).

III.2. Types de tubes fabriqués

-
- **Lignes de transport (Line-Pipe) :** tuyaux conformes à l'API 5L, conçus pour acheminer sur de grandes distances le pétrole, le gaz naturel, ou encore le GPL vers les raffineries et centres de distribution. On les retrouve dans les pipelines enterrés (terrestres), les pipelines sous-marins (offshore) et les réseaux de distribution urbains de gaz. [7]



Figure 8. Tuyaux Line-Pipe

- **Applications pétrolières/forage (Casing) :** tuyaux conformes à l'API 5CT, utilisés comme tubage dans les puits de forage. Leur rôle est de maintenir l'intégrité du puits : par exemple les tubages de surface protègent les nappes aquifères, les tubages intermédiaires isolent les zones à haute pression ou instables, et le tubage de production supporte la colonne de forage et dirige l'écoulement des hydrocarbures vers la surface. [8]



Figure 9.Tuyaux Casing

III.3. Étapes de fabrication d'un tube sans soudure à chaud

- **Sélection des matières premières :** Choix de billettes ferromagnétiques (acier carbone ou allié) de la nuance adéquate.
- **Chauffage du billett :** Incinération en four ($\sim 1200^{\circ}\text{C}$) pour rendre l'acier malléable .
- **Perçage (forage) initial :** Sur billett incandescent, un mandrin ou un percuteur rotatif perce le centre pour créer un tube creux primitif.
- **Laminage à chaud / Expansion :** Le tube creux passe dans des cylindres successifs et est étiré avec un mandrin intérieur, ce qui élargit l'orifice et homogénéise l'épaisseur de paroi.
- **Refroidissement contrôlé :** Le tube est refroidi lentement sous environnement contrôlé pour conserver ses propriétés mécaniques et stabiliser sa géométrie.

- **Dressage (redressage)** : Passage du tube dans un banc de dressage qui élimine les courbures ou déformations résiduelles, garantissant la planéité et la rectitude des tubes.
- **Parachèvement** : Usinage final des extrémités (coupe à longueur, chanfreinage, filetage si nécessaire pour les connexions), polissage de surface et traitements thermiques complémentaires (normalisation, trempe/ revenu) pour atteindre les propriétés mécaniques spécifiées.
- **Essais mécaniques destructifs** : Prélevés sur échantillons, les tubes font l'objet de tests de résistance (traction, aplatissement, résilience Charpy, pression interne) pour vérifier qu'ils satisfont aux exigences (limite d'élasticité, allongement, ténacité, etc.).
- **Contrôle non destructif (CND)** : Chaque tube est inspecté par ultrasons (US) pour détecter les fissures ou inclusions internes, puis soumis à un contrôle magnétoscopique (MPI) pour mettre en évidence les défauts de surface (fissures, pelage, laminations).



Figure 10.Un tube sans soudure entrain de fabrication

III.4. Objectifs de l'essai pratique

- **Étalonnage et validation** du banc GE GRP-PAT-PB à l'aide d'un tube étalon muni d'entailles calibrées (longitudinales, transversales, obliques, amincissements).
- **Vérification de la sensibilité** : chaque défaut « réel » d'environ 12,5 % d'épaisseur doit produire un écho dépassant le seuil fixé (ex. 80 % FS ou – 6 dB).
- **Mesure d'épaisseur (WT)** : confirmer la précision de mesure ($\pm 0,03$ mm) sur paroi saine.
- **Contrôle en production** : assurer une détection fiable sans faux positifs pour des défauts < 10 % d'épaisseur et sans faux négatifs pour des défauts ≥ 10 %.
- **Analyse des problèmes d'écho** (échauffement, parasites) et mise en place de solutions correctives. [9]

III.5. Matériel et normes

Tableau 3. Matériel et normes utilisé

Élément	Description	Norme associée
Line-pipe	Tubes de transport (gaz, GPL...)	API 5L
Casing	Tubes de tubage de puits pétrolier	API 5CT
Banc US GE GRP-PAT-PB	Cellule à eau, convoyeur à rouleaux, pupitre SMART	—
Palpeurs	0° (long.), ±15° (obliques), ~60° (transv. & WT)	ASTM E213
Tube étalon	Ø 10¾" × 11,13 mm, entailles calibrées	Certificat métrologie

