



Faculté : Des sciences de l'ingénierie

Département : De Génie Mécanique

Domaine : Science et Technologie

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Construction Mécanique

## Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

**Inspection des pipelines par les procédés de contrôle non destructif  
au niveau de l'entreprise fertial Annaba**

Présenté par: REZZOUG BACHIR

Encadrant: BOUSSAID OUZINE

Grade Professeur

Parrain: Mr. BELHASSINI ADEL

### Jury de Soutenance :

GOUASSMI SACI	MCB	Université d'ANNABA	Président
MENAIL YOUNES	MCA	Université d'ANNABA	Examineur
BELHASSINI ADEL	Ingénieur	Entreprise FERTIAL	Co-encadrant

## ***Remerciements***

Dieu merci pour avoir mener à terme ce mémoire de fin d'études.

Je tiens à exprimer mes remerciements à mon encadreur Pr. Boussaid pour avoir accepter de diriger ce travail.

Je tiens aussi à remercier vivement Mr Belhassini Adel directeur au département technique fertial Annaba, pour avoir contribué au suivi de ce travail son assistance son accueil et le partage de son expérience durant la courte durée d'essais. Mes remerciements s'adressent également à toute l'équipe vinçotte d'une manière générale.

Je tiens également à remercier les membres du jury, pour avoir accepté d'évaluer ce travail.

Mes remerciements les plus s'adressent à ma mère et mon père qui ont beaucoup sacrifié pour que puisse atteindre mon but, celui de réussir dans mes études.

## ***Dédicaces***

*Je dédie ce mémoire à :*

*Mes chers parents pour tous les sacrifices consentis, pour leur soutien durant toutes  
mes années d'études,*

*Toute ma famille,*

*Tous mes amis qui m'ont partagés mes soucis,*

*Ma reconnaissance est également formulée envers tous mes enseignants et tous les  
employés de l'administration de département de Génie Mécanique.*

## Résumé

Ce travail a pour but l'étude de la dégradation d'un bien en vue de l'amélioration de la durée de vie et agir sur l'élément défaillant au plus près de sa période de dysfonctionnement. Ce qui permet de réduire la fréquence des pannes en optimisant la fréquence des interventions préventives. Parmi les outils d'inspection des équipements en vue d'une défaillance éventuelle, le Contrôle non destructif qui consiste à détecter les défauts de surface.

Ce procédé est appliqué aux pipelines au niveau de l'entreprise fleuron de l'industrie pétrochimique, Fertilal, société des fertilisants d'Algérie. La partie expérimentale a été réalisée au niveau du département technique spécialisé dans l'inspection des tuyauteries et des équipements d'unité d'ammoniac. Pour cela on a effectué des mesures expérimentales par la méthode de contrôle non destructif et particulièrement par ressuage, et par magnétoscopie pour faire apparaître les fissures en surfaces et aussi par ultra-sons pour détecter les défauts à l'intérieur des cordons de soudure du pipe. Une amélioration du procédé est proposée à l'entreprise pour améliorer la capacité de la technique CND à détecter plus de défauts et l'adaptation aux méthodes actuelles.

Mots clés : CND, ressuage, pipeline, inspection, fissure, défaut, magnétoscopie, Ultra-sons.

## ملخص

الهدف من هذا العمل هو أولاً البحث في جميع الأدبيات المتعلقة بالاختبارات غير المدمرة والتفتيش على خطوط الأنابيب ، ولا سيما عملياتها وتقنيات الاختبار المختلفة للكشف عن العيوب السطحية. لهذا قمنا بإجراء قياسات تجريبية من خلال طرق اختبار غير مدمرة وخاصة اختبار الاختراق ، اختبار الجسيمات المغناطيسية للكشف عن الشقوق السطحية والموجات فوق الصوتية للكشف عن العيوب داخل طبقات اللحام للأنبوب. تم اقتراح مقترح للتدخل لتجنب هذه العيوب للشركة لتحسين فريق التفتيش cnd وتكون أكثر مهنية في المستقبل.

كلمات البحث: مخترق، الموجات فوق الصوتية، تشقق، عيوب .

## Abstract

The aim of this work is firstly to research all the literature concerning non-destructive testing and inspection of pipelines, in particular their processes and the various testing techniques for detecting surface defects. For this we carried out experimental measurements by non-destructive testing methods and particularly penetrant testing, magnetoscopy to reveal surface cracks and ultrasound to detect faults inside the weld seams of the pipe. A proposal to intervene to avoid these faults is drawn up for the company to improve the NDT inspection team and be more professional in the future.

Key words: CND, penetrant testing, pipeline, inspection, crack, defect, magnétoscopie, Ultrasons.

## **Sommaire:**

### **Introduction.**

#### **Présentation de l'entreprise :**

1. Historique de l'entreprise .....	01
2. Présentation du FERTIAL (SPA) .....	01
2.1. Situation géographique .....	01
2.2. Objectifs de l'entreprise .....	02
2.3. Principales activités .....	02

#### **Chapitre 1 : Étude bibliographique.**

1. Généralités sur le contrôle non destructif (CND) .....	03
1.1. Historique .....	03
1.2. Définition .....	03
1.3. Champ d'application .....	04
2. Principes de détection des défauts, Différentes techniques du CND .....	05
2.1. Hétérogénéités et défauts .....	05
2.2. Procédure de CND .....	06
3. Techniques de contrôle .....	08
3.1. Examen visuel - procédés optiques .....	08
3.2. Le ressuage .....	09
3.3. Magnétoscopie .....	13
3.4. Radiographie .....	14
3.5. Courants de Foucault .....	16
3.6. Ultrasons .....	18
4. Conclusion .....	21

#### **Chapitre 2 : Défauts des pipelines et méthodes d'inspection.**

1. Introduction .....	22
2. Définition système pipelines .....	22
3. Caractéristiques mécaniques des tubes .....	23
4. Les types d'inspections et les modes de dégradations des pipelines .....	23

4.1. Les modes de dégradations des pipelines.....	23
4.2. Défaillances mécaniques .....	24
4.3. Défaillance opérationnelle.....	24
4.4. Risques naturels.....	24
4.5. Dégradation par corrosion.....	24
5. Les types d'inspections des pipelines .....	27
5.1 Contrôles Non destructifs et destructifs.....	28
5.2 Contrôles Destructifs (CD).....	29
6 Scénarios de réparation de pipe .....	33
6.1 Pipe sujet à la perte interne de métal.....	33
6.2 Pipe sujet à la fuite.....	34
7 Gamme des brides disponibles et connecteurs/accouplements de réparation.....	34
7.1 Les brides de réparation.....	35
7.2 Réparation des accouplements et des connecteurs .....	37
7.4.Types de réparation par matériaux composites .....	41
8 Conseils d'inspection ; réparation; conception.....	42
9 Aspects importants des réparations .....	43
9.1 Préparation de surface .....	43
9.2 Traitement de stratifié de réparation.....	43
9.3 Préparation des documents et des données nécessaires.....	43
9.4 Inspection finale des réparations par composite.....	43
10. Conclusion.....	44

## **Chapitre 3 : Application expérimentale du procédé**

### **CND au niveau de l'entreprise fertial.**

1. Étude expérimentale.....	45
1.1. Département technique fertial Annaba .....	45
2. Application du Control Non Destructif (première application).....	45
2.1. Objet de l'inspection .....	46
2.2. Base d'inspection .....	46
2.3. Environnement de l'équipement.....	46
3. Inspection de l'équipement.....	47
3.1. Détails .....	47

3.2. Contrôle visuel.....	47
3.3. Etat externe général de l'équipement.....	47
3.4. Localisation et dimensionnement des anomalies (dégradations).....	47
3.5. Moyen d'accès.....	49
3.6. Support de l'équipement .....	49
3.7. Accessoires et auxiliaires .....	49
4. Etat interne général de l'équipement.....	50
5. Résultats des contrôles CND effectués .....	51
6. Contrôle par magnétoscopie :( externe).....	52
6.1. Caractéristiques .....	52
6.2. Appareils utilisées .....	52
6.3. Résultats .....	54
7. Evaluation de l'intégrité structurelle.....	54
7.1. Levée de réserves (Réparation).....	54
7.2. Application de champ magnétique sur la paroi externe de pipe après la réparation.....	54
8. Résultats.....	55
9. Deuxième application.....	55
9.1. Contrôle par ressuage (PT).....	55
10. Troisième application.....	58
10.1 Contrôle d'un pipeline par l'ultrason.....	58
10.2 Objet de l'inspection.....	58
10.3 Propriétés mécaniques .....	59
10.4 Composition chimique.....	59
10.5 Les étapes et le matériel utilisé.....	59
10.6 Conclusion.....	62
11. Des propositions.....	62
12. Conclusion générale.....	63

#### Références bibliographiques.

Bibliographie .....	64
Annexe.....	67

## **Liste des figures.**

### **Présentation de l'entreprise.**

Figure 1.1: Lieu de stage fertial Annaba.....	01
Figure 1.2 : Situation géographique d'ASMIDAL-ANNABA.....	02

### **Chapitre 1 : Étude bibliographique.**

Figure 1.3: Quelques secteurs industriels qui utilisent le CND .....	04
Figure1.4 : Principe de détection d'un défaut.....	08
Figure 1.5 : Principe du contrôle non destructif.....	08
Figure 1.6 : éclairage direct.....	10
Figure 1.7 : Procédure générale de contrôle par ressuage .....	12
Figure 1.8 : Contrôle par magnétoscopie de pipe G657 au niveau D'entreprise fertial Annaba.....	14
Figure 1.9: principe de la magnétoscopie .....	15
Figure 1.10 et 1.11 : application de la radiographie sur un moteur mécanique.....	16
Figure 1.12 : principe de la radiographie.....	17
Figure 1.13 : Application de courants de Foucault sur mini avion Boeing.....	18
Figure 1.14 : principe de la méthode courants de Foucault.....	18
Figure 1.15 : application d'ultrason au niveau d'usine Toyota.....	20
Figure 1.16 : principe d'ultrasons.....	21

### **Chapitre 2 : Défauts des pipelines et méthodes d'inspection.**

Figure 2.1 : Système tuyauteries industriel fertial annaba .....	23
Figure 2.2 : corrosion interne .....	26
Figure2.3 : Pertes de métal dues à la corrosion interne.....	26
Figure 2.4 : corrosion externe d'un pipe FERTIAL ANNABA.....	26
Figure 2.5 : Pertes de métal dues à corrosion externe.....	26
Figure 2.6: Corrosion uniforme .....	27



Figure 2.7: Corrosion par piqûres .....	28
Figure 2.8 : Marquage des tubes .....	30
Figure 2.9 : Machine de traction.....	31
Figure 2.10: Exemple d'une éprouvette d'une entaille en U.....	32
Figure 2.11 : Machine de résilience.....	32
Figure 2.12 : Machine de dureté ROCKWELL.....	33
Figure 2.13 : Bride de pièce rapportée.....	36
Figure 2.14 : Bride de réparation de fuite de la taille d'un trou d'épingle.....	37
Figure 2.15 : Douille de réparation type encerclement.....	37
Figure 2.16 : Deux types de brides de réparation type 'stand-off'.....	38
Figure 2.17:Utilisation des connecteurs de pipe de réparation.....	39
Figure 2.18 : Douille de réparation remplie par époxyde .....	40
Figure 2.19 : Dispositif de Clock Spring pour la réparation de canalisation.....	41

## **Chapitre 3 : Application expérimentale du procédé**

### **CND au niveau de l'entreprise fertial.**

Figure 3.1 : vue d'ambiance de lieu d'inspection. Fertial Annaba .....	46
Figure 3.2 : schéma d'Objet de l'inspection.....	47
Figure 3.4 : petites crevasses de corrosion au niveau des joints de soudures .....	48
Figure 3.5 : vue d'ensemble pipe BF-35H-350 type ballon.....	49
Figure 3.6 : Paroi externe côte Nord .....	49
Figure 3.7 : fond bombé coté est .....	49
Figure 3.8 : zone corrodée, $Pr > 6$ mm.....	50
Figure 3.9 : Cerceau de fixation de calorifuge dégradé.....	50
Figure 3.10 : Piquages Y & Z.....	50
Figure 3.11 : piquage D.....	50
Figure 3.12 : support de pipe type ballon.....	51
Figure 3.13 : Tiges d'ancrages.....	51
Figure 3.14 : Indicateur de niveau.....	51

Figure 3.16 : Soudure non conforme.....	52
Figure 3.17 : Demister.....	52
Figure 3.18 : Localisation de la zone corrodée, pour le contrôle UT.....	52
Figure 3.22 : Zone dégradée pendant & après réparation.....	55
Figure 3.23 : application perpendiculairement de champ magnétique sur la zone la plus touchante de corrosion (pipe BF-35H-350 type ballon) .....	56
Figure 3.24 : Localisation de la partie rechargée sur la virole après le réparation finale.....	56
Figure 3.25 : Pipeline : numéro F-60H-340 fertial annaba.....	57
Figure 3.26 : les produits d'application.....	57
Figure 3.27 : étape 1 et 2 nettoyage et application de pénétrant.....	58
Figure 3.28: étape 3 application de révélateur.....	59
Figure 3.30 : les micros fissures détectées sur le cordon de la soudure.....	59
Figure 3.31 : un pipeline métallique en acier au carbone X60 (fertial annaba).....	60
Figure 3.32 : le matériel utilisé.....	60
Figure 3.33 : l'appareil de l'ultrason EPOCH LT .....	61
Figure 3.34 : étalonnage .....	61
Figure 3.35 : Balayage.....	62
Figure3.36 : image d'un test sans défaut.....	62
Figure 3.37: image d'un test avec pic de défaut.....	63

## **Liste des tableaux**

### **Chapitre 1 : Recherche bibliographique**

Tableau 1.1 Différents produits fabriqués par Fertial – Annaba.....	03
---	----

### **Chapitre 3 : Application expérimentale du procédé CND**

Tableau 3.1 : résultats d'examen visuel de pipe BF-35H-350 type ballon	52
Tableau 3.2 : Eléments contrôlés .....	53
Tableau 3.3 : Dimension de l'élément.....	53
Tableau 3.4 : caractéristiques d'appareil magnétoscopie .....	53

## **1. Introduction :**

Le maintien des équipements de production est un enjeu clé pour la productivité des usines et pour la qualité des produits. C'est un défi industriel impliquant le bon fonctionnement des systèmes et la promotion de nouvelles méthodes de maintenance.

Aujourd'hui, les industriels ne peuvent se permettre d'interrompre leur production en raison des pannes qui pourraient être détectées en amont. Il est possible d'éviter ces problèmes grâce à la maintenance prévisionnelle. Les méthodes de maintenance préventive systématique et conditionnelle sont destinées à effectuer des interventions sur des pièces à faible coût, dont le contrôle du niveau de détérioration s'effectue facilement (contrôle d'un niveau d'huile, changement de pièces détachées à intervalles prédéfinis). Cependant, certains niveaux de détérioration pouvant conduire à une panne sont difficiles à détecter, tels que l'apparition de microfissures, la montée en température d'éléments tournants, un défaut d'isolement, la corrosion... .

On connaît la maintenance curative qui consiste à réparer un équipement lorsque celui-ci est en panne, la maintenance préventive qui consiste en des contrôles périodiques des équipements, mais un peu moins la maintenance prédictive, qui s'impose de plus en plus.

Il ne s'agit pas d'une maintenance qui prédit l'avenir ! Le terme « prédictive » comme le terme « prévisionnelle » (Norme NF 13306 – Terminologie de la maintenance) signifie prévoir, et agir avant défaillance, en effectuant la maintenance au bon moment.

La maintenance prédictive, ou maintenance prévisionnelle, se base sur une surveillance méthodique et assidue des équipements. En surveillant et en analysant l'évolution d'une machine ou d'un composant. Il est possible de programmer une intervention au moment le plus approprié : ni trop tôt pour réduire les coûts, ni trop tard pour éviter les pannes.

Tout élément manifeste des signes, visibles ou non, de dégradation qui en annonce la défaillance. Le tout est de savoir reconnaître ces signes précurseurs. Des appareils permettent de mesurer cette dégradation, laquelle peut être une variation de température, des vibrations, une variation de pression, de dimension, de position, un bruit, etc... Ces dégradations peuvent donc être d'ordre physique, chimique, de comportement.

Pour aider l'équipe de maintenance, il existe plusieurs outils qui font partie d'un ensemble que l'on peut appeler : « CND – Contrôle non destructif ».

Le but de notre travail est le contrôle par des méthodes non destructives des pipelines qui nous avons traité au niveau de l'entreprise fleuron de l'industrie pétrochimique, Fértial, société des fertilisants d'Algérie. La partie expérimentale a été réalisée au niveau du département technique spécialisé dans l'inspection des tuyauteries et d'équipements d'unité d'ammoniac.

**Présentation de l'entreprise**

### 1. Historique de l'entreprise :

A l'aube de l'indépendance la situation du secteur de l'industrie des produits chimiques montrait une faiblesse notable dans les capacités de production installée qui se limitait à de petites unités de fabrication vétustes, utilisant des procédés archaïques. C'est pourquoi la SONATRACH (société mère) a mis en œuvre une stratégie de développement globale dans le cadre de la politique du développement de l'industrie pétrochimique et principalement la de l'agriculture algérienne qui présente un outil indispensable dans l'indépendance du pays. En 1972 la société prend le nom du complexe d'engrais phosphaté de Bône CEPB. L'année 1977 a été une année charnière dans la vie de l'entreprise CEPB-SONATRACH, où elle a vu sa réception avec le déstagement des activités secondaires et recentrage sur son métier de base à savoir la fabrication de l'ammoniac et des engrais. Puis elle devient ASMIDAL en septembre 1986 (1).

En août 2005 une nouvelle société a été créée résultant d'un partenariat signé entre le Groupe algérien ASMIDAL et le groupe espagnol Grupo Villar Mir. Ils détiennent respectivement 34% et 66% du capital.



Figure 1.1: Lieu de stage fertil Annaba (1).

### 2. Présentation du FERTIAL (SPA) :

#### 2.1. Situation géographique :

L'usine est située à 04 Km de la ville d'Annaba, elle est limitée par Oued Seybouse et la cité Sidi-Salem à l'Est, la cité Seybouse à l'ouest, la mer méditerranée au Nord et la route nationale n° 44 et la plaine de Annaba au Sud.



Figure 1.2 : Situation géographique d'ASMIDAL-ANNABA (1).

### 2.2.Objectifs de l'entreprise :

Dans le cadre du développement économique et social du pays, l'entreprise est chargée de :

- Promouvoir et développer l'industrie des engrais et produit phytosanitaires.
- Exploiter, gérer et rentabiliser les moyens humains, matériels et financiers dont elle dispose.
- Satisfaire aux besoins du marché national et international.
- Favoriser l'épanouissement de l'esprit d'imagination et d'initiative et faire appel aux moyens locaux.
- Développer la coopération dans le cadre de la politique national (1).

### 2.3.Principales activités :

Fertial-ANNABA présente plusieurs activités, dont les plus importantes sont :

- La production d'ammoniac ( $\text{NH}_3$ ) : 1000T/J.
- La production d'ammonium : 2 lignes de 500T/J chacune.
- La production d'acide nitrique : 2 lignes de 400T/J chacune.
- La production d'engrais phosphatés : 1000T/J.
- La production SSP (super simple phosphate) : 1200T/J.
- La production UAN (urée acide nitrique) : 600T/J.

Une partie du nitrate d'ammonium et de l'ammoniac, est autoconsommée par Fertial pour la production d'autres produits. Les différents produits fabriqués et les capacités produites annuellement sont regroupés dans le tableau suivant :

Unités	Capacité (tonnes/an)
Engrais phosphatés (NPK - TSP)	550,000
Super simple phosphate (SSP)	40,000
Ammoniac ( $\text{NH}_3$ )	330,000
acide nitrique ( $\text{HNO}_3$ )	264,000
Nitrate d'ammonium( $\text{NH}_4\text{NH}_3$ )	330,000

Tableau 1.1 Différents produits fabriqués par Fertial – Annaba (1). .

