

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed khider –Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie civil et d'Hydraulique
Référence :/2020



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم الهندسة المدنية والري
المرجع :/2020

Mémoire de Master

Filière : Génie civil

Spécialité : Structures

Thème

***ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE À PROPOS DES
TECHNIQUES DE CONTRÔLE NON DESTRUCTIF
DES JOINTS SOUDÉS EN ACIER***

Nom et Prénom de l'étudiante :
BEN AISSA Feriel

Encadreur : Mr. BITAM M. Mehdi

Année universitaire : 2019 - 2020

Remerciements

Tout d'abord, je remercie « ALLAH » le tout puissant pour toutes les bénédictions et pour m'avoir donné la patience et la volonté de faire ce travail.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance ainsi que ma gratitude à mon encadreur de mémoire BPTAM Mohamed Mehdi, pour son patience et son soutien ainsi que pour son entière disponibilité et surtout ses précieux conseils durant la période de la réalisation de ce travail.

Je remercie très spécialement mes très chers parents, qui ont toujours avec moi pour leurs encouragements et leurs soutenir soit moral, financier, psychologique "Merci pour tout vous avez fait pour moi "

Je voudrais aussi à remercier mes sœurs pour leurs soutien constant et leurs encouragements qui inestimable

RÉSUMÉ

Le présent mémoire de master en génie civil s'intéresse au contrôle technique de qualité des joints soudés des structures de génie civil fabriquées en acier. Nous nous intéressons à la catégorie des contrôles non destructifs CND. Ce contrôle consiste à mettre en œuvre des méthodes d'investigation permettant de juger «sans destruction» l'état de santé d'une pièce mécanique, d'un élément structurel ou d'une soudure. L'objectif final de ce contrôle est de formuler un avis sur l'aptitude de cette pièce à remplir la ou les fonctions pour lesquelles elle a été conçue.

On sait qu'il existe plusieurs méthodes de CND, cette recherche s'intéresse à cinq techniques suivantes : Contrôle visuel (VT), Contrôle par ressuage (PT), Contrôle par magnétoscopie (MT), Contrôle par ultrasons (UT), et Contrôle par radiographie (RT). L'objectif principal du présent mémoire est de présenter ces techniques pour vérifier la qualité des joints soudés. Cette recherche est une étude bibliographique qui explore l'état de l'art actuel dans ce domaine du savoir et de la technologie. Les documents scientifiques visés sont avant tout les textes normatifs ISO et EN, ensuite tout livre, article de recherche ou document utile pour présenter les techniques de CND anciennes et nouvelles, leurs domaines d'application, exigences en matériel et compétences, limites d'usage et leur efficacité.

Ce manuscrit se compose de 7 chapitres, les 5 premiers chapitres sont destinés aux présentations des 5 techniques de CND : visuel (VT), ressuage (PT), magnétoscopie (MT), radiographie (RT) et les ultrasons (UT). Dans le 6^{ème} chapitre, nous donnons une synthèse des défauts les plus courants qui touchent les joints soudés. Le 7^{ème} chapitre est destiné aux aspects pratiques, il contient un ensemble de cas réels où des joints soudés ont été contrôlés par des techniques de CND. Pour chacun des cas présentés, il est cité sa référence bibliographique ou sur le web, le nom de la méthode de CND appliquée, les observations des auteurs de la publication, et enfin nos commentaires. Ce mémoire se termine par une conclusion générale et d'une liste des références bibliographiques et numériques utilisées.

ABSTRACT

The present report of master in civil engineering is interested in the technical inspection of quality of the welded joints of civil steel engineering structures. We are interested in the category of non-destructive testing (NDT). This examination consists in implementing methods of investigation making it possible to judge «without destruction» the health of a machine element, a structural element or a welding. The final objective of this control is to formulate an opinion on the aptitude of this weld to fulfill the functions for which it was conceived.

It is known that several methods of NDT exist, this research is interested in five following techniques: Visual testing (VT), Penetrant testing (PT), Magnetic particle testing (MT), Ultrasonic testing (UT), and Radiographic testing (RT). The main objective of our report is to present these testing techniques to check the quality of the welded joints. This research is a bibliographical study, which explores the current state of art in this technology field. The scientific documents concerned are before all the normative texts ISO and EN, also any book, research paper or useful document, which present the techniques of NDT, their applicability, their requirements concerning material and competences, limits of use and their effectiveness.

This manuscript is composed of 7 chapters; the first 5 chapters are intended for the presentations of the 5 NDT techniques: (VT), (PT), (MT), (RT) and (UT). In the chapter 6, we give a synthesis of the most current defects which touch the welded joints. The chapter 7 is intended for the practical aspects, it contains several real cases where welded joints were inspected by application of NDT techniques. For each case presented, we present its bibliographical or web reference, and the name of the NDT applied method, the author's observations, and finally our comments. This master's thesis finishes by a general conclusion and a bibliographical references list.

ملخص

تهتم مذكرة الماستر في الهندسة المدنية بالمراقبة التقنية لجودة الوصلات الملحومة للهياكل الهندسة المدنية المصنوعة من الفولاذ. نهتم بفترة الاختبارات غيرالتحطيمية "NDT". حيث يقوم هذا الفحص بتنفيذ طرق التفتيش وجعلها من الممكن الحكم على سلامة الجزء الميكانيكي أو العنصر الهيكلي أو اللحام بدون تحطيمه. والهدف النهائي من هذا الاختبار هو صياغة رأي حول أهلية هذا الجزء لأداء الوظيفة أو الوظائف التي تم تصميمه من أجلها.

هناك عدة طرق غير التحطيمية حيث يهتم هذا البحث بالتقنيات الخمس الآتية: الاختبار البصري (VT)، اختبار الاختراق (PT)، الاختبار المغناطيسي (MT)، اختبار الموجات فوق الصوتية (UT)، واختبار التصوير الإشعاعي (RT). إن الهدف الرئيسي من هذه الرسالة هو تقديم هذه التقنيات لتحقيق من جودة الوصلات الملحومة. وهذا البحث هو دراسة مكتبية توصل إليه التطور العلمي والصناعي في مجال المعرفة والتكنولوجيا. إن الوثائق العلمية المقصودة هي قبل كل شيء نصوص المواصفات والمقاييس الدولية ISO والأوروبية EN، كذلك كل كتاب أو مقالة بحثية أو وثيقة مفيدة تهتم بتقديم تقنيات "NDT" القديمة والجديدة، ومجالات تطبيقها ومتطلباتها من مواد وعتاد وكفاءات بشرية ونعرض حدود الاستخدام ودرجات فاعليتها.

يتكون هذا التقرير من سبع فصول، خصصت الفصول الخمسة الأولى لعرض تقنيات الخمس من "NDT" متمثلة في: الاختبار البصري (VT)، اختبار الاختراق (PT)، الاختبار المغناطيسي (MT)، الاختبار التصوير الإشعاعي (RT) واختبار الموجات فوق الصوتية (UT). نقدم في الفصل السادس ملخصاً عن الأخطاء الأكثر شيوعاً التي تؤثر على الوصلات الملحومة. وخصص الفصل السابع للجوانب التطبيقية من خلال عرض لمجموعة من الحالات الحقيقية حيث جاء فيها فحص الوصلات الملحومة بتقنيات "NDT".

بالنسبة لكل حالة من الحالات المعروضة، نقوم بالتعريف بمرجعها سواء كانت وثيقة مكتبية أو وثيقة على عن طريق الانترنت، كما نذكر اسم طريقة الاختبار غير التحطيمية المطبق، وندعم ذلك بتعليقات مؤلف المنشور وتعليقاتنا عليها.

SOMMAIRE

Résumé.....	1
Introduction Générale.....	1

Chapitre I : Défauts des joints soudés

I-1-Introduction	5
I-2- Différents types de défauts dans les joints soudés	5
I-3- Les Fissurations	5
I-3-1 Présentation des fissurations	5
I-3-2- Fissurations à chaud	6
I-3-2-1- Causes des fissures à chaud	6
I-3-2-2- Remèdes contre les fissures à chaud.....	7
I-3-3- Fissuration à froid	7
I-3-3-1- Causes des fissures à froid	8
I-3-3-2- Remèdes contre les fissures à froid	8
I-4- Soufflures et piqures	9
I-4-1- Présentation des soufflures et piqures	9
I-4-2- Causes des soufflures	10
I-4-3 -Remèdes contre les soufflures	10
I-5- Les inclusions	10
I-5-1- Définition et types des défauts appelés inclusions	10
I-5-2-Causes des divers types d'inclusions	10
I-5-3- Prévention contre les inclusions solides, de laitier et de flux	11
I-6- Pollution ferreuse	12
I-7-Retassures	12
I-7-1-Définition et types de défauts appelés retassures	12
I-7-2-Causes possibles des retassures	13
I-7-2-Moyens de prévention contre les retassures	13
I-8- Morsures et Caniveaux	13
I-8-1- Définitions des Morsures	13
I-8-2- Définition des Caniveaux	13
I-8-3- Causes des morsures et caniveaux	14
I-8-4-Moyens de prévention	14
I-9- Effondrements et trous	14
I-9- 1-Définition et types des défauts appelés effondrements	14
I-9-2-Causes possibles des effondrements	15
I-9-3- Remèdes contre les effondrements	15
I-10- Défauts de formage du cordon	15
I-10-1- Définition	15
I-10-2- Défaut de convexité	15
I-10-3- Défaut de concavité	16

I-10-4- Défaut d’alignement.....	17
I-10-5- Déformations angulaires	17
I-11- Débordements du cordon	17
I-11-1- Définition des débordements de soudures	17
I-11-2- Causes des défauts appelés débordements	18
I-11-3-Moyens de prévention contre les défauts appelés débordements	18
I-12- Défaut de pénétration	18
I-12-1- Définition du manque de pénétration	18
I-12-1-1- Causes possibles du manque de pénétration	18
I-12-1-2- Moyens de prévention contre le manque de pénétration	19
I-12-2- Définition du défaut appelé excès de pénétration	19
I-12-2- 1-Causes des défauts d’excès de pénétration	19
I-12-2-2-Moyens de prévention contre les défauts d’excès de pénétration.....	20
I-13- Collage ou manque de fusion	20
I-13-1- Définition des défauts appelés « collage » ou « manque de fusion »	20
I-13-2- Types de défauts appelés « manque de fusion »	20
I-13-3- Causes des défauts de collage	20
I-13-4- Moyens de prévention contre les défauts de collage	21
I-14- Les Projections	21
I-14-1- Définition des défauts appelés « projections »	21
I-14-2- Causes de l’apparition des projections	21
I-14-3- Moyens de prévention contre les projections	22

Chapitre II : Contrôles Visuels

II-1- Introduction	24
II-2- Conditions de réussite du contrôle visuel.....	24
II-3- Equipements utilisés	25
II-4- Avantages du contrôle visuel « VT » par rapport aux autres procédés de CND.....	26
II-5- Inconvénients du contrôle visuel « VT » par rapport aux autres procédés de CND.....	26

Chapitre III : Contrôle par ressuage

III-1- Principe du ressuage	28
III-2- Précautions pour une manipulation réussite	28
III-3 -Sécurité	29
III-4- Mode opératoire	29
III-5- Les produits utilisés.....	31
III-5-1- <i>Classification normalisée des produits pou l’essai PT</i>	32
III-5-2- <i>Comment choisir un produit pénétrant ?</i>	33
III-5-3- <i>Comment choisir un produit d’élimination ?</i>	34
III-5-4- <i>Comment choisir un produit révélateur ?</i>	34
III-6- Avantages et Inconvénients du contrôle par ressuage.....	35

Chapitre IV : Contrôle par magnétoscopie

IV-1-Introduction	37
IV -2- Principe.....	37
IV -3- Mode opératoire	38
IV-4- Règles de sécurité	40
IV -5- Précautions relatives au contrôle des joints soudés.....	40
IV-6- Les Révélateurs	40
IV-7- État et préparation de la surface	41
IV-8-Paramètres d'examen MT recommandés	41
IV-8-1- Niveaux d'acceptation	42
IV-9- Les diverses techniques d'aimantation en magnétoscopie	43
IV-10- Equipement et produits	50
IV-11- Avantages et inconvénients de la magnétoscopie	50

Chapitre V : Contrôle par radiographie

V-1- Principe	53
V-2- Norme de base	53
V-3 -Autres normes importantes à l'application de l'essai par radiographie	54
V-4- Mesures de sécurité	54
V-5- Les sources des rayonnements 55	
V-5- 1-Rayons X	55
V-5- 2-Les ions γ	56
V-5- 3- Différences entre rayonnement X et ions gamma	56
V-5- 4-Comment choisir la source de rayonnement ?	57
V-5- 5-Propriétés du rayonnement	57
V-6-Film radiographique	57
V-6-1-Conditions d'observation du film	58
V-6-2-Développement du film	58
V-6-3-Densité optique d'un film	59
V-6-4-Traitement de film	60
V-6-5-Recouvrement des films	60
V-7-Types et positions des indicateurs de qualité d'image (IQI)	60
V-7 -1-Détermination de l'indice de qualité d'image « IQI »	60
V-8-Cassette de film normalisée	61
V-9-Avantages et Inconvénients du contrôle par radiographie.....	66
V-9-1-Avantages	66
V-9-2- Inconvénients	66

Chapitre VI: Contrôle par ultrasons

VI-1-Introduction.....	68
VI-2- Principe du contrôle par ultrasons.....	68
VI-3- Normes de référence	69
VI-3-1 La norme de base EN 1714 d'aout 1997	69
VI-3-2- A propos de la norme EN 1713	71
VI-3-3 -A propos de la norme EN 1712	71
VI-4 -Précautions de mise en œuvre	72
VI-5 -Mise en œuvre de l'essai à ultrasons UT et appareillage	73
VI-6-Diverses Méthodes de contrôle par ultrasons	75
VI-6 -1- Méthode par réflexion	75
VI-6-2 -Méthode par transmission	76
VI-6-3-Méthode par émerision	76
VI-7 -A propos de la propagation des ultrasons	76
VI-8 -Types d'ondes ultrasonores	77
VI-8-1-Ondes longitudinales (ou de compression)	77
VI-8-2- Ondes transversales (ou de cisaillement)	78
VI-8-3 Ondes guidées	78
VI-8-3-1- <i>Ondes de surface</i> (ou de Rayleigh)	78
VI-8-3-2-Ondes de plaque (ou de Lamb)	79
VI -9- Propagation d'ondes ultrasonores à travers différents milieux	80
VI-10- Avantages et Inconvénients du contrôle par ultrasons.....	83

VII- Quelques exemples des défauts dans les joints soudés

Introduction	86
VII-1. Analyse du cas N°1 - Essai VT	86
VII-2. Analyse du cas N°2 - Essai RT.....	87
VII-3. Analyse du cas N°3 - Essai RT.....	87
VII-4. Analyse du cas N°4 - Essai RT.....	88
VII-5. Analyse du cas N°5 - Essai RT.....	89
VII-6. Analyse du cas N°6 - Essai VT.....	89
VII-7. Analyse du cas N°7 - Essai VT.....	90
VII-8. Analyse du cas N°8 - Essai VT.....	91
VII-9. Analyse du cas N°9 - Essai PT.....	91
VII-10. Analyse du cas N°10 - Essai VT.....	92
VII-11. Analyse du cas N°11 - Essai RT.....	93
VII-12. Analyse du cas N°12 - Essai RT.....	94
VII-13. Analyse du cas N°13 - Essai VT.....	94
VII-14. Analyse du cas N°14 - Essai MT.....	95
VII-15. Analyse du cas N°15 - Essai MT.....	96
VII-16. Analyse du cas N°16 - Essai PT.....	96

Conclusion Générale.....	99
Liste bibliographique.....	103

Liste des figures

Figure I.1 : Fissuration à chaud d'un joint soudé (Réf. [R16]).....	6
Figure I.2 : Fissuration à chaud d'un joint soudé (Réf. [R15]).....	6
Figure I.3 : Mise en évidence des fissures à froid (Réf.[R23]).....	7
Figure I.4 : Types de fissures à froid (Réf.[R15]).....	8
Figure I.5 : Types de soufflures d'après (Réf.[R16]).....	9
Figure I.6 : Types des soufflures d'après (Réf.[R28]).....	9
Figure I.7 : Types d'inclusions (Réf.[R22]).....	11
Figure I.8 : inclusions de laitier (Réf.[R23]).....	11
Figure I.9 : Différents types de retassures (Réf.[R16]).....	12
Figure I.10 : Schéma définissant les retassures (Réf.[R28]).....	12
Figure I.11 : Différentes types de caniveaux (Réf.[R23]).....	13
Figure I.12 : Présentation des morsures et caniveaux (Réf.[R28]).....	14
Figure I.13 : Schéma d'un effondrement (Réf.[R28]).....	15
Figure I.14 : Types des effondrements (Réf.[R23]).....	15
Figure I.15 : convexité dans un joint soudé (Réf.[R28]).....	16
Figure I.16 : concavité dans un joint soudé (Réf.[R28]).....	16
Figure I.17 : Défaut d'alignement d'un cordon de soudure (Réf.[R15]).....	17
Figure I.18 : angulaires dans un joint soudé (Réf.[R28])	17
Figure I.19 : débordements du cordon (Réf.[R15]).....	18
Figure I.20 : Manque de pénétration dans un cordon de soudure (Réf.[R28]).....	18
Figure I.21 : Excès de pénétration (Réf.[R28]).....	19
Figure I.22 : Défauts de collage ou manque de fusion dans une soudure (Réf.[R15]).....	20
Figure I.23 : Défaut de projection (ou de collage) dans un joint soudé (Réf.[R16]).....	21

Figure .II. 1 : Principe du contrôle visuel (Réf.[R29]).....	24
Figure .II.2: Accessibilité pour le contrôle (Réf.[R1]).....	25
Figure .II.3: Loupe (Réf. [R30])	26
Figure .II.4: Règle droite (Réf. [R31])	26
Figure. II. 5: Jauge de rayon (Réf. [R32]).....	26
Figure .II.6: Endoscope (Réf. [R33]).....	26
Figure. III.1 : nettoyage de pièce (Réf.[R34]).....	29
Figure .III.2 : Application du pénétrant (Réf.[R34]).....	30
Figure .III.3 : Elimination de l'excès de pénétrant (Réf.[R34])	30
Figure .III.4 : Application du révélateur (Réf.[R34])	31
Figure .III. 5 : observation des défauts (Réf.[R34])	31
Figure .III. 6 : Solvant (Réf.[R35])	32
Figure .III. 7 : Pénétrant rouge (Réf.[R35])	32
Figure .III. 8 : Révélateur blanc (Réf.[R35])	32
Figure .IV.1: Schéma de principe du contrôle par magnétoscopie (Réf.[R42])	37
Figure .IV.2: Image présentant l'opération de nettoyage de la pièce (Réf.[R34]).....	38
Figure .IV.3 : Image présentant l'opération de pulvérisation de la poudre magnétique avec l'utilisation d'un appareil de production d'un champ magnétique (Réf.[R37]).....	39
Figure .IV.4 : Image présentant l'opération de désaimantation (Réf.[R37]).....	39
Figure .IV.5: Image présentant l'opération d'observation de la pièce et mise en évidence éventuelle de défauts (Réf.[R37]).....	39
Figure. IV.6 : schéma d'aimantation longitudinale (Réf.[R25])	46
Figure .IV.7 : d'aimantation longitudinale (Réf.[R42]).....	47
Figure .IV.8 : schéma d'aimantation transversale (Réf.[R25]).....	47
Figure .IV. 9: l'aimantation transversale (Réf.[R142]).....	48
Figure. IV.10 : Magnétoscopie par courant induit (Réf.[R42]).....	48
Figure. IV.11: Magnétoscopie par champ tournant chambre (Réf.[R42]).....	49

Figure .IV.12: L'indicateur (coloré ou fluorescent) (Réf.[R41]).....	50
Figure .IV.13: La pie gauge est qui indique l'orientation du champ magnétique (Réf.[R38])	50
Figure .IV.14: indicateur de champ magnétique (Réf.[R39]).....	50
Figure. IV.15: Instrument magnétoscopie (YOKE) (Réf.[R37]).....	50
Figure. IV.16: Nettoyage (à la brosse, au solvant, ...) (. [R37],[R 35]).....	50
Figure. IV.17: Lampe (Réf.[R40]).....	50
Figure .V.1 : Principe du contrôle par radiographie (Réf.[R13]).....	53
Figure .V.2: Rayons X (Réf.[R13]).....	55
Figure V.3 : Equipement de rayonnement gamma (Réf.[R13]).....	56
Figure .V.4 : Film de radiographie (Réf.[R13]).....	58
Figure V.5 : Cassette de film pour radiographie (Réf.[R44]).....	61
Figure .V.6 : Disposition d'examen pour parois planes et exposition en simple paroi (Réf.[R6]).....	62
Figure V.7 : Disposition d'examen pour exposition en simple paroi d'objets courbes (Réf.[R6]).....	62
Figure V.8 : Disposition d'examen pour exposition en simple paroi d'objets courbes (soudure de piquage pénétrant) (Réf.[R6]).....	63
Figure V.9 : Disposition d'examen pour exposition en simple paroi d'objets courbes (soudure de piquage posé) (Réf.[R6]).....	63
Figure V.10 : Disposition d'examen pour exposition en simple paroi d'objets courbes (Réf.[R6]).....	63
Figure V.11 : Disposition d'examen pour exposition en simple paroi d'objets courbes (soudure de piquage pénétrant) (Réf.[R6]).....	64

Figure V.12 : Disposition d'examen pour exposition en simple paroi d'objets courbes (soudure de piquage posé) (Réf.[R6]).....	64
Figure V.13 : Tension maximale pour des appareils à rayons X jusqu'à 500 kV en fonction de l'épaisseur traversée et du matériau (Réf.[R6]).....	65
Figure VI.1 : Principe de l'essai UT (Réf. [R52])	69
Figure VI.2 : Positions des indications (Réf. [R9]).....	71
Figure VI.3 : Incidence de contrôle (Réf. [R9]).....	71
Figure VI.4 : Un générateur d'impulsions (Réf.[R46])	73
Figure VI.5 : les palpeurs (Réf.[R47]).....	74
Figure VI.6 : Un amplificateur (Réf.[R49])	74
Figure VI.7 : écran de visualisation (Réf.[R48])	74
Figure VI.8 Couplant pour les inspections à ultrasons (Réf.[R45])	75
Figure VI.9 : Méthode de contrôle par réflexion (Réf.[R19])	75
Figure VI.10 : Méthode de contrôle par transmission.(Réf.[R19])	76
Figure VI.11 : Méthode de contrôle par émerision.(Réf.[R24]).....	76
Figure VI.12 : Les fréquences des ultrasons. (Réf.[R20])	77
Figure VI.13 : propagation d'une onde longitudinale (Réf.[R22]).....	78
Figure VI.14 : propagation d'une onde transversale (Réf.[R22]).....	78
Figure VI.15 : propagation d'une onde de surface (Réf.[R24]).....	79
Figure VI.16 : propagation d'une onde de plaque symétrique (Réf.[R24]).....	79
Figure VI.17 : Observations à l'oscilloscope des signaux émis et reçus en fonction du temps (Réf.[R50]).....	80
Figure VI.18. : incidence normal (Réf.[R24])	81
Figure VI.19 : incidence oblique. (Réf.[R24])	82

Figure. VII.1 : caniveaux (Réf. [R14]).....	86
Figure. VII.2 : Présence des effondrements dans la soudure (Réf. [R14]).....	87
Figure. VII.3 : Présence d'inclusions dans le cordon (Réf. [R51]).....	88
Figure. VII.4 : Présence de soufflures (Réf. [R51]).....	88
Figure. VII.5 : défaut d'alignement (Réf. [R51]).....	89
Figure. VII.6 : Mise en évidence de projections sur le cordon de soudure (Réf. [R27]).....	90
Figure. VII.7 : Mise en évidence de plusieurs défauts de soudure (Réf. [R53]).....	90
Figure. VII.8 : Mise en évidence de défauts dans un joint soudé (Réf. [R53]).....	91
Figure. VII.9 : Présence de caniveau et d'inclusions (Réf. [R25]).....	92
Figure. VII.10 : un excès de pénétration (Réf. [R27]).....	93
Figure. VII.11 : Un manque de pénétration (Réf. [R13]).....	93
Figure. VII.12 : Présence de plusieurs défauts de type fissurations (Réf. [R13]).....	94
Figure. VII.13 : Mise en évidence d'un manque de pénétration et d'une convexité (Réf.[R27]).....	95
Figure. VII.14 : Un nid de soufflures (Réf. [R25]).....	95
Figure. VII.15 : Un caniveau observé (Réf. [R25]).....	96
Figure. VII.16 : Présence des inclusions (Réf. [R25]).....	97

Liste des Tableaux

Tableau I.1 : représenté les défauts d'un cordon de soudure (Réf.[R20]).....	16
Tableau III.1 : Produits pour le contrôle par ressuage PT (Réf. [R3])	32
Tableau III.2 : Type de pénétrant selon le niveau de sensibilité (Réf. [R3]).....	33
Tableau III.3 : Type de pénétrant selon état de surface (Réf. [R2]).....	34
Tableau .IV.1 : Choix du type de produit révélateur en fonction de l'état de surface (Réf.[R5]).....	41
Tableau .IV.2 : Paramètres d'examen recommandés (Réf.[R5])	41
Tableau. IV.3 : Niveau d'acceptation en fonction de type d'indication (Réf.[R5])	42
Tableau .IV.4 : Techniques types d'aimantation par électroaimant (Réf.[R4]).....	43
Tableau .IV.5 : Techniques types d'aimantation par électrodes avec un courant d'aimantation (Réf.[R4]).....	44
Tableau .IV.6 : Techniques types d'aimantation par câbles flexibles ou bobines (Réf.[R4]).....	45
Tableau VI.1 : Niveaux d'examen d'un assemblage bout-à-bout (Réf.[R8]).....	70

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Soit une pièce mécanique qu'on veut contrôler ses caractéristiques ; il s'agit d'un outil, un élément structurel ou un matériau de construction. On définit l'expression « contrôle technique » pour désigner un ensemble d'examen, d'essais et de mesures scientifiques bien spécifiques à cette pièce et aux caractéristiques en question. Dans les domaines du génie civil et des travaux publics, et dans plusieurs autres domaines de la technologie (tels que : le génie mécanique, l'aéronautique, etc.), la production des ouvrages exige le plus souvent le recours au contrôle technique, cette mission est organisée par des textes législatifs et réglementaires établis par le gouvernement du pays. L'application des procédés de contrôle technique dans les domaines du génie civil et des travaux publics est encadrée par un ensemble de règlements techniques et de normes d'une grande utilité, ces documents présentent toutes les connaissances dont on a besoin pour bien accomplir la mission du contrôle technique.

Le présent mémoire de master s'intéresse au contrôle technique de qualité des joints soudés des structures de génie civil fabriquées en acier. Pour cette fin, les normes internationales ISO et européennes EN existent, elles ont l'objectif de présenter les procédés pratiques de contrôle technique des soudures des ouvrages en acier des domaines du génie civil (bâtiments, réservoirs, canalisations, mâts, etc.) et des travaux publics (ponts, tunnels, etc.), ce sont des procédés scientifiquement reconnus par les savants et experts. En plus des normes, il existe de nombreuses publications scientifiques et commerciales, liées au sujet du contrôle technique de qualité des joints soudés, en particulier pour les soudures des structures en acier.

La lecture dans les textes normatifs et la littérature scientifique fait ressortir de nombreux procédés et méthodes pratiques de contrôle technique des soudures pour les ouvrages en acier. Globalement parlant, on distingue deux catégories de procédés de contrôle technique : les procédés de *contrôle technique destructifs* et les procédés de *contrôle technique non destructifs*. Dans la première catégorie, les pièces contrôlées peuvent subir des fissures et des ruptures, autrement dit ; au bout d'un test de contrôle, une destruction est probable, souvent elle est nécessaire pour montrer les caractéristiques et mesures voulues. Cependant, dans la deuxième catégorie, désignée en bref par « **CND** », la pièce contrôlée ne subit pas de dommages, elle conserve son état initial et on peut continuer à s'en servir.

Dans la présente recherche, nous nous intéressons à la catégorie des **contrôles non destructifs CND** [en anglais (*Non-Destructive Testing* - NDT)]. Ce contrôle consiste à mettre en œuvre des méthodes d'investigation permettant de juger « sans destruction » l'état de santé d'une pièce mécanique, d'un élément structurel ou d'une soudure. L'objectif final de ce contrôle est de formuler un avis sur l'aptitude de cette pièce à remplir la ou les fonctions pour lesquelles elle a été conçue.

Il existe plusieurs méthodes de CND, les plus utilisées sont les suivantes :


- Contrôle visuel
- Contrôle par ressuage
- Contrôle par magnétoscopie
- Contrôle par ultrasons
- Contrôle par radiographie
- Contrôle par courants de Foucault

L'objectif principal du présent mémoire est de présenter les cinq premières techniques citées ci-dessus pour vérifier la qualité des joints soudés. Cette recherche est étude bibliographique qui explore l'état de l'art actuel dans ce domaine du savoir et de la technologie. Les documents scientifiques visés sont avant tout les textes normatifs ISO et EN, ensuite tout livre, article de recherche ou document utile pour présenter les techniques de CND anciennes et nouvelles, leurs domaines d'application, exigences en matériel et compétences humaines, limites d'usage et leur efficacité.