III.6. Les commandes principales

Tableau 4. Les commandes principales

Client	Norme API	Type de tube	Qté (km)	Année (contrat)	Observations
Naftal	5L	Pipeline (GPL)	1 100	2020	Ligne Arzew–Chlef–Alger
Naftal	5L	Pipeline (GPL)	127	2024	Section ajoutée (LPG)
Sonelgaz	5L	Pipeline (gaz)	200	2021	Gaz naturel (distribution)
Sonatrach	5CT (PSL2/3)	Casing (forages)	1 000	2023	2 tranches (292+766 km)

Chapitre IV: Partie Pratique

IV.1. Introduction

Dans le cadre de mon stage effectué au sein de l'unité TSS (Tuberie Sans Soudure) de Sider El Hadjar, j'ai eu l'opportunité de m'initier aux différentes techniques de Contrôle Non Destructif (CND) appliquées aux tubes destinés aux secteurs pétrolier et gazier. La partie pratique de ce mémoire porte principalement sur deux méthodes essentielles utilisées au TSS : le contrôle magnétoscopique, qui permet la détection des défauts de surface, et le contrôle par ultrasons, utilisé pour l'inspection volumique interne des tubes.

IV.2. Contrôle magnétoscopique (MT)

Le contrôle magnétoscopique, ou Magnetic Particle Inspection (MPI), est un examen non destructif de surface, utilisé pour détecter les défauts ouverts ou débouchants sur les matériaux ferromagnétiques tels que l'acier. Il est particulièrement efficace pour révéler les fissures, criques, soufflures ou replis présents en surface ou en sub-surface immédiate.

- **Étapes détaillées :**

1. **Préparation de surface** : nettoyage de la zone à contrôler.
2. **Aimantation** : application d'un champ magnétique par un courant traversant



Figure 11.Application du champ magnétique

3. Application des particules magnétiques :

- En **poudre sèche** (détection à la lumière blanche),

4. Contrôle visuel

- Les particules s'accumulent aux fuites de flux,
- L'opérateur interprète les formes, dimensions et orientations des indications.



Figure 12.Détection des défauts visuels

5. La méthode de réparation :

- **Évaluation de la gravité**

L'opérateur qualifié évalue la **profondeur et la longueur** du défaut. Si le défaut est superficiel, il peut être réparé. En cas de défaut profond ou structurel, le tube peut être **rejeté ou réformé** selon la politique qualité.

- **Meulage localisé (ponçage)**

Le défaut est éliminé par **meulage ou ponçage localisé** à l'aide d'une meuleuse portative. Cette opération est effectuée avec prudence afin de **ne pas altérer la géométrie du tube** (épaisseur ou profil du filetage).

- **Nouveau contrôle magnétoscopique**

Une fois le meulage terminé, un **nouveau contrôle magnétoscopique** est réalisé sur la zone réparée pour **vérifier l'élimination complète du défaut**.

- **Validation finale**

Si aucune indication n'est de nouveau détectée, la réparation est validée par le service qualité et la production se poursuit. Sinon, le tube est mis en rebut ou soumis à des réparations plus poussées.

IV.3. La commande et le contrôle par ultrasons

Pendant mon stage au sein de l'unité TSS (Tubes et Services Spéciaux) de l'usine SIDER El Hadjar, j'ai été intégré au service **Contrôle Non Destructif (CND)**, où j'ai eu l'occasion de participer activement au **contrôle par ultrasons automatisé** des tubes en acier sans soudure. Cette méthode de contrôle est essentielle pour garantir la qualité et la conformité des tubes destinés aux secteurs de l'énergie, du pétrole et du gaz.

Le contrôle non destructif par ultrasons (CND-US) permet de détecter des défauts internes sans altérer la structure du tube. C'est une étape critique dans le processus de fabrication, car un défaut non détecté peut compromettre la sécurité d'une

installation entière. Cette expérience m'a permis de découvrir non seulement la technologie utilisée, mais aussi la rigueur nécessaire dans l'interprétation des résultats et le suivi des procédures.