Fertial exporte certains produits vers l'étranger :

- $\text{NH}_3$  : Espagne, France, Italie, Grèce, Belgique, Cuba, grand Bretagne, Turquie et Maroc.
- UAN : France, Espagne et USA.
- NITRATE : Tunisie et Maroc ; SSP : Maroc, Grèce, France, Italie et Brésil (1).

# **Chapitre 1 : Étude bibliographique**

## 1. Généralités sur le contrôle non destructif (CND):

Le contrôle non destructif occupe une place importante dans l'univers du domaine industriel. Il existe dans : la fabrication mécanique, les activités nucléaires, l'aéronautique, l'industrie chimique et tant d'autres secteurs qui ne sauraient être réguliers sans le recours à l'inspection des équipements par les méthodes du contrôle non destructif.

Le développement industriel est porté par le souci permanent de trouver de nouveaux procédés de maintenance pour améliorer la qualité du produit, la productivité, le prix de revient et le temps d'exécution etc.



Figure 1.3: Quelques secteurs industriels qui utilisent le CND (2).

### 1.1. Historique :

L'introduction des contrôles non destructifs (CND) des matériaux en génie civil remonte à la fin des années 1940, lors de la période de reconstruction qui a suivi la fin de la deuxième guerre mondiale. À cette époque, les ingénieurs avaient besoin de techniques pour suivre l'évolution de la résistance à la compression du béton à jeune âge afin.

Plus tard, dans les années 1980, les besoins des ingénieurs ont évolués. Ces ingénieurs avaient non seulement toujours besoin de techniques pour l'estimation de la résistance du béton à jeune âge, mais également, compte tenu du vieillissement des ouvrages, de techniques pour l'évaluation de la résistance des matériaux âgés et pour la détection et la caractérisation des défauts dans ces matériaux. (3)

Le métier du CND s'est historiquement construit autour des activités nucléaires (1950-80), puis celles de l'aéronautique (1980-2000) lorsque les matériaux composites sont apparus.

### 1.2. Définition :

Le contrôle non destructif (CND) regroupe un ensemble de méthodes qui ont pour but général de contrôler un objet sans le modifier. (2)

On regroupe sous le vocable essais non destructifs ou encore contrôles non destructifs (ce dernier évoquant mieux l'aspect qualité industrielle que le premier qui évoque plutôt les examens en laboratoire) l'ensemble des techniques et procédés aptes à fournir des informations sur la santé d'une pièce ou d'une structure sans qu'il en résulte des altérations préjudiciables à leur utilisation ultérieure.



Le terme de santé, s'il souligne une certaine parenté avec le domaine des examens d'aide au diagnostic médical, comme la radiologie ou l'échographie, délimite bien l'objectif des Contrôles non destructifs qui sont la mise en évidence de toutes les défauts susceptibles d'altérer la disponibilité, la sécurité d'emploi et/ou, plus généralement, la conformité d'un produit à l'usage auquel il est destiné.

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

Situé ainsi aux frontières de la métrologie, de l'instrumentation industrielle, scientifique et médicale, le domaine des contrôles non destructifs constitue un secteur spécifique d'activité scientifique et industrielle possédant ses propres structures professionnelles qui regroupent des industriels fabricants ou distributeurs spécialisés, des organismes d'étude et de formation, des sociétés de services, ainsi que les départements spécialisés d'un certain nombre de grosses entreprises industrielles fortement utilisatrices de ces techniques. (1)

### **1.3.Champ d'application :**

À travers sa définition, 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).

Les CND trouvent leurs applications dans le contrôle et la surveillance des installations suivantes par exemple :

- Contrôle de l'usure des tuyauteries d'une chaufferie ;
- Surveillance de la structure d'un avion ;
- Vérification de l'état d'une pièce de sécurité très chargée (fissuration) ;
- Contrôle d'une pièce avant son remontage afin d'éviter toute casse ultérieure ;
- Vérification des soudures d'une pièce ;
- Etc.

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 :

### 1.3.1. Le contrôle en cours de fabrication :

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 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**. (4)

### 1.3.2. Le contrôle en réception :

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

Si l'aspect coût et productivité peut avoir encore une certaine importance à ce stade de contrôle, c'est surtout l'aspect procédure de la démarche qui devient primordial, qu'il s'agisse du choix du procédé, du choix des paramètres de réglage, de l'étalonnage, de la présentation et de l'archivage des résultats obtenus. À ce stade, il s'agit de **détecter des défauts** mais aussi souvent d'**en définir la nature et les dimensions**. (5)

### 1.3.3. Le contrôle en service :

Le contrôle en service s'effectue sur pièces ou structures lors d'opérations de maintenance ou à la suite de détection d'anomalies de comportement. On en attend une très grande fiabilité car les risques de non-détection d'un défaut sont graves. 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**. (4)

## 2. Principes de détection des défauts. Différentes techniques du CND :

### 2.1. 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.

#### 2.1.1. Les défauts de surface :

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

- **Les défauts ponctuels :** qui correspondent 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  $\mu\text{m}$ ) 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. (1)
- **Les défauts d'aspect :** qui correspondent 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.

### 2.1.2. Les défauts internes :

Ils 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. (1)

## 2.2.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.

### 2.2.1. 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 :

- Mise en œuvre d'un processus physique énergétique (**excitation**)
- Modulation ou altération de ce processus par les défauts (**perturbation**).
- Détection de ces modifications par un capteur approprié (**révélation**).
- Traitement des signaux et interprétation de l'information délivrée.

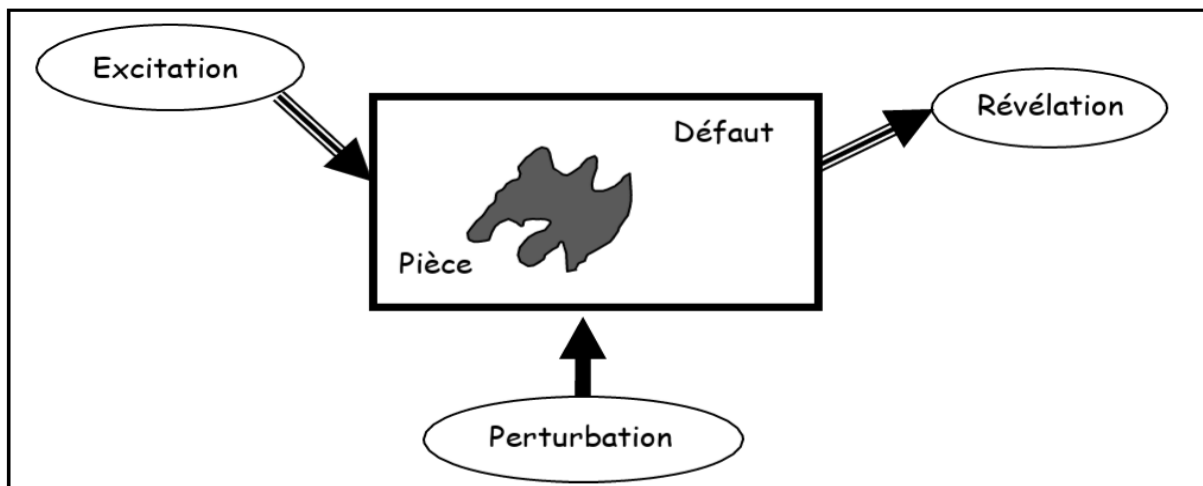


Figure1.4 : Principe de détection d'un défaut (5)

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 :

**A. 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 ci-dessous ; la grande majorité des procédés du contrôle non destructif se réfère à ce groupe de méthodes.

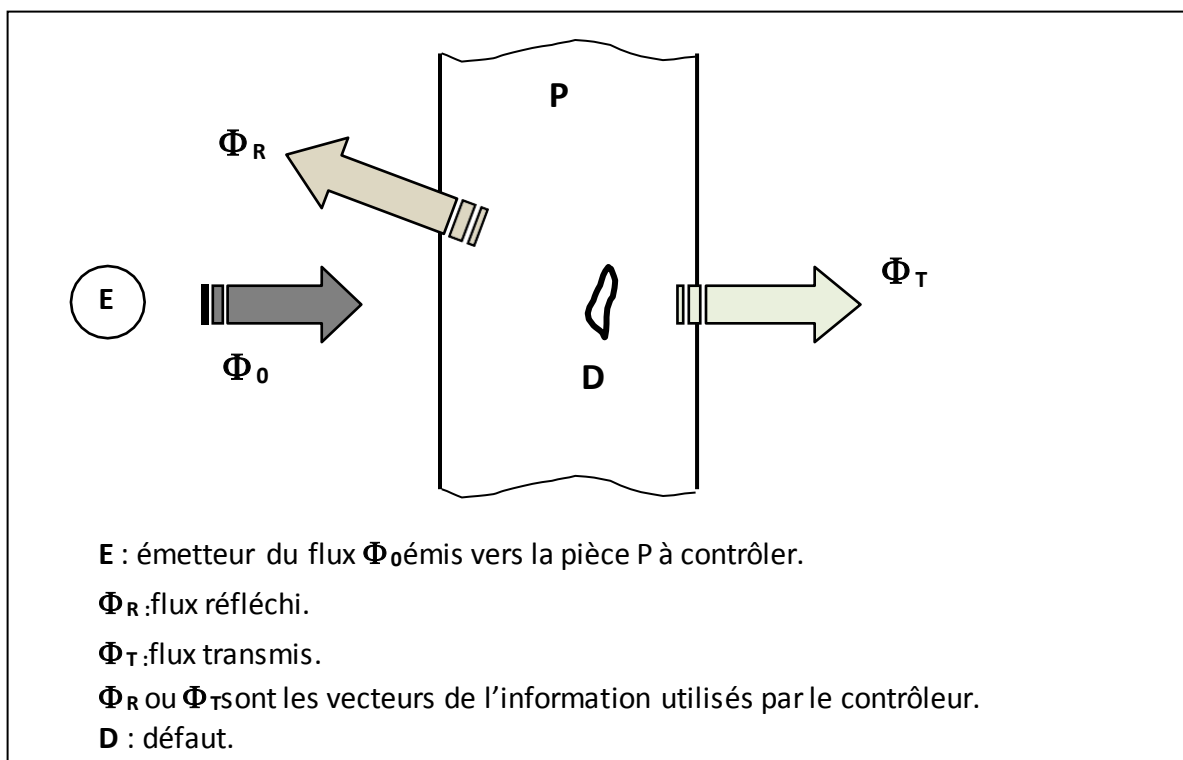


Figure 1.5 : Principe du contrôle non destructif (5)

**B** .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.

### 3. Techniques de contrôle :

Les CND peuvent s'effectuer selon les méthodes suivantes :

- Procédés optiques, examen visuel
- Ressuage.
- Magnétoscopie.
- Radiographie.
- Courants de Foucault.
- Ultrasons.

#### 3.1.Examen visuel - procédés optiques :

##### 3.1.1. Définition :

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. (1)

##### 3.1.2. L'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. 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, on

doit préférer l'utilisation d'un **éclairage directif**; enfin les défauts présentant un certain relief sont mis en évidence grâce à un **éclairage rasant**.

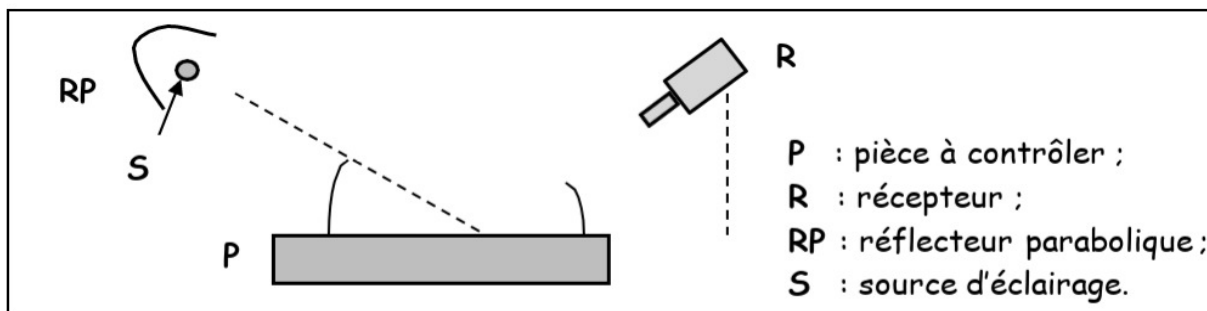


Figure 1.6 : éclairage direct (5)

### 3.1.3. L'œil et ses limitations :

L'œil est un capteur optique remarquable 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  $\mu\text{m}$  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.

### 3.1.4. Appareils optiques :

Les appareils optiques permettent de repousser les limites de l'acuité visuelle. Il s'agit en premier lieu des **loupes** et des **verres grossissants** constitués généralement d'une ou deux lentilles donnant un grossissement allant de 1,5 à 20 fois environ. La loupe doit être tenue près de l'œil; son champ et sa profondeur de champ diminuent fortement lorsque le grossissement s'accroît.

Pour un examen approfondi en laboratoire, on utilisera de préférence du matériel d'observation métallographique : **loupe binoculaire** à grossissement variable et éclairage incorporé, éventuellement **microscope métallographique** si l'on ressent la nécessité d'utiliser des grossissements importants, de 100 ou 1 000 et plus.

On note enfin que l'emploi des **microscopes électroniques à balayage** (MEB) n'est plus désormais réservé aux seuls spécialistes, ce qui devrait élargir son soutien au contrôle non destructif en laboratoire.

## 3.2. Le ressuage :

Le ressuage est une extension de l'inspection visuelle qui peut s'appliquer sur tout matériau à l'exception de certaines fontes qui présentent une surface poreuse.

C'est un terme qui désigne la sortie d'un fluide (liquide ou gazeux) d'une discontinuité dans laquelle ce fluide s'était précédemment accumulé au cours d'une opération d'imprégnation.

C'est une méthode de contrôle non destructif qui permet de détecter des défauts débouchant en surface de pièce pour des matériaux non absorbants (alliages métalliques, matières plastiques, caoutchouc moulés, verres, certaines céramiques...).

Les défauts observés sont principalement : les reprises de coulée, les criques, les tapures, les microporosités, les décohésions et les reprises de fonderie. L'opération de ressuage peut s'effectuer à tous les stades d'élaboration d'une pièce (brut de fonderie, après usinage, après traitements thermiques...).

### **3.2.1. Principe de ressuage :**

La méthode consiste à appliquer un pénétrant de faible tension superficielle (de bonne capillarité) sur la surface de la pièce.

On lui laisse un certain temps de sorte qu'il puisse s'introduire dans les discontinuités aboutissantes à la surface, On élimine ensuite le pénétrant sur la surface mais cette opération laisse cependant en place la partie qui a réussi à s'infiltrer dans les discontinuités.

Un révélateur, produit opaque et absorbant est appliqué sur la surface, le pouvoir absorbant du révélateur fait que le pénétrant qui a réussi à s'infiltrer dans les discontinuités est alors aspiré vers la surface (effet buvard) et y laisse une trace. Cette trace à cause de la diffusion du pénétrant dans le révélateur, est toujours plus importante que la discontinuité.

L'efficacité de cette méthode de contrôle repose sur la possibilité de détecter les indications de discontinuité afin d'améliorer cette détectabilité. Le pénétrant contient en général un produit coloré visible à la lumière blanche ou un produit fluorescent visible à la lumière noire (ultra violet).

### **3.2.2. Domaine d'application et technique opératoire :**

Le ressuage ne peut détecter que les défauts superficiels débouchant sur la surface. Les défauts matés ou obturés ne sont que partiellement détectés. Par contre les défauts internes ne peuvent pas être décelés.

On peut ainsi localiser les défauts de : moulage, de fatigue, d'usinage, de traitement thermique et de soudage.

Le ressuage donne des résultats intéressants avec des métaux tel que l'aluminium, le magnésium, le cuivre, le titane, l'acier inoxydable et la plupart des alliages non métalliques comme les céramiques, les plastiques, le caoutchouc moulé, (mais il faut, pour les plastiques et les composés caoutchouc moulé, se méfier de leur réactivité vis à vis des produits utilisés et donc procédé à des essais préliminaires). (5)

### **3.2.3. La procédure générale:**

Une inspection par pénétrant liquide se fait en six temps :

**1<sup>er</sup> temps** : Nettoyage de la surface à contrôler de toutes traces de matériaux métrangers solides ou liquides qui risqueraient de gêner l'entrée du pénétrant dans les discontinuités.

**2<sup>ème</sup> temps** : Application du pénétrant sur toute la surface à examiner et maintien d'une couche continue de pénétrant pendant tout le temps d'imprégnation.

**3<sup>ème</sup> temps** : Elimination du pénétrant étalé à la surface de la pièce (c'est une phase très délicate: il ne faut pas enlever le pénétrant situé dans les défauts).

**4<sup>ème</sup> temps** : Application régulière du révélateur sur toute la surface à examiner.

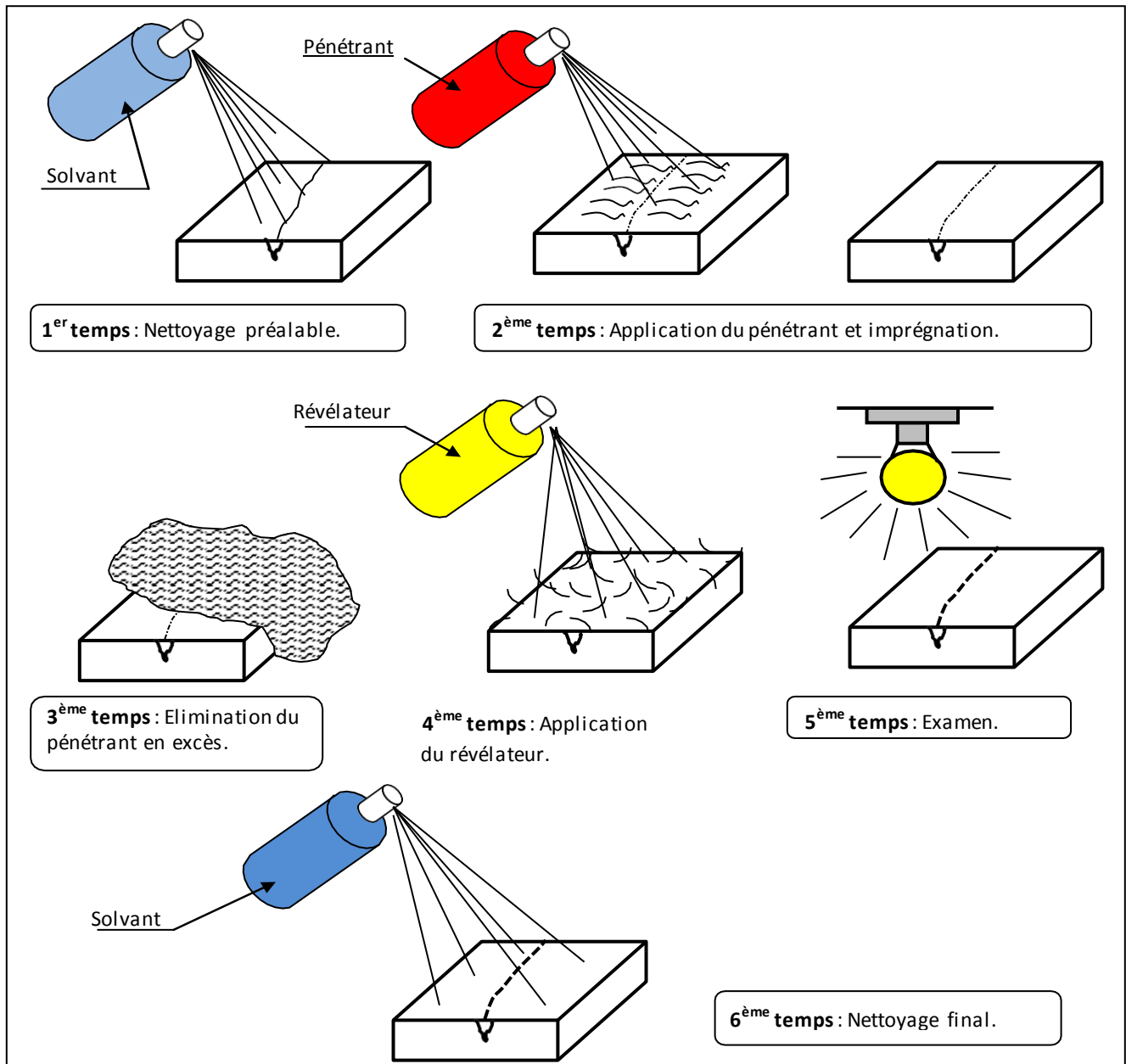


Figure 1.7 : Procédure générale de contrôle par ressuage (5)



**5<sup>ème</sup> temps** : Pendant et après développement des indications, inspection soignée lumière blanche ou/et sous lumière ultraviolette pour repérer la présence, localiser, donner la « nature » et la « grandeur » des discontinuités débouchant à la surface.