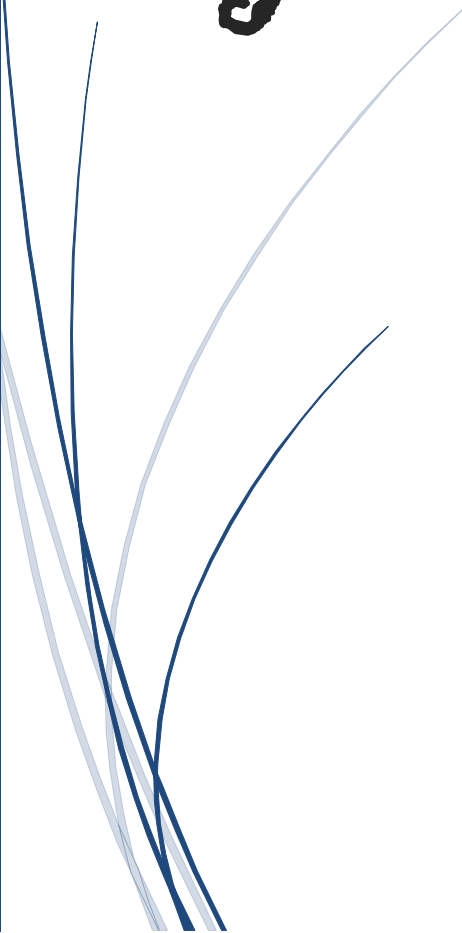
Le présent manuscrit se compose de sept chapitres :

- Dans le premier chapitre, nous donnons une synthèse des défauts les plus courants qui touchent les joints soudés
- Les cinq chapitres suivants sont destinés aux présentations des cinq techniques de contrôle non destructif : visuel (VT), ressuage (PT), magnétoscopie (MT), radiographie (RT) et les ultrasons (UT).
- Le septième chapitre est destiné aux aspects pratiques. Dans cette partie du mémoire nous présentons un ensemble de cas réels où des joints soudés ont été contrôlés par des techniques de CND. Ces cas pratiques sont tirés de notre lecture dans plusieurs ouvrages scientifiques spécialisés. Pour chacun des cas présentés, nous citons sa référence bibliographique ou sur Internet, nous donnons le nom de la méthode de CND appliquée, les observations des auteurs de la publication, et enfin nos commentaires. Nous insistons sur le type de défaut de soudage plutôt que sur les causes derrière ce (ou ces) défaut(s).

- Une conclusion générale clôture ce mémoire, elle contient nos commentaires sur les objectifs atteints, les difficultés de recherche rencontrées et des recommandations pour des travaux de recherche futurs dans ce domaine.
- En fin, nous annexons ce rapport par une liste des références bibliographiques et numériques utilisées pour réaliser ce mémoire de master.



*Chapitre I:
Défauts des
joints soudés*



I-1-Introduction

Dans ce premier chapitre, nous présentons les défauts de soudures, les plus courants que nous avons recueillis lors de notre recherche bibliographique à l'occasion du présent mémoire de master. Il s'avère que les défauts sont divers, on distingue des **défauts appelés fissurations, d'autres sont désignés par le terme : inclusions**. En outre, on distingue ce qu'on appelle : « La Pollution ferreuse », « Les retassures », « Les morsures et caniveaux », « Les effondrements », les défauts de formage du cordon et les défauts de pénétration. Cette liste n'est pas exhaustive, d'autres types de défauts de soudures peuvent exister.

Ci-dessous nous présentons les plus courants défauts de soudures que nous avons recueillis lors de notre recherche bibliographique à l'occasion du présent mémoire de master.

I-2- Différents types de défauts dans les joints soudés

Il y a plusieurs types de défauts qui peuvent être mis en évidence lors de l'inspection d'un joint soudé. Nous exposons les défauts les plus courants, leurs causes probables et les moyens de prévention contre ces défauts. Il s'agit des défauts suivants :

- Les fissurations : elles peuvent être situées dans le métal fondu ou dans le métal de base, elles peuvent être causées à froid ou à chaud,
- Les inclusions,
- La Pollution ferreuse,
- Les retassures,
- Les morsures et caniveaux,
- Les effondrements et trous,
- Les défauts de formage du cordon,
- Les défauts de pénétration

I-3- Les Fissurations :

1-3-1-Présentation des fissurations : Ce type de défaut de soudure est l'un des défauts les plus fréquents. Les fissurations sont causées par la présence de contraintes internes trop importantes à l'intérieur du métal soudé l'utilisation d'un métal d'apport incompatible avec le métal de base avec une épaisseur moins faible de cordon des tensions internes seront créées par le retrait thermique qui survient dans le métal d'apport, ce qui peut provoquer des fissures.

Les fissures dans un métal sont divisées en deux catégories selon l'endroit où elles apparaissent :

- Les fissures peuvent être **localisées dans le métal fondu** ; elles dépendent alors de la nature du métal d'apport et des conditions d'exécution de la soudure.
 - Les fissures peuvent être créées **dans le métal de base**, dans la zone de liaison; ces dernières sont généralement reliées à une plus faible soudabilité du métal.
- On peut aussi distinguer deux types de fissurations selon le moment où elles surviennent à la suite d'une soudure : **la fissuration à chaud** et **la fissuration à froid**. [10]

I-3-2- Fissurations à chaud : La fissuration à chaud se produit au moment de l'exécution quand la fusion de métal d'apport se produit. Ce défaut est susceptible d'apparaître en présence d'impuretés dans le métal de base telles que le soufre ou le phosphore.

Pour éviter ce type de défaut, le document [10] recommande ceci : « Si on doit souder un métal à risque il est recommandé d'utiliser des électrodes à flux basique, par ailleurs le métal d'apport doit être compatible avec le métal de base et le cordon de soudure doit être suffisamment large ».

D'autre part, si on relève trop brusquement l'électrode à la fin de la soudure, on peut provoquer l'apparition d'un cratère formant une cavité interne provoquant une fissure [23].

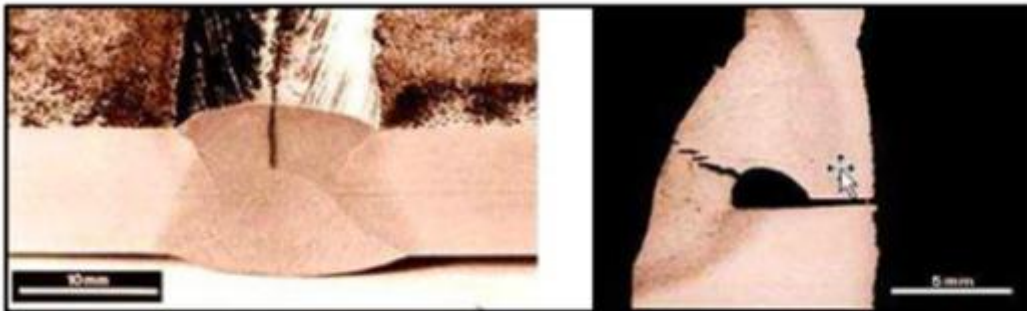


Figure I.1 : Fissuration à chaud d'un joint soudé (Réf. [R16])

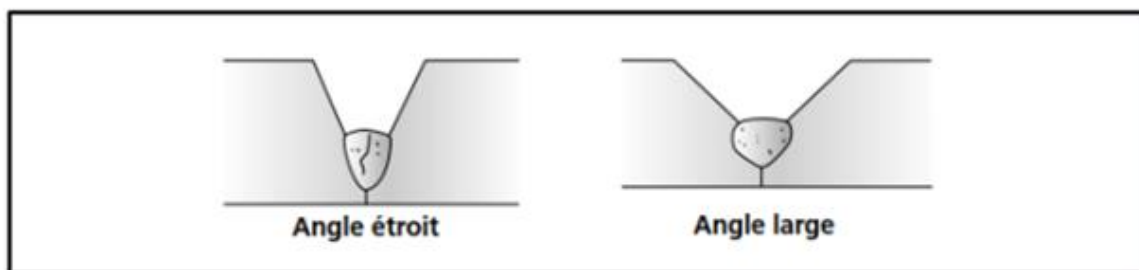


Figure I.2 : Fissuration à chaud d'un joint soudé (Réf. [R15])

I-3-2-1- Causes des fissures à chaud : D'après [23] et [16], les principales causes de l'apparition des fissures dans les joints soudés sont les suivantes :

- Il existe des contraintes excessives pendant le soudage. Elles sont dues soit à une énergie trop élevée, soit à un refroidissement trop rapide, ou autre cause.

- le volume du cordon est trop faible.

- le joint est trop étroit causé par une préparation des bords trop étroite.

- existence de déformations dues au retrait après soudage.

- les vitesses de soudage sont excessives.
- le métal d'apport est incompatible avec le métal de base.
- Il y a présence d'impuretés dans la soudure telles que le soufre et le phosphore à des niveaux élevés.

I-3-2-2- Remèdes contre les fissures à chaud: Plusieurs solutions peuvent être envisagées pour réduire ou supprimer la fissuration à chaud des soudures. On cite les solutions techniques suivantes :

- Adopter un préchauffage approprié des pièces avant leur soudage ou en cours de soudage.
- Eliminer toutes les sources d'hydrogène : calamine, rouille, graisse, peinture, humidité sur les pièces et surtout la présence d'humidité dans les enrobages. On recommande l'emploi des électrodes à basses teneur en hydrogène.
- Contrôler la température entre les passes du cordon dans le but de limiter le refroidissement.
- Effectuer une bonne préparation des joints. En effet, le chanfreinage va prévenir la fissuration car les joints trop étroits ou plus profonds risquent de se fissurer, tandis que des joints plus larges et de moindre profondeur sont les mieux protégés.
- Choisir un métal d'apport approprié.
- Choisir la bonne procédure de soudage qui diminue les défauts [23].

I-3-3- Fissuration à froid : La fissuration à froid peut apparaître des heures ou bien des jours après le soudage, elle survient dans la zone de soudage appelée « zone affectée thermiquement ZAT » ou dans les pièces soudées. Ce type de fissuration est causé par l'influence d'hydrogène dans la soudure ou par des tensions internes résiduelles importantes. En effet, les aciers à forte teneur en carbone de même que les aciers faiblement alliés sont plus susceptibles de subir la fissuration à froid [20].

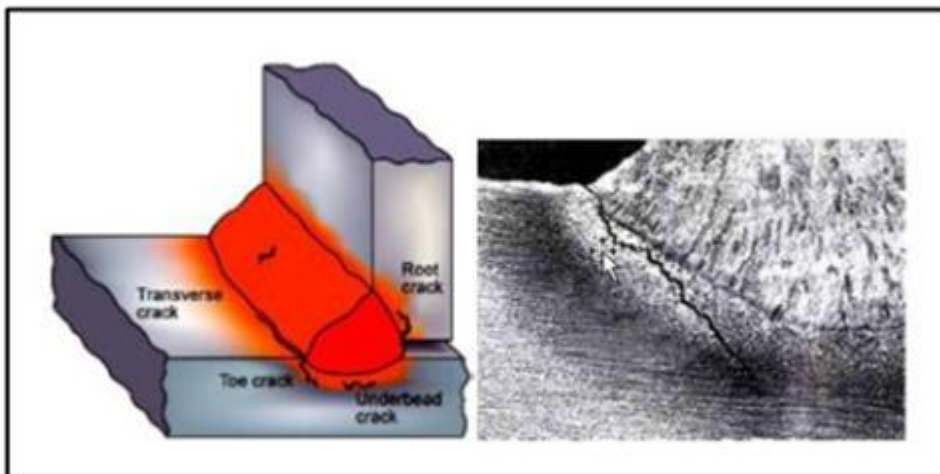


Figure I.3 : Mise en évidence des fissures à froid (Réf.[R23])

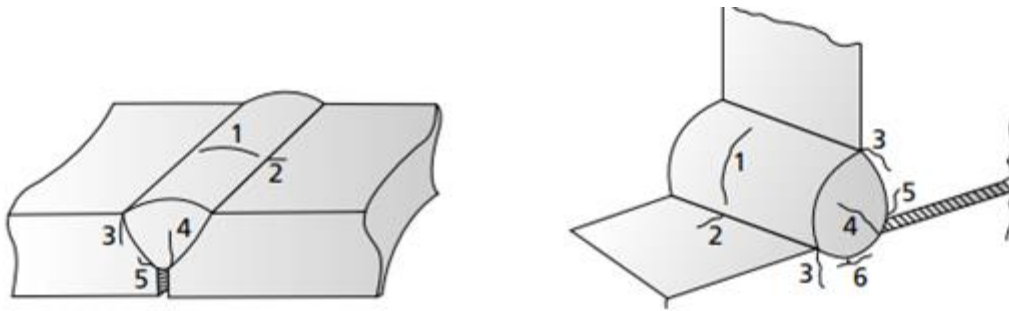


Figure I.4 : Types de fissures à froid (Réf.[R15])

I-3-3-1- Causes des fissures à froid : Il y a plusieurs facteurs qui peuvent causer la fissuration à froid d'une pièce. D'après [16] et [23], ces facteurs d'influence sont les suivants :

- La présence d'hydrogène, due à l'humidité qui était dans l'air, sur le joint ou bien sur les pièces soudées,
- La trempabilité de métal d'apport reliée au carbone équivalent,
- Le refroidissement rapide de la pièce,
- La présence de défauts à la surface de la pièce (inclusions, soufflures, trop grande épaisseur de la soudure, caniveau, etc.),
- Les tensions internes résiduelles importantes,
- De grands écartements, un régime thermique faible ou manque de préchauffe peuvent également être des causes aux fissurations.

I-3-3-2- Remèdes contre les fissures à froid : Toujours D'après [16] et [23], parmi les meilleures solutions pour éviter la fissuration à froid, on cite ce qui suit :

- exécuter un préchauffage suffisant des pièces à souder pour évaporer l'hydrogène contenu dans l'humidité présente sur la pièce,
- choisir des électrodes préchauffées à basses teneur en hydrogène (basiques) ; donc la méthode de soudure peut diminuer la possibilité de production des fissures à froid,
- Pour les pièces susceptibles de subir une fissuration à froid, il est conseillé de les refroidir très lentement pour éviter l'apparition de tensions internes favorisant l'apparition des fissures,
- Entreposer les électrodes dans un four au chaud.

I-4- Soufflures et piqures

I-4-1- Présentation des soufflures et piqures : Les **soufflures** sont des défauts creux d'une forme sphérique, ils sont formés par la présence de gaz occlus résultants des réactions chimiques à la fois dans le métal des pièces, dans le métal d'apport et dans les enrobages [10]. Les **piques** sont des **soufflures débouchantes**, donc elles sont visibles en surface.

L'humidité des pièces et des électrodes peut en être la cause, il faudra donc utiliser des aciers calmés ou sécher les pièces et les électrodes.

Les soufflures peuvent se présenter sous les formes suivantes :

- des soufflures sphériques.
- des soufflures vermiculaires disposées les unes à la suite des autres,
- des piqures.

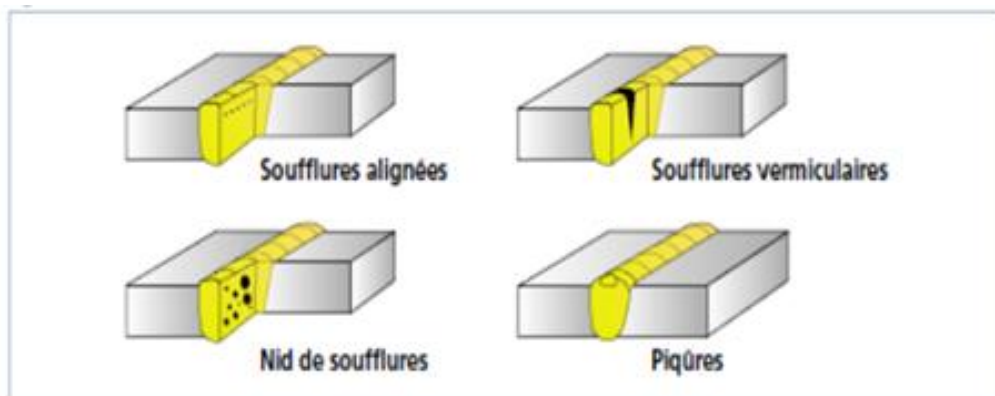


Figure I.5 : Types de soufflures d'après (Réf.[R16])

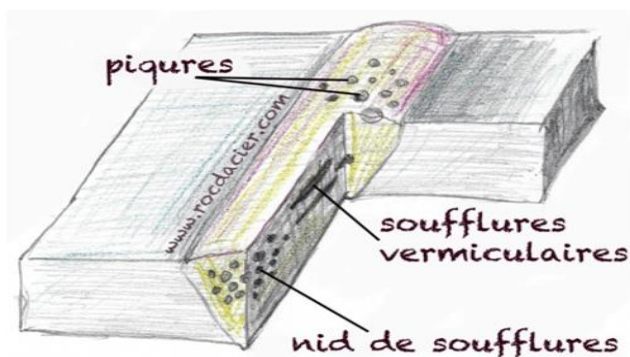


Figure I.6 : Types des soufflures d'après (Réf.[R28])

I-4-2- Causes des soufflures : Selon [16], les soufflures peuvent être causées par plusieurs parasites comme suit:

- Soit par la présence de courants d'air ;
- Sachant que généralement on exécute une zone gazeuse de protection dans la zone de soudage, et c'est le manque de ce gaz qui a une influence pour provoquer la soufflure ;
- S'il y a présence d'une substance graisseuse sur le métal de base ou sur le métal d'apport, cette substance peut fondre lors de l'opération et se lier après avec le métal d'apport ;
- Si l'arc de soudage est trop long et le courant de soudage est trop faible ; ou si la vitesse de soudage est plus grande ;
- Si le débit de gaz de protection est trop faible ;
- Si l'angle de soudage n'est pas correct, ce qui entraîne une mauvaise protection gazeuse
- S'il y a des impuretés dans le joint à souder.

I-4-3 -Remèdes contre les soufflures : Toujours d'après [16], il est possible de prévenir les soufflures en s'assurant des points suivants :

- que la surface du métal de base est propre,
- que l'équipement utilisé est propre,
- avoir une bonne fusion,
- que l'intensité du courant électrique ne soit pas trop faible et que la vitesse de soudage ne soit pas trop élevée,
- éviter le contact entre l'électrode et le métal de base.

I-5- Les inclusions :

I-5-1- Définition et types des défauts appelés inclusions : Les inclusions désignent l'incorporation dans le cordon de soudage d'un composé étranger. On distingue différents types d'inclusions : inclusions de laitier, inclusions solides et inclusions de flux.

a) Inclusion de laitier : C'est un résidu de laitier emprisonné dans le cordon de soudure, ces inclusions peuvent avoir deux aspects:

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

b) inclusions solides : c'est un corps solide étranger emprisonné dans la masse de métal fondu. Il est causé par le manque de nettoyage des cordons ou par un piquage mal fait du laitier dans le cas du soudage multi-passes.

c) inclusions de flux : c'est un résidu de flux emprisonné dans la soudure. Ces inclusions peuvent être alignées isolées ou distribuées de façon aléatoire.

I-5-2-Causes des divers types d'inclusions : Pour les trois types d'inclusions précités, les causes derrière leurs apparitions sont les suivantes :

- Un mauvais écartement à la racine.
- Les impuretés situées dans le bain de fusion.

- Il y a un manque d'élimination du laitier entre passes d'une soudure multi-passes.
- Les chanfreins sont trop étroits.
- Il y a un mauvais décrochage entre passes.
- Il y a un mauvais choix de l'électrode.
- Il y a un mauvais réglage de l'intensité du courant électrique.
- Il y a fonte de l'électrode causée par une chaleur trop élevée [16], [10]

I-5-3- Prévention contre les inclusions solides, de laitier et de flux : Pour la prévention de ces défauts, il faut assurer les tâches suivantes ([16], [10]):

- bien positionner les pièces,
- bien nettoyer le métal de base sur tout entre les cordons,
- éliminer suffisamment le laitier entre passes,
- appliquer une bonne chaleur de soudage,
- bien disposer les cordons dans la soudure multi-passes.

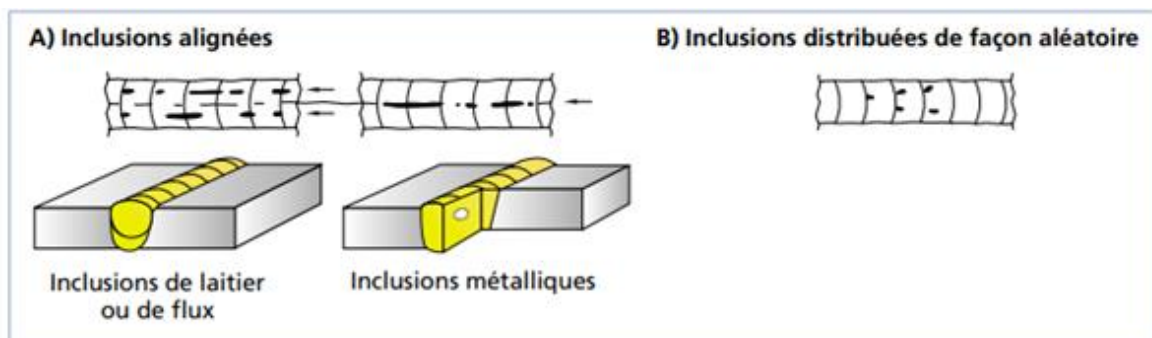


Figure I.7: Types d'inclusions (Réf.[R22])

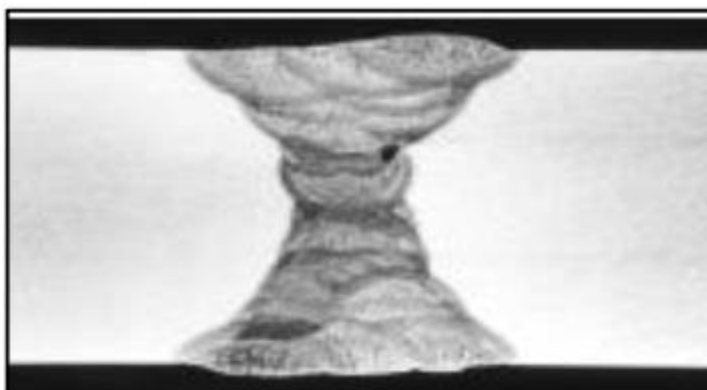


Figure I.8 : inclusions de laitier (Réf.[R23])

I-6- Pollution ferreuse : La pollution ferreuse est une corrosion des aciers inoxydables causée par la destruction de la couche superficielle, elle résulte généralement de ce qui suit :

- de l'utilisation d'outils qui ne sont pas en acier inoxydable (brosse ou autres) pendant l'usinage ;
- de la mise en forme ou le nettoyage dans d'autres cas ;
- parmi ces conséquences, on cite la survenue des projections de métal fondu lors des opérations de soudage.

I-7-Retassures :

I-7-1-Définition et types de défauts appelés retassures : Lorsque le métal se refroidit, il est possible que le cordon ne se referme pas de façon uniforme en fin de soudure, le creux formé est appelé « retassure ». Les retassures ne sont visibles qu'au microscope situées en profondeur (retassure interne) ou en surface (retassure externe) des masses métalliques [20]. On distingue les types de retassures suivants présentés par les figures I.9 ci-dessous :

- a) Une retassure à la racine apparaît sous la soudure au moment de la solidification
- b) Une retassure de cratère est une cavité dans une reprise non corrigée avant l'exécution de la passe suivante.

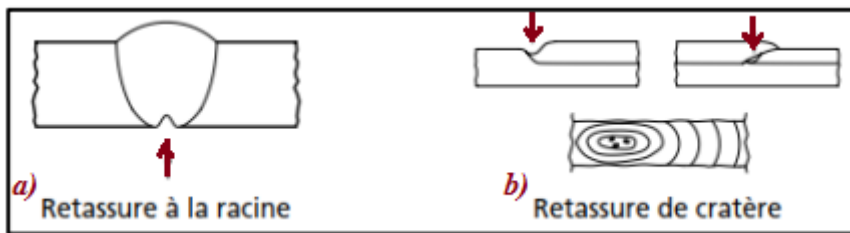


Figure I.9 : Différents types de retassures (Réf.[R16])

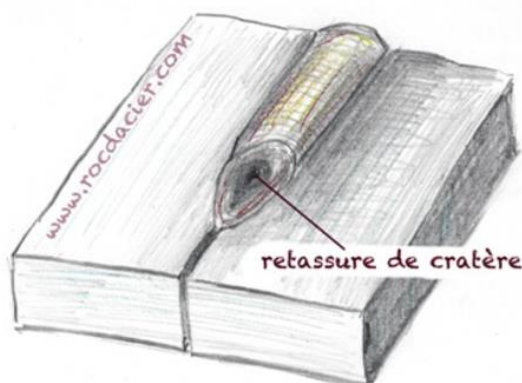


Figure I.10: Schéma définissant les retassures (Réf.[R28])

I-7-2-Causes possibles des retassures : D'après [16], ces défauts sont causés par un ou plusieurs facteurs suivants :

- ✓ Joints trop étroits.
- ✓ Présence d'impuretés dans la soudure (soufre, phosphore).
- ✓ Métal d'apport incompatible avec le métal de base.
- ✓ Cordon trop petit Un arrêt trop brusque de l'arc électrique.

I-7-3-Moyens de prévention contre les retassures : Toujours, d'après [16], il est conseillé de respecter les règles techniques suivantes pour éviter l'apparition des retassures :

- ✓ Effectuer une bonne préparation des joints,
- ✓ Choisir un métal d'apport approprié
- ✓ Bien nettoyer de la soudure
- ✓ Bien mesurer les angles des chanfreins.
- ✓ Préchauffer et chauffer en cours de soudure.
- ✓ Refroidir lentement.

I-8- Morsures et Caniveaux

I-8-1- Définitions des Morsures : Ce sont des défauts ponctuels caractérisé par le creusage ou une insuffisance du métal de base sur une partie du cordon. [16]

I-8-2- Définition des Caniveaux : Un caniveau ressemble à celui d'une route, dans une soudure il s'agit d'un affouillement ou creux sur une grande partie de la longueur de la soudure.

Les caniveaux peuvent être en surface, entre le cordon et le métal de base, ils peuvent aussi être à la racine. [16]

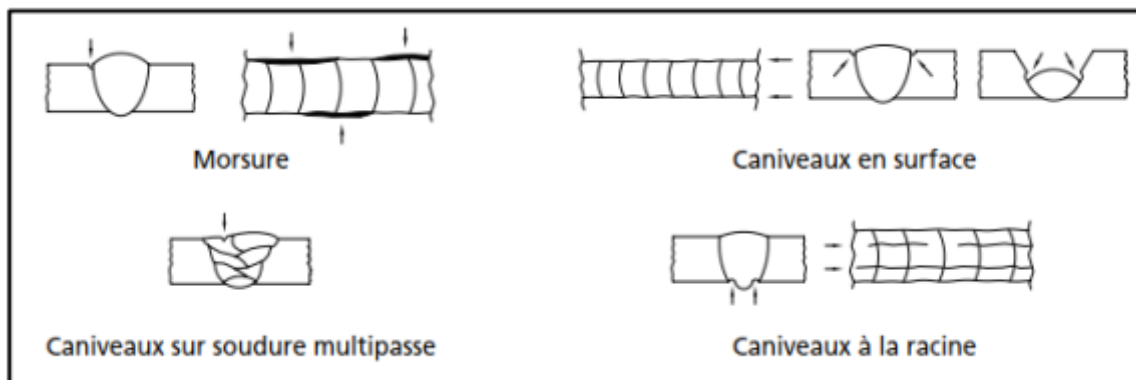


Figure I.11: Différentes types de caniveaux (Réf.[R23])

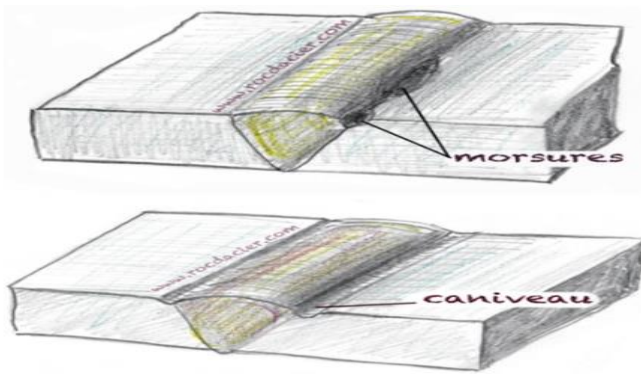


Figure I.12: Présentation des morsures et caniveaux (Réf.[R28])

I-8-3- Causes des morsures et caniveaux : D'après [16], ces défauts sont causés par un ou plusieurs facteurs suivants :

- Une trop grande énergie de soudage,
- Une position défectueuse de l'électrode dans le cas des cordons d'angle,
- Une trop grande chaleur du métal d'apport par rapport à l'épaisseur ou à la densité du métal de base,
- Un mauvais angle de soudage,
- La longueur d'arc est incorrecte,
- Un courant trop fort,
- Une vitesse d'avance trop élevée favorisant l'apparition de caniveaux.

I-8-4-Moyens de prévention : Toujours, d'après [16], il est conseillé de respecter les règles techniques suivantes pour éviter l'apparition des morsures et caniveaux :

- ✓ corriger l'angle d'accès de l'électrode.
- ✓ diminuer l'intensité du courant.
- ✓ augmenter la longueur d'arc.
- ✓ réduire l'énergie de soudage.

I-9- Effondrements et trous

I-9- 1-Définition et types des défauts appelés effondrements : On définit le manque de métal à la surface du cordon par le mot : effondrement. Ce manque peut être localisé ou continu ; c'est le résultat de l'affaissement du métal déposé dû à une fusion excessive. On distingue différents types d'effondrements comme suit :

- Effondrement en corniche,
- Effondrement à plat ou au plafond,

- Effondrement **d'angle** de la soudure,
- Effondrement **d'arête**.

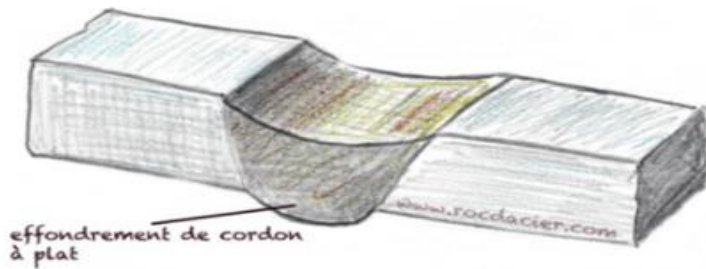


Figure I.13: Schéma d'un effondrement (Réf.[R28])

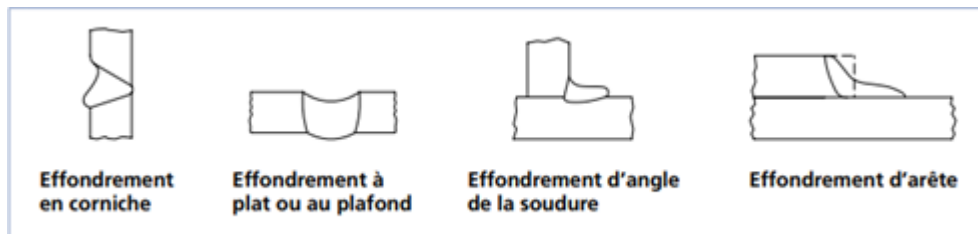


Figure I.14: Types des effondrements (Réf.[R23])

I-9-2-Causes possibles des effondrements: Selon [16], les effondrements peuvent être causés par les facteurs suivants :

- La chaleur est trop élevée,
- La soudure est effectuée trop lentement ; c'est-à-dire que la vitesse d'avance est trop lente,
- Le courant est trop fort.

I-9-3- Remèdes contre les effondrements: Selon [16], pour éviter les effondrements, il faut :

- augmenter la vitesse d'avance.
- réduire l'intensité du courant.

I-10- Défauts de formage du cordon

I-10-1- Définition : Les défauts de formage d'une soudure sont des défauts géométriques du cordon, ils sont liés à la mauvaise forme de la surface du cordon. Le cordon peut être très convexe ou très concave.

I-10-2- Défaut de convexité : Il s'agit d'un excès de matière sur la longueur de la soudure, ou localisé. Les normes imposent des limites d'épaisseur pour le cordon. Si le cordon est très bombé et dépasse ces limites, donc il y a défaut de convexité. [20]

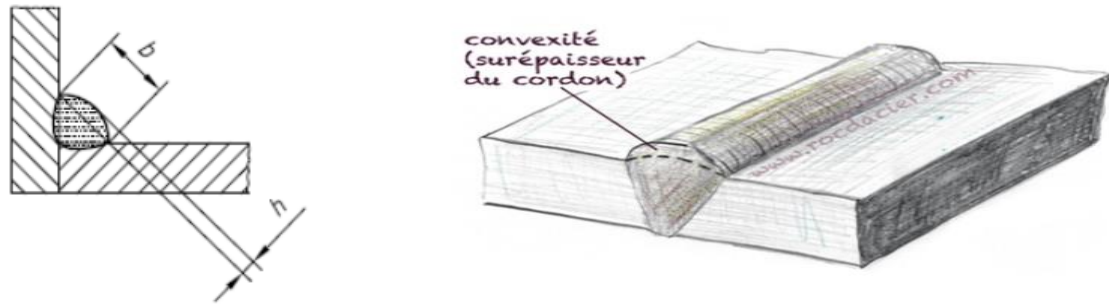


Figure I.15 : convexité dans un joint soudé (Réf.[R28])

I-10-3- Défaut de concavité : Il s'agit d'un manque de matière sur la longueur de la soudure, ou localisé. Si le cordon est trop creux et dépasse les limites des normes, alors il y a défaut de concavité. [20]

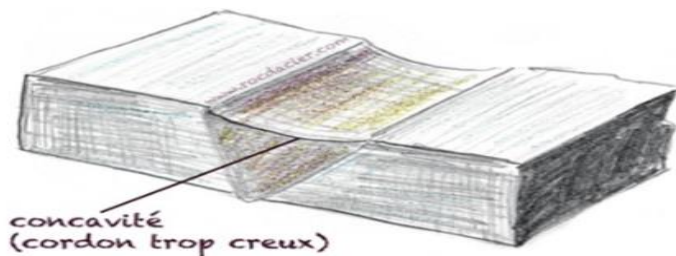


Figure I.16 : concavité dans un joint soudé (Réf.[R28])

- **Tableau de Présentation des défauts d'aspect d'un cordon de soudure :** Dans [20], le tableau suivant a été rédigé pour montrer les causes et remèdes aux défauts d'aspect des cordons de soudure.

Tableau I.1 : représenté les défauts d'un cordon de soudure (Réf.[R20])

Aspect du cordon	Cordon trop large	Cordon trop étroit	Cordon irrégulier
Causes possibles	<ul style="list-style-type: none"> - Vitesse d'avance trop lente - Mauvais angle de soudure - Arc trop long 	<ul style="list-style-type: none"> - Vitesse d'avance trop rapide 	<ul style="list-style-type: none"> - Intensité du courant trop faible - Mauvais angle de soudure - Arc irrégulier - Mouvements du soudeur non stable
Moyens de prévention	<ul style="list-style-type: none"> - Augmenter la vitesse. - Corriger 	<ul style="list-style-type: none"> - Diminuer la vitesse. 	<ul style="list-style-type: none"> - Augmenter l'intensité - Corriger l'angle. - Vérifier que le métal de base et l'électrode

	l'angle. – Rapprocher la torche (ou l'électrode).		sont propres, que l'électrode est appropriée, que le courant est constant, que la haute fréquence fonctionne et qu'il n'y a pas de matériel magnétique près de l'arc. – S'assurer que la vitesse d'avance et la longueur d'arc sont stables et ne varient pas.
--	--	--	---

I-10-4- Défaut d'alignement: Lorsque les pièces sont mal bridées (fixées), on peut avoir un défaut d'alignement.

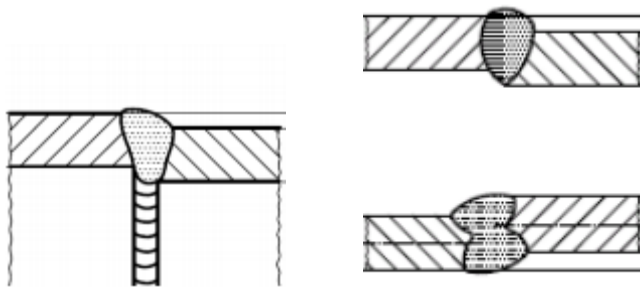


Figure I.17 : Défaut d'alignement d'un cordon de soudure (Réf.[R15])

I-10-5- Déformations angulaires : Les déformations importantes de l'opération de soudage peuvent aussi entraîner un défaut angulaire. Les pièces assemblées ne respectent pas la forme souhaitée ; voir les figures I.18 ci-dessous.

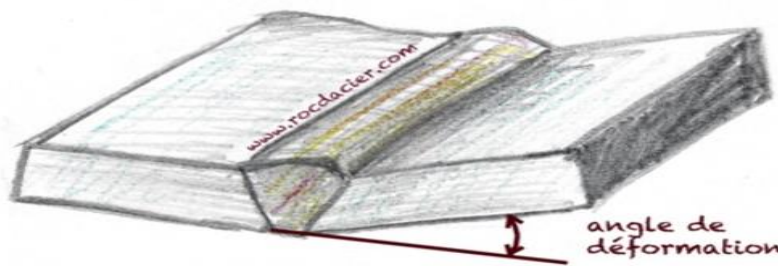


Figure I.18 : angulaires dans un joint soudé (Réf.[R28])

I-11- Débordements du cordon :

I-11-1- Définition des débordements de soudures : Il s'agit d'un excès de métal déposé à la surface du métal de base, mais qui ne se lie pas avec ce dernier. Les figures I.19 (a et b) montrent de type de défaut.

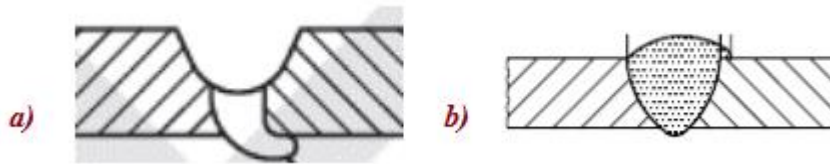


Figure I.19 : débordements du cordon (Réf.[R15])

I-11-2- Causes des défauts appelés débordements : D'après (Réf. 16), les débordements sont causés par un ou plusieurs des facteurs suivants :

- Vitesse d'avance trop lente,
- Mauvais angle de soudage,
- Joints mal nettoyés.

I-11-3-Moyens de prévention contre les défauts appelés débordements : On recommande les dispositions techniques suivantes pour prévenir les débordements (Réf. 16):

- Augmenter la vitesse,
- Modifier l'angle de soudage,
- S'assurer que les joints sont propres.

I-12- Défaut de pénétration :

I-12-1- Définition du manque de pénétration : Le défaut exprimé par l'expression « manque de pénétration » se caractérise principalement par une zone non fondue à la racine de la soudure, un jeu trop étroit qui engendre un manque de pénétration, donc la liaison entre les pièces ne sera pas réalisée dans le sens de l'épaisseur, comme le montre la figure I.20

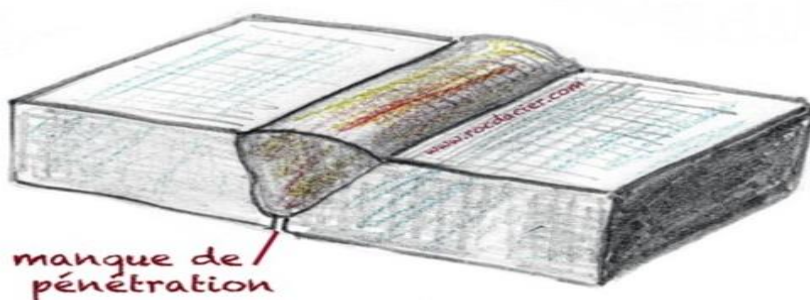


Figure I.20 : Manque de pénétration dans un cordon de soudure (Réf.[R28])

I-12-1-1- Causes possibles du manque de pénétration : D'après (Réf. 16), le manque de pénétration est causé par un ou plusieurs des facteurs suivants :

- Vitesse d'avance trop élevée

- Intensité du courant trop faible
- Chanfrein trop étroit ou absent
- Métal de base trop épais et froid
- Jeu de soudage trop petit (pièces trop rapprochées)

I-12-1-2- Moyens de prévention contre le manque de pénétration : On recommande les dispositions techniques suivantes pour prévenir le manque de pénétration (Réf. 16):

- Diminuer la vitesse d'avance.
- Augmenter l'intensité
- Préchauffer les pièces
- Souder plus doucement
- Élargir le chanfrein ou modifier l'écartement des pièces

I-12-2-Définition du défaut appelé excès de pénétration : L'excès de pénétration dans un joint soudé correspond à un surplus de métal fondu à la base du joint soudé. Un jeu trop étroit engendrera un manque de pénétration alors qu'un jeu trop important risque de créer un excès de pénétration, un jeu trop important risque de créer un excès de pénétration ; voir la figure I.21 suivante.

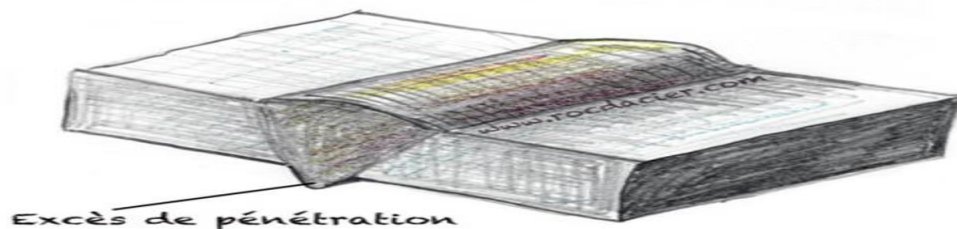


Figure I.21 : Excès de pénétration (Réf.[R28])

I-12-2-1- Causes des défauts d'excès de pénétration : D'après (Réf. 16), l'excès de pénétration est causé par un ou plusieurs des facteurs suivants :

- Vitesse d'avance trop lente
- Intensité du courant trop forte
- Mauvaise préparation des bords
- Trop de distance entre les pièces
- Arc trop court

-Distance électrode et pièce trop courte

I-12-2-2- Moyens de prévention contre les défauts d'excès de pénétration: On recommande les dispositions techniques suivantes pour prévenir l'excès de pénétration (Réf. 16):

- Augmenter la vitesse d'avance.
- Réduire l'intensité
- Utiliser le joint approprié.
- Rapprocher la torche de la pièce pendant le soudage
- Rapprocher les pièces.
- Éloigner la torche.

I-13- Collage ou manque de fusion

I-13-1- Définition des défauts appelés « collage » ou « manque de fusion » : Ce type de défaut de soudure apparaît lorsque le métal de base est non fondu ce qui crée un manque de liaison entre le métal déposé et le métal de base. Le manque de fusion diminue la section efficace de la soudure. Le collage peut être latéral, entre passes ou à la racine de la soudure

I-13-2- Types de défauts appelés « manque de fusion » : Les figures I.22 (a, b, c et d) montrent les types de défauts nommés « manque de fusion ».

- a) Manque de fusion des bords à souder
- b) Manque de fusion entre les passes.
- c) et d) Manque de fusion à la racine.

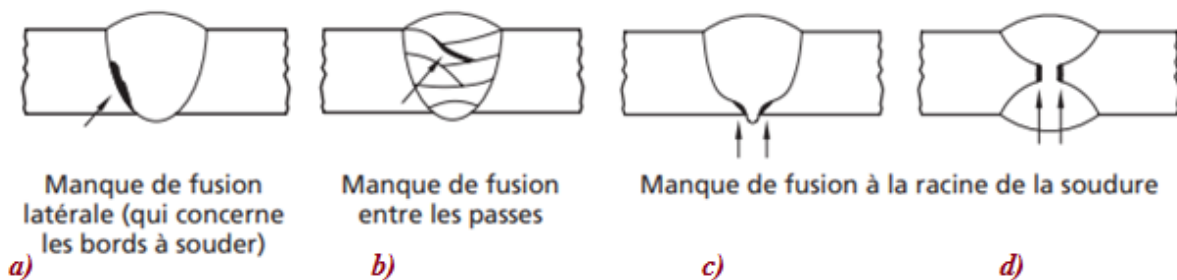


Figure I.22 : Défauts de collage ou manque de fusion dans une soudure (Réf.[R15])

I-13-3- Causes des défauts de collage : D'après (Réf. 16), les défauts de collage sont causés par un ou plusieurs des facteurs suivants :

- Mauvaise préparation des bords
- L'arc n'ayant pas directement atteint la racine (ou la passe précédente) et le côté opposé du chanfrein,

- Intensité le courant de soudage est trop faible
- La vitesse est trop grande.
- Angle du chanfrein trop étroit
- Mauvaise orientation des électrodes

I-13-4- Moyens de prévention contre les défauts de collage : On recommande les dispositions techniques suivantes pour prévenir les défauts de collage (Réf. 16):

- Un bon préchauffage des pièces épaisses permet de prévenir ce défaut,
- Une bonne préparation des bords,
- Il faut augmenter l'intensité du courant électrique,
- Il faut réduire la vitesse d'application du cordon de soudure,
- Veiller à ce que l'angle du chanfrein soit large.

I-14- Les Projections

I-14-1-Définition des défauts appelés « projections » : Une projection est une éclaboussure de métal en fusion projeté pendant le soudage et qui adhère au métal de base ou au cordon déjà solidifié.

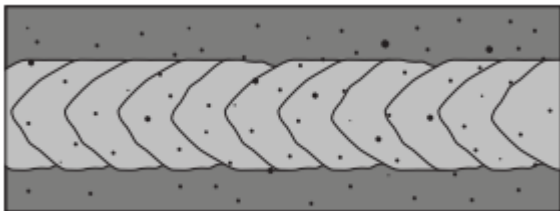


Figure I.23 : Défaut de projection (ou de collage) dans un joint soudé (Réf.[R16])

I-14-2- Causes de l'apparition des projections : D'après [16], les projections dans une soudure sont causés par un ou plusieurs des facteurs suivants :

- L'intensité du courant est trop forte,
- La longueur d'arc trop importante,
- Instabilité de l'arc,
- Mode de transfert inapproprié,
- Le soufflage de l'arc.
- Un mauvais débit et certains gaz de protection peuvent aussi favoriser l'apparition de projections.

I-14-3- Moyens de prévention contre les projections : Toujours d'après [16], il est conseillé de respecter les dispositions techniques suivantes pour prévenir les défauts nommés projections :

- Changer le mélange de gaz de protection.
- Changer la longueur de l'arc.
- Changer le mode de transfert.
- Réduire l'intensité du courant.



Chapitre 19
Contrôles
Visuels



II-1 Introduction :

Le contrôle visuel est désigné par le symbole normalisé (VT) (en anglais : *The Visual Testing*) (Réf. EN 12062-2002 ; tableau 1). C'est le procédé de contrôle technique non destructif le plus simple et le plus général. Pour inspecter les joints soudés, le VT permet de déceler les défauts en surface des soudures. Le contrôle visuel porte sur l'aspect et les défauts géométriques des cordons (dimension de la gorge, caniveaux, surépaisseur, fissure ...). En général, le contrôle visuel est réalisé à l'œil nu, il est amélioré par l'utilisation d'un matériel tel que : les jauges de mesure, la loupe, l'endoscope ...etc.

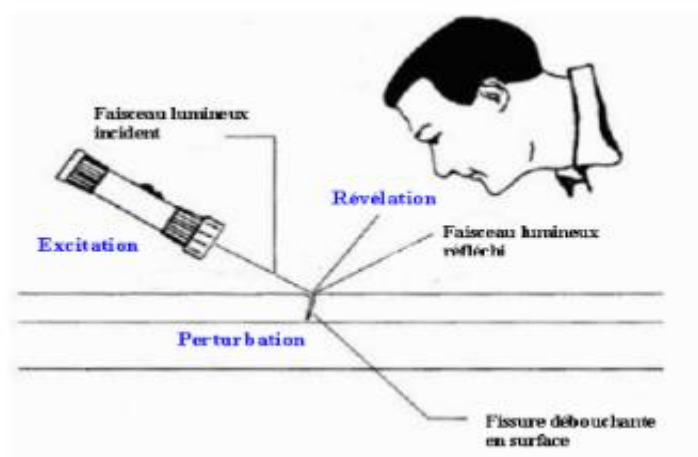


Figure .II.1 : Principe du contrôle visuel (Réf.[R29])

II-2- Conditions de réussite du contrôle visuel : Pour avoir de bons résultats, le contrôle visuel exige le respect d'un ensemble de conditions ; il s'agit de :

- L'œil et ses limitations : L'œil est un capteur optique certes remarquable à bien des points de vue mais possédant toutefois des limitations dont il faut tenir compte en contrôle non destructif.

L'accès doit être suffisant pour placer l'œil à moins de 600 mm de la surface et à un angle au moins égal à 30 (figure.II. 2) [1]

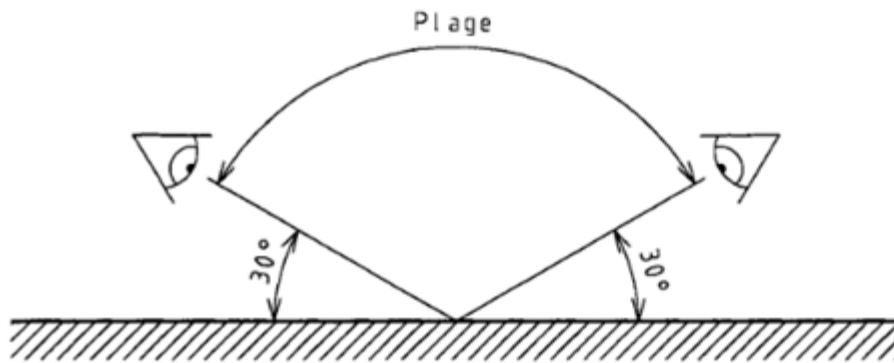


Figure .II.2: Accessibilité pour le contrôle (Réf.[R1])

- L'éclairage :

Les conditions d'éclairage sont essentielles pour la fiabilité du contrôle optique. Il s'agit d'abord de se placer dans les conditions énergétiques permettant à l'œil de travailler avec la meilleure acuité ; ainsi un éclairement de plus de 350 lx est exigé. Il s'agit ensuite d'adapter le type et l'orientation de l'éclairage pour améliorer le contraste. [1]

- Le personnel de contrôle : selon [1] et [17]

- il doit avoir des connaissances suffisantes sur les normes et les règles à suivre pour bien mener une opération de CND,

- il doit bien être informé du mode opératoire de la technique de soudage utilisée,

- il doit avoir une bonne acuité visuelle. Pour cela, un examen de vérification de cette performance doit être effectué tous les 12 mois,

- il doit respecter les normes en vigueur relatives à la conduite du contrôle visuel et les conditions d'acceptance des soudures métalliques.

II-3- Equipements utilisés :

- ✚ La règle droite avec graduation de 1 mm au moins,

- ✚ Le pied à coulisse,

- ✚ Un jeu de jauge et jauge de rayon,

- ✚ L'endoscope d'éclairage,

- ✚ La loupe grossissant de 2 fois à 5 fois.



Figure .II.3: Loupe (Réf.[R30])



Figure .II.4: Règle droite (Réf.[R31])



Figure .II.5 : Jauge de rayon (Réf.[R32])




Figure .II. 6: Endoscope (Réf.[R33])

II-4-Avantages du contrôle visuel « VT » par rapport aux autres procédés de CND :

- ✚ Le VT est plus simple à réaliser,
- ✚ Le VT est plus rapide à faire,
- ✚ Le VT est peu couteux,
- ✚ Le VT est fournit une information directe.

II-5-Inconvénients du contrôle visuel « VT » par rapport aux autres procédés de CND :

- ✚ Il ne préjuge pas de la présence des défauts internes,
- ✚ Il dépende de l'expérience de l'opérateur à mener et à interpréter les résultats,
- ✚ Les mesures obtenues sont peu précises,
- ✚ Il est souvent subjectif.



Chapitre 111
Contrôle par
ressuage



III-1-Principe du ressuage :

Le contrôle par ressuage est désigné par le symbole normalisé (PT) (en anglais : *The Penetrant Testing*), c'est un examen qui permet de détecter les défauts débouchant en surface des pièces métalliques non poreuses et non absorbantes, donc il est parfaitement valable pour inspecter les pièces métalliques. Ce contrôle est réalisé à l'aide de produits chimiques liquides, appelés : les pénétrants. Ces produits, à très faible tension superficielle, pénètrent par capillarité dans les défauts débouchant en surface. Lorsqu'on élimine l'excès de pénétrant sur la surface des pièces, l'observation visuelle des défauts est réalisée par l'application d'un produit révélateur. Celui-ci est une fine couche de poudre constituée des tubes capillaires microscopiques qui pompent le pénétrant retenu dans les discontinuités des défauts

-Après élimination de l'excès de pénétrant de la surface, on lave cette surface à examiner et on la laisse sécher. C'est ainsi que le pénétrant contenu dans les discontinuités donne au technicien contrôleur une indication clairement visible des discontinuités et défauts, ainsi il pourra évaluer leur degré de gravité [3]

III-2-Précautions pour une manipulation réussite : Selon (Réf.2) et (Réf.3), (Réf.18), et il est recommandé de respecter certaines mesures :

- Le temps laissé à l'effet de révélation, c'est-à-dire au produit révélateur placé, doit être compris entre 10 et 30 minutes.
- Effectuer un nettoyage préliminaire de la surface à contrôler, ce qui améliore considérablement les résultats de l'examen.
- Les produits et équipements de l'essai PT doivent être utilisés avec précaution.
- Le temps de pénétration peut varier de 15 à 30 minutes. Le temps varie selon le type de pénétration.
- La température de surface doit être comprise entre 10°C et 50°C, pour réduire la pénétration de l'humidité dans les discontinuités de la surface à examiner.
- Lors de l'inspection des joints soudés, la largeur de la zone soumise à contrôle doit inclure le métal déposé et la zone adjacente du métal de base jusqu'à une distance de 10 mm de part et d'autre du joint.

III-3-Sécurité : Les produits utilisés dans le test de pénétration sont des nocifs et inflammables, donc assez dangereux pour le technicien contrôleur et son entourage. Par conséquent, certaines mesures de sécurité doivent être respectées conformément à la (Réf.3):

- ✓ Il faut éviter le contact direct des produits avec la peau,
- ✓ Les zones de travail doivent être convenablement ventilées et situées loin des sources de chaleur excessive et des flammes,
- ✓ En cas d'utilisation aux sources ultraviolets UV-A, on doit éviter un contact directement avec les yeux.

III-4- Mode opératoire :

1) Préparation et nettoyage des surfaces à contrôler : La technique de nettoyage à mettre en œuvre doit être choisie en fonction de la nature de la contamination (peintures et vernis, produits de corrosion, graisses, huiles ...)[2]

Un nettoyage doit garantir que la surface contrôlée est exempte de résidus ce qui permet aux pénétrants d'entrer dans toute discontinuité. (Figure .III.1)



Figure.III.1 : nettoyage de pièce
(Réf.[R34])

2) Application du pénétrant : L'application du pénétrant liquide sur les pièces préalablement nettoyées est pratiquée par un des procédés suivants :

- ✓ Par immersion,
- ✓ Par pulvérisation,
- ✓ A la brosse,
- ✓ Par aspersion.

D'après (EN 571-1) , La durée de contact entre la surface de la pièce et le pénétrant dépend:

- ✓ De la nature du liquide d'imprégnation utilisé,
- ✓ De la sensibilité du contrôle,
- ✓ De la température de la pièce.



Figure.III.2 : Application du pénétrant
(Réf.[R34])

3) Elimination de l'excès de pénétrant en surface des pièces : L'excès de pénétrant doit être éliminé par un rinçage approprié ; suivant la nature du liquide pénétrant la technique d'élimination sera différente, nous distinguons trois types de produits :

- ✓ Pénétrants lavables par un solvant spécial
- ✓ Pénétrants pré-émulsionnés directement lavables à l'eau
- ✓ Pénétrants à post-émulsion lavables à l'eau après application d'un émulsifiant.



Figure .III.3: Elimination de l'excès de pénétrant
(Réf.[R34])

4) Application du révélateur : Il y a deux types de révélateurs : secs et liquides

- Pour les révélateurs secs l'application se fait par :
 - Pulvérisation mécanique à l'aide d'un pistolet à l'air comprimé,
 - Création d'un brouillard de poudre dans une cabine étanche aménagée à cet effet,
 - Pulvérisation électrostatique,

- Pour les révélateurs liquides l'application se fait par :
 - Immersion (quelques secondes),
 - Pulvérisation mécanique ou électrostatique (pour les non aqueux).



Figure .III.4 : Application du révélateur (Réf. [R34])

5) Observation des indications de défauts :

Enfin, il procède à l'observation des défauts des pièces. La surface d'essai doit être inspectée à la lumière du jour ou sous une lumière blanche artificielle avec un éclairage non moins de 500 lux sur la surface de la pièce testée. Les conditions d'observation doivent être telles que l'éblouissement et les reflets sont évités.



Figure .III. 5 : observation des défauts (Réf.[R34])

III-5-Les produits utilisés :

- 1-Solvant
- 2- Pénétrant (coloré)
- 3- Révélateur (liquide)



Figure .III.6 : Solvant (Réf.[R35])



Figure .III. 7 : Pénétrant rouge (Réf.[R35])



Figure .III. 8 : Révélateur blanc (Réf.[R35])

III-5-1- Classification normalisée des produits pour l'essai PT : Plusieurs produits peuvent être utilisés pour réaliser l'essai PT. La norme [3] classe les pénétrants en trois types (I – II – III), elle classe les produits d'élimination de l'excès de pénétrant suivant la méthode effectuée ou leur effet : neutre, émulsifiant, solvant, ou effet combiné ; on distingue alors les méthodes A, B, C, D et E comme le montre (**tableau III.1**) suivant. D'autre part, les produits révélateurs sont classés selon leur forme en : forme *a*, forme *b*, forme *c*, forme *d* et forme *e*. Le même tableau donne des détails au sujet de ces types de produits.

Tableau III.1: Produits pour le contrôle par ressuage PT (Réf. [R3])

Pénétrant		Produit d'élimination de l'excès de pénétrant		Révélateur	
Type	Dénomination	Méthode	Dénomination	Forme	Dénomination
I	Pénétrant fluorescent	A	Eau	a	Révélateur sec
II	Pénétrant coloré	B	Émulsifiant lipophile	b	Hydrosoluble
III	Pénétrant mixte (pénétrant fluorescent et coloré)		1 Émulsifiant à base d'huile 2 Rinçage à l'eau courante	c	Suspension dans l'eau
		C	Solvant (liquide)	d	À base de solvant
		D	Émulsifiant hydrophile	e	Hydrosoluble, suspension dans l'eau ou à base de solvant pour applications spéciales (ex : révélateur pelliculaire)
			1 Pré-rinçage facultatif (eau)		
			2 Émulsifiant (dilué dans l'eau) 3 Rinçage final (eau)		
		E	Eau et solvant		

III-5-2-Comment choisir un produit pénétrant ?

En pratique, deux pénétrants sont les plus utilisés : pénétrants colorés et pénétrants fluorescents.

- **Pénétrants colorés (rouge):** La surface à inspecter doit être examinée à la lumière du jour ou sous une lumière blanche artificielle, l'intensité d'éclairement lumineux n'est pas inférieure à 500 lx sur la surface de la pièce contrôlée.[3]
- **Pénétrants fluorescents :** La surface doit être examinée sous éclairage UV-A ,et toutes les surfaces visibles par l'opérateur doivent être non fluorescentes. L'éclairement énergétique UV-A sur la surface examinée ne doit pas être inférieur à 10W/m²(soit 1000μW/cm²). En cas de besoin, une lampe UV supplémentaire peut être utilisée.[3]

Les normes recommandent de choisir le type de produit en fonction des paramètres : Sensibilité et Etat de surface, comme suit.

- Choix du pénétrant selon le paramètre de Sensibilité: Un niveau de sensibilité se rapporte à l'aptitude du produit à détecter de petits défauts. En général, pour la détection de petits défauts, il est recommandé d'utiliser des produits ayant une grande sensibilité.

-Une classification en quatre niveaux de sensibilité est adoptée, le niveau faible, le niveau, le niveau haut et le niveau très haut.

-Le tableau III.2 de la norme (EN EN 571-1) aide le contrôleur à choisir son type de pénétrant, en fonction du niveau de sensibilité.

Tableau III.2 : Type de pénétrant selon le niveau de sensibilité (Réf. [R3])

<i>Type de pénétrant</i>	<i>Niveau de Sensibilité</i>
Pénétrant colore pré-émulsionne	Faible sensibilité
Pénétrant fluorescent pré-émulsionné	Sensibilité moyenne
Pénétrant a post-émulsion avec émulsifiant lipophile	Haute sensibilité
Pénétrant a post-émulsion avec émulsifiant hydrophile	Très haute sensibilité

- Choix du pénétrant selon le paramètre d'état de surface : L'état de surface affecte directement la taille minimale des défauts. Sur des surfaces lisses, il obtient les meilleurs résultats. Il est peu probable de détecter les petits défauts sur des surfaces rugueuses.

Le tableau III.3 de la norme (EN 1289) aide le contrôleur à choisir son type de pénétrant, en fonction de l'état de surface.

Tableau III.3 : Type de pénétrant selon état de surface (Réf. [R2])

<i>État de surface</i>	<i>Type de produit de ressuage</i>
- Surface lisse et régulière	-Produit de ressuage fluorescent, à sensibilité normale ou supérieure -Produit de ressuage coloré, à haute sensibilité
- Surface lisse	-Tout produit
- Surface de qualité courante	-Tout produit

III-5-3-Comment choisir un produit d'élimination?

Le type de produit d'élimination dépend de la nature du liquide pénétré, Selon la norme (EN 571-1), les produits les plus couramment utilisés sont :

- ✚ Eau : L'excès de pénétrant doit être éliminé par un rinçage approprié, soit par pulvérisation, soit avec un chiffon humide. La température de l'eau ne doit pas dépasser 50 °C .
- ✚ Solvants : Le pénétrant doit d'abord être retiré avec un chiffon propre et le nettoyage doit être effectué avec un chiffon légèrement humidifié de solvant ou par pulvérisation directe de solvants sur la pièce examinée.
- ✚ Eau et solvant : On doit éliminer d'abord l'excès de pénétrant lavable à l'eau au moyen d'eau, puis elle doit être nettoyée avec un chiffon propre légèrement humecté de solvant.

III-5-4- Comment choisir un produit révélateur ?

- Choix d'un révélateur sec : Un révélateur sec est une poudre blanche déposée dans les zones de ressuage, il ne peut être utilisé qu'avec des pénétrants fluorescents. Le révélateur doit être appliqué uniformément sur la surface examinée par une technique appropriée [3]

- Choix d'un révélateur humide: L'application d'une couche mince et uniforme du révélateur doit être obtenue par immersion dans une suspension d'inducteur ou par pulvérisation à l'aide d'un appareil approprié selon une procédure agréée [3].

III-6- Avantages et Inconvénients du contrôle par ressuage :


Notre lecture dans plusieurs documents scientifiques au sujet des procédés de CND a mis en évidence des points de comparaison entre l'essai PT et les autres essais CND ([Réf. 36], ([Réf. 18], ([Réf. 2],).

➤ Avantages du contrôle par ressuage

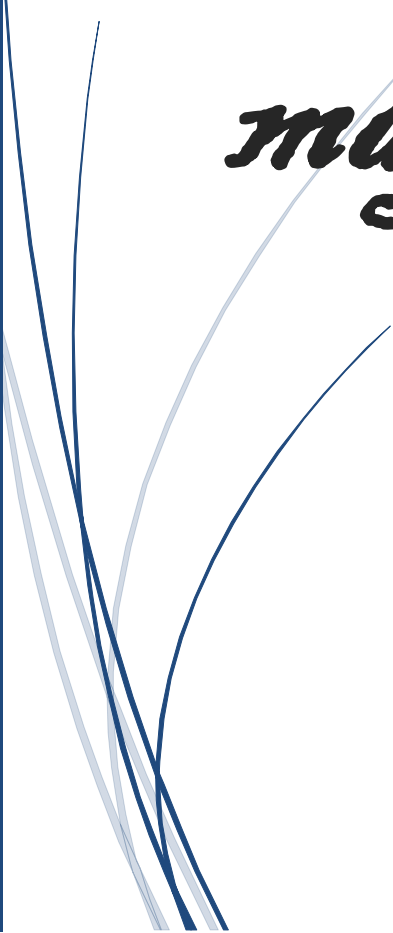
- * C'est un contrôle rapide et économique,
- * C'est une méthode globale qui autorise un examen de la totalité de la surface de la pièce,
 - Il est applicable à tous les matériaux non poreux, métalliques et non-métalliques,
 - En plus des températures ambiantes, il est applicable pour les températures élevées (150 à 200°C), des produits convenables pour ces températures existent,
 - Il offre une bonne sensibilité de détection des défauts débouchants,
 - Sa mise en œuvre est simple,
 - Il permet de bien apprécier la longueur des défauts.

➤ Inconvénients du contrôle par ressuage

- * Il ne permet de détecter que des défauts présentant un certain volume
- * Il n'est pas utilisable sur les matériaux poreux et absorbants,
- * Il ne détecte pas les défauts internes,
- * Il nécessite des surfaces propres et bien dégraissées,
- * Il utilise des produits nocifs, inflammables ou volatils.



Chapitre IV
Contrôle par
magnétoscopie



IV-1-Introduction :

Le contrôle par magnétoscopie est désigné par le symbole normalisé (MT) (en anglais : The Magnetic Testing), c'est une technique de contrôle non destructif largement utilisée dans le domaine de la technologie des matériaux, en particulier pour examiner la qualité des produits métalliques. Deux normes européennes sont nécessaires pour l'application de l'examen par magnétoscopie :

- La norme EN 1290 en date du février 1998. Elle s'intitule « Contrôle non destructif des assemblages soudés - Contrôle par magnétoscopie des assemblages soudés ».
- La norme EN 1291 de l'année 1998. Elle accompagne la norme EN 1290 et définit les niveaux d'acceptations des indications enregistrées (c'est-à-dire des défauts).

D'après [Réf 11], la magnétoscopie est très efficace pour la détection des défauts débouchant et sous-jacents, elle n'est utilisée que sur des matériaux ferromagnétiques.

IV -2- Principe :

Le principe de cette technique de CND se base sur les champs magnétiques. Il s'agit de créer un flux magnétique intense à l'intérieur d'un matériau. Lors de la présence d'un défaut sur le chemin du flux magnétique, celui-ci est dévié et crée une fuite qui va attirer les particules (colorées ou fluorescentes) d'un produit révélateur. Ces flux sont mis en évidence par des traceurs magnétiques finement micronisés et déposés à la surface des matériaux. Cette méthode de CND permet de mettre en évidence des discontinuités ou des fissures, débouchantes ou proches de la surface, la profondeur maximale des défauts détectables est estimée à 5 mm . [42], [11]

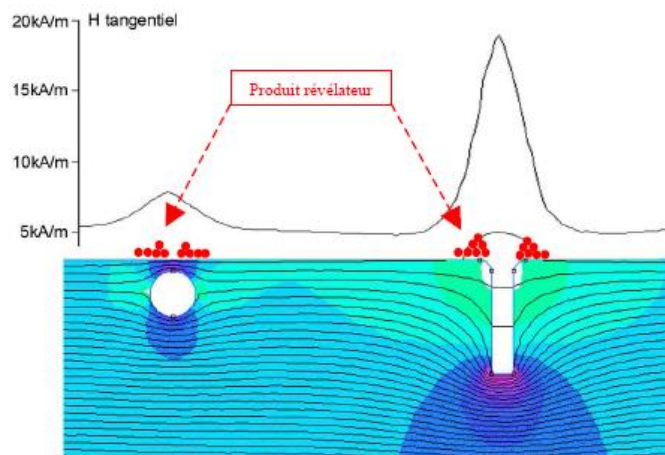


Figure .IV.1: Schéma de principe du contrôle par magnétoscopie (Réf.[R42])

IV -3- Mode opératoire : le contrôle par magnétoscopie comporte trois étapes :

- **La phase initiale :** dans cette première étape, un produit indicateur est appliqué sur la surface à examiner pendant l'aimantation (technique simultanée) ou après aimantation (technique résiduelle). Les particules magnétiques du produit indicateur noir, coloré et/ou fluorescent sont attirées au droit de la discontinuité par les forces magnétiques pour former des indications.
- **La deuxième étape :** on observe les indications enregistrées dans les conditions appropriées, soit en lumière blanche artificielle ou en lumière du jour, soit sous rayonnement ultraviolet (UV-A), soit sous lumière bleue actinique, selon le type de produit indicateur utilisé.
- **La troisième étape :** c'est la phase d'après-contrôle, où la suppression de l'aimantation de la pièce peut être requise ; on parle de « désaimantation ». La nécessité de cette opération de nettoyage de la pièce dépend des conditions d'utilisation future de celle-ci.

Pour le contrôle des joints soudés en acier (ou tout autre matériau ferromagnétique), l'article 5.12 de la norme EN 1290 indique que l'opération de désaimantation n'est pas nécessaire étant donné que souvent l'aimantation résiduelle est normalement faible.

❖ **Pratique de la magnétoscopie :**

1) Faire un nettoyage de la pièce, afin d'éliminer calamine, huile, graisse, afin de ne pas avoir de fausses indications lors de l'inspection. Dans ce opération, des brosses et certains produits nettoyants peuvent être utilisés.



Figure .IV.2: Image présentant l'opération de nettoyage de la pièce (Réf.[R34])

2) Induire le magnétisme, en plaçant la culasse magnétique sur la pièce et application à son tour les particules magnétiques roses



Figure.IV.3 : Image présentant l'opération de pulvérisation de la poudre magnétique avec l'utilisation d'un appareil de production d'un champ magnétique (Réf.[R37])

3) Dans cette étape de travail, nous enlevons les particules magnétiques en excès de la surface, cela se fait en soufflant uniformément la pièce



Figure .IV.4 : Image présentant l'opération de désaimantation (Réf.[R37])

4) Enfin, nous devons interpréter et évaluer les résultats obtenus de l'inspection. Ces indications sont observées, dans des conditions appropriées, soit en lumière blanche artificielle ou lumière du jour, soit sous rayonnement ultraviolet (UV-A), selon le type de produit indicateur utilisé.

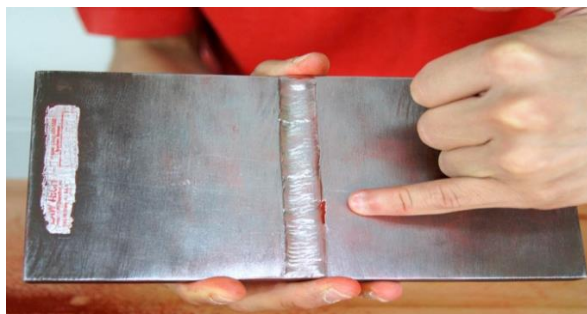


Figure .IV.5: Image présentant l'opération d'observation de la pièce et mise en évidence éventuelle de défauts (Réf.[R37])

IV-4- Règles de sécurité :

La norme EN 1290 présente un ensemble de règles importantes pour mener le contrôle MT dans les meilleures conditions de sécurité puisque les produits utilisés dans le MT sont des produits nocifs et inflammables.

- Il est nécessaire que l'opérateur porte des lunettes de protection des yeux et des gants de protection de la peau.
- Il faut veiller à ce que les produits utilisés soient situés loin des sources de chaleur et des flammes.
- Il faut prendre des mesures de sécurité électrique et contre les radiations directes d'ultra-violets UV.
- Il faut respecter les règles de protection des environnements aux niveaux local et national.

IV -5- Précautions relatives au contrôle des joints soudés

D'après les normes EN 1290 et EN 1291, le contrôle des joints soudés par application de la technique de magnétoscopie exige le respect des recommandations suivantes :

- Choisir une intensité de champ magnétique tangentiel comprise entre 2 kA/m et 6 kA/m (valeur efficace).
- Les soudures doivent être magnétisées dans deux directions approximativement perpendiculaires l'une par rapport à l'autre avec un écart maximal de 30°, pour assurer la détection des défauts en fonction de leurs orientations.
- La largeur de la zone soumise à contrôle doit inclure le métal déposé et la zone adjacente du métal de base jusqu'à une distance de 10 mm de part et d'autre.

IV -5- Les Révélateurs : les traceurs peuvent être secs ou humides [5]

-**Les traceurs secs** : ils sont ferromagnétiques, très mobiles sur la pièce et très visibles à l'œil.

-**Les traceurs humides** : les liquides porteurs sont :

- soit des produits aqueux non inflammables
- soit des produits au kérosène (kérosène + anti-dermique).

D'après la norme EN 1290, les révélateurs fluorescents magnétiques donnent une sensibilité supérieure à celle des révélateurs colorés, du fait du plus fort contraste entre le fond sombre.

-La sensibilité de la méthode par fluorescence diminue peu à peu en proportion de toute augmentation de la rugosité de surface à laquelle les particules magnétiques adhèrent, on peut même avoir un effet de fluorescence de fond perturbateur, donc donnant de faux résultats.

-Lorsque la fluorescence de fond est perturbatrice, la méthode des produits colorés donnera généralement une sensibilité meilleure.

La visualisation des défauts peut être effectuée soit :

- en lumière blanche avec des produits traceurs colorés,
- ou en lumière ultraviolette avec des traceurs fluorescents

IV-7- État et préparation de la surface :

Afin d’obtenir une sensibilité maximale par application de la technique de magnétoscopie, il faut tenir compte de plusieurs variables, parmi elles on cite la rugosité de la surface de la pièce et la présence d’irrégularités sur cette surface. [4]

Tableau .IV.1: Choix du type de produit révélateur en fonction de l’état de surface (**Réf.[R5]**)

Etat de surface	Révélateur utilisé
Surface lisse et régulière	Révélateur fluorescent ou coloré avec une fine couche de peinture contrastante
Surface lisse	Révélateur fluorescent ou coloré avec une fine couche de peinture contrastante
Surface de qualité courante	Révélateur coloré avec une fine couche de peinture contrastante ou révélateur fluorescent

IV-8-Paramètres d’examen MT recommandés :

Le tableau. IV.2 de l’annexe de la norme EN 1291 donne des recommandations pour une détection fiable de petits défauts. Les surfaces des pièces à souder sont à l’état brut.

Tableau .IV.2: Paramètres d’examen recommandés (**Réf.[R5]**)

Niveau d’acceptation	Etat de surface
1	Surface lisse et régulière
2	Surface lisse
3	Surface de qualité courante

Commentaires du tableau :

1) La soudure et le métal de base ont une surface lisse et propre, avec un nombre négligeable de caniveaux, de vagues de solidification et de projections. La finition est typique des soudures effectuées avec le procédé TIG automatique, ou sous flux (entièrement mécanisé) ou le soudage manuel à l'arc avec électrode enrobée contenant de la poudre de fer.

2) La soudure et le métal de base ont une surface raisonnablement lisse, avec peu de caniveaux, de vagues de solidification et de projections. La finition est typique des soudures effectuées en soudage manuel avec électrode enrobée, en position verticale descendante, ou en MAG en utilisant de l'argon pour les passes terminales.

3) La soudure et le métal de base sont à l'état brut de soudage. La finition est typique des soudures réalisées par soudage manuel avec électrode enrobée ou MAG en toute position.

IV-8-1- Niveaux d'acceptation :

D'après la norme EN 1291, on définit trois niveaux d'acceptation des défauts, ces derniers sont appelés par le terme : indications. Nous rappelons ci-dessous le tableau.IV.3 de cette norme.

Les niveaux d'acceptation fixés pour les indications linéaires correspondent au niveau d'évaluation. Les indications inférieures ne doivent pas être prises en compte. Normalement,

Les indications acceptables ne doivent pas être enregistrées.

Tableau. IV.3 : Niveau d'acceptation en fonction de type d'indication (**Réf.[R5]**)

Types d'indication	Niveau d'acceptation		
	1	2	3
linéaire l=longueur de l'indication	$L \leq 1.5$	$L \leq 3$	$L \leq 6$
non linéaire d = dimension du grand axe	$d \leq 2$	$d \leq 3$	$d \leq 4$

Commentaires du tableau :

Les niveaux d'acceptation 2 et 3 peuvent être spécifiés avec un suffixe «X» qui signifie que toutes les indications linéaires détectées doivent être évaluées suivant le niveau 1. Toutefois, la

probabilité de détection d'indications plus petites que celles correspondant au niveau d'acceptation d'origine peut être faible.

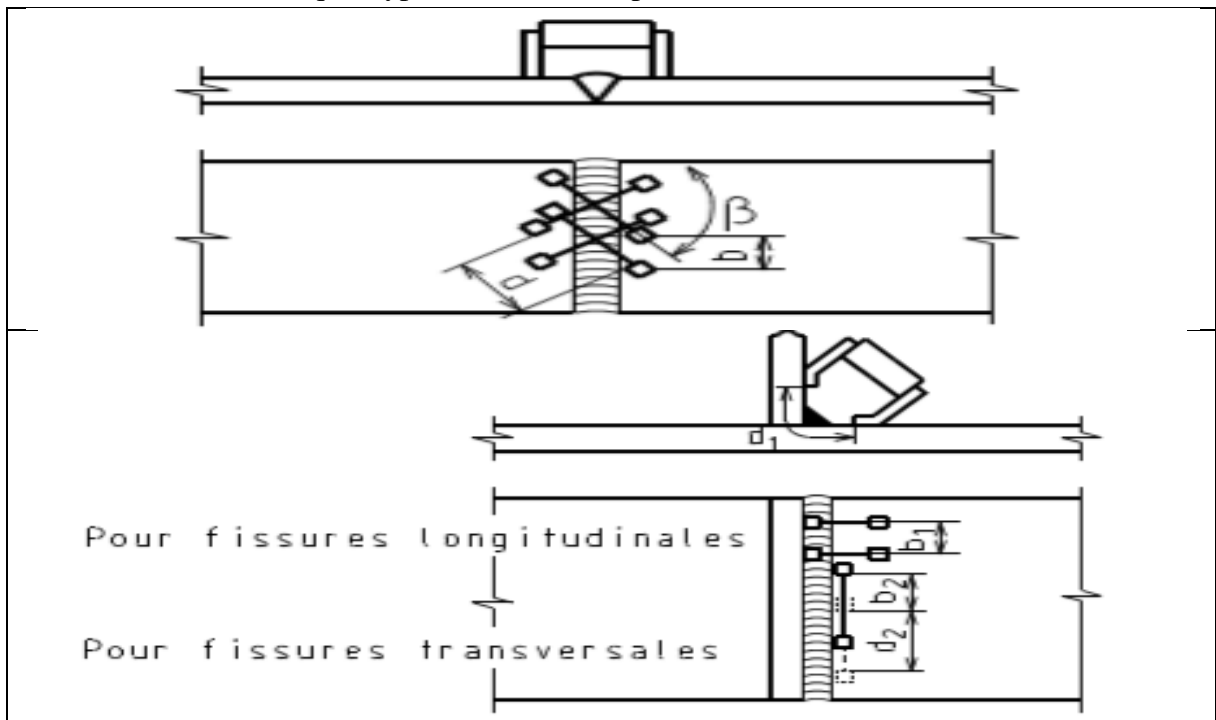
IV-9- Les diverses techniques d'aimantation en magnétoscopie :

Selon [Réf.4], l'application efficace des techniques de contrôle par magnétoscopie aux formes de joints soudés les plus courantes exige que la largeur d du trajet du flux de courant soit supérieure ou égale à la largeur de la soudure et de la zone affectée thermiquement 50 mm .

On distingue trois techniques d'aimantation :

- Les techniques types d'aimantation par électroaimant,
- Les techniques types d'aimantation par électrodes avec un courant d'aimantation,
- Les techniques types d'aimantation par câbles flexibles ou bobines.

Tableau .IV.4 : Techniques types d'aimantation par électroaimant (Réf.[R4])



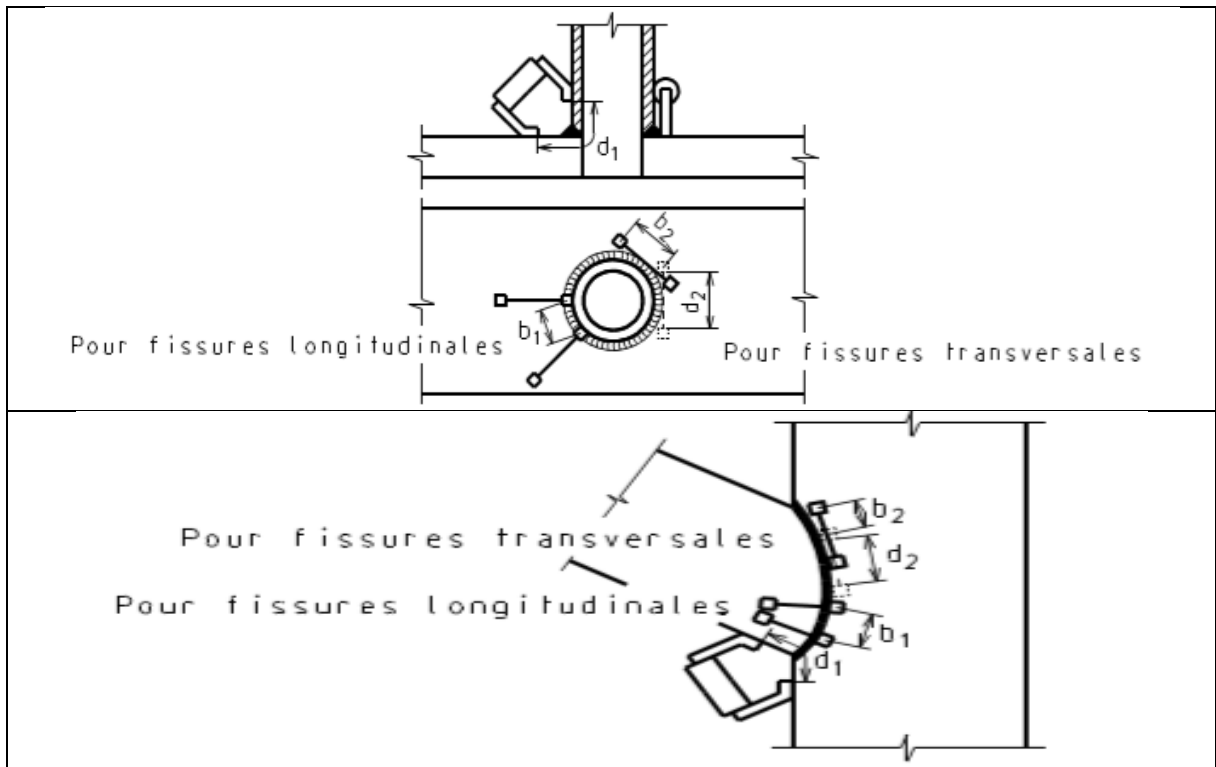
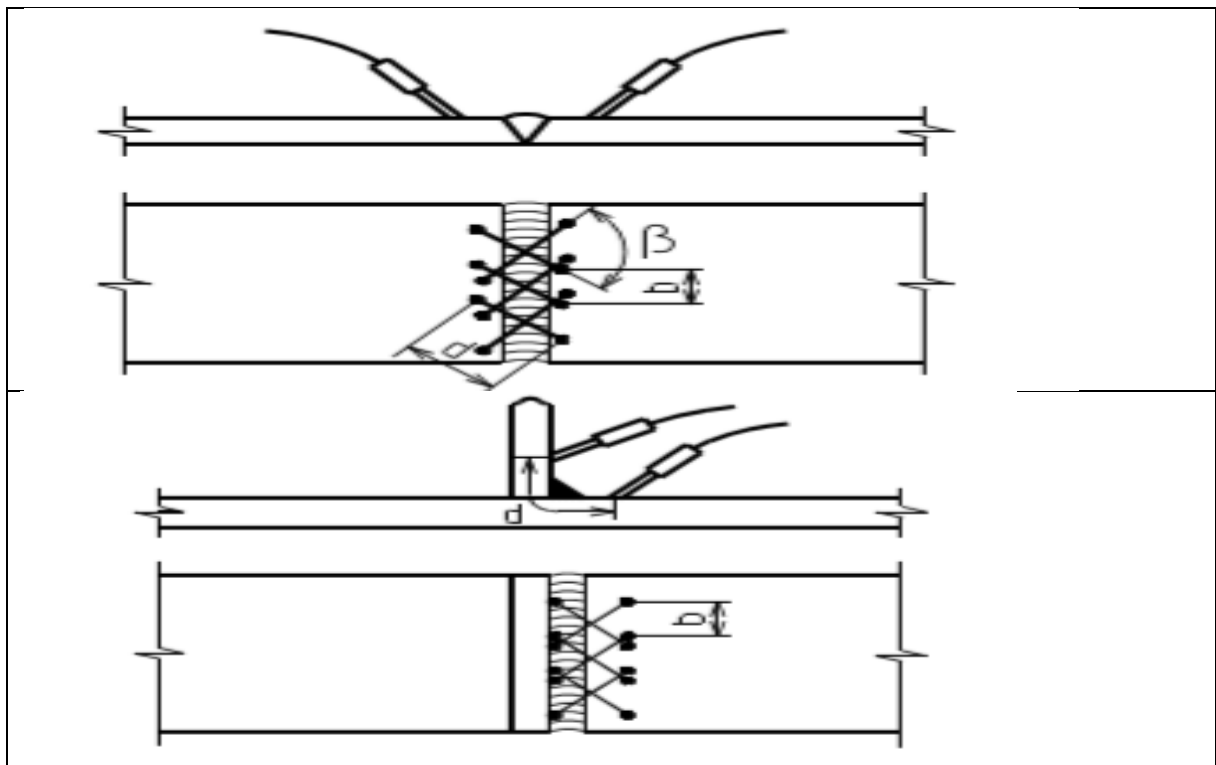


Tableau .IV.5 : Techniques types d'aimantation par électrodes avec un courant d'aimantation (Réf.[R4])



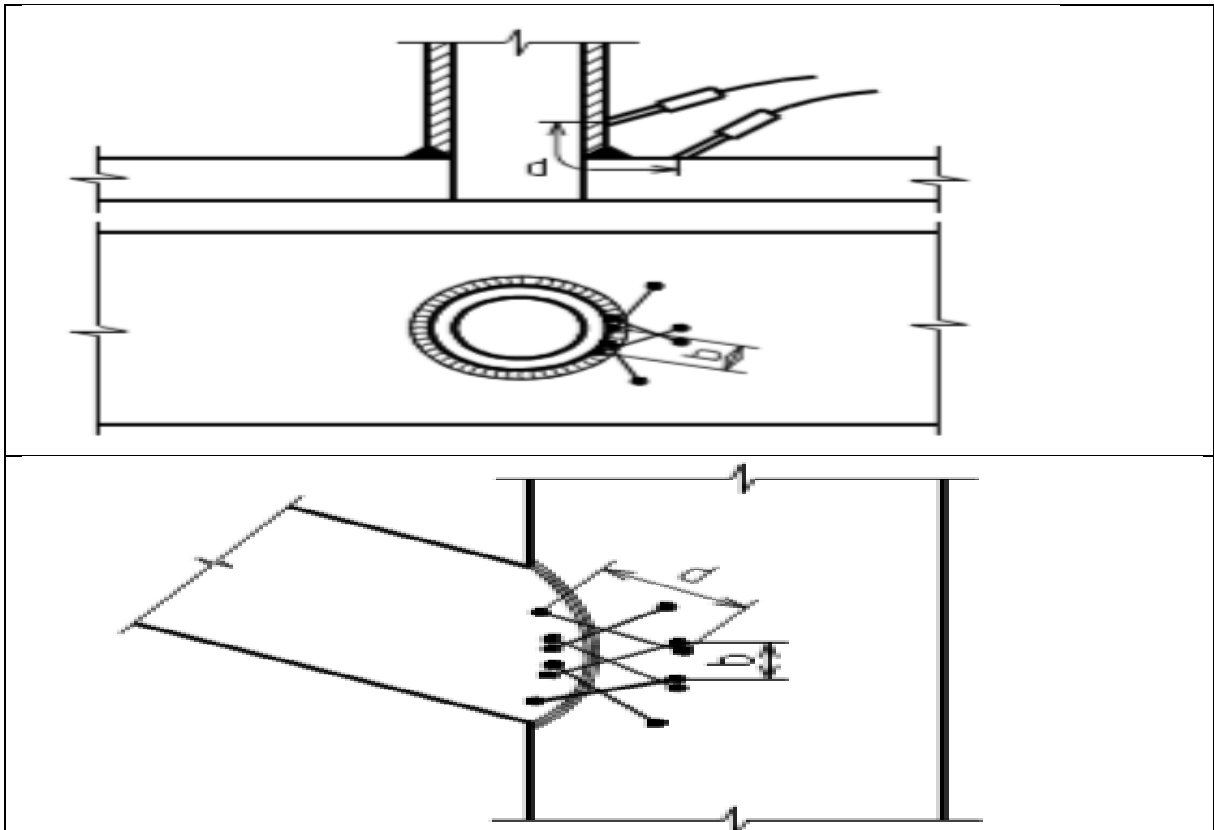
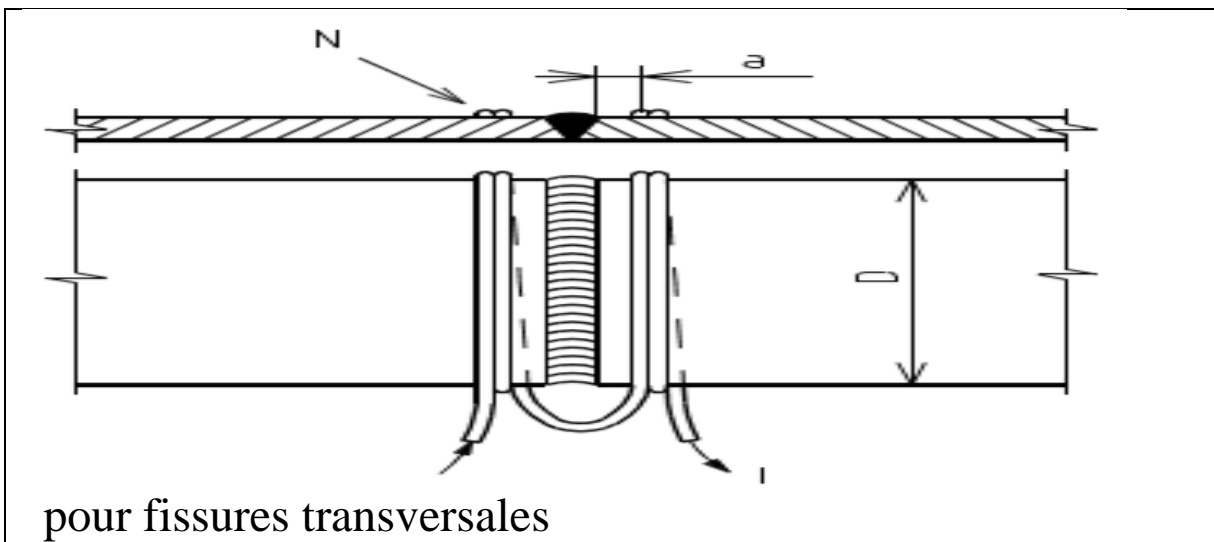
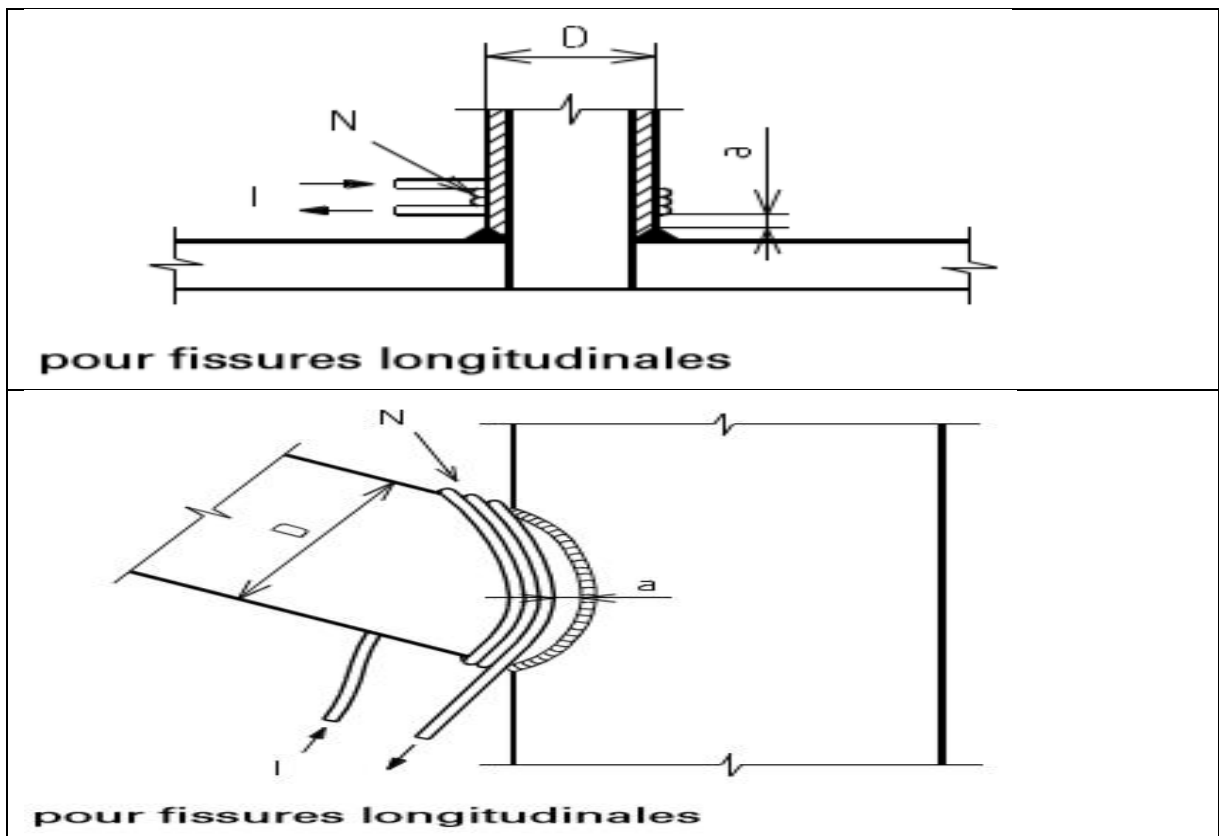


Tableau .IV.6 : Techniques types d'aimantation par câbles flexibles ou bobines (Réf.[R4])





❖ **Aimantation longitudinale et aimantation transversale :**

Selon l'équipement utilisé pour créer le flux magnétique, deux types d'aimantation existent, elles se différencient par la direction des lignes de force : perpendiculairement ou parallèles à l'axe Nord-Sud :

a) **Aimantation longitudinale** : Par le passage de flux magnétique dans les pièces, on parle d'aimantation longitudinale quand les lignes de force (le flux) sont parallèles à l'axe Nord-Sud. Cette méthode permet de détecter des discontinuités transversales (ou perpendiculaires) à cet axe, comme le montre la figure suivante.

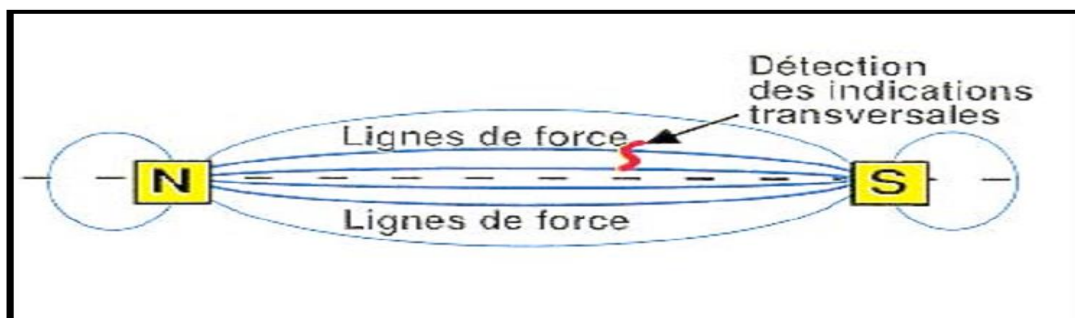


Figure. IV.6 : schéma d'aimantation longitudinale (Réf.[R25])

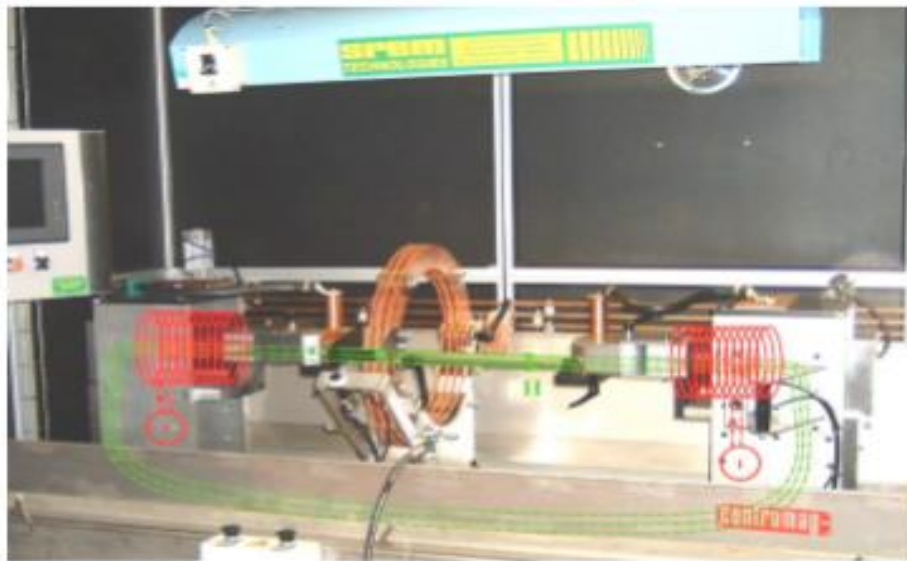


Figure. IV.7 : d'aimantation longitudinale (Réf.[R42])

b) **Aimantation transversale** : Par le passage de flux magnétique dans les pièces, on parle d'aimantation transversale lorsque les lignes de force sont perpendiculairement à l'axe Nord-Sud. Cette méthode permet de donc détecter les discontinuités longitudinales (ou parallèles) à cet l'axe, comme le montre la figure suivante.

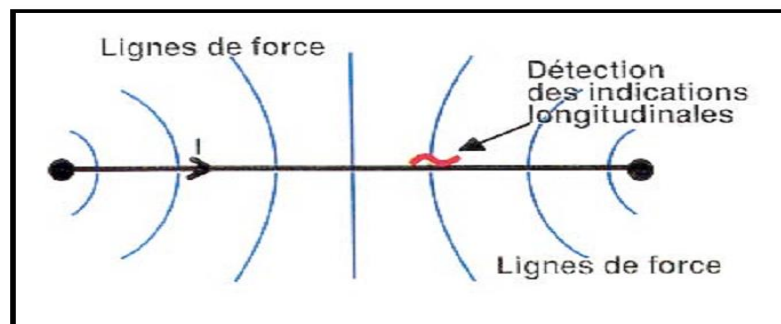


Figure.IV.8 :schéma d'aimantation transversale (Réf.[R25])

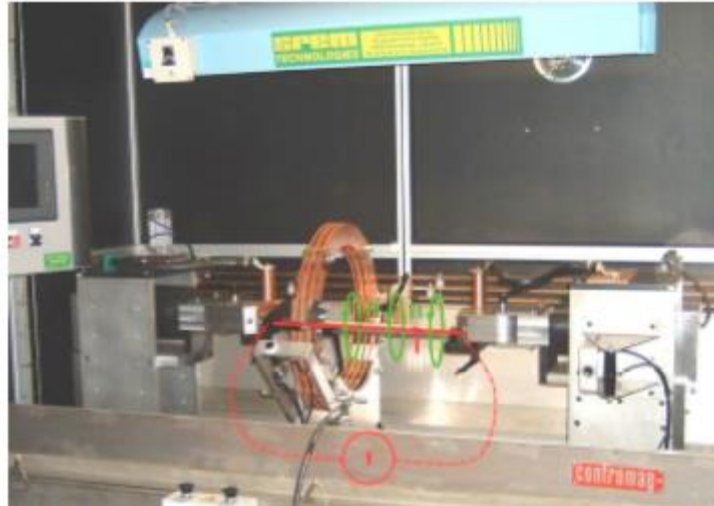


Figure. IV. 9: l'aimantation transversale (Réf.[R42])

❖ **Techniques alternatives :**

Il existe un grand nombre de techniques alternatives permettant l'aimantation des pièces. Selon [référence 42], on parle surtout de deux types, à savoir :

a) **Magnétoscopie sans contact par passage de courant induit** : dans ce cas, l'aimantation se fait à l'aide d'une broche constituée d'un conducteur traversant et d'un noyau magnétique du transformateur de courant induit, cette technique utilisée avec des courants alternatifs sinusoïdaux permet la magnétisation transversale et longitudinale de la pièce sans que celle-ci soit en contact avec le système d'aimantation.

En utilisant des courants déphasés, les magnétisations transversales et longitudinales peuvent être appliquées simultanément pour générer un champ tournant sur la pièce.

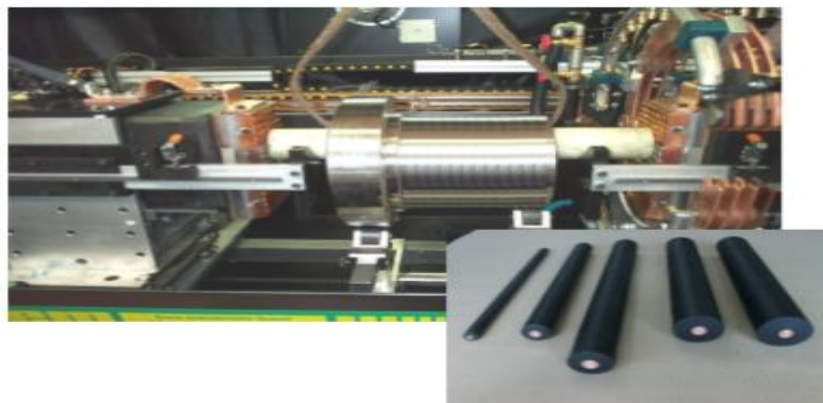


Figure.IV.10 :Magnétoscopie par courant induit (Réf.[R42])

b) **Magnétoscopie sans contact par champ tournant chambre** : dans ce cas, une chambre d'aimantation par champ tournant permet de générer, sur toute la surface à contrôler de la pièce, un champ magnétique de direction variable dans le temps. La pièce ne sera pas en contact avec le système d'aimantation.

Cette technique est seulement utilisable avec des courants alternatifs sinusoïdaux et elle convient bien pour la détection de discontinuités débouchantes en surface.



Figure. IV.11: Magnétoscopie par champ tournant chambre (Réf.[R42])

IV-10- Equipement et produits :

<p>Figure .IV.12: L'indicateur (coloré ou fluorescent) (Réf.[R41])</p>	<p>Figure .IV.13: La pie gauge est qui indique l'orientation du champ magnétique (Réf.[R38])</p>	<p>Figure .IV.14: indicateur de champ magnétique (Réf.[R39])</p>
		
<p>Figure .IV.15: Instrument magnétoscopie (YOKE) (Réf.[R37])</p>	<p>Figure .IV.16: Nettoyage (à la brosse, au solvant,...)([R37].[R 35])</p>	<p>Figure .IV.17: Lampe (Réf.[R40])</p>
		

IV-11- Avantages et inconvénients de la magnétoscopie :

Selon les références (réf 36) et (réf 11), le contrôle par magnétoscopie se caractérise par les avantages suivants :

- Simplicité de mise en œuvre
- Méthode rapide
- Localisation des défauts de surface ou légèrement sous-jacents (5 mm environ)
- Appréciation longueur de défaut
- Possibilité d'automatisation

D'autre part, on cite les inconvénients suivants de l'examen par magnétoscopie (Réf .36), ce qui oriente le contrôleur au choix d'une autre technique de CND :

- Il est impossible de détecter les défauts internes,
- On ne peut apprécier la profondeur des défauts profonds,
- L'interprétation des résultats est délicate, alors une bonne qualification du contrôleur est nécessaire,
- Cette technique n'est utilisable que sur les matériaux ferromagnétiques tels que les aciers de constructions au carbone et les aciers inoxydables. Elle exclue les autres matériaux.
- La sensibilité de ce type de contrôle dépend de l'orientation du défaut par rapport à la direction générale des lignes d'induction.
- Les pièces doivent être démagnétisées et nettoyées après inspection.



Chapitre V
Contrôle par
radiographie



V-1- Principe :

Le contrôle par radiographie est désigné par le symbole normalisé (RT) (en anglais : *The Radiography Testing*). De nos jours, cet examen est largement répandu, il consiste à l'irradiation de la pièce à inspecter, on obtient une radiographie entre la source de rayonnements (rayons X ou ions gamma) des ondes de très faible longueur d'onde. Pour inspecter les défauts des pièces, le rayonnement est dirigé à travers la pièce. d'après [12] : « L'intensité des rayons(X ou γ) diminue à cause de leur absorption par le réseau d'atomes du métal. L'intensité de la radiation pénétrante durant sa traversée est modifiée entre un parcours dans les matériaux sain et dans les défauts internes qui peuvent exister dans ces métaux. »

Ce phénomène est appelé : absorption différentielle. une pellicule photosensible placée de l'autre côté de l'objet contrôle enregistre les variations d'intensité des rayons qui ont traversé la pièce (réf .20).

Le contrôle détecte la différence d'absorption provoquée par la présence du défaut par rapport au reste de la pièce sous forme d'une tache sombre sur le fond clair de la soudure. Cette différence peut être mise en évidence par : l'impression de films photographiques, l'utilisation d'écrans fluorescents et caméras de télévision, l'utilisation de détecteurs de rayonnements

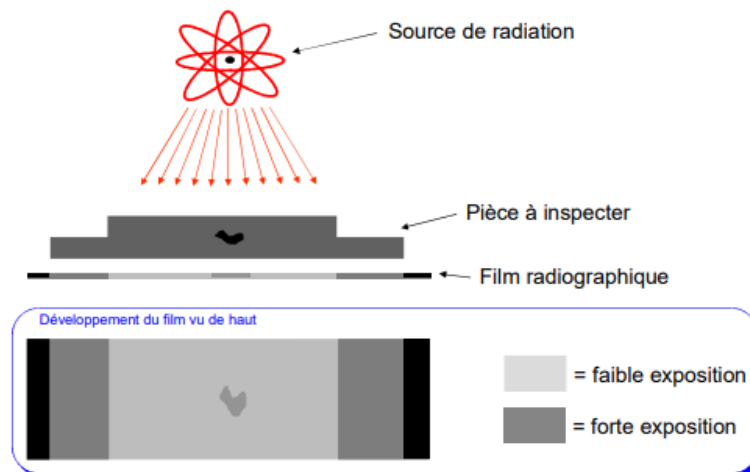


Figure .V.1 : Principe du contrôle par radiographie (Réf.[R13])

V-2- Norme de base :

Pour effectuer des contrôles par radiographie sur des joints soudés, la norme de base est EN 1435 d'aout 1997, elle s'intitule « CND des assemblages soudés - Contrôle par radiographie des assemblages soudés ». Cette norme européenne spécifie les techniques fondamentales de radiographie permettant d'obtenir des résultats satisfaisants et reproductibles de façon économique. Ces techniques reposent sur une pratique généralement reconnue et sur la théorie de l'imagerie ou de la radiographie.

Cependant, cette norme a un domaine d'application bien précis. En effet, elle n'est applicable que pour les assemblages soudés par fusion des matériaux métalliques. Les pièces concernées sont soit des tôles ou des tubes. Elle ne couvre pas les assemblages pour les autres formes de pièces et de profilés ! Donc, cette norme exclut ce type de CND pour examiner les soudures de raboutage des profilés en I, en H, en U et en cornières.

V-3 -Autres normes importantes à l'application de l'essai par radiographie :

D'après la norme de base EN 1435, pour bien mener ce type d'examen et en toute sécurité, il faut respecter les règles des normes complémentaires suivantes :

- EN 444 Essais non destructifs - Principes généraux de l'examen radiographique à l'aide de rayons X et gamma des matériaux métalliques.
- EN 462-1 Essais non destructifs - Qualité d'image des radiogrammes. Partie 1: Indicateurs de qualité d'image (à fils), détermination de l'indice de qualité d'image.
- EN 462-2 Essais non destructifs - Qualité d'image des radiogrammes. Partie 2: Indicateurs de qualité d'image (à gradins et à trous), détermination de l'indice de qualité d'image.
- EN 462-3 Essais non destructifs - Qualité d'image des radiogrammes. Partie 3 : Indices de qualité d'image pour métaux ferreux.
- EN 462-4 Essais non destructifs - Qualité d'image des radiogrammes. Partie 4 : Évaluation expérimentale des indices de qualité d'image et des tables de qualité d'image.
- EN 473 Qualification et certification du personnel en contrôle non destructif - Principes généraux.
- EN 584-1 Essais non destructifs - Film pour radiographie industrielle. Partie 1 : Classification des systèmes films pour radiographie industrielle.
- EN 584-2 Essais non destructifs - Film pour radiographie industrielle. Partie 2 : Contrôle du traitement des films à partir de valeurs de référence.
- EN 25580 Essais non destructifs - Négatoscopes utilisés en radiographie industrielle - Exigences minimales (ISO 5580:1985).
- Et la norme **EN 12517** de septembre 1998, intitulée CND des assemblages soudés, Contrôle par radiographie des assemblages soudés - *Niveaux d'acceptation* : Cette norme a pour objectif de définir les niveaux d'acceptation des indications des défauts se trouvant dans des assemblages en acier soudés bout-à-bout détectés par radiographie. On définit 3 niveaux d'acceptation comme indiqué dans le tableau 1 de cette norme.

V-4- Mesures de sécurité : l'exposition d'une partie quelconque du corps humain aux rayons X ou γ peut être extrêmement préjudiciable à la santé, aussi toute utilisation de matériels à rayons X ou de sources radioactives est soumise à des dispositions légales ou réglementaires appropriées, qu'il y a lieu de suivre scrupuleusement. Les normes EN 1435 et EN 12517 recommandent les consignes suivantes de sécurité de l'opérateur et de son entourage.

- L'utilisation de sources de radiation en milieu industriel est fortement contrôlée par des organismes fédéraux en raison des risques potentiels pour les opérateurs et le publique en général,
- Les sources radioactives ne pouvant pas avoir une protection qui élimine totalement les radiations et au niveau d'un atelier,
- Porter des vêtements de sécurité,
- Le faisceau du rayonnement doit être axé sur le centre de la surface examinée et il est recommandé que ce rayonnement soit perpendiculaire à la surface de l'objet.
- Les opérateurs doivent posséder le 'c.a.m.a.r.i.' Pour pouvoir manipuler les différentes sources de rayonnement.
- Les opérateurs sont classés travailleurs de catégorie « A » et portent un dosimètre individuel.
- Une attention particulière doit être portée à la température, au temps de développement et de lavage.
- Le traitement du film doit être contrôlé régulièrement.
- que les radiogrammes soient examinés dans un local sombre à luminance réglable.

V-5- Les sources des rayonnements :

V-5- 1-Rayons X : les rayons X sont des rayonnements électromagnétiques ; ce sont donc des photons, ils sont générés à la demande. On utilise un tube en verre dans le quel règne un vide poussé. Il est alimenté en courant électrique et émet des électrons par échauffement d'un filament incandescent de tungstène (cathode). Se faisceau d'électrons est attiré par la différence de potentiel (plusieurs milliers de Volts) vers une cible (anode ou anticathode).

L'impact des électrons sur la cible génère chaleur (99%) et rayons X (1%), « contrôlée par la tension appliquée sur le générateur varie de (20 à 500 keV) »[13]. D'après (réf .43) : «Les rayons X ont des longueurs d'onde comprises entre 10^{-7} m et 10^{-12} m, ils ont un pouvoir pénétrant grand.



Figure .V.2: Rayons X (Réf.[R13])

V-5- 2-Les ions γ : ce sont des rayonnements électromagnétiques (photons) émis naturellement suite à la désintégration spontanée de radio-isotopes tel que l'iridium 192, d'ytterbium 169 ou de cobalt 60.[12]

Les radio-isotopes sont obtenus par irradiation neutronique produisant un spectre de raies d'émission λ caractérisé par deux niveaux d'énergie proches respectivement de 0.1 et 2 MeV.

L'émission décroît de façon exponentielle dans le temps. On définit la période du radioélément (sa durée de vie) comme le temps nécessaire à la désintégration de la moitié des noyaux atomiques actifs. Un facteur important est l'activité de la source radioactive, correspond au nombre d'atomes se transformant par unité de temps.[13]

La source peut se positionner dans des tubes de petits diamètre et rayonne dans toutes les directions, L'utilisation des rayonnements ionisants exige des locaux spéciaux et doivent être transportés conformément au règlement de transport visant les marchandises dangereuses et les matières radioactives.



Figure V.3 : Equipement de rayonnement gamma (Réf.[R13])

V-5- 3- Différences entre rayonnement X et ions gamma :

- Les ions gamma sont plus dangereux que les rayons X
- L'énergie du rayonnement gamma permet une meilleure pénétration par rapport aux rayons X, elle donne la plus grande compacité des projecteurs et des sources.
- Les ions gamma sont des sources autonomes qui ne nécessitent aucune prise de courant contrairement au poste à rayons X.
- Les ions gamma sont émis naturellement, par contre les rayons x sont générés à la demande.

V-5- 4-Comment choisir la source de rayonnement ?

Nous avons noté que deux sources de radiations sont principalement utilisées en CND, ce sont les rayons X et les ions gamma. Ces sources de rayonnements sont choisies en fonction de quelques paramètres ; il s'agit de ce qui suit :

- La nature du matériau à inspecter,
- L'épaisseur et la forme du matériau qui va être traversé par les rayonnements,
- La position de ces défauts,
- La qualité d'image demandée,
- La forme et la nature des discontinuités affectant le matériau,
- Les conditions techniques de la réalisation.

V-5- 5-Propriétés du rayonnement : au « CND » les rayonnements (X et gamma) ont les propriétés suivantes :

- Ils se propagent en ligne droite à la vitesse de la lumière.
- Ils sont invisibles.
- Ils traversent la matière et sont partiellement absorbés au cours de la transmission.
- Ils peuvent endommager ou détruire les cellules vivantes, ce qui est très dangereux.
- Ils ionisent les milieux gazeux.

V-6- Film radiographique : le film radiographique est un des plus vieux outils de visualisation et d'enregistrement d'images radiographiques. Encore aujourd'hui, les plus utilisés des mediums sont des films constitués chacun d'un support plastique recouvert sur les deux faces d'une émulsion de sels d'halogénures d'argent dans une couche de gélatine.

-Une des caractéristiques des films est la taille du grain. Les films à gros grains sont plus rapides que les films à grains fins mais la définition des images est plus faible.

-Lorsque exposé aux radiations et développé en chambre noire, les fines particules d'halogénure d'argent tournent au noir.[7]

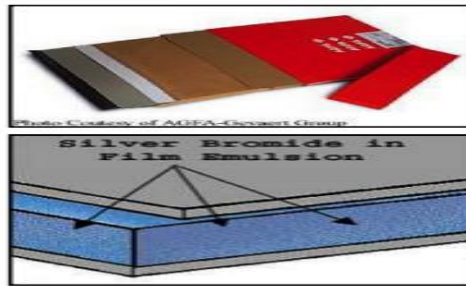


Figure .V.4 : Film de radiographie (Réf.[R13])

V-6-1-Conditions d'observation du film : il est recommandé que les radiogrammes soient examinés dans un local sombre à luminance réglable, conforme les normes. D'autre part, la surface non masquée du négatoscope doit correspondre à la surface minimale examinée [6]

V-6-2-Développement du film : selon la norme EN 1435 et référence 13, le développement du film radiographique se déroule dans une chambre noire, étanche à la lumière, dans laquelle le manipulateur extrait le film de la cassette, développe le film et recharge la cassette. Il est d'usage de conserver les cassettes chargées pour un examen radiographique ultérieur.

La chambre noire est séparée en 2 parties : la partie sèche et la partie humide. La partie sèche est là où les films sont stockés et où les films et les cassettes sont manipulés. Les films et les écrans sont très sensibles aux liquides et il est important de manipuler ces éléments avec des mains bien sèches. La partie humide correspond au développement du film, même si le développement est automatisé.

La chambre noire est éclairée par une lampe inactinique auquel les films sont peu sensibles. L'étanchéité de la chambre noire peut être facilement vérifiée par le test des clés. Un trousseau de clé est déposé sur un film vierge pendant 5 minutes dans la chambre noire. Il est ensuite développé. Si les clés apparaissent sur le film, c'est que l'étanchéité n'est pas complète ou que la lampe inactinique fonctionne mal.

Le développement se déroule en 4 ou 5 phases. Il peut être manuel ou automatique. La première phase, qui est aussi la plus importante, est la révélation : le film sec est plongé dans un bac contenant du révélateur adapté au film et au mode de développement. Il s'agit d'une réaction d'oxydoréduction au cours de laquelle les ions Argent sont transformés en Argent métallique qui a une couleur noire. Le développement dépend de la concentration en produits actifs, du temps de séjour dans le bain et de la température. Il est important de maîtriser ces 3

paramètres pour obtenir une bonne révélation de l'image radiographique. Le révélateur s'oxyde avec la lumière et l'oxygène. Il est d'usage de couvrir les bains en dehors de leur utilisation.

Un développement complet du film radiographique se reconnaît à la qualité du "noir du fond", qui doit être le plus intense possible. Une radiographie sous-développée a un fond grisé. Un test simple consiste à passer ses doigts derrière le film : avec un film sous-développé, les doigts sont visibles à travers le "noir du fond". Ce "noir du fond" est un bon indicateur de la qualité du développement. Il permet d'identifier un problème de fonctionnement de la développeuse automatique et indique le moment de changer les bains lors de développement manuel.

Le fixateur a pour rôle d'arrêter le développement, de fixer l'image en éliminant les ions argent qui n'ont pas réagi et de rendre le film transparent. Lors de développement manuel, il est précédé d'un court rinçage à l'eau pour éliminer le révélateur. Un film mal fixé garde une base opaque de couleur crème ou légèrement rosée.

Le rinçage du film est une étape très importante, car elle permet d'éliminer les traces de fixateur. Lors de développement manuel, le film doit être rincé pendant 20 minutes à l'eau courante. Un film mal rincé devient progressivement jaune par la cristallisation de sulfure d'argent.

Le développement automatique réalisé par une développeuse se généralise dans les cabinets vétérinaires. Il permet d'obtenir un développement constant et standardisé des films et contribue à la constance de la qualité des images produites. Il est cependant nécessaire de bien suivre le mode d'emploi de chaque appareil et de respecter en particulier les périodes de chauffe avant utilisation et le passage de "films balai" qui renouvelle les bains.

Le développement manuel est plus délicat et demande l'établissement d'une procédure de développement. Le film est monté sur un cadre qui permet de le manipuler sans le toucher. Le film est successivement placé dans le révélateur, l'eau, le fixateur et le bain final de rinçage. Il est important de maîtriser précisément la température du révélateur et le temps de séjour. Le temps de séjour recommandé dans le révélateur est de 5 minutes à 20 degrés.

V-6-3-Densité optique d'un film : la densité optique d'un film radiographie correspond au degré de noircissement du film ; elle est égale au rapport logarithmique de la lumière incidente par la lumière transmise. Pour éviter les densités optiques de voile anormalement élevées provoquées par le vieillissement du film, le développement ou la température, la densité optique de voile doit être vérifiée périodiquement sur un échantillon non exposé du film manipulé et

traité comme le radiogramme réel. La densité optique de voile ne doit pas dépasser 0,3. La densité optique du voile se définit ici comme la densité optique totale (émulsion + base) d'un film non exposé traité. En technique multi-films mais avec interprétation en simple film [6]

V-6-4-Traitement de film : les films sont traités suivant les conditions recommandées par le fabricant de films et des produits chimiques pour obtenir la classe de système film choisie. Une attention particulière doit être portée à la température, au temps de développement et de lavage. Le traitement du film doit être contrôlé régulièrement conformément à l'EN 584-2. Il est recommandé que les radiogrammes soient exempts de défauts dus au traitement ou à d'autres causes susceptibles de gêner leur interprétation [6]

V-6-5-Recouvrement des films : lorsque la radiographie d'une zone donnée nécessite deux films distincts ou plus, ceux-ci doivent présenter un recouvrement suffisant afin de prouver que la zone à contrôler est totalement radiographiée. Ceci doit être vérifié à l'aide d'un symbole à haute densité placé sur la surface de l'objet et qui doit apparaître sur chaque film [6]

V-7- Types et positions des indicateurs de qualité d'image (IQI) : l'IQI doit être placé de préférence côté source sur l'objet à contrôler, au centre de la surface contrôlée et sur le métal de base adjacent à la soudure. L'IQI doit être en contact étroit avec la surface de l'objet. L'emplacement doit avoir une densité optique uniforme sur le film

L'IQI doit toujours être disposé sur l'objet contrôlé à un endroit où l'épaisseur est aussi uniforme que possible selon EN 462-1. [6]

V-7-1-Détermination de l'indice de qualité d'image « IQI » : d'après les normes EN 462-3 et EN 1435, un indice de qualité d'image doit être déterminé pour chaque radiogramme. Si des mesures ont été prises pour garantir que les radiogrammes d'objets et de zones contrôlées similaires sont obtenus dans les mêmes conditions d'exposition et de traitement, sans changer l'indice de qualité d'image, il n'est pas nécessaire de vérifier la qualité d'image pour chaque radiogramme.

a) avec les IQI à fils: les fils doivent être orientés perpendiculairement à la soudure le numéro du fil le plus petit clairement visible sur le radiogramme doit être pris comme indice de qualité d'image et placés de sorte qu'au moins 10 mm de longueur de fils apparaissent sur une partie de densité optique uniforme, ce qui correspond normalement au métal de base adjacent à la soudure, et il est recommandé qu'ils n'apparaissent pas en projection sur l'image de la soudure

b) avec les IQI à trous et à gradins : l'IQI doit être placé de telle manière que le numéro du trou requis se trouve à proximité de la soudure Pour les IQI à trous et à gradins, le numéro du plus petit trou clairement visible sur le radiogramme doit être pris comme indice de qualité d'image. Lorsqu'un gradin contient deux trous, les deux doivent être visibles. En cas d'exposition de tubes de diamètre supérieur ou égal à 200 mm avec source centrée, il est

recommandé de placer au moins trois IQI à des distances égales autour de la circonférence. Le (ou les) film(s) sur lesquels apparaissent les images d'IQI sont alors considérés comme représentatifs de toute la circonférence.

V-8-Cassette de film normalisée : Les films doivent être protégés de la lumière visible parce que, la lumière visible est une onde tout comme les rayons X et électromagnétique et peut exposer le film. Les films sont donc placés dans une cassette à l'épreuve de la lumière ambiante.



Figure V.5 : Cassette de film pour radiographie (Réf.[R44])

❖ **Réduction du rayonnement diffusé :**

a) **Filtres et collimateurs :** pour réduire les effets des rayonnements rétrodiffusés, le rayonnement direct doit être collimaté autant que possible sur la partie examinée. Avec les sources de rayonnement Iridium 192 et Cobalt 60 ou en cas d'effet de bord, on peut utiliser pour filtrer le rayonnement diffusé de basse énergie une feuille en plomb placée entre l'objet et la cassette. L'épaisseur de cette feuille est comprise entre 0,5 mm et 2 mm selon l'épaisseur traversée. [6]

b) **Interception du rayonnement rétrodiffusé Si nécessaire :** le film doit être protégé des rayonnements rétrodiffusés, pour cela il est renforcé par une épaisseur appropriée d'au moins 1 mm de plomb ou d'au moins 1,5 mm d'étain, cette épaisseur est placée derrière l'ensemble film écran. L'effet du rayonnement rétrodiffusé doit être vérifié pour chacune des nouvelles conditions opératoires, en plaçant une lettre en plomb B (d'une hauteur minimale de 10 mm et d'une épaisseur minimale de 1,5 mm) immédiatement derrière chaque cassette. Si l'image de ce symbole apparaît en plus clair sur le radiogramme, celui-ci doit être refusé. S'il apparaît en plus foncé ou demeure invisible, le radiogramme est acceptable et démontre une bonne protection contre le rayonnement rétrodiffusé. [6]

❖ Dispositions d'examen :

D'après le section 6.1 de la norme de base EN 1435, l'application de la technique de radiographie doit suivre les articles 6.1.2 à 6.1.9 où on trouve les procédés de rayonnements suivants accompagnés de 19 figures explicatives ,on résume ceci comme suit :

- a) Source de rayonnement située face à l'objet avec film sur la paroi opposée

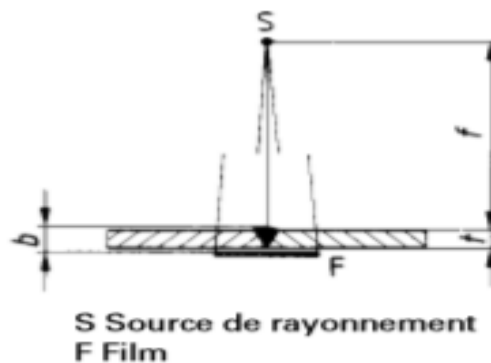


Figure .V.6 : Disposition d'examen pour parois planes et exposition en simple paroi
(Réf.[R6])

- b) Source de rayonnement située à l'extérieur de l'objet avec film à l'intérieur (figure 7 et 8 et 9)

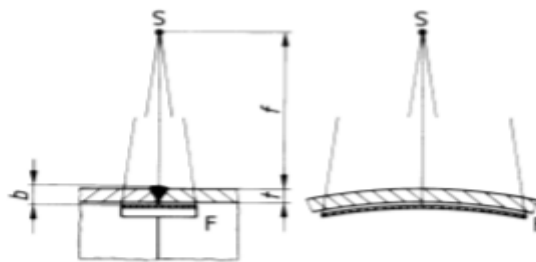


Figure V.7 : Disposition d'examen pour exposition en simple paroi d'objets courbes
(Réf.[R6])

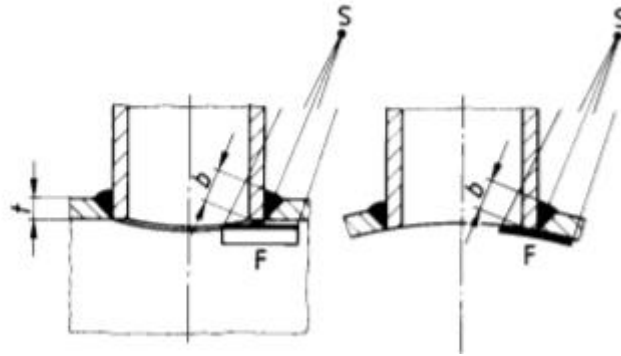


Figure V.8 : Disposition d'examen pour exposition en simple paroi d'objets courbes (soudure de piquage pénétrant) (Réf.[R6])

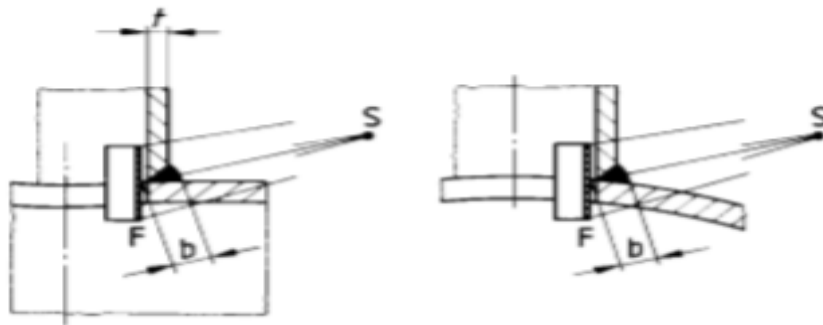


Figure V.9 : Disposition d'examen pour exposition en simple paroi d'objets courbes (soudure de piquage posé) (Réf.[R6])

- c) Source de rayonnement centrée à l'intérieur de l'objet, avec film à l'extérieur (figures 10 à 12)

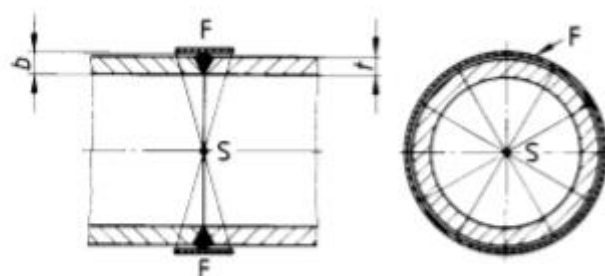


Figure V.10 : Disposition d'examen pour exposition en simple paroi d'objets courbes (Réf.[R6])

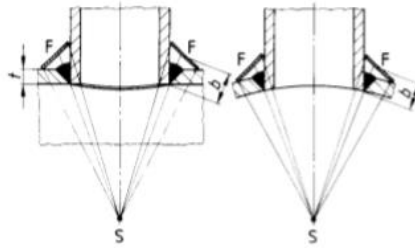


Figure V.11 : Disposition d'examen pour exposition en simple paroi d'objets courbes
(soudure de piquage pénétrant) (Réf.[R6])

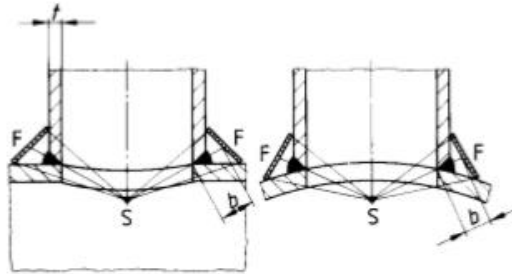
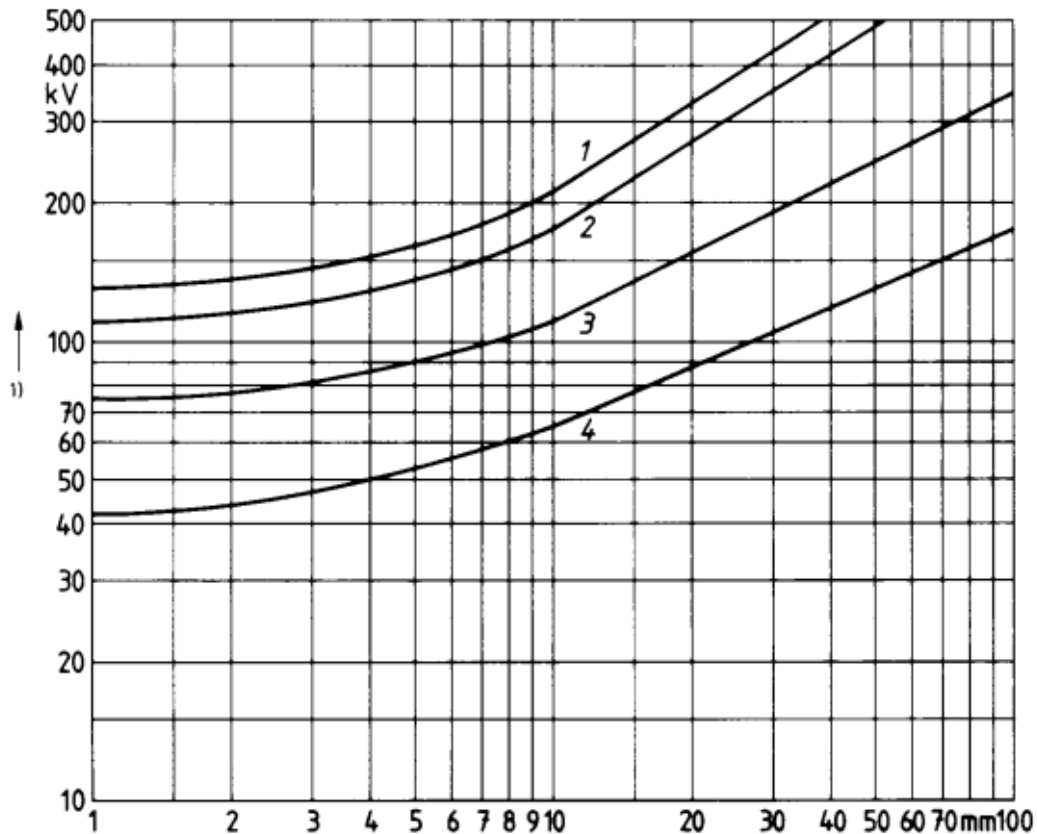


Figure V.12 : Disposition d'examen pour exposition en simple paroi d'objets courbes
(soudure de piquage posé) (Réf.[R6])

➤ **Comment choisir la tension du tube et celle de la source de rayonnement ?**

Selon la norme EN 1435, il existe deux sources de rayonnement, ce sont:

a) Les appareils à rayons X jusqu'à 500 kV : pour garantir une bonne sensibilité de détection des imperfections, il est recommandé que la tension du tube à rayons X soit aussi basse que possible. Les valeurs maximales de tension du tube par rapport à l'épaisseur sont indiquées à la figure



1 Alliage base cuivre/nickel

2 Alliage base acier

3 Alliage base titane

4 Alliage base aluminium

Figure V.13 : Tension maximale pour des appareils à rayons X jusqu'à 500 kV en fonction de l'épaisseur traversée et du matériau (Réf.[R6])

a) **Les autres sources de rayonnement** : les gammes d'épaisseurs traversées autorisées pour les sources à rayons gamma et le matériel à rayons X dont la tension dépasse 1 MeV

La valeur pourra être réduite à 10 mm pour l'Iridium 192 et à 5 mm pour Se 75. Sur les faibles épaisseurs d'acier, les rayonnements gamma du Se 75, de l'Iridium 192 et du Cobalt 60 ne donnent pas des radiogrammes ayant une aussi bonne sensibilité de détection de défauts que les rayons X utilisés avec des paramètres techniques appropriés. Toutefois, compte tenu des avantages des sources à rayons gamma en termes de facilité de manipulation et d'accessibilité,

Dans le cas où les radiogrammes sont obtenus avec un rayonnement gamma, le temps de positionnement de la source ne doit pas dépasser 10 % du temps de pose total.

V-9-Avantages et Inconvénients du contrôle par radiographie:

Selon les normes EN 1435 et EN 12517 et les références (réf 13) et (réf 36), les avantages et inconvénients de l'essai par radiographie sont les suivants:

V-9-1- Avantages :

- ✓ Possibilité de radiographier des formes complexes,
- ✓ Il est possible de radiographier un grand nombre de pièces disposées autour de la source.
- ✓ La traçabilité et l'archivage des résultats sont possibles,
- ✓ Facilité d'identification des défauts internes des soudures bout à bout interpénétrés,
- ✓ L'essai est applicable à tous les matériaux (aluminium, acier, alliages cuivreux, titane, etc.),
- ✓ Facilité d'identification des défauts internes et leurs profondeurs,
- ✓ Les problèmes d'accessibilité sont résolus,
- ✓ Possibilité de conserver les radiogrammes durant plusieurs dizaines d'années et à faible coût.

V-9-2- Inconvénients :

- ✓ Cet essai se limite au contrôle des faibles épaisseurs,
- ✓ Cet essai est peu adapté au contrôle des soudures en angle et soudures non interpénétrées,
- ✓ Il exige l'accessibilité de l'opérateur des 2 côtés,
- ✓ Les défauts plats (collages ou fissures) ne sont décelés que s'ils sont orientés suivant le rayonnement (ou légèrement inclinés sur celui-ci). L'orientation du rayonnement doit être choisie en fonction de l'orientation supposée du défaut recherché.
- ✓ Il exige le respect continu d'un ensemble de mesures de protection,
- ✓ Le temps de pose est long.
- ✓ Leur coût est très élevé à cause des besoins en sources de rayonnement, des opérations d'entretien du matériel, des films radiographiques, des mesures de protection et de sécurité.
- ✓ Ils exigent des instruments de mesure particuliers qui ne sont toujours disponibles.
- ✓ L'interprétation des radiogrammes est souvent délicate et nécessite une formation de haut niveau des opérateurs ainsi qu'une grande expérience. Pour cela, des normes ont été rédigées pour bien organiser la formation professionnelle et l'examen des contrôleurs.
- ✓ Les rayonnements utilisés sont dangereux et peuvent provoquer des maladies professionnelles graves et mortelles.
- ✓ La sensibilité de détection des défauts dépend des dimensions de la source et de son énergie, de la position et de l'orientation des défauts dans la pièce, de l'épaisseur de la pièce, de la sensibilité du film.
- ✓ Le transport du matériel est difficile à cause de sa sensibilité et de sa lourdeur, en outre, il faut assurer une grande surface pour ce matériel.



Chapitre Vg

Contrôle par

ultrasons



VI-1- Introduction :

Un autre type de CND est le contrôle par ultrasons, il est désigné par le symbole normalisé(UT) (en anglais : *The ultrasons Testing*). Dans ce chapitre, nous commençons par une brève présentation du principe de cet examen, ensuite une liste des normes européennes fondamentales qui encadrent son bon déroulement.

Nous passons à l'exposé d'un ensemble de règles et consignes de bonne mise en œuvre, au mode opératoire de l'essai UT. Une section sera réservée à la présentation des appareils et outils utilisés dans ce contrôle.

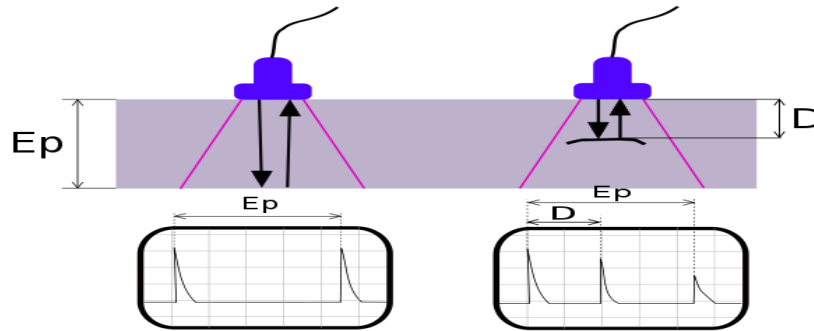
Diverses méthodes de contrôle par ultrasons sont ensuite décrites, elles sont suivies de quelques aspects théoriques de la physique des ondes et vibrations.

VI-2- Principe du contrôle par ultrasons :

Cette méthode d'essai contrôle non destructif permet la détection de défaut à l'intérieur d'un matériau. Le contrôle UT est basé sur la transmission et la réflexion d'onde de type ultrasons à l'intérieur d'un matériau. La vibration est transmise et reçue par un même capteur appelé traducteur qui comporte un élément piézoélectrique apte à transformer un signal électrique en vibration mécanique et inversement. L'impulsion acoustique émise se propage dans tout le matériau.

S'il y a un obstacle quelconque dans le chemin de cette onde acoustique, elle sera réfléchi. Le parcours de l'onde ultrasonore définit le faisceau acoustique, il est directif et limité dans l'espace. Il peut être utilisé sur pratiquement tout type de matériau. Un exemple d'obstacle possible dans un joint soudé est une fissure interne ; il s'agit d'un défaut d'exécution que le contrôle UT veut détecter.

La détection de défaut se fait en comparant le temps mis pour que l'onde fasse un aller-retour dans l'épaisseur de la pièce et le temps mis pour la réflexion sur un défaut. [22]



(E_p : épaisseur de la pièce ; D : profondeur de l'obstacle, c-à-d. de la fissure)

Figure VI.1 : Principe de l'essai UT (Réf. [R52])

VI-3- Normes de référence : au niveau européen, le contrôle par ultrasons est normalisé et guidé par un ensemble de normes.

- EN 1714 Contrôles non destructifs des assemblages soudés — Contrôlent par ultrasons des assemblages soudés. C'est la norme de base pour bien mener l'essai par ultrasons.
- EN 12062 Contrôle non destructif des assemblages soudés — Règles générales pour les matériaux métalliques.
- EN 25817 Assemblages en acier soudé à l'arc — Guide des niveaux d'acceptation des défauts (ISO 5817:1992).
- EN 1713 de mai 1998, elle s'intitule : CND des assemblages soudés, Contrôle par ultrasons - Caractérisation des indications dans les assemblages soudés.
- EN 1712 de novembre 1997, intitulé : CND des assemblages soudés, Contrôle par ultrasons des assemblages soudés - Niveaux d'acceptation.

VI-3-1- La norme de base EN 1714 de aout 1997 : elle s'intitule : CND des assemblages soudés, Contrôle par ultrasons des assemblages soudés. Cette norme européenne spécifie des méthodes de contrôle manuel par ultrasons des assemblages en matériaux métalliques soudés par fusion, d'épaisseur égale ou supérieure à 8 mm, présentant une atténuation relativement faible des ultrasons.

Cette norme vise en particulier les assemblages soudés à pleine pénétration dont le métal de base et la soudure sont ferritiques. Toutefois, d'après l'article 1 portant domaine d'application,

cette norme s'étend à d'autres cas après accord entre les parties contractantes ; il s'agit des techniques suivantes :

- ✓ pour des matériaux autres que ceux indiqués ;
- ✓ sur des soudures à pénétration partielle ;
- ✓ avec des équipements automatisés.

Toujours dans l'article 1, on lit que : « Lorsque les valeurs des caractéristiques ultrasonores des matériaux sont précisées dans la présente norme, elles concernent des aciers dans lesquels la vitesse des ondes ultrasonores est égale à $(5\,920 \pm 50)$ m/s pour les ondes longitudinales et $(3\,255 \pm 30)$ m/s pour les ondes transversales. Cet élément doit être pris en compte pour le contrôle des matériaux présentant des vitesses de propagation ultrasonores différentes ».

❖ **Niveaux de contrôle** : La norme EN 1714 définit 4 niveaux de contrôle, chacun correspondant à une probabilité différente de détection des imperfections. Un guide du choix des niveaux de contrôle A, B et C est donné en annexe A de cette norme. Les prescriptions relatives au quatrième niveau de contrôle, qui est prévu pour des applications spéciales, doivent être convenues entre les parties contractantes.

Extrait de l'annexe A de la norme EN 1714 :

Tableau VI.1: Niveaux d'examen d'un assemblage bout-à-bout (Réf.[R8])

Niveau d'examen	Épaisseur du matériau de base mm	Indications longitudinales					
		les angles	les positions	SZW	les positions	Nombre total d'explorations	Notes
		Exploration L			Exploration N		
A	$8 \leq t < 15$	1	A ou B	1,25 p	—	2	1)
	$15 \leq t < 40$	1	A ou B	1,25 p	—	2	1)
B	$8 \leq t < 15$	1	A ou B	1,25 p	—	2	5)
	$15 \leq t < 40$	2	A ou B	1,25 p	—	4	2), 5)
C	$8 \leq t < 15$	1	A ou B	1,25 p	G ou H	3	4)
	$15 \leq t < 40$	2	A ou B	1,25 p	G ou H	5	2), 4)

❖ **Evaluation des indications** : La norme EN 1714 permet l'évaluation des indications, cette évaluation se fait par l'une des méthodes suivantes :

- 1) évaluation basée principalement sur la longueur et l'amplitude de l'écho du signal de l'indication ;
- 2) évaluation basée sur la caractérisation et le dimensionnement de l'indication par des méthodes de déplacement du transducteur.

VI-3-2-A propos de la norme EN 1713 : de mai 1998, elle s'intitule : CND des assemblages soudés, Contrôle par ultrasons - Caractérisation des indications dans les assemblages soudés. Cette norme définit un schéma décisionnel (appelé : procédure cascade) présenté dans l'annexe A de cette norme. Ce schéma est destiné à effectuer la classification des indications internes en indication volumique ou en indication non volumique.

La norme EN 1713 n'est applicable que pour des indications situées au moins à 5 mm de chacune des faces non arasées de l'assemblage, comme le montre la figure suivante (**Figure VI.2**):

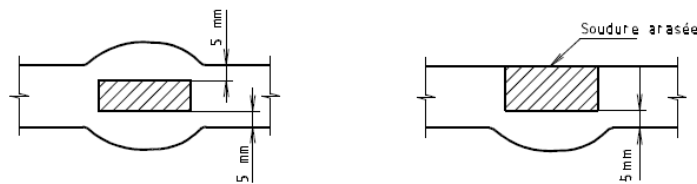


Figure VI.2 : Positions des indications (Réf. [R9])

❖ **Ondes transversales et ondes longitudinales**: D'après l'annexe B de cette norme, on définit deux types d'incidences : les ondes transversales et les ondes longitudinales.

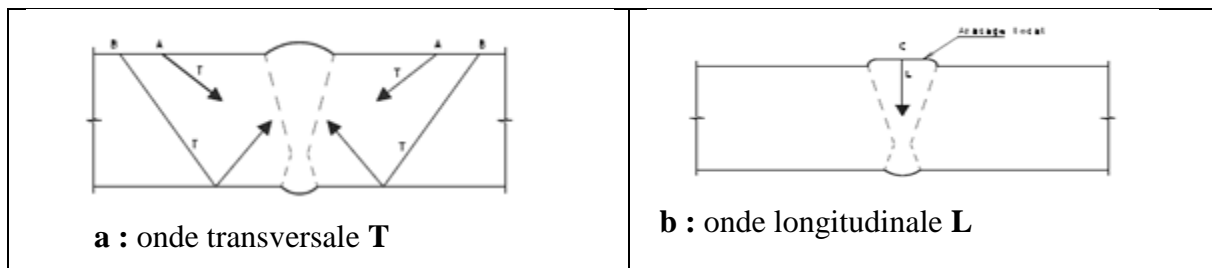


Figure VI.3 : Incidence de contrôle (Réf. [R9])

VI-3-3- A propos de la norme EN 1712 : de novembre 1997, intitulé : CND des assemblages soudés, Contrôle par ultrasons des assemblages soudés - Niveaux d'acceptation :

Ce document spécifie les niveaux d'acceptation 2 et 3 pour le contrôle par ultrasons de joints en aciers ferritiques soudés à pleine pénétration, qui correspondent aux niveaux de qualité B et C de la NF EN 25817.

Les niveaux d'acceptation correspondant au niveau D de l'EN 25817 n'ont pas été inclus dans la présente norme car le contrôle par ultrasons n'est pas recommandé pour cette qualité de soudure.

Ces niveaux d'acceptation sont applicables aux contrôles effectués conformément aux normes mentionnées dans l'EN 12062. Toutefois, ils peuvent être appliqués conjointement à d'autres règles dans lesquelles les mêmes types de réflecteurs de référence sont utilisés pour le réglage de la sensibilité, pourvu que cela soit convenu entre les parties contractantes.

Cette norme est applicable au contrôle de joints soudés en aciers à pleine pénétration d'épaisseurs allant de 8 mm à 100 mm. Cependant, pour d'autres types de soudures ou matériaux, et pour des épaisseurs supérieures à 100 mm, cette norme peut être utilisée à condition que les contrôles soient effectués en tenant compte de la géométrie et des caractéristiques acoustiques de l'élément soudé, et où une sensibilité appropriée peut être utilisée pour permettre l'application des niveaux d'acceptation de la présente norme européenne.

VI-4-Précautions de mise en œuvre: selon la norme EN 1714, il est recommandé de

Respecter les règles suivantes :

- Le personnel chargé d'effectuer les essais UT doit être qualifié et certifié. Pour cela, l'opérateur doit suivre une formation pour interpréter l'affichage de manière précise.
- Outre une connaissance générale du contrôle par ultrasons des soudures, l'opérateur doit aussi être familiarisé avec les problèmes de contrôle spécifiquement liés aux types d'assemblages soudés à contrôler.
- Tout matériel utilisé pour le contrôle des soudures doit être étalonné de façon régulière pour chaque épaisseur et chaque type de matériau.
- La fréquence d'ondes doit être comprise entre 2 MHz et 5 MHz.
- La fréquence doit être aussi basse que possible.
- On doit s'assurer que l'angle d'incidence du faisceau sur la surface réfléchissante ne soit pas inférieur à 35°, aussi il est préférable que cet angle ne soit pas supérieur à 70°.

- Il faut veiller à l'adaptation des transducteurs aux surfaces d'exploration incurvées. Pour cela, le jeu entre la surface examinée et la semelle du transducteur ne doit pas dépasser 0,5 mm.

-L'amplitude de l'écho doit être amplifiée au maximum par le mouvement du transducteur et notée.

VI-5 -Mise en œuvre de l'essai à ultrasons UT et appareillage :

- Il faut commencer par le nettoyage des surfaces de pièce à contrôler, on utilise un chiffon et applique un produit de couplage (liquide, gel, etc...). Ensuite, l'opérateur déplace le palpeur lors du contact avec une surface de la pièce à contrôler pour à émettre une onde ultrasonore qui se propage dans la pièce à contrôler et se réfléchit sur les obstacles qu'elle rencontre (anomalies), et cela à la manière d'un écho.

- L'étape prochaine consiste à ce que l'opérateur surveille l'apparition d'échos sur l'écran de contrôle (écran de visualisation) dont la position (qui permet de localiser le réflecteur) et L'amplitude (qui permet d'estimer l'importance du défaut) sont révélateurs d'anomalies.

❖ **Appareillage** : La chaîne de mesure qui englobe les différentes parties d'un appareil doit comporter :

1-Un générateur d'impulsions : Il délivre l'impulsion grâce à laquelle le palpeur sera excité pour engendrer les oscillations mécaniques.



Figure VI.4 : Un générateur d'impulsions (Réf.[R46])

2-Un palpeur : c'est un instrument chargé de transformer les impulsions électriques d'excitation en oscillations mécaniques (ultrasons) et à l'inverse les oscillations ultrasonores en impulsions électriques. Les palpeurs peuvent être en même temps émetteur-récepteur ou des éléments séparés : émetteur et récepteur.



Figure VI.5 : les palpeurs (Réf.[R47])

3-Un amplificateur: A la réception, le signal provoqué par l'écho est très faible (0.01V) pour être visualisé sur l'écran, il faut l'amplifier et filtrer, alors l'amplificateur lui associe avec un gain suffisant pour la visualisation.



Figure VI.6 : Un amplificateur (Réf.[R49])

4-Un tube cathodique (ou écran de visualisation) : Après le traitement du signal, les résultats sont affichés sur un écran d'un tube cathodique, les distances et les amplitudes des échos sont obtenues grâce à un balayage horizontal et vertical.



Figure VI.7: écran de visualisation (Réf.[R48])

5-Les couplants ultrasons : Ils sont utilisés dans pratiquement toutes les applications avec des sondes de contact pour faciliter la transmission de l'énergie sonore entre la sonde et la pièce à inspecter. En général, les couplants se présentent sous forme de liquides, de gels ou de pâtes non toxiques moyennement visqueux. Leur utilisation est nécessaire, car l'énergie sonore

utilisée pour le CND est émise à des fréquences ultrasonores qui nuisent à son déplacement dans l'air.

En plus des considérations liées aux effets d'atténuation, l'impédance acoustique de l'air est aussi très différente de celle de la plaque d'usure de la sonde et des matériaux généralement inspectés. même un vide extrêmement petit entre la sonde et la pièce nuira à une transmission d'énergie efficace et interdira l'inspection conventionnelle.

Pour beaucoup d'applications, on signale plusieurs substances courantes peuvent servir de couplant. On cite par exemple l'eau, l'huile à moteur ou la graisse, et aussi certains produits commerciaux à usage de gel pour cheveux. [45]



Figure VI.8 Couplants pour les inspections à ultrasons (Réf.[R45])

VI-6-Diverses méthodes de contrôle par ultrasons :

VI-6 -1-Méthode par réflexion : la méthode la plus utilisée est dite "méthode par écho". dans ce cas, un seul palpeur joue le rôle d'émetteur et de récepteur, il est relié avec un tube cathodique muni d'une base de temps. on peut chercher un défaut dans une pièce à contrôler par un balayage d'une surface par contact. Le temps mis par l'écho pour faire le trajet aller-retour est proportionnel à la profondeur à laquelle se situe le défaut. La position du défaut est donc connue avec précision ; voir la figure ci-dessous.

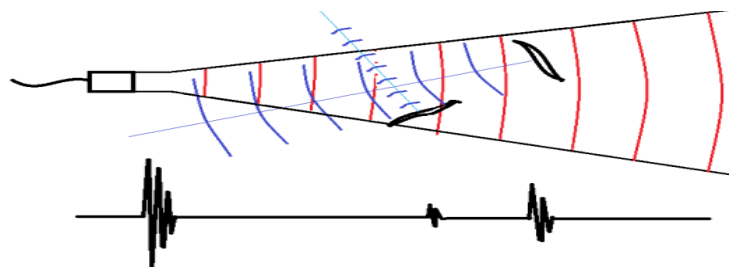


Figure VI.9 : Méthode de contrôle par réflexion (Réf.[R19])

VI-6-2 - Méthode par transmission : cette méthode est appliquée sur les plaques de faible épaisseur, elle nécessite deux capteurs ultrasonores (un émetteur et un récepteur). La diminution du signal transmis par rapport au signal émis indique la présence d'un défaut, par contre la position de ce défaut est impossible à détecter.

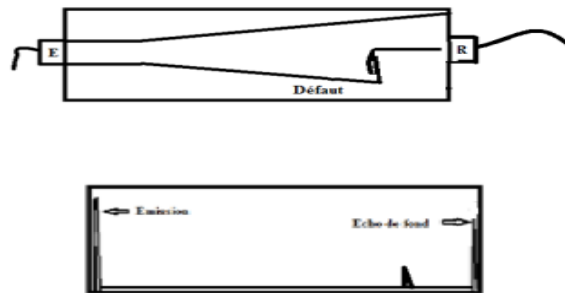


Figure VI.10: Méthode de contrôle par transmission.(Réf.[R19])

VI-6-3- Méthode par émerision : la pièce à contrôler est immergée dans un liquide de couplage, le plus souvent c'est de l'eau, parfois du pétrole, et plus rarement c'est de l'huile. Le palpeur n'étant pas en contact avec la pièce à contrôler la hauteur du fluide intervient dans le trajet parcouru par les ultrasons. cette méthode de contrôle par immersion peut être menée selon la position de la pièce de deux façons :

- Par immersion totale.
- Par immersion locale.

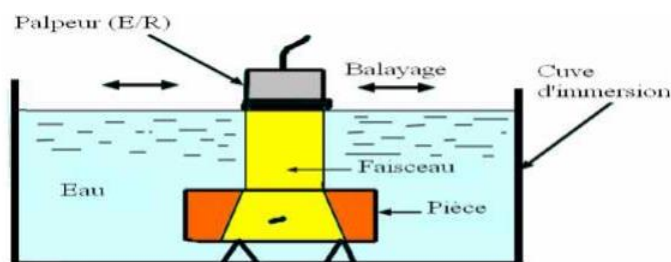


Figure VI.11: Méthode de contrôle par émerision.(Réf.[R24])

VI-7 - A propos de la propagation des ultrasons :

a) Nature des ultrasons : Les ultrasons sont des vibrations élastiques d'origine mécanique qui se propagent dans un milieu matériel. Les ultrasons sont de même nature que le son mais

leur fréquence sont plus élevés. Les atomes qui constituent la matière oscillent sous l'effet d'une onde ultrasonore. Il s'agit donc d'une vibration de matière. [8]

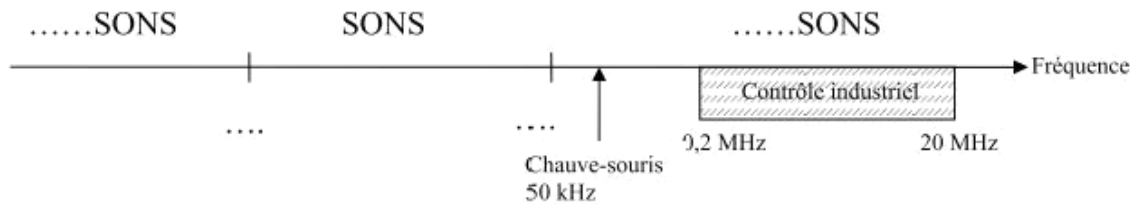


Figure VI.12 : Les fréquences des ultrasons. (Réf.[R20])

b) Equation de la longueur d'onde : La longueur d'onde est notée « λ », elle se calcule par l'équation suivante : $\lambda = C \cdot T = C / f$; λ est en (m) ;

f : fréquence de l'onde en (Hz)

T : période de l'onde en (s)

C : célérité de l'onde en(m/s)

VI-8 -Types d'ondes ultrasonores : Nous distinguons différents types d'ondes sonores.

Ce sont soit des ondes longitudinales, des ondes transversales, des ondes guidées de surface ou des ondes de plaque (ou de Lamb).

VI-8-1 -Ondes longitudinales (ou de compression): Le mouvement (vibration) des particules est parallèle à la direction de propagation (le déplacement s'accompagne d'une variation de pression). [22]

-Vitesse de propagation« V_L » d'une onde longitudinale : Elle est donnée par la formule scientifique suivante :

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

E : Module d'Young du matériau N/m² ;

ρ : masse volumique du matériau (kg/m³) ;

ν : Coefficient de Poisson.



Figure VI.13 : propagation d'une onde longitudinale (Réf.[R22])

VI-8-2-Ondes transversales (ou de cisaillement) : Pour ces ondes, la direction de propagation est perpendiculaire au sens de vibration des particules, elles font intervenir des contraintes de cisaillement qui ne se propagent que dans les solides et les liquides visqueux. On note que la propagation des ultrasons est très réduite dans les gaz. [22]

- **Vitesse de propagation « V_T » d'une onde transversale** : Elle s'est donnée par la formule scientifique suivante :

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

E : Module d'Young du matériau N/m^2 ;

ρ : masse volumique du matériau (Kg/m^3) ;

ν : Coefficient de Poisson.

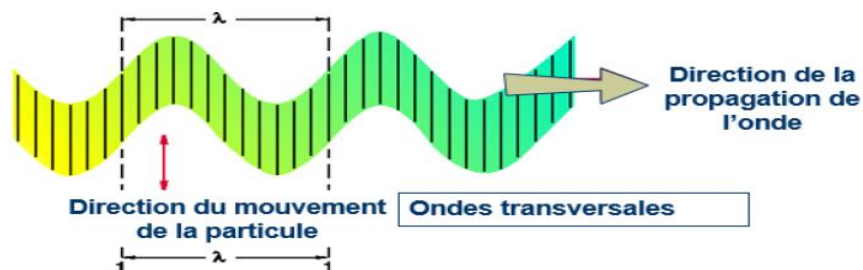


Figure VI.14: propagation d'une onde transversale (Réf.[R22])

VI-8-3 -Ondes guidées : On distingue deux types d'ondes guidées : les ondes de surface (ou De Rayleigh) et les ondes de plaque (ou de Lamb).

VI-8-3-1-Ondes de surface (ou de Rayleigh) : On obtient une onde de surface lorsqu'on

superpose une onde longitudinale et une onde transversale de même direction parallèle à la surface d'un solide, elles n'affectent que la surface du solide sur une profondeur de l'ordre de la longueur l'onde.[24]

- Vitesse de propagation d'une onde de surface : $V_S = 0.9 V_T$

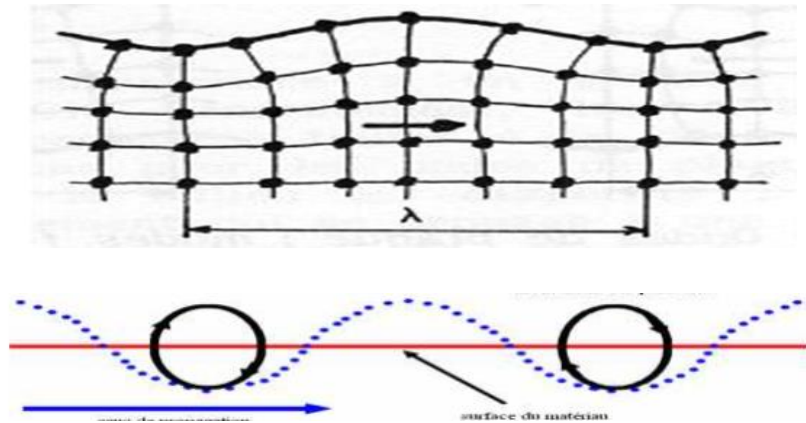


Figure VI.15 : propagation d'une onde de surface (Réf.[R24])

VI-8-3-2-Ondes de plaque (ou de Lamb) : Elles sont appelées ondes de Lamb symétrique et antisymétrique. dans le mode symétrique, les particules sur les deux faces de la pièce vibrent en opposition de phase en décrivant des ellipses. Sur l'axe neutre de la plaque le mouvement vibratoire des particules est longitudinal. Dans le mode antisymétrique, les particules sur les deux faces de la pièce vibrent en phase, en décrivant des ellipses. Sur l'axe neutre de la plaque, le mouvement vibratoire des particules est transversal. [24]

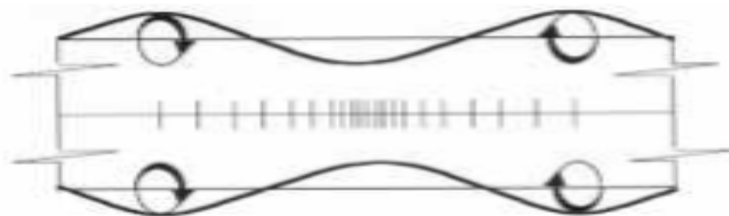


Figure VI.16: propagation d'une onde de plaque symétrique (Réf.[R24])

VI -9- Propagation d'ondes ultrasonores à travers différents milieux :

Lorsque l'on observe les signaux émis et reçus sur l'écran d'un oscilloscope (**figure VI.17**), on note deux principales différences entre le faisceau incident et le faisceau transmis : leur amplitude et leur phase. En effet, une réduction a lieu entre le faisceau incident et le faisceau transmis ; l'amplitude du faisceau sortant est inférieure à celle du faisceau entrant.

Cette réduction du signal justifie l'existence d'une interaction des ondes ultrasonores avec les milieux. Celle-ci dépend de la distance parcourue par le faisceau d'ondes (la réduction augmente exponentiellement avec la distance) et de la fréquence du signal émis (l'absorption est d'autant plus importante que la fréquence est élevée).[50]

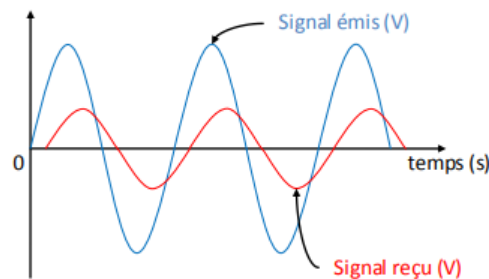


Figure VI.17 : Observations à l'oscilloscope des signaux émis et reçus en fonction du temps
(Réf.[R50])

On distingue deux cas d'**incidence : normale et oblique**.

- Dans l'incidence normale, le faisceau incident est orthogonal au plan de l'interface.
- Dans l'incidence oblique, le faisceau incident est dans une position quelconque par rapport à l'interface.

a) Incidence normale : Lorsqu'une onde longitudinale U_i arrive perpendiculairement à l'interface de deux milieux (1) et (2) d'impédance acoustique Z_1 et Z_2 , avec une vitesse V_1 , une partie U_r de l'onde incidente est réfléchiée vers le milieu (1) avec une vitesse V_1 l'autre partie U_t est transmise dans le milieu (2) avec une vitesse V_2

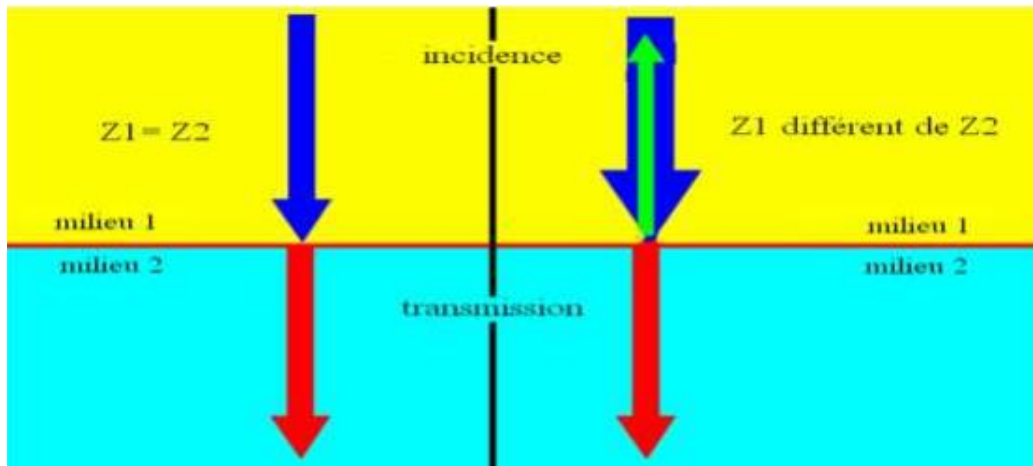


Figure VI.18. : incidence normal (Réf.[R24])

- ❖ Coefficient de réflexion R : On définit le coefficient de réflexion R comme étant le rapport entre la pression acoustique de l'onde réfléchi P_r et la pression acoustique de l'onde incidente P_i .

$$R = \frac{P_r}{P_i} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$$

Avec : Z_1 : impédance acoustique du milieu 1

Z_2 : impédance acoustique du milieu 2

- ❖ Coefficient de transmission T : On définit le coefficient de transmission T comme étant le rapport entre la pression acoustique de l'onde transmise P_t et celle de l'onde incidente P_i

$$T = \frac{P_t}{P_i} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1}$$

b) Incidence oblique : Si l'incidence n'est pas orthogonale à la surface de l'interface, une onde ultrasonore incidente arrive obliquement sur l'interface de deux milieux et trois phénomènes apparaissent : réflexion, réfraction et transformation de mode.

La réflexion est la partie d'énergie réfléchiée par le milieu 2 dans le milieu 1, ainsi l'onde transmise subit des changements brusques de direction si les vitesses de propagation sont différentes dans les deux milieux, c'est la réfraction.

Selon la nature des deux milieux et de l'angle d'incidence, l'onde incidente peut subir d'une transformation de mode en onde longitudinale, transversale ou de surface.

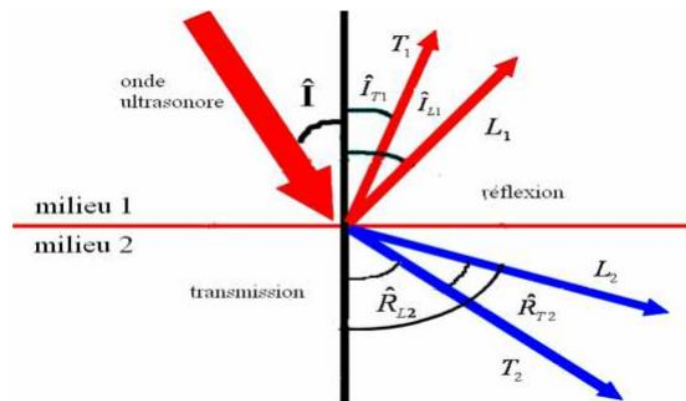


Figure VI.19: incidence oblique. (Réf.[R24])

Les angles de réflexion et de réfraction de chaque mode d'onde peuvent se déterminer par la loi de Snell –Descartes formulée comme suit :

$$\frac{\sin \hat{i}}{V_{L1}} = \frac{\sin \hat{i}_{L1}}{V_{L1}} = \frac{\sin \hat{i}_{T1}}{V_{T1}} = \frac{\sin \hat{R}_{L2}}{V_{L2}} = \frac{\sin \hat{R}_{T2}}{V_{T2}}$$

où : V_{L1} , V_{L2} , V_{T1} et V_{T2} : sont les vitesses de propagation des ondes.

Dans ce mode d'incidence, il est important de citer les deux angles d'incidence limites existant qui sont : un angle limite d'onde longitudinale et un angle limite d'onde transversale.

Le premier angle limite est calculé en mettant : $\sin \hat{R}_{L2} = 1$ (à la disparition de l'onde longitudinale) ce qui donne :

$$\hat{i}_{C1} = \arcsin\left(\frac{V_{L1}}{V_{L2}}\right)$$

❖ Production des ultrasons de fréquence élevés :

Pour la détection des défauts, on utilise le principe de la **piézo-électricité** qui consiste en ce que les oscillations électriques sont transformées en vibrations mécaniques qui produisent les ultrasons.

Selon [12] : « La piézo-électricité peut être définie comme étant la propriété que possèdent certains matériaux de pouvoir transformer une énergie électrique en une énergie mécanique, c'est-à-dire une onde électrique en une onde mécanique ou inversement».


VI-10-Avantages et Inconvénients du contrôle par ultrasons : Notre lecture dans plusieurs documents scientifiques au sujet de contrôle par ultrasons a mis en évidence des points ([Réf. 19], [Réf. 36] et([Réf. 12]) :

- Les avantages du contrôle par ultrasons :

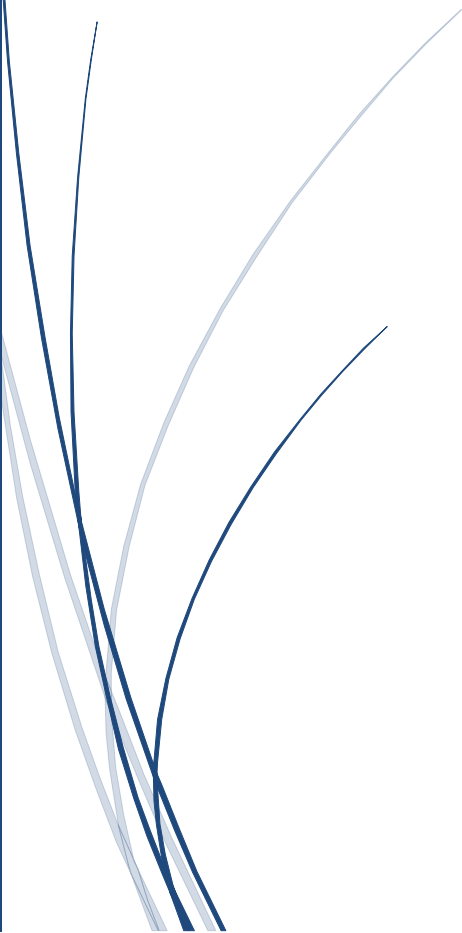
- Pouvoir pénétrant élevé, qui permet la détection de défauts au plus profond de la pièce.
- Haute sensibilité (1-2%) permettant la détection de défauts extrêmement petits.
- Il n'est pas nécessaire d'avoir accès aux deux cotés de la pièce donc une seule surface accessible.
- Plus grande précision que les autres méthodes non destructives pour de détection localisation et longueur du défaut et déterminer la profondeur des défauts internes et l'épaisseur des pièces à surfaces parallèles.
- Une certaine capacité d'estimer la taille, l'orientation, la forme et la nature des défauts.
- Non dangereux pour les opérations ou le personnel
- Capable d'un fonctionnement portable ou hautement automatisé.
- Il est utilisable sur la plus part des matériaux,
- Il n'a aucun effet négatif sur l'équipement et les matériaux,
- Il est d'application rapide,
- Associé aux fortes épaisseurs,
- Les résultats sont immédiats,
- Le matériel utilisé en contrôle par ultrason est léger et portable
- Le contrôle par ultrasons peut être facilement mis en œuvre sur le site de production.

-Les inconvénients du contrôle par ultrasons :

- Des connaissances techniques approfondies sont requises pour l'élaboration de procédures d'inspection.
- Les pièces rugueuses, de formes irrégulières, très petites ou minces ou non homogènes sont difficiles à inspecter.
- La surface doit être préparée en nettoyant
- Les articles inspectés doivent être résistants à l'eau lors de l'utilisation de couplant à base d'eau qui ne contiennent pas d'antirouille.
- Les défauts parallèles aux ondes ultrasonores sont difficiles à déceler.
- Il est peu adapté aux aciers inoxydables austénitiques,
- Il n'est pas adapté aux faibles épaisseurs,
- L'interprétation de l'opérateur est subjective.



Chapitre V^oII
Quelques exemples
des défauts dans les
 joints soudés



Introduction :

Dans ce dernier chapitre, nous présentons les aspects pratiques des essais de CND. Quelques exemples réels de l'application des techniques de CND : VT, PT, RT, MT et UT sont donnés, nous présentons et commentons les défauts éventuellement découverts dans les soudures des pièces en acier. Ces cas pratiques sont tirés de notre lecture dans plusieurs ouvrages scientifiques spécialisés. Pour chacun des cas présentés, nous citons sa référence bibliographique ou sur Internet, nous donnons le nom de la méthode de CND appliquée, les observations des auteurs de la publication, et enfin nos commentaires. Nous insistons sur le type de défaut de soudage plutôt que sur les causes derrière ce (ou ces) défaut(s).

VII-1. Analyse du cas N°1 - Essai VT

- ❖ **Source :** article de F. Scandella et L. Jubin (Réf. [R14])
- ❖ **Thème :** Procédés de soudage à forte Pénétration : principes et applications de deux variantes du procédé TIG.
- ❖ **Méthode de CND appliquée :** Le contrôle visuel
- ❖ **Observations :** L'image suivante est analysée.

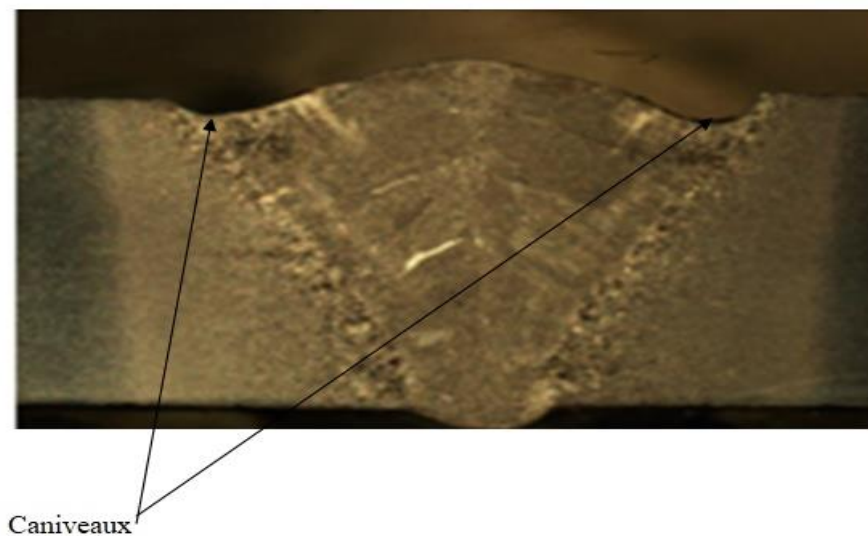


Figure. VII.1 : caniveaux (Réf. [R14])

- ❖ **Commentaires :** Le type de défaut enregistré est : *Caniveaux*

Deux plaques d'épaisseur 6 mm et l'intensité de soudage dépasse 500 A et/ou que la vitesse de soudage est de plus de 40 cm/min, donc des caniveaux apparaissent causés par un courant électrique de trop forte intensité et par une vitesse d'avance trop élevée.

VII-2. Analyse du cas N°2 - Essai RT

- ❖ **Source** : article de F. Scandella et L. Jubin (Réf. [R14])
- ❖ **Thème** : Procédés de soudage à forte Pénétration : principes et applications de deux variantes du procédé TIG.
- ❖ **Méthode de CND appliquée** : Le contrôle par radiographie
- ❖ **Observations** : L'image suivante est analysée.

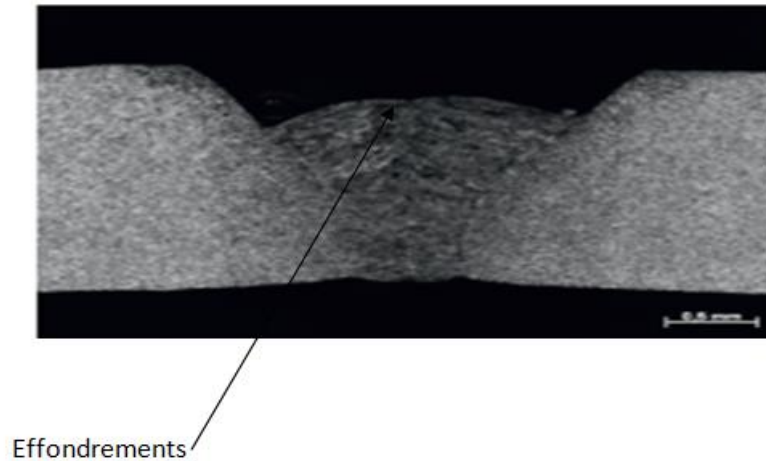


Figure. VII.2 : Présence des effondrements dans la soudure (Réf. [R14])

- ❖ **Commentaires** : Le type de défaut enregistré est : *Des effondrements*

Nous avons deux plaques d'épaisseur 2mm et la vitesse maximale de soudage atteinte fut de 15m/min. Nous observons un manque important de métal en partie supérieure (en surface) du cordon ; c'est le résultat de l'affaissement du métal déposé dû à une fusion excessive parce que la vitesse d'avance est trop rapide.

VII-3. Analyse du cas N°3 - Essai RT

- ❖ **Source** : site d'internet : www.slideshare.net (Réf. [R51])
- ❖ **Thème** : L'examen visuel des soudures
- ❖ **Méthode de CND appliquée** : Le contrôle par radiographie
- ❖ **Observations** : L'image suivante est analysée.



Figure. VII.3 : Présence d'inclusions dans le cordon (Réf. [R51])

❖ **Commentaires :** Le type de défaut enregistré est : *Des inclusions*

Cette photo montre qu'il y a un résidu de laitier emprisonné dans le cordon de soudure, c'est une inclusion de forme linéaire parallèle à l'axe du cordon

VII-4. Analyse du cas N°4 - Essai RT

- ❖ **Source :** site d'internet : www.slideshare.net (Réf. [R51])
- ❖ **Thème :** L'examen visuel des soudures
- ❖ **Méthode de CND appliquée :** Le contrôle par radiographie
- ❖ **Observations :** L'image suivante est remarquable.

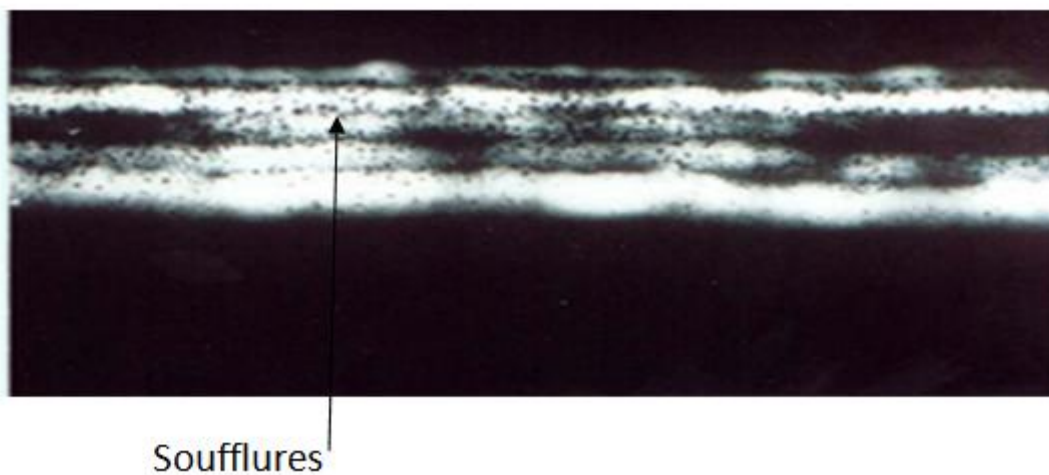


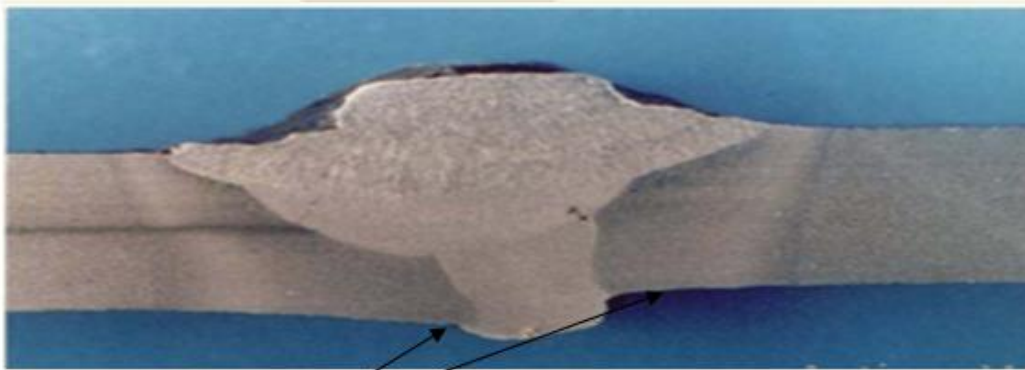
Figure. VII.4 : Présence de soufflures (Réf. [R51])

- ❖ **Commentaires :** Le type de défaut enregistré est : *Des soufflures*.

Nous voyons des points noirs d'une forme sphérique, ce qui indique la présence des soufflures.

VII-5. Analyse du cas N°5 - Essai RT

- ❖ **Source :** site d'internet : www.slideshare.net (Réf. [R51])
- ❖ **Thème :** L'examen visuel des soudures
- ❖ **Méthode de CND appliquée :** Le contrôle par radiographie
- ❖ **Observations :** L'image suivante est analysée.



Défaut d'alignement

Figure .VII.5 : défaut d'alignement (Réf. [R51])

- ❖ **Commentaires :** Le type de défaut enregistré est : *Un défaut d'alignement*

Nous remarquons que les deux pièces sont mal fixées, ce manque de bridage a créé un déplacement entre les deux parties à souder.

VII-6. Analyse du cas N°6 - Essai VT

- ❖ **Source :** Mémoire de Cheraitia R. (Réf. [R27])
- ❖ **Thème :** Etat de l'art sur les défauts dans les joints de soudure et leurs effets sur la fissuration par fatigue
- ❖ **Méthode de CND appliquée :** Le contrôle visuel
- ❖ **Observations :** L'image suivante est remarquable.

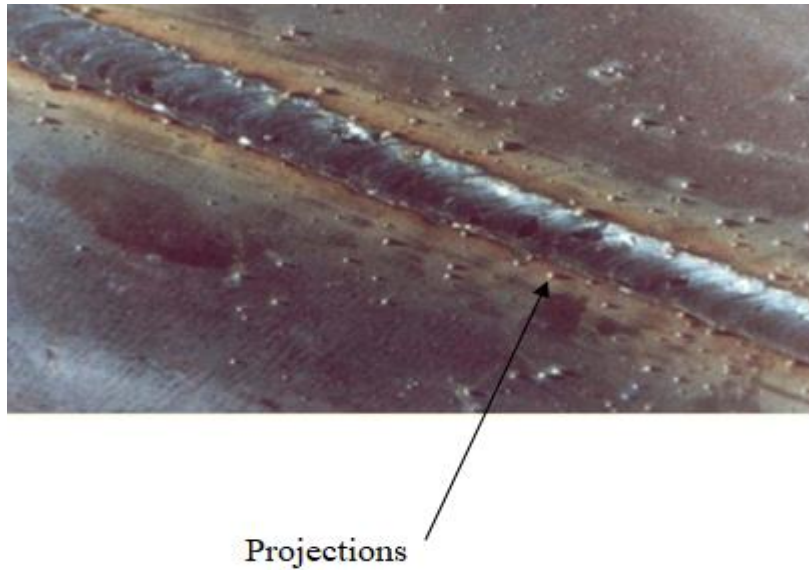


Figure. VII.6 : Mise en évidence de projections sur le cordon de soudure (Réf. [R27])

❖ **Commentaires :** Le défaut enregistré est : *Des projections*.

On remarque la présence de produits organiques formant une éclaboussure collée à la surface de la pièce ou dans au cordon.

VII-7. Analyse du cas N°7 - Essai VT

- ❖ **Source :** Une vidéo présentée en ligne à l'adresse :
www.youtube.com/watch?v=cTasmhBkSFg (Réf. [R53])
- ❖ **Méthode de CND appliquée :** Le contrôle visuel
- ❖ **Observations :** L'image suivante est remarquable.



Figure. VII.7 : Mise en évidence de plusieurs défauts de soudure (Réf. [R53])

- ❖ **Commentaires** : Les défauts enregistrés sont : *Des inclusions, Des projections et une faible pénétration.*

Nous observons que le cordon est de très mauvaise qualité et il existe une inclusion de laitier dans le cordon. Aussi, nous pouvons mettre en évidence une projection et une faible pénétration. D'après l'auteur de cette publication, ces défauts sont dus à une faible intensité du courant électrique, autrement dit il fallait choisir une intensité de courant plus grande et suffisante selon les règles de bonne exécution du soudage à l'arc électrique.

VII-8. Analyse du cas N°8 - Essai VT

- ❖ **Source** : Une vidéo présentée en ligne à l'adresse : www.youtube.com/watch?v=cTasmhBkSFg (Réf. [R53])
- ❖ **Méthode de CND appliquée** : Le contrôle visuel
- ❖ **Observations** : L'image suivante est analysée.



Figure. VII.8 : Mise en évidence de défauts dans un joint soudé (Réf. [R53])

- ❖ **Commentaires** : Notre analyse de l'image précédente a mis en évidence un ensemble de défauts de soudure ; ces défauts sont :
 - Le cordon a un mauvais aspect,
 - Il y a trop de projection, le cordon est anormalement épais et la pièce a tendance à se déformer ou se trouer,
 - Il y a une forte pénétration,
 - Il y a formation de caniveaux,
 - Il existe un effondrement du bain de fusion.

VII-9. Analyse du cas N°9 - Essai PT

- ❖ **Source** : mémoire de Fekraoui A. (Réf. [R25])
- ❖ **Thème** : Calcul des Structures Métalliques minces formés à froid et stage pratique
- ❖ **Méthode de CND appliquée** : Le contrôle par ressuage

❖ **Observations** : L'image suivante est remarquable.



Figure. VII.9 : Présence de caniveau et d'inclusions (Réf. [R25])

❖ **Commentaires** : Les défauts enregistrés sont : *Un caniveau et Des inclusions*

- Les inclusions sont dues à la mauvaise qualité de nettoyage, elles sont situées à l'interface ;
- Le caniveau observé est dû à l'effet de l'échauffement de la première passe lorsque la fusion du métal d'apport est effectuée pour la deuxième passe de la soudure.

VII-10. Analyse du cas N°10 - Essai VT

- ❖ **Source** : mémoire de Cheraitia R. (Réf. [R27])
- ❖ **Thème** : Etat de l'art sur les défauts dans les joints de soudure et leurs effets sur la fissuration par fatigue
- ❖ **Méthode de CND appliquée** : Le contrôle visuel
- ❖ **Observations** : L'image suivante est remarquable.

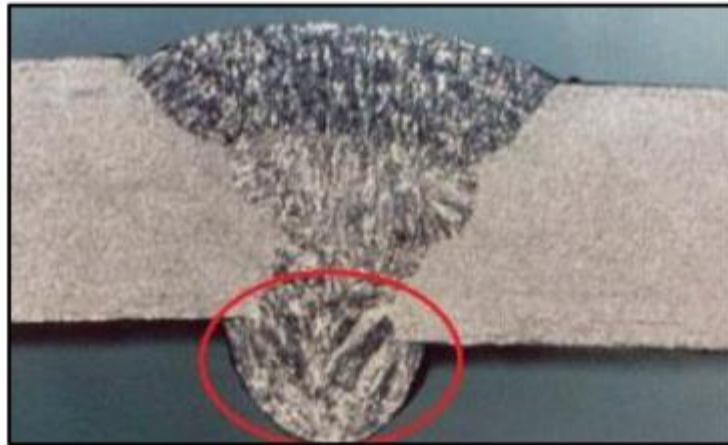


Figure. VII.10 : un excès de pénétration (Réf. [R27])

- ❖ **Commentaires :** Le défaut enregistré est *un excès de pénétration*.

Nous voyons la présence d'un surplus de métal à la racine de la soudure ; c'est un excès de pénétration.

VII-11. Analyse du cas N°11 - Essai RT

- ❖ **Source :** cours de Martin Viens (Réf. [R13]).
- ❖ **Thème :** Essais mécaniques et contrôle non destructif
- ❖ **Méthode de CND appliquée :** Le contrôle par radiographie
- ❖ **Observations :** L'image suivante est analysée.

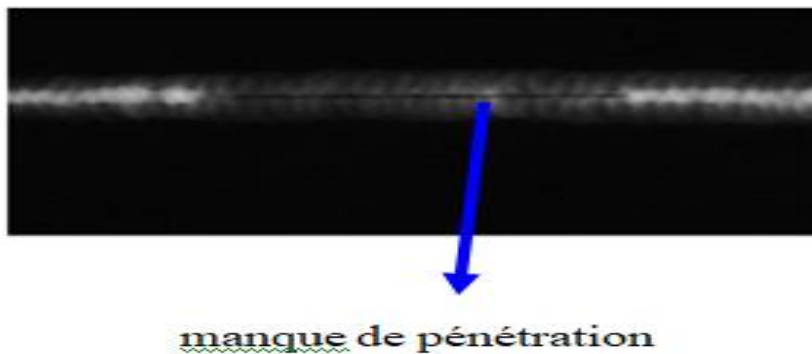


Figure. VII.11 : Un manque de pénétration (Réf. [R13])

- ❖ **Commentaires :** Le défaut enregistré est : *Un manque de pénétration*.

Nous observons dans cette photo une discontinuité au milieu de cordon de soudure, elle exprime un manque de pénétration.

VII-12. Analyse du cas N°12 - Essai RT

- ❖ **Source** : cours de Martin Viens (Réf. [R13]).
- ❖ **Thème** : Essais mécaniques et contrôle non destructif
- ❖ **Méthode de CND appliquée** : Le contrôle par radiographie
- ❖ **Observations** : L'image suivante est analysée.

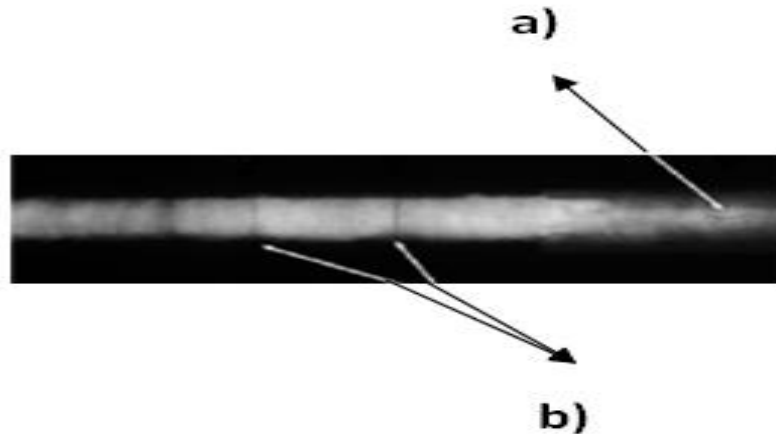


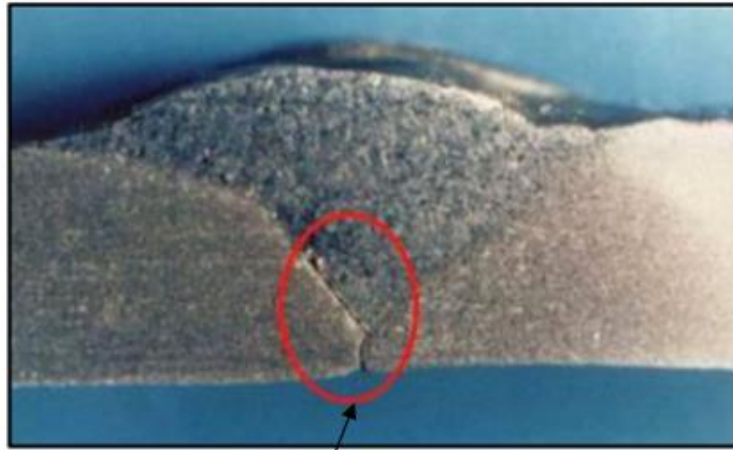
Figure. VII.12 : Présence de plusieurs défauts de type fissurations (Réf. [R13])

- ❖ **Commentaires** : Le défaut enregistré est : *Défaut de fissuration*

Nous observons l'existence de plusieurs discontinuités dans le joint, elles se présentent sous forme de lignes transversales (lignes (a)) et des lignes longitudinales (lignes (b)).

VII-13. Analyse du cas N°13 - Essai VT

- ❖ **Source** : mémoire Cheraitia R. (Réf. [R27]).
- ❖ **Thème** : Etat de l'art sur les défauts dans les joints de soudure et leurs effets sur la fissuration par fatigue
- ❖ **Méthode de CND appliquée** : Le contrôle visuel
- ❖ **Observations** : L'image suivante est remarquable.



Manque de pénétration

Figure. VII.13 : Mise en évidence d'un manque de pénétration et d'une convexité
(Réf.[R27])

- ❖ **Commentaires :** Les défauts enregistrés sont : *Un manque de pénétration et une forme convexe du cordon.*

Dans cette photo, nous remarquons l'existence d'une zone non fondue à la racine de cordon. En outre, il y a des excès de métal dans la partie supérieure de cordon appelé «convexité»

VII-14. Analyse du cas N°14 - Essai MT

- ❖ **Source :** mémoire de master de Fekraoui A. (Réf. [R25])
- ❖ **Thème :** Calcul des Structures Métalliques minces formés à froid et stage pratique
- ❖ **Méthode de CND appliquée :** Le contrôle par magnétoscopie
- ❖ **Observations :** L'image suivante est analysée.



Figure. VII.14 : Un nid de soufflures (Réf. [R25])

- ❖ **Commentaires** : Les défauts enregistrés sont : **Un nid des soufflures**

Nous voyons plusieurs points noirs, ce qui indique la présence un nid des soufflures.

VII-15. Analyse du cas N°15 - Essai MT

- ❖ **Source** : mémoire de master de Fekraoui A. (Réf. [R25])
- ❖ **Thème** : Calcul des Structures Métalliques minces formés à froid et stage pratique
- ❖ **Méthode de CND appliquée** : Le contrôle par magnétoscopie
- ❖ **Observations** : L'image suivante est analysée.



Figure. VII.15 : Un caniveau observé (Réf. [R25])

- ❖ **Commentaires** : Les défauts enregistrés sont : **Un caniveau**

Nous observons que sur la surface du cordon il y a une creux sur une grande partie de la longueur de la soudure ; il s'agit d'un caniveau.

VII-16. Analyse du cas N°16 - Essai PT

- ❖ **Source** : mémoire de master de Fekraoui A. (Réf. [R25])
- ❖ **Thème** : Calcul des Structures Métalliques minces formés à froid et stage pratique
- ❖ **Méthode de CND appliquée** : Le contrôle par ressuage
- ❖ **Observations** : L'image suivante est remarquable.



Figure. VII.16 : Présence des inclusions (Réf. [R25])

❖ **Commentaires :** Les défauts enregistrés sont : *des inclusions*

Nous remarquons la présence de résidus linéaires parallèles à l'axe du cordon de soudure, ils indiquent la présence des *inclusions*.



*Conclusion
Générale*



CONCLUSION GÉNÉRALE

A la fin de cette recherche portant sur l'analyse de la mission du contrôle technique de qualité des joints soudés des structures de génie civil fabriquées en acier, nous pouvons conclure les éléments suivants :

- Le contrôle technique de qualité est une tâche très importante pour satisfaire les exigences de sécurité et de durabilité des structures de génie civil, en particulier pour les joints soudés.
- Le contrôle technique de qualité peut être mené par application d'une ou de plusieurs méthodes dont les efficacités sont reconnues, elles sont classées en méthodes destructives et méthodes non destructives « CND »,
- Les méthodes de CND sont nombreuses, le présent mémoire a exploré cinq d'entre-elles : le contrôle visuel (VT), le contrôle par ressuage (PT), le contrôle par magnétoscopie (MT), le contrôle par radiographie (RT) et le contrôle par ultrasons (UT).
- Le Contrôle non destructif des assemblages soudés est encadré par de nombreuses normes internationales ISO et normes européennes EN. La norme ISO 3834 de l'année 2005 avec ses 5 parties nous parait comme une norme génératrice qui définit les niveaux de qualité recherchée par le contrôleur technique : niveau élémentaire, courant ou complet, et donne les grandes lignes à suivre pour un soudage de qualité admise.

Au niveau européen, les normes suivantes sont d'une importance capitale :

- Norme EN 12062 d'août 1997 modifiée en mai 2002, elle présente les principes généraux du CND des assemblages soudés pour les matériaux métalliques,
- Norme EN 1090 partie 2 de juillet 2002, elle présente les règles et exigences techniques pour des travaux d'exécution corrects des structures en acier,
- Norme EN 970 de février 1997, elle présente les règles pour un contrôle correct par la méthode visuelle VT,
- Pour le Contrôle par ressuage, on s'oriente vers les normes EN 1289 et EN 571-1,
- Pour le Contrôle par magnétoscopie, on s'oriente vers les normes EN 1290 et EN 1291,
- Pour le Contrôle par ultrasons, on s'oriente vers les normes EN 1712, EN 1713 et EN 1714,

- Pour le Contrôle par radiographie, on s'oriente vers les normes EN 1435 et EN 12517.
- Dans ce mémoire, nous avons réussi à l'exploration et aux commentaires de cinq parmi les techniques de CND les plus utilisées en pratique des soudures à l'arc électrique en construction métallique : les techniques VT, PT, RT, MT et UT. Nous avons présenté ces techniques, leurs domaines d'application, exigences en matériel et compétences humaines, limites d'usage et leur efficacité. Ces présentations se sont basées sur une recherche bibliographique et sur le réseau Internet.
- En plus des présentations des cinq techniques de CND, nous avons jugé utile d'ajouter un sixième chapitre portant une synthèse des défauts les plus courants qui touchent les joints soudés.
- Le coté pratique de notre mémoire se traduit par la présentation d'un ensemble de cas réels où des joints soudés ont été contrôlés par des techniques de CND. Ces cas pratiques ont été tirés de notre lecture dans plusieurs ouvrages scientifiques spécialisés. Pour chacun des cas présentés, nous avons cité sa référence bibliographique ou sur Internet, le nom de la méthode de CND appliquée, les observations des auteurs de la publication, et enfin nos commentaires. Chaque fois, nous insistions sur le(s) type(s) du ou des défauts enregistré(s) sur le cordon de soudure, plutôt que sur les causes derrière ce (ou ces) défaut(s). Il faut signaler que discuter des causes de défaut de soudage ne rentre pas dans le cadre de notre mémoire.
- Au cours de notre recherche bibliographique, nous avons eu des difficultés ; il s'agit :
 - du manque en matière de ressources bibliographiques disponibles à notre niveau et au niveau des bibliothèques de notre université,
 - du coût élevé des documents liés à notre sujet de recherche, que ce soit les documents normatifs, les livres, les revues scientifiques spécialisées et des articles de recherche. La plupart de ces documents n'étaient pas gratuits, et leurs coûts étaient non abordables pour nous.
 - de vivre difficilement face à la pandémie mondiale du virus COVID-19 qui a bouleversée notre pays, et qui m'a empêchée de consulter plus de documents dans les bibliothèques de notre université, de discuter face à face avec mon encadreur, et enfin de visiter des organismes appliquant les techniques de CND. En effet, nous avons tellement voulu visiter le pôle des essais de l'entreprise nationale des travaux de génie civil et canalisation Cosider, ce pôle étant situé dans la commune d'Oumache wilaya de Biskra. Ainsi, l'occasion de visiter cet établissement d'essais de contrôle de qualité des soudures pour

canalisations n'a pu être réalisée, et je n'ai pas pu voir comment se font les procédés de contrôle par magnétoscopie et par radiographie aux rayons X et aux rayons gamma, appliqués dans ce pôle d'essais. Ce stage pratique a été donc remplacé par une lecture dans les mémoires de master de génie civil des anciens étudiants de l'université de Biskra : Mr. M. Amine Hadji et Mr. A. Fakraoui, promotion de juin 2015.

➤ de comprendre quelques connaissances théoriques liées aux phénomènes physiques de mise en application de certains contrôles CND tels que la radiographie, la magnétoscopie et les ultrasons.

- Toutefois, je peux confirmer que l'établissement de ce mémoire était une belle occasion pour moi, de m'approfondir dans le domaine des travaux d'exécution des soudures pour structures métalliques, et aussi d'explorer en profondeur le domaine du contrôle technique de qualité des ouvrages, en particulier le contrôle à l'aide des techniques modernes non-destructives.



La

Bibliographie



La Bibliographie

- [1] CEN – Comité européen de normalisation, norme EN 970, Contrôle non destructif des assemblages soudés par fusion, Contrôle Visuel, Bruxelles, décembre 1998
- [2] CEN – Comité européen de normalisation, norme EN 1289, Contrôle non destructif des assemblages soudés - Contrôle par Ressuage des soudures, Bruxelles, Février 1998
- [3] CEN – Comité européen de normalisation, norme EN 571-1, Essais non destructifs - Examen par ressuage Partie 1 : Principes généraux, Bruxelles, Janvier 1997
- [4] CEN – Comité européen de normalisation, norme EN 1290 Contrôle non destructif des assemblages soudés - Contrôle par magnétoscopie des assemblages soudés , Bruxelles, Août 1998
- [5] CEN – Comité européen de normalisation, norme EN 1291 Contrôle non destructif des assemblages soudés - Contrôle par magnétoscopie des soudures, Bruxelles, Août 1998
- [6] CEN – Comité européen de normalisation, norme EN 1435 Contrôle non destructif des assemblages soudés — Contrôle par radiographie des assemblages soudés, Bruxelles, Août 1997
- [7] CEN – Comité européen de normalisation, norme EN 12517 Contrôle non destructif des assemblages soudés — Contrôle par radiographie des assemblages soudés — Niveaux d'acceptation, Bruxelles, Février 1998
- [8] CEN – Comité européen de normalisation, norme EN 1714 Contrôle non destructif des assemblages soudés — Contrôle par ultrasons des assemblages soudés, Bruxelles, Août 1997
- [9] CEN – Comité européen de normalisation, norme EN 1713 Contrôle non destructif des assemblages soudés — Contrôle par ultrasons — Caractérisation des indications dans les assemblages soudés , Bruxelles, Mai 1997
- [10] BEN ISSAAD S., Le soudage - cours de génie mécanique TEC 340, édité par office des publications universitaires, Alger, 1995
- [11] Althouse A., Turnquist C., Bowditch W., et al., Technologie des métaux , Contrôles et essais des soudures ,édition Reynald Goulet, Canada, 2008
- [12] RYBAKOV V., le soudage et le coupage des métaux , édition MIR, Moscou, Russie, 1980
- [13] Martin Viens, Essais mécaniques et contrôle non destructif - Radiographie (RT), département de génie mécanique, Programme de baccalauréat, Québec, Canada
- [14] Scandella F et Jubin L., Procédés de soudage à forte pénétration : Principes et applications de deux variantes du Procédé TIG, éditions Institut de Soudure IS, France, 2017

La Bibliographie

- [15] E.W.G - European Welding Group, Instruction pour l'inspection visuelle selon EN ISO 17637 avec les critères d'acceptation pour EN ISO 9606-1, Allemagne, aout 2017
- [16] CSMOFMI- **Le Comité sectoriel de la main-d'œuvre dans la fabrication métallique industrielle**, Soudage et Assemblage-soudage, guide d'auto-apprentissage, Québec, Canada, 2010
- [17] AWS-American Welding Society, norme AWS B1.11:2000, *Guide for the Visual Examination of Welds* , Florida, USA, January 7, 2000
- [18] Cherfaoui M., Essais non destructifs, document BM6-450, éditions Techniques d'ingénieur EDI, Paris, 2006
- [19] RAID A., cours de contrôles non destructifs , université USTO d'Oran, 2018
- [20] HADJI A, Les procédés de contrôle technique de qualité des assemblages soudés – étude bibliographique et stage pratique, Mémoire de master en génie civil, Université de Biskra, juin 2015
- [21] BOUMELITA Y, Dégradation des propriétés mécaniques du cordon de soudure d'un acier API X70 en fonction de la succession des réparations Application dureté , Mémoire de master en Génie Mécanique ,Université Badji Mokhtar Annaba ,juin 2017
- [22] Khoualdia S, Orientation de la fonction maintenance à partir des défauts de soudure détectés par CND et des rendements techniques « Cas d'ALFAPIPE », Mémoire de master en Génie Mécanique, Université de Annaba, juin 2017
- [23] BENCHADLI I, Détermination des différents critères de qualité des joints soudés sur les pipelines en service, Mémoire de master en génie mécanique, Université de Tlemcen , juin 2017
- [24] Belacel B. et Bouchria S., Contrôle des joints de soudure des pipelines par ultrasons, Mémoire de master en Génie Mécanique, Université de Boumerdes, 2017
- [25] FEKRAOUI A , Calcul des Structures Métalliques minces formés à froid, Mémoire de master en génie civil ,Université de Biskra, juin 2015
- [26] EKKOUCHE M et NAHI BELKOU A, Etude des propriétés piézoélectriques d'un nouveau matériau céramique, Mémoire de master en ingénierie du gaz naturel (I G N),Université KASDI-MERBAH Ouargla, 2015
- [27] Cheraitia R., Etat de l'art sur les défauts dans les joints de soudures et leurs effets sur la fissuration par fatigue, Mémoire de Master en Génie Mécanique , Université de Tlemcen, 2015
- [28] site d'internet : www.rocdacier.com
- [29] site d'internet : <http://www.cours.gel.ulaval.ca>

La Bibliographie

- [30] site d'internet : <https://www.bonhommebois.com>
- [31] site d'internet : <https://www.amazon.fr>
- [32] site d'internet : <https://www.micronfrance.com>
- [33] site d'internet : <https://www.2gtuyauterie.fr/>
- [34] site d'internet : <https://www.ingenieurkurse.de/werkstofftechnik-1/werkstoffpruefung/zerstoerungsfreie-werkstoffpruefung/eindringverfahren.html>
- [35] site d'internet : <http://aero3d.fr/fr/ressuage/1159-kit-de-ressuage-complet-ardrox.html>
- [36] www.steelbizfrance.com, site internet pour la promotion de la construction métallique, dirigé par le centre de recherche CTICM, Paris, France
- [37] site d'internet : http://www.llogsa.com/Descargas/Ultratips/Ediciones/Utipsed_166.php
- [38] site d'internet : <https://www.hockerinc.com/product/magnetic-penetratometer-with-pouch-pie-gauge/>
- [39] site d'internet : <https://www.tvcalx.co.uk/product/model-25-calibrated-magnetic-field-indicator-mag0007/>
- [40] site d'internet : <https://www.noon.com/saudi-ar/mini-flashlight-13-3-3-centimeter/N16438314A/p>
- [41] site d'internet : <https://metsuco.com/product/magnaflux-spotcheck-cleaner-remover/>
- [42] site d'internet : www.srem.fr
- [43] site d'internet : www.univ-usto.dz
- [44] site d'internet : www.tradeindia.com
- [45] site d'internet : <https://www.olympus-ims.com/fr/applications/ultrasonic-couplant/>
- [46] site d'internet : <https://www.directindustry.fr/prod/harvard-apparatus/product-22358-816289.html>
- [47] site d'internet : <https://www.maintenanceandco.com/p/15261/palpeurs-ultrasons-harisonic>
- [48] site d'internet : <https://amupod.univ-amu.fr/video/1484-prepa-tp-ultrason-et-son-acquisition-de-signal-2/>
- [49] site d'internet : <https://binarytech-dz.com/produit/ultrason-hc-sr04/>
- [50] site d'internet : http://ticsante.ustrasbg.fr/lib/exe/fetch.php?media=projets_ingenieurs_promo_2014:cahier_courstp_final.pdf

La Bibliographie

[51] site d'internet : www.slideshare.net

[52] <https://www.wikipedia.org/>

[53] vidéo sur internet : <https://www.youtube.com/watch?v=cTasmhBkSFg>