IV.3.1. Cahier de charge

SIDER EL HADJAR TSS – Département Qualité Procédure d'exploitation et d'étalonnage de l'installation de contrôle par ultrasons (GRP-PAT-PB)

Identification : P-DQ ASQ-027

Indice :D

1 – But et domaine d'application

La présente procédure constitue un guide opératoire pour l'installation d'inspection par ultrasons GRP-PAT-PB, destinée au contrôle des tubes sans soudure (line pipe) présentant les caractéristiques techniques suivantes :

- **Diamètre** : de 152 mm à 356 mm (soit de 6" à 14").
- **Matériaux** : Acier faiblement allié ou fortement allié au carbone. Le choix du matériau dépend de la taille du grain (les défauts de référence doivent produire une amplitude minimale de 12 dB au-dessus du niveau de bruit).
- **Épaisseur** : de 4 mm à 26 mm.
- **Épaisseur/diamètre** : $e/D \leq 0,18$ (et pour les défauts obliques $\leq 0,15$).
- **Longueur des tubes** : de 5 m à 15 m.
- **État de surface** : Brute de laminage ou mieux, sans huile et sans calamine.
- **Rectitude** : Fléchissement maximal de 1 mm/m, avec une déviation maximale de 15 mm sur toute la longueur par rapport à une droite linéaire.
- **Ovalité** : Tolérance maximale de 1,5 % du diamètre externe.
- **Extrémités** : Coupées et biseautées, sans bavures extérieures.

Spécifications de mesure

- **Résolution de mesure** : 0,0125 mm
 - **Précision de l'ensemble de mesure** : $\pm 0,03$ mm (selon le constructeur GE)
-

2 – Tâches de contrôle

- Détection des défauts longitudinaux
 - Détection des défauts transversaux
 - Détection des défauts obliques ($\pm 5^\circ$ à $\pm 15^\circ$) pour $e/D < 0,15$
 - Détection des défauts d'épaisseur (épaisseurs faibles ou fortes)
 - Détection des défauts laminaires (dédoublures, laminations)
 - Détection de la déformation de la paroi interne (type *Round Bottom Groove*)
 - Détection d'excentricité
 - Contrôle du couplage
-

3 – Terminologie

- **US** : Ultrasons
 - **Pupitre SMART** : Pupitre de commande
 - **LOI** : Longitudinal oblique I
 - **LOII** : Longitudinal oblique II
 - **WT** : Épaisseur (Wall Thickness)
 - **TWT** : Variation d'épaisseur de la paroi
 - **BWE** : Écho de fond (*Back Wall Echo*)
-

5 – Personnel

Tout opérateur affecté au contrôle par ultrasons (GRP-PAT-PB) doit obligatoirement posséder **au minimum le niveau I en Ultrasons**, selon les normes **ASNT-SNT-TC-1A** ou **ISO 11484**. (Se référer à la procédure de formation du personnel en CND : **P-DQ ASQ-025**)

6 – Matériel

Installation US/PAT :

- Cellule équipée de 3 palpeurs *phased array*
- Racleur
- Bac à eau
- Voie à rouleaux
- Réservoir de 2500 L
- Tubes étalons
- Caisse à outils
- Jauge d'épaisseur ultrasonore type **DM4** ou équivalent
- Couplant (eau)
- Système informatique de traitement des signaux US
- Imprimante
- Système de peinture pour marquage des défauts sur les tubes

Avant de commencer une série de contrôles, nous procédons à un étalonnage de la machine en utilisant un tube étalon qui contient des défauts calibrés : entailles longitudinales, transversales, réduction d'épaisseur, etc. Cet étalonnage garantit la fiabilité et la précision de la détection.

IV.3.2. Étapes du contrôle CND-U

Voici les étapes que j'ai suivies lors de l'inspection des tubes :

➤ **Préparation du tube :**

- Nettoyage de la surface avec le racleur pour enlever toute trace de calamine ou d'huile.
- Vérification des dimensions (diamètre, ovalité, rectitude) et de l'état de surface.

➤ **Positionnement et démarrage :**

- Le tube est placé sur la voie à rouleaux.
- Un laser détecte son positionnement et synchronise le début du contrôle.
- Le tube avance tout en tournant, ce qui permet un balayage complet de sa surface par les ultrasons.

➤ **Inspection automatisée :**

- Les trois palpeurs émettent des ondes ultrasonores à travers le bac à eau.
- Le logiciel GE enregistre et affiche les signaux pour chaque canal (longitudinal I, longitudinal II, transversal, épaisseur, écho de fond...).
- En cas de dépassement de seuil, une alarme visuelle et sonore est déclenchée et le tube est automatiquement marqué par peinture.

➤ **Analyse et validation :**

- Si aucun signal suspect n'est détecté, le tube est validé comme conforme.

- Si des défauts sont signalés, une inspection visuelle est réalisée sur les zones marquées.
- En cas de doute, une vérification manuelle avec un appareil à ultrasons portable est réalisée.