**6<sup>ème</sup> temps** : Nettoyage de la pièce pour éliminer toutes traces de produits de ressuage.

### 3.2.4. Produits de ressuage :

Les produits de ressuage sont constitués par les pénétrants, les émulsifiants et les révélateurs.

- **Les pénétrants** font l'objet d'une classification selon la spécification américaine MIL I 25135 révision C ; les pénétrants fluorescents, qu'ils soient à post-émulsion ou directement lavables à l'eau, sont plus sensibles que les pénétrants colorés.
- **Les émulsifiants**, longtemps de type lipophiles à base de solvants pétroliers, ~~peuvent~~ être approvisionnés sous forme d'émulsifiants hydrophiles à diluer dans l'eau, permettant ainsi un meilleur réglage de la sensibilité du contrôle.
- **Les révélateurs** sont soit de type sec, soit de type humide, en suspension dans l'eau ou encore à support organique volatil. Le choix à faire dépend du type de contrôle ; en particulier, on utilise toujours un révélateur non aqueux en association avec un pénétrant coloré. Il existe enfin des révélateurs pelliculaires qui permettent de garder la trace des défauts.

Tous ces produits de ressuage sont vendus conditionnés de diverses façons et, en particulier, sous forme de récipients aérosols pour les contrôles à l'unité et sur site.

### 3.2.5. Avantage :

- procédé de contrôle économique.
- procédé de contrôle relativement rapide.
- bonne sensibilité de détection des défauts débouchant avec appréciation de leur longueur.
- détection possible de petit défaut.
- procédé insensible à l'orientation des défauts par rapport à la surface.
- utilisable sur les matériaux amagnétiques à l'inverse de la magnétoscopie.
- possibilité d'automatisation du procédé.

### Inconvénient :

- détection de défaut obligatoirement débouchant sur une surface.
- accès d'un seul côté pour les éléments aux de faible diamètre.
- impossibilité de contrôler les matériaux poreux.
- la surface à contrôler ne doit être expérimentée pour certains techniques.
- impossible de révéler les défauts internes et obstrués.

- gestion des déchets liquides rejetés à l'égout.

### 3.3.Magnétoscopie :

#### 3.3.1. Définition :

Le principe de la magnétoscopie est exposé dans la norme NF A09-590, comme suit: << L'examen magnétoscopie consiste à soumettre la pièce ou une partie de la pièce à un champ magnétique de valeur définie en fonction de la pièce. Les discontinuités superficielles provoquent à leur endroit des fuites magnétiques qui sont mise en évidence par des produits indicateurs déposés à la surface de la pièce. L'image magnétique obtenue est observée dans des conditions qui dépendent du produit indicateur utilisé >>.

Le CND par magnétoscopie n'est utilisable que pour les matériaux ferromagnétiques. Cette technique est particulièrement efficace pour les défauts de surface de très petites dimensions, mais donne difficilement de bons résultats pour les défauts en fous (7) .

Ils ne permettent pas de déterminer avec précision l'importance dimensionnelle du défaut, mais d'en définir la position et souvent la nature.

#### 3.3.2. Principe

La magnétoscopie consiste à créer un flux magnétique intense à l'intérieur d'un matériau ferromagnétique. En présence d'un défaut sur son chemin, le flux magnétique est dévié et il se crée une fuite magnétique. Des particules colorées ou fluorescentes de type limaille de fer faisant office de révélateur (par analogie avec le ressuage) sont projetées dans la zone inspectée. Si leur répartition est homogène, la pièce inspectée est saine, sinon celle-ci fournit une signature caractéristique de la présence d'un défaut.



Figure 1.8 : Contrôle par magnétoscopie de pipe G657 au niveau d'entreprise fertial Annaba

La magnétoscopie permet de détecter des défauts de densité débouchant en surface ou proches de la surface sur des matériaux ferromagnétiques tels que aciers ordinaire au carbone, aciers

ferritiques ordinaires et au chrome (13 % de chrome), fontes, nickel, cobalt. Les aciers austénitiques ne sont pas ferromagnétiques.

Le principe consiste à soumettre la pièce à un champ magnétique d'une intensité suffisante de manière à travailler dans une zone située au dessus de la valeur maximale de la perméabilité magnétique du matériau.

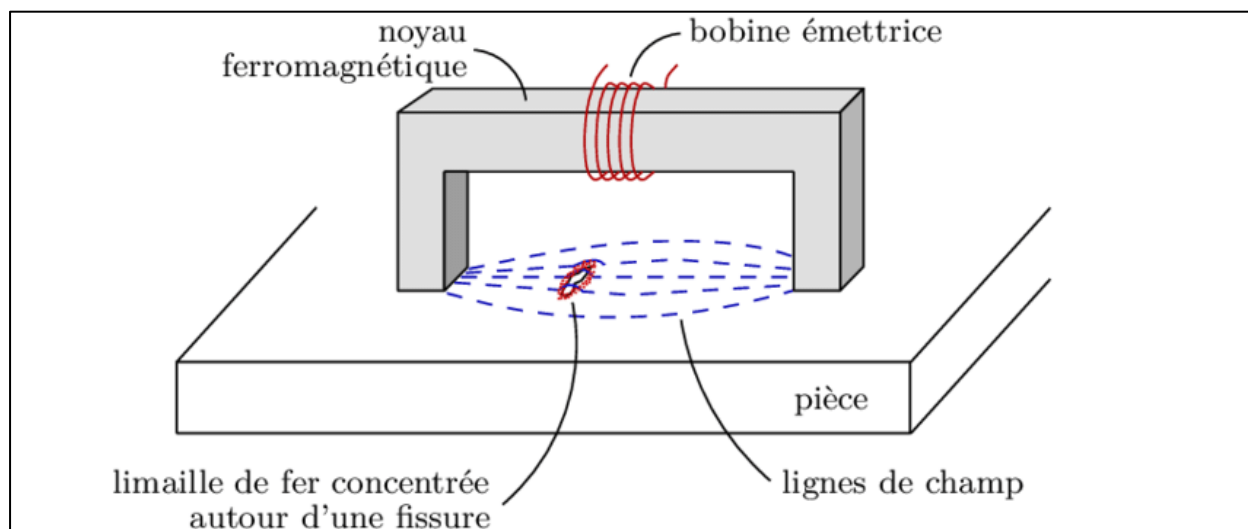


Figure 1.9: principe de la magnétoscopie (7).

### 3.3.3. Avantages :

- Méthode globale.
- Détection de tous les défauts débouchant.
- Contrôle de pièces de quelques millimètres à plusieurs mètres de long.
- Inspections relativement rapides et peu coûteuses.
- Résolution importante.
- Matériel robuste, pouvant être utilisé dans des environnements difficiles.

### Inconvénients :

- Contrôle limité aux pièces ferromagnétiques ;
- Méthode non entièrement automatisable ;
- Détection de défauts internes parfois difficile (suivant leur taille, leur profondeur, etc) ;
- Nécessite l'emploi de produits chimiques (révélateurs).

### 3.4. Radiographie :

### 3.4.1. Définition :

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

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

Le principe de la radiographie est le même que pour le domaine médical figure 8 et 9.



Figure 1.10 : application de la radiographie sur  
Un moteur mécanique.



Figure 1.11: application de la radiographie  
sur une main.

### 3.4.2. Principe :

Ce contrôle est basé sur l'absorption différentielle du rayonnement X ou gamma. Les différences de rayonnement émergeant de la pièce engendrent sur le film une « image latente » qui sera ensuite révélée par voie chimique.

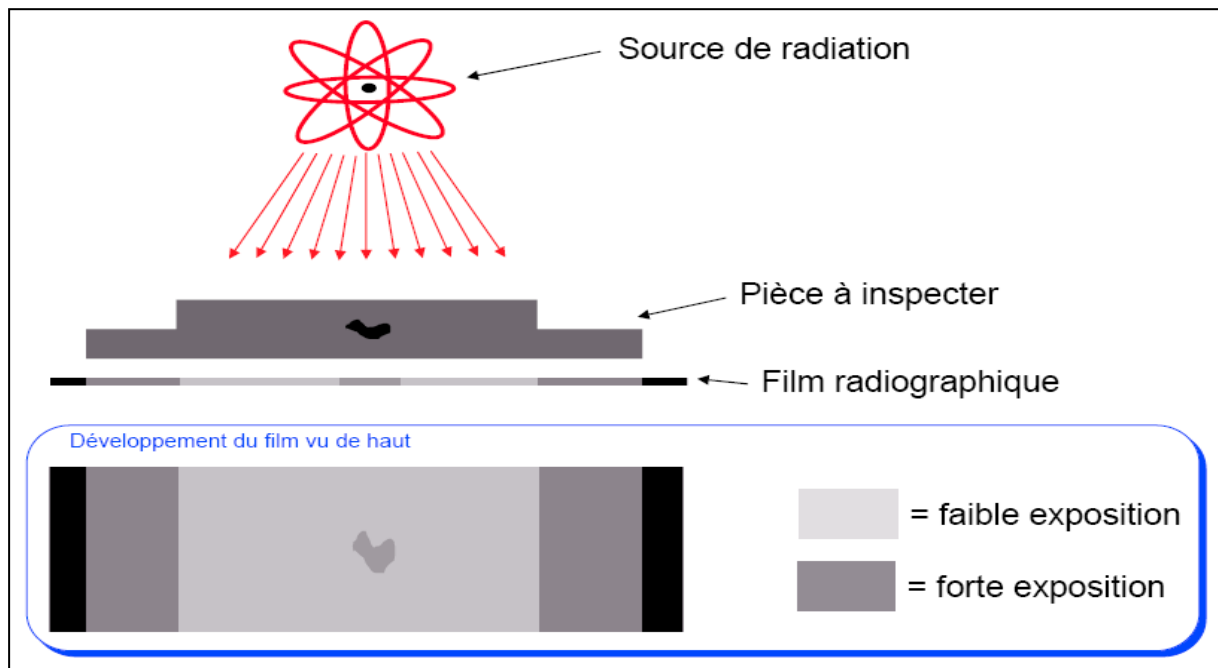


Figure 1.12 : principe de la radiographie (8)

### 3.4.3. Avantages :

- facilité de détection des défauts internes des pièces ;
- rapidité relative d'obtention du résultat ;
- bonne sensibilité de détection des défauts ;
- traçabilité et archivage des résultats par l'intermédiaire d'une file ;
- numérisation possible avec un traitement d'image,

### Inconvénients :

- Méthode coûteuse en investissement et développement des films ;
- Nécessite le respect de règles de sécurité importantes ;
- Pénétration des rayons limitée par l'épaisseur et la puissance de la source ;
- Localisation du défaut dans la section non garantie ;

### 3.5. Courants de Foucault :

### 3.5.1. Définition :

C'est une méthode de contrôle qui consiste à créer, dans un matériau conducteur, un courant induit par un champ magnétique variable. Ces courants induits, appelés **courants de Foucault**, circulent localement, à la surface du matériau. La présence d'une discontinuité à la surface de la pièce contrôlée perturbe la circulation des courants, entraînant une variation de l'impédance apparente de la sonde de mesure.

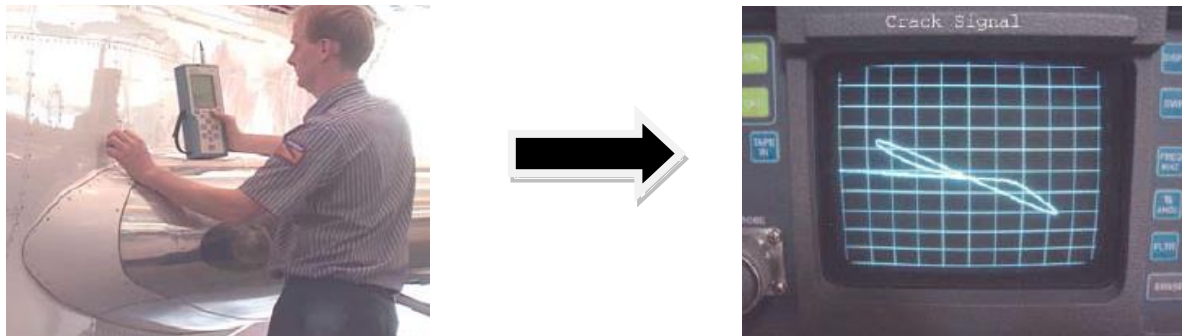


Figure 1.13 : Application de courants de Foucault sur mini avion Boeing (9).

### 3.5.2. Principe :

Cette méthode s'applique à tous les matériaux conducteurs de l'électricité. Elle consiste à placer une pièce conductrice dans un champ magnétique variable dans le temps. Celle-ci est alors parcourue par des courants induits, appelés "courants de Foucault" (physicien français 1819-1868). Ainsi, une bobine parcourue par un courant variable, alternatif par exemple, génère de tels courants induits qui, créant eux-mêmes un flux magnétique qui s'oppose au flux générateur, modifient par la même l'impédance de cette bobine. Ce principe simple est surtout utilisé pour détecter des défauts superficiels (9).

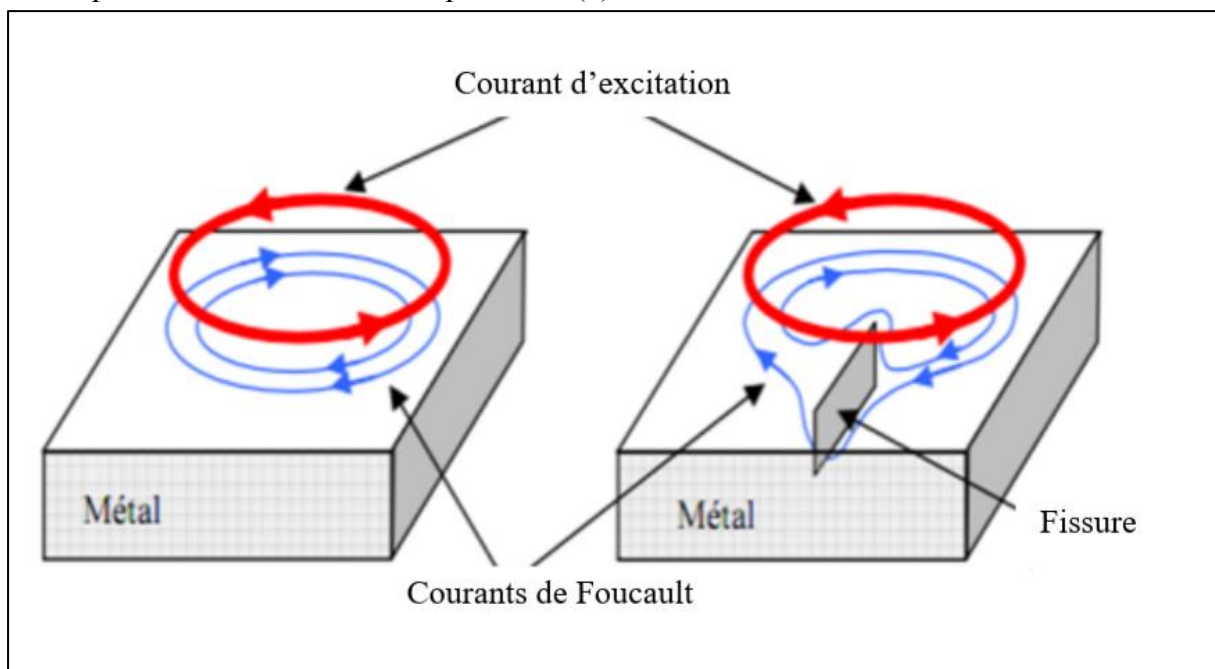


Figure 1.14 : principe de la méthode courants de Foucault (11) .

### **3.5.3. Application :**

L'utilisation des courants de Foucault dans les applications de CND est limitée aux pièces électriquement conductrices. Elle s'étend de l'inspection des tubes (échangeurs, générateurs de vapeurs de centrales nucléaires à la recherche des défauts débouchant sur des surfaces plus ou moins planes. Il est aussi possible de mesurer des épaisseurs de paroi ou la perméabilité magnétique du matériau (12) .

### **3.5.4. Avantage :**

- Rapidité de palpation et de détection (3 fois plus rapide que la magnétoscopie) ;
- Détection possible à travers un revêtement surfacique ;
- Aucune préparation particulière de la surface à contrôler ;
- Qualité de détection indépendante de la vitesse de palpation ;
- Pas de nécessiter d'étalonnage de l'appareil, une simple calibration est suffisante ;
- Traitement informatique avec stockage des données de modélisation ;
- Contrôle non polluant, (13) .

### **Inconvénient :**

- Investissement important ;
- Effet de bords des pièces produisant des signaux parasites ;
- Détection de défauts débouchant en surface ;
- Le revêtement de surface doit être non magnétique et isolant électrique ;
- Importance du positionnement de la sonde par rapport au défaut existant ;
- Formation théorique et pratique des utilisateurs et intervenants (13).

## **3.6. Ultrasons :**

### **3.6.1. Définition :**



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

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



Figure 1.15 : application d'ultrason au niveau d'usine Toyota (14)

### 3.6.2. Principe

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



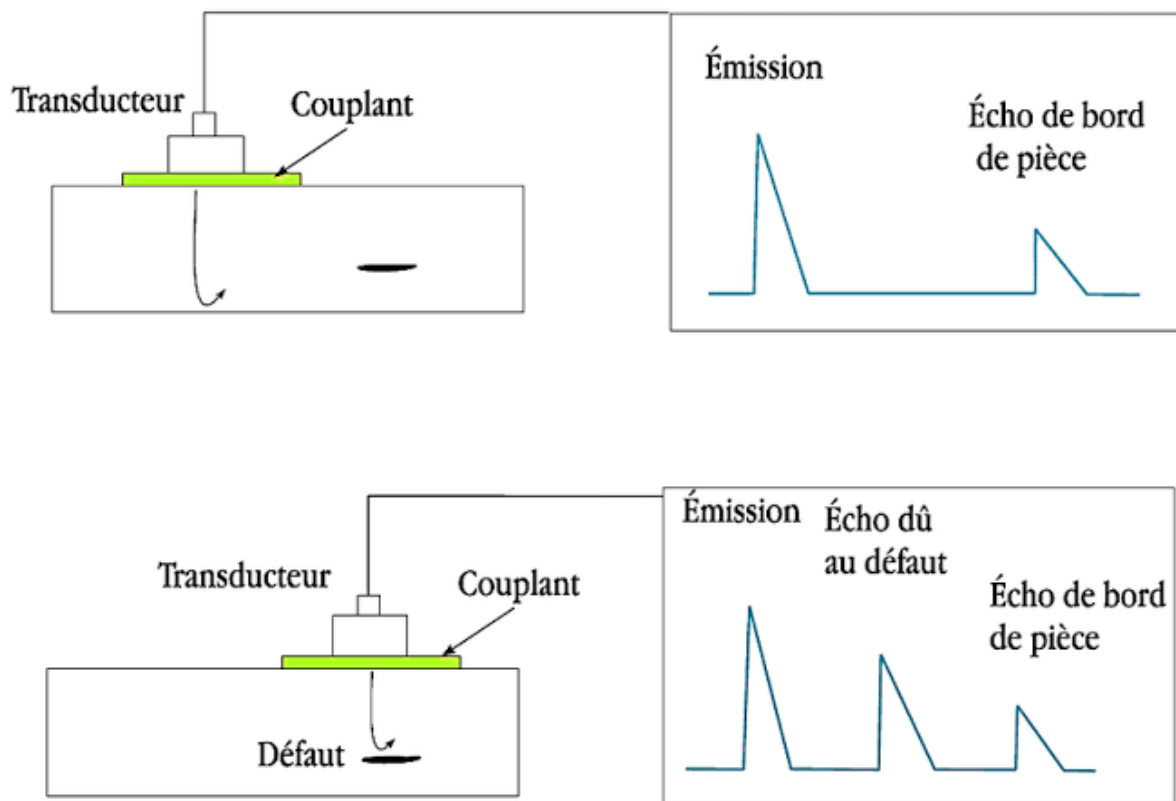


Figure 1.16 : principe d'ultrasons (13).

### 3.6.3. Domaine d'application :

- Examen de pièces métalliques (moulées, forgées, usinées, soudées...) à tous stades d'élaboration et d'utilisation (fabrication, maintenance) ;
- Contrôle des cordons de soudure ;
- Caractérisation et contrôle de matériaux composites et de bétons ;
- Contrôle de précontrainte dans les assemblages boulonnés ;
- Mesure de propriétés physiques ou métallurgiques de matériaux ;
- Suivi en service d'installations et de matériels (nucléaire, transports aérien et ferroviaire, pétrochimie...).

### 3.6.4. Avantages :

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

- Détection, localisation et dimensionnement des défauts ;
- Inspection et détection en temps réel.

**Inconvénients :**

- Sensible à la nature et à l'orientation des défauts ;
- Technique souvent très coûteuse (investissement, temps de contrôle) ;
- Inspection limitée par la complexité de la forme de la pièce contrôlée.

**4. Conclusion :**

On peut conclure que le CND présente une importance primordiale pour connaître la qualité des structures mécaniques et des pièces dans les étapes de fabrication, en service et après la maintenance. Plusieurs normes et réglementations imposent ce type de contrôle pour des raisons de sécurité surtout pour les appareils sous pression (réservoirs et pipelines). Une application pratique au niveau d'entreprise à Annaba sera exposée dans le chapitre 3.

## **Chapitre 2 :**

# **Défauts des pipelines et méthodes d'inspection**

## 1. Introduction :

Le Plan de Modernisation des Installations Industrielles est aujourd'hui au cœur de l'actualité et concerne plus particulièrement les canalisations, les pipelines et leur accessoire.

En règle générale, ces derniers sont difficilement accessibles pour les opérations de contrôle car ils sont suspendus comme ce qu'on trouve dans les entreprises industrielles énergétiques ou bien ils sont souvent enterrés et difficiles d'accès et ils nécessitent parfois la mise en œuvre d'opérations lourdes telles que la mise en place d'échafaudages et l'enlèvement des protections type calorifuge de la canalisation [15].

## 2. Définition :

Un système pipelines est un ensemble de sections de tuyauterie qui est clairement identifié et délimité dans l'espace. C'est un mode de transport, de matières fluides. Il peut être amené à assembler des équipements supplémentaires (vannes, robinetteries, des ballons industriels...). Il existe dans les ateliers ou les chantiers, dans les secteurs de la pétrochimie, de la construction navale ou du nucléaire. Les produits visés par ce terme sont généralement : le pétrole et autres hydrocarbures liquides, le gaz naturel et autres combustibles, ainsi que certains produits chimiques [16].

Un système de pipelines fait l'objet d'un plan d'inspection spécifique et est un 'item individuel' dans le programme d'inspection. La définition de systèmes de tuyauterie est donc une manière pour garder gérable de manière pratique l'inspection d'un grand nombre de tuyauteries ou bien de pipes [17].



Figure 2.1 : Système tuyauteries industriel fertial annaba.

### 3. Caractéristiques mécaniques des tubes :

La demande mondiale croissante de produits chimiques a obligé les sociétés énergétiques de développer le système de transport et de stockage et a nécessité l'emploi des tubes de grand diamètre, exploités à des pressions plus élevées. Pour éviter d'atteindre des épaisseurs difficiles à souder et faire des économies d'acier, on a eu recours à de nouvelles nuances à caractéristiques mécaniques améliorées. C'est ainsi qu'on a vu apparaître les grades X60, X65, X70, X80 et même X100. Les aciers des tubes peuvent être divisés en deux groupes : aciers au carbone faiblement alliés et aciers à faible teneur en carbone. Dans le premier groupe on trouve les aciers ferrito-perlitique X42 à X52 (selon API) renfermant jusqu'à 0,3 % C, 1,6 % Mn, 0,7 % Si. Dans le deuxième groupe on trouve les aciers ferrito-perlitiques faiblement alliés à basse teneur en carbone X56, X50, X65, X70 renfermant 0,12 % C, 0,45 % Si, 0,25 % S, 1,9 % Mn, 0,1 % V, 0,1Nb, 0,015 % Al. Pour les conduites de diamètre supérieur à 1020 mm, destinée à fonctionner sous des pressions élevées, on utilise généralement des tubes en acier de laminage contrôlé [18].

### 4. Les types d'inspections et les modes de dégradations des pipelines :

#### 4.1. Les modes de dégradations des pipelines :

Bien que le transport de produits dangereux par pipeline soit considéré comme un moyen de transport sûr et malgré la gestion rigoureuse du réseau de pipelines, des défaillances sont identifiées principalement dans la surveillance des travaux effectués dans ce couloir [19].

La multiplication des accidents plus ou moins graves, notamment dus à la corrosion, ainsi que leur incidence sur l'économie mondiale et leur impact sur l'environnement rendent le transport des hydrocarbures de plus en plus préoccupant. Les cas les plus fréquents sont relatifs à des incidents amorcés à partir de défauts issus soit de l'élaboration du matériau, soit de la fabrication, de l'assemblage, de la réparation ou des conditions d'exploitations des tubes et qui ont conduit à la naissance et à la propagation des fissures superficielles ou traversantes suivies de fuites.

On trouve six catégories principales de causes des dégradations des pipelines :

- Agression externe ou activité tierce (les plus répandus) ;
- Corrosion interne ou externe ;
- Défaut de construction ou défaillance de matériels ou défaut mécanique ;
- Mouvement de terrain ou risques naturels en général ;
- Erreurs opérationnelles [19].

#### **4.2.Défaillances mécaniques :**

Les défaillances mécaniques sont des ruptures et des fissures qui se produisent lorsque des contraintes dans le système dépasser le stress admissible. Ils peuvent être causés par une mauvaise qualité du matériau ou défectueux construction.

Des défauts de fabrication peuvent se produire dans le ou les raccords, par exemple, dans le mur de la tuyauterie ou dans la soudure longitudinale. Les mauvaises techniques de construction peuvent générer un stress résiduel élevé niveaux dans le pipeline avant la mise en service.

Les défaillances mécaniques représente environ 25% du nombre d'incidents de déversement et environ 30% du volume net a été répandu sur l'ensemble de la période de vingt-cinq ans.

#### **4.3.Défaillance opérationnelle :**

Les défaillances opérationnelles peuvent être attribuables à une surpression ou à un dysfonctionnement des systèmes tels que dispositifs de décompression ou de contrôle. Ils sont également causés par des erreurs humaines telles que en ne respectant pas les instructions d'utilisation correctes. Cependant, l'industrie a acquis une grande expérience des pipelines opérationnels et l'incidence des déversements a provoqué par erreur opérationnelle est très faible à 7% des incidents dans les données de vingt-cinq ans [18] .

#### **4.4.Risque naturel :**

Les risques naturels sont des phénomènes tels que les glissements de terrain, les inondations, l'affaissement au sol et les tremblements de terre.

Ces politiques de routage et de conception ont entraîné une très faible incidence d'échec due à des risques naturels de seulement 4% des incidents dans la période de 25 ans [20] .

#### **4.5.Dégradation par corrosion :**

C'est un phénomène naturel qui se produit lorsque le métal réagit avec l'environnement, soit par exemple au contact de l'eau ou de la terre. Tout comme une bicyclette exposée à la pluie finira par se rouiller et commencera à se corroder, les pipelines peuvent se corroder au bout d'un certain temps s'ils ne sont pas protégés [21].

##### **4.5.1. Pertes de métal dues à la corrosion interne :**

Les pertes de métal sont provoquées le plus souvent par des attaques chimiques de la surface interne de la conduite (figure I.2). Ce type de corrosion est favorisé par la présence de sulfure d'hydrogène et de dioxyde de carbone dans le gaz et la présence de bactéries sulfato-réductrices (BSR) dans le cas des oléoducs.



Figure 2.2 : corrosion interne [22]



figure2.3 : Pertes de métal dues à la corrosion interne [23].

#### 4.5.2. Pertes de métal dues à la corrosion externe :

Les pertes de métal sont provoquées le plus souvent par des phénomènes de type électrochimique et chimique de la surface externe de la conduite.

Les principaux facteurs favorisant ce type de corrosion sont :

- Les défauts de revêtement de la conduite ;
- Les insuffisances du système de protection cathodique [23].



Figure 2.4 : corrosion externe d'un pipe (fertil Annaba)

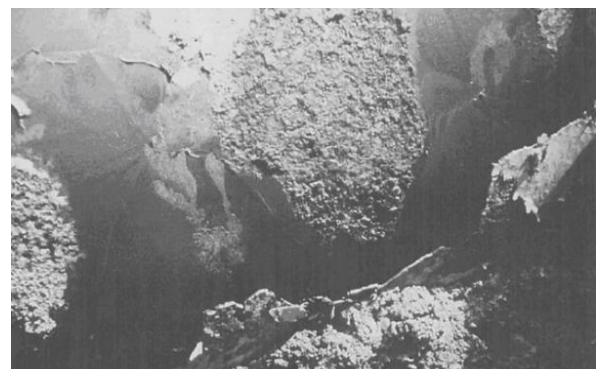


figure 2.5 : Pertes de métal dues à corrosion externe



### 4.5.3. Corrosion uniforme :

La corrosion uniforme est caractérisée par un taux de corrosion relativement uniforme sur l'ensemble d'une surface exposée. Ce type de corrosion est habituellement prévu pour les pièces faisant partie d'élément structural qui peuvent être sacrifiés au fil du temps, mais elle affecte tous les métaux communs. Dans le cas des aciers au carbone, le fer réagit avec l'oxygène pour former de la magnétite minérale, qui est de l'oxyde de fer dont la formule chimique est  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ .



Figure 2.6: Corrosion uniforme [18].

### 4.5.4. Corrosion par piqûres et corrosion caverneuse :

La corrosion par piqûres et la corrosion caverneuse sont des cas particuliers de corrosion galvanique dans lesquels la perte de métal est localisée sur une zone de métal relativement petite.

Dans de tels cas, la corrosion se produit à cause des différences de concentration localisées de l'oxygène ou d'un ion agressif, par exemple un ion de chlore, ou encore à cause d'une différence de pH.

Cette situation peut survenir lorsque les conditions de l'écoulement provoquent un faible débit ou une stagnation, par exemple, dans les petites fissures, les espaces ou les criques, comme celles associées à la présence de boulons ou de joints d'étanchéité, ou encore aux points de contact entre les métaux [24].



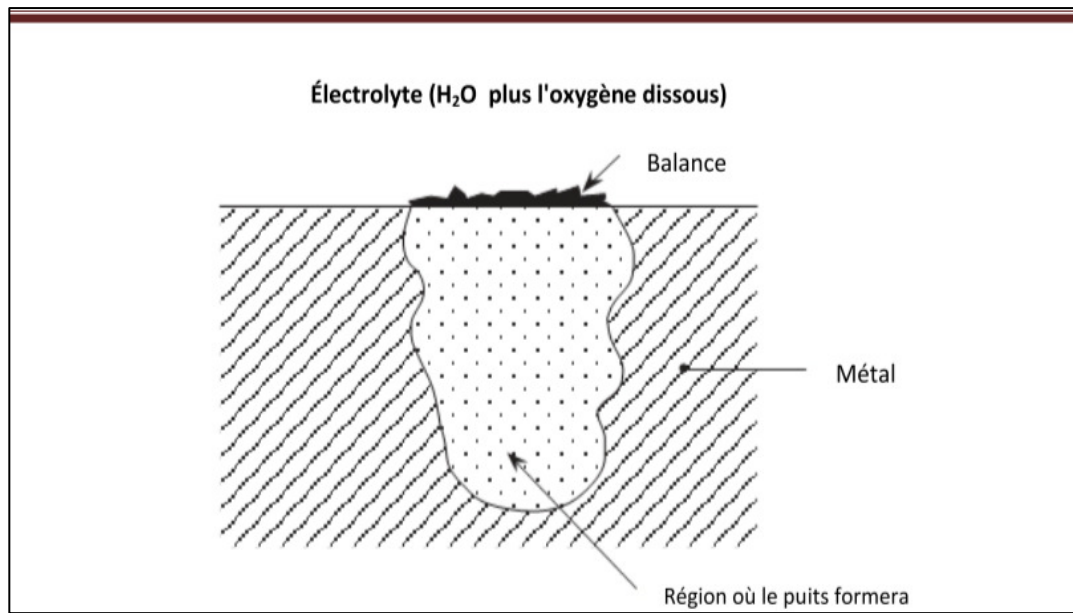


Figure 2.7: Corrosion par piqûres [24].

#### 4.5.5. Corrosion-érosion :

La corrosion-érosion se produit lorsque le débit de l'eau se combine à la corrosion pour augmenter considérablement la vitesse d'enlèvement du métal par rapport à la vitesse d'enlèvement à des débits plus faibles. L'effet du débit est dû à l'enlèvement des ions métalliques et des couches protectrices à mesure qu'ils se forment, ce qui accroît la force d'entraînement de corrosion chimique et peut empêcher la formation d'une couche protectrice [18].

#### 4.5.6. Corrosion induite microbiologiquement (CIM) :

Les bactéries, que l'on trouve couramment dans l'eau stagnante, favorisent la corrosion induite microbiologiquement (CIM). Le phénomène peut se produire avec ou sans oxygène, parce que certaines bactéries ont évolué de manière à se reproduire dans l'une ou l'autre condition.

Des nodules de bactéries qui aiment l'oxygène peuvent se déposer à la surface des métaux, ce qui crée des conditions semblables à celles décrites à la section de la corrosion par piqûres [18].

## 5. Les types d'inspections des pipelines :

## **5.1. Contrôles Non destructifs et destructifs :**

### **5.1.1. Contrôles Non Destructifs (CND) :**

Les contrôles non destructifs (CND), sont couramment utilisés pour décrire la technologie de détection des défauts dans les solides. Cette technologie couvre un groupe de techniques d'analyse utilisées dans la science et l'industrie pour évaluer les propriétés d'un matériau, d'un composant ou d'un système sans causer de dégâts. C'est un élément essentiel du contrôle de la qualité des systèmes d'ingénierie pour leur utilisation sûre et réussie dans des situations pratiques. Cependant, les applications de CND ne vont pas plus loin et ont une portée beaucoup plus large que la détection de défauts grossiers. Ils concernent tous les aspects de la caractérisation des solides ainsi que leur méthode de préparation [25].

### **5.1.2. Contrôle des lingots :**

Un contrôle à la réception des lingots est effectué sur la base des spécifications techniques (forme, dimensions, défauts de surface tels que les empreintes et les griffures), de la liste de colisage et la spécification des lingots dans le but de s'assurer la conformité des lingots reçues avec les documents d'accompagnement.

Un second contrôle des documents d'accompagnement (certificats d'analyse chimique et mécaniques) établis par le fournisseur. Les lingots conformes sont saisies sur une liste de réception, et sont identifiées par un marquage indélébile comportant :

Numéro du lingot, Numéro de la coulée et la nuance de l'acier, Poids de lingot, Dimensions, Nom du fournisseur, Identification du projet.

Cette identification permet d'assurer la traçabilité du produit réceptionné. Les lingots non conformes sont isolés avec un marquage spécifique.

### **5.1.3. Contrôles des tubes :**

Ce contrôle a pour but de mettre en évidence des défauts soit directement (visuel) soit indirectement par leurs effets (visuel, magnétoscopie, ultrasons, BEH...). Ces défauts sont de types :

- Défauts admissibles (soufflures sphériques ou allongées, coup d'arc...)
- Défauts non admissibles (manque de pénétration, fissures, caniveaux...).

La conformité des tubes est vérifiée à la fin de l'opération de fabrication et avant leur acheminement vers le parc par différents moyens de contrôle. Ces contrôles sont les suivants :

- Le contrôle visuel
- Ressuage.
- Magnétoscopie.
- Radiographie.
- Courants de Foucault.
- Ultrasons.

#### 5.1.4. Contrôle final :

C'est un contrôle visuel dimensionnel qui consiste en un contrôle interne et externe de chaque tube en contrôlant les renseignements mentionnés sur la carte tube. Le tube est alors réceptionné ou classé, un numéro séquentiel lui sera attribué. Le contrôleur final veille au marquage des tubes selon la procédure en cours.



Figure 2.8 : Marquage des tubes [26].

### 5.2. Contrôles Destructifs (CD):

Les contrôles destructifs des tubes viennent consolider la qualité du produit fabriqué. Son laboratoire d'essais mécaniques dispose d'équipements fiables étalonnés périodiquement. Ces essais destructifs se sont des essais mécaniques (essai de traction, de résilience, de dureté) et aussi des analyses chimiques, qui réalisés sur un anneau de tube (virole).

#### 5.2.1. Prélèvement des échantillons :

Les échantillons pour les essais destructifs sont prélevés d'un anneau du tube (virole) obturé des extrémités des tubes, l'échantillonnage des coulées est conforme aux critères suivants :

- De 1 à 10 tubes par coulée : 1 prélèvement AV et AR.
- De 11 à 20 tubes par coulé : 2 prélèvement AV et AR.

### 5.2.2. Essais réalisés :

Tous les essais sont effectués en conformité avec les normes API 5 L et avec les spécifications du client.

### 5.2.3. Analyses chimiques :

Le contrôle de la composition chimique se fait sur le métal de base. Les résultats d'analyse sont comparés avec celle du fournisseur et les exigences du client, ce qui permet de définir les premiers critères d'acceptation du produit en composition chimique et en carbone équivalent (spectromètre à étincelle).

### 5.2.4. Essai de traction :

L'essai de traction consiste à soumettre une éprouvette normalisée selon l'API à un effort de traction jusqu'à rupture en vue de déterminer une ou plusieurs caractéristiques mécaniques (la résistance ultime à la traction, la limite apparente d'élasticité à 0.2% et l'allongement).



Figure 2.9 : Machine de traction [27].

### 5.2.5. Essai de résilience :

L'essai de résilience a pour objet de déterminer la résistance des matériaux à la rupture sous l'effet d'un choc par l'intermédiaire de l'énergie de rupture.

La ténacité de l'acier est vérifiée par les résultats de la lecture de l'énergie déployée pour rompre les éprouvettes de résilience et du taux de ductilité du faciès de rupture. La température d'essai est exigée par le client.

Les essais de résilience ont été réalisés sur des éprouvettes d'une entaille en V (figure 24), ou bien en U (figure 25), normalisées dont la géométrie selon l'API

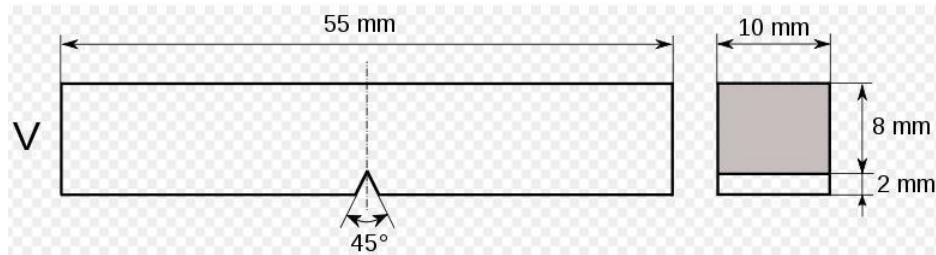


Figure 24 : Exemple d'une éprouvette d'une entaille en V

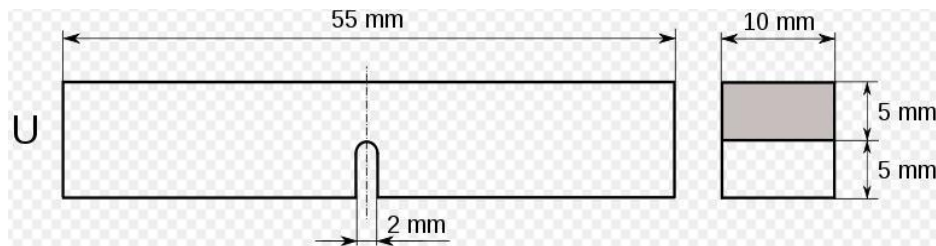


Figure 2.10: Exemple d'une éprouvette d'une entaille en U



Figure 2.11 : Machine de résilience [27].

### 5.2.6. Essai de dureté :

Le but de cet essai est de mettre en évidence la résistance du matériau à la pénétration, la machine de dureté mesure la pression moyenne de contact des matériaux, lors de l'enfoncement d'un indenteur (conique, pyramidal ou sphérique) sur une surface plans. Différentes méthodes sont utilisées en fonction de la nature des matériaux:

- **Dureté ROCKWELL :**

Dans cet essai, la valeur de dureté est obtenue en mesurant la profondeur de pénétration d'une pointe de diamant HRC ou d'une bille d'acier HRB sous les conditions de charge imposées. Pour l'échelle B : Le pénétrateur est une bille en acier de diamètre (1,5875 mm). Pour l'échelle C : Le pénétrateur est un cône en diamant à angle de 120 et d'extrémité sphérique ( $\varnothing$  0,2 mm).

- **Dureté VICKERS :**

La dureté Vickers est caractérisée par l'empreinte faite par un pénétrateur sous une charge donnée durant 15 secondes, le pénétrateur est formé d'une pyramide en diamant à base carrée dont les faces opposées font un angle de 136°.

- **Dureté BRINELL :**

La dureté Brinell est caractérisée par l'empreinte faite par un pénétrateur sous une charge donnée pendant 15 à 30 secondes selon le métal. L'essai Brinell utilise comme pénétrateur (poinçon) une bille en acier trempé ou en carbure de tungstène de 1, 2,5 ou 10 mm de diamètre.



Figure 2.12 : Machine de dureté ROCKWELL [27].

## 6. Scénarios de réparation de pipe:

Il y a trois scénarios principaux de réparation sont considérés : le tube sujet à la perte externe de métal (provoquée par la corrosion ou les endommagements mécaniques), à la perte interne de métal (provoquée par la corrosion, érosion ou érosion/corrosion) et aux éléments de tuyauterie qui fuit. En plus de ces scénarios principaux de réparation, l'ampleur de la détérioration ou des endommagements localisé ou étendu sera également considérée lors du choix des méthodes et des éléments de réparation. Ces scénarios sont décrits plus loin dans les sections suivantes [28] :

### 6.1.Pipe sujet à la perte interne de métal :

Les fluides transportés dans les systèmes des tubes, particulièrement en pétrole et gaz et des produits pétrochimiques, peuvent présenter des problèmes de corrosion interne, d'érosion, ou d'une combinaison de la corrosion et de l'érosion. Dépendant de la sévérité et l'ampleur des endommagements/détériorations internes que la canalisation peut couler ou être dans la menace de la fuite. Le scénario de réparation considéré ici, cependant, est quand la perte interne en métal n'a pas eu comme conséquence la fuite. À la différence de la corrosion externe, il peut ne pas être possible d'arrêter le mécanisme de perte en métal et davantage d'endommagements/détérioration temps- dépendants continueront. À moins qu'il soit possible d'arrêter le mécanisme de perte en métal, les éléments choisis de réparation devront adapter aux effets de la détérioration supplémentaire certaine. Dans ces cas le rétablissement de l'intégrité de pipe peut seulement être considéré provisoire, à moins que la conception des composants de réparation adresse spécifiquement les effets davantage de détérioration, au moins jusqu'à la vie restante du système de canalisations. À la différence de la corrosion externe, il est plus difficile mesurer la corrosion, érosion ou corrosion/érosion interne, en termes de perte absolue en métal et ampleur de cette perte. Les techniques d'inspection sont disponibles, comme les ultrasons et la radiographie, pour aider à cette quantification. Ce qui est important d'obtenir autant information possible sur les endommagements/détérioration pour permettre à la méthode correcte de réparation d'être choisi. Il est particulièrement important d'obtenir l'information concernant la capacité des endommagements subis d'adapter aux contraintes qui, dans les systèmes de pipe complexes, peuvent être significatifs. En outre, davantage de détérioration ou la perte interne existante en métal peut avoir comme conséquence la paroi de pipe ne pouvant pas supporter ces charges [28].

## 6.2. Pipe sujet à la fuite :

La fuite peut être provoquée par la perte interne ou externe en métal (ou, très rarement, une combinaison des deux). La fuite peut également être provoquée par la fissuration des coutures ou des joints soudés ou de la pipe de parent elle-même. Selon l'ampleur des endommagements découverts, la réparation peut exiger l'installation d'une bride de réparation (réparation localisée) ou du remplacement d'une section de pipe utilisant des connecteurs ou des accouplements. Dans tous les cas où le contenu de pipe est fuité, il sera nécessaire de considérer la convenance du composant de réparation adapter non seulement aux conditions de retenue de pression, mais s'adapter également corrosivement et à d'autres effets des fluides. Par exemple, les joints élastomères utilisés dans de certains brides/connecteurs de réparation peuvent être susceptibles de la détérioration en présence des hydrocarbures, de compositions volatiles ..... etc. Les issues de la dégradation/relaxation et à long terme possibles de joint en ont besoin d'abord de refouler/prise la nécessité de fuite d'être considéré. Dans certains cas il peut être possible d'installer une bride de réparation dans une pipe disjointe réelle - la bride qui enferme le secteur défectueux et disjoint est équipée de prise de passage qui peut être fermé une fois la bride a été correctement installé et serré [25].

## 7. Gamme des brides disponibles et connecteurs/accouplements de réparation :

Un des aspects fondamentaux de l'endommagement du pipe qui dicte le type de composant de réparation peut appliquer dont les conditions de la surface externe du pipe sont mieux. Si la surface externe est endommagée dans la mesure où un joint élastomère ne peut pas fournir les forces suffisantes de cachetage à proximité immédiate des endommagements, ou dans les secteurs relativement inchangés aux voisinage d'endommagement majeur (ces domaines étant utilisé pour effectuer le scellement par des colliers de réparation 'stand'-off repair clamps). Une certaine forme de matériau de remplissage est parfois nécessaire sur la surface externe du pipe pour qu'il soit rétablie. Les développements par l'utilisation des douilles en acier remplies par une résine époxyde ont montrés quelle peuvent s'adapter pour répondre a des demandes de gamme entière de défauts, y compris la corrosion, non propagation des fissures, les bosselures ou les goujures dans l'orientation axiale et circulaire et les anomalies associées au soudures de périmètre, Mais ces outils de réparation sont applicables à des dimensions des diamètres normalisées et dans des cas spécifiques (par exemple à une longueur limité de défaut [28].



### 7.1. Les brides de réparation :

La forme la plus simple du composant de réparation est une pièce rapportée métallique qui peut être appliquée pour couvrir un petit défaut. La réparation comporte la soudure par le filet soudant dans le pipe d'une pièce rapportée convenablement incurvée. La paroi du pipe dans les régions de soudure, qui sont à loin du secteur du défaut, doit être sans défaut et d'épaisseur suffisante. Ce type de réparation est très rarement appliqué au haut niveau d'intégration et n'offre aucun avantage principal par rapport à une bride de pièce rapportée; un simple bride boulonnée qui tient une pièce rapportée de matériau élastomère au voisinage du secteur du défaut.

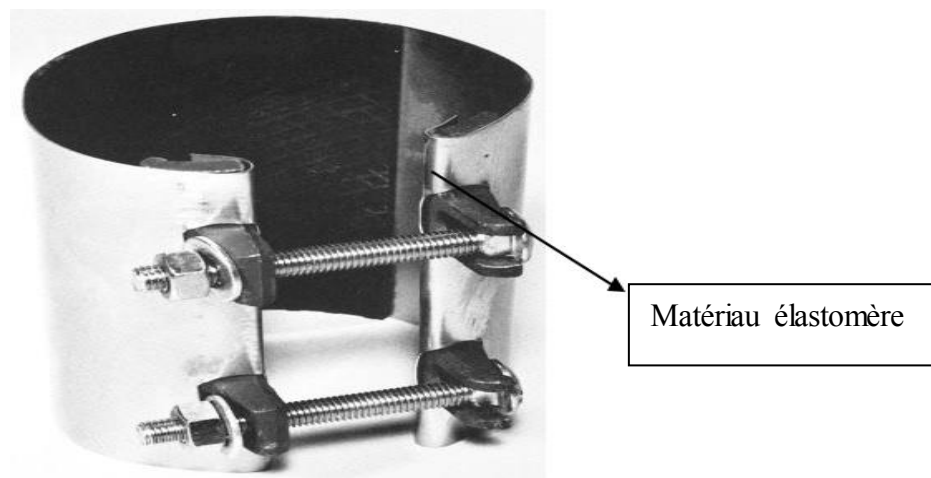


Figure 2.13 : Bride de pièce rapportée.

Dans le cas d'une petite fuite de la taille d'une épingle sur une section de pipe, une bride de pièce rapportée simple peut être utilisée ou une bride spéciale de réparation de fuite de trou d'épingle. Pour la réparation de cette fuite en utilise une bride a goupille de repère qui guide un joint aigu de cône dans le trou. La pression est alors appliquée au joint du cône par une vis de pression et une fois que le joint est comprimé, la goupille peut être enlevée de ce fait accomplissant le joint. Ce type de réparation est capable de résister à des pressions d'utilisation supérieur à 138 barre (2000 psi).

Un exemple d'une bride de réparation de fuite de trou d'épingle est montré ci-dessous [28].

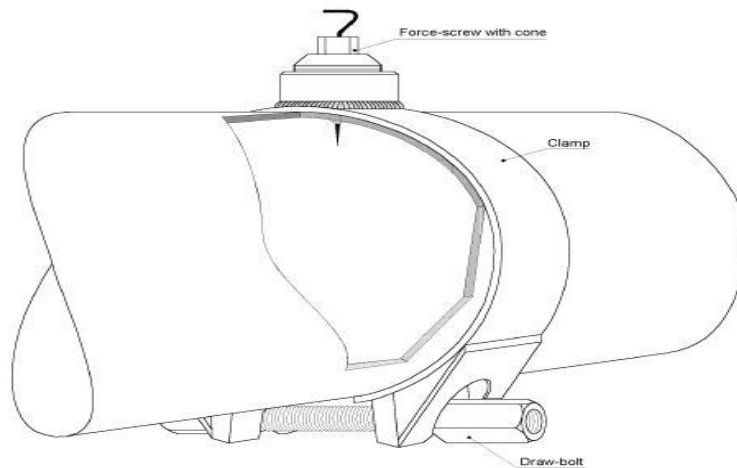


Figure 2.14 : Bride de réparation de fuite de la taille d'un trou d'épingle [29].

Une section défectueuse de pipe peut être simplement renforcée en employant les douilles d'encerclement simples. Les douilles sont sous forme de deux moitiés et sont clôturent l'ajustement au diamètre extérieur du pipe. Les deux moitiés sont soudées ensemble longitudinalement (des bandes de soutien sont utilisées pour les soudures longitudinales pour empêcher des endommagements induits par soudure, ou des changements de propriétés mécaniques, sur la surface de pipe). Pour des applications contenant des pressions, la douille doit être complètement lié par un joint soudée avec le pipe. Un exemple d'une douille d'encerclement est montré ci-dessous (Figure 30).

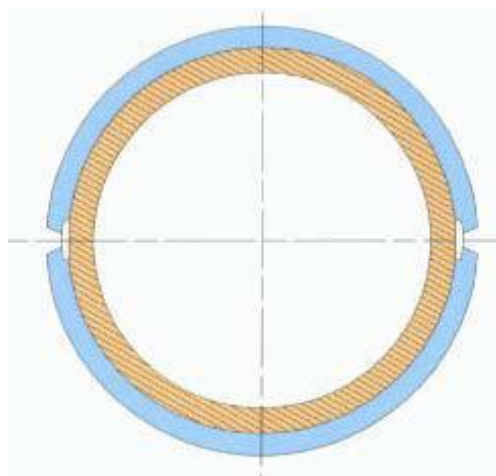


Figure 2.15 : Douille de réparation type encerclement.

La forme la plus commune des composants de réparation de pipe est les brides de réparation d'impasse ('stand-off' repair clamp) ; ces brides sont habituellement formées par deux

demis coquilles cylindrique (Figure 31). Cependant, les brides de basse pression peuvent être fournies sous forme d'ensemble d'une seule pièce flexible qui peut être posé dans le défaut du pipe. Les brides de réparation d'impasse désigner parfois sous le nom de clôtures de vertu du fait qu'elles ferment totalement le secteur défectueux dans un scellement de retenue de pression. Le cachetage de la clôture est typiquement par des joints élastomères aux joints longitudinaux des deux demis coquilles et les joints aux extrémités du cylindre.

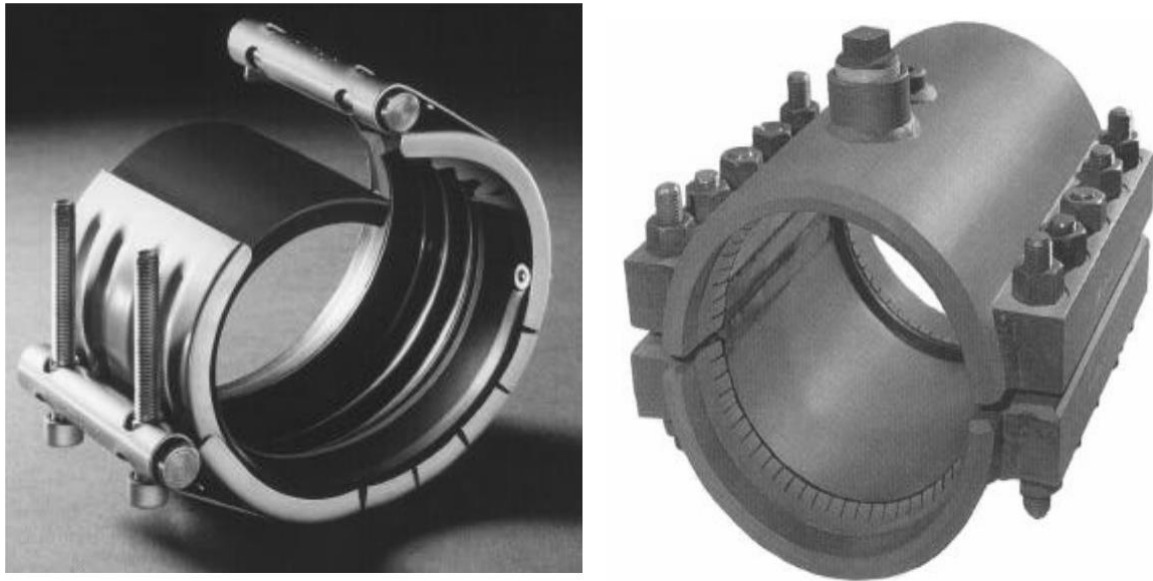


Figure 2.16 : Deux types de brides de réparation type 'stand-off'

## 7.2.Réparation des accouplements et des connecteurs :

Dans les situations où il y a eu des détériorations et endommagements importants d'une section de canalisation il peut ne pas être possible d'effectuer des réparations par l'utilisation des brides ou des douilles simples. Les brides tendent à être disponibles dans des tailles standard (diamètre et longueur) et le délai d'exécution et les coûts liés à la production des brides extra longues est habituellement prohibitif. Cependant, il y a des situations où ces coûts sont justifiés afin d'éviter la fermeture de l'usine (ou de l'approvisionnement), ceci naturellement par la quantification des endommagements existants et que les risques liés à la continuation de la production sont acceptables [30].

Habituellement, la solution de réparation la plus économique impliquera le remplacement de la section endommagée de la canalisation. Ceci peut être envisagé dans le cas où les flasques raccords existants et sont disponibles pour faciliter le remplacement d'une section de canalisation endommagée. Alternativement la réparation peut être simplement une

soudure sur place au lieu d'une rechange d'une section du pipe. La solution la plus économique de réparation pour des situations où des endommagements importants ont été trouvés est d'utiliser des accouplements ou des connecteurs en même temps qu'une section de rechange de pipe. Une solution typique comprenant l'utilisation des connecteurs est illustrée ci-dessous (Figure 31) [30].

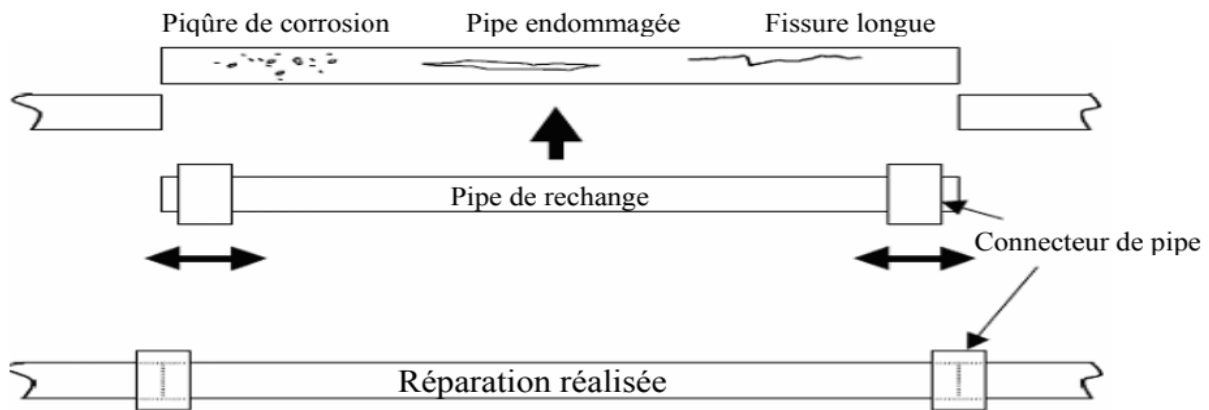


Figure 2.17: Utilisation des connecteurs de pipe de réparation.

Les connecteurs plus sophistiqués sont capables de satisfaire des estimations de pression jusqu'à la classe 2500 lb - 690 bar (10 000 psi) et des diamètres de pipe allant jusqu'à 48 pouces. Sur certains des connecteurs de réparation, des ports de raccordement de pression externe permettent à l'intégrité des joints radiaux d'être vérifiée.

Une méthode de réparation originairement développée pour des applications transnationales de canalisation, il y a déjà plus d'une décennie, mais maintenant considérée également applicable aux systèmes de pipe au sol (Figure 32) est capable de résister à des efforts circulaires et axiaux élevés sans joint de soudure c'est-à-dire que la réparation est effectuée directement par le bridage d'une douille sur le pipe ou par l'utilisation d'un connecteur de pipe avec des outils de préhension [30].

La méthode de réparation utilisant des douilles en fente dans la conjonction avec une résine époxyde c'est également avéré capable de tolérer la perte interne continue en métal ; incluent la croissance de perte en métal à travers le mur du pipe.

Cette méthode de réparation n'est pas une méthode rapide de réparation puisque les deux demi-coquilles exigent la soudure longitudinalement et l'époxyde une fois qu'elle est mélangée et injectée dans l'espace annulaire, elle a besoin d'approximativement 24 heures pour

polymériser et donc peut supporter jusqu'à 90% de sa charge ultime. La technique époxy-remplie de douille de réparation est illustrée à la figure 32 [30] .

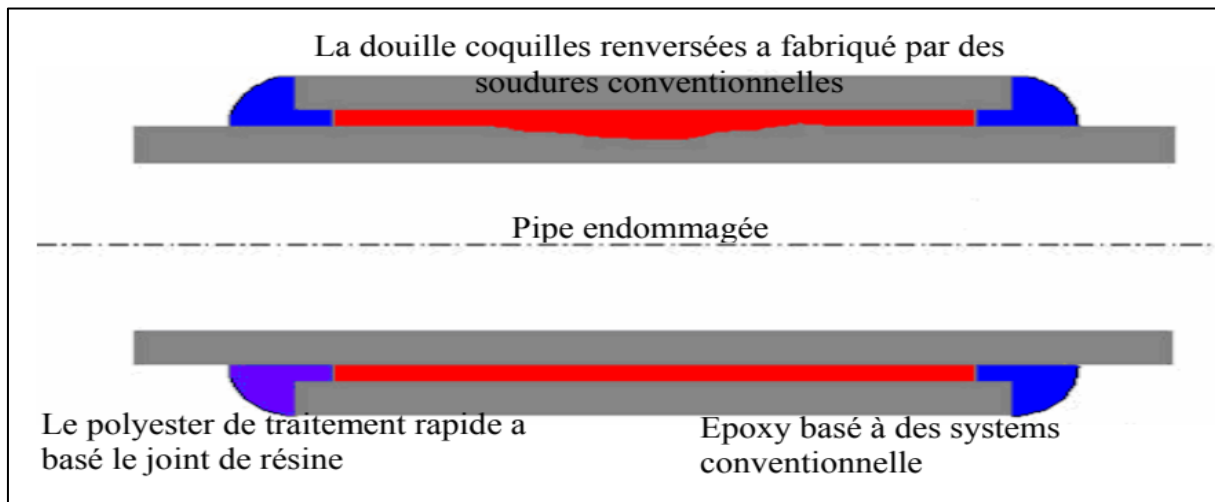


Figure 2.18 : Douille de réparation remplie par époxyde [31] .

### 7.3.L'utilisation des matières composites pour la réparation des canalisations :

L'utilisation des matières composites pour la réparation de la canalisation d'acier sur les systèmes qui ont été à l'origine conçus selon ASME/ANSI B31.3 pour les tuyauteries d'usine chimique et de raffinerie de pétrole. Considérant que ces codes et normes fournissent des règles pour la conception, la fabrication, l'inspection et l'essai de nouveaux systèmes des pipes, ils n'adressent pas le fait que ces systèmes peuvent dégrader en service et exiger la réparation. Cet examen de l'utilisation des matières composites pour la réparation de la canalisation couvre les circonstances suivantes :

la corrosion externe où il n'y a aucune fuite et intégrité structurale doit être reconstituée. Dans ce cas-ci il est probable qu'avec la préparation extérieure appropriée l'application d'une surenveloppe de matériaux composite arrêtera davantage la détérioration.

Endommagements externes tels que des bosselures, gouges, se rongant où l'intégrité structurale doit être reconstituée.

Perte interne en métal par la corrosion ou l'érosion (ou une combinaison de la corrosion et de l'érosion), et il y a un besoin de reconstituer l'intégrité structurale. Dans ce cas-ci il est probable que la perte interne en métal continuera et l'évaluation des endommagements et de l'option de la réparation par composite doit tenir compte de ceci.

Toutes les méthodes de réparation considérées doivent être capables du fonctionnement jusqu'à 60°C pour les périodes au-dessus d'opération. Cependant, comme tous les systèmes de résine considérés sont traités à la température ambiante, l'utilisation au-dessus de cette température devrait être traitée avec soin [28] .

Les réparations par matériaux composites (renforcement par tissu) peuvent être une bonne alternative à l'installation de soudure, des douilles de plein-encerclement pour la réparation des canalisations de transmission de gaz. Ces réparations se composent typiquement d'un renfort sous forme de fibres noyées dans une matrice polymère (résine) métallisé dans le pipe par un adhésif. Le remplisseur adhésif est appliqué au défaut avant l'installation pour permettre le transfert de charge à la matière composite. L'avantage primaire de ces produits de réparation au-dessus de souder, des douilles de plein-encerclement est le fait que la soudure est exclue. Une illustration du dispositif de l'utilisation du matériaux composites de tissu-renforcé, Clock Spring, est montrée sur la figure 33 [28].



Figure 2.19 : Dispositif de Clock Spring pour la réparation de canalisation [32].

- **Clock Spring est un système en trois parties :**
- structure de composite unidirectionnelle.
- système adhésif en deux parties à rendement élevé.
- composant de propriété industrielle de transfert de charge [32] [33].

Trois caractéristiques doivent être considérées en concevant le renforcement par fibres: type de fibre (verre, carbone, ou aramide) ; forme de fibre (typiquement boudinage,

remorquage, natte, ou tissu tissé) et orientation ou architecture de fibre. Le renfort peut être orienté dans n'importe quelle direction désirée par le concepteur. Le problème est de déterminer la praticabilité d'employer des matériaux composites comme alternative de réparation pour les canalisations à haute pression. Des critères de conception pour le système de réparation ont été élaborés tôt dans le programme [32] [33]. La réparation doit :

- non intrusive.
- applicable aux canalisations en service.
- permanent.
- rentable.
- entièrement prévisible et vérifiable par la modélisation et les équations définitives.
- éliminer toutes les variables d'installation.
- efficace dans tous les endroits et environnements.
- efficace pour toutes les catégories et tailles de pipe.
- répondre ou dépasser aux exigences courantes de code.
- éliminer la technique et la conception de terrain.
- reconstituer conservativement le pipe à sa force originale [32] [33].

La corrosion externe peut également être réparée par cette méthode en appliquant l'adhésif au défaut et en enveloppant une matière composite de renforcement- tissu autour du diamètre extérieur de la canalisation [33]..

#### **7.4.Types de réparation par matériaux composites :**

Les types de réparation par composite tombent dans 2 types génériques : bandage et machiné. Le type de réparations de bandage implique l'application du matériau, souvent sous la forme préemballée, qui peut être tenue comme article courant de réparation et peut être appliquée par le personnel d'entretien sur le service. Le type de réparations machiné sont spécifiés et conçu et la réparation effectué par des entrepreneurs spécialisé.

Toutes les réparations impliquent l'application d'une surenveloppe aux secteurs endommagés ou défectueux afin de renforcer la résistance/intégrité de la paroi du pipe. Ceci peut comporter la production sur place d'un stratifié - une combinaison d'un réseau de renfort fibreux et d'une matrice polymère therm durcissable qui est sujette plus tard à un processus de traitement chimique - ou l'utilisation d'une douille composite préformée qui est enroulée autour du pipe et collée par un adhésive au pipe et sur les enveloppes ultérieur. Dans la

situation où la perte externe en métal est réparée, les applications de réparation qui utilisent une douille composite préformée doivent également impliquer l'application d'une certaine forme de remplisseur de transfert de charge au secteur endommagé avant l'application de la douille composite [30].

## **8. Conseils d'inspection ; réparation; conception :**

Une attention particulière doit être accordée à la dégradation possible d'un matériau composite de réparation par la lumière UV. Il y a deux approches principales utilisées pour la conception d'une enveloppe composite, la différence principale étant si on permet au pipe originale de dépasser sa conception originale permise. Alors que pour les renforts en verre qui sont de tissu ou de type de matre aléatoire il est peu probable que la réparation sera conçu tels que l'acier dépasse le rendement. Dans ce cas c'est la part de charge entre le composite et l'acier qui est l'issue de conception principale [34].

Pour les matériaux composites à fibre continus de verre ou de carbone, le plein avantage de la réparation ne peut être réalisé à moins qu'on permette au système de fonctionner aux contraintes relativement élevées. Ici on suppose que la contribution de l'acier a supporté la charge dans la section réparée peut être négligé afin d'évaluer la contribution du pipe en acier endommagée à l'intégrité de réparation.

Les procédures de conception pour le stratifié de réparation suivent ceux qui sont bien établis dans la fabrication des composites où le principe est de limiter les déformations des matériaux au-dessous du point où les endommagements sont engendré. Tandis que c'est bien au-dessous des charges ultimes qu'il est considéré nécessaire pour le travail à long terme (fatigue). L'approche de conception utilisée dans l'évaluation de la réparation doit tenir compte de toutes les charges appliquées et de la capacité de l'enveloppe composite de supporter ces derniers d'une manière satisfaisante. Dans certains systèmes de réparation le renfort est préférentiellement orienté circonférentiellement et dans cas il y a une limitation de supporter la charge dans la direction axiale. Pour les systèmes de pipe complexes où les efforts axiaux peuvent être significatifs et où il y a suffisamment de métal de base pour supporter ces charges, les options alternatives de réparation qui ont le cercle semblable et les contraintes axiales devront être considérées [28].



## **9. Aspects importants des réparations :**

### **9.1.Préparation de surface :**

La préparation extérieure du pipe à réparer est l'aspect le plus important simple dans l'accomplissement d'une réparation réussie. Pour les réparations des pipes en acier au carbone il est normalement possible à réaliser un raccordement collé durable avec l'abrasion mécanique comme l'unique activité préparation extérieure. Il est important, donc, que la nature de la technique d'abrasion soit entièrement spécifiée (selon la norme suédoise SA3). Il est également important d'aborder les risques de santé et de sécurité liés au processus de nettoyage de souffle (blast cleaned) lui-même [30].

### **9.2.Traitement de stratifié de réparation :**

Le traitement d'un stratifié de réparation est fortement influencé par la température et le mélange correct des constituants de résine avant la stratification. Il est important, donc, que les conditions de température dominante soient considérées. Avec l'application de la température limite et d'un certain niveau de catalyseur de résine, comme recommandé par les fournisseurs, ne doit pas être effectué sans recours aux fournisseurs pour plus d'informations [30].

### **9.3.Préparation des documents et des données nécessaires :**

Pendant l'ordre d'un fournisseur de matière composite pour spécifier correctement une option proposée de réparation, l'opérateur devrait fournir les informations suivantes :

- pression d'emploi, y compris les conditions de dérèglement;
- obligation de la température, y compris les états de renversement ;
- processus, y compris des constituants de trace ;
- charges induites par pression agissant sur le pipe;
- temps requis de la vie de la réparation.

### **9.4.Inspection finale des réparations par composite :**

L'enveloppe GRP (Glass Reinforced Plastic) est favorable à l'inspection visuelle et l'entrée d'un fluide dans l'enveloppe ou à l'interface entre elle et l'acier peut être vue, en particulier si des remplisseurs ou des colorants inutiles sont exclus du matériau de réparation. Des

méthodes ultrasoniques seraient efficaces pour localiser des décollements entre la réparation et le pipe. Des ultrasons dans la gamme 0,5 MHz à 1 MHz sont habituellement employés.

L'examen du pipe originale sous la réparation n'est pas franc car l'atténuation à la réparation à interface du pipe rendra difficile l'utilisation des ultrasons conventionnels. De nouvelles techniques pourraient être employées telles que le CHIME (Creeping Head Wave Inspection Method) (méthode principale d'inspection de vague de rampement) où le plein volume du pipe peut être examiné à l'aide des sondes placées en dehors de la réparation. D'autres méthodes telles que la thermographie passagère ou les courants de Foucault de basse fréquence ont pu être utiles, mais pas sans élément du développement dans le domaine. Alternativement, pour des applications critiques, des capteurs ultrasoniques montés sur un circuit imprimé flexible ont pu être placés sur la pipe avant l'application de la réparation [28].

## **10.Conclusion :**

On peut conclure que l'inspection des tuyauterie et les pipes industriels nécessitent plusieurs techniques et moyens pour éviter les dégradations et les arrêts des sociétés énergétiques du fait de la difficulté de réparer les pannes, qui sont souvent très coûteuses et prend beaucoup de temps de maintenance.

L'une des techniques la plus importante utilisée dans les sociétés énergétiques algériennes et internationales sont les contrôles non destructifs ; Plusieurs normes et réglementations impose ce type de contrôle pour des raisons de sécurité surtout pour les appareils sous pression (réservoirs et pipelines). Une application pratique dans l'industrie sera exposée dans le chapitre suivant.

## **Chapitre 3 :**

### **Application expérimentale du procédé CND au niveau de l'entreprise fertial**

## 1. Étude expérimentale :

On a fait une application expérimentale dans l'entreprise fertial Annaba pour le contrôle des pipes et leurs accessoires et d'autres équipements par les méthodes cnd .

### 1.1. Département technique fertial Annaba :

Le département technique c'est la première structure de la pyramide de maintenance au niveau d'entreprise fertial Annaba ; son rôle est :

- la réalisation des études techniques des équipements et les pipelines de transport d'ammoniac avec leurs accessoires.
- maîtriser les risques de dégradation des enveloppes.
- Choix des méthodes d'inspection.
- Gestion des inspections et des réparations.

L'application des méthodes des contrôles non destructifs réalisés par l'équipe Vincotte (équipe spécialisée dans le contrôle non destructif).



Figure 3.1 : vue d'ambiance de lieu d'inspection. Fertial Annaba

## 2. Application du Control Non Destructif (première application):

Dans le but d'évaluer l'intégrité des équipements de l'unité ammoniac, afin de pouvoir la ré-éprouver et renouveler sa remise en service par l'autorité compétente, l'exploitant

(FERTIAL Annaba) a mandaté Vinçotte , pour mettre en œuvre un ensemble d'inspections et de contrôles.

## 2.1. Objet de l'inspection :

**Pipeline : numéro : BF-35H-350 type ballon.**

## 2.2. Base d'inspection :

- Décret exécutif n° 90-245/246 du 18 août 1990, portant sur la réglementation des appareils à pression.
- API 510 Pressure Vessel Inspection Code: In-Service Inspection, Rating, Repair, and Alteration.
- Plan d'inspection.
- Dossier de l'équipement.
- ASME Section V pour les procédures de contrôles non destructifs.
- ASME Section VIII pour détail de construction (conception, test, critères d'acceptation, ...)
- API 579 ASME FFS: Fitness For Service.

## 2.3. Environnement de l'équipement :

L'équipement est un pipe type ballon vertical, constitué de plusieurs viroles cylindriques avec soudure longitudinale et circulaire, deux fonds bombés et des piquages.

Voir détail sur plan ci-dessous.

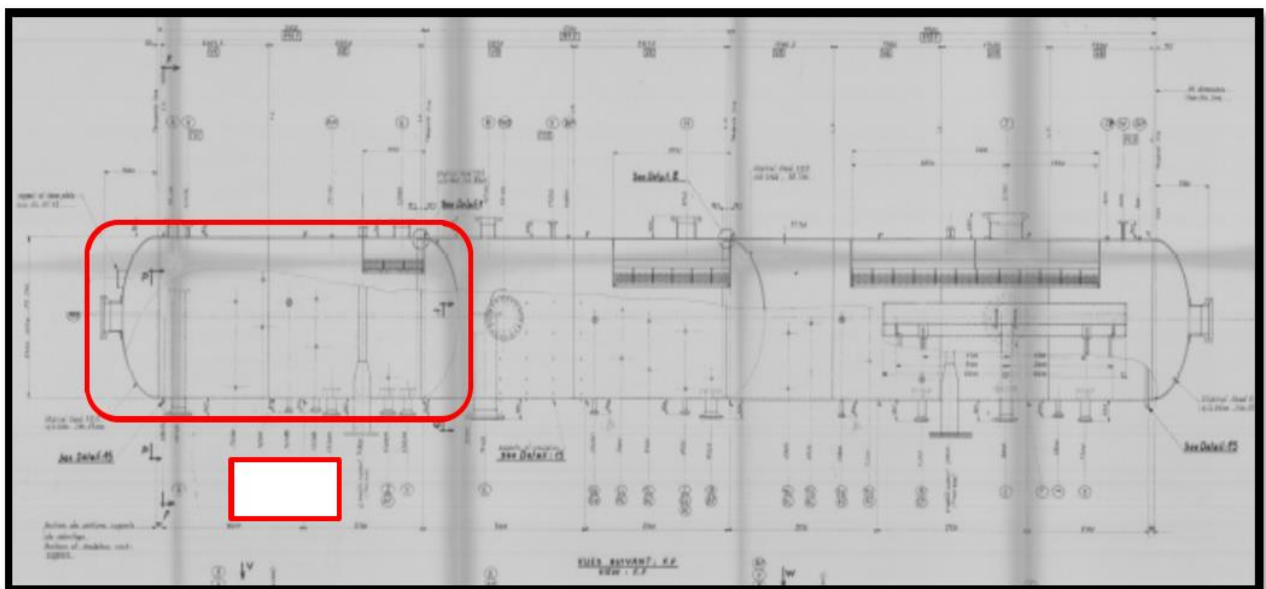


Figure 3.2 : schéma d'Objet de l'inspection

### 3. Inspection de l'équipement :

#### 3.1. Détails :

- Contrôle visuel.
- Contrôles CND.
- Evaluation d'intégrité structurelle.
- Périodicité des inspections.
- Conclusion.

#### 3.2. Contrôle visuel :

##### Joint de soudure :

- Tous les joints soudés accessibles ont fait l'objet d'un contrôle visuel.
- Présence de petites crevasses de corrosion.



Figure 3.4 : petites crevasses de corrosion au niveau des joints de soudures.

#### 3.3. Etat externe général de l'équipement :

L'examen visuel externe a été réalisé directement à l'œil nu.

La paroi externe présente une corrosion sous forme de cratères concentrés sur presque la totalité de l'équipement, les zones les plus touchées (profondeur supérieure à 6 mm) sont évaluées selon le code ASME 579-FFS,

#### 3.4. Localisation et dimensionnement des anomalies (dégradations) :

**Anomalie I** : 80% de la paroi et fond côte externe sont rouillée (profondeur supérieure à 6 mm).



**Anomalie II** : perte d'épaisseur au niveau des piquage D, Y & Z (voir annexe 5.4.5). plus dégradation importante des cerceaux de fixation de calorifuge.



Figure 3.5 : vue d'ensemble pipe BF-35H-350 type ballon

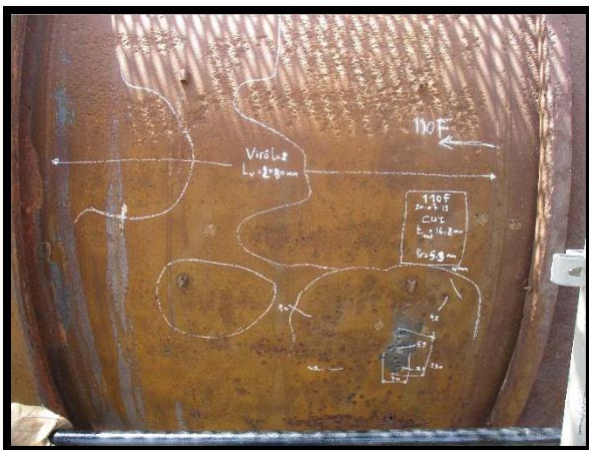


Figure 3.6 : Paroi externe côté Nord



Figure 3.7 : fond bombé coté est

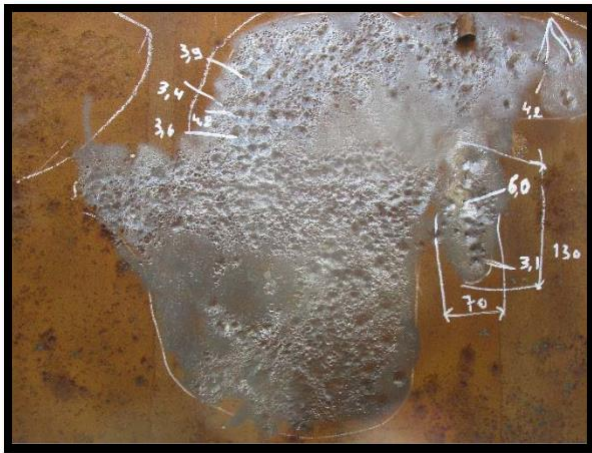
Figure 3.8 : zone corrodée,  $Pr > 6$  mm.

Figure 3.9 : Cerceau de fixation de calorifuge dégradé.



Figure 3.10 : Piquages Y &amp; Z

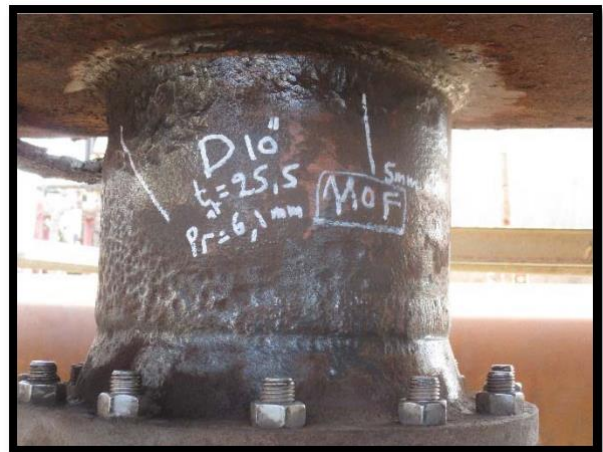


Figure 3.11 : piquage D

### 3.5. Moyend'accès :

- Échelle ; passerelle ; plateforme ; support plateforme dégradés ils doivent être changés.

### 3.6. Support de l'équipement :

- L'équipement repose sur deux berceaux en acier montés sur une plateforme en béton.
- La fondation en béton présente des fissurations à plusieurs endroits.
- L'aspect général des berceaux est acceptable cependant les tiges d'ancrages sont sévèrement corrodées, il est recommandé de prévoir une action corrective.

### 3.7. Accessoires et auxiliaires :

- Manomètre, indicateur de niveau .... Les accessoires de mesure et de contrôle, sont à vérifier.





Figure 3.12 : support de pipe type ballon



Figure 3.13 : Tiges d'ancrages



Figure 3.14 : Indicateur de niveau



Figure 3.: Soupape après le tarage

**Note :** L'équipement est protégé par une soupape de sécurité, TAG : RV 110F.

#### 4. Etat interne général de l'équipement :

**L'examen interne a été réalisé :** après accès direct à travers un trou d'homme.

La visite interne n'a révélé aucune anomalie affectant l'intégrité de l'équipement. Soudure de piquage intérieur non-conforme, à recharger.

Les parties amovibles sont en bon état (demister, distributeur...), prévoir le remplacement ou le nettoyage des filtres (demister) avant la remise en service.



Figure 3.16 : Soudure non conforme



figure 3.17 : Demister



Figure 3.18 : Localisation de la zone corrodée, pour le contrôle UT.

## 5. Résultats des contrôles CND effectués :

Tableau 3.1 : résultats d'examen visuel de pipe BF-35H-350 type ballon.

Technique de contrôle	Etendue	Localisation	Résultat	Remarque	Référence rapport
Examen visuel externe	100%	Surface externe. L'inspection sera limitée aux parties visibles et accessibles.	Non satisfaisant	Présence des piqures sur la totalité de la paroi externe	Présent rapport
Examen visuel interne	100%	Surface interne. L'inspection sera limitée aux parties visibles et accessibles.	Satisfaisant	Soudure piquage non conforme	Présent rapport

## 6. Contrôle par magnétoscopie :( externe)

### 6.1. Caractéristiques :

Tableau 3.2 : Eléments contrôlés.

REF	Eléments contrôlés	numéros	Méthode de contrôle
	Description		magnétoscopie
1	Soudures de support coté est : A	1	MT
2	soudures des piquages : MH1	1	MT
3	soudures des piquages : D1	1	MT
4	soudures des piquages : G1	1	MT
Proc de contrôle : ASM V article 7		Critères d'acceptation : ASM V3 DV1	

Tableau 3.3 : Dimension de l'élément.

REF	Dimension de l'élément mm		Matériaux	Soudure	Surface	Tech
	E	Ø	TYPE	préparation	état	2
1	23.01	219.1	AG333 G1	angle	/	mt
2	25.4	273	AG333 G1	angle	propre	mt
3	18.6	168.3	AG333 G1	angle	/	mt
4	25.4	273	AG333 G1	angle	propre	mt

### 6.2. Appareils utilisées :

Tableau 3.4 : caractéristiques d'appareil magnétoscopie.

1*	appareil		Méthode de magnétisation		PMUC – (FLUXO 3) & (FLUXO 4) strem			
	type	Numéro	Accessoires	Direction	Produits	Nombre de tours	Amp	AC/DC
A	PF-CH	15-0	ELE -220V	2X PERPENDICULAIRE	Noir et blanc	NA	3	AC



**Note :** vérification du matériel suivant Doc.mod : VI 5530.



Figure 3.19: Appareils utilisée PF-CH (magnétoscopie)[36].

**Etape 1 :** application de révélateur blanc pour absorber les anomalies de tous les piquages.



Figure 3.20 : application de révélateur blanc sur les joints de soudures les  
Piquages : MH1, D1, G1



Figure 3.21 : application de révélateur sur les Soudures de support coté est.

**Etape 2 :** utilisation de l'appareil PF-CH pour appliquer le champ magnétique et détecter les anomalies.

### 6.3. Resultats :

Le contrôle MT n'a révélé aucune fissuration ou autre indication qui nécessite la réparation.

**Observation :** sur les soudures de support coté est sont pas accessibles pour pouvoir effectuer le contrôle MT.

## 7. Evaluation de l'intégrité structurelle :

Les résultats de contrôle visuel ont mis en évidence une perte d'épaisseur supérieure à 6 mm sur la paroi externe de l'équipement au niveau de la virole numéro 2. La perte enregistrée a dépassé la tolérance de la surépaisseur de corrosion CA qui est de 3mm, de ce fait les conditions de conception d'origine ne sont pas garanties. Donc, une évaluation d'intégrité est nécessaire (voir annexe ; évaluation de l'intégrité structurelle).

### 7.1. Levée de réserves (Réparation) :

Après l'évaluation de la dégradation ; une réparation (rechargement par soudage) a été réalisée selon une procédure de réparation approuvée par Vinçotte. Suivi d'un contrôle non destructif CND avec résultats concluants (annexe MT).



Figure 3.22 : Zone dégradée pendant & après réparation

### 7.2. Application de champ magnétique sur la paroi externe de pipe après la réparation :

L'inspection visuelle externe de la pipe BF-35H-350 type ballon a révélé une sévère corrosion sur la totalité de la paroi externe, les zones les plus touchées sont évaluées, réparées

et contrôlées. Pour vérifier l'état d'intégrité de la paroi externe après la réparation de pipe il faut appliquer la méthode MT.



Figure 3.23 : application perpendiculairement de champ magnétique sur la zone la plus touchée de corrosion (pipe BF-35H-350 type ballon).

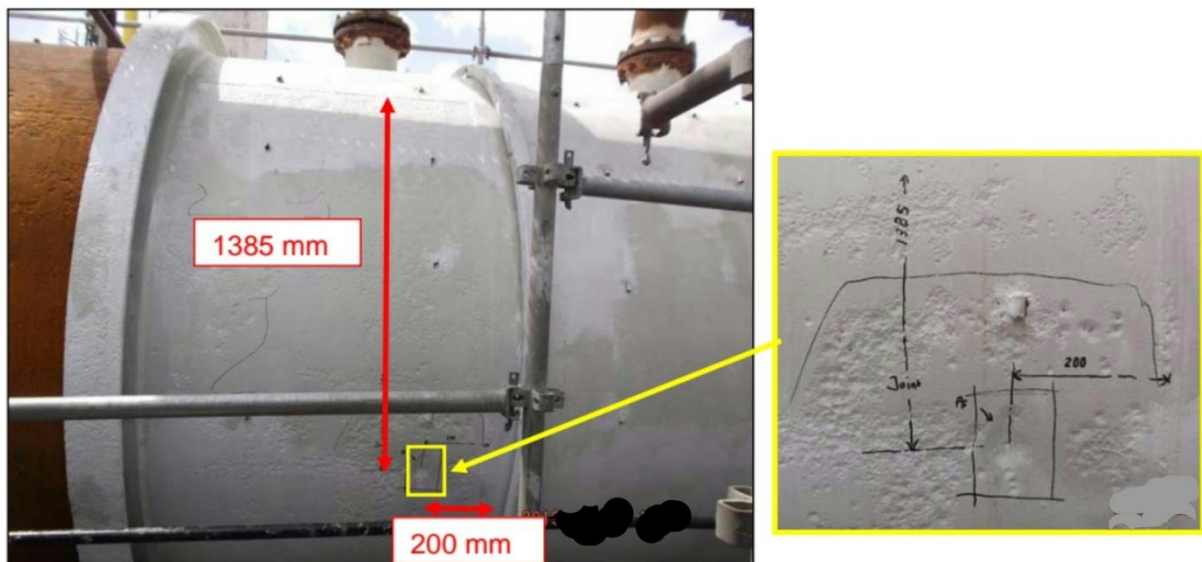


Figure 3.24 : Localisation de la partie rechargée sur la virole après la réparation finale.

## 8. Résultats :

Le contrôle MT de rechargement n'a révélé aucune fissuration ou autre indication qui nécessite la continuité de la réparation.

## 9. Deuxième application :

### 9.1. Contrôle par ressuage (PT) :

Objet de l'inspection :

Pipeline : numéro : F-60H-340





Figure 3.25 : Pipeline : numéro F-60H-340 fertil annaba.

#### 9.1.1. Le matériel et les étapes d'essai :

Dans notre exemple nous utilisons :

- les produits d'application ;
- une loupe ;
- chiffon.



Figure 3.26 : les produits d'application.

On applique une inspection par pénétrant liquide schématisé ci-après :

Premièrement nous avons appliqué le nettoyant pour nettoyer la surface à contrôler de toutes traces de matériaux étrangers solides ou liquides qui risqueraient de gêner l'entrée du pénétrant dans les discontinuités.

Ensuite nous appliquons le pénétrant sur toute la surface à examiner, laisser un Temps de pénétration de (15 a 20) min.

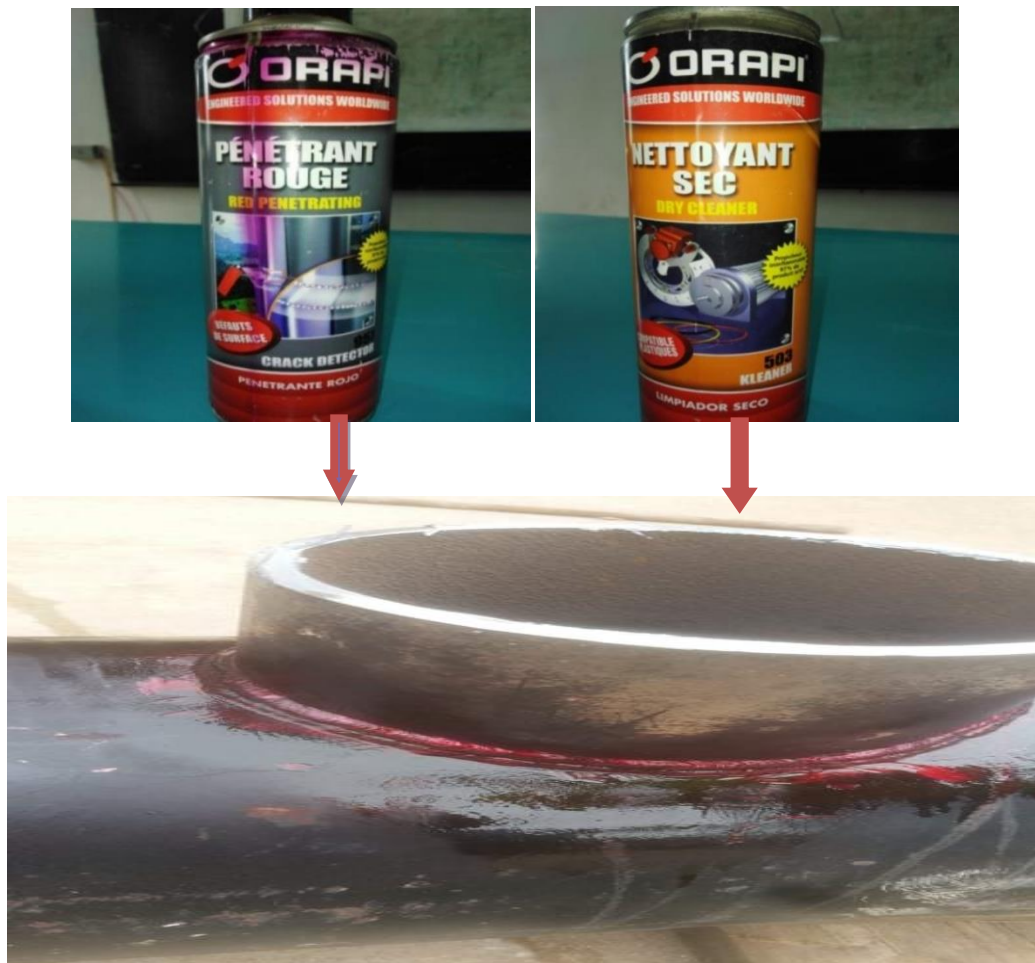


Figure 3.27 : étape 1 et 2 nettoyage et application de pénétrant.

on élimine le pénétrant étalé à la surface de la pièce (c'est une phase très délicate: il ne faut pas enlever le pénétrant situé dans les défauts).

Après le nettoyage et le séchage de la surface, on applique régulièrement le révélateur sur toute la surface à examiner.





Figure 3.28: étape 3 application de révélateur.

Enfin nous nettoyons la pièce pour éliminer toutes traces de produits de ressuage.

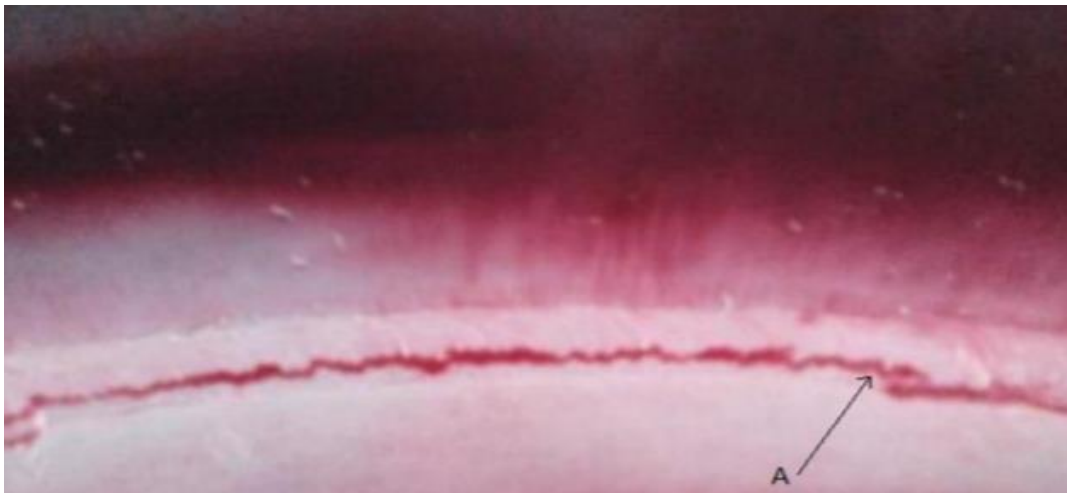


Figure 3.30 : les micros fissures détectées sur le cordon de la soudure.

Après l'agrandissement de l'image de notre essai par une loupe on constate qu'il existe des micros fissures sur le cordon de la soudure. Donc on peut conclure qu'il faut re-souder le pipe.

9.1.2. **Type de réparation** : réparation par soudage, élimination et renouvellement des joints.

## 10. Troisième application :

### 10.1. Contrôle d'un pipe par l'ultrason :

### 10.2. Objet de l'inspection :

un pipeline métallique en acier au carbone X60, de diamètre : 24 pouces, et d'épaisseur : 29mm, en coupant un tançant de longueur : 398 mm, et de largeur 288mm.

nuance : API5L X60

### 10.3. Propriétés mécaniques :

- limite élastique minimum : 413Mpa
- résistance a la traction minimum : 517Mpa
- élongation minimum : 19%

### 10.4. Composition chimique % (1).

- carbone : 0.26
- manganèse : 1.20
- phosphore : 0.030
- soufre : 0.030

On applique l'utrason sur le joint de soudure pour vitrifier s'il y a un défaut,



Figure 3.31 : un pipeline métallique en acier au carbone X60 (fertial annaba).

### 10.5. Le matériel utilisé :

1. Appareil à ultrasons EPOCH LT ;
2. palpeur Droit et Angle 45°et70° technique Par réflexion (E/R) ;
3. Blocs d'étalonnages : ISO 2400 cales V1 ;
4. Milieu de couplage : Graisses ;



Figure 3.32 : le matériel utilisé

### 10.5.1.Caractéristiques de l'appareil de l'ultrason EPOCH LT :

- Bande Passante  
analogique : 0,3 à 20  
MHz a -3dB
- Capacité mémoire :100 echos
- Fréquence de  
récence : réglable  
entre 60 et 360 Hz
- Calibration automatique ;
- Impulsion d'émission Type Dirac ;
- Batterie rechargeable ;
- Grand Ecran ;



Figure 3.33 : l'appareil de l'ultrason EPOCH LT [37].

Avant chaque examen de contrôle, on doit respecter quelques informations requises avant l'examen parmi eux on peut citer :

- Méthode d'évaluation des indications : Méthodes par réflexion ou par écho ;
- Contrôle de matière de bas : Etat de surface, dimensions et nettoyage et limite la plage de balayage ;
- L'étalonnage de l'appareillage : EPOCH LT ET palpeur ;
- Choix du type de palpeur : palpeur droit et Angle 45°et 70° technique par réflexion (E/R) ;
- Choix de milieux de couplage, Graisses.

Premièrement nous avons fait l'étalonnage de l'appareillage (EPOCH LT et palpeur),



Figure 3.34 : étalonnage[37].

Deuxièmement on prend la pièce à examiner et on limite la plage de balayage, ensuite on dépose le couplant entre la pièce et le palpeur en suite a fait le mouvement de palpeur sur tout la longueur de la plage de balayage en deux mouvements avant /arrière et zig zag.



Figure 3.35 : Balayage.

A travers l'écho visualisée sur l'écran on constate seulement deux échos un écho de surface et un seconde écho relatif au fond ce qui implique l'absence de défaut dans le cardan de soudure.

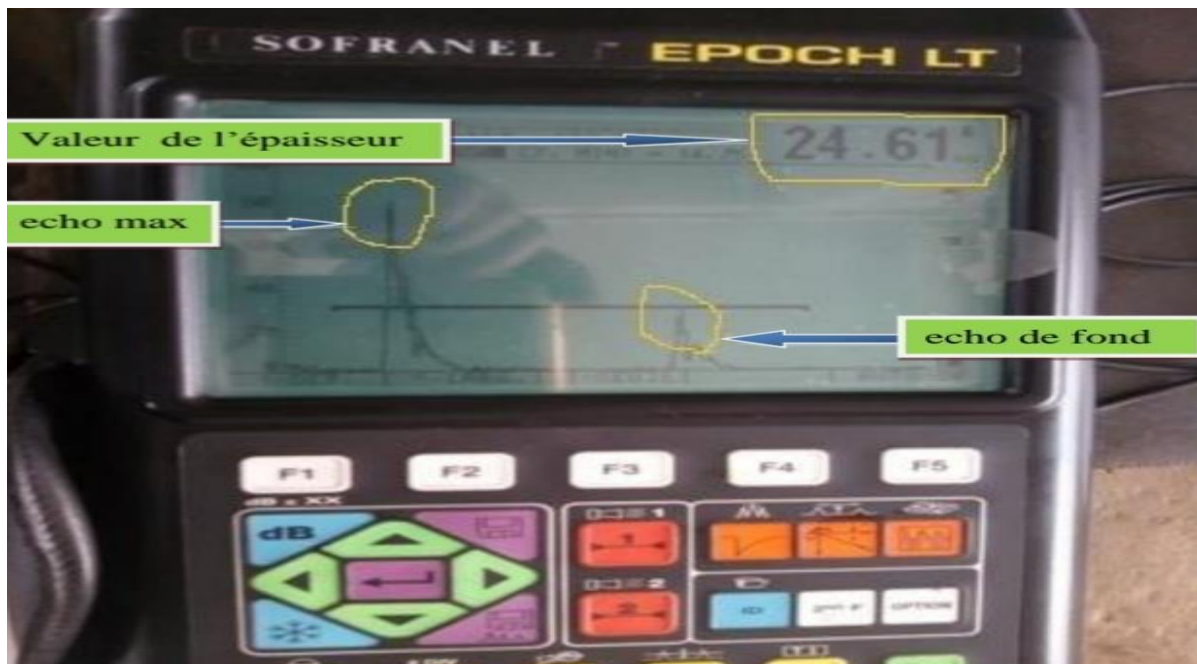


Figure3.36 : image d'un test sans défaut[37].

En cas de présence de défaut on remarque la présence d'un pic intermédiaire entre les deux pics (de la surface et du fond de la pièce) ce dernier est appelé le pic de défaut qui déterminer la position, la taille et la profondeur de défaut.



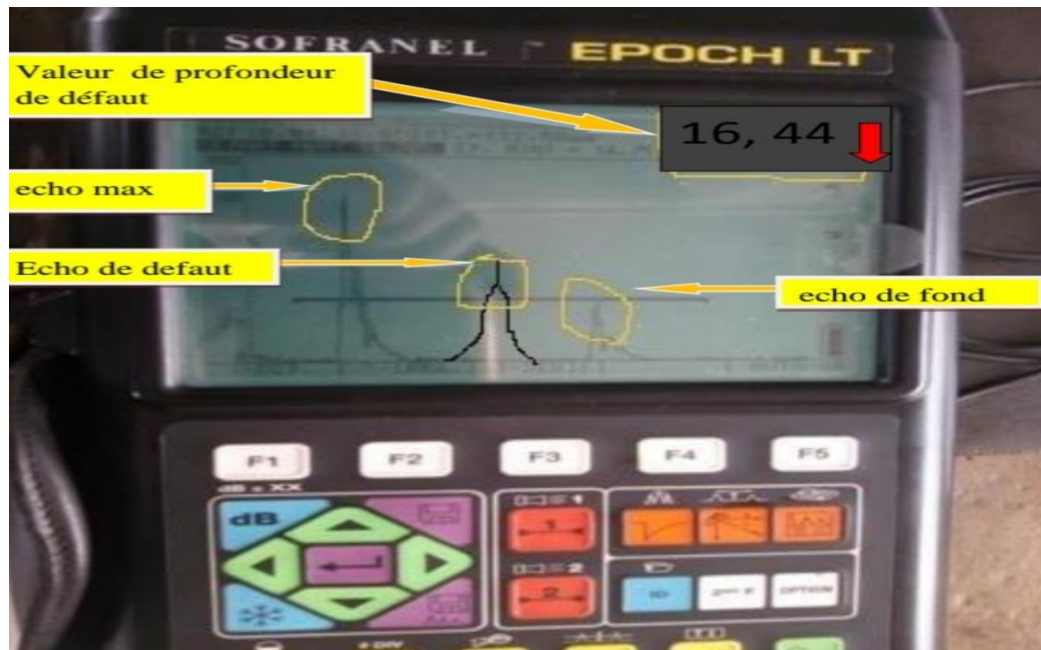


Figure 3.37: image d'un test avec pic de défaut [37].

## 10.6. Conclusion :

Le contrôle par ultrasons est une méthode technologique efficace, parmi ses propriétés, la détection d'un nombre important des irrégularités dans le matériau ou dans un assemblage, ceci dépend de la performance des équipements de contrôle [38].

## 11. Propositions :

En fin de cette étude, et tenant compte des moyens existants, et des observations relevées au sein de l'entreprise, et particulièrement au département technique ou agit l'équipe Vinçotte des propositions seront avancées, telles que :

- L'actualisation de certains équipements de contrôle non destructif et leur remplacement par des équipements modernes.
- La réparation de certains appareils d'inspection à l'arrêt, la mise en place d'une politique de maintenance préventive et la prévision de certaines pièces de rechange.
- L'équipe d'inspection de Vinçotte semble travailler dans des conditions contraignantes. Il serait souhaitable de l'élargir pour permettre de subvenir à l'inspection du grand stock de pipeline avant que le défaut ne se produise.
- Mettre à jour la formation des inspecteurs CND.
- Collaboration avec les grandes sociétés de maintenance CND comme la SGS algeria.

### Conclusion

L'objectif assigné à ce travail est l'étude du procédé du contrôle non destructif (CND) et l'application aux pipe-lines en vue de détecter différents défauts. D'abord, une littérature relative au domaine d'inspection des pipelines par les procédés de contrôle non destructif est donnée. On a retrouvé que le CND présente une importance primordiale pour connaître la qualité des structures mécaniques et des pièces dans les étapes de fabrication, et en service. Plusieurs normes et réglementations imposent ce type de contrôle pour des raisons de sécurité surtout pour les appareils sous pression (réservoirs et pipelines). On a montré des généralités sur les méthodes de contrôle non destructif. Ces techniques de détection des fissures sont nombreuses mais certaines d'entre elles sont coûteuses donc difficiles à réaliser. On s'est aperçu que les techniques par ressuage, magnétoscopie et ultrasonores sont du moins faisables par rapport à d'autres techniques. On a développé une application pratique de ces trois méthodes pour l'inspection des pipelines au niveau de l'entreprise fertial de Annaba. La partie expérimentale a été réalisée au niveau du département technique spécialisé dans l'inspection des tuyauteries et des équipements d'unité d'ammoniac. Pour cela on a effectué des mesures expérimentales par la méthode de contrôle non destructif et particulièrement par ressuage, et par magnétoscopie pour faire apparaître les fissures en surfaces et aussi par ultra-sons pour détecter les défauts à l'intérieur des cordons de soudure du pipe. Une amélioration du procédé est proposée à l'entreprise.

En fin de l'étude, des propositions pour l'entreprise sont données en vue d'améliorer la capacité de la technique CND à détecter plus de défauts et les solutions pour y remédier et l'adaptation des moyens existants aux méthodes actuelles.

# Références bibliographiques

### Bibliographie

- [1] Equipe vinçotte. Document entreprise «fertial.annaba»,2005.
- [2] Gilles Corneloup, Cécile Gueudré. «Le contrôle non destructif et la contrôlabilité des matériaux et des structures», 2016.
- [3] le bulletin auscultech num 2 contrôle non destructif, Mars 2013.
- [4] Jacques Dumont-fillon, Ingénieur de l'École Centrale de Paris Ancien Directeur Technique de l'Institut de Recherches de la Sidérurgie. «Livre Contrôle non destructif (CND) ».
- [5] web, site. Techniques de l'Ingénieur, «traité Mesures et Contrôle».
- [6] S.Mekhelif. Cour contrôle non destructif (CND). 2016.
- [7] M.C. Guilpin, Maître de conférences à l'Université Paris VII Mme B. MANGEOT. Maître de conférence à l'Université Paris VI. «Magnétoscopie Niveau 2». 1990.
- [8] G.Gaussorgueas. «La thermographie infrarouge edition technique et documentation».
- [9] Web, site «Boeing maintenance.com».
- [10] Cyril Ravat. « Conception de multi capteur à courants de Foucault et inversion des signaux associés pour le contrôle non destructif ». Thèse de doctorat, d'université de Paris-sud11, 2008.
- [11] G, WACHE. «Contrôle non destructif traitement thermique N 212-88».
- [12] Philippe Belrame. « Modélisation de la perturbation électromagnétique au voisinage d'une fissure mince dans un matériau conducteur. Application au contrôle non destructif par courants de Foucault. ». Thèse de doctorat, a école centrale de Lyon, 2002.
- [13] Abderrezzak Latreche. « Etude du contrôle non destructif par la méthode de Galerkin sans maillage ». Mémoire de magistère, d'université de Batna, 2009.
- [14] Site toyota maintenance.
- [15] C. Amsellem, J. F. Sanchez, R. Edery, and L. Martin, « Racleur instrumenté ultrasons pour contrôle en ligne des pipelines de diamètres 6 »/ 8 ”,” Journées cofrend, pp. 2–9, 2011.
- [16] Code, Tuyauteur industriel. ROME (France) H2914.
- [17] livre. « Outil d'inspection Maîtrise de la dégradation des enveloppes» . septembre 2014.
- [18] Akila, SOUELMi. Mémoire «étude de la conformité des pipelines destinés». 2018.
- [19] Code 35860, N°. «Fuite sur un pipeline d'hydrogène».
- [20] Edward livre (DRA-013). Risques Naturels et Environnement Industriel (DRA-013).
- [21] Pr Sébastien Candia. Livre sur les pipelines.



## Références bibliographiques

- [22] Web site pump technics.
- [23] M. Marouane, E. Bakkali, M. Marouane, and E. Bakkali, "Modélisation des contrôles non-destructifs par ondes ultrasonores guide.
- [24] C. Adam. "L'inspection des pipelines par racleurs instrumentés maintenance des pipelines."
- [25] E. Lyon. "Guide-Waves Inspection System for the," 2012.
- [26] Doc entreprise. Alfapipeline annaba.
- [27] livre. Entreprise. Alfapipeline Annaba.
- [28] OFFSHORE TECHNOLOGY REPORT. [Temporary/permanent pipe repair – Guidelines.Prepared by AEA Technology Consulting for the Health and Safety Executive]. 2001.
- [29] DEP 31.40.60.12-Gen.December. [MANUAL PIPELINE REPAIRS]. 1995.
- [30] Issasfa., Ibrahim. Ecole Doctorale Nationale en Mécanique De Construction « EDNMC ».
- [31]. kiven, k livre. Maintenance pipeline fertial.annaba.
- [32] PABLO.SERVI Repairs, Composite Pipeline. - Clock Spring® is Different Patrick C. Porter 1, José Augusto Pereira da Silva2. Copyright 2001, Brazilian Petroleum and Gas Institute – IBP.
- [32] Article Radiation, United States Environmental Protection Agency Air and. (6202J) 1200 Pennsylvania Ave., NW July 2003 Washington, DC 20460 EPA430-B-03-017.
- [33] Robin Gordon, Bill Bruce, Nancy Porter, Mike Sullivan, and Chris Neary. Internal Repair of PipelinesSemi-Annual Technical Progress ReportReporting. Period: September 30, 2002 through March 31,
- [34] Gornet, laurent. Généralités sur les matériaux composites.
- [35] Akwarap. Système de réparation permanent de pipeline.
- [36] .Document. Entreprise fertial.annaba.
- [37] Brgoug Ali ; entreprise alfapipeline etalonnage ultrason.

ANNEXE

## **Annexe**

**Date** : 06/03/2020  
**Lieu** : FERTIAL Annaba

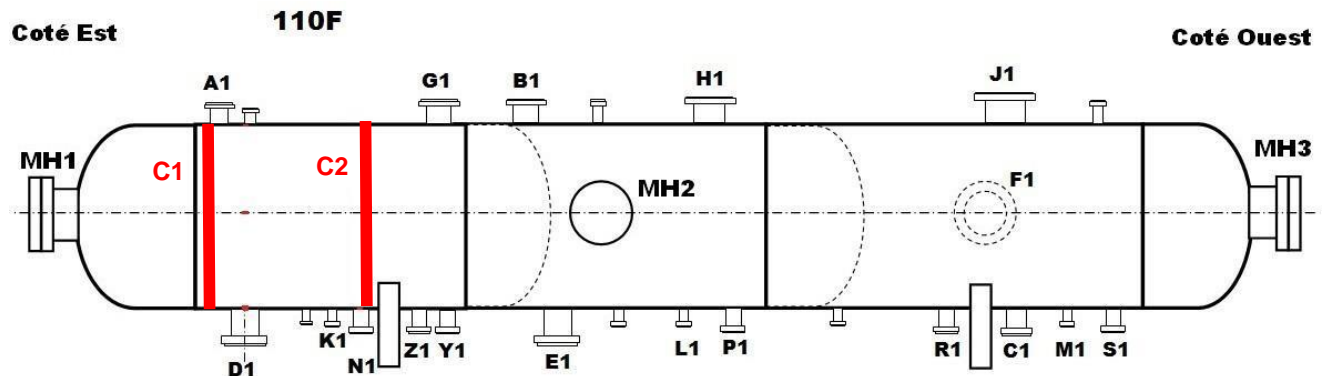
**Installation** : NH3  
**Equipement** : Pipe 35H Ballon

Appareil		Méthode de palpage			Méthode d'étalonnage		
Type	N°	Palpeur	Fréquence MHz	N°	Bloc		Dist (mm)
EPOCH 600	130504703	3.5x10	4	871354	N°	Ep (mm)	100 / 200
					V2	25	

zone de mesure :

Zones de mesure (mm)											
Item	t nom	C A	t min	Nord	Sud	Est	Ouest	0h	3h	6h	9h
Circulaire C1	17	3	17.2	14.4	17.3	/	/	17.5	/	17.2	/
Circulaire C2	17	3	17.0	13.2	17.4	/	/	17.0	/	17.5	/
Fond bombé coté Est	17	3	18.8	/	/	/	/	18.9	18.8	19.3	19.3
	7	3	18.6	/	/	/	/	18.9	18.7	18.7	18.6
	17	3	18.8	/	/	/	/	19.0	19.9	18.8	19.4
	7										
Piquage A 1	23.01	3	23.4	23.4	25.6	25.5	Xc	/	/	/	/
Piquage D 1	25.4	3	25.8	25.8	27.2	27.6	25.8	/	/	/	/
Piquage N 1	18.26	3	17.8	19.5	17.8	18.8	19.0	/	/	/	/
Piquage MH1	17	3	17.3	17.4	17.3	/	/	17.6	/	17.4	/

t<sub>nom</sub> : Epaisseur nominale  
CA : Surépaisseur de corrosion  
t<sub>min</sub> : Epaisseur minimale mesurée  
Xc : surface corrodée



• **Données d'évaluation**

**Lieu** : Fertial Annaba  
**Effectuée par** : NASRI Ouahid, et stagiaire Rezzoug Bachir

## Evaluation de l'intégrité structurelle

**Installation** : Fertial Annaba      **Unité** : Ammoniac      **Equipement n°** : PIPE 35H

### 1. Caractéristiques de l'équipement :

**Constructeur** : Ets COQUANT, 59261 Wahagnies Nord, France  
**Numéro de fabrication** : 348  
**Année de construction** : 1976  
**Fluide contenu /Volume (L)** :  
**Pression de calcul** : 8.5 bars  
**Pression de service** : 5.9 bars  
**Pression d'épreuve (au sommet)** : 12.75 bars  
**Température de calcul** : -40 °C au 35 °C  
**Température de service** : 13.3 °C  
**Surépaisseur de corrosion** : 3 mm

### 2. Objet de l'évaluation :

- La mise en œuvre du programme d'inspection, a mis en évidence des dégradations de types perte d'épaisseurs supérieures à la tolérance prévue dans l'étude de conception d'origine de l'équipement.
- Pour cela l'exploitant a mandaté l'organisme d'inspection Vinçotte International Algerie annaba pour réaliser une évaluation de l'intégrité de l'équipement

### 3. Base de l'évaluation :

- Décret exécutif n° 90-245/246 du 18 août 1990, portant sur la réglementation des appareils à pression.
- API 510 Ed 2014
- API 579-1/ASME FFS-1 – Fitness For Service - Second Edition
- CODAP
- Dossier constructeur d'origine de l'équipement
- Rapport de contrôle d'épaisseurs Vinçotte

Nombre total de pages : 04  
Distribution Originale(s) : 01 Client  
Distribution Copie(s) : 1 dossier VIA  
Crée le : 10/03/20

05 B 52A 002rev5

#### 4. Inspections de base :

- Le contrôle par prises des mesures d'épaisseur décrit dans le tableau ci-dessous a été mis en œuvre par la société Vinçotte International Algérie spa
- Le programme de contrôle a été défini en fonction de l'expérience commune de l'inspecteur de la société Vinçotte Algérie et de l'exploitant.

Technique de contrôle	Etendue	Localisation	Résultat	Remarque
Mesures d'épaisseur ponctuelles par ultrasons	Spot	Virole, Fonds, piquages	Présence des pertes d'épaisseur sur la virole, les piquages : Y, Z, N, K, D.	À évaluer, ou à réparer selon les résultats de l'évaluation.

#### 5. Evaluation de l'intégrité structurelle :

- Hypothèses prises en compte dans l'évaluation : Les sollicitations sont uniquement dues à la pression intérieure. Aucune autre charge n'a été prise en compte (poids, hauteur de fluide, vent, neige, charge sur tubulures,...).

##### ➤ **Données d'inspection :**

Les contrôles par mesures d'épaisseurs réalisés par l'organisme Vinçotte en juillet 2019, ont mis en évidence des dégradations de type perte d'épaisseur sur les parois externes de la viroles, des piquages Y, Z, N, K, D, et ce après une période de service de 43 ans.

Mesures d'épaisseur			
Elément contrôlé	Donnée de conception (mm)		Epaisseur minimale mesurée (mm)
	Epaisseur nom	CA	
Virole 1 – perte 1	17	3	11.0
Virole 2 – perte 2	17	3	14.9
Piquage – Y (Diamètre = 6")	18.26	3	14.26
Piquage – Z (Diamètre = 6")	18.26	3	15.26
Piquage – N (Diamètre = 6")	18.26	3	13.76
Piquage – K (Diamètre = 3")	11.13	3	7.63
Piquage – D (Diamètre = 10")	28.58	3	25.58

Les zones de mesure identifiées ci-dessus présentaient une diminution d'épaisseur supérieure à la surépaisseur de corrosion.

##### **Détail :**

Pour les emplacements des pertes, voir détail sur l'annexe des mesures d'épaisseurs.