



HAL
open science

Contribution à la caractérisation en contrôle non-destructif ultrasonore de défauts de soudures bout-à-bout en acier carbone: élaboration d'une procédure complète automatisée au diagnostic

Nathalie Kopp

► **To cite this version:**

Nathalie Kopp. Contribution à la caractérisation en contrôle non-destructif ultrasonore de défauts de soudures bout-à-bout en acier carbone: élaboration d'une procédure complète automatisée au diagnostic. Sciences de l'ingénieur [physics]. Université Paul Verlaine - Metz, 1999. Français. NNT : 1999METZ004S . tel-01749121

HAL Id: tel-01749121

<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01749121>

Submitted on 29 Mar 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>



UNIVERSITE DE
METZ

S/Mz 3314

Laboratoire
Interfaces Composants et Microélectronique
Centre Lorrain d'Optique et d'Electronique des Solides



Supélec

THESE



présentée à l'Université de Metz pour l'obtention du diplôme de
DOCTEUR de l'Université de METZ

Spécialité: **Electronique**
Ecole Doctorale: PROMEMA

**CONTRIBUTION A LA CARACTERISATION EN CONTROLE
NON DESTRUCTIF ULTRASONORE DE DEFAUTS DE SOUDURES
BOUT-A-BOUT EN ACIER FAIBLEMENT ALLIE.
ELABORATION D'UNE PROCEDURE D'AIDE AUTOMATISEE
AU DIAGNOSTIC**

par
Nathalie KOPP

Soutenue le 4 mai 1999

Après avis de:

MM	G. CORNELOUP	Professeur à l'Université d'Aix-Marseille II	Rapporteur
	A. CORNET	Professeur à l'E.N.S.A.I.S. de Strasbourg	Rapporteur

Devant la commission d'examen formée de:

MME	M. LUMBRERAS	Professeur à l'Université de Metz	Directeur de thèse
MM	D. FLOTTE	Ingénieur de recherche à l'Institut de Soudure	Responsable de thèse
	G. CORNELOUP	Professeur à l'Université d'Aix-Marseille II	Rapporteur
	A. CORNET	Professeur à l'E.N.S.A.I.S. de Strasbourg	Rapporteur
	B. LEPLEY	Professeur à l'Université de Metz	Examineur
	D. CHA...	...nt de Soudure	Examineur
	M. NAD...	... Poincaré	Examineur

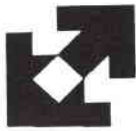
BIBLIOTHEQUE UNIVERSITAIRE DE METZ



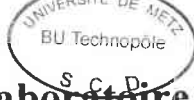
022 420703 0

57070 METZ - France

Tél: 03 87 75 96 00 ; Fax: 03 87 75 96 01



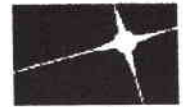
UNIVERSITE DE
METZ



Laboratoire

Interfaces Composants et Microélectronique

Centre Lorrain d'Optique et d'Electronique des Solides



Supélec

b146159

THESE

présentée à l'Université de Metz pour l'obtention du diplôme de
DOCTEUR de l'Université de METZ

Spécialité: **Electronique**
Ecole Doctorale: PROMEMA

BIBLIOTHEQUE UNIVERSITAIRE TECHNOPÔLE - METZ -	
N° Inv.	19990155
Cote de	S17z 9914
Loc.	Magasin
Cat.	

**CONTRIBUTION A LA CARACTERISATION EN CONTROLE
NON DESTRUCTIF ULTRASONORE DE DEFAUTS DE SOUDURES
BOUT-A-BOUT EN ACIER FAIBLEMENT ALLIE.
ELABORATION D'UNE PROCEDURE D'AIDE AUTOMATISEE
AU DIAGNOSTIC**

par
Nathalie KOPP

Soutenu le 4 mai 1999

Après avis de:

MM	G. CORNELOUP	Professeur à l'Université d'Aix-Marseille II	Rapporteur
	A. CORNET	Professeur à l'E.N.S.A.I.S. de Strasbourg	Rapporteur

Devant la commission d'examen formée de:

MME	M. LUMBRERAS	Professeur à l'Université de Metz	Directeur de thèse
MM	D. FLOTTE	Ingénieur de recherche à l'Institut de Soudure	Responsable de thèse
	G. CORNELOUP	Professeur à l'Université d'Aix-Marseille II	Rapporteur
	A. CORNET	Professeur à l'E.N.S.A.I.S. de Strasbourg	Rapporteur
	B. LEPLEY	Professeur à l'Université de Metz	Examineur
	D. CHAUVEAU	Responsable D.C.N.D. à l'Institut de Soudure	Examineur
	M. NADI	Professeur à l'Université Henri Poincaré de Nancy I	Examineur

Sommaire

Remerciements	3
Introduction générale	4
Préambule: Des méthodes manuelles à l'automatisation	7
1. Introduction	7
2. La problématique du contrôle ultrasonore	8
3. Les limites du contrôle manuel.....	8
Chapitre I: Classification des défauts de soudure à l'aide du contrôle non destructif ultrasonore	10
I. 1. Un peu d'histoire.....	10
I. 2. Classification par reconnaissance de modèle	11
I. 3. Méthodes non statistiques	21
I. 4. Conclusion.....	25
Chapitre II: La recommandation IS. US. 319.21 - 2^{de} édition - Procédure Cascade	26
II. 1. Etude préparatoire	26
II. 2. La recommandation IS. US. 319.21 - 2 ^{de} édition - Juin 1995	31
II. 3. Le document B - La procédure "Cascade"	34
II. 3. 1. <i>Conditions d'utilisation de la procédure Cascade</i>	35
II. 3. 2. <i>La procédure Cascade</i>	38
II. 4. Conclusion	49
Chapitre III: Aspects théoriques du contrôle non destructif ultrasonore	50
III. 1. Introduction	50
III. 2. Le contrôle non destructif par ultrasons des assemblages soudés	50
III. 2. 1. <i>Principe du contrôle ultrasonore</i>	50
III. 2. 2. <i>Nature des ondes ultrasonores</i>	51
III. 2. 3. <i>La production des ultrasons</i>	52
III. 2. 4. <i>Propriétés des ondes ultrasonores</i>	57
III. 3. <i>Les principales méthodes de contrôle</i>	61
III. 4. Les défauts internes affectant les constructions soudées	65
Chapitre IV: Etude expérimentale et automatisation des quatre premières étapes de la procédure Cascade	69
IV. 1. Contrôle des éprouvettes - Acquisition de signaux ultrasonores représentatifs	69
IV. 1. 1. <i>Les éprouvettes étudiées</i>	69
IV. 1. 2. <i>Configuration du contrôle</i>	72

<i>IV. 1. 3. Le système expérimental</i>	73
<i>IV. 1. 4. Visualisation des résultats - Imagerie ultrasonore</i>	79
<i>IV. 1. 5. Post-traitement sous environnement MUSTIG</i>	80
IV. 2. Classification selon les quatre premières étapes de la procédure Cascade	83
<i>IV. 2. 1. Exemple de classification d'une fissure longitudinale en finition - Etape 2</i>	83
<i>IV. 2. 2. Cas d'un défaut en racine: exemple de classification d'un manque de pénétration - Etape 2</i>	85
<i>IV. 2. 3. Exemple de classification d'un excès de pénétration - Etape 3</i>	90
<i>IV. 2. 4. Etude de la notion de "rugosité" d'un écho - Etape 4</i>	91
IV. 3. Conclusion	95
Chapitre V: Classification des nids de soufflures et des fissures ramifiées - Etape 5 de la procédure Cascade	96
V. 1. Introduction	96
V. 2. Une première approche	96
V. 3. Etude comportementale des ultrasons sur un nid de soufflures et sur une fissure ramifiée (ou fortement rugueuse)	98
<i>V. 3. 1. Cas du nid de soufflures</i>	98
<i>V. 3. 2. Cas de la fissure ramifiée ou fortement rugueuse</i>	102
<i>V. 3. 3. Premiers résultats</i>	105
V. 4. Recherche de paramètres représentatifs	106
<i>V. 4. 1. Etude comportementale</i>	107
<i>V. 4. 2. Méthode de suivi des échos de défaut</i>	109
<i>V. 4. 3. Premier paramètre: étude des variations d'amplitude (δA)</i>	116
<i>V. 4. 4. Second paramètre: étude des variations du nombre de pics détectés dans l'écho de défaut (δN)</i>	118
V. 5. Résultats et discussion	119
<i>V. 5. 1. Présentation des résultats</i>	119
<i>V. 5. 2. Discussion</i>	123
V. 6. Evolution du développement informatique des paramètres	125
V. 7. Conclusion	126
Conclusion générale	127
Références bibliographiques	130

Annexes

Remerciements

Ce travail a été effectué au sein du laboratoire Développement Contrôles Non destructifs (D.C.N.D.) de l'Institut de Soudure à Ennery, en collaboration avec le groupe Capteurs du Laboratoire Interfaces, Composants et Microélectronique (L.I.C.M.) du Centre Lorrain d'Optique et d'Electronique des Solides (C.L.O.E.S.) de l'Université de Metz.

Tout d'abord, je remercie Monsieur Daniel Chauveau pour m'avoir accueillie au sein du laboratoire Développement Contrôles Non destructifs.

Ma profonde reconnaissance va à mon directeur de thèse, Madame Martine Lumbreras, Professeur à l'Université de Metz, que je tiens à remercier pour l'aide constante qu'elle m'a apportée pendant cette thèse.

Je remercie tout particulièrement Monsieur Didier Flotté, mon responsable de thèse à l'Institut de Soudure, qui m'a prodigué tout au long de ce travail une aide précieuse. Son soutien et ses conseils m'ont permis de mener à bien ma recherche.

Je remercie Monsieur Bernard Lepley, Professeur à l'Université de Metz, et Directeur du L.I.C.M. de m'avoir accueillie dans son équipe.

J'exprime toute ma gratitude à Monsieur Gilles Corneloup, Professeur à l'Université d'Aix-Marseille II, et Monsieur Alain Cornet, Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure des Arts et Industries de Strasbourg, qui ont accepté la tâche de rapporteurs de cette thèse.

Enfin, je remercie Monsieur Mustapha Nadi, Professeur à l'Université Henri Poincaré de Nancy, qui s'est tenu au courant de mon travail depuis mon année de D.E.A., d'avoir accepté de faire partie du jury.

D'une manière générale, je tiens à remercier l'équipe du laboratoire D.C.N.D., le personnel du Centre André Leroy de l'Institut de Soudure, et l'équipe du L.I.C.M., pour leur contribution à une ambiance de travail agréable.

Introduction générale

Depuis quelques dizaines d'années, des équipes de recherche travaillent sur la caractérisation par contrôle non destructif ultrasonore de défauts¹ détectés dans des soudures en acier faiblement allié², type d'acier le plus couramment utilisé en milieu industriel. Leur but est de déterminer des caractéristiques propres à chaque nature de défaut, qui permettraient de différencier les défauts entre eux, et de les regrouper sous forme de classes. Deux grandes classes de défauts sont définies à ce jour: les défauts volumiques et les défauts non volumiques. Cette distinction est primordiale lors d'un contrôle afin de pouvoir réparer toute zone d'une soudure affectée par la présence d'un défaut non volumique, généralement inacceptable suivant les codes applicables aux constructions soudées.

La recommandation IS. US. 319.21 - 2^{de} édition, incluse dans la norme européenne EN 1713, définit une méthode de contrôle manuel par ultrasons des soudures à pleine pénétration, dans laquelle est décrite la procédure Cascade comme une série de cinq tests successifs qui permet de classer les défauts détectés en défauts volumiques ou non volumiques. Celle-ci doit être utilisée lors des contrôles réglementaires depuis le 1^{er} mars 1999.

Afin de donner aux contrôles une notion de répétabilité, et de diminuer de façon considérable le temps d'interprétation des résultats, on cherche, aujourd'hui, à rendre automatique la classification des défauts.

L'Institut de Soudure, qui a contribué à l'élaboration de la recommandation IS. US. 319.21, commence l'adaptation au contrôle automatique de ce document, en l'intégrant dans un nouvel outil de chantier, développé par le laboratoire Développement Contrôles Non destructifs à Ennery en partenariat avec un fabricant de matériel ultrasonore.

Le but de notre travail est de réaliser une aide au diagnostic, la plus automatisée possible, permettant au contrôleur de conclure quant à la nature d'une indication détectée lors d'un contrôle automatique réalisé sur une soudure bout-à-bout en acier faiblement allié.

¹ Voir glossaire en annexe 1

² Acier faiblement allié: voir paragraphe II. 2. Document A

Cette aide au diagnostic doit s'adapter à chaque configuration d'examen étudiée et, pour cela, nécessite l'intervention, la plus minime possible, de l'opérateur. Il doit exister une interactivité importante entre l'homme et sa machine. De plus, l'opérateur doit pouvoir, à chaque instant, suivre l'évolution de l'analyse réalisée par le système. En aucun cas, le système ne devra prendre une décision, ou fournir un diagnostic, sans que celui-ci n'ait été préalablement validé par l'opérateur. Nous avons donc choisi de travailler sur une automatisation étape par étape de la procédure Cascade. Ainsi, à chaque niveau, l'opérateur pourra vérifier le résultat du diagnostic offert par le système, et dans le pire des cas, conclure à l'existence d'un doute, plutôt que de donner un résultat erroné.

Plusieurs conditions, imposées par la recommandation IS. US. 319.21, ont dû être considérées avant de commencer notre étude. D'une part, la caractérisation repose sur une étude de signaux ultrasonores redressés filtrés, qui ont l'avantage d'être facilement exploitables dans le domaine temporel. D'autre part, les configurations d'examen (choix des transducteurs, des accès par rapport au cordon de la soudure, des angles d'incidence, etc.) sont limitées.

Notre travail se découpe en cinq chapitres. Le chapitre I présente un état de l'art concernant les différentes méthodes de caractérisation des défauts de soudure.

Dans le chapitre II, nous présentons et analysons la recommandation IS. US. 319.21 - 2^{de} édition, et plus particulièrement le document B. Celui-ci définit la procédure Cascade qui permet à un opérateur de classer une indication détectée en défaut volumique ou non volumique. Cette procédure est la base de notre travail.

Nous abordons, dans le chapitre III, les aspects théoriques du contrôle non destructif ultrasonore. Nous traitons ainsi des ondes ultrasonores, des transducteurs, des principales méthodes de contrôle, et enfin des défauts susceptibles d'apparaître dans des cordons de soudures.

La suite de notre étude est répartie sur deux chapitres. Dans le chapitre IV, nous présentons les conditions expérimentales, les défauts étudiés, et les outils utilisés. De plus, nous traitons les quatre premières étapes de la procédure Cascade. Ainsi, nous appliquons la procédure à vingt-sept défauts, nous exposons les différents traitements appliqués aux signaux ultrasonores afin de diagnostiquer automatiquement la nature des défauts, et les résultats obtenus.

Dans le chapitre V, nous traitons du cas particulier des défauts de type fissure ramifiée ou fortement rugueuse, et de type nid de soufflures. En effet, seule la cinquième et dernière étape de la procédure Cascade permet, théoriquement, de différencier ces deux types de défauts. Mais cette distinction est délicate, même pour un opérateur expérimenté effectuant un contrôle manuel traditionnel. Nous avons donc commencé par analyser le comportement théorique des échos ultrasonores réfléchis sur ces deux types de défauts lors d'un déplacement du traducteur perpendiculaire au cordon de la soudure. A partir de cette étude, nous avons testé plusieurs méthodes permettant de caractériser efficacement les deux types de défauts concernés. Nous présentons ensuite la validation de ces tests, effectuée sur douze défauts réels.

Préambule: Des méthodes manuelles à l'automatisation

1. Introduction

Afin d'éloigner tout risque d'endommagement ou de danger, les assemblages soudés doivent subir des contrôles en fabrication ou en service. Lors de ces contrôles, on va chercher à prouver la présence ou non de défauts dans le cordon de la soudure et étudier leur nocivité. Le but de cette tâche est de déterminer si l'assemblage est sain (c'est-à-dire sans défauts), s'il comporte des défauts dits acceptables (pouvant être laissés dans la pièce sans aucun risque), ou si au contraire il doit subir une réparation, ou même être rejeté.

“Caractériser une indication” signifie:

- *la localiser* dans l'épaisseur de la structure,
- *l'identifier* (en défaut volumique ou non volumique, ou donner sa nature si cela est possible),
- enfin, *la dimensionner* (longueur et si possible hauteur).

La première et la troisième phase sont toujours présentes lors d'une caractérisation, et il existe déjà plusieurs techniques efficaces. La phase d'identification, quant à elle, reste plus délicate. Pourtant, la distinction entre les défauts volumiques (inclusions, soufflures,...) et les défauts non volumiques (fissures, manques de fusion,...) ne doit pas laisser de doute. Il est très important en effet de pouvoir faire la différence entre une fissure et une inclusion, la fissure risquant de se propager dans l'assemblage, contrairement à l'inclusion. C'est cette notion d'évolution dans le temps, entre autres, qui rend les défauts non volumiques dangereux. Ceux-ci doivent donc être soigneusement caractérisés, puis, si nécessaire, éliminés.

La méthode de contrôle et de caractérisation utilisée dans ce travail est le contrôle ultrasonore.

2. La problématique du contrôle ultrasonore

Le contrôle ultrasonore des soudures comporte deux étapes. La première est d'obtenir un signal quel que soit le défaut présent dans l'assemblage, et d'avoir la certitude que ce signal correspond effectivement à la présence d'un défaut de compacité, et non de la structure ou de la géométrie. La seconde est de déterminer les caractéristiques du défaut à partir du signal ultrasonore renvoyé par ce dernier.

La problématique du contrôle réside dans le fait que l'amplitude de l'écho reçu est affectée par de nombreux facteurs d'influence autres que la taille physique de la discontinuité réfléchissante, et ne saurait, en conséquence, être prise comme seul critère pour dimensionner ou identifier un défaut. Les facteurs d'influence sont liés soit au système défaut-soudure-pièce, soit aux conditions opératoires. On en distingue deux groupes: les facteurs sur lesquels un opérateur ne peut pas agir (état de surface, géométrie, propriétés physiques du métal), et les facteurs sur lesquels un opérateur peut agir dans une certaine mesure (tout ce qui dépend de l'instrumentation, le mode de couplage, les conditions d'étalonnage, le mode d'enregistrement ou l'opérateur lui-même).

3. Les limites du contrôle manuel

Lors d'un contrôle manuel par contact direct du traducteur sur la pièce, il est fait usage d'un milieu de couplage dont la viscosité doit être suffisamment importante pour qu'il se maintienne de façon satisfaisante sur des parois inclinées ou verticales. En raison de la pression appliquée par l'opérateur sur le traducteur, on observe une variation d'épaisseur de cette lame de couplage qui provoque une variation de l'énergie acoustique transmise dans le matériau contrôlé. Cette situation entraîne une variation de la probabilité de détection des réflecteurs.

La trajectoire imprimée au traducteur lors d'un contrôle manuel est irrégulière, et il est possible que le pas de déplacement devienne trop important lorsque la fatigue de l'opérateur s'accroît (théoriquement, le pas doit être au plus égal à la moitié du diamètre du faisceau).

En dehors de la qualité de la procédure à partir de laquelle un contrôle manuel est réalisé, l'efficacité de celui-ci est également liée à la qualification et à l'expérience professionnelle de l'agent de contrôle. Les équipements utilisés ainsi que les conditions de travail jouent également un rôle important vis-à-vis de la qualité d'un examen.

Enfin, quelle que soit la qualification d'un opérateur, celui-ci peut être exposé, après plusieurs heures de travail, à une certaine fatigue ou lassitude qui provoque une baisse de l'attention. Celle-ci peut conduire à l'omission de signaux de défauts, et donc en fait à une non détection de ces derniers.

Certains de ces problèmes peuvent être résolus par la mécanisation puis l'automatisation du contrôle, en particulier les limites dues au mouvement du traducteur et au traitement des données. En effet, l'aptitude de l'homme à évaluer le contenu d'une seule indication dans un signal relativement complexe est grande mais cependant limitée par rapport à l'ensemble des informations provenant d'un même défaut. L'utilisation de systèmes mécanisés avec enregistrement des résultats et traitement différé de ceux-ci présente donc un grand intérêt dans l'identification des défauts.

Un système de contrôle automatique convenablement conçu pourra pallier dans une certaine mesure au manque de fidélité et de reproductibilité du contrôle manuel, mais cependant ne pourra pas rivaliser avec l'intelligence humaine puisqu'il ne trouvera pas de solutions nouvelles aux difficultés imprévues qu'il pourra rencontrer lors d'une opération de contrôle.

Chapitre I: Classification des défauts de soudure à l'aide du contrôle non destructif ultrasonore

I. 1. Un peu d'histoire...

Déjà à la fin des années 1950, G. Chanty et A. Nouvet [1] présentent une étude visant à identifier la nature des défauts détectés par ultrasons dans des constructions soudées. Ils y décrivent pour chaque type de défauts les caractéristiques de leur écho (front, allure et amplitude), ainsi que l'évolution de l'écho présentant l'amplitude maximale lorsque le traducteur subit une rotation autour du défaut, celui-ci étant pris comme centre de rotation (figure I-1 et annexe 2). De cette façon, ils réalisent une première distinction entre les manques de pénétration, les soufflures isolées et groupées, et les inclusions isolées et en chapelet (tableau I-1).

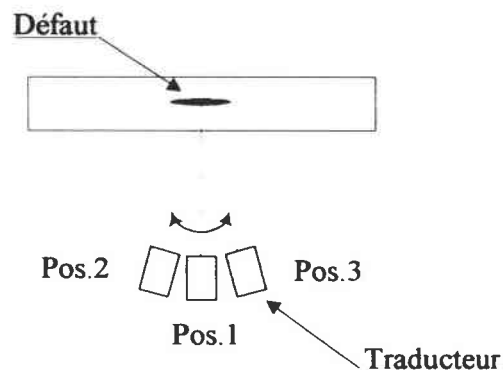


Figure I-1:

Evolution du traducteur autour du défaut [1]

Cette étude a beaucoup marqué le contrôle ultrasonore puisqu'elle a servi de base plus tard à l'élaboration de codes concernant la caractérisation des défauts de soudures. Entre autres, elle a été un des points de départ de la recommandation IS. US. 319.21 - 1^{ère} édition [2] (critère du mouvement orbital).

Depuis cette première étude, de nombreux chercheurs tentent d'automatiser la caractérisation des défauts, ou du moins de faire apparaître des paramètres représentatifs afin de fournir une aide au diagnostic.

Nature des défauts		Traits caractéristiques des échos			Rotation de la sonde autour du défaut pris comme centre	Epaisseur de l'éprouvette mm	Etat de surface	Réglage		Observations
		front	allure	amplitude				Puissance*	Amplifications*	
Manques de pénétration		raide	effilée	importante	L'écho disparaît totalement pour une rotation de $\pm 5^\circ$	10 20	bon bon	2 2	10 10	Le défaut est rectiligne et dans l'axe de la soudure. L'allure de l'écho est analogue à celle que l'on obtient sur le coin d'une tôle
Soufflures	isolées	dentelé	quelque peu élargie	faible	L'écho subsiste	10 20 30	bon bon passable	5 5 5	10 10 10	L'allure de l'écho est pratiquement la même pour un nid de soufflures important et pour une inclusion isolée
	groupées	raide	quelque peu élargie	faible	L'écho subsiste	10	bon	5	10	
Inclusions	isolées	dentelé	quelque peu élargie	faible	L'écho subsiste mais son amplitude varie et passe par plusieurs maxima au cours de la rotation	10 20	bon bon	5 5	10 10	
	en chapelet	la largeur du pied de l'écho est importante				30	passable	5	10	

*Donné sans unité.

Tableau I-1:

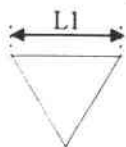
Caractéristiques des échos représentatifs de différents types de défauts [1]

1. 2. Classification par reconnaissance de modèle

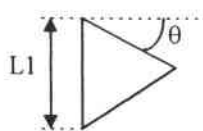
Dès 1976, J.L. Rose et collaborateurs [3, 4, 5] montrent qu'il est possible de trouver des paramètres représentatifs de certains types de défauts. Pour cela, des défauts artificiels sont créés par électroérosion dans des éprouvettes. Ils sont ensuite répartis selon cinq classes (figure I-2):

- défauts triangulaires droits (une des faces est parallèle à la surface),
- défauts triangulaires inclinés,
- défauts cylindriques,
- défauts rectangulaires,
- défauts elliptiques.

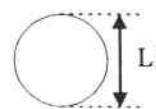
Type 1: Défaut triangulaire droit



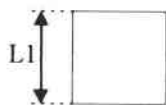
Type 2: Défaut triangulaire incliné



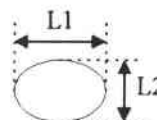
Type 3: Défaut cylindrique



Type 4: Défaut rectangulaire



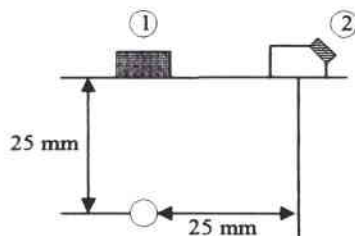
Type 5: Défaut elliptique

**Figure I-2:***Nature des défauts artificiels étudiés [3]*

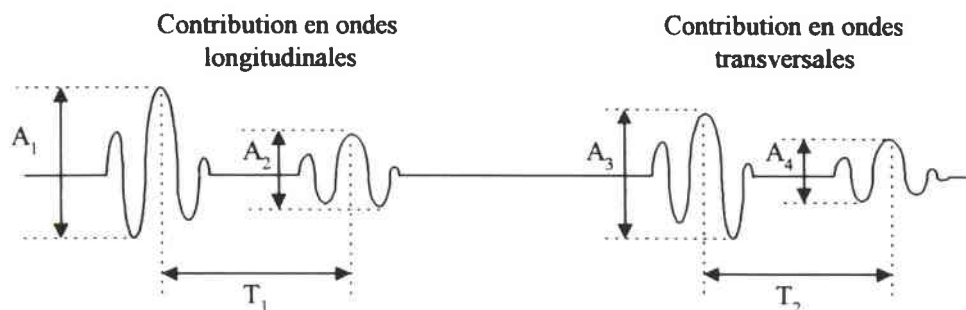
Quatre paramètres, déduits de rapports d'amplitudes et d'une différence de temps de parcours, sont alors extraits des signaux obtenus par transmission sur les défauts (figure I-3):

- A_1/A_2 : paramètre d'inclinaison,
- A_4/A_3 : paramètre de tranchant (évoque le caractère pointu du défaut),
- A_3/A_1 : paramètre de surface cylindrique,
- T_1 : paramètre de surface pointue.

- Contrôle par transmission:



- Ondes réfractées longitudinales et transversales de 1 vers 2:

**Figure I-3:***Principe d'acquisition des données [3]*

Cependant dans leurs publications, les auteurs ne donnent aucune explication sur l'origine des échos utilisés. Mais ils montrent tout de même que les paramètres trouvés s'avèrent suffisants pour permettre la classification de dix défauts selon les cinq classes prédéfinies.

Par la suite, J.L. Rose [6] développe cette technique sur vingt-trois défauts toujours artificiels. Huit paramètres significatifs sont utilisés, dont le kurtosis (ou degré d'aplatissement) qui sera exploité par nombre d'auteurs [7, 8, 9, 10, 11]. Afin de réaliser une étude de faisabilité en vue de la classification de défauts réels, J. Rose compare les routines de reconnaissance de modèle suivantes:

- schéma de classification par distance minimale (concept du plus proche voisin),
- analyse discriminante de Fisher,
- réseau d'apprentissage adaptatif.

Il en ressort une certaine efficacité de la classification par distance minimale pour trouver des défauts de type pointu unique (93 % de réussite) ou par paquet. Cependant, l'analyse discriminante de Fisher donne de meilleurs résultats pour les paquets de défauts lisses.

Entre 1986 et 1993, S.F. Burch et collaborateurs [7, 8, 9] et C.G. Windsor et collaborateurs [10, 11] poursuivent dans cette voie. Le but de S.F. Burch et collaborateurs [7] est dans un premier temps de faire une discrimination sur une quarantaine de défauts entre les fissures lisses ou rugueuses et les défauts plus bénins tels que les porosités ou les inclusions. Sur six paramètres exploités, trois s'avèrent relativement efficaces pour séparer ces deux grands types de défauts (100 % de réussite sur quarante défauts): AM (rapport d'amplitudes entre deux incidences de contrôle), KU (kurtosis) et SP (sphéricité ou distribution tridimensionnelle sphérique) (tableau I-2).

Défauts (quantité)	Rapport d'amplitudes (AM)	Kurtosis (KU)	Sphéricité (SP)
Fissures lisses (13)	Bas	Haut	Le plus bas
Fissures rugueuses (13)	Haut	Bas	Intermédiaire
Inclusions (11)	Haut	Haut	Bas
Porosités (2)	Haut	Bas	Haut

Tableau I-2:

Discrimination entre les quatre types de défauts réels en utilisant les paramètres sélectionnés [7]

Ils ont réussi à classer soixante-dix défauts de la manière suivante:

- fissures,
- défauts volumiques simples,
- défauts volumiques multiples [8].

Cependant, la distinction entre fissures rugueuses et porosités (deux échantillons étudiés seulement) n'est pas significative.

D'après les résultats donnés par les auteurs (tableau I-3), la méthode semble satisfaisante à condition de connaître la nature du défaut (figure I-4).

Défaut Type / Classe	Valeurs des paramètres		
	Rapport d'amplitudes (AM)	Kurtosis (KU)	Sphéricité (SP)
Fissures (44):			
- lisses	bas	haut	bas
- rugueuses	moyen	moyen	moyen
- très rugueuses	haut	bas	moyen
Volumique simple (16)			
- ponctuel	haut	haut	haut
- court	haut	haut	moyen
- allongé	haut	haut	bas
Volumique multiple (10)	haut	bas	haut

Tableau I-3:

Discrimination de défauts par utilisation de trois paramètres [8]

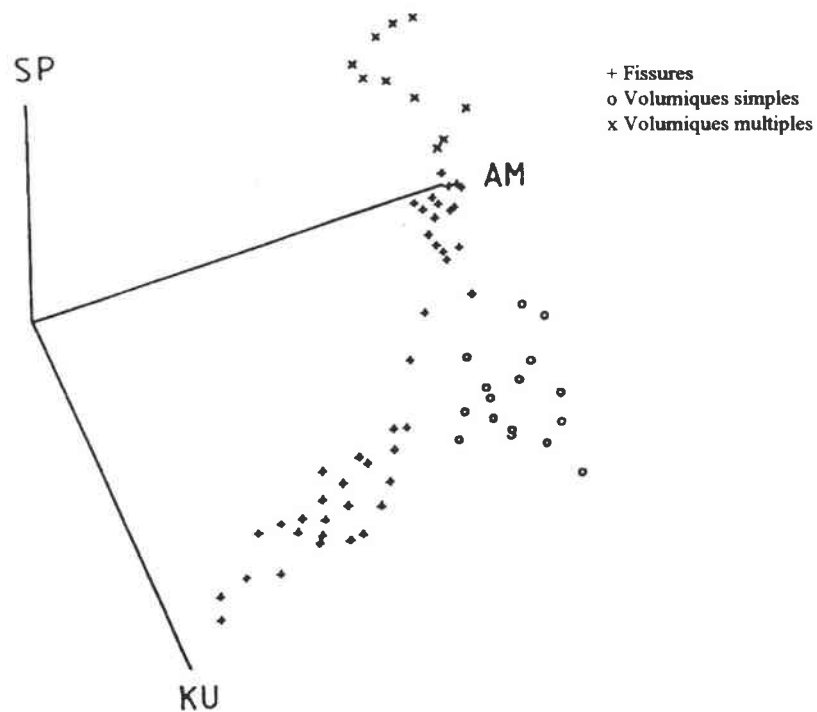


Figure I-4:

Représentation des valeurs des paramètres pour chaque défaut [8]

En 1990 [9], un quatrième paramètre vient s'ajouter à AM, KU et SP. Il va permettre de distinguer les défauts de type simple des défauts composites, c'est-à-dire présentant à la fois une composante volumique et une composante plane (figure I-5). Le principe de ce paramètre repose sur une étude du pouvoir réfléchissant des défauts selon l'angle d'incidence du faisceau ultrasonore. Il permet d'identifier la présence de deux composantes dans le signal ultrasonore obtenu sur des défauts composites. Une distribution fréquentielle (histogramme) est calculée sur les valeurs de variations d'amplitude obtenues par angle ultrasonore sur tous les points du défaut. Ce paramètre correspond alors au kurtosis (quatrième moment) de la forme de l'histogramme, et est appelé KM.

Sur la figure I-5, on voit que les défauts de type composite forment un groupe assez bien séparé, tandis que les groupes représentant les autres défauts s'interpénètrent.

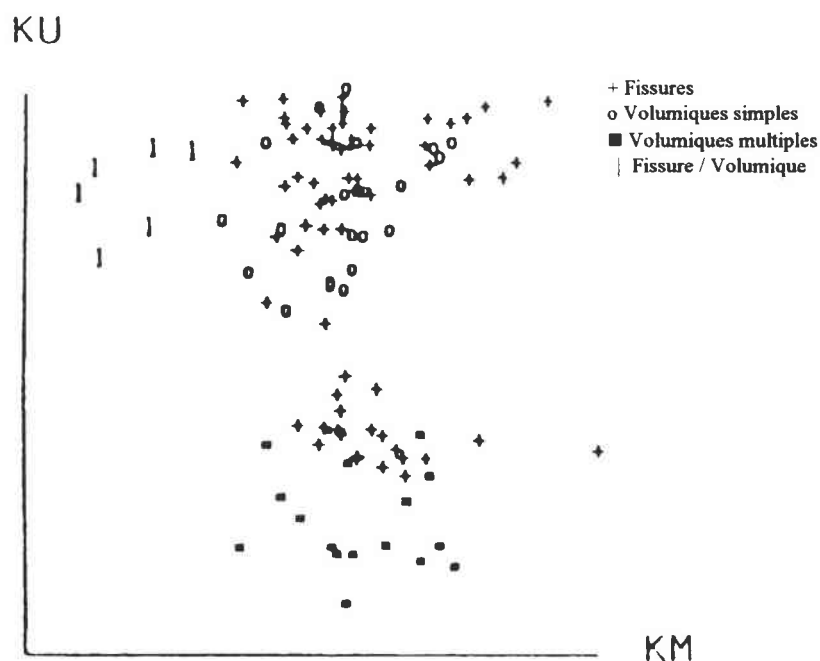


Figure I-5:

Représentation des valeurs de KM par rapport à celles de KU montrant la séparation entre les défauts composites et les autres défauts [9]

En 1989, C.G. Windsor et collaborateurs [10] associent les paramètres utilisés par S.F. Burch et collaborateurs à un réseau de neurones de Hopfield. Ils travaillent alors avec quatre-vingt-trois défauts répartis en quatre classes:

- fissures lisses (35),
- inclusions (17),
- porosités (10),
- fissures rugueuses (21).

Ils montrent que les performances du réseau de neurones de Hopfield sont comparables à celles obtenues avec la technique de classification par distance minimale, mais restent inférieures à celles obtenues avec des réseaux de neurones plus avancés, tels que les réseaux auto-adaptatifs.

Quatre ans plus tard [11], l'étude est poursuivie à partir des mêmes paramètres sur 112 B-scans* obtenus sur soixante-six défauts selon deux incidences distinctes, mais par des méthodes différentes.

*Remarque: on appelle B-scan une vue en coupe de l'interaction du front d'onde avec le réflecteur dans un plan passant par la direction de propagation de l'axe du faisceau ultrasonore et perpendiculaire à l'axe de la soudure.

Les auteurs cherchent cette fois-ci à comparer entre elles les méthodes suivantes:

- méthode a: moyennage d'image,
- méthode b: étude de la distribution de l'intensité de l'image par rapport à son centre de gravité,
- méthode c: filtrage de l'image du défaut par superposition et déplacement d'une image à petite échelle créée artificiellement au préalable,
- méthode d: réseau de neurones (perceptron multicouches),
- méthode e: concept du plus proche voisin.

Les résultats obtenus sont les suivants:

- sur cent-soixante images générées artificiellement:
 - méthode a: 50,6 % de bonne classification,
 - méthode c: 98,1 % de bonne classification,
 - méthode d: 78,1 % de bonne classification,
- sur cent-douze images réelles:
 - méthode e: 94,4 % de bonne classification,
 - méthode d: 94 % de bonne classification.

En fait, il est montré que les techniques basées sur l'analyse de l'image sont tout aussi efficaces que celles basées sur des analyses de paramètres. Elles évitent surtout le lourd passage de l'extraction des paramètres.

En 1991, A. McNab et I. Dunlop [12] étudient eux aussi l'application de techniques d'intelligence artificielle [13] à la classification des défauts. Les essais sont réalisés sur des défauts lisses simulés. Quatre classes [14] sont définies:

- défauts ponctuels,
- défauts linéaires,
- défauts non volumiques,
- défauts volumiques.

Ils comparent deux méthodes de classification de formes utilisées à partir d'images B-scans dont les résultats seront traités par réseau de neurones:

- l'analyse par la meilleure estimation: celle-ci donne 100 % de bonne classification;
- l'analyse par triangulation (calcul du nombre d'occurrences pour chaque type de triangle formé par trois points de données; les triangles sont différenciés par la valeur de leurs angles internes): celle-ci donne 100 % de bonne classification également.

Il s'agit ici de méthodes de classification de formes de défauts à partir d'images et qui sont indépendantes d'une rotation, d'une translation ou encore d'une éventuelle modification de l'échelle de l'image.

Des travaux ultérieurs [15] complètent l'étude par la comparaison de trois techniques d'extraction supplémentaires avec la technique de triangulation:

- méthode par "couches d'oignon" (OL): étude de la décomposition d'une image tridimensionnelle selon plusieurs sphères concentriques, chacune d'elles contenant une proportion de points de données [16],
- méthode de la constante des moments 3D (MI) [17],
- représentation tétraédrique (TR): même technique que la triangulation, mais avec un tétraèdre (étude tridimensionnelle),
- triangulation (TA) [18].

Après les avoir testées sur des défauts simulés, il ressort que la représentation tétraédrique donne les plus mauvais résultats, alors que les méthodes dites par "couches d'oignon" et de la constante des moments 3D offrent de très bons résultats (figure I-6).

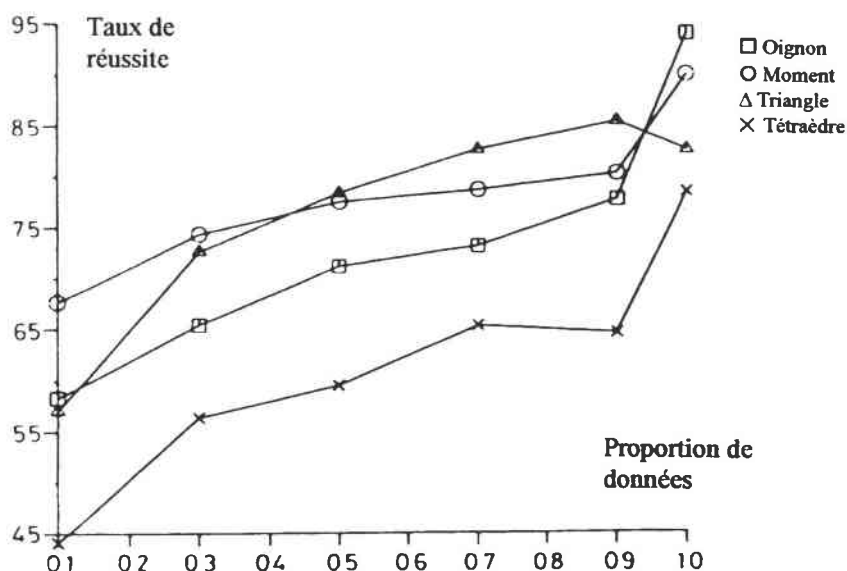


Figure I-6:

Pourcentage de classification pour les quatre techniques d'extraction de paramètres par rapport à des proportions de données [15]

C.H. Chen et collaborateurs [19] montrent en 1993 qu'un réseau de neurones associé à la distribution de Wigner ou à la décomposition en ondelettes peut donner de meilleurs résultats qu'une méthode associée au concept du plus proche voisin. En effet, ils obtiennent, sur trois classes de défauts artificiels (à fond plat, à coupe circulaire et à coupe angulaire):

- 66,7 % de réussite par la classification par méthode du plus proche voisin,
- 83,3 % de réussite par le réseau de neurones associé à la distribution de Wigner,
- 100 % de réussite par le réseau de neurones associé à la décomposition en ondelettes.

Cependant, ils précisent aussi que des essais supplémentaires seraient nécessaires pour confirmer les performances de ces deux techniques.

Enfin, en 1996, A. Manasta et M. Sunseri [20] associent un réseau de neurones à une analyse discriminante de Fisher pour classer 135 défauts réels en trois classes:

- fissures,
- inclusions multiples,
- porosités.

A l'origine ils sélectionnent vingt-quatre paramètres déduits de l'échodynamique transversal* représentatif du défaut. Mais grâce à l'analyse discriminante de Fisher, les seize paramètres les plus significatifs sont retenus pour le traitement. Les résultats de la classification, donnés dans le tableau I-4, sont plus que concluants (94,8% de réussite).

Type de défaut	Fissure	Inclusion	Porosité
Fissure	42	0	3
Inclusion	0	43	2
Porosité	0	2	43

Tableau I-4:

Résultats de la classification après analyse discriminante de Fisher [20]

*Remarque: on appelle échodynamique transversal la courbe enveloppe de l'ensemble des échos d'un réflecteur résultant d'un déplacement du traducteur perpendiculaire à l'axe de la soudure.

En conclusion, la classification des défauts de soudures par technique de reconnaissance de modèle est un sujet de recherche depuis plus d'une vingtaine d'années. Les premiers résultats concluants obtenus par J.L. Rose [3] ont été depuis largement exploités. Ils ont servi de base pour les analyses statistiques qui ont suivi. La méthode a pu montrer une certaine efficacité sur des défauts artificiels et a pu alors être adaptée sur des classes de défauts réels. Cependant, les résultats alors obtenus demandent parfois confirmation sur des éprouvettes supplémentaires vu le petit nombre de défauts étudiés par classe. De plus, les auteurs ne fournissent que rarement la configuration selon laquelle les essais ont été réalisés, alors que les résultats qu'ils montrent peuvent être sensibles aux paramètres de l'acquisition (problème de "rusticité" du système).

Cette méthode demande donc encore beaucoup de travail avant de pouvoir être adaptée sur une configuration de chantier. D'ailleurs, toutes les publications citées ne montrent aucune application directe. Cette méthode reste donc encore pour l'instant au stade de l'étude.

I. 3. Méthodes non statistiques

En 1976, I.N. Ermolov et collaborateurs [21] présentent deux méthodes qui pourraient permettre de distinguer les défauts volumiques et les défauts non volumiques, la première basée sur une variation de la fréquence des ultrasons et la seconde sur une variation de l'angle d'incidence du contrôle. Ils définissent ainsi un premier paramètre appelé facteur de forme obtenu lors d'une première étude où la fréquence f est maintenue constante et l'incidence i variable. A partir de la valeur de ce facteur, qui correspond en fait au rapport des signaux reçus en réflexion directe du défaut sur celui reçu de la face opposée par méthode tandem (figure I-7), les défauts sphériques peuvent être séparés des défauts non volumiques (on retrouvera ce concept dans l'IS. US. 319.21 - 2^{de} édition [32]). Sur cent-cinquante défauts réels testés, sept seulement sont mal classés, et il s'agit pour chaque cas d'un défaut composite.

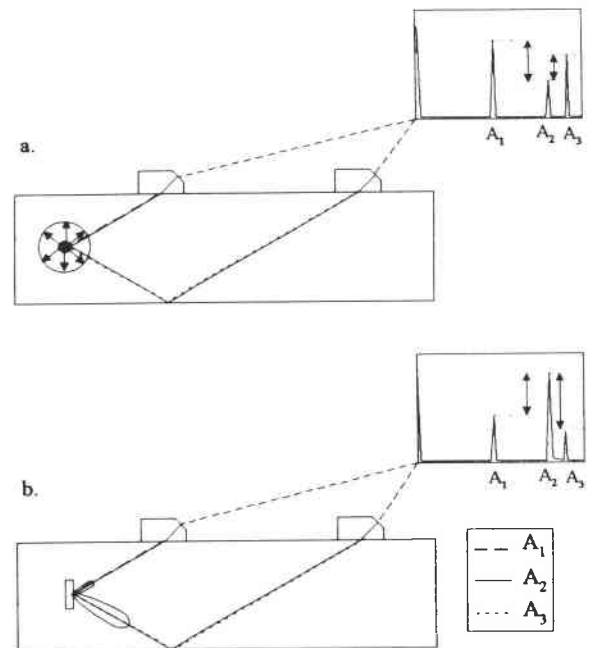


Figure I-7:

Détermination du facteur de forme pour des défauts volumiques (a) et non volumiques (b)[21]

Leur second paramètre est la réponse fréquentielle obtenue sur le défaut avec une incidence constante et une fréquence variable. Les auteurs distinguent alors trois classes de défauts en fonction de l'allure de la courbe:

- caractéristique fréquentielle constante ou décroissante monotone: défaut volumique (figure I-8),
- caractéristique fréquentielle croissante monotone: défaut non volumique orienté perpendiculairement au faisceau ultrasonore (figure I-9.1 et I-9.4),
- caractéristique fréquentielle non monotone et présentant des maxima et des minima alternant périodiquement: défaut non volumique non orienté perpendiculairement au faisceau ultrasonore (figure I-9.2, I-9.3, I-9.5 et I-9.6).

Les auteurs n'expliquent pas les résultats obtenus en fonction de la nature des défauts et ne donnent pas de résultats concernant la fiabilité de la méthode.

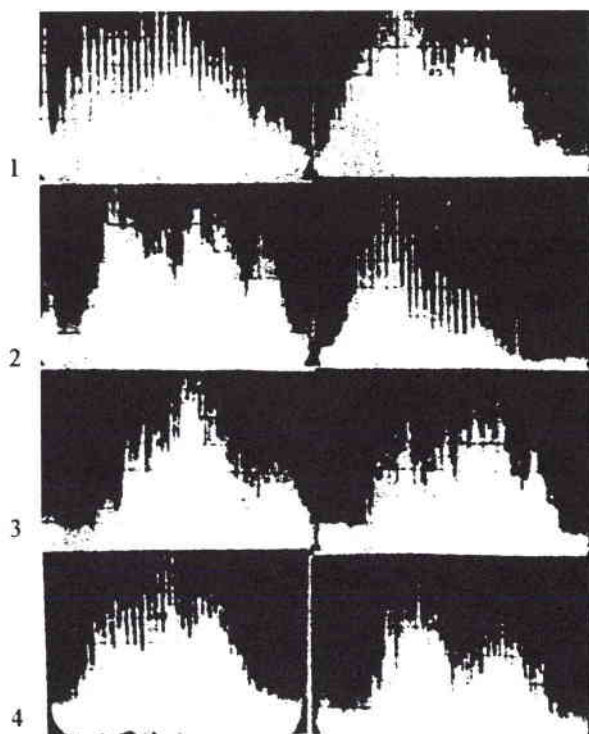
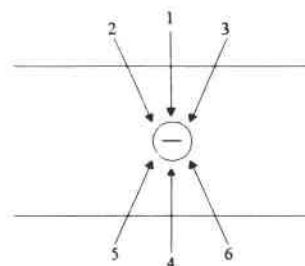
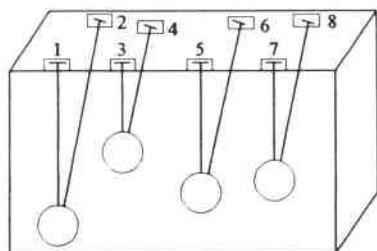


Figure I-8:

Spectrogrammes de signaux réfléchis sur des défauts de type inclusion [21]

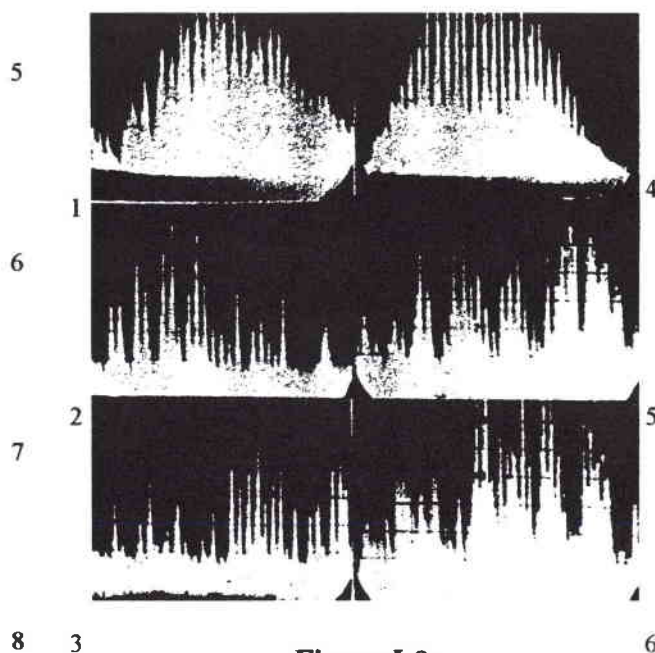


Figure I-9:

Spectrogrammes de signaux réfléchis sur un défaut de type fissure [21]

En 1983, H. Seiger et J. Wagner [22] présentent une technique permettant de distinguer les défauts non volumiques isolés et les défauts volumiques par analyse du spectre en fréquence [23, 24]. Leur expérience est d'abord réalisée sur des défauts artificiels avant d'être validée sur vingt-neuf défauts naturels (fissures, manques de fusion et inclusions). Leur technique repose sur l'étude du spectre en fréquence: celui-ci est d'abord divisé en cinq bandes de 300 kHz chacune, puis l'amplitude maximale du spectre dans chaque bande est relevée. La caractérisation des défauts est réalisée par étude des rapports entre toutes les amplitudes relevées (figure I-10).

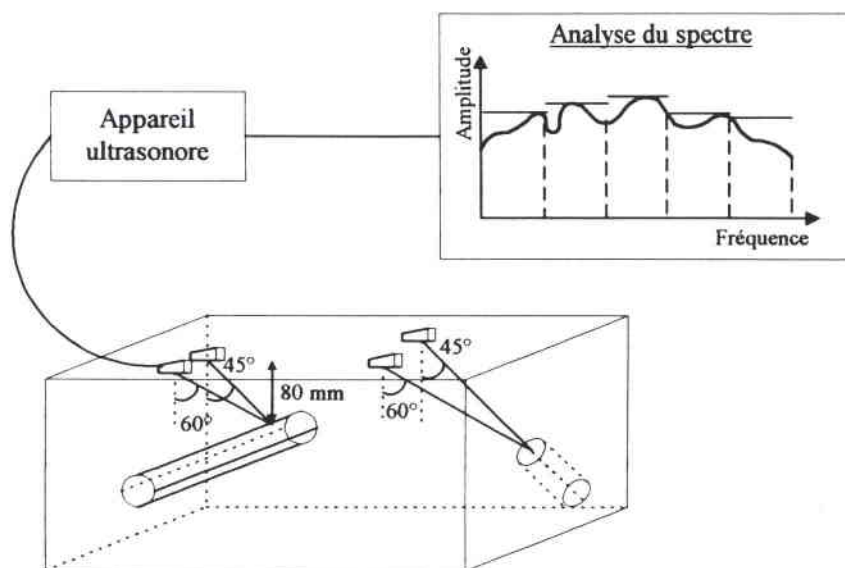


Figure I-10:

Principe de la méthode par division du spectre en fréquence [22]

Ils font en fait une sélection des données qui permet d'augmenter la vitesse de la classification en ne considérant que certaines informations du spectre. Les résultats montrent qu'il est possible de différencier les défauts non volumiques isolés et les défauts volumiques à condition toutefois d'éliminer les cas limites (figure I-11).

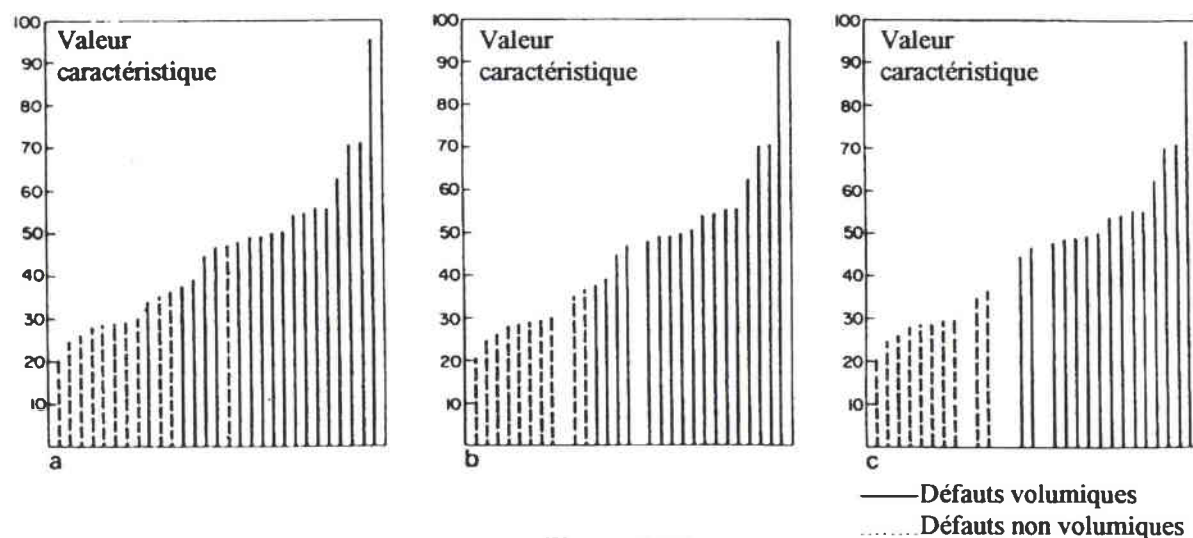


Figure I-11:

Caractéristiques des défauts testés - Classification - a. sur les vingt-neuf défauts rangés par ordre croissant; b. première élimination de cas limites (les valeurs les plus faibles pour les défauts non volumiques et les plus élevées pour les défauts volumiques); c. seconde élimination des cas limites (selon le même principe que b.) [22]

D'autres travaux se sont basés sur l'étude de l'échodynamique afin de caractériser les défauts selon leur nature.

Ainsi, en 1984, O. Ganglbauer et collaborateurs [25] définissent, pour distinguer les grands défauts plats des autres défauts, quatre paramètres déduits directement de la forme de l'échodynamique: le temps de montée (ERT), le temps de descente (EFT), la durée de l'écho (EPD) et la durée de son plateau (EPL) (figure I-12). Leur méthode, testée sur des défauts artificiels, peut en fait donner une indication supplémentaire lors d'une classification, mais est insuffisante à elle seule.

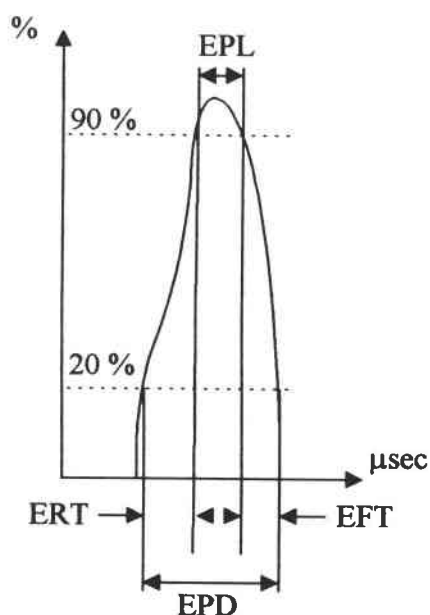


Figure I-12:

Paramètres tirés de l'échodynamique [25]

A l'heure actuelle, G. Krug et collaborateurs [26] continuent de penser que grâce à l'étude de la forme de l'échodynamique, il sera bientôt possible de distinguer les défauts sphériques des autres défauts, mais n'ont pas encore présenté de résultats neufs sur cette classification.

Le phénomène de diffraction sur les bords de fissures est utilisé depuis plusieurs années pour tenter de distinguer les fissures des petits défauts. Tout d'abord, D. De Vadder et M. Dosso [27] en 1984 qui présentent leurs résultats obtenus sur des défauts artificiels, puis plus proche de nous, L. Paradis et collaborateurs [28]. Les premiers montrent la relation de dérivation qui existe entre les échos de petits défauts et ceux de bords de fissures. Les seconds appliquent ce résultat sur des images B-scans de défauts réels afin de valider la méthode. Cette étape est toujours en cours.

Une dernière technique repose sur l'exploitation de la phase du signal et l'étude des pôles et des zéros de sa fonction de transfert. Des premiers essais sont décrits par N. Mercier en 1986 [29, 30], qui travaille alors sur des cibles circulaires. Les résultats montrent que la caractérisation des cibles à partir des répartitions des zéros n'est pas simple, mais certaines tendances semblent se dessiner. Les positions des zéros paraissent être des paramètres s'adaptant bien aux méthodes de reconnaissance de forme qui pourraient aboutir à une classification de cibles ou de défauts. En 1993 [31], N. Mercier montre, avec J.F. De Belleval et P. Lanceleur, que la distribution des zéros varie considérablement en fonction de la forme de la cible, de l'angle d'incidence et de la distance cible-traducteur. Leur but est actuellement d'appliquer cette méthode à la reconnaissance d'images obtenues sur des défauts.

1. 4. Conclusion

Les travaux réalisés dans le domaine de la caractérisation par ultrasons des défauts dans les constructions soudées ne permettent pas de classer les défauts d'une façon suffisamment fiable pour pouvoir rendre cette classification automatisable dans une configuration de chantier. En effet, la plupart des travaux concluants ont été réalisés sur des défauts artificiels, ou bien sur un trop petit nombre d'échantillons, ou encore uniquement dans des conditions de laboratoire inadaptables au cas du chantier. De plus, certains types de défauts posent toujours problème. C'est le cas des nids de soufflures et des fissures ramifiées ou rugueuses, qui sont difficilement discernables entre eux. C'est pourquoi il faut utiliser une méthode de classification qui tienne compte de ces impératifs fondamentaux. Nous avons choisi de travailler d'après la méthode de classification proposée par la recommandation IS. US. 319.21-2^{de} édition, que nous exposons dans le chapitre suivant.

Chapitre II: La recommandation IS. US. 319.21 - 2^{de} édition - Procédure Cascade

II. 1. Etude préparatoire

Avant d'arriver à la recommandation IS. US. 319.21 [32] telle que nous la connaissons aujourd'hui, des études importantes ont été nécessaires pour adapter des techniques de contrôle sur des assemblages plus ou moins complexes afin d'en identifier les indications détectées.

En premier lieu est éditée, en mai 1977, la première édition de l'IS. US. 319.21 [2] intitulée "Recommandations concernant le contrôle manuel par ultrasons des soudures à pleine pénétration". Dans ce document, élaboré par l'Institut de Soudure, sont données des recommandations nécessaires au bon déroulement d'un contrôle ultrasonore réalisé sur des assemblages soudés à pleine pénétration d'épaisseurs supérieures ou égales à 10 mm, dont la température est inférieure ou égale à 80°C et dans des nuances d'acier carbone (types constructions d'usage général (NF A 35.501), chaudières et appareils à pression (NF A 36.205), appareils à pression à basse température (NF A 36.208) ou tuyauteries de nuances analogues) ou dans des aciers faiblement alliés (type tôles chaudières et appareils à pression (NF A 36.206) comprenant l'acier 5% Cr - 0,5% Mo). L'examen de ces assemblages soudés avec des métaux d'apport à structure austénitique ou austéno-ferritique est exclus.

Ainsi, le document donne des recommandations sur les points suivants:

- *la préparation des pièces*: état de surface du métal de base, état de surface de la soudure, et méthode de détermination de l'axe des soudures;

- *le choix des matériels et des paramètres d'examen*: fonctions nécessaires de l'appareil à ultrasons, caractéristiques des palpeurs en fonction de la zone contrôlée (métal de base ou soudure), propriétés du milieu de couplage;

- *les blocs d'étalonnage, de référence et de transfert*: forme, caractéristiques dimensionnelles;

- *le réglage des paramètres d'examen du métal de base et de la soudure*: échelle de profondeur (base de temps), sensibilité d'examen (puissance et amplification);

- *les conditions d'exécution de l'examen du métal de base et de la soudure*: type d'ondes utilisées et configuration en fonction du positionnement des défauts recherchés (transversaux ou longitudinaux) et de l'épaisseur de l'assemblage;

- *la caractérisation d'une indication*: localisation, évaluation de son pouvoir réfléchissant, longueur, distinction entre défaut volumique et non volumique par le critère du mouvement orbital (évolution de l'amplitude du pouvoir réfléchissant lorsque le palpeur subit une rotation autour du défaut, celui-ci étant pris comme centre de rotation), condition de continuité de deux défauts;

- *la conduite du contrôle par ultrasons*: opérations préliminaires nécessaires, examen en lui-même, présentation des résultats.

Dans le "Manuel pour l'examen par ultrasons des soudures" (1978) de l'Institut International de la Soudure [33] apparaissent des méthodes d'identification de signaux:

- le critère du mouvement orbital est repris pour séparer les défauts volumiques des défauts non volumiques;

- l'étude de la sensibilité directionnelle (paragraphe II. 3. 2.) permet quant à elle de distinguer les manques de fusion;

- une méthode est donnée pour différencier un écho dû à une surépaisseur excessive de la soudure et un défaut non volumique éventuel se trouvant dans la zone thermiquement affectée. Il s'agit de la technique appelée plus tard méthode de l'effet de coin à 45°;

- les manques de pénétration, les excès de pénétration, et les dénivellations des bords sont caractérisés par l'étude des temps de parcours de leurs échos en ondes transversales.

Remarque: toutes ces techniques, mis à part le critère du mouvement orbital (manque de fiabilité), seront reprises plus tard dans l'IS. US. 319.21 - 2^{de} édition en tant que méthodes discriminantes.

Plusieurs projets se développent ensuite afin d'étudier plus en détail le comportement de l'écho ultrasonore obtenu sur un défaut en fonction de sa nature. En 1986, T.H. Nguyen et collaborateurs [34] présentent un système d'aide à la caractérisation d'indications détectées manuellement par ultrasons. Ils exploitent plusieurs paramètres et tirent certaines conclusions qu'ils qualifient de "partielles":

- *le relevé des maxima de l'écho* en fonction des coordonnées du palpeur par la prise en compte du parcours sonore et de l'amplitude de l'écho: par exemple, si l'indication est en bord de chanfrein, alors il y a de fortes chances pour que ce soit un collage;

- *les formes des échos statiques* (forme, front de montée, pied de l'écho): un défaut multi-faciès donne un écho déchiqueté;

- *le comportement dynamique des échos*: un faciès non volumique engendre un échodynamique en forme de plateau;

- *la réflectivité conventionnelle* (définie par les auteurs comme l'angle de rotation total du palpeur centré sur l'aplomb du réflecteur pour une décroissance de 50% de l'amplitude maximale): si l'angle est inférieur à 10° , alors, par convention, le défaut est non volumique (critère du mouvement orbital);

- *le diagramme de réflectivité*: si le diagramme est unidirectionnel, c'est-à-dire si les amplitudes les plus importantes sont obtenues pour un même angle d'incidence, il y a de fortes chances pour que le défaut soit non volumique.

Remarque: On retrouvera dans l'IS. US. 319.21 - 2^{de} édition la plupart de ces paramètres.

Finalement, le système donne des résultats plus que satisfaisants puisque, après avoir été développé sur des défauts simulés, sept défauts réels sur huit (deux inclusions, quatre fissures, un manque de pénétration et un manque de fusion) ont bien été caractérisés. Les auteurs ne précisent pas la nature du défaut mal classé.

Au début des années 1990 [35], D. Chauveau présente le bilan d'une étude de cinq ans réalisée dans le cadre d'un vaste programme de recherche lancé par l'Institut de Soudure intitulé "Evaluation des défauts et de leur nocivité dans les constructions soudées". Vingt-quatre organismes ou sociétés participaient au projet. Un des objectifs était d'établir de

nouvelles procédures de contrôle visant à mieux identifier la nature des défauts de soudure, et déterminer leur hauteur.

D. Chauveau montre que le critère du mouvement orbital a ses limites: par exemple, appliqué aux extrémités des défauts, il est satisfaisant pour classer des manques de fusion et de pénétration en défaut non volumique, mais il subit un échec lorsqu'il s'agit de classer des fissures (43% d'entre elles sont considérées comme des défauts volumiques) et des inclusions (70% d'entre elles sont considérées comme des défauts non volumiques). Nous pouvons expliquer ce résultat par la présence d'un phénomène de diffraction en extrémité de fissure qui génère une onde sphérique d'amplitude importante qui peut laisser supposer l'existence d'un bord arrondi caractéristique d'un défaut volumique. Une autre direction de recherche est donc empruntée.

Pour la première fois, l'expression de "procédure Cascade" est employée. En fait, il s'agit d'une procédure d'identification des défauts internes de soudures prenant en compte, en cascade, les paramètres suivants:

- la valeur du pouvoir réfléchissant (étapes 1, 2 et 3),
- le nombre de déséquilibres dans le diagramme directionnel (étape 3),
- la forme de l'écho de défaut (étape 4),
- l'aspect et la forme des échos et temps dynamiques* (étape 5).

*Remarque: on appelle temps dynamique la courbe représentant les variations du temps de parcours d'un écho en fonction du déplacement du traducteur.

Les défauts en racine sont traités uniquement par l'exploitation de leurs temps dynamiques, ce qui donne un taux de réussite de 97%.

Les défauts débouchant en surface peuvent être traités par étude du comportement dynamique ou par d'autres méthodes de contrôle non destructif plus simples d'utilisation. Les ondes rampantes peuvent aussi s'avérer utiles dans ce cas.

Finalement, l'auteur donne les résultats suivants: la procédure Cascade a permis de classer, de manière manuelle, 150 défauts en trois catégories (fissures, défauts volumiques et

défauts non volumiques) avec 75% de réussite. Si seulement deux classes sont considérées (défauts volumiques et défauts non volumiques), alors un résultat de 100% de réussite est atteint.

En 1995, les résultats obtenus lors de cette étude sont intégrés à la recommandation IS. US. 319.21 - 2^{de} édition.

En 1997, B. Brion et collaborateurs [36] font appliquer successivement, d'une manière manuelle, la procédure Cascade par quatre opérateurs sur quatorze défauts réels, dont cinq défauts composites (ceux-ci ne facilitant pas la caractérisation) (tableau II.1). Ils cherchent à étudier les performances de l'IS. US. 319.21.

Bloc	Défaut	Radio	Opérateur A		Opérateur B		Opérateur C		Opérateur D	
			étape	caractère	étape	caractère	étape	caractère	étape	caractère
n° 1	Inclusion	NV	3	NV	3	NV	3	NV	4	V
	Fissure	NV	3	NV	5	NV	3	NV	5	V
	Inclusion	NV	3	NV	3	NV	3	NV	4	V
	Manque de pénétration	NV	5	NV	5	NV	5	V	5	V
n° 2	Nid de soufflures	V	3	NV	5	V	5	V	2	NV
	Manque de pénétration	NV	3	NV	4	V	3	NV	5	V
	Collage	V	3	NV	3	NV	5	V	4	V
	Inclusions alignées	NV	5	V	5	V	5	NV	5	V
	Nid de soufflures	V-NV	3	NV	2	NV	3	NV	3	NV
	Manque de fusion	NV	2	NV	3	NV	5	V	2	NV
	Fissure	NV	3	NV	5	NV	3	NV	5	V
	Nid de soufflures	V	5	NV	5	V	5	V	5	V
	Nid de soufflures	V	5	NV	5	V	5	V	5	V
Nid de soufflures	V	5	V	5	V	5	NV	5	V	

V: volumique NV: non volumique

Tableau II-1:

Résultats de l'application de la procédure Cascade sur quatorze défauts réels par quatre opérateurs [36]

Ils tirent alors les conclusions suivantes:

- les deux premiers critères de la procédure, c'est-à-dire le pouvoir réfléchissant et la réflectivité directionnelle, donnent de très bons résultats et sont faciles à mettre en œuvre;
- pour les indications dont la caractérisation nécessite le passage par toutes les étapes de la procédure Cascade, le temps de contrôle peut s'en trouver allongé;
- le comportement dynamique des échos est difficile à évaluer par des opérateurs non entraînés;
- les meilleurs résultats (80% de réussite) ont été obtenus par les opérateurs ayant reçu une formation préalable.

En considérant ces résultats, les auteurs considèrent la méthode comme satisfaisante.

II. 2. La recommandation IS. US. 319.21 - 2^{de} édition - Juin 1995

La recommandation IS. US. 319.21 - 2^{de} édition, incluse aujourd'hui dans la norme européenne EN 1713, a été élaborée à partir de la première édition de 1977 en tenant compte des normes européennes en préparation, de l'arrêté du 24 mars 1978 [37] ainsi que des travaux accomplis par des commissions réunissant des experts français et étrangers dans le **domaine de la détection et de la caractérisation manuelle par ultrasons des défauts dans les assemblages soudés.**

Elle concerne le **contrôle manuel par ultrasons des soudures à pleine pénétration.** Elle se compose de trois documents distincts qui sont le document A, le document B et le document C. Chacun de ces documents traite d'une partie du contrôle d'un assemblage soudé.

● **Le document A:** les méthodes ultrasonores générales de contrôle de fabrication des assemblages soudés les plus communément utilisées y sont décrites, et avant tout l'objet et le domaine d'application de la recommandation. Ainsi, il est dit que l'application du document se limite à l'examen manuel d'assemblages soudés d'épaisseurs supérieures ou égales à 8 mm (10 mm dans la première édition), dont la température est inférieure ou égale à 60° (80° dans

la première édition) et dans des nuances d'acier présentant une atténuation ultrasonore relativement faible (par exemple: aciers de construction non alliés, aciers pour chaudières et appareils à pression, appareils à pression à basse température ou tuyauterie de nuances analogues; aciers faiblement alliés type tôles chaudières et appareils à pression comprenant l'acier 5% Cr - 0,5% Mo; acier fortement allié pour chaudière type Z10CVD MB9.1 contenant 8 à 9% de chrome).

Sont exclus:

- l'examen des assemblages soudés avec des métaux d'apport à structure austénitique ou austéno-ferritique,
- l'examen des assemblages soudés dont le métal de base est austénitique ou austéno-ferritique dans la mesure où ceux-ci présentent une atténuation forte ou produisent une dispersion importante du faisceau.

De la même façon que dans la première édition, tous les besoins au bon déroulement du contrôle (renseignements spécifiques nécessaires avant d'effectuer le contrôle, conditions à remplir par le personnel, l'appareillage et les traducteurs, les blocs d'étalonnage et de référence, les paramètres d'examen, les conditions d'exécution, l'évaluation de l'indication ultrasonore et enfin la présentation des résultats) sont spécifiés en fonction du type de l'assemblage contrôlé (bout-à-bout de plaques ou de tubes, de structure en T, par piquage traversant, en structure en L, par piquage posé, cruciforme, ou comportant des nœuds dans une structure tubulaire).

La recommandation spécifie quatre niveaux d'examen. Chacun donne une probabilité différente de détection des défauts:

- niveau 1: niveau économique d'examen conférant une probabilité modérée de détection des défauts;
- niveau 2: niveau moyen d'examen conférant cependant une probabilité élevée de détection des défauts;
- niveau 3: niveau élevé d'examen assurant la probabilité la plus élevée de détection des défauts dans des conditions normales;
- niveau 4: niveau d'examen dont les caractéristiques spécifiques ne sont pas définies dans la recommandation et doivent faire l'objet d'un mode opératoire écrit, établi spécialement mais tenant compte des règles générales de la recommandation.

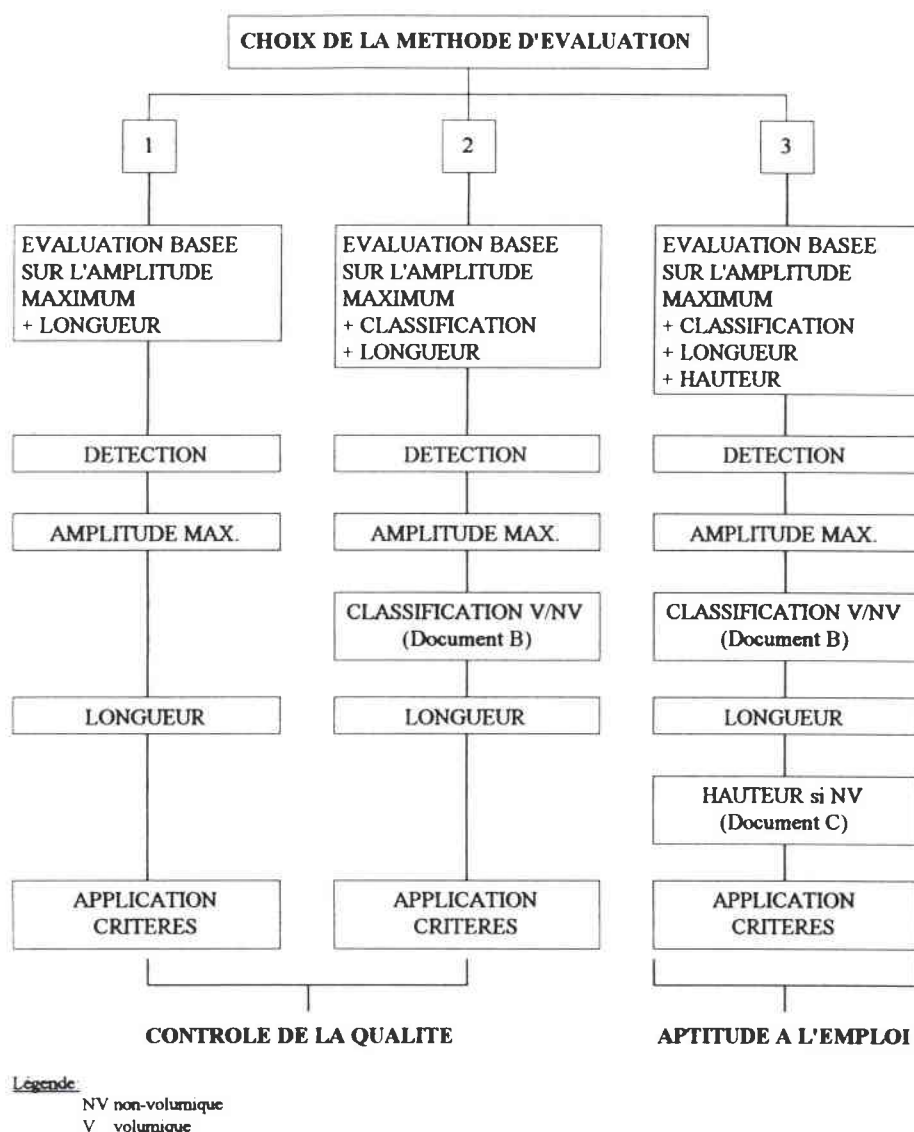


Figure II-1:

Choix de la méthode d'évaluation des indications - Document A [2]

Trois méthodes d'évaluation des défauts sont permises (figure II-1):

- une évaluation basée sur l'amplitude du signal de l'indication et sur sa longueur,
- une évaluation basée sur l'amplitude du signal de l'indication, sa classification (volumique ou non volumique par des méthodes décrites dans le document B) et sa longueur,
- dans le cas particulier de l'aptitude à l'emploi, la méthode précédente sera complétée par une appréciation de la hauteur du défaut (document C), si celui-ci a été classé non volumique par les méthodes décrites dans le document B.

● **Le document B**: celui-ci donne une méthode de classification des défauts en défauts volumiques ou non volumiques. Il sera détaillé dans le paragraphe II. 3..

● **Le document C**: après avoir classé les défauts détectés, il peut être nécessaire d’y appliquer des critères afin de déterminer si leur présence est acceptable ou non dans l’assemblage soudé. Ceci concerne uniquement les défauts ayant été trouvés comme des défauts non volumiques lors de l’application du document B. Les critères d’acceptabilité sont basés sur la longueur, la profondeur et la hauteur des réflecteurs, c’est-à-dire leur dimensionnement.

II. 3. Le document B - La procédure “Cascade”

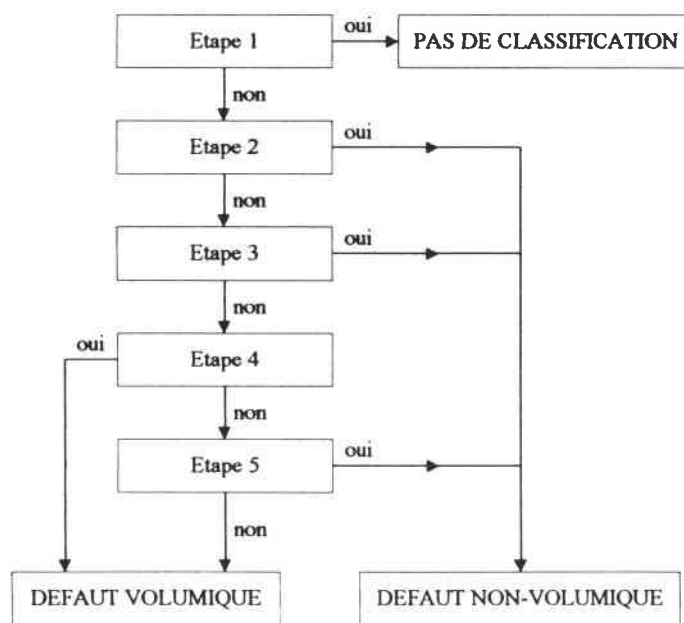


Figure II-2:

Principe de la procédure Cascade

Le document B est la partie de l’IS. US. 319.21 qui permet au contrôleur de classer en défauts volumiques ou non volumiques les défauts détectés. La technique repose sur une procédure dite Cascade qui est une succession de tests (figure II-2). Après chaque test réalisé sur l’écho de défaut, il est possible, soit de conclure directement sur le caractère volumique

ou non du défaut, soit de passer au test suivant. Cependant, plusieurs cas de figures sont à distinguer avant d'appliquer cette procédure.

Le principe complet de cette procédure est présenté en figures II-7 et II-8.

II. 3. 1. Conditions d'utilisation de la procédure Cascade

Comme on peut le voir sur la figure II-3, trois cas distincts d'application de la procédure Cascade sont considérés. Chacun est relatif à la localisation en profondeur de l'indication détectée.

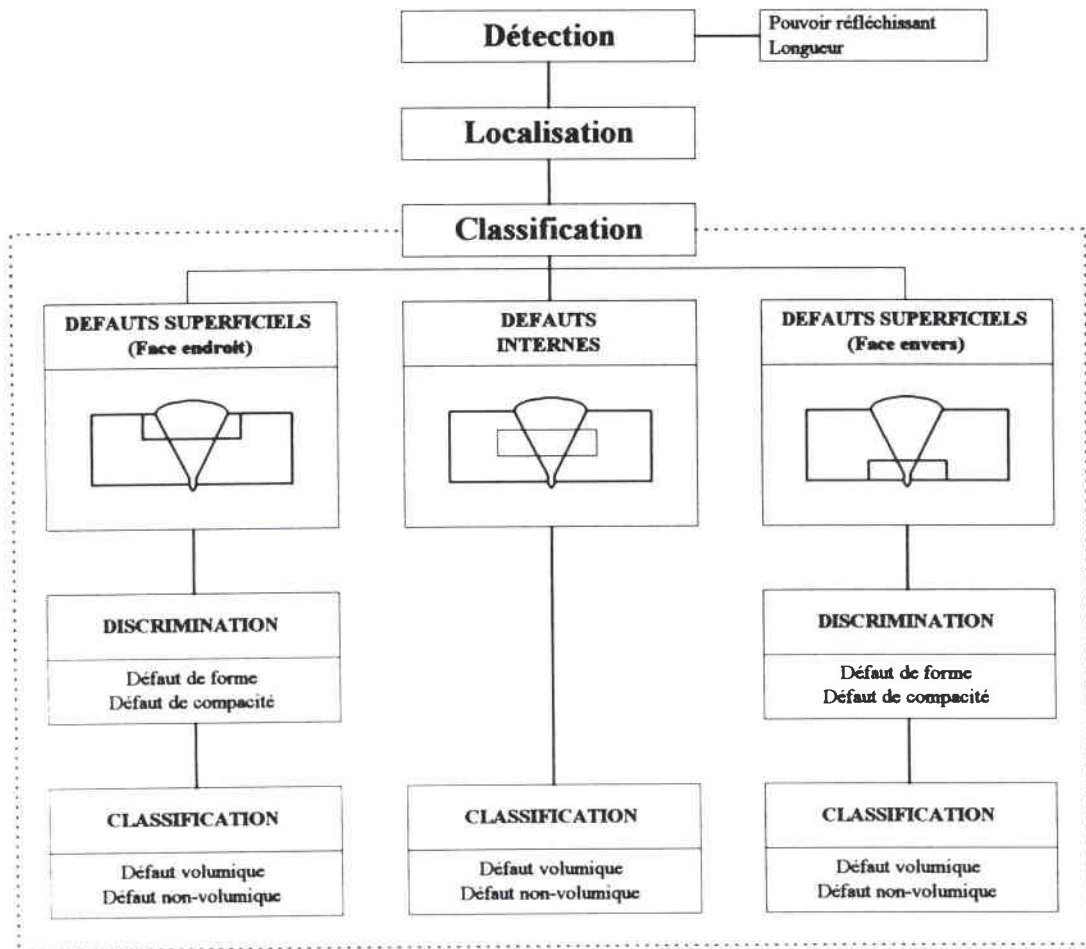


Figure II-3:

Conditions d'application de la procédure Cascade

● **Classification des défauts internes, c'est-à-dire situés au moins à 5 mm de chacune des faces non arasées de l'assemblage (figure II-4):**

La classification par la procédure Cascade est applicable directement sur une indication interne, à condition toutefois d'avoir vérifié au préalable qu'elle n'était pas ponctuelle.

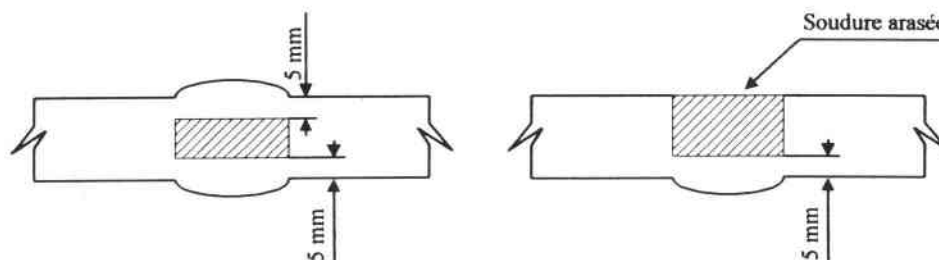


Figure II-4:

Cas des défauts internes

Remarque: une indication ponctuelle est une indication dont la longueur est inférieure ou égale à celle figurant dans le tableau II-2.

Profondeur de l'indication	$P < 40 \text{ mm}$	$40 \text{ mm} < P < 100 \text{ mm}$	$P > 100 \text{ mm}$
Longueur	5 mm	10 mm	10% de la profondeur de l'indication

Tableau II-2:

Définition d'une indication ponctuelle

Si l'indication est déterminée ponctuelle, alors on se doit d'étudier son pouvoir réfléchissant. Si celui-ci est supérieur ou égal à la Courbe Amplitude Distance (C.A.D.) (annexe 3), l'indication doit faire l'objet de la classification par la procédure Cascade. Si celui-ci est inférieur à la C.A.D., l'indication est considérée comme étant volumique.

● **Classification des défauts superficiels situés à moins de 5 mm de la face de palpage (figure II-5):**

Avant d'appliquer la procédure de classification, il est indispensable de faire une discrimination entre les indications dues à un défaut de géométrie, dit "de forme", et une indication due à un défaut de compacité. Celle-ci peut être réalisée par l'utilisation de

méthodes discriminantes ultrasonores telles que la méthode de l'effet de coin (annexe 4) ou la méthode des ondes rampantes (annexe 5). Lorsque cette discrimination s'avère difficile à réaliser par ultrasons, l'opérateur doit bénéficier des informations recueillies lors de l'application d'autres procédés de contrôle non destructif, si ceux-ci ont déjà été effectués. Dans le cas contraire, il peut demander que soit réalisé localement un contrôle par ressuage et/ou par magnétoscopie. Il est enfin également possible de demander une mise en forme appropriée de la surépaisseur de la soudure au droit de la zone suspecte afin de rendre possible la mise en œuvre d'une des méthodes discriminantes ultrasonores.

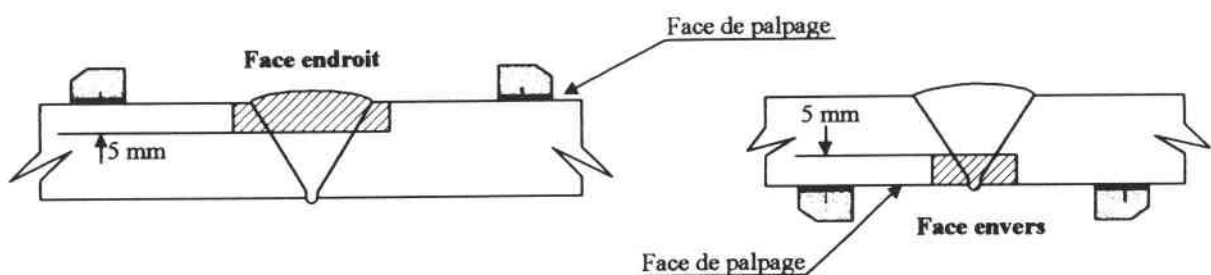


Figure II-5:

Cas des défauts superficiels à moins de 5 mm de la face de palpation

Dès lors qu'il aura été établi que l'indication correspond bien à un défaut de compacité, sa classification devra être effectuée:

- par examen visuel, magnétoscopie ou ressuage pour un défaut débouchant,
- par la procédure Cascade pour un défaut sous-jacent.

● **Classification des défauts superficiels situés à moins de 5 mm de la face opposée à la face de palpation** (figure II-6):

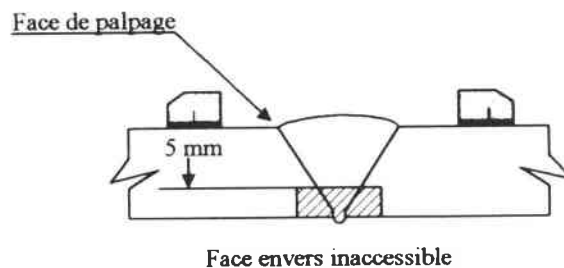


Figure II-6:

Cas des défauts situés à moins de 5 mm de la face opposée à la face de palpation

De la même façon que précédemment, une discrimination défaut de forme / défaut de compacité est nécessaire. Les méthodes discriminantes ultrasonores pouvant être employées sont la méthode de l'onde longitudinale à 0° (annexe 6), la méthode des ondes transversales (annexe 7) et la méthode des ondes rampantes en racine (annexe 5). Lorsque cette discrimination s'avère difficile à réaliser par ultrasons, l'arasage local du cordon côté face de palpation est conseillé. L'opérateur devra bénéficier des informations recueillies lors du contrôle radiographique, dans la mesure où celui-ci aura déjà été effectué. Dans le cas contraire et à condition que cela soit techniquement réalisable, il conviendra de procéder localement à cet examen au droit de la zone douteuse.

Dès lors qu'il aura été établi que l'indication correspond bien à un défaut de compacité, celui-ci sera classé en défaut non volumique, à moins de démontrer le contraire par une technique complémentaire.

II. 3. 2. La procédure Cascade

La procédure Cascade permet de classer en défaut volumique ou non volumique une indication détectée. Elle résulte de l'application successive de plusieurs critères discriminatoires (figures II-7 et II-8):

- le pouvoir réfléchissant, ou amplitude de l'écho,
- la réflectivité directionnelle, ou étude du pouvoir réfléchissant en fonction de l'angle d'incidence et la direction du faisceau ultrasonore,
- l'allure de l'écho, ou sa forme,
- le comportement dynamique de l'écho, ou son comportement lors du déplacement du transducteur sur le défaut.

La procédure s'interrompt dès que l'un des critères est satisfait.

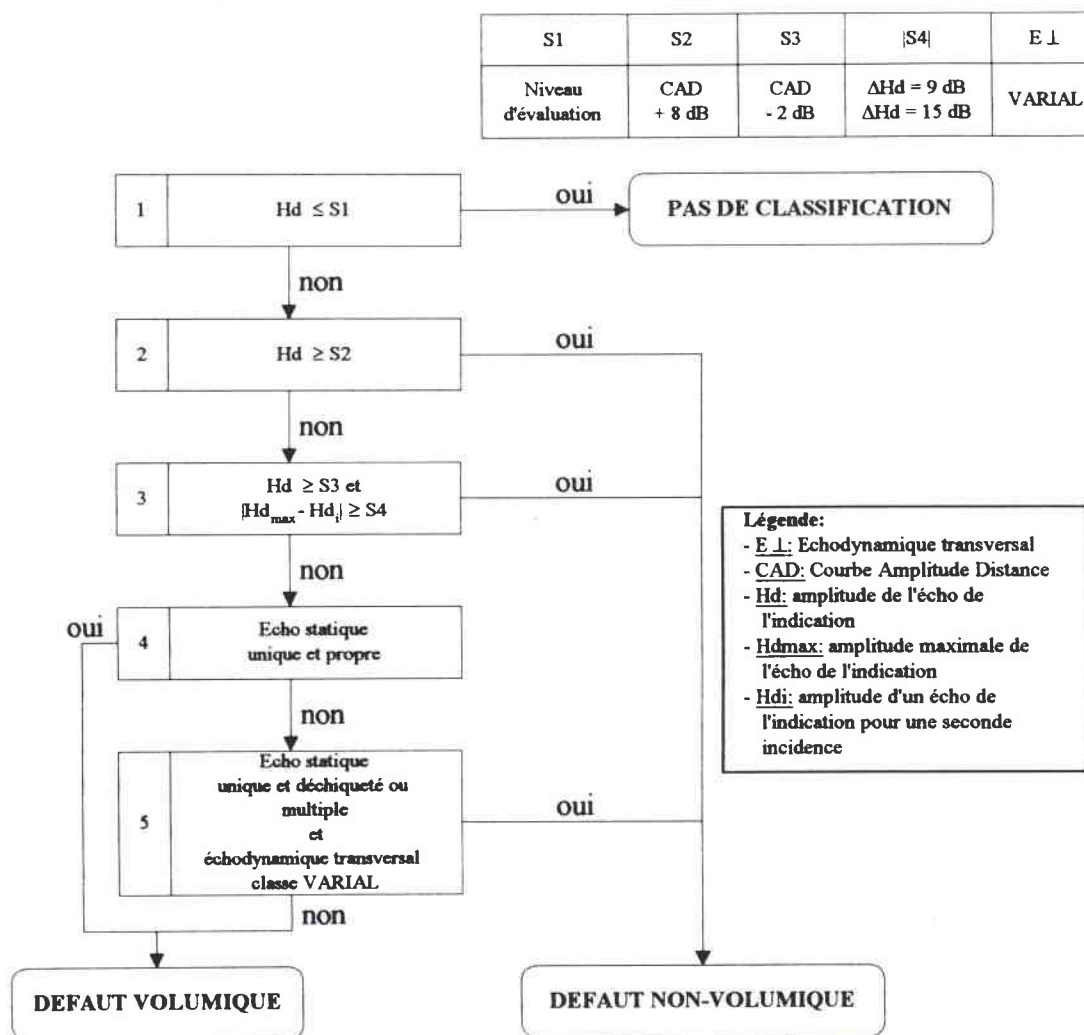
La classification passe ainsi par les cinq étapes suivantes:

- étape 1: évite de prendre en compte les indications peu réfléchissantes,
- étape 2: considère comme des défauts non volumiques toutes les indications fortement réfléchissantes,

- étape 3: caractérise les manques de fusion sur chanfrein, les manques de fusion entre passes, ou les collages inclusionnaires,
- étape 4: caractérise certaines inclusions,
- étape 5: caractérise les fissures ramifiées ou fortement rugueuses.

Quelques remarques:

- La procédure codifie une approche industrielle et définit des valeurs seuils en décibels (dB), soit par rapport à la C.A.D., soit entre différentes incidences de contrôle.
Rappel: $G_{dB} = 20 \log (H_{d1}/H_{d2})$, avec H_{d1} amplitude maximale d'un premier écho, et H_{d2} amplitude maximale d'un second écho.
- L'étude d'un écho se fait toujours par rapport à un écho de référence obtenu sur un trou de diamètre 1,5 mm ou 3 mm (norme européenne pour ce dernier).
- Le niveau d'évaluation ainsi que le diamètre du trou du bloc de référence à utiliser sont définis dans les documents contractuels. Les valeurs seuils à utiliser dépendent du diamètre des trous de référence. Si ces trous sont de diamètre 1,5 mm, on utilisera les valeurs seuils mentionnées sur la figure II-7, s'ils sont de diamètre 3 mm, on prendra celles de la figure II-8.
- Les défauts hybrides (ou composites), c'est-à-dire résultant de l'association d'un manque de fusion et d'une inclusion, sont caractérisés en défauts non volumiques par la procédure Cascade.
- $H_d = CAD - 6 \text{ dB}$ signifie que l'indication de défaut est de 6 dB moins réfléchissante que la référence, soit deux fois moins réfléchissante (par exemple, le gain correspondant G_r obtenu sur la référence étant de 20 dB, le gain correspondant G_d obtenu sur le défaut est de 26 dB).
- Par convention, une valeur seuil négative indique que l'indication est moins réfléchissante que la référence, et une valeur seuil positive indique que l'indication est plus réfléchissante que la référence.
- Pour toutes les étapes, les valeurs de seuil ont été déterminées expérimentalement [35] par étude statistique portant sur de nombreux défauts.



1/ (S1 = niveau d'évaluation): le niveau d'évaluation est fixé dans les documents contractuels, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de classification si l'amplitude de l'écho est en-dessous de cette valeur (sauf spécification contraire dans les documents contractuels).

2/ (S2 = CAD + 8 dB): si l'écho de défaut est deux fois et demi plus réfléchissant que la CAD prise comme référence, le défaut est classé non-volumique.

3/ (S3 = CAD - 2 dB): si le pouvoir réfléchissant atteint au moins 80% de la CAD prise comme référence et s'il existe un déséquilibre de réflectivité égal au moins à S4 alors le défaut est classé non-volumique

- avec S4 = 9 dB pour les ondes transversales à 4 MHz,
- avec S4 = 15 dB entre une incidence en ondes transversales et une incidence en ondes longitudinales. Les incidences i de contrôle utilisées sont séparées d'au moins 10°. Les comparaisons doivent être effectuées sensiblement dans la même zone du défaut.

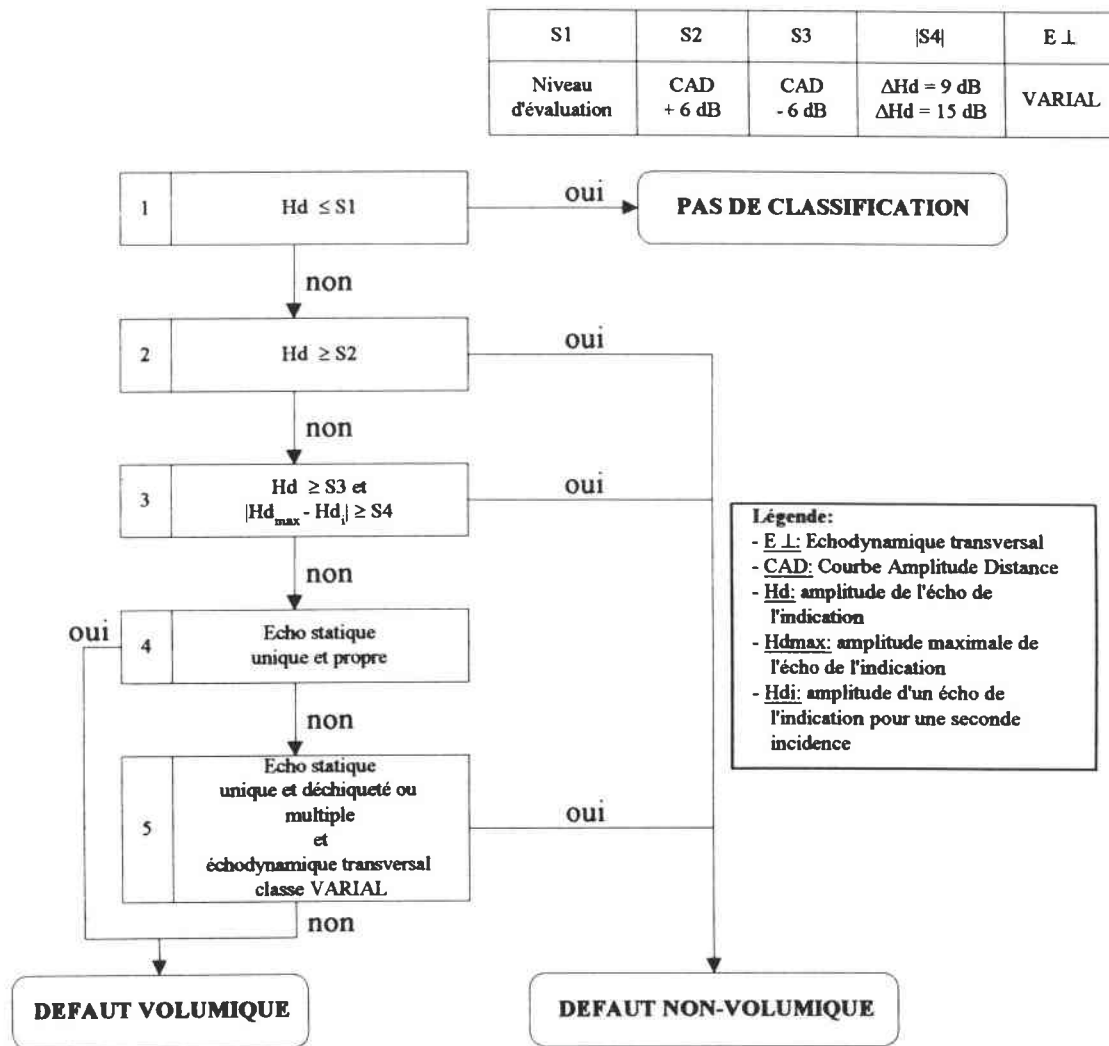
4 & 5/ Prise en compte des comportements les plus pénalisants. Le diagnostic doit être redondant pour au moins 2 incidences de contrôle.

5/ Si l'échodynamique n'est pas VARIAL, le défaut est classé volumique (VAROUL, CLOCHE).

Remarque importante: les valeurs mentionnées sur la présente figure sont à utiliser lorsque les échos de référence sont obtenus sur des génératrices d'un diamètre de 1,5 mm.

Figure II-7:

Procédure Cascade - IS. US. 319.21 pour un diamètre du trou de référence égal à 1,5 mm



1/ (S1 = niveau d'évaluation): le niveau d'évaluation est fixé dans les documents contractuels, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de classification si l'amplitude de l'écho est en-dessous de cette valeur (sauf spécification contraire dans les documents contractuels).

2/ (S2 = CAD + 6 dB): si l'écho de défaut est deux fois plus réfléchissant que la CAD prise comme référence, le défaut est classé non-volumique.

3/ (S3 = CAD - 6 dB): si le pouvoir réfléchissant atteint au moins la moitié de la CAD prise comme référence et s'il existe un déséquilibre de réflectivité égal au moins à S4 alors le défaut est classé non-volumique
 - avec S4 = 9 dB pour les ondes transversales à 4 MHz,
 - avec S4 = 15 dB entre une incidence en ondes transversales et une incidence en ondes longitudinales. Les incidences i de contrôle utilisées sont séparées d'au moins 10°. Les comparaisons doivent être effectuées sensiblement dans la même zone du défaut.

4 & 5/ Prise en compte des comportements les plus pénalisants. Le diagnostic doit être redondant pour au moins 2 incidences de contrôle.

5/ Si l'échodynamique n'est pas VARIAL, le défaut est classé volumique (VAROUL, CLOCHE).

Remarque importante: les valeurs mentionnées sur la présente figure sont à utiliser lorsque les échos de référence sont obtenus sur des génératrices d'un diamètre de 3 mm.

Figure II-8:

Procédure Cascade - IS. US. 319.21 pour un diamètre du trou de référence égal à 3 mm

Note: la procédure que nous avons utilisée dans notre travail et qui est décrite dans la suite correspond à un trou de référence de diamètre 3 mm, conformément aux normes européennes.

● Critère du pouvoir réfléchissant - Etapes 1 et 2:

Dans le cas de faibles amplitudes, on admet qu'une indication moins réfléchissante que le niveau d'évaluation n'est pas significative.

Dans le cas de fortes amplitudes, on admet qu'une indication deux fois plus réfléchissante que la C.A.D. résulte de la présence d'un défaut non volumique.

Cette étape va permettre de classer les défauts non volumiques type fissure ou manque de fusion qui sont très bien orientés par rapport au faisceau ultrasonore (défauts perpendiculaires au faisceau). En effet, une grande quantité de l'énergie émise sera réfléchi vers le traducteur (figure II-9).

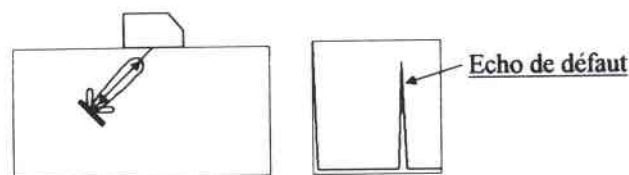


Figure II-9:

Cas d'un défaut non volumique orienté perpendiculairement au faisceau ultrasonore

● Critère de la réflectivité directionnelle - Etape 3:

Le principe de cette étape repose sur le fait qu'un défaut volumique va réfléchir une quantité d'énergie équivalente dans toutes les directions, alors que le défaut non volumique, comme on l'a déjà précisé pour l'étape 2, réfléchit une grande quantité d'énergie selon une seule direction. Un exemple est donné en figure II-10.

Deux conditions devront être réunies pour pouvoir conclure à la présence d'un défaut non volumique:

- le pouvoir réfléchissant atteint au moins le seuil S3,
- il existe un déséquilibre d'au moins 9 dB entre deux incidences de contrôle si celui-ci est effectué en ondes transversales, ou d'au moins 15 dB entre une incidence de contrôle

effectuée en ondes transversales et une autre effectuée en ondes longitudinales droites. Le terme incidence de contrôle regroupe l'angle de réfraction, l'accès et le mode de travail (demi-bond* ou bond*).

***Remarque:** le contrôle au demi-bond est une technique dans laquelle le trajet de l'onde ultrasonore est direct entre le point d'incidence et le réflecteur, sans réflexion intermédiaire, alors que le contrôle au bond utilise une réflexion intermédiaire sur le fond de la pièce.

Conditions d'application:

- il faut toujours utiliser, pour les différents passages effectués, des transducteurs de fréquences très voisines,
- la différence entre les incidences de contrôle doit être au moins égale à 10° ,
- la comparaison des pouvoirs réfléchissants doit être effectuée sur la zone la plus réfléchissante de l'indication obtenue avec les incidences de contrôle utilisées, et n'a de signification que si les échos rencontrés sont uniques et proviennent bien du même réflecteur.

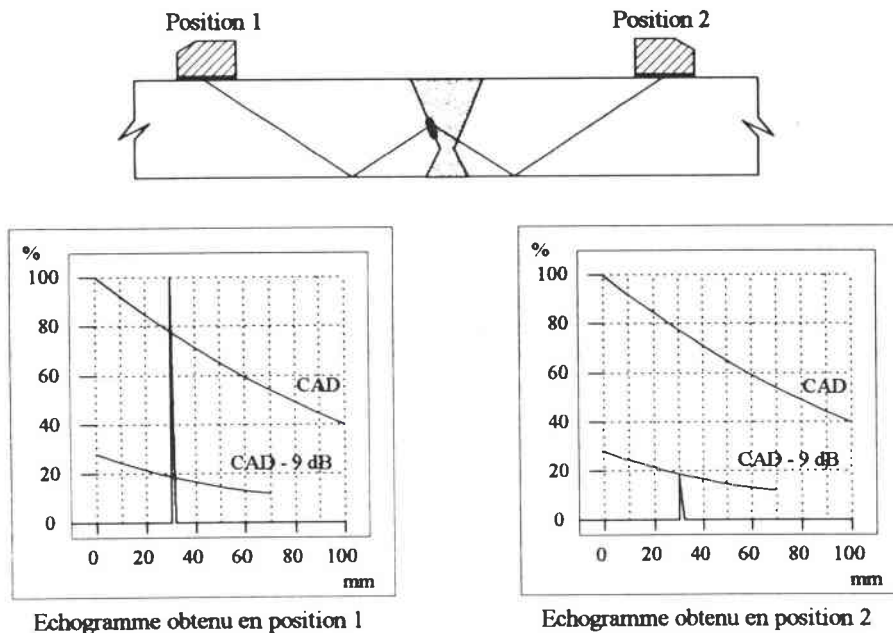


Figure II-10:

Exemple d'application du critère de la réflectivité directionnelle pour un défaut non volumique sur chanfrein

● **Critère de l'aspect de l'écho statique - Etape 4:**

Compte-tenu des valeurs des pouvoirs réfléchissants rencontrés (ni trop forts, ni trop faibles) et de l'équilibre des réflectivités rencontrées entre toutes les incidences, si l'écho statique est unique et propre, le défaut analysé est considéré comme volumique. Dans le cas contraire, on passe à l'étape 5.

Un exemple d'écho statique unique et propre est donné en figure II-11.

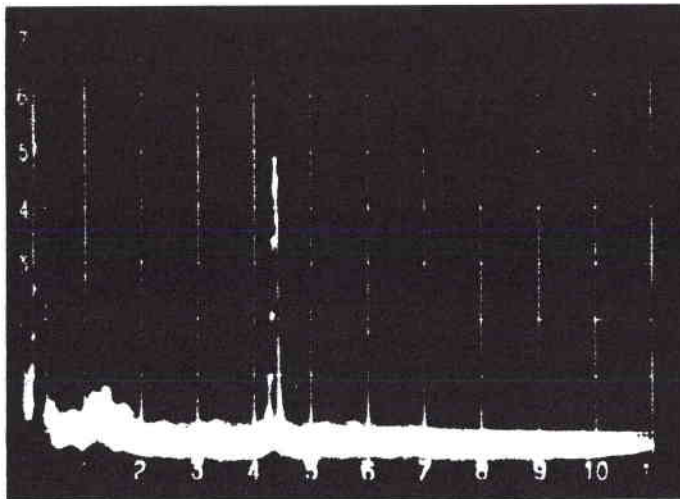


Figure II-11:

Echo statique unique et propre

Remarque: il est clair que l'aspect de l'écho dépend du couple transducteur - appareil à ultrasons. C'est pourquoi il est impératif de comparer visuellement l'aspect de l'écho obtenu sur l'indication avec celui de l'écho obtenu sur la génératrice de trou du bloc de référence (cas type d'un écho unique et propre).

Il est ainsi possible de distinguer les défauts volumiques de type soufflures ou inclusions.

● **Critère du comportement de l'échodynamique transversal - Etape 5:**

Si l'écho statique n'est pas unique et propre, il est forcément unique et déchiqueté (figure II-12) ou multiple (figure II-13 et II-14).

Remarque: l'analyse prend en compte, non seulement l'enveloppe de la courbe, mais aussi les comportements dynamiques des échos au sein de cette enveloppe.

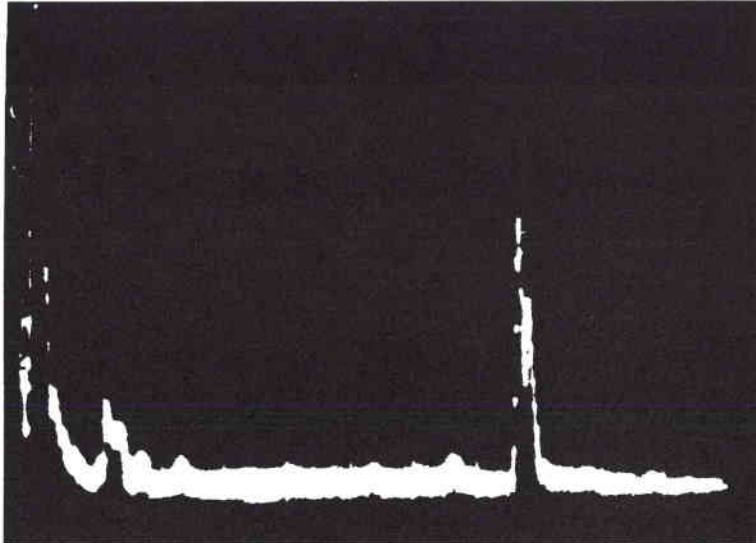


Figure II-12:
Echo statique unique et déchiqueté

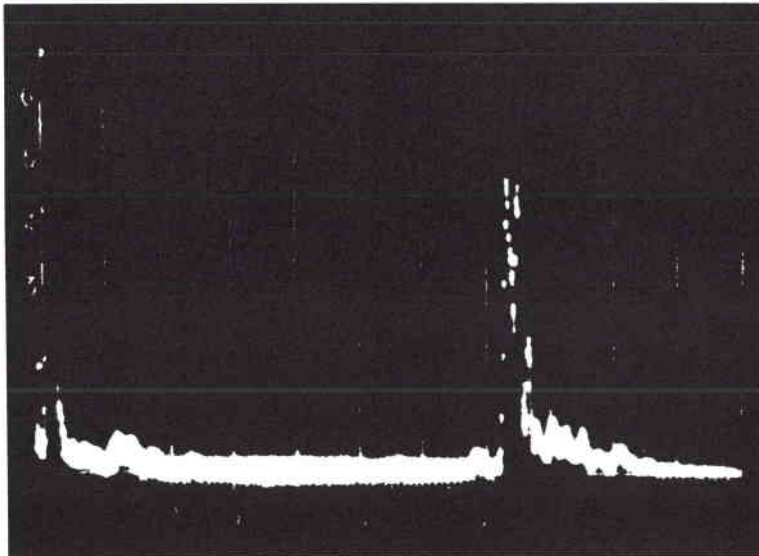


Figure II-13:
Echos statiques multiples - Sans parcours sonore affecté

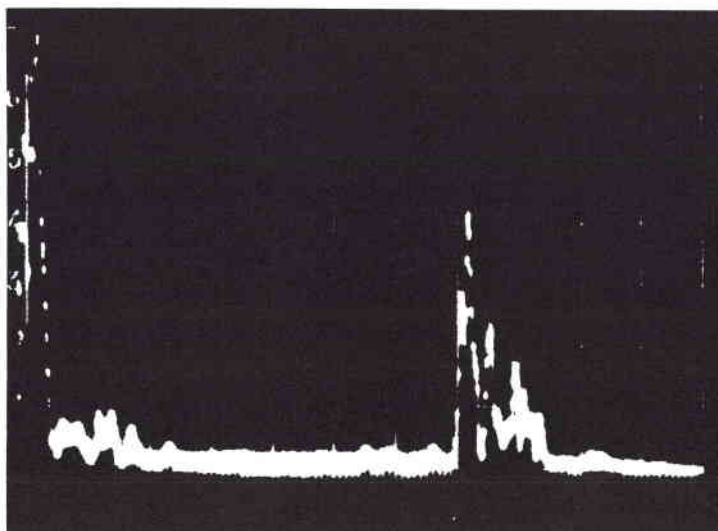


Figure II-14:

Echos statiques multiples et déchiquetés - Parcours sonore affecté: 12 mm

A cette dernière étape, les comportements dynamiques observés peuvent être classés en quatre types:

- CLOCHE (figure II-15): un écho unique se déplace dans une enveloppe en forme de cloche;

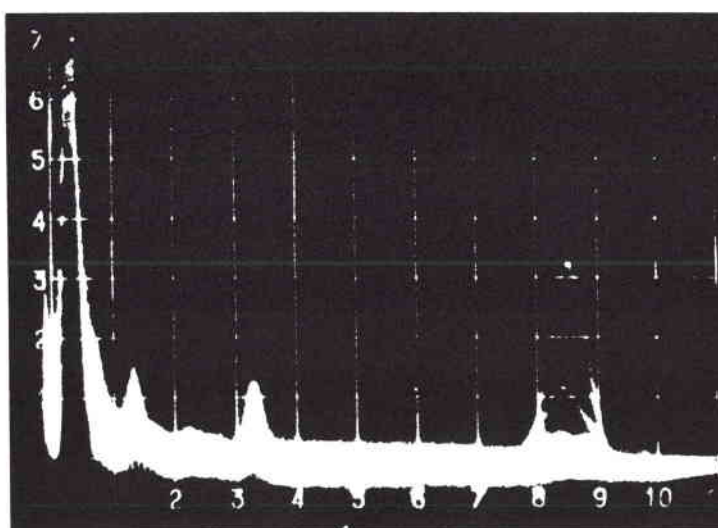


Figure II-15:

Comportement échodynamique CLOCHE

- PLATEAU (figure II-16): une écho unique se déplace selon une enveloppe élargie présentant une zone d'amplitude plus ou moins constante;

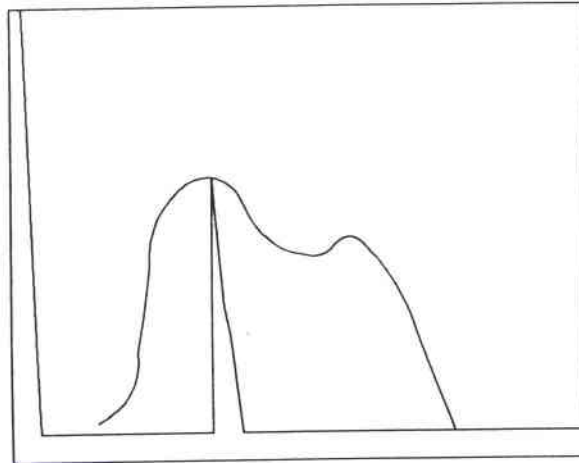


Figure II-16:

Comportement échodynamique PLATEAU

- VAROUL (figure II-17): des échos multiples, d'amplitudes différentes se déplacent indépendamment et à des instants pouvant être différents, les enveloppes en cloche se recourent et globalement l'enveloppe résultante est variable, mais les échos semblent rouler au sein de chaque enveloppe, d'où l'appellation VAROUL;

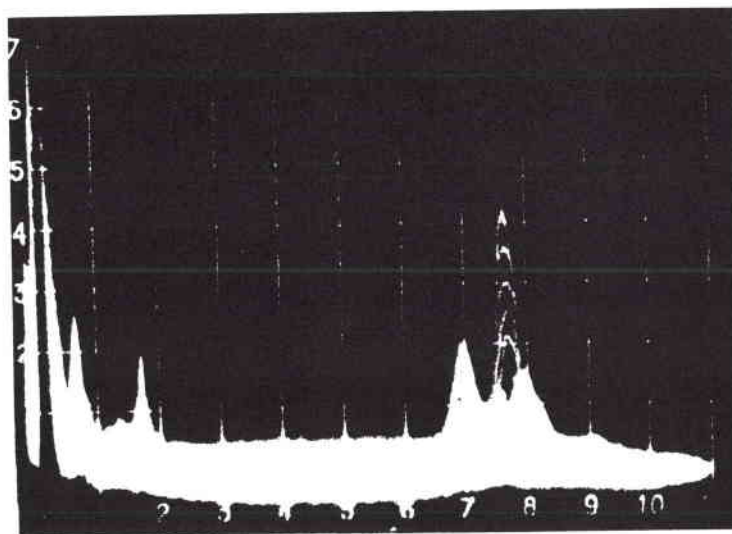


Figure II-17:

Comportement échodynamique VAROUL

- **VARIAL** (figure II-18): des échos multiples d'amplitudes différentes apparaissent de façon aléatoire; les courbes échodynamiques individuelles, lorsqu'elles peuvent être observées, sont assimilables à des cloches très étroites, ce qui donne l'impression de montées et descentes brutales des échos.

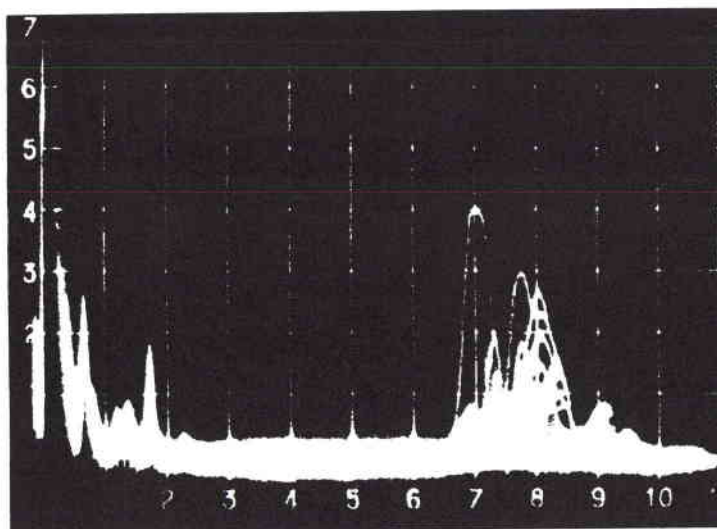


Figure II-18:
Comportement échodynamique VARIAL

L'appellation VARIAL a une influence importante en terme de classification indication volumique / indication non volumique. C'est pourquoi, en cas d'hésitation VAROUL / VARIAL, il est préférable d'exprimer un doute plutôt qu'une conclusion erronée.

Le diagnostic à retenir pour une incidence de contrôle est le comportement échodynamique le plus pénalisant rencontré lors du balayage effectué sur toute la longueur de l'indication.

Si le comportement échodynamique de l'indication est de type VARIAL pour au moins deux incidences de contrôle, alors on peut conclure à la présence d'un défaut non volumique (a priori, les deux incidences retenues correspondent à celles ayant donné lieu aux pouvoirs réfléchissants les plus forts). Dans le cas où une seule incidence donne lieu à un comportement échodynamique de type VARIAL, il peut être fait appel pour conclure à une incidence supplémentaire ou à des examens complémentaires.

Les autres comportements échodynamiques conduisent à conclure à la présence d'un défaut volumique (CLOCHE: volumique simple; VAROUL: volumique multiple).

A ce stade d'application de la procédure, il ne peut pas y avoir de comportement échodynamique de type PLATEAU car ce défaut aura déjà été classé comme non volumique dès les premières étapes de la classification.

Cette ultime étape permet finalement de distinguer les défauts non volumiques tels que les fissures ramifiées ou fortement rugueuses des défauts volumiques multiples tels que des nids de soufflures.

II. 4. Conclusion

La recommandation IS. US. 319.21 propose une méthode de classification des défauts selon leur nature volumique ou non volumique, déjà utilisée sous forme manuelle sur chantier. Les quatre premières étapes sont parfaitement définies par la procédure et ne doivent pas poser de problèmes à un opérateur. La cinquième étape introduit une notion visuelle qui peut permettre de séparer les nids de soufflures et les fissures ramifiées. Cependant, cette distinction visuelle reste délicate à apprécier et nécessite que l'opérateur soit expérimenté.

Aussi, afin de pallier à ce problème de discrimination, nous avons cherché à définir des paramètres représentatifs du comportement des ondes ultrasonores sur les défauts concernés.

Chapitre III: Aspects théoriques du contrôle non destructif ultrasonore

III. 1. Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté la procédure Cascade utilisée pour la caractérisation des défauts dans les soudures bout-à-bout en acier faiblement allié. Dans ce chapitre, nous présentons les principes du contrôle non destructif ultrasonore, les différentes conditions expérimentales possibles et leurs réponses, puis nous décrivons la nature des différents défauts pouvant apparaître dans les soudures étudiées.

III. 2. Le contrôle non destructif par ultrasons des assemblages soudés

III. 2. 1. Principe du contrôle ultrasonore

Les ondes ultrasonores sont des vibrations mécaniques qui se propagent dans les milieux élastiques tels que les solides ou les fluides. Certaines modifications des caractéristiques du milieu de propagation, telles que des défauts de compacité, perturbent la progression de l'onde sonore en entraînant des phénomènes divers tels que réflexion, réfraction ou atténuation.

Le principe du contrôle par ultrasons est donc d'analyser, à l'aide d'instruments de mesure appropriés, les perturbations que subit une onde ultrasonore qui se propage dans le milieu testé, tout en sachant que l'origine de ces perturbations n'est pas nécessairement un défaut de compacité, mais peut être liée à de multiples facteurs tels que la géométrie de la pièce, l'habileté de l'opérateur, la qualité du matériel, etc. La principale difficulté de mise en œuvre de ce procédé réside donc dans l'interprétation des signaux issus d'une anomalie de propagation, de façon à en déterminer l'origine.

Les fréquences ultrasonores utilisées dépendent essentiellement des caractéristiques du matériau contrôlé et des dimensions des discontinuités recherchées. Dans le cas du contrôle industriel des matériaux métalliques, elles sont généralement comprises entre 1 MHz et 15 MHz. La génération est obtenue en exploitant les phénomènes de piézo-électricité.

L'utilisation des ultrasons pour le contrôle non destructif des matériaux met en jeu un certain nombre de phénomènes qui seront successivement abordés:

- la nature des ondes et leurs propriétés,
- la production des ultrasons,
- leur propagation dans le matériau considéré,
- les phénomènes de réflexion, réfraction,...

III. 2. 2. Nature des ondes ultrasonores

Dans les solides isotropes (mêmes caractéristiques élastiques dans toutes les directions), on démontre qu'il existe deux modes de propagation de volume des ondes élastiques avec des vitesses définies:

- *le déplacement sans cisaillement* qui correspond aux ondes longitudinales ou de compression, dont la vitesse de propagation est donnée par la formule:

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

avec E: module d'élasticité ou de Young du matériau contrôlé,

ν : le coefficient de Poisson du matériau contrôlé,

ρ : la masse volumique du matériau contrôlé.

Ces ondes existent pour tous les états physiques: solide, liquide et gazeux.

- *le déplacement sans dilatation ou compression* qui correspond aux ondes transversales ou de cisaillement, et dont la vitesse de propagation est donnée par la formule:

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

ou

$$c_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

avec G : module de Coulomb ou de rigidité du matériau contrôlé,

ρ : la masse volumique du matériau contrôlé.

Les ondes transversales n'existent que pour les solides car le module de Coulomb est nul pour les liquides et les gaz.

Dans certaines configurations, il peut aussi exister des ondes de surface dont les plus couramment utilisées en contrôle non destructif sont les suivantes:

- les ondes de Rayleigh: elles n'affectent qu'une épaisseur de l'ordre de deux longueurs d'onde à la surface de la pièce. Elles sont la combinaison de deux ondes, l'une de compression et l'autre de cisaillement déphasée de $\pi/2$, qui se propagent à la même vitesse et dans la même direction. La vitesse de propagation de ces ondes est d'environ $0,9.c_T$.

- les ondes de Lamb: elles existent dans les matériaux de faible épaisseur, c'est-à-dire de l'ordre de la longueur d'onde. Elles peuvent être considérées comme le résultat de deux ondes longitudinales et de deux ondes transversales. Leur vitesse varie suivant la fréquence et l'épaisseur: il s'agit d'un mode de propagation dispersif. Elles sont surtout utilisées dans le cas des tôles minces.

III. 2. 3. La production des ultrasons

D'une manière générale, on appelle transducteur tout système qui permet de convertir une forme d'énergie (par exemple électrique) sous une autre forme (par exemple mécanique). Les transducteurs ultrasonores couramment utilisés permettent de transformer l'énergie électrique délivrée par un générateur en énergie acoustique (ultrasons). Ces mêmes transducteurs permettent la conversion inverse énergie acoustique - énergie électrique.

Les transducteurs sont basés sur le phénomène de la piézo-électricité. Des céramiques ferroélectriques polarisées telles que le titanate de baryum sont utilisées, ou de plus en plus souvent, des céramiques piézo-composites.

developpe- ultra-son échop XAA.

• **Les caractéristiques d'un traducteur:**

Il est généralement constitué:

- d'une céramique connectée à un système électronique émetteur-récepteur, appelée transducteur,
- d'un support qui joue un rôle d'amortisseur,
- d'une lame "quart d'onde" qui adapte l'impédance de la céramique à celle du moyen de couplage,
- d'un boîtier de protection.

Selon sa construction, il peut générer des ondes transversales ou longitudinales dans le matériau testé.

Il est caractérisé par sa fréquence de résonance et par sa bande passante (figure III-1).

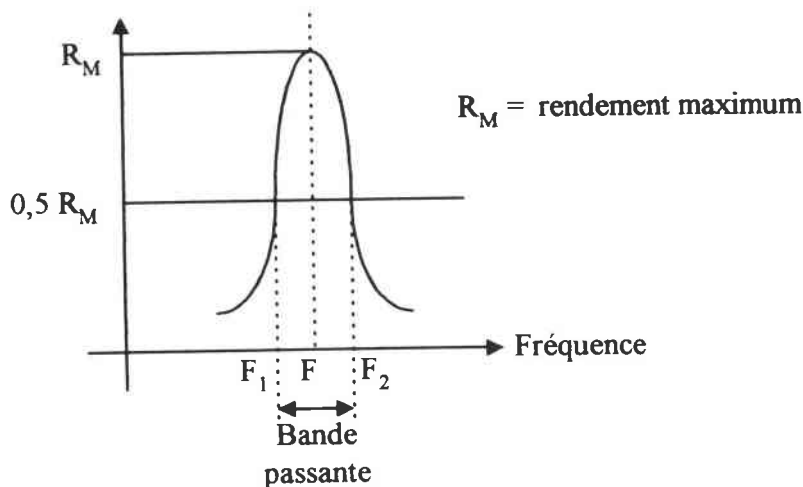


Figure III-1:

Exemple de réponse fréquentielle d'un capteur [38]

La céramique étant excitée par une impulsion électrique, elle vibre suivant une sinusoïde amortie en fonction du temps (figure III-2).

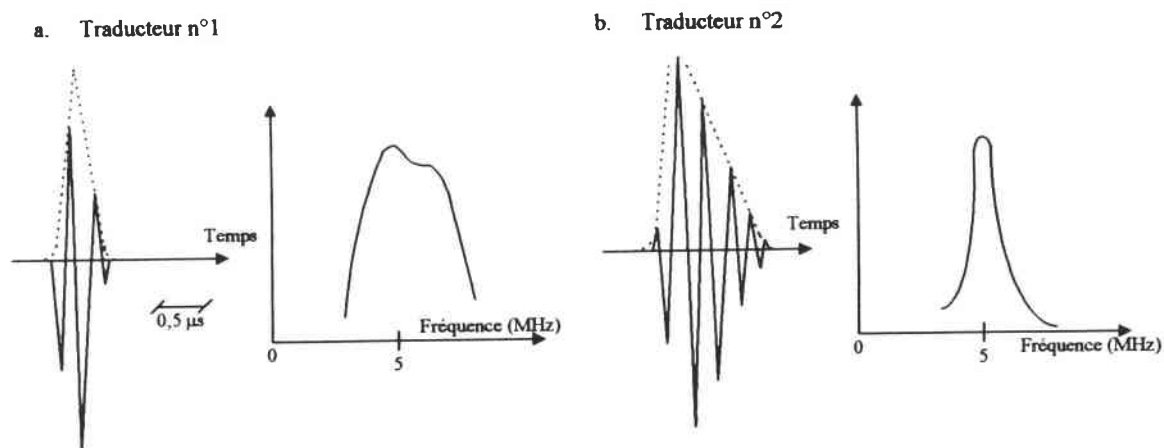


Figure III-2:

Réponses de transducteurs [39]

On trouve des transducteurs plus ou moins amortis suivant leur conception. Il convient donc, en fonction de l'application, de choisir un transducteur adapté au contrôle que l'on veut effectuer. Dans le cas du contrôle des soudures en acier faiblement allié, des transducteurs de fréquence centrale comprise entre 2 MHz et 5 MHz et moyennement amortis sont généralement utilisés.

• **Le champ acoustique:**

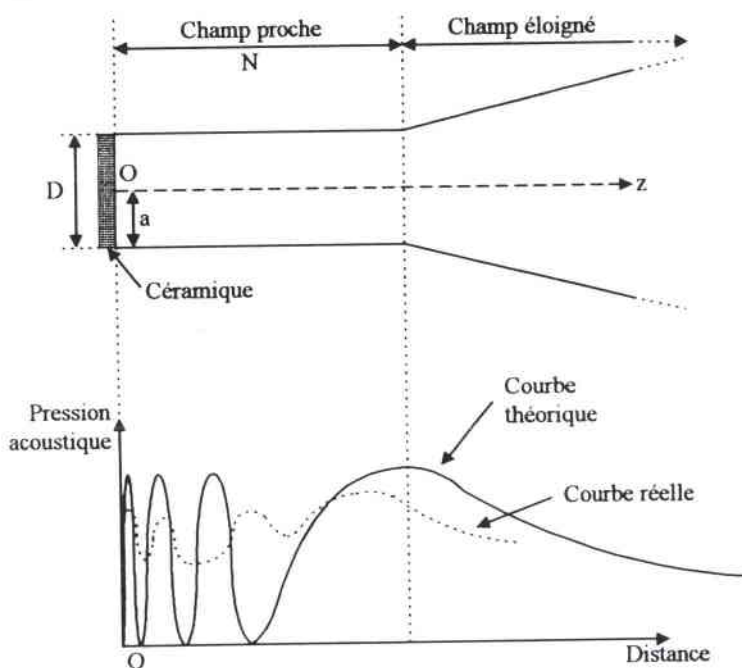


Figure III-3:

Champ sonore créé par un transducteur et pression ultrasonore moyenne en fonction de la distance

Le calcul du champ acoustique (détermination de la pression acoustique dans l'espace) peut s'effectuer en appliquant le principe de Huygens [40] selon lequel l'émetteur est assimilé à une infinité de sources ponctuelles qui émettent des ondes sphériques (cette approche permet d'écrire la pression acoustique en un point donné comme la somme des pressions produites par chaque source secondaire). En faisant l'hypothèse du cas monochromatique avec toutes les sources en phase, avec une longueur d'onde dans le transducteur très petite devant son diamètre D , et en utilisant un émetteur plan et circulaire, nous présentons les expressions des champs créés.

On distingue deux zones (figures III-3):

- une zone appelée **champ proche**, ou zone de Fresnel: elle est définie comme étant la zone du faisceau acoustique d'un transducteur plan située à proximité de celui-ci, dans laquelle se produisent de nombreuses interférences entraînant de fortes variations d'amplitude mais pratiquement sans divergence. Sa longueur N est égale à la distance entre l'émetteur et le dernier maximum de la pression acoustique.

L'amplitude de la pression acoustique maximum sur l'axe est:

$$P(z) = 2P_0 \sin \frac{ka^2}{4z} = 2P_0 \sin \frac{a^2}{2z\lambda} \pi$$

avec $k=2\pi/\lambda$,

P_0 : pression sur la surface du transducteur,

a : rayon du transducteur,

λ : longueur d'onde,

z : distance sur l'axe du faisceau.

Cette partie du faisceau n'est normalement pas exploitée pour le contrôle.

- une zone appelée **champ éloigné**, ou zone de Fraunhofer, définie comme étant la zone du faisceau acoustique d'un transducteur plan située au-delà du champ proche, et où l'intensité décroît en fonction inverse du carré de la distance à l'émetteur. Cette zone est caractérisée par une divergence du faisceau.

L'expression de la pression est:

$$P(r, z, t) = P_0 \frac{a}{r} J_1 \left(\frac{kra}{z} \right) \sin(\omega t - kz)$$

avec r : distance par rapport à l'axe du faisceau,
 P_0 : pression sur la surface de l'émetteur,
 z : distance par rapport à l'émetteur,
 a : rayon de l'émetteur,
 λ : longueur d'onde,
 ω : pulsation de l'onde émise ($\omega=2\pi f$),
 y : distance sur l'axe du faisceau,
 α : angle de divergence du faisceau ($\sin\alpha=r/z$),
 J_1 : fonction de Bessel d'ordre 1,
 $k=2\pi/\lambda$.

En posant $\sin\alpha=r/z$, on obtient:

$$P(r, z, t) = P_0 \frac{k\alpha^2}{2z} \frac{2J_1(ka \sin\alpha)}{ka \sin\alpha} \sin(\omega t - kz)$$

$P_0 \frac{k\alpha^2}{2z}$ est la pression acoustique sur l'axe.

Dans un plan perpendiculaire à la direction de propagation, la répartition énergétique se fait donc sous forme de tache circulaire. La tache centrale contient la majeure partie de l'énergie: c'est le lobe principal (figure III-4), le plus intéressant, et celui que nous avons utilisé pour le contrôle. Les autres taches correspondent aux lobes latéraux.

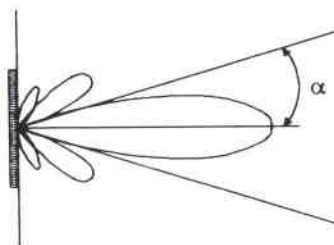


Figure III-4:
Lobes d'émission principal et secondaires

Dans la zone de Fraunhofer, la pression acoustique décroît en $1/z$ et diverge. L'angle de divergence est l'angle entre l'axe et le lieu où l'énergie acoustique s'annule, soit pour:

$$J_1(ka \sin\alpha) = 0.$$

On obtient $\sin \alpha = 1,22 \frac{\lambda}{2a}$, premier zéro de la fonction de Bessel d'ordre 1.

La connaissance de cet angle est importante pour un opérateur: il lui permet d'expliquer la présence de certains échos, dus à la géométrie de la pièce comme, par exemple, la racine de la soudure, et qui ne sont pas des échos dus à un défaut.

III. 2. 4. Propriétés des ondes ultrasonores

III. 2. 4. 1. L'atténuation du faisceau ultrasonore

Dans le cas des ondes longitudinales et transversales, et si l'onde est harmonique (entretenue monochromatique), la pression ultrasonore P et l'amplitude A du mouvement de la particule sont reliées par la formule suivante:

$$P = \rho c \omega A$$

avec ρ : la masse volumique du matériau,
 c : la vitesse de propagation de l'onde dans le matériau,
 ω : la pulsation de l'onde émise.

L'impédance acoustique caractéristique du milieu étudié est donné par la formule:

$$Z = \rho c.$$

On peut définir l'énergie E d'une onde ultrasonore par:

$$E = \frac{1}{2} \frac{P}{Z} = \frac{1}{2} Z \omega^2 A^2$$

En raison de l'absorption (frottement interne des molécules et conduction de chaleur), de la diffusion et de la divergence du faisceau, on observe une atténuation de l'amplitude du faisceau ultrasonore. L'énergie du faisceau dans un plan parallèle au transducteur décroît avec la distance suivant la formule classique d'atténuation:

$$E_z = E_0 e^{-kz}$$

avec E_0 : énergie initiale,
 E_z : énergie à la distance z de l'origine,
 k : coefficient d'atténuation, qui dépend de nombreux facteurs.

Dans notre cas, pour les aciers faiblement alliés contrôlés, le coefficient d'atténuation est fonction du carré de la fréquence.

III. 2. 4. 2. Les phénomènes de réflexion et de réfraction aux interfaces

• Incidence normale à l'interface:

Lorsqu'une onde ultrasonore se propage dans un matériau et atteint une interface sous incidence nulle, l'énergie acoustique se répartit comme le montre la figure III-5.

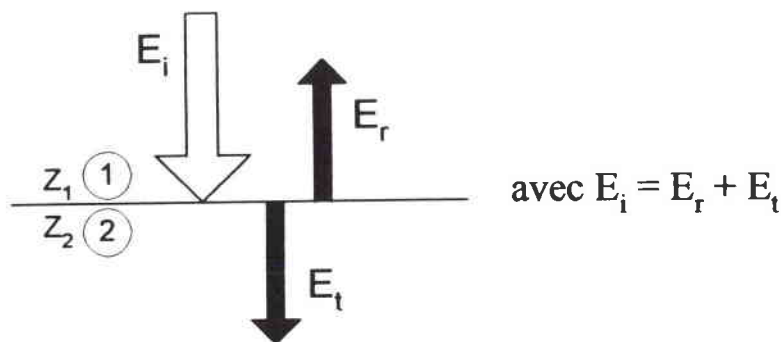


Figure III-5:

Répartition de l'énergie pour une incidence normale

Une partie de l'énergie est transmise dans le milieu 2 (E_t), et le reste est réfléchi dans le milieu 1 (E_r). Ce sont les impédances acoustiques des milieux 1 et 2 qui déterminent les proportions d'énergie transmise et réfléchie.

On a:

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

avec A_r : amplitude de l'onde réfléchie,

A_i : amplitude de l'onde incidente.

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

avec A_t : amplitude de l'onde transmise.

Si on considère que les énergies sont proportionnelles au carré des amplitudes, on obtient:

$$\frac{E_r}{E_i} = \frac{(Z_1 - Z_2)^2}{(Z_1 + Z_2)^2}$$

avec E_r : énergie de l'onde réfléchie,

E_i : énergie de l'onde incidente.

Comme l'énergie de l'onde incidente est la somme des énergies des ondes réfléchies et transmises, on a donc:

$$\frac{E_t}{E_i} = \frac{E_i - E_r}{E_i} = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2}$$

avec E_t : énergie de l'onde transmise.

Plus la différence des impédances acoustiques est importante, plus l'énergie réfléchie est importante. Cette propriété est fondamentale dans le cas du contrôle par réflexion sachant qu'une grande majorité des défauts qui affectent les assemblages soudés est constituée d'air ou de gaz dont l'impédance acoustique est négligeable par rapport à celle de l'acier.

Si les impédances acoustiques sont égales, il n'y a pas d'onde réfléchie.

● **Incidence oblique à l'interface:**

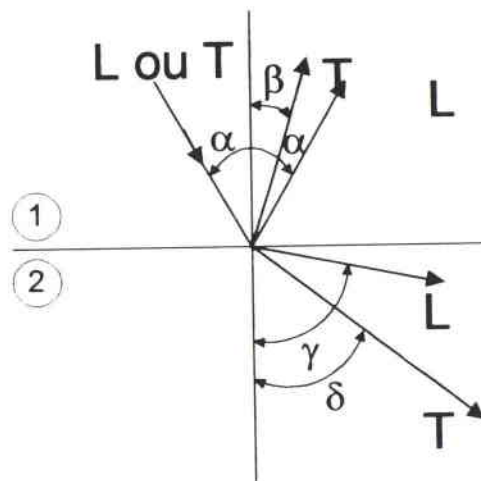


Figure III-6:

Incidence oblique à l'interface

Lorsqu'une onde ultrasonore plane rencontre sous une incidence oblique la surface de séparation de deux milieux (figure III-6), on observe:

- une conversion de mode dans les parties réfléchi et transmise: celle-ci s'explique par le fait que l'axe de vibration du réseau cristallin sur la surface de séparation des milieux fait un angle avec celle-ci et peut être décomposé en une vibration normale et une vibration tangentielle qui donnent respectivement naissance à une onde longitudinale et à une onde transversale.

- une réfraction des ondes sonores dans la partie transmise: c'est un phénomène que l'on observe lorsque la vitesse de propagation d'une onde subit une variation et que cette onde forme un angle d'incidence non nul avec l'interface. Cette variation de vitesse s'accompagne d'un changement de direction.

On a:

$$\frac{\sin \alpha_1}{V_1} = \frac{\sin \alpha_2}{V_2}$$

avec α_1 : angle d'incidence dans le milieu 1,

V_1 : vitesse des ondes dans le milieu 1,

α_2 : angle de réfraction dans le milieu 2,

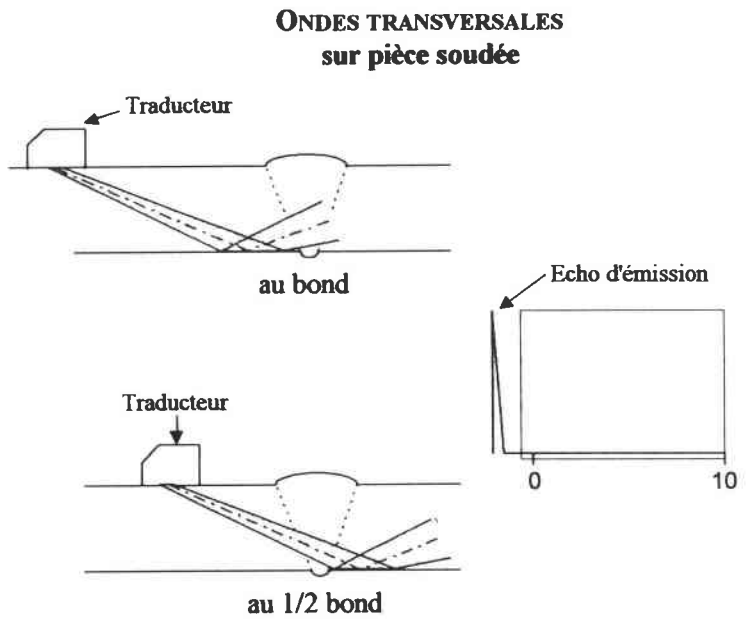
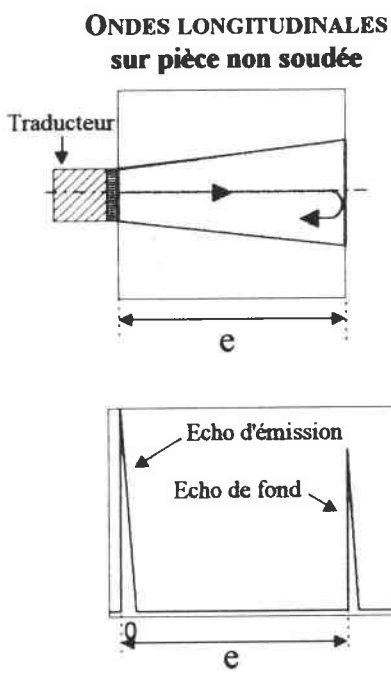
V_2 : vitesse des ondes dans le milieu 2.

En plus des phénomènes de réflexion et de réfraction, l'énergie se répartit dans les différents types d'ondes réfractées et réfléchies. Dans le cas d'une interface entre deux milieux isotropes et homogènes, cette répartition obéit aux équations de Knott [40]: lorsqu'une onde plane incidente, de directions de propagation et de polarisation connues, arrive sur une interface plane séparant deux milieux élastiques différents, on peut déterminer complètement les ondes réfléchies et transmises en appliquant l'équation de propagation et en tenant compte des conditions aux limites. Ces conditions consistent en la continuité du déplacement (ou de la vitesse) et en la continuité des contraintes lorsque l'on franchit la frontière séparant les deux milieux.

III. 3. Les principales méthodes de contrôle

• Méthode par réflexion

a) Cas d'une pièce saine



b) Cas d'une pièce avec défaut

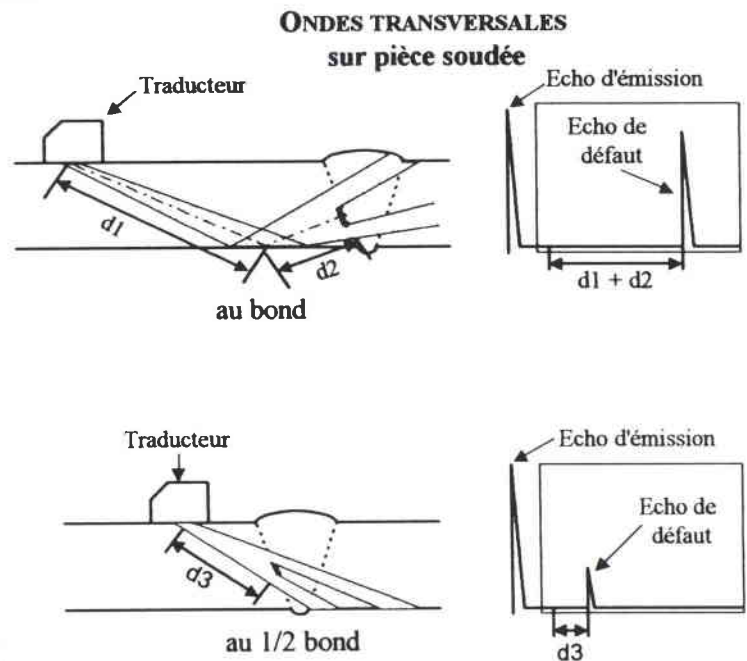
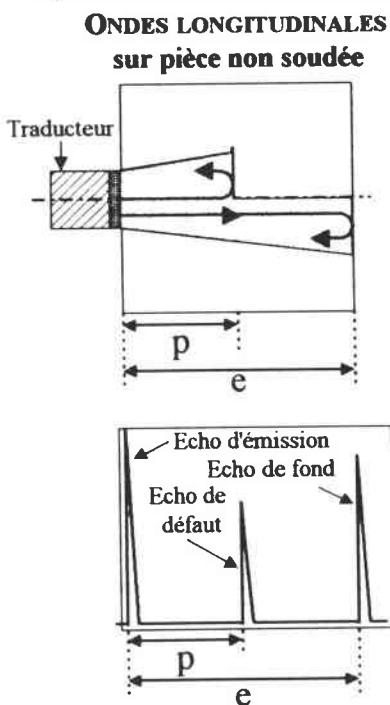


Figure III-7:

Principe de la méthode par réflexion

Un seul transducteur joue le rôle d'émetteur et de récepteur. Les ondes ultrasonores sont émises de façon impulsionnelle. Entre deux émissions, le transducteur reçoit les ondes réfléchies.

En figure III-7 est présenté le principe du contrôle par réflexion d'une pièce saine et d'une pièce comportant un défaut. Pour chaque cas de figure, on donne une étude en ondes longitudinales à 0° (cas simple) et en ondes transversales réfractées (cas du contrôle des soudures).

Pour permettre le positionnement dans la pièce des indications détectées, un étalonnage en distance de l'appareil ultrasonore doit être préalablement effectué.

a) Cas d'une pièce saine

Le faisceau ultrasonore traverse la pièce et "rebondit" sur le fond. Dans le cas des ondes longitudinales, le faisceau est réfléchi entièrement vers le transducteur d'où la détection d'un écho de fond de forte amplitude. L'échogramme présente un écho d'émission et un écho de fond. Dans le cas des ondes transversales, au bond comme au demi-bond, en général, le faisceau n'est pas réfléchi dans la direction du transducteur et aucun écho n'est détecté. L'échogramme présente simplement l'écho d'émission.

b) Cas d'une pièce avec défaut

Lorsqu'un défaut est présent dans la pièce contrôlée, le faisceau est réfléchi par le défaut. Un écho de défaut apparaît donc à un temps de parcours correspondant:

- dans le cas des ondes longitudinales à 0° , à la position p de l'indication dans l'épaisseur de la pièce. Selon la taille du défaut, une partie du faisceau peut atteindre le fond de la pièce et se réfléchir vers le transducteur: l'échogramme présentera, en plus de l'écho d'émission et de l'écho de fond, un écho de défaut situé à la distance p de l'écho d'émission.

- dans le cas des ondes transversales au bond, à une position d_1+d_2 . La position du défaut dans l'épaisseur est ensuite donnée par la relation:

$$p = e - d_2 \cdot \cos\alpha$$

avec e : épaisseur de la pièce,

α : angle d'incidence.

- dans le cas des ondes transversales au demi-bond, à une position d_3 . La position du défaut dans l'épaisseur est alors donnée par la relation:

$$p = d_3 \cdot \cos\alpha.$$

Dans ces deux derniers cas, l'échogramme présente un écho de défaut et un écho d'émission.

Bien que le parcours sonore soit plus important au bond, l'amplitude de l'écho de défaut est plus importante qu'au demi-bond puisque dans ce cas, l'orientation est préférentielle, c'est-à-dire perpendiculaire au faisceau.

Cette méthode permet de détecter un défaut à condition que celui-ci renvoie suffisamment d'énergie vers le traducteur. En effet, dans le cas où la surface réfléchissante n'est pas perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde, l'onde réfléchie peut ne pas revenir au traducteur, l'indication réfléchissante ne sera pas détectée.

L'énergie sonore peut, d'autre part, être entièrement absorbée par la structure du matériau.

Dans notre étude, la méthode par réflexion est appliquée au contrôle des soudures bout-à-bout en acier faiblement allié dans une configuration automatique avec plusieurs traducteurs disposant d'angles d'incidence différents, et se déplaçant en créneaux de part et d'autre de la soudure.

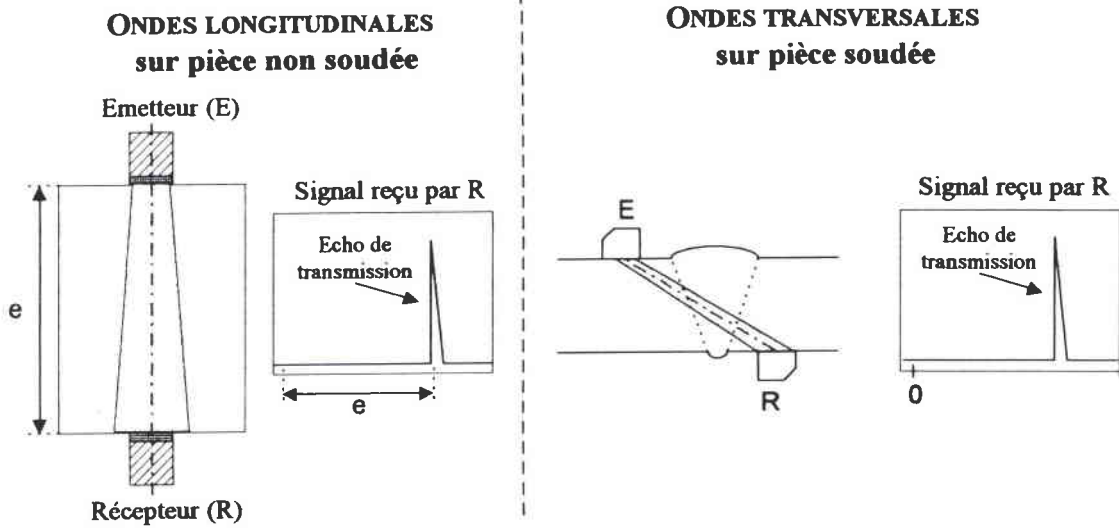
● Méthode par transmission

L'objet de cette méthode est de détecter les discontinuités internes de la matière, sans les localiser dans l'épaisseur de la pièce, en mesurant les variations de l'énergie acoustique transmise à travers le matériau contrôlé. Cette énergie transmise est partiellement ou totalement interceptée lorsqu'un défaut de compacité de la matière s'interpose sur le trajet du faisceau ultrasonore.

Cette technique est utilisée aussi dans le but de déterminer l'atténuation d'un matériau par rapport au matériau de référence avant de procéder au contrôle.

Le principe de la méthode par transmission est donné en figure 38 dans le cas des ondes longitudinales à 0° (cas simple) et des ondes transversales pour une pièce saine et une pièce avec défaut.

a) Cas d'une pièce saine



b) Cas d'une pièce avec défaut

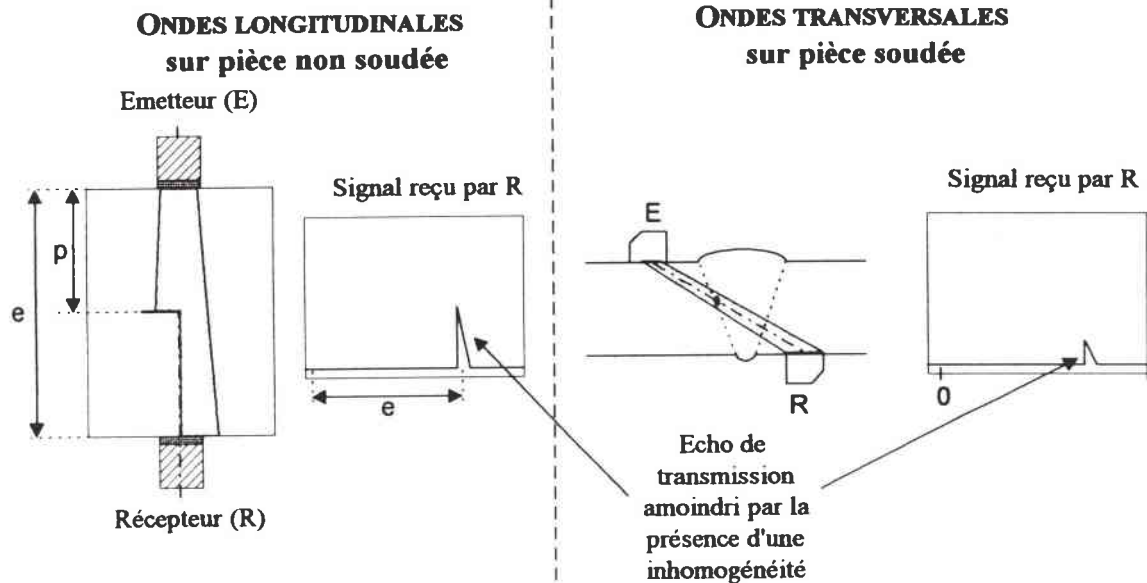


Figure III-8:

Principe de la méthode par transmission

Cette fois-ci deux transducteurs sont utilisés, le premier comme émetteur du faisceau ultrasonore, et le second comme récepteur. Ici, la présence d'un écho dit de transmission suffisant suppose l'absence de défaut. Par contre, l'absence ou une diminution sensible de cet écho peut provenir, hormis le cas d'un manque de couplage:

- d'une atténuation importante,
- de la présence d'un défaut,
- d'une déviation du faisceau due à une structure particulière.

Dans notre cas, cette méthode a été utilisée une fois pour chaque pièce et chaque traducteur afin de déterminer l'atténuation de l'acier contrôlé par rapport au bloc de référence.

III. 4. Les défauts internes affectant les constructions soudées

Tout assemblage soudé doit offrir des garanties minimales de sécurité et de résistance aux conditions normales d'utilisation, que ce soit pour une nouvelle installation ou une installation déjà en service.

Les défauts de fabrication sont des défauts qui apparaissent lors de l'exécution d'une soudure ou au cours du refroidissement de celle-ci. Leur orientation peut être longitudinale, c'est-à-dire suivant un axe parallèle à l'axe de la soudure, ou bien transversale, c'est-à-dire perpendiculaire à ce dernier. Ils peuvent nuire à la bonne tenue de l'assemblage en service. D'une façon générale, ils peuvent présenter les risques suivants:

- amorce de rupture,
- amoindrissement de la section,
- risque de fuite,
- risque de corrosion.

De plus, une concentration volumétrique de défauts trop importante peut gêner la détection ou la caractérisation de défauts plus graves.

La norme NF EN 26520 [41] établit une classification des défauts de soudure en six groupes qui sont:

- Groupe 1: les fissures,
- Groupe 2: les cavités,
- Groupe 3: les inclusions solides,
- Groupe 4: les manques de fusion et les manques de pénétration,
- Groupe 5: les défauts de forme,
- Groupe 6: les défauts divers n'appartenant à aucun des groupes cités ci-dessus.

Les groupes 5 et 6 ne seront pas abordés dans ce chapitre. En effet, il s'agit de défauts externes et, normalement, le contrôle ultrasonore n'est pas destiné à détecter ce type de défauts.

• Groupe 1: les fissures

Les fissures sont des déchirures du métal qui peuvent se produire au cours du refroidissement ou sous l'effet de contraintes.

On distingue principalement:

- *les fissures longitudinales*: fissures dont la direction principale est voisine de celle de l'axe de la soudure;
- *les fissures transversales*: fissures dont la direction est sensiblement perpendiculaire à l'axe de la soudure;
- *les fissures rayonnantes*: groupes de fissures issues d'un même point;
- *les réseaux de fissures marbrées*: ensembles de fissures groupées d'orientation quelconque;
- *les fissures ramifiées*: ensembles de fissures reliées entre elles qui se présentent sous forme d'arborescence et qui sont à distinguer d'un réseau de fissures marbrées et de fissures rayonnantes.

• Groupe 2: les cavités

Ce terme s'applique à deux types de défauts:

- les soufflures ou cavités formées par du ou des gaz,
- les retassures ou cavités dues au retrait du métal au moment de la solidification.

On distingue principalement:

- *les soufflures sphéroïdales*: soufflures de forme sphérique;
- *les nids de soufflures*: groupes de soufflures;
- *les soufflures allongées*: soufflures non sphéroïdales importantes dont la plus grande dimension est approximativement parallèle à l'axe de la soudure;
- *les soufflures vermiculaires*: soufflures en forme de "galerie de ver" résultant du cheminement des gaz. La forme et la position de ces soufflures sont déterminées par le mode de solidification et l'origine des gaz; elles sont généralement disposées en arêtes de poisson et groupées en nids;
- *les retassures*.

• Groupe 3: les inclusions solides

Les inclusions solides sont des corps solides étrangers emprisonnés dans la masse de métal fondu.

Ces inclusions comprennent:

- *les inclusions de laitier*: résidu de laitier emprisonné dans la masse de métal fondu; on peut rencontrer suivant leur répartition des inclusions de laitier alignées (ou en chapelet), isolées, ou autres;

- *les inclusions de flux*: résidu de flux emprisonné dans la soudure; suivant le cas, il peut s'agir d'inclusions alignées (ou en chapelet), isolées, ou autres;

- *les inclusions d'oxyde*: oxyde métallique emprisonné dans le métal fondu en cours de solidification;

- *les inclusions métalliques*: particules de métal étranger emprisonnées dans la masse de métal fondu; il peut s'agir de tungstène, cuivre ou de tout autre métal.

Le type d'inclusion solide rencontré dans une soudure dépend du procédé de soudage utilisé.

• Groupe 4: les manques de fusion et les manques de pénétration

Un manque de fusion est un manque de liaison entre le métal déposé et le métal de base ou entre deux couches contiguës de métal déposé.

Il y a lieu de distinguer:

- le manque de fusion latéral qui intéresse les bords à souder,
- le manque de fusion entre passes,
- le manque de fusion à la racine de la soudure.

Un manque de pénétration est une absence partielle de fusion des bords à souder, laissant subsister un interstice entre ces bords.

En ultrasons, les défauts sont classés en deux familles:

- **les défauts non volumiques, qui risquent d'engendrer les problèmes présentés précédemment, et qui sont très dangereux; il s'agit des fissures, des manques de fusion,...**

- **les défauts volumiques, qui présentent peu de risque d'évoluer dans le temps, et qui sont souvent tolérés; il s'agit des soufflures, des inclusions, ...**

Les critères d'acceptation des défauts dans les soudures sont imposés par les codes (CODAP - Code Français de Construction des Appareils à Pression, RCCM - Règles de Conception et de Construction des Matériels Mécaniques des Ilots Nucléaires). Généralement, les défauts non volumiques sont catégoriquement refusés. En ce qui concerne les défauts volumiques, il faut prendre en compte leur longueur, leur pouvoir réfléchissant, ainsi que leur densité avant de conclure.

Chapitre IV: Etude expérimentale et automatisation des quatre premières étapes de la procédure Cascade

Nous avons analysé la procédure Cascade pour réaliser une série d'algorithmes de traitement permettant de fournir à un contrôleur une aide au diagnostic.

Dans ce chapitre, nous exposons la procédure développée pour les quatre premières étapes. Chaque étape est automatisée séparément. Le diagnostic correspondant aux trois premières étapes repose sur des représentations graphiques, basées sur l'amplitude des échos détectés, qui permettent à l'opérateur de prendre une décision. Dans la quatrième étape, une analyse des échos est nécessaire; elle compare la forme de l'écho de défaut à un écho de référence. Cette étude de la rugosité de l'écho permet de déterminer si l'on obtient un écho unique et propre.

IV. 1. Contrôle des éprouvettes - Acquisition de signaux ultrasonores représentatifs

IV. 1. 1. Les éprouvettes étudiées

L'Institut de Soudure a mis à notre disposition un lot de trente-cinq éprouvettes soudées comprenant différentes sortes de défauts types réels implantés volontairement dans les éprouvettes. Il s'agit pour la plupart de pièces en acier carbone avec chanfrein en X ou en V soudées à l'électrode enrobée. Leur épaisseur est de 25 mm et leur largeur supérieure ou égale à cinq fois l'épaisseur de chaque partie soudée (figure IV-1). Dans la plupart de ces éprouvettes, trois défauts ont été implantés.

Une partie des éprouvettes a été sélectionnée pour constituer la population de défauts suivante:

- 3 fissures longitudinales,
- 11 manques de fusion,
- 7 manques de pénétration,
- 2 excès de pénétration,
- 3 nids de soufflures,
- 1 fissure ramifiée.

Afin de disposer d'un plus grand nombre d'échantillons, des éprouvettes supplémentaires ont dû être réalisées. Ainsi sont venus s'ajouter à la liste précédente:

- 7 nids de soufflures,
- 7 fissures ramifiées,
- 2 blocs percés de plusieurs trous de diamètres différents contenus dans un certain périmètre; ils seront utilisés afin de simuler des nids de soufflures.

Les pièces utilisées pour notre étude sont regroupées dans le tableau IV-1.

Nature des défauts	Eprouvettes déjà existantes		Eprouvettes réalisées pour notre étude	
	Réf. pièce	N° défaut	Réf. pièce	N° défaut
Fissures longitudinales	A2	1, 2		
	B7	23		
Manques de fusion	A6	8, 9, 10		
	B12.1	32, 33, 34		
	C10	87, 88, 89		
	C11	90, 92		
Manques de pénétration	B16	41, 42, 43		
	B17	44		
	B24	55, 56, 57		
Excès de pénétration	B29	65, 66		
Fissures ramifiées	D17	119	E3	7, 8
			F3	7, 8
			F4	10, 11, 12
Nids de soufflures	C3	74, 75, 76	E1	1, 2, 3
			F2	4, 5, 5b, 6
Nids de soufflures simulés			S1	
			S2	

Tableau IV-1:

Récapitulatif des pièces utilisées pour notre étude

En figure IV-1 est donné l'exemple d'une éprouvette contenant trois nids de soufflures implantés dans une soudure à chanfrein en V.

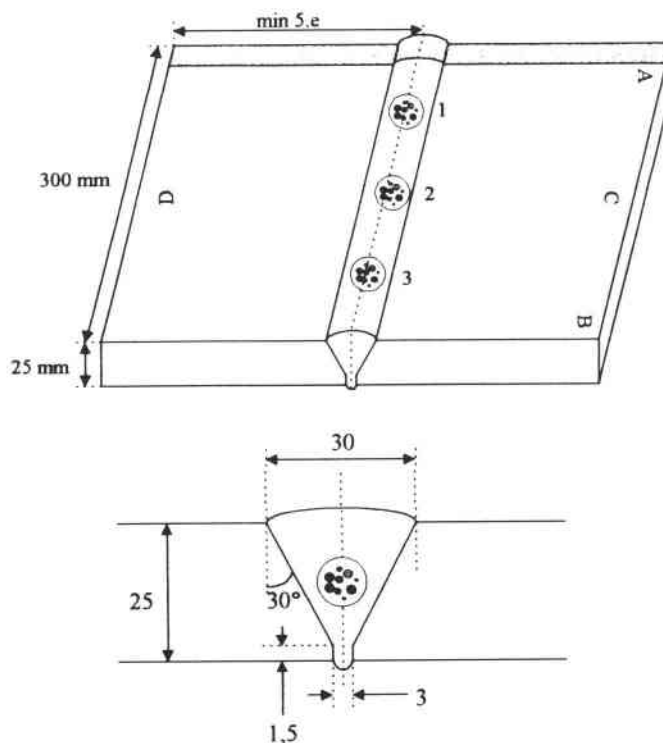


Figure IV-1:

Eprouvette E1 - Nids de soufflures.

Les éprouvettes réalisées spécifiquement pour l'étude ont aussi été soudées à l'électrode enrobée à l'Institut de Soudure. L'implantation des nids de soufflures a été réalisée en mouillant l'électrode utilisée. L'eau ainsi introduite lors du soudage a pour effet de faire apparaître des bulles lors des passes suivantes. Les fissures ramifiées, quant à elles, sont le résultat de l'implantation d'une tige de cuivre entre deux passes de soudage. Un mélange eutectique fer/cuivre se forme aux joints de grains. Celui-ci, fragile, se fissure pendant le refroidissement. La fissure ainsi créée a une forme ramifiée. Il est à noter que ce type de défaut n'est pas toujours visible lors d'un contrôle radiographique.

Un premier contrôle non destructif par radiographie a été effectué sur chaque éprouvette afin de vérifier l'implantation des défauts. Un contrôle manuel ultrasonore est venu compléter ce premier examen. Lorsque la présence des défauts attendus a été constatée, le contrôle automatique est réalisé. Dans le cas contraire, la pièce est reprise en soudage.

IV. 1. 2. Configuration du contrôle

Le contrôle des pièces soudées comportant les défauts étudiés est réalisé selon le document A de l'IS. US. 319.21 (méthode par réflexion), en ne considérant qu'une seule face d'accès, nous mettant ainsi dans les conditions de chantier les plus contraignantes.

Afin d'effectuer le contrôle, il est nécessaire de définir un niveau d'évaluation et un niveau d'examen. Les différents niveaux d'évaluation des indications réfléchissantes nous sont donnés par le document A (figure II-1). Dans celui-ci, nous suivrons la méthode d'évaluation de niveau 2 du contrôle de la qualité. Dans le cas de défauts non volumiques, nous ne chercherons pas à déterminer la hauteur des indications correspondant à ces défauts.

Le niveau de l'examen, défini normalement au préalable par les parties contractantes au contrôle, sera aussi de niveau 2: il s'agit du niveau d'examen le plus couramment utilisé qui offre une probabilité élevée de détection des défauts. Deux angles d'incidence différents sont utilisés pour l'émission du faisceau ultrasonore, et quatre balayages doivent être effectués (deux balayages de chaque côté du cordon de la soudure) (figure IV-2). Dans le cadre de ce travail, seuls les défauts longitudinaux sont étudiés.

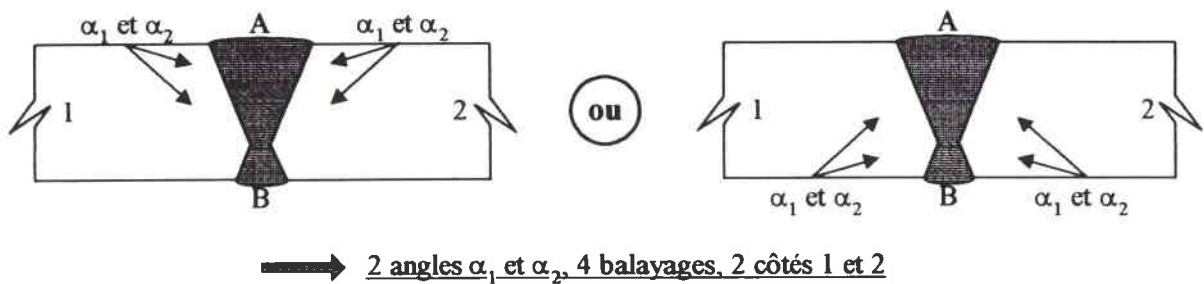


Figure IV-2:

Configuration du contrôle de soudures bout-à-bout avec un niveau d'examen de classe 2.

Afin d'optimiser la détection des indications et d'accroître la quantité d'informations utilisables, un balayage supplémentaire avec un troisième angle est réalisé de chaque côté. Ainsi, six contrôles sont effectués par zone étudiée: un contrôle à 45°, 60° et 70° (incidences de contrôle usuelles) de chaque côté de la soudure.

IV. 1. 3. Le système expérimental

• La chaîne d'acquisition

La figure IV-3 montre l'ensemble du système d'acquisition.

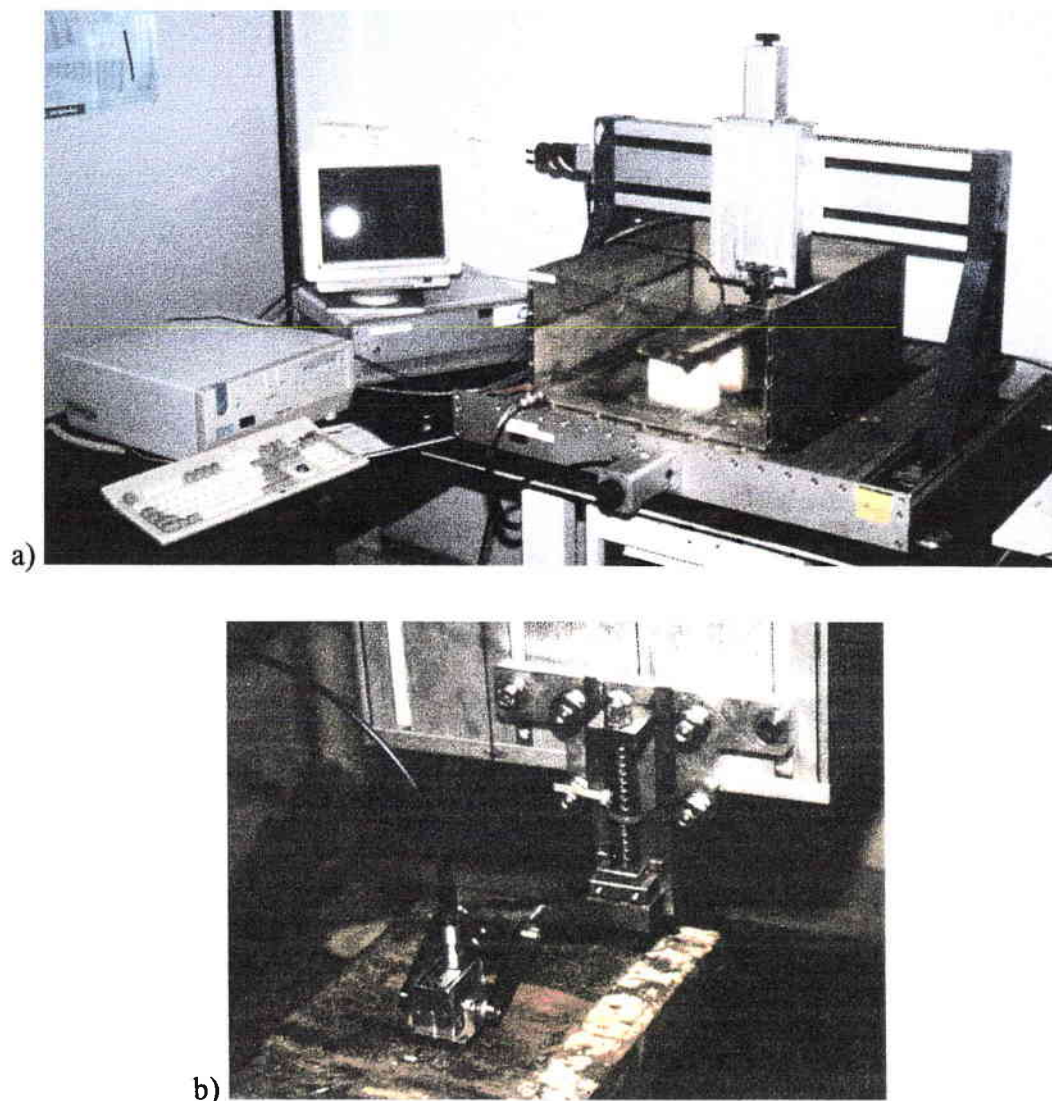


Figure IV-3:

Le système d'acquisition - a) le système, b) le porte-transducteur

Le but de cette étude est de trouver une méthode de classification des défauts de soudures qui doit être adaptable au contrôle automatique sur site, et non pas rester un outil de laboratoire. C'est pourquoi les conditions d'utilisation du système de contrôle automatique des échantillons sont choisies de manière à se rapprocher au maximum des conditions de chantier.

La figure IV-4 donne l'architecture de la chaîne de mesure. Le système de contrôle automatique est composé de plusieurs éléments distincts que nous allons décrire.

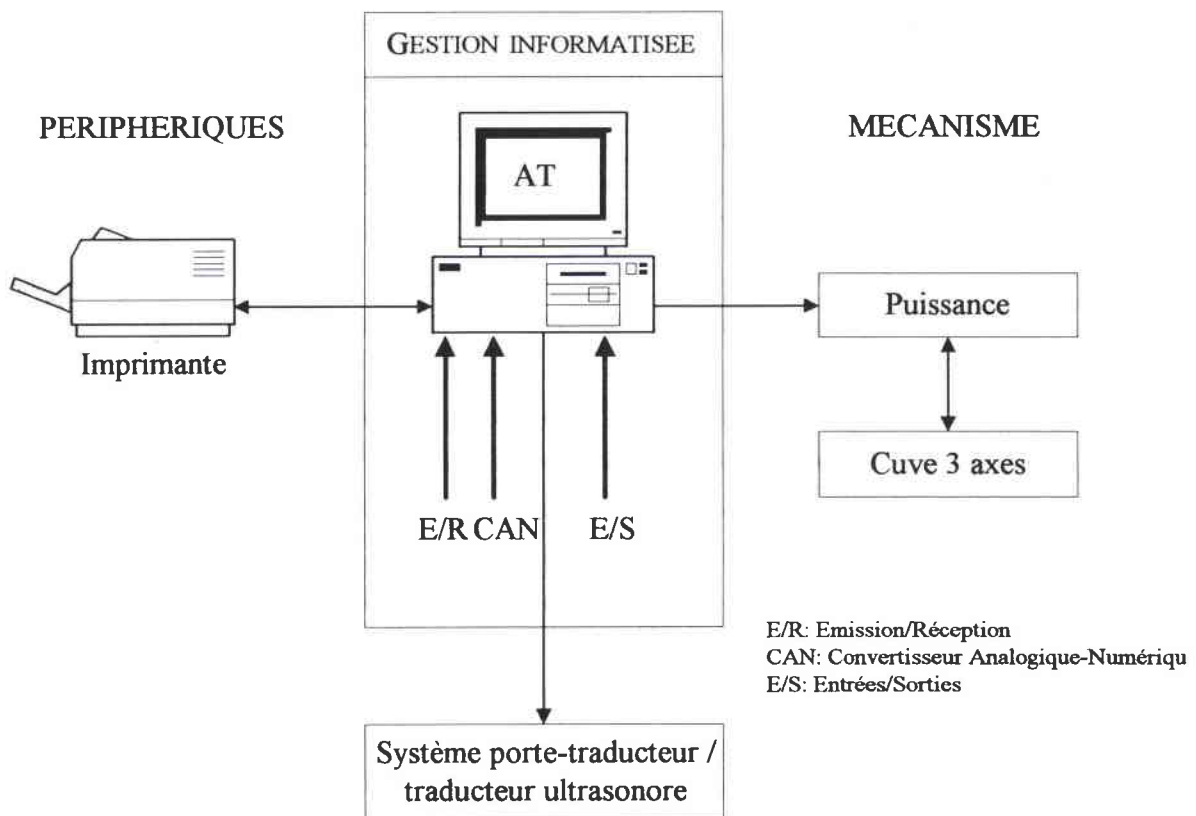


Figure IV-4:
Architecture de la chaîne de mesure

- *La cuve à immersion:* l'éprouvette examinée y est déposée; la cuve est ensuite remplie d'eau, qui assure la fonction de couplant entre le traducteur et l'éprouvette (figure IV-3).

- *Les traducteurs ultrasonores:* afin d'être fidèles aux conditions de chantier, nous avons utilisé des traducteurs de type MWB à ondes transversales, de fréquence 4 MHz (Krautkrämer).

- *Le système robotisé trois axes:* il est commandé par ordinateur via une carte d'indexage (E/S) et assure le déplacement du traducteur sur la tôle, comme le montre la figure IV-5, afin de sonder la soudure en totalité. Ainsi, le traducteur se déplace selon un axe

de balayage Y avec un déplacement incrémenté selon l'axe X. La valeur de l'incrément sur X a été choisie égale à 1 mm: cette valeur correspond au plus petit incrément généralement utilisé sur site. Le pas d'acquisition sur l'axe Y, quant à lui, a été choisi égal à 0,5 mm: ceci permet d'obtenir une résolution importante dans le sens transversal du défaut afin de pouvoir effectuer convenablement par la suite les traitements nécessaires, tout en faisant un compromis entre cette résolution et la taille du fichier à traiter. La longueur du déplacement est adaptée en fonction de l'angle du traducteur et de l'épaisseur de la tôle.

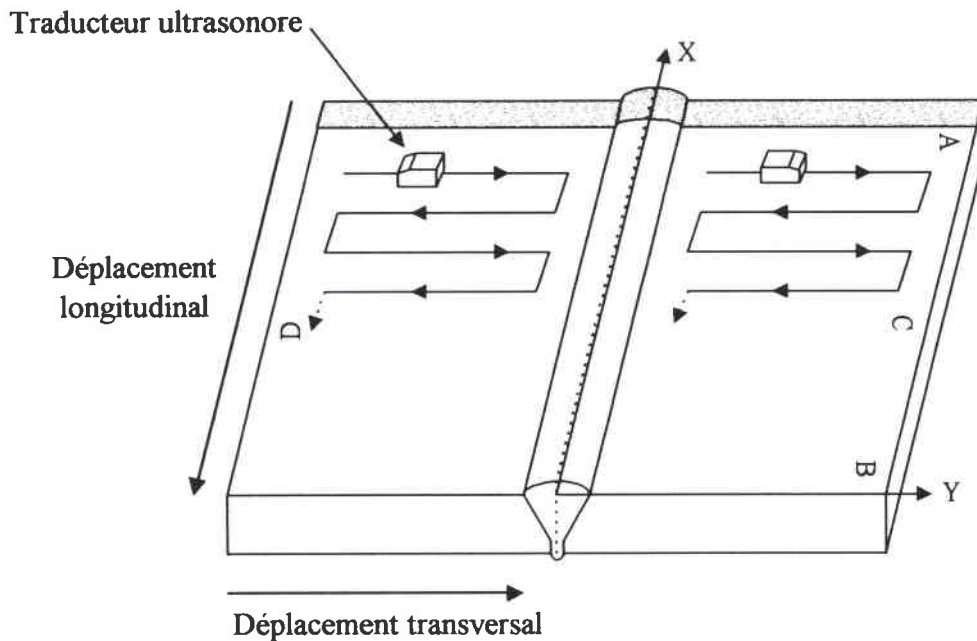


Figure IV-5:
Déplacement du traducteur sur l'échantillon

- *Le système porte-traducteur*: un système mécanique tient le traducteur en place sur le dessus de la pièce (figure IV-3).

- *Une carte ultrasonore* IPR 90 (Euro Physical Acoustics) (E/R) qui génère les ultrasons, et *une carte de numérisation* STR 8100 (Sonix) (CAN). Cette dernière dispose d'une bande passante de 50 MHz et d'une fréquence de numérisation maximale de 100 MHz. Lors de la configuration de l'acquisition, la fréquence de numérisation est déterminée en fonction de la base de temps choisie pour pouvoir capturer la totalité de l'écho étudié. Dans notre cas, cette fréquence était généralement égale à 6,25 MHz. En théorie, d'après le

théorème de Shannon, la fréquence de numérisation à utiliser aurait dû être d'au moins 8 MHz. Mais expérimentalement, le dispositif de contrôle utilisé ne permet pas de travailler avec cette fréquence. Il aurait fallu que les fenêtres de numérisation soient plus longues, ce que le logiciel d'acquisition imposé ne nous donne pas. Notre choix a donc été limité par les possibilités offertes par le système. Le nombre de points d'acquisition étant inférieur à ce que l'on aurait obtenu en prenant une fréquence de 8 MHz, il peut se produire une légère erreur dans l'appréciation de l'amplitude de l'écho étudié. Cette erreur est acceptable dans le cas de notre travail. Toujours lors de la configuration, il a été nécessaire de choisir le gain satisfaisant pour le contrôle. Ceci demande la connaissance de deux informations. La première information concerne le gain théorique (sans atténuation) à utiliser lors des mesures. La seconde information correspond à l'évaluation de l'atténuation de la pièce contrôlée.

Nous avons vu que les mesures des amplitudes des signaux se font par rapport aux Courbes Amplitude-Distance (C.A.D.) effectuées sur le bloc de référence. La détermination de ces C.A.D., expliquée en annexe 3, permet de définir les gains à utiliser lors du contrôle pour comparer facilement un écho avec la C.A.D. correspondante. Cette comparaison est faite en fonction du parcours sonore jusqu'à l'indication réfléchissante de défaut (c'est-à-dire sa localisation dans l'épaisseur) et du mode d'accès du faisceau ultrasonore (au bond ou au demi-bond). Ainsi, la valeur du gain de contrôle est d'abord choisie de telle sorte que la valeur de l'amplitude lue sur l'écran de visualisation du signal corresponde directement à x % de la C.A.D., 100 % de la C.A.D. se trouvant au milieu de l'écran (figure IV-6).

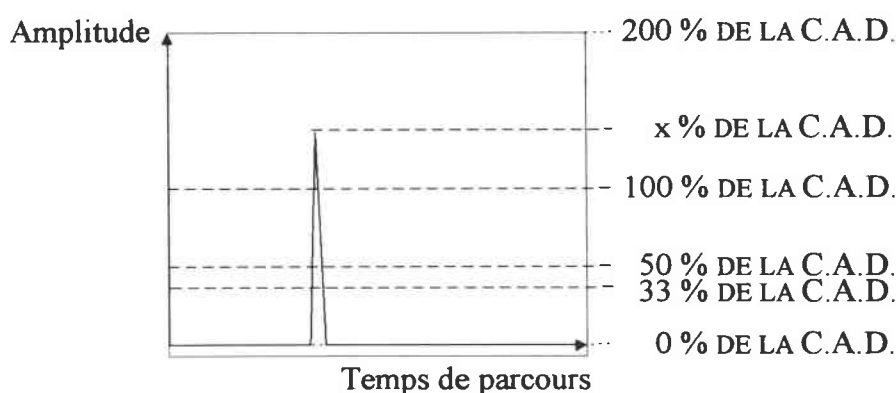


Figure IV-6:

Configuration de l'affichage des signaux ultrasonores

Cette valeur de gain doit ensuite être modifiée en fonction de l'atténuation mesurée sur la pièce à contrôler par rapport au bloc de référence utilisée pour les C.A.D.. Pour cela on compare un écho de fond obtenu par transmission sur le bloc de référence avec un écho obtenu, par la même méthode et correspondant au même parcours sonore, sur la pièce contrôlée à travers une zone de métal fondu: on fixe l'écho obtenu sur le bloc de référence à 80 % de la hauteur de l'écran de visualisation en faisant varier la valeur du gain. Sans changer le réglage, on passe alors sur la pièce à contrôler, et on ajuste le gain pour que le nouvel écho obtenu atteigne à son tour 80 % de la hauteur de l'écran. La différence entre les deux gains utilisés correspond à l'atténuation mesurée dans la pièce à contrôler par rapport au bloc de référence. Si sa valeur absolue est supérieure à 2 dB, la valeur de l'atténuation doit être ajoutée au gain déterminé précédemment pour la configuration du contrôle.

- *le logiciel d'acquisition*: il s'agit du logiciel "POLYSCAN", développé par l'Institut de Soudure il y a quelques années, qui est un outil de chantier. Ce logiciel permet de configurer les paramètres de contrôle et de procéder aux acquisitions. Il s'agit d'un système d'imagerie ultrasonore développé par le laboratoire de contrôles non destructifs dans le but de répondre aux besoins suscités au fil de ses études. Basé sur un micro-ordinateur de type compatible AT, c'est un système intégré qui répond aux exigences formulées par ses utilisateurs:

- *capacité d'acquisition*: le logiciel permet la saisie des amplitudes crêtes, des temps de vol correspondants et du signal ultrasonore sur 512 points maximum, ceci jusqu'à 32 Mo de données,

- *suivi de l'acquisition*: pendant la phase d'acquisition, l'opérateur visualise le signal et la constitution de la cartographie C-scan en temps réel,

- *post-traitement*: le logiciel de base assure le traitement des acquisitions par le biais de fonctions classiques telles que les visualisations de types C-scan et B-scan, coupes, etc.

Toutes les conditions opératoires nécessaires au contrôle sont sauvegardées dans le fichier avec les données d'acquisition. En exemple, la figure IV-7 présente les conditions opératoires utilisées pour le contrôle d'une soudure bout-à-bout en acier carbone de 25 mm d'épaisseur.

```

VERSION POLYSCAN : V2.00

FICHIER D'ACQUISITION : b1645d43          DATE: 28/11/96

1.CONDITIONS OPERATOIRES          FICHIER: b1645d
AFFAIRE:ME 651                    OPERATEUR:nathalie kopp
REFERENCE PIECE:b16                REFERENCE ZONE:
MATIERE:acier carbone              ACCES:d
PREPARATION:soudure bout-à-bout    EPAISSEUR: 25.39 mm
COMMENTAIRES:

MODE TRAVAIL:contact              TYPE D'ONDES:OT
COUPLAGE:eau                      ANGLE REFRACTION: 45°
COLONNE D'EAU: 0                  VITESSE US:3255 m/s
TRADUCTEUR:mwb45                  FREQ:4 MHz          DIAMETRE:
DIST FOCAL (eau):                 Z1:                 Z2:

2. REGLAGE DES MOTEURS
FICHIER : PCIDX                   | AXE X | AXE Y | AXE Z |
-----|-----|-----|-----|
NB PAS PAR mm                    | 80   | 80   | 80   |
COURSE MAXI (mm)                  | 600  | 600  | 200  |
VITESSE DEMARRAGE (mm/s)         | 10   | 10   | 0    |
VITESSE NOMINALE (mm/s)         | 40   | 40   | 0    |
ACCELERATION (mm/s/it)          | 10   | 10   | 10   |

3. CYCLE ET ACQUISITION
CYCLE : b16450v                   | AXE X | AXE Y | AXE Z |
-----|-----|-----|-----|
DECALAGE ORIGINE (mm)            | 0     | 0     | 0     |
AXE DE BALAYAGE                   | 0     | 1     |       |
AXE INCREMENTAL                   | 1     | 0     |       |
COURSE DE DEPLACEMENT (mm)       | 90    | 60    |       |
PAS D'ACQUISITION (mm/100)       | 100   | 100   |       |

AMPLITUDE CARTE SFT4001C.:0      AMP ET TEMPS FEN 1 POLYSCOPE :1
TEMPS CARTE SFT4001C.....:0     AMP ET TEMPS FEN 2 POLYSCOPE :0
AMPLITUDE PCAD .....:0          TOFT POLYSCOPE .....:1

FICHIER PALETTE :PALETTE
%. : 0   5   10  20  35  50  70  85  100
RVB :|000000|000063|006300|006363|630000|630063|636300|636363|

4. REGLAGE EURO PHYSICAL ACOUSTICS          ULTRAPAC II
RECURRENCE : 1000 HZ  SYNCHRO : External + MODE : E/R
AMPLITUDE   : 400 V   GAIN   : 31 dB    ATTENUATION : 0 dB
FILTRE      : Large bande          AMORTISSEMENT : 3920 Û

5. REGLAGE NUMERISEUR STR8100              F: 6.25 MHz
RET:8          GAIN:2000  OFF:2286  FIL:V1          SYNC:SOF NOR +
ORG F1:332    LG F1:126  SYNC F1:1          SEUIL F1:28
ORG F2:417    LG F2:103  SYNC F2:0          SEUIL F2:169
ORG FS:0      LG FS:207  SYNC FS:1          SEUIL FS:19
    
```

Figure IV-7:

Exemple de conditions opératoires - POLYSCAN

Remarque: lors de contrôles automatiques sur site, les éléments inspectés ne sont bien évidemment pas placés dans une cuve, mais le mode de couplage est identique puisqu'il s'agira toujours d'une lame d'eau, et la mécanique supportant les transducteurs sera identique ou de conception voisine à celle que nous avons utilisée.

IV. 1. 4. Visualisation des résultats - Imagerie ultrasonore

Comme nous l'avons vu précédemment, le transducteur ultrasonore est déplacé sur la pièce selon un balayage Y perpendiculaire à l'axe de la soudure, et un déplacement X parallèle à l'axe de la soudure. Pour chaque position du transducteur correspondant à la position de coordonnées (x_i, y_j) sont enregistrés l'amplitude maximale de l'écho compris dans une fenêtre de mesure, le temps de parcours correspondant à cette amplitude maximale, et le signal ultrasonore, ou A-scan, reçu (sur 509 points dans notre cas). Une cartographie de type C-scan en amplitude est alors réalisée. Elle représente une vue de dessus du pouvoir réfléchissant des indications détectées sur la zone contrôlée.

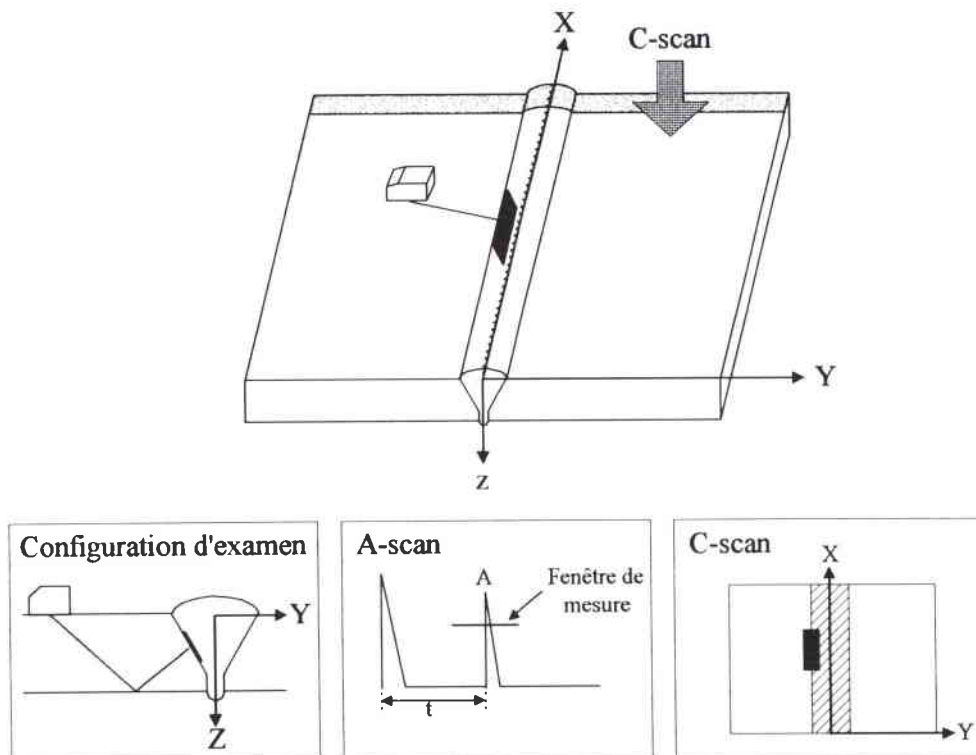


Figure IV-8:
Principe du C-scan

Le principe de la visualisation de type C-scan est donné en figure IV-8. On place une fenêtre de mesure sur le signal A-scan. La position de cette fenêtre est déterminée par la zone de la soudure (en profondeur) qui doit être examinée, et dans laquelle des défauts sont recherchés. Ainsi, si par exemple on désire contrôler le volume de la soudure au demi-bond, on placera la fenêtre entre le temps de parcours (ou la position) correspondant à l'écho d'émission et au parcours correspondant au fond de la pièce. Si par contre on recherche des défauts en racine, la fenêtre sera placée sur l'intervalle de temps durant lequel on pourrait avoir un écho de fond. Lorsqu'un écho apparaît dans cette fenêtre, les valeurs de son amplitude maximale et du temps de parcours correspondant sont sauvegardées. Pour créer la cartographie C-scan, on affiche alors, pour chaque position du traducteur et donc pour chaque A-scan, un point de couleur correspondant à la valeur de l'amplitude maximale sauvegardée précédemment (un exemple de C-scan est visible figure IV-10).

L'amplitude du pouvoir réfléchissant est codée de 0% à 200% par rapport à la C.A.D..

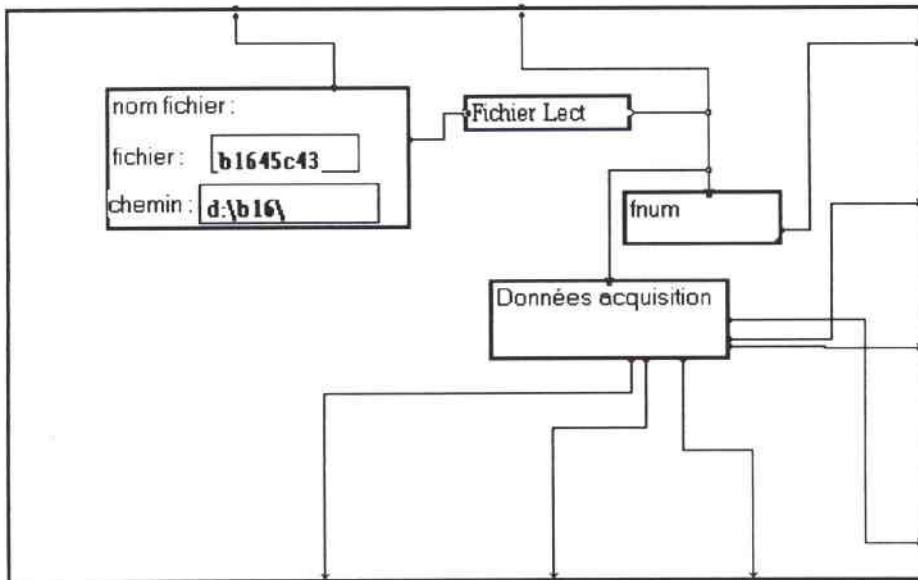
De la même manière, on peut construire un C-scan où chaque point de couleur code un temps de parcours.

IV. 1. 5. Post-traitement sous environnement MUSTIG

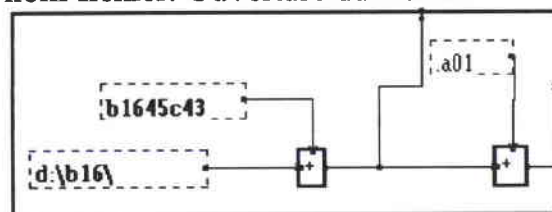
MUSTIG (Multidimensional Signal Treatment Interactive Graphical), développé par le C.N.R.S. et l'Institut National Polytechnique de Grenoble sur un brevet C.N.R.S., est un outil de développement graphique, interactif et multidimensionnel pour le traitement du signal. Un programme en Mustig se présente sous la forme d'un graphe de dépendance construit à l'aide d'un éditeur graphique simple et puissant: ce graphe peut être calculé à n'importe quel moment, en totalité ou partiellement, ce qui permet de tester rapidement un nouvel algorithme. Il s'agit donc d'une succession de "macros" s'imbriquant les unes dans les autres sans limitation. Les résultats sont mis en page sous forme d'images. Si le graphe est modifié, les résultats en aval de la modification sont effacés et seule la partie modifiée est recalculée. De plus, il est possible d'interfacer Mustig avec des programmes externes en langage C.

La figure IV-9 montre un exemple de graphe MUSTIG.

Ouverture d'un fichier, lecture et exploitation de certaines données



nom fichier: Ouverture du fichier



fnum: calcul de la fréquence de numérisisation

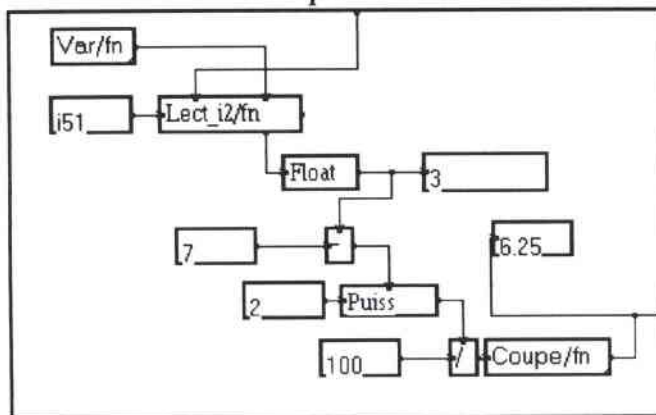


Figure IV-9:

Exemple de graphe MUSTIG: ouverture d'un fichier de données d'acquisition

Mustig a été choisi pour mettre en place rapidement, puis valider des algorithmes de traitement de signaux ultrasonores utiles à l'étude des acquisitions réalisées avec le système sous environnement POLYSCAN.

Ainsi, tous les fichiers de données ultrasonores ont été transférés de la station d'acquisition vers une station de travail afin d'y être dépouillés. Après ouverture et lecture des fichiers d'acquisition, les cartographies de type C-scan ont été recrées sous le nouvel environnement pour servir de base à l'étude. A partir de là, la sélection des signaux intéressants a été réalisée manuellement par utilisation d'un curseur positionné sur la cartographie, et une fenêtre "zoom" a permis d'isoler l'écho du réflecteur étudié, un déplacement du curseur entraînant le changement instantané d'écho.

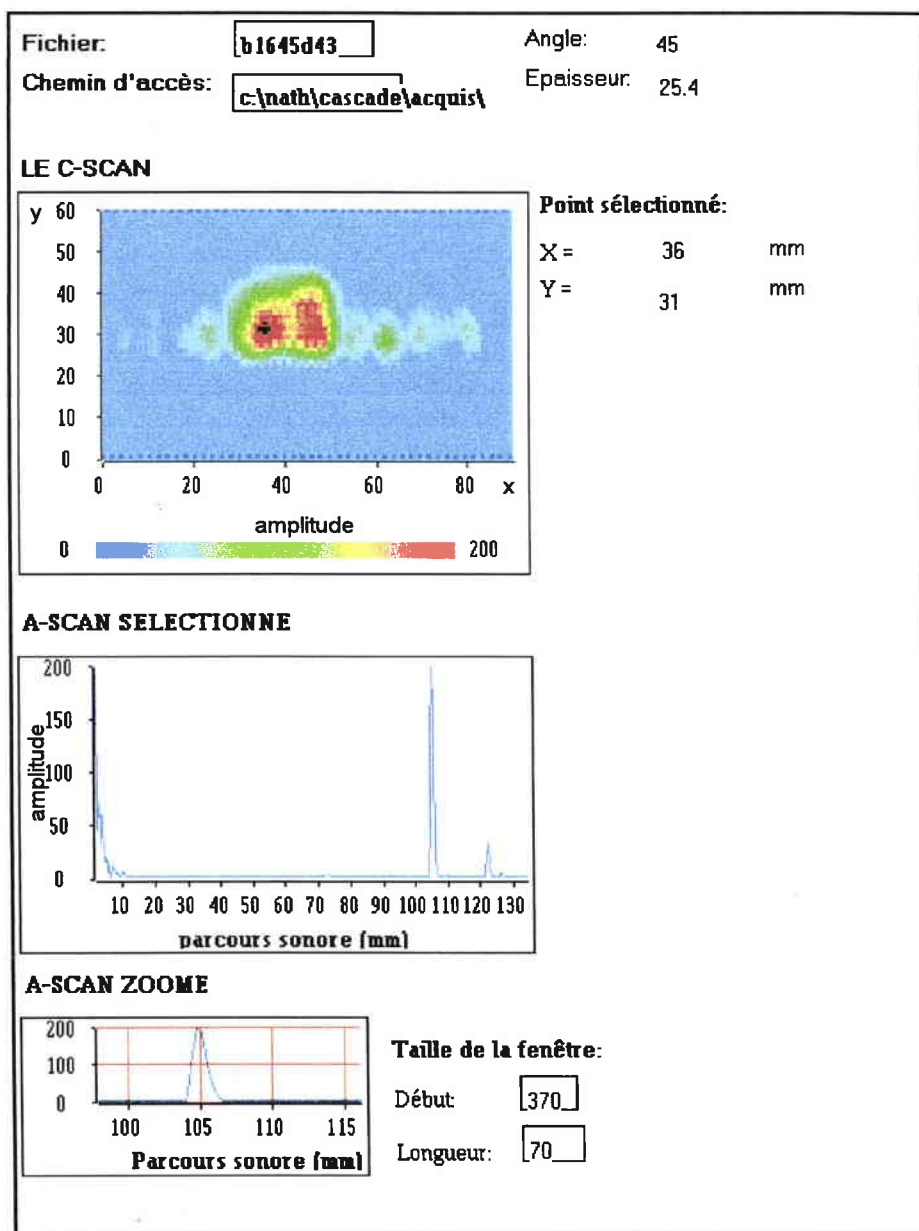


Figure IV-10:

Image de contrôle pour la sélection du signal ultrasonore voulu

La figure IV-10 est une représentation de base permettant de sélectionner les échos à étudier. Nous avons entièrement réalisé cette image à l'aide de MUSTIG.

IV. 2. Classification selon les quatre premières étapes de la procédure Cascade [42]

IV. 2. 1. Exemple de classification d'une fissure longitudinale en finition - Etape 2

Nous avons cherché à classer une fissure longitudinale (défaut non volumique) localisée au niveau de la finition de la soudure de la pièce A2. La figure IV-11 montre les informations obtenues sur le défaut en étudiant les résultats d'un contrôle radiographique et d'un contrôle ultrasonore manuel.

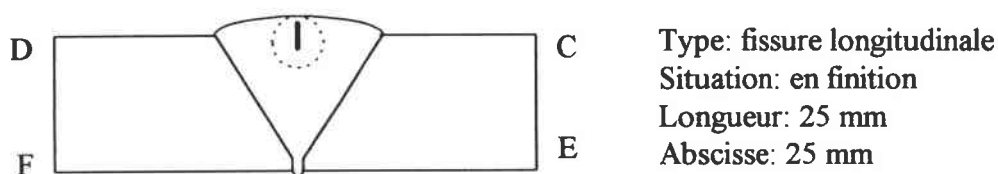


Figure IV-11:
Eprouvette A2 - Défaut 1

En figure IV-12 sont donnés les C-scans obtenus sur la pièce pour chaque incidence et chaque accès, à savoir:

- à 45°, accès C;
- à 45°, accès D;
- à 60°, accès C;
- à 60°, accès D.

De par les dimensions de l'éprouvette, les contrôles à 70° n'ont pas été réalisés (manque de recul).

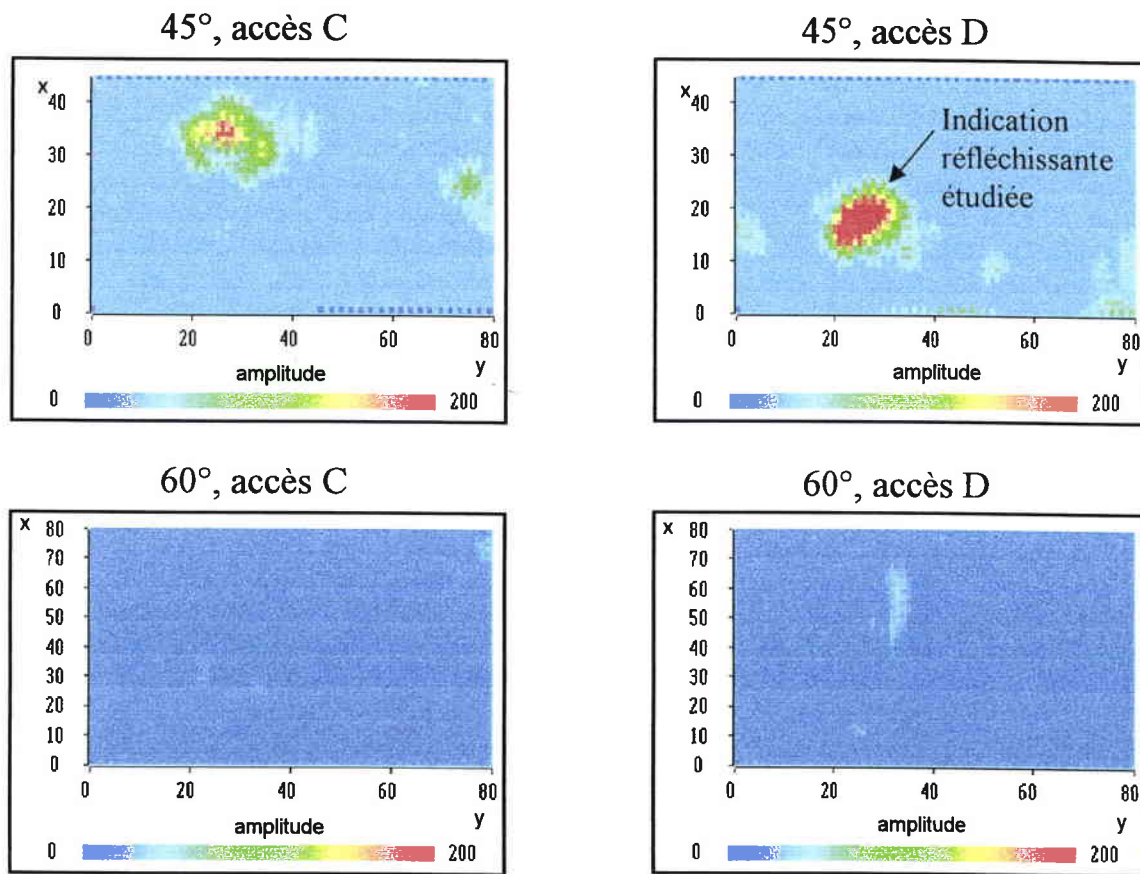


Figure IV-12:

C-scans - Eprouvette A2 - Défaut 1

Ici, les C-scans permettent de conclure rapidement sur la nature volumique ou non du défaut détecté. En effet pour une incidence de 45° , que ce soit du côté C ou du côté D de la soudure, une indication réfléchit le faisceau ultrasonore à plus de 200 % de la C.A.D. (figure IV-13).

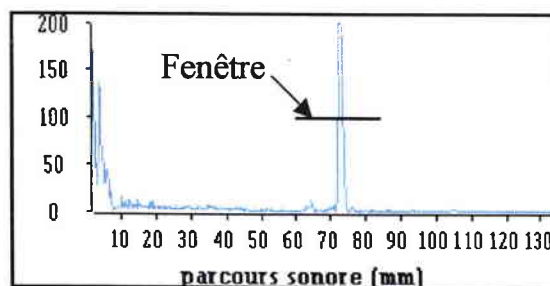


Figure IV-13:

A-scan correspondant à la position ($x=24, y=16$) du C-scan enregistré à 45° accès D

Le parcours sonore de l'écho de cette indication et la distance entre le traducteur et le cordon de soudure, donnée par la cartographie, permettent de localiser cette indication vers le milieu de la finition de la soudure.

D'après la procédure Cascade, on peut conclure dès la seconde l'étape que l'indication réfléchissante correspond à un défaut non volumique.

IV. 2. 2. Cas d'un défaut en racine: exemple de classification d'un manque de pénétration - Etape 2

La figure IV-14 montre le défaut étudié: il s'agit d'un manque de pénétration (défaut non volumique) en racine.

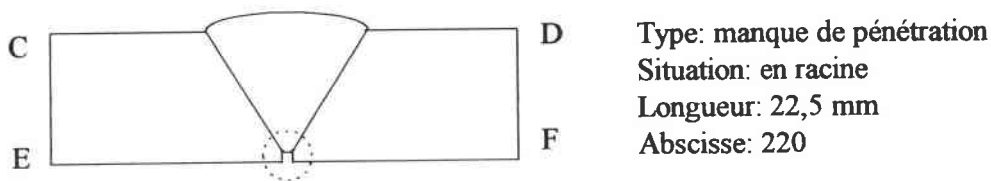


Figure IV-14:

Eprouvette B16 - Défaut 43

La difficulté de classification de ce type de défaut est due à sa localisation. En effet, avant même de chercher à savoir si l'indication réfléchissante correspond à un défaut volumique ou non volumique, il est nécessaire d'établir la preuve que l'on n'est pas en train d'analyser un écho dû à la racine de la soudure. Dans la recommandation IS. US. 319.21, il est dit que dans un tel cas, il faut faire appel à une méthode discriminante. Certaines méthodes sont énumérées dans le document, mais il est possible d'utiliser d'autres techniques. Ainsi, dans le cas d'un contrôle réalisé avec un système automatique, on peut faire l'**étude des temps dynamiques** afin de distinguer les échos de défaut des échos dus à la géométrie de la pièce. Cette méthode ne pouvant pas être adaptée au contrôle manuel, elle n'apparaît pas dans la liste fournie par le document B de la recommandation IS. US. 319.21. Elle a été mise au point par D. Chauveau fin des années 1980 [35]. Son avantage est qu'elle utilise les signaux déjà acquis, et évite un contrôle supplémentaire.

• Le critère du temps dynamique: définition

D'une manière générale, on appelle **courbe temps dynamique** la courbe $t(d)$ pour laquelle t est le temps de parcours correspondant au pic d'amplitude maximale de l'écho de défaut et d le déplacement du traducteur selon un axe. Cette courbe fait apparaître l'évolution du temps de parcours d'un écho en fonction du déplacement du traducteur. Dans le cas de la discrimination écho de géométrie / écho de défaut, le déplacement du traducteur est parallèle à la soudure (**déplacement longitudinal**) afin d'examiner l'évolution d'un écho détecté en racine sur la longueur de celle-ci. Comme le montre la figure IV-15, on peut observer les phénomènes suivants:

- apparition d'une "cuvette": il s'agit d'une zone où le temps de parcours a diminué: le faisceau ultrasonore s'est réfléchi sur un obstacle avant d'atteindre la racine; cette diminution peut être due, par exemple, à un manque de matière localisé (manque de pénétration), ou à la présence d'une fissure ou d'un manque de fusion;

- apparition d'un "chapeau": il s'agit d'une zone où le temps de parcours a augmenté; cette augmentation peut être due à la présence d'un excès de matière (excès de pénétration).

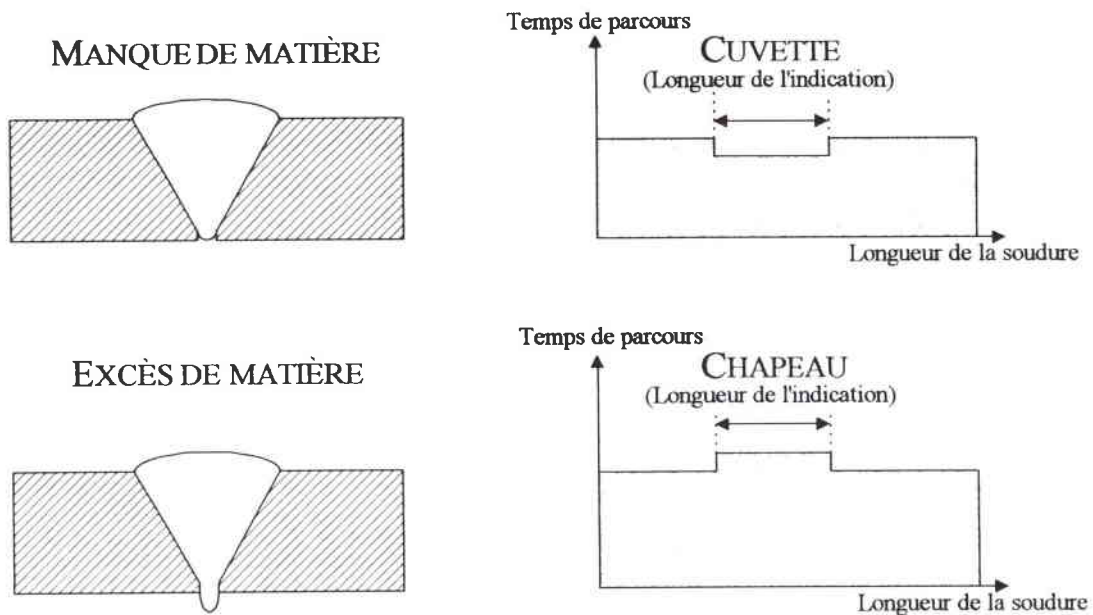


Figure IV-15:

Etude de la courbe échodynamique longitudinale en fonction de la géométrie du cordon de soudure en racine

• **Le critère du temps dynamique: application à la discrimination écho de racine / écho de défaut**

Nous présentons l'application de cette méthode au défaut 43 de l'éprouvette B16.

Un contrôle de la zone de la pièce comprenant le manque de pénétration a été réalisé pour chaque angle d'incidence. D'après les différentes cartographies obtenues, on remarque une indication fortement réfléchissante lors de l'examen à 45° de l'accès C. Les résultats obtenus sont donnés en figure IV-16.

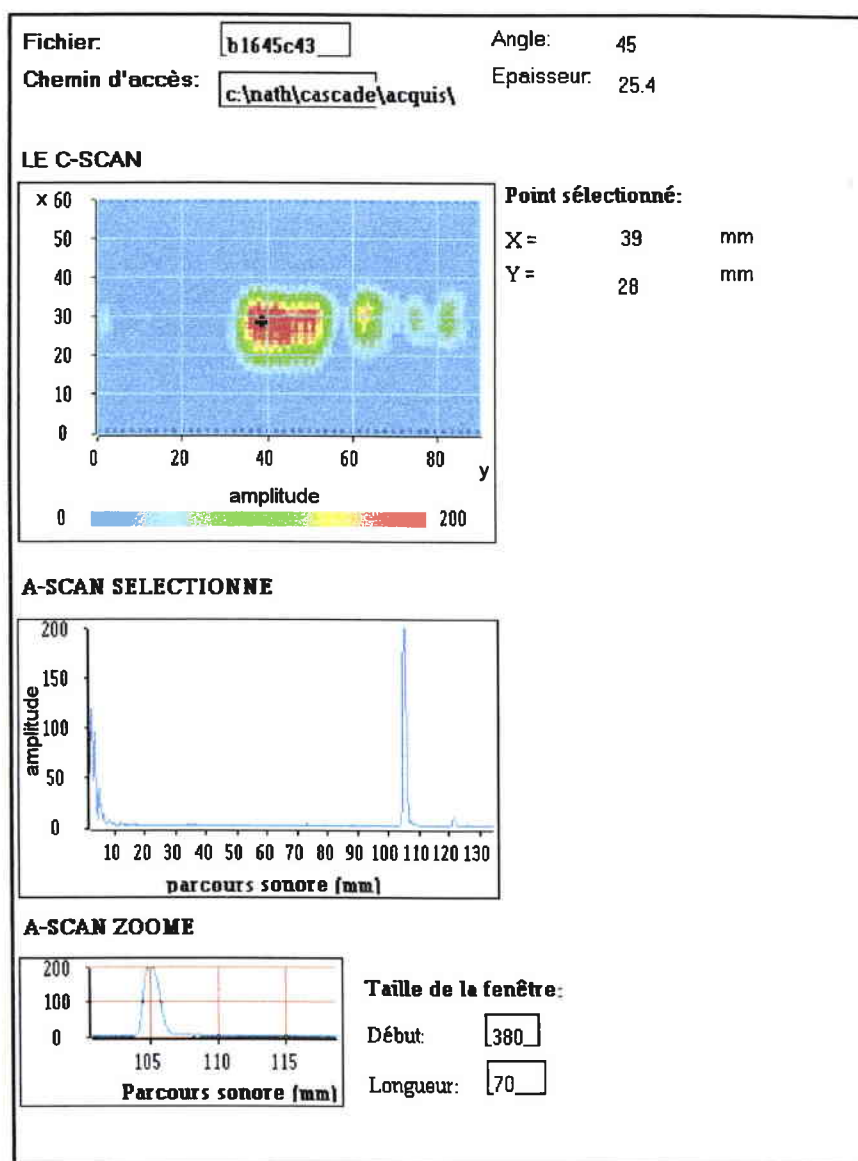


Figure IV-16:

*Image de contrôle pour la sélection du signal ultrasonore voulu
 Cas d'un manque de pénétration en racine - Pièce B16, défaut 43- 45°, accès C*

Sur la cartographie C-scan, on observe plusieurs zones de forte amplitude. Il va s'agir de vérifier si toutes ces zones sont dues à la présence d'un défaut ou bien à la géométrie de la racine de la soudure. Une macro a donc été réalisée sous MUSTIG afin d'étudier, sous différentes représentations, la courbe temps dynamique obtenue à partir de la position du curseur sur la cartographie, ce dernier ayant été positionné auparavant à une position correspondant à l'amplitude de l'écho de l'indication maximale (plusieurs maxima sont possibles). Tous les temps de parcours correspondant aux maxima de l'écho de l'indication ont été représentés en fonction du déplacement du traducteur le long de la soudure. Les résultats obtenus sont donnés en figure IV-17.

Sur la courbe échodynamique (paragraphe I. 2.) en figure IV-17-a, nous remarquons qu'un écho est reçu par le traducteur sur tout le déplacement le long de la soudure. L'amplitude représentée sur la courbe échodynamique est variable. Dans tous les cas, il est évident que l'étude de cette seule courbe est insuffisante pour pouvoir discerner le défaut présent en racine.

En étudiant la courbe temps dynamique (figure IV-17-b). Nous observons ce que précédemment nous avons appelé une cuvette sur un déplacement d'une trentaine de millimètres entre les positions 31 mm et 59 mm. D'après le critère du temps dynamique, celle-ci est due à la présence d'un défaut au niveau de la racine.

Les représentations données en figure IV-17-c et IV-17-d sont assez significatives. Il s'agit de la représentation des A-scans en fonction du déplacement du traducteur. Nous retrouvons en abscisse le déplacement du traducteur, et en ordonnée est représenté le parcours sonore. Nous avons placé les A-scans les uns à côté des autres verticalement au fur et à mesure du déplacement longitudinal du traducteur. Dans un cas, l'amplitude est en relief (figure IV-17-c), c'est-à-dire que les pics d'amplitude sont visibles sur un troisième axe, et dans l'autre, elle est codée en couleur (figure IV-17-d): chaque couleur correspond à une valeur de l'amplitude. On voit très nettement, sur ces deux représentations, la diminution du temps de parcours correspondant à l'écho de l'indication réfléchissante par rapport à celui de la racine.

Si nous superposons les courbes dynamiques, nous constatons que la cuvette correspond à une zone où l'amplitude du signal réfléchi est supérieure à 200 % de la C.A.D..

Nous pouvons donc conclure: nous sommes ici en présence d'un défaut non volumique localisé à la racine.

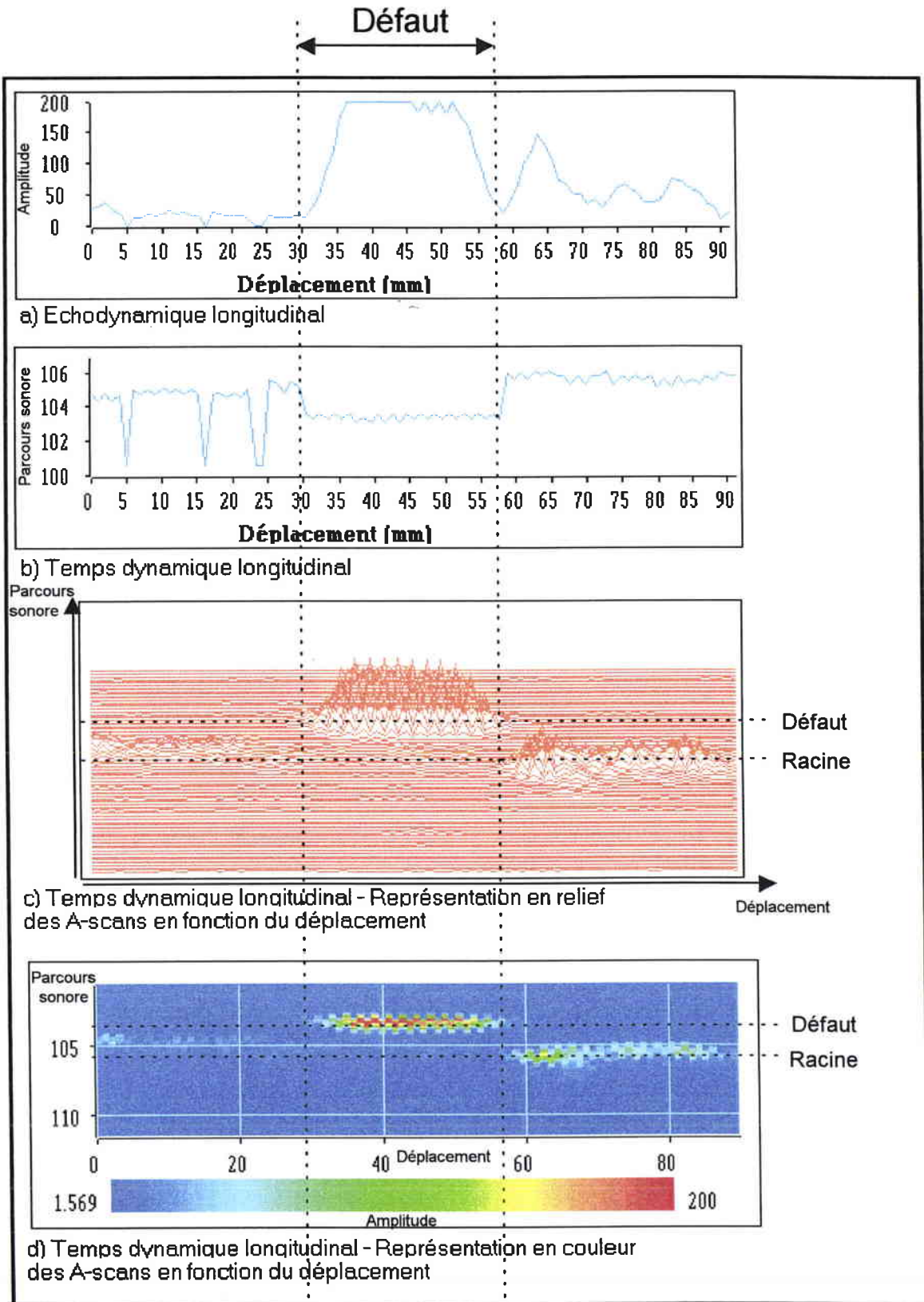


Figure IV-17:

Etude des temps dynamiques correspondant aux coordonnées (39, 28)
du C-scan obtenu sur la pièce B16 - défaut 43*

*Les représentations c et d peuvent être considérées comme des représentations de type B-scan, terme en cours de normalisation.

IV. 2. 3. Exemple de classification d'un excès de pénétration - Etape 3

Le défaut étudié ici est un excès de pénétration en racine (défaut non volumique). Sa description est donnée en figure IV-18.

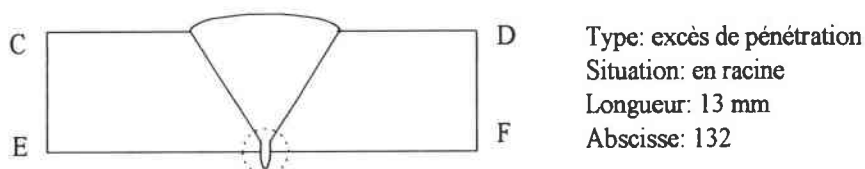


Figure IV-18:

Eprouvette B29 - Défaut 65

Le défaut se trouvant en racine, il est nécessaire de suivre la même procédure que dans le paragraphe précédent.

Nous retrouvons en figure IV-19 les courbes échodynamiques et temps dynamiques représentatives de ce défaut. Le pouvoir réfléchissant le plus important a été relevé pour le contrôle à 45° par l'accès C. D'après la courbe temps dynamique correspondante, nous pouvons déterminer la partie de l'échodynamique qui correspond à la zone affectée par le défaut (même méthode que dans le paragraphe précédent). Nous avons donc bien localisé un défaut au niveau de la racine. Maintenant, il s'agit de déterminer sa nature: est-ce un défaut volumique ou un défaut non volumique ?

D'après l'échodynamique obtenu à 45° par l'accès C, le maximum d'amplitude de l'écho de défaut n'atteint pas 200 % de la C.A.D.. Nous ne pouvons donc pas conclure directement à l'étape 2 de la procédure Cascade.

Par contre, l'amplitude maximale de l'écho est supérieure au seuil S_3 utilisé par l'étape 3 de la procédure, c'est-à-dire 50 % de la C.A.D.. De plus, après étude des résultats des différents contrôles, il s'avère que l'écho de défaut disparaît totalement pour un examen à 60° par l'accès D (figure IV-19). Ce résultat est observable sur les courbes échodynamique et temps dynamique: l'écho de défaut ayant disparu, aucune mesure d'amplitude et de temps de parcours sonore n'est possible dans la fenêtre de mesure. Ce cas répond aux conditions imposées par l'étape 3:

- l'amplitude de l'écho de l'indication atteint bien le seuil S_3 (paragraphe II. 3. 3.),
- il existe un déséquilibre d'au moins 9 dB entre deux incidences de contrôles séparées d'au moins 10°.

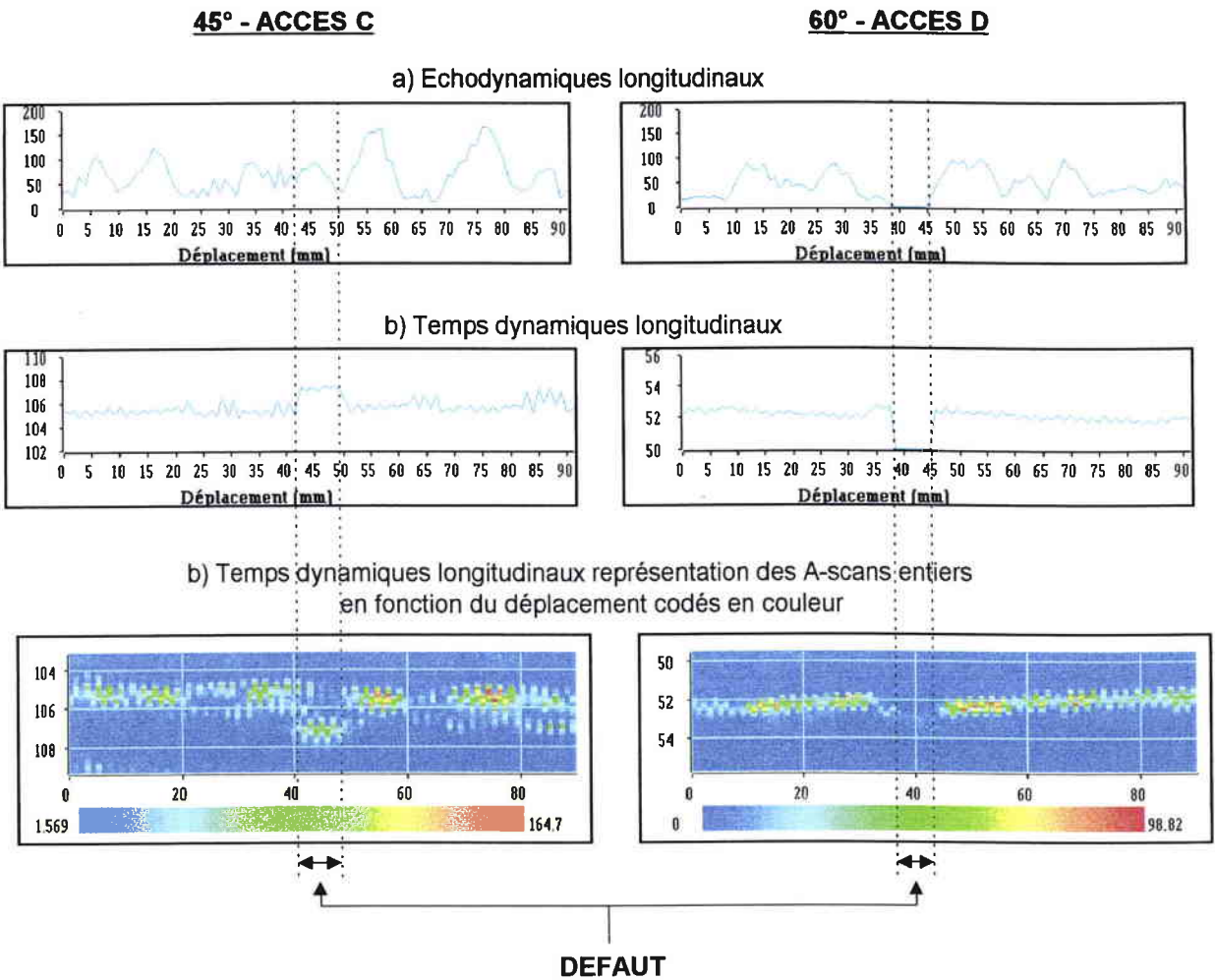


Figure IV-19:

Etude des échodynamiques et des temps dynamiques du défaut 65 de la pièce B29

Nous pouvons maintenant donc conclure: nous sommes ici en présence d'un défaut non volumique en racine.

IV. 2. 4. Etude de la notion de “rugosité” d’un écho - Etape 4

Si l'étude des amplitudes des échos détectés durant les trois premières étapes de la procédure Cascade, n'a pas permis la classification du défaut, nous devons alors étudier la forme de ces échos. D'après l'étape quatre, que nous allons présenter maintenant, si l'écho étudié est unique et propre, l'indication est classée directement en défaut volumique.

L'automatisation de cette étape nécessite la détermination d'un paramètre que nous appellerons la "rugosité" d'un écho. Nous allons en fait comparer le nombre de maxima détectés dans l'écho étudié avec celui d'un écho, représentatif d'un défaut volumique, obtenu sur une génératrice de trou. L'écho obtenu sur cette génératrice est unique et propre, et sert d'écho de référence pour cette étape de la procédure.

Nous avons ainsi réalisé, sous MUSTIG, une macro qui détecte les maxima présents dans un écho et détermine leur nombre. Le principe de cette macro est donné en figure IV-20.

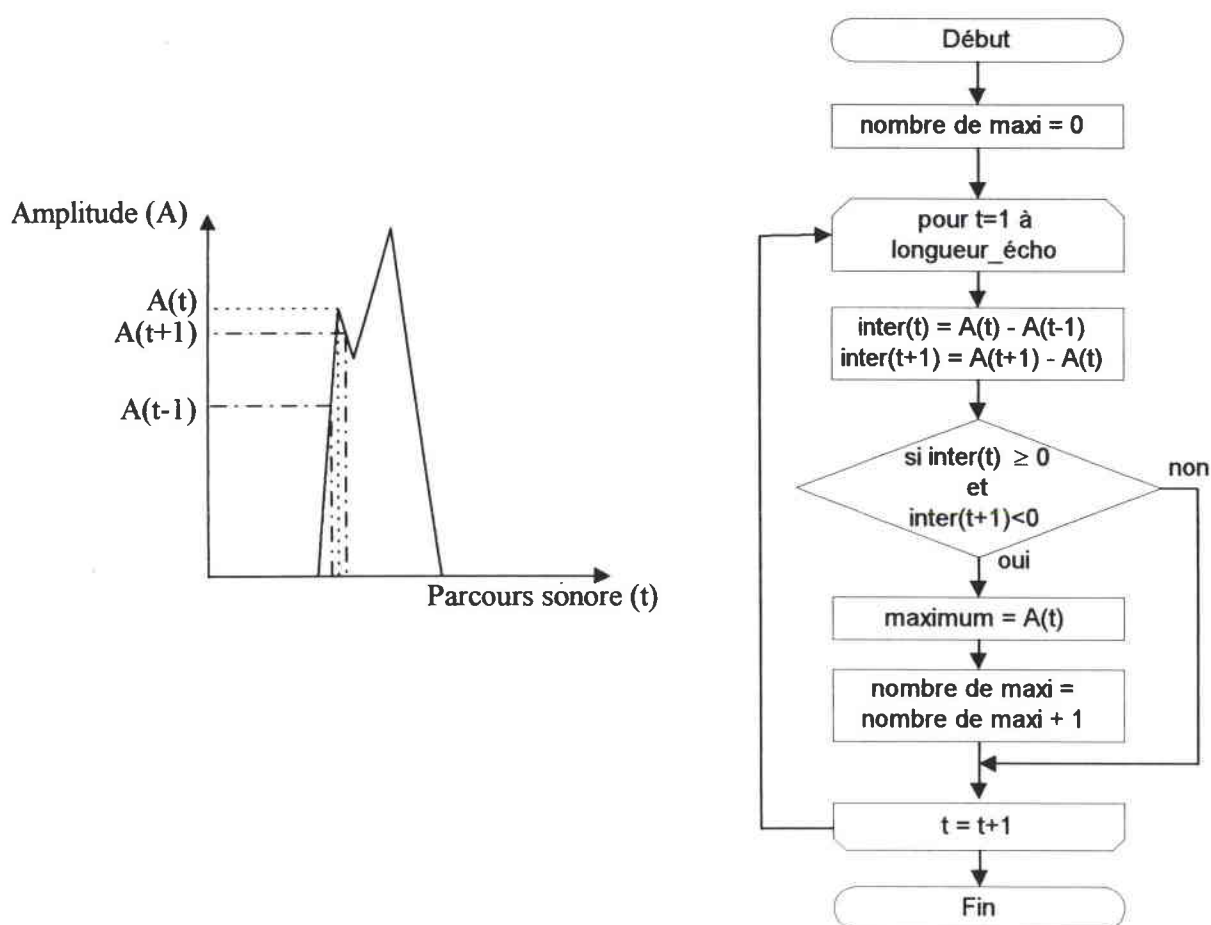


Figure IV-20:

Principe de la détection de maxima

Après avoir placé un seuil de 5 % à partir de zéro (en % de la C.A.D.) sur le signal afin de ne considérer que les échos intéressants et suffisamment importants, l'amplitude de chaque point $A(t)$ de l'écho étudié est comparée avec celle qui le précède ($A(t-1)$) et celle qui

lui succède ($A(t+1)$). Dans le cas où un point correspond à un maximum de l'écho, les deux conditions suivantes sont réunies:

- la différence des amplitudes $A(t) - A(t-1)$ est supérieure ou égale à zéro,
- la différence des amplitudes $A(t+1) - A(t)$ est inférieure à zéro.

Nous appliquons d'abord ce principe à un écho obtenu sur un trou de diamètre 3 mm situé à 10 mm de la surface d'un bloc de référence. Le signal reçu est présenté en figure IV-21. La figure IV-22 montre un agrandissement de l'écho correspondant au trou, sur lequel nous avons lancé la recherche des maxima. Ici, deux maxima sont détectés sur un écho conventionnellement dit unique et propre.

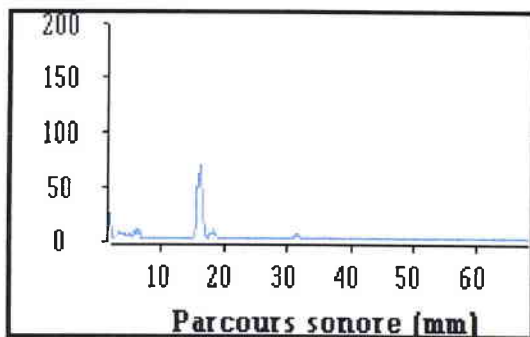


Figure IV-21:

*A-scan obtenu à 45° sur un trou
de diamètre 3 mm*

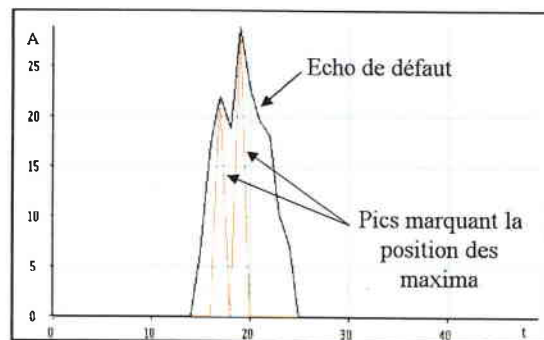


Figure IV-22:

*Maxima détectés sur l'écho
correspondant au trou*

Nous considérons ensuite le cas d'un écho détecté dans une des éprouvettes contrôlées. Il s'agit du défaut 7 de la pièce E3, qui correspond à une fissure ramifiée. D'après les acquisitions réalisées, il n'a pas été possible de classer le défaut plus tôt, lors des trois étapes précédentes. En figure IV-23 est donné le A-scan qui doit être analysé. Nous sommes ici en présence d'un écho de défaut multiple.

Sur la figure IV-24, nous pouvons voir que dix maxima ont été détectés par le programme (le dernier n'apparaît pas en rouge car il est superposé au dernier pic visible sur l'échogramme).

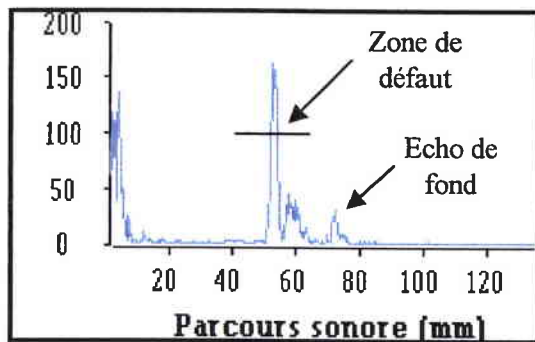


Figure IV-23:

A-scan obtenu sur le défaut 7 -Pièce E3

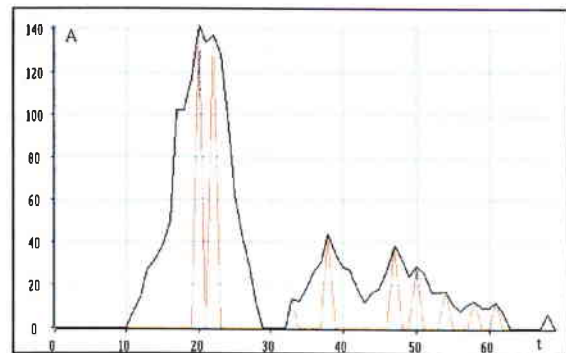


Figure IV-24:

Maxima détectés sur l'écho correspondant au défaut 7 -Pièce E3

	Trou de référence	Défaut 7 - Pièce E3
Nombre de maxima détectés dans l'écho	2	10

Tableau IV-2: Nombre de maxima détectés dans un écho

Les résultats de l'étude sont repris dans le tableau IV-2. Nous pouvons constater qu'il existe un rapport de cinq entre le nombre de maxima détectés dans le cas du trou de référence et celui du cas du nid de soufflures. Nous considérerons, en règle générale, que tout écho dont le nombre de maxima détectés sera plus important que dans le cas du trou de référence devra être considéré comme n'étant pas unique et propre. Une marge d'erreur de l'ordre de un maximum supplémentaire, pourra être prise en compte. Cela étant dit, lorsque l'écho étudié est multiple ou unique et déchiqueté, la différence du nombre de maxima est suffisamment importante pour qu'aucun doute n'existe.

Dans le cas étudié ici, nous pouvons conclure, sans difficulté, que l'écho n'est pas unique et propre. La classification de cette indication ne peut donc pas encore se faire à cette étape de la procédure Cascade. Il va falloir étudier la cinquième et dernière étape de la procédure pour pouvoir conclure.

Aucun des défauts analysés dans le cadre de cette étude n'a pu être classé directement lors de cette étape.

IV. 3. Conclusion

Les quatre premières étapes de la procédure Cascade permettent de classer une grande majorité des défauts rencontrés dans les soudures. Les étapes 1, 2 et 3 reposent sur une étude des amplitudes des échos détectés. De ce fait, une fois que les échos intéressants ont été sélectionnés, automatiser les différents tests ne pose aucune difficulté. En fait, pour les trois premières étapes, quelques représentations des données suffisent pour faire un diagnostic. Il n'en est pas de même pour l'étape 4, puisqu'il est nécessaire de prendre en compte la forme de l'écho, et non plus son amplitude. Pour cela, nous avons introduit une notion de rugosité de l'écho qui permet de comparer l'écho détecté avec un écho unique et propre de référence.

Toute la population de défauts (soit vingt-sept défauts) regroupant des fissures longitudinales, des manques de fusion, des manques de pénétration et des excès de pénétration, a pu être classée avec succès par application des premières étapes de la procédure Cascade. Il reste maintenant à mettre en place, à l'étape 5, une technique automatisable permettant de distinguer les deux derniers grands types de défauts que sont les nids de soufflures et les fissures ramifiées.

Chapitre V: Classification des nids de soufflures et des fissures ramifiées - Etape 5 de la procédure Cascade [43, 44, 45]

V. 1. Introduction

La dernière étape de la procédure Cascade doit permettre de faire la différence entre deux types de défauts: les nids de soufflures et les fissures ramifiées. Ceux-ci n'ont pas pu être classés par les premières étapes car leurs échos, multiples ou uniques et déchiquetés, présentent des amplitudes faibles dans toutes les directions.

Cette distinction est pourtant très importante. En effet, nous avons déjà montré que les défauts non volumiques pouvaient nuire à la bonne tenue d'un assemblage en service, alors que les défauts volumiques sont souvent acceptés (parfois sous conditions). Les fissures ramifiées, de par leur forme, représentent un risque réel qu'il est nécessaire d'éliminer.

Toutefois, en cas de doute, il est préférable de ne pas conclure, plutôt que de faire un mauvais diagnostic.

V. 2. Une première approche

Avant même de chercher à déterminer des paramètres automatisables permettant de distinguer une fissure ramifiée d'un nid de soufflures, nous n'avons pu que constater le manque d'éprouvettes comprenant ces types de défauts. Nous avons donc lancé la fabrication de nouvelles éprouvettes où ont été implantés des défauts réels lors du soudage. Cette démarche demandant des délais relativement importants (commande des tôles en acier carbone, réception des tôles brutes par un contrôleur expérimenté afin de vérifier l'absence d'inhomogénéités dans le métal, découpage, soudage, contrôles radiographique et ultrasonore manuel), nous avons décidé de tester différents matériaux dans lesquels nous pourrions simuler la présence de nids de soufflures plus facilement, afin d'étudier le comportement du faisceau ultrasonore sur ce type de défaut.

Nous avons travaillé les matériaux suivants:

- résine à inclusion,
- cire,
- mastic,
- colle.

La première étape de cette étude fut de tenter un contrôle dans une pièce saine de chaque matériau. Dès ce stade, nous avons pu constater que ce n'était pas la peine d'aller plus loin en raison de l'atténuation importante que présentaient ces matériaux. En effet, le signal reçu par le traducteur (identique à ceux utilisés pour le contrôle réel) était d'amplitude très faible et inutilisable efficacement. De plus, certains de ces matériaux comportaient de nombreuses soufflures créées lors du durcissement. Cette étude fut donc rapidement abandonnée.

Afin de mettre au point l'étude du comportement des ultrasons sur des défauts, nous avons voulu fabriquer des défauts "idéaux". Ceci n'a été possible que dans le cas du nid de soufflures (paragraphe IV. 1. 1.). Un exemple de pièce est donné en figure V-1. Les dimensions des pièces ont été choisies suffisantes afin d'éviter les effets de bord.

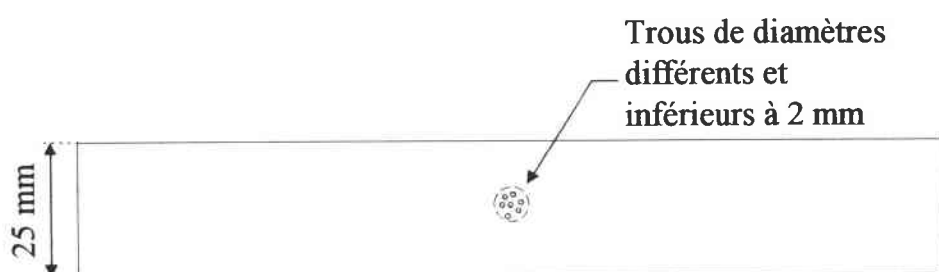


Figure V-1:

Pièce S1

Nous avons ensuite analysé le comportement d'un faisceau ultrasonore sur les défauts déjà existants.

V. 3. Etude comportementale des ultrasons sur un nid de soufflures et sur une fissure ramifiée (ou fortement rugueuse)

Lorsqu'une pièce comprenant un nid de soufflures ou une fissure ramifiée est contrôlée, le signal de défaut reçu est, dans les deux cas, de type unique et déchiqueté ou multiple. Si l'amplitude des échos observés ne remplit pas une des conditions des trois premières étapes de la procédure Cascade, une étude statique de l'écho de défaut ne suffira pas pour conclure. Nous devons donc étudier le comportement dynamique de l'écho, c'est-à-dire son évolution lors d'un déplacement du traducteur. **Ce dernier se fera selon un axe perpendiculaire à l'axe de la soudure afin d'étudier le défaut dans sa hauteur.**

V. 3. 1. Cas du nid de soufflures

Un nid de soufflures est un défaut composé d'un groupe de plusieurs petites soufflures comprises dans un certain périmètre. Lorsque l'on place le traducteur d'un côté du cordon de la soudure, le faisceau ultrasonore se réfléchit sur chaque soufflure "visible" de cette position. Une succession de petits pics apparaît sur l'écho détecté. Nous obtenons ainsi un écho multiple ou unique et déchiqueté, selon l'espace existant entre les soufflures. En figure V-2 est montré un écho ultrasonore obtenu au demi-bond à 45° sur une pièce percée (figure V-1) simulant un nid de soufflures important (pièce S1 - figure V-1).

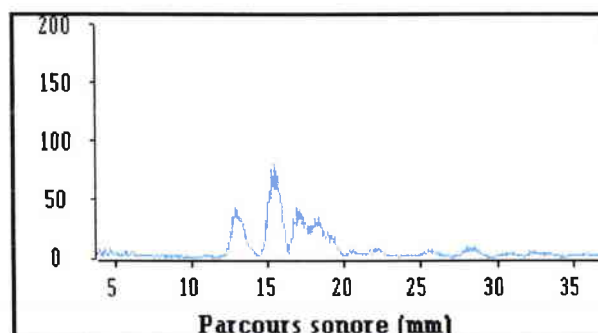


Figure V-2:

Echo obtenu sur la pièce S1 simulant un nid de soufflures

Exceptionnellement la fréquence de numérisation utilisée lors de cette acquisition est de 25 MHz, ce qui a permis d'obtenir une résolution importante du signal en parcours sonore.

Lorsque l'on déplace le transducteur perpendiculairement à l'axe de la soudure, les échos multiples, d'amplitudes différentes, se déplacent indépendamment et à des instants pouvant être différents. Chaque écho semble rouler au sein de son enveloppe en forme de cloche. En fait, chaque cloche résulte de la réflexion d'une partie du faisceau sur une soufflure. Toutes les enveloppes se recoupent et, globalement, l'enveloppe résultante est variable. Ce type de comportement est dit VAROUL (figure II-17).

La figure V-3 montre, en théorie, le comportement du faisceau ultrasonore et de l'écho obtenu sur un nid de soufflures lorsque le transducteur est déplacé sur la pièce perpendiculairement à l'axe de la soudure. Nous allons maintenant décrire les résultats obtenus sur le nid de soufflures "idéal" que nous avons fabriqué.

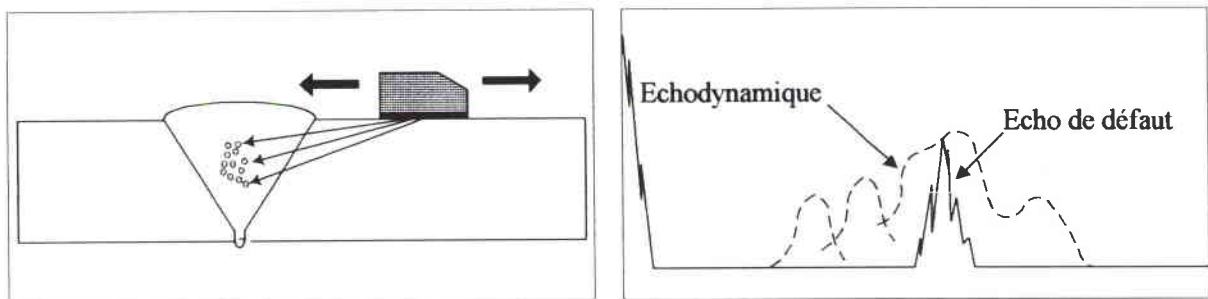


Figure V-3:

Comportement du faisceau ultrasonore et de l'écho obtenu sur un nid de soufflures

En figure V-4 sont montrées les courbes échodynamique et temps dynamique obtenues sur la pièce S1. En fait, la courbe échodynamique représente la courbe enveloppe des différentes cloches qui évoluent au cours du déplacement du transducteur. L'association de cette courbe avec la courbe temps dynamique permet de confirmer la théorie du comportement du faisceau sur le type de défaut étudié ici. Sur la courbe échodynamique différents sommets sont visibles. Chaque pente de la courbe temps dynamique correspond à l'évolution du parcours sonore de l'écho de la soufflure la plus réfléchissante. Chaque rupture de pente montre la position du transducteur pour laquelle un autre écho de soufflure est devenu

le nouveau maximum de l'écho de défaut, et donne le parcours sonore correspondant à ce dernier.

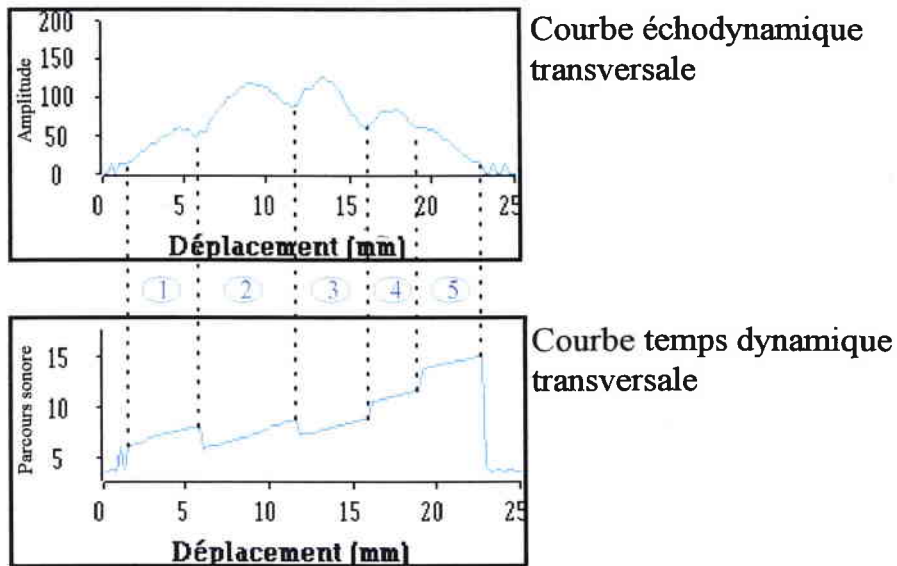


Figure V-4:

Courbes échodynamique et temps dynamique obtenues sur la pièce S1.

Nid de soufflures "idéal"

Dans notre exemple, cinq trous sont observables de ce côté du défaut. Le second trou observé se trouve à une distance plus courte du traducteur sur l'axe du faisceau ultrasonore que le premier (diminution du temps de parcours visible sur la courbe temps dynamique), alors que le quatrième est plus éloigné (augmentation du temps de parcours).

Ces résultats permettent de mieux comprendre ce qui se passe lorsqu'un faisceau ultrasonore vient se réfléchir sur un nid de soufflures. Comme nous avons utilisé un nid de soufflures "idéalisé", il sera difficile dans la réalité d'obtenir des résultats aussi caractéristiques. Notamment, dans un vrai nid de soufflures, il y a disparité de forme (sphéricité, ...) et de taille. Il sera difficile d'obtenir des courbes telles que nous venons de les présenter. D'autre part, la base de temps utilisée lors d'un contrôle est plus longue, et donc, avec notre système, la fréquence de numérisation est plus faible. Par conséquent, la résolution de l'acquisition est moins importante, et contribue à la différence des résultats.

L'exemple du défaut 1 de la pièce E1 (figure V-5) est donné en figure V-6. L'acquisition étudiée a été enregistrée à 60° au bond du côté C.

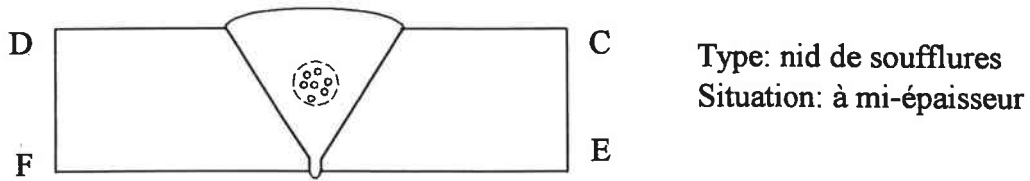
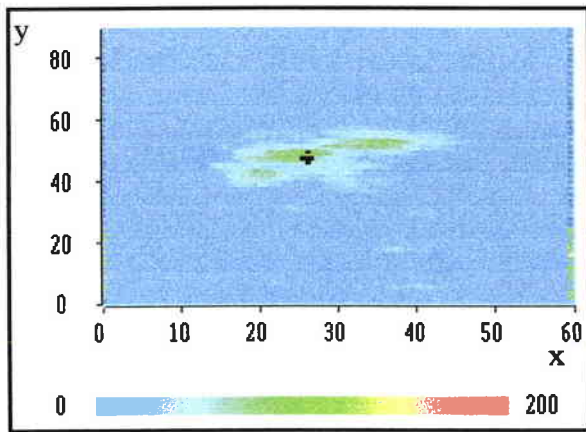
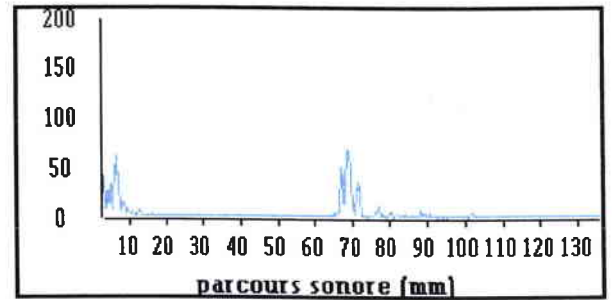


Figure V-5:

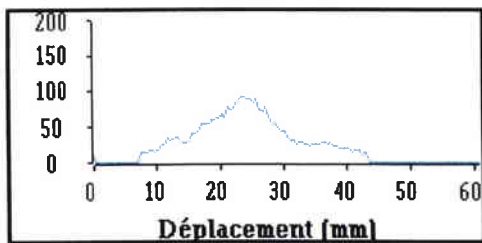
Défaut 1 - Pièce E1 - Nid de soufflures



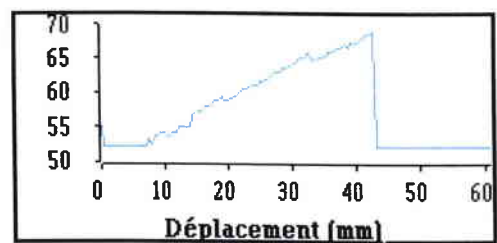
a) C-scan



b) A-scan correspondant à la position du curseur sur le C-scan



c) Courbe échodynamique transversale



d) Courbe temps dynamique transversale

Figure V-6:

Courbes obtenues sur le défaut 1 de la pièce E1 - Nid de soufflures

Les courbes dynamiques ne sont vraiment pas aussi significatives que celles obtenues sur la pièce percée. La courbe temps dynamique présente bien quelques

ruptures de pente, mais elles sont plutôt faibles. En fait, il est plutôt difficile d'extraire de ces résultats des informations exploitables.

V. 3. 2. Cas de la fissure ramifiée ou fortement rugueuse

Une fissure ramifiée est un ensemble de fissures reliées entre elles qui se présente sous forme d'arborescence. Les fissures rugueuses sont des fissures orientées selon une direction principale mais dont la surface est suffisamment rugueuse pour présenter une succession de petites facettes orientées différemment. Dans les deux cas, le faisceau ultrasonore va se réfléchir sur ces facettes et engendrer le phénomène suivant: des échos multiples d'amplitudes différentes semblent apparaître de façon aléatoire. Les courbes échodynamiques, prises indépendamment les unes des autres, lorsqu'elles peuvent être observées, sont assimilables à des cloches très étroites. Celles-ci correspondent à chaque petite facette réfléchissante de la fissure, et leur largeur dépend de l'orientation des facettes. La variation de ces cloches étroites lors du déplacement du transducteur donne l'impression de montées et de descentes brutales des échos. Ce type de comportement dynamique est dit **VARIAL** (figure II-18).

La figure V-7 montre, en théorie, le comportement du faisceau ultrasonore et de l'écho obtenu sur une fissure ramifiée lorsque le transducteur est déplacé sur la pièce perpendiculairement à l'axe de la soudure.

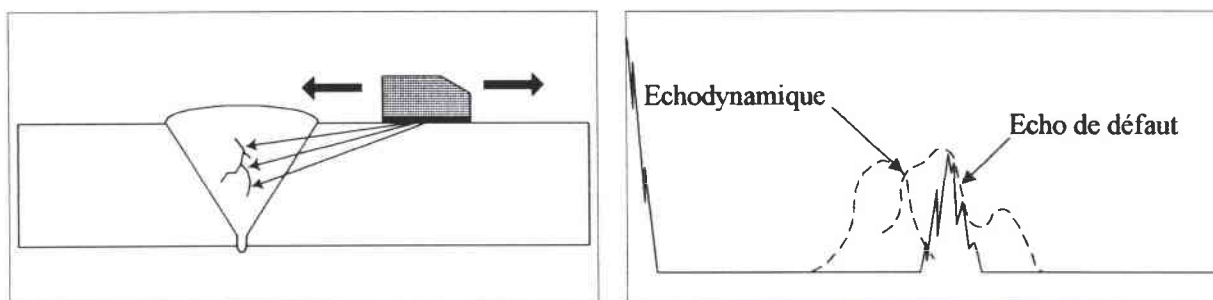


Figure V-7:

Comportement du faisceau ultrasonore et de l'écho obtenu sur une fissure ramifiée

Pour ce type de défaut, nous n'avons pas pu fabriquer une éprouvette possédant un défaut "idéal". Nous avons réalisé une série d'éprouvettes selon différents procédés, mais sans obtenir de résultats satisfaisants. Par conséquent, nous n'avons pas pu réaliser une simulation efficace.

Nous avons effectué les essais suivants:

a) nous avons fait casser des pièces, selon différentes orientations, par refroidissement à l'azote liquide. Les deux morceaux ont ensuite été soudés (figure V-8).

Lors du contrôle manuel par ultrasons, l'écho de défaut obtenu comprenait toujours deux pics correspondant aux deux extrémités du défaut. La présence de ces deux pics peut s'expliquer par le phénomène suivant: lors de la reconstitution de la pièce, il existe un certain jeu entre les deux morceaux; lors du soudage, ce jeu diminue, le gaz est expulsé, et il y a création de soufflures aux deux extrémités du défaut.

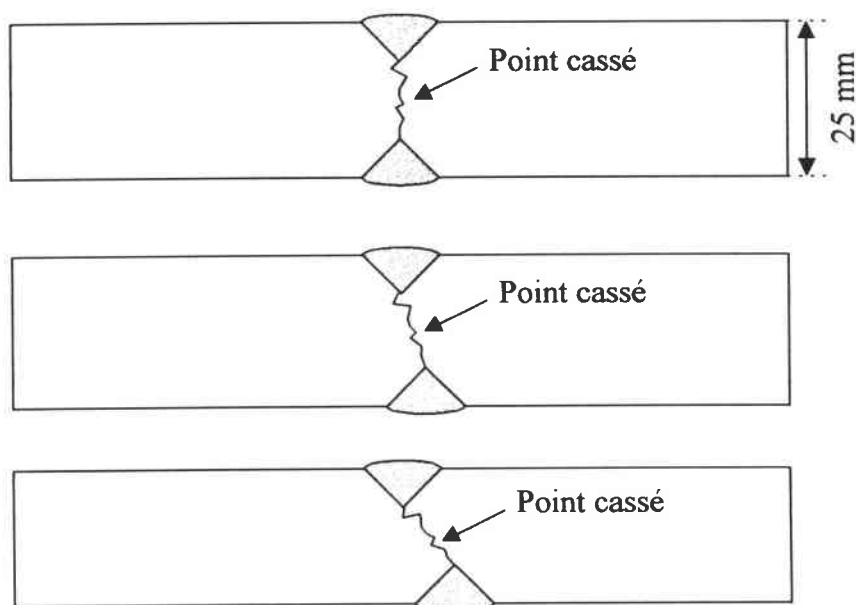


Figure V-8:

Pièces cassées, puis ressoudées

b) nous avons fait percer des pièces de telle sorte que tous les trous soient tangents et sous différentes inclinaisons (figure V-9).

Lors du contrôle, il s'est avéré que le comportement de l'écho ultrasonore pouvait être assimilé à celui obtenu sur un nid de soufflures. Ceci est dû à la réflexion du faisceau sur des surfaces sphériques.

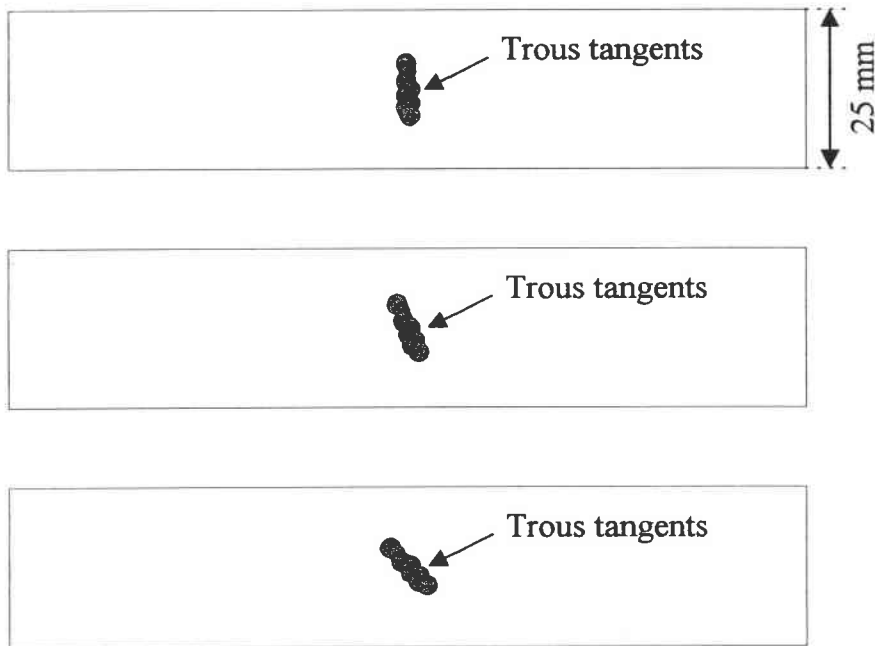


Figure V-9:
Pièces percées

Nous avons donc étudié uniquement les éprouvettes contenant des défauts réels. Les courbes montrées en figure V-11 ont été obtenues sur le défaut 7 de la pièce E3 (figure V-10). Il s'agit d'une fissure ramifiée obtenue en insérant une tige de cuivre dans le cordon lors du soudage (paragraphe IV. 1. 1.).

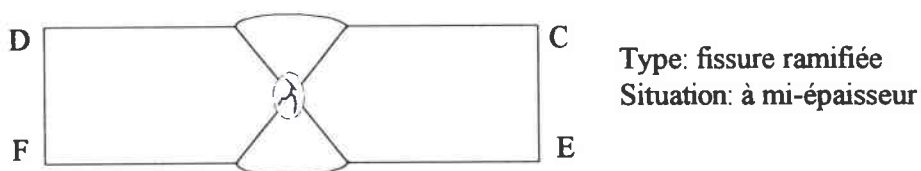
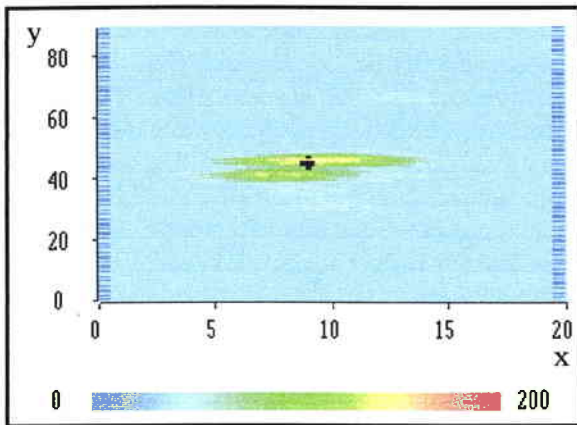
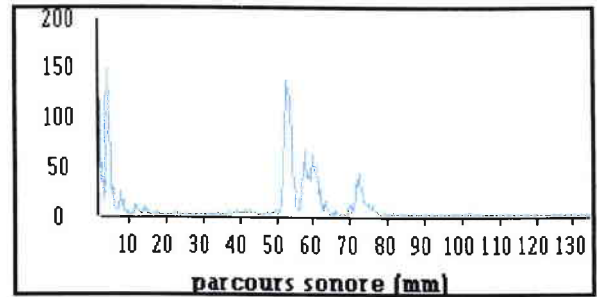


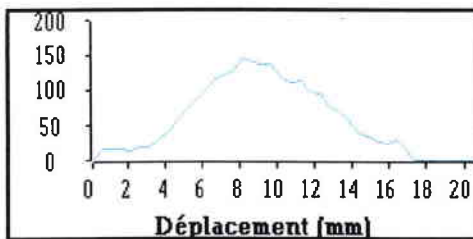
Figure V-10:
Défaut 7 - Pièce E3 - Fissure ramifiée



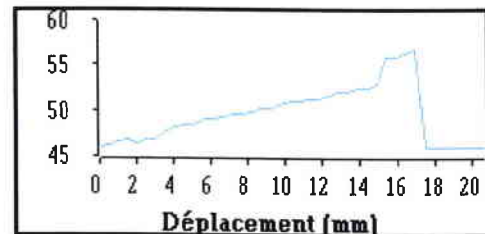
a) C-scan



b) A-scan correspondant à la position du curseur sur le C-scan



c) Courbe échodynamique transversale



d) Courbe temps dynamique transversale

Figure V-11:

Courbes obtenues sur le défaut 7 de la pièce E3 - Fissure ramifiée

Comme pour le cas du nid de soufflures vu précédemment, les courbes obtenues ne nous apportent pas d'informations significatives qui permettraient de reconnaître la nature du défaut. Seule une rupture de pente importante est visible, ce qui montre qu'un pic domine dans l'écho de défaut pendant presque tout le déplacement. Mais ceci reste propre à cet exemple.

V. 3. 3. Premiers résultats

A ce stade de l'étude, l'idée de base concernant la discrimination entre un nid de soufflures et une fissure ramifiée repose sur une étude des courbes dynamiques obtenues sur ces deux types de défauts. Or, comme nous le constatons en observant et en analysant les

courbes échodynamiques et temps dynamiques obtenues sur chacun de ces défauts (figures V-6 et V-11), il est plutôt difficile de se faire une opinion sur la nature des défauts 1 de la pièce E1 et 7 de la pièce E3. En effet, non seulement on ne retrouve pas, dans le cas du nid de soufflures, les résultats attendus après l'étude du nid de soufflures idéal appartenant à la pièce percée S1, mais, en plus, la distinction entre les différentes courbes dynamiques correspondant à ces deux défauts est très difficile. Dans les deux cas, on observe une courbe échodynamique variable et un temps dynamique présentant quelques légères ruptures de pentes. Ces dernières confirment toutefois la présence d'échos de défaut multiples, ou uniques et déchiquetés.

L'étude statique des courbes échodynamiques et temps dynamiques ne permet donc pas de distinguer les fissures ramifiées ou fortement rugueuses des nids de soufflures.

V. 4. Recherche de paramètres représentatifs

Cette première analyse aura cependant permis de bien cerner les tendances d'évolution d'un écho de défaut lorsque le faisceau ultrasonore balaie le volume occupé par une fissure ramifiée ou un nid de soufflures. Ceci a permis de dégager une autre direction de recherche pour trouver des paramètres représentatifs de ces deux types de défauts. Cette analyse, associée dans un second temps à une réflexion sur l'application des phénomènes ultrasonores présents aux interfaces (les unes planes et les autres sphériques) dans le cas de ces deux types de défauts, nous a incités à étudier les deux notions suivantes:

- la variation de l'amplitude des différents pics formant les échos de défaut durant le déplacement du traducteur (δA),
- la variation du nombre de pics formant les échos de défaut durant le déplacement du traducteur (δN).

Remarque: afin de faciliter la détection des pics composant l'écho de défaut et l'étude du comportement de ceux-ci, nous avons augmenté le gain utilisé lors des acquisitions réalisées

sur des pièces comprenant des fissures ramifiées (trois pièces, soit six défauts) et des nids de soufflures (deux pièces, soit six défauts). Comme nous avons décidé d'étudier des rapports d'amplitudes, et non pas des amplitudes brutes, les proportions sont conservées.

V. 4. 1. Etude comportementale

Un nid de soufflures est constitué de plusieurs soufflures plus ou moins rapprochées. Celles-ci, de par leur forme sphérique, renvoient toujours au moins une fois une partie de l'énergie émise vers le traducteur, et ceci quelle que soit la position des soufflures et du traducteur (figure V-12).

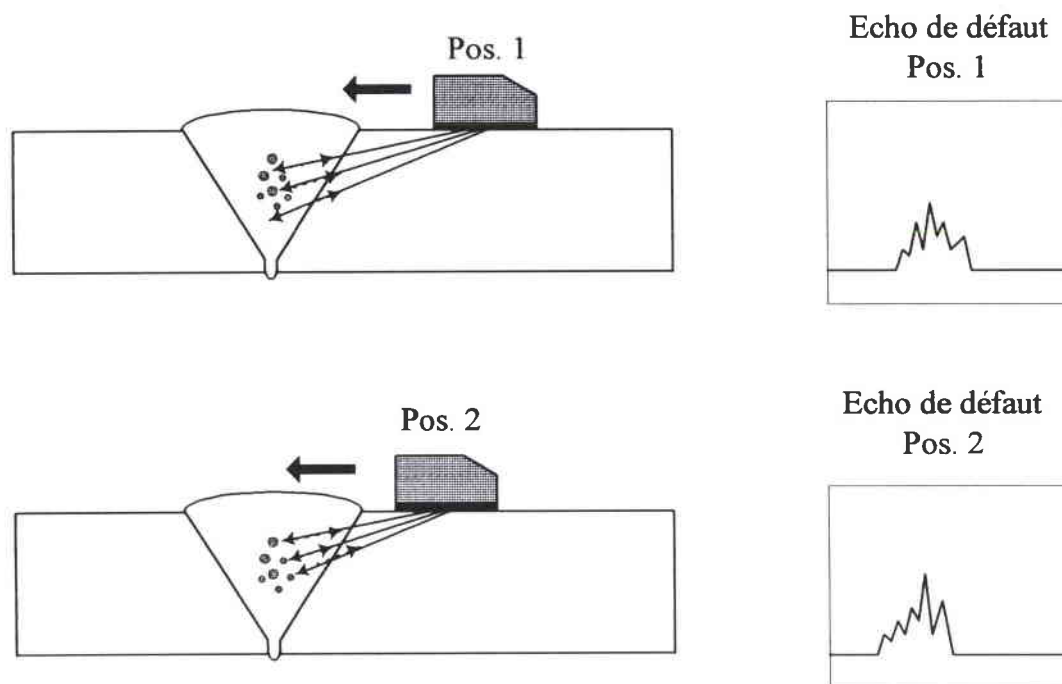


Figure V-12:

Evolution théorique d'un écho de nid de soufflures entre deux positions du traducteur

Donc, lorsque le traducteur se déplace sur la pièce perpendiculairement au cordon de soudure, on doit observer des variations en amplitude régulières et peu importantes de chaque pic formant l'écho de défaut. De la même façon, comme le faisceau se réfléchit sur les

soufflures les uns après les autres, le nombre de pics détectés dans l'écho de défaut doit varier progressivement.

Par contre, ces hypothèses ne doivent pas être applicables aux fissures ramifiées ou fortement rugueuses, sauf dans des cas très particuliers. D'après la forme de ce type de défaut, les variations des amplitudes des pics formant les échos de défaut sont fonction de l'orientation des facettes constituant les fissures (figure V-13): les facettes ne sont bien orientées par rapport au traducteur et au faisceau incident que pendant très peu de temps lors du déplacement du traducteur. Les amplitudes vont donc varier brutalement, et les pics détectés disparaître tout aussi brutalement.

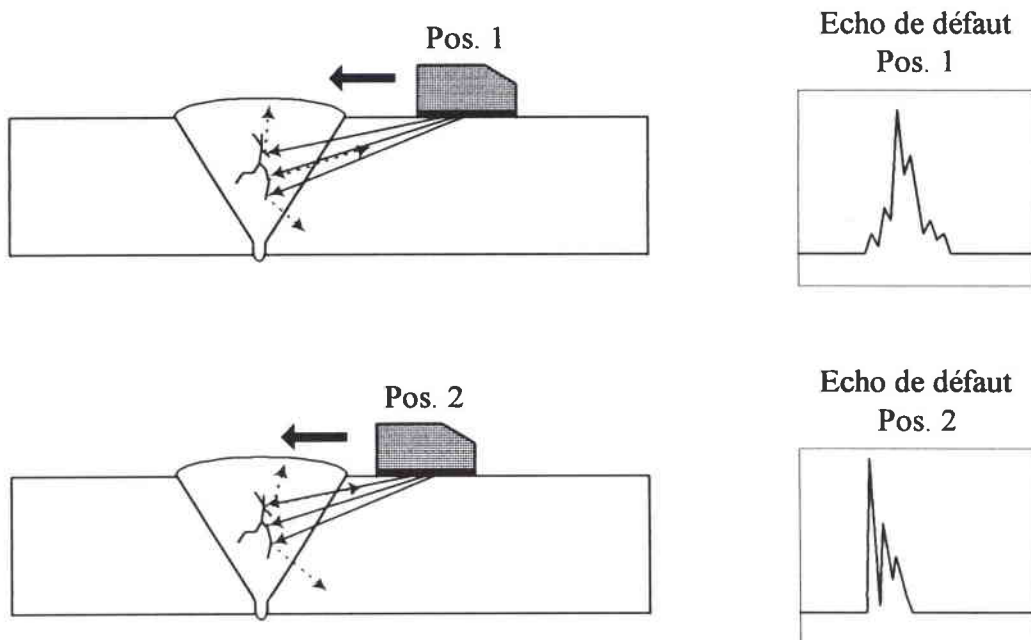


Figure V-13:

Evolution théorique d'un écho de fissure ramifiée entre deux positions du traducteur

C'est à partir de ces deux hypothèses que nous avons décidé d'étudier les deux paramètres que nous avons appelés δA et δN .

V. 4. 2. Méthode de suivi des échos de défaut

Le principe de la méthode de suivi des échos de défaut lors du déplacement du traducteur sur le défaut est présenté en figure V-14.

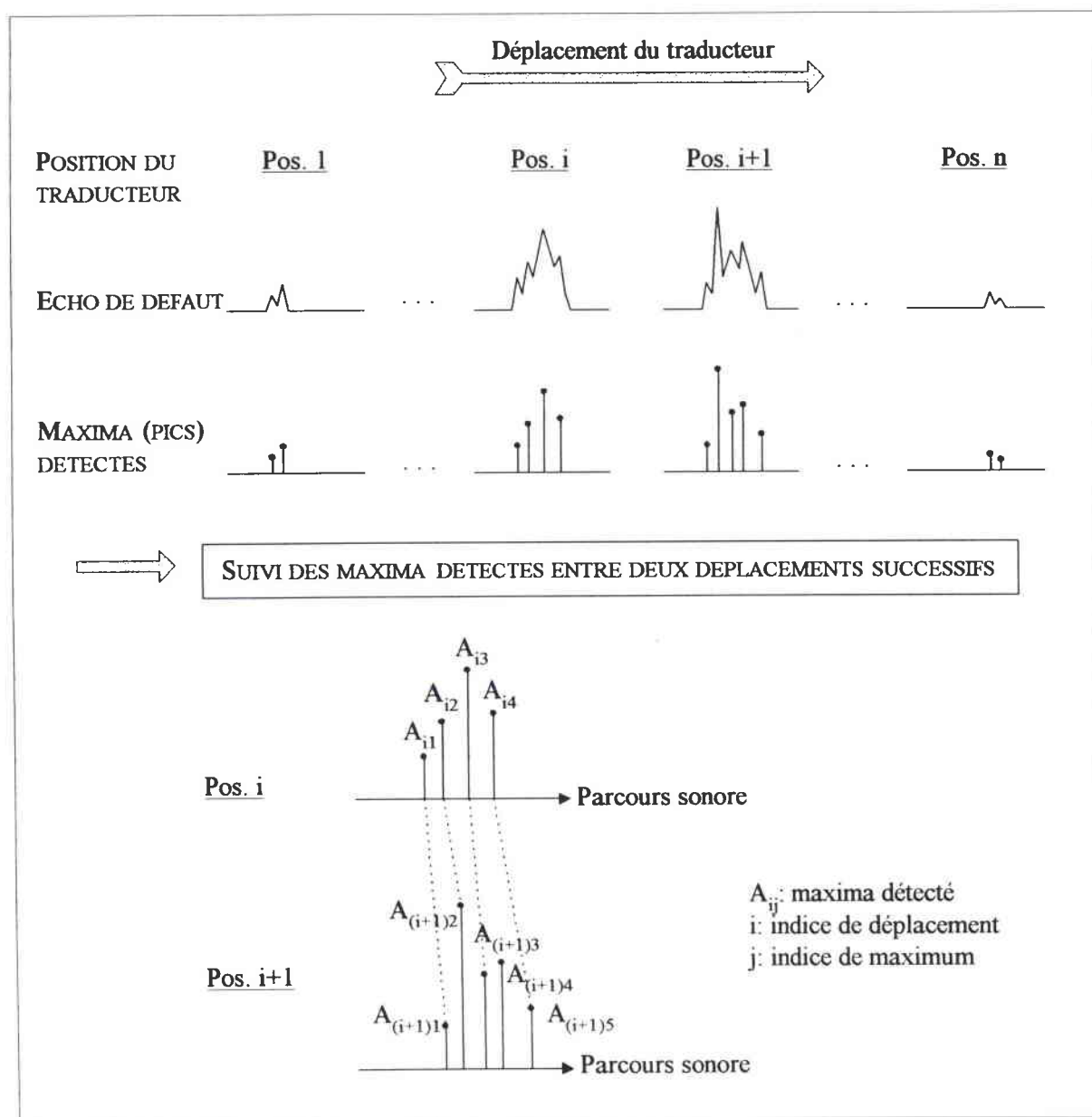


Figure V-14:

Principe de la méthode de suivi des échos de défaut

En premier lieu, nous avons dû isoler l'écho de défaut étudié en plaçant toujours une fenêtre, définie par un nombre de points compris entre 1 et 509, sur la zone du parcours

sonore du A-scan affectée par l'écho de défaut. Ainsi, sur une échelle "parcours sonore", l'écho se rapproche de l'origine quand le traducteur va vers le défaut, et inversement se déplace dans l'autre sens quand le traducteur s'éloigne du défaut: **la fenêtre doit comprendre toute la zone, en parcours sonore, couverte durant tout le déplacement du traducteur où un écho de défaut est observable. Nous ne considérerons donc maintenant que le déplacement correspondant à cette fenêtre.**

De plus, le parcours sonore ne sera plus exprimé en millimètres ou en microsecondes, mais en nombre de points dans la fenêtre de mesure.

Nous avons ensuite repris l'algorithme développé pour l'étape quatre de la procédure Cascade (étude de la rugosité - paragraphe IV. 2. 4.) afin de détecter tous les pics (ou maxima) qui composent l'écho de défaut, et de déterminer leur amplitude et leur parcours sonore. Nous avons dès lors toujours travaillé avec ces derniers, au lieu de considérer tous les points constituant l'écho de défaut.

Il a alors fallu réaliser le traitement permettant d'isoler chaque pic détecté, et de le suivre durant le déplacement (étude du comportement échodynamique de chaque maximum détecté). Celui-ci a été développé, puis validé sous MUSTIG. Son principe repose sur une étude de l'évolution des parcours sonores des maxima en fonction du déplacement du traducteur et de l'angle d'incidence utilisé lors du contrôle (figure V-15).

Remarque importante: afin de pouvoir effectuer une comparaison des échos obtenus sur tous les défauts, quelles que soient leur taille et leur nature, nous avons fait en sorte de comparer des échos de signaux obtenus avec un pas en profondeur sur le défaut proche de 1 mm (figure V-15). Pour un défaut "idéal" plan vertical, connaissant l'angle d'incidence utilisé, nous en avons déduit les différents pas des acquisitions à exploiter au niveau de la surface de la pièce contrôlée. Ainsi, nous avons travaillé avec un pas, en surface, de 1 mm à 45°, 2 mm à 60° et 3 mm à 70°, ceci ne posant aucun problème puisque les contrôles ont été réalisés à l'origine avec un pas d'acquisition de déplacement du traducteur de 0,5 mm.

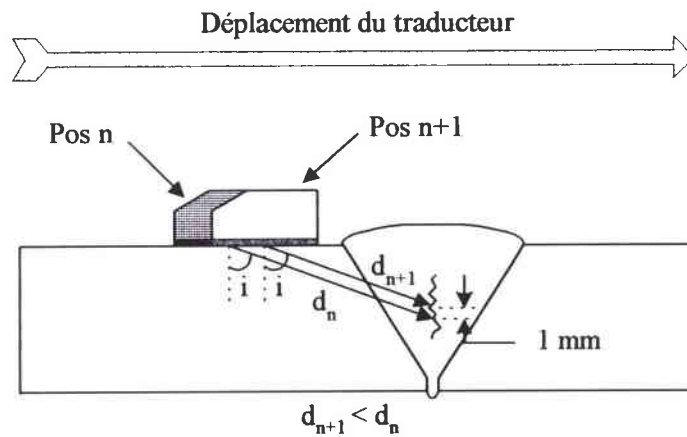


Figure V-15:

Détermination du pas des acquisitions exploitées

Nous avons d'abord étudié visuellement l'évolution du parcours sonore des différents pics formant l'écho de défaut lorsque le transducteur s'éloigne ou se rapproche du cordon de soudure comprenant le défaut étudié.

Ainsi, quelle que soit la nature du défaut étudié, lorsque le transducteur se rapproche de celui-ci, le parcours sonore d_n de l'écho de défaut, ainsi que de chaque pic le composant, diminue (figure V-15). De même, lorsque le transducteur s'en éloigne, ces parcours sonores augmentent. Ces résultats peuvent être confirmés par la réalisation des courbes temps dynamiques transversaux (figures V-6 et V-11).

Pour pouvoir suivre l'évolution d'un pic particulier de l'écho lors du déplacement du transducteur, nous avons dû déterminer des valeurs caractérisant l'évolution des parcours sonores en fonction de l'angle d'incidence utilisé lors du contrôle. Ainsi, en étudiant les parcours sonores des maxima obtenus automatiquement (sous MUSTIG), et en analysant les déplacements des pics visuellement (sous MUSTIG), nous avons réussi à associer les pics selon le principe exposé ci-dessous.

Pour chaque écho de défaut, les parcours sonores de chaque maximum détecté sont comparés avec ceux des mêmes maxima de l'écho obtenu pour la position suivante du transducteur. Grâce à l'étude des cinq pièces (paragraphe V. 4.), nous avons alors déterminé statistiquement des valeurs correspondant aux écarts Δ en nombre de points du parcours

sonore maximum et minimum possible pour un même pic lorsqu'il évolue avec le déplacement du traducteur. Ces résultats sont regroupés dans le tableau V-1.

Angle d'incidence	Limites de la variation des parcours sonores d'un même pic au sein d'un écho de défaut entre deux positions du traducteur (en nombre de points)
45°	$0 < \Delta \leq 5$
60°	$4 < \Delta \leq 8$
70°	$6 < \Delta \leq 12$

Tableau V-1:

Seuils permettant d'isoler les pics d'un écho de défaut lors du déplacement du traducteur

Ces seuils étant déterminés, nous avons alors pu isoler les pics et les associer entre eux sur tout le déplacement du traducteur. Nous avons ainsi réalisé une macro sous MUSTIG permettant de déterminer l'évolution des pics. Celle-ci comprend deux étapes:

- la première permet de détecter dans un écho (i) les pics qui étaient déjà présents dans l'écho précédent (i-1), de noter leur amplitude et leur parcours sonore (figure V-16): on compare les parcours correspondant au même pic entre eux pour sélectionner, dans l'écho (i), ceux qui remplissent les conditions exposées dans le tableau V-1;

- la seconde étape consiste à rechercher dans l'écho (i-1) les amplitudes et les parcours sonores des pics correspondant à ceux retenus à partir de l'étude de l'écho (i) (figure V-17): on compare les parcours entre eux pour sélectionner ceux qui remplissent, en valeur absolue, les conditions données dans le tableau V-1.

Les résultats sortent alors sous forme de vecteurs qui sont transférés automatiquement sous EXCEL, puis représentés sous forme d'un tableau (tableau V-2).

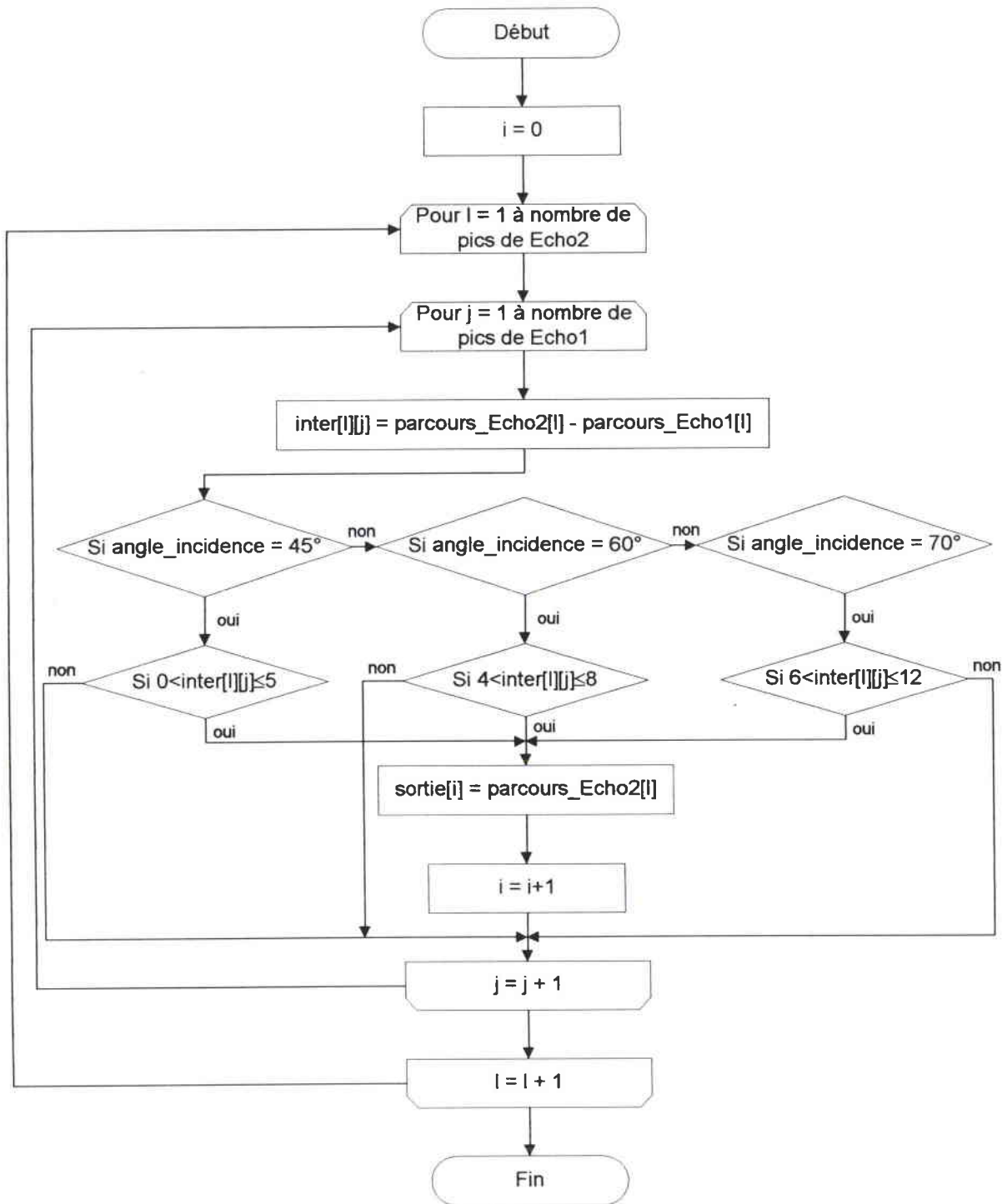


Figure V-16:

Algorithme de traitement permettant l'association des pics du second écho par rapport au premier

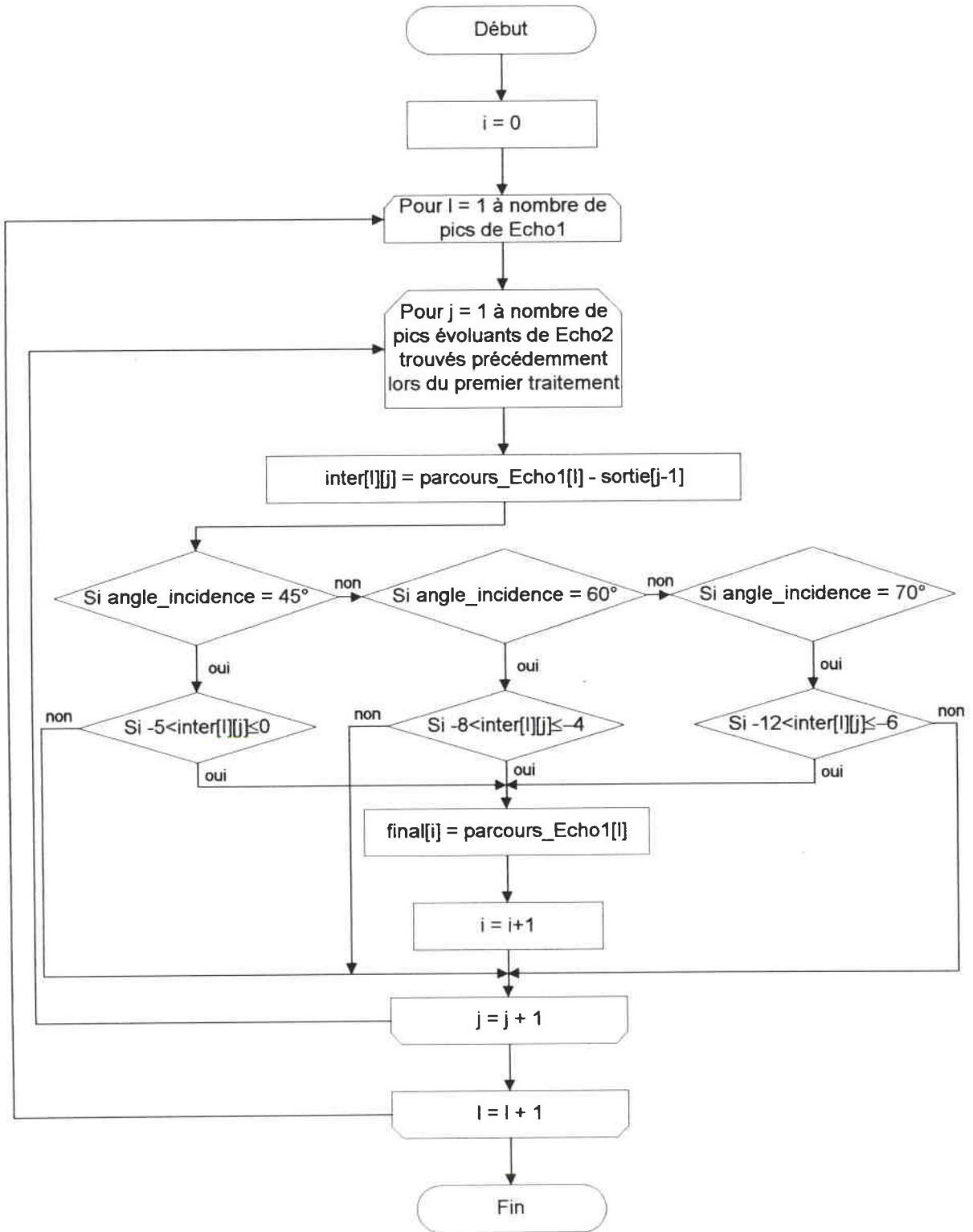


Figure V-17:

Algorithme de traitement permettant l'association des pics du premier écho par rapport au second

coord	54	52	50	48	46	44	42	40	38	36	34	32	30	28	
P	3	4	6	5	6	6	6	5	7	6	6	7	5	5	
	7														
	7.06														
	10														
	25.88														
	12	13													
	30.59	12.55													
		15	16												
		53.33	5.49												
			18	20											
			22.75	7.84											
		18	21	23	26										
		76.86	66.67	35.29	8.63										
		21	24	26											
		54.9	98.82	75.29											
			27	28	29	31									
			82.35	115.29	50.98	5.49									
					31	34									
					107.45	54.9									
			30	31	34	36	38								
			41.57	106.67	159.22	127.84	58.82								
					37	39	41								
					157.65	176.47	118.43								
					40	42	44	45							
					87.84	187.45	156.08	36.08							
								47	50						
								76.08	23.53						
						45	47	50	52	55					
						116.08	168.63	113.73	29.8	17.25					
								50	53	55	58	60	62		
								114.51	148.24	47.06	14.9	9.41	5.49		
								56	58	61	64	65	70		
								120.78	90.98	32.94	10.2	11.76	9.41		
								56							
								10.98							
									61	64	66				
									85.49	71.37	33.73				
										67	69	70			
										56.47	45.49	10.98			
												73	75	76	
												14.12	14.12	9.41	
												75	77	79	
												23.53	12.55	7.84	
														81	
														10.98	
													78	82	84
												18.04	7.84	10.2	
									68	73	78				
									11.76	5.49	9.41				
											81				
											6.27				
														86	
														6.27	
													87	92	
												5.49	5.49		
									87						
									7.06						

Tableau V-2:

Evolution des pics détectés dans l'écho de défaut étudié sur le déplacement du traducteur d'ondes transversales à 45° - Cas du défaut 6 de la pièce F2: nid de soufflures

Nous trouvons dans ce tableau les informations suivantes:

- coord: cela correspond aux coordonnées du traducteur durant l'acquisition, ou plutôt au numéro du pas d'acquisition correspondant à sa position sur la pièce; ici, ces coordonnées vont de deux en deux car l'acquisition avait un pas d'acquisition d'origine de 0,5 mm, et a été réalisée avec un traducteur à 45°; comme nous voulons un pas d'acquisition de 1 mm, nous avons donc exploité un signal sur deux;

- P: il s'agit du nombre de maxima ou pics détectés dans l'écho de défaut pour la position considérée;

- les lignes grises: le parcours sonore des pics détectés;

- les lignes blanches: l'amplitude des pics détectés.

Si nous lisons le tableau dans le sens vertical, nous pouvons voir les pics détectés au sein de l'écho de défaut pour une position fixe. Par exemple, pour la première coordonnée (54), trois maxima ont été détectés correspondant aux parcours sonores 7 (7,06%), 10 (25,88%) et 12 (30,50%).

Maintenant si nous lisons ce même tableau dans le sens horizontal, nous pouvons suivre l'évolution des pics en fonction du déplacement du traducteur. C'est à partir de ce résultat que nous avons pu étudier les paramètres δA et δN définis précédemment.

Nous avons donc réussi à isoler chaque maximum de l'écho lors du déplacement du traducteur en fixant un pas d'acquisition constant pour chaque incidence. En étudiant pour chaque incidence l'évolution des parcours sonores, nous avons réussi à extraire des seuils permettant d'associer un pic obtenu pour une position du traducteur à celui qui lui correspond dans l'écho obtenu pour la position suivante. L'isolation des pics a alors été représentée sous forme de tableaux sous EXCEL. Chaque ligne de ces tableaux nous donne l'échodynamique et le temps dynamique pour un maximum donné.

V. 4. 3. Premier paramètre: étude des variations d'amplitude (δA)

Nous avons cherché à étudier les variations de l'amplitude des pics détectés en fonction du déplacement du traducteur (figure V-18). Ces variations sont relevées sur les lignes blanches des tableaux EXCEL (amplitude des pics détectés) établis pour chaque défaut.

Nous avons calculé les rapports des amplitudes de chaque pic détecté entre deux positions consécutives du traducteur, et ceci sur tout le déplacement où le défaut est observé.

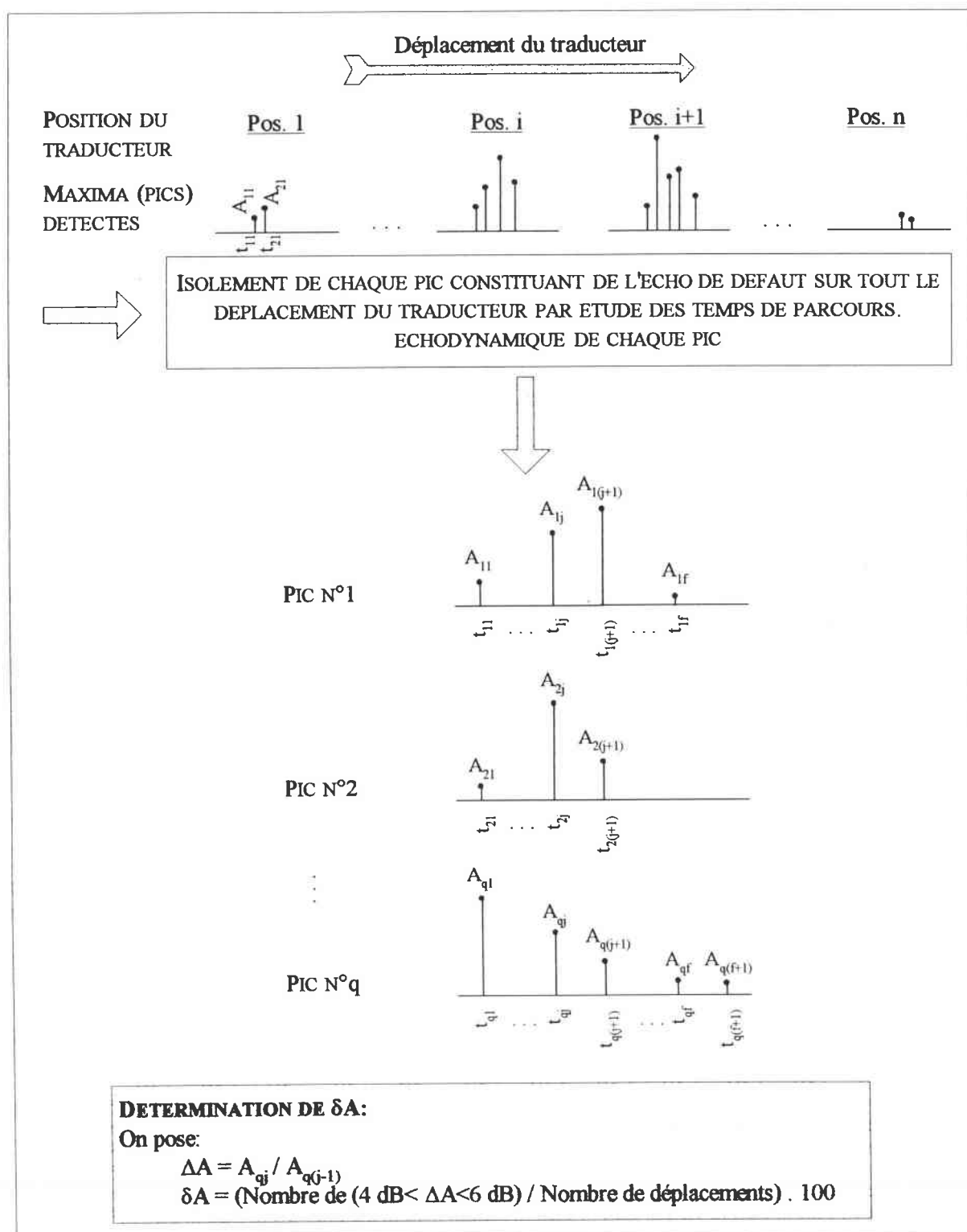


Figure V-18:
Principe de détermination de δA

δA est défini par la relation suivante:

$$\delta A = (\text{Nombre de } \Delta A \text{ importants} / \text{Nombre de déplacements}) \cdot 100$$

avec ΔA : rapport des amplitudes obtenues pour un même pic entre deux positions successives du traducteur (figure V-18).

Afin de définir la notions de grandeur de ΔA , trois seuils différents ont été choisis:

- variations d'amplitude ΔA supérieures à 4 dB,
- variations d'amplitude ΔA supérieures à 6 dB,
- variations d'amplitude ΔA comprises entre 4 dB et 6 dB.

Les résultats obtenus seront présentés dans le paragraphe V. 5..

V. 4. 4. Second paramètre: étude des variations du nombre de pics détectés dans l'écho de défaut (δN)