IV.3.3. Cas pratique 1 : Tube non conforme

Lors d'un contrôle, un tube a présenté plusieurs défauts détectés automatiquement par le logiciel. Sur l'écran, j'ai observé **des pics rouges importants sur les courbes du logiciel**, dépassant les seuils sur plusieurs canaux, notamment celui des défauts longitudinaux et de l'épaisseur [5].



Figure 13. Les pics rouges sur l'écran du logiciel qui présente les défauts

Après marquage automatique, nous avons examiné le tube visuellement. J'ai pu constater la présence de **fissures longitudinales visibles à l'œil nu**, ainsi que des **fissures transversale** et un **coup à chaud**, confirmant les résultats du système.



Figures V.6. Fissure transversale



Figure 16. Le coup à chaud

Dans ce cas, le tube n'est pas immédiatement rejeté. Il est **transféré à l'atelier de réparation**, où les défauts sont meulés ou corrigés selon les procédures internes. Une fois la réparation terminée, le tube est **recontrôlé** par ultrasons.

- Si aucun défaut n'est détecté lors du second contrôle, il est déclaré **conforme**.
- Si des défauts persistent ou si la réparation est insuffisante, le tube est **définitivement rejeté**.

Ce processus permet d'éviter le gaspillage et de valoriser les produits récupérables tout en maintenant un niveau de qualité élevé.

IV.3.4. Cas pratique 2 : Tube conforme

Un autre tube a été contrôlé dans les mêmes conditions. Cette fois-ci, aucun dépassement de seuil n'a été enregistré. Toutes les courbes sur l'écran sont restées dans la plage verte, ce qui signifie qu'aucune anomalie n'a été détectée par les capteurs.



Figure 17.Aucun pic rouge (aucun défaut détecté)

Le tube n'a reçu aucun marquage, et après une inspection visuelle de routine, il a été accepté comme conforme et prêt à être expédié.

Conclusions

Conclusion

Au terme de cette recherche, il apparaît clairement que le contrôle non destructif (CND) – en particulier par ultrasons (US) – joue un rôle fondamental dans l'assurance qualité des produits industriels. Grâce à sa capacité à détecter des défauts internes sans détruire les pièces, le CND contribue à la fiabilité, à la sécurité et à la durabilité des installations dans des secteurs critiques tels que l'énergie, l'aéronautique, la pétrochimie et la sidérurgie.

Dans le cadre de mon stage à SIDER El Hadjar – unité TSS, j'ai pu mettre en pratique les principes étudiés, en participant à l'inspection de tubes sans soudure par ultrasons selon la procédure GRP-PAT-PB. L'utilisation d'un banc de contrôle automatisé, équipé de sondes phased array et d'un logiciel GE, m'a permis de comprendre le fonctionnement technique, l'importance de l'étalonnage, l'interprétation des signaux, ainsi que le processus de décision entre acceptation, réparation ou rejet. [10]

Les deux cas pratiques analysés (un tube non conforme avec fissures détectées et réparé, un autre conforme sans défaut) ont illustré l'efficacité de la méthode et la rigueur exigée dans un contexte industriel. Cette expérience a renforcé mes compétences en contrôle qualité et m'a permis d'associer la théorie à une application concrète.

En conclusion, le CND-US n'est pas seulement un outil de contrôle, mais une garantie de performance, de sécurité et de conformité pour toute chaîne de production moderne. Son usage systématique chez SIDER El Hadjar témoigne d'un engagement fort envers la qualité industrielle et la fiabilité des produits destinés au marché national et international.

Bibliographie

- [1] Bodycote, «Les controles non destructif (CND),» Bodycote technical sheet, 2020.
- [2] C. Hellier, Handbook of Nondestructive Evaluation (3rd ed.), McGraw-Hill, 2020.
- [3] E. /. O. NDT, «General Introduction to Ultrasonic Testing,» [En ligne].
- [4] ASNT, Nondestructive Testing Handbook, Vol. 7: Ultrasonic Testing, ASNT, 2007.
- [5] ASTM, *Norme technique*, ASTM International, 2022.
- [6] C. e. a. Breidenbach, «Breidenbach, C. et al.,» *Journal industriel/API*, 2014.
- [7] API, *API Specification 5L – Specification for Line Pipe*, API, 2018.
- [8] API, *API Specification 5CT – Specification for Casing and Tubing*, API, 2018.
- [9] PHMSA, «Seamless Pipe Manufacturing Process,» [En ligne]. Available: HMSA Websit.
- [10] N. Woodroof, «Mise en service d’une installation ShapeUT™ chez Vallourec,» p. Vallourec Industry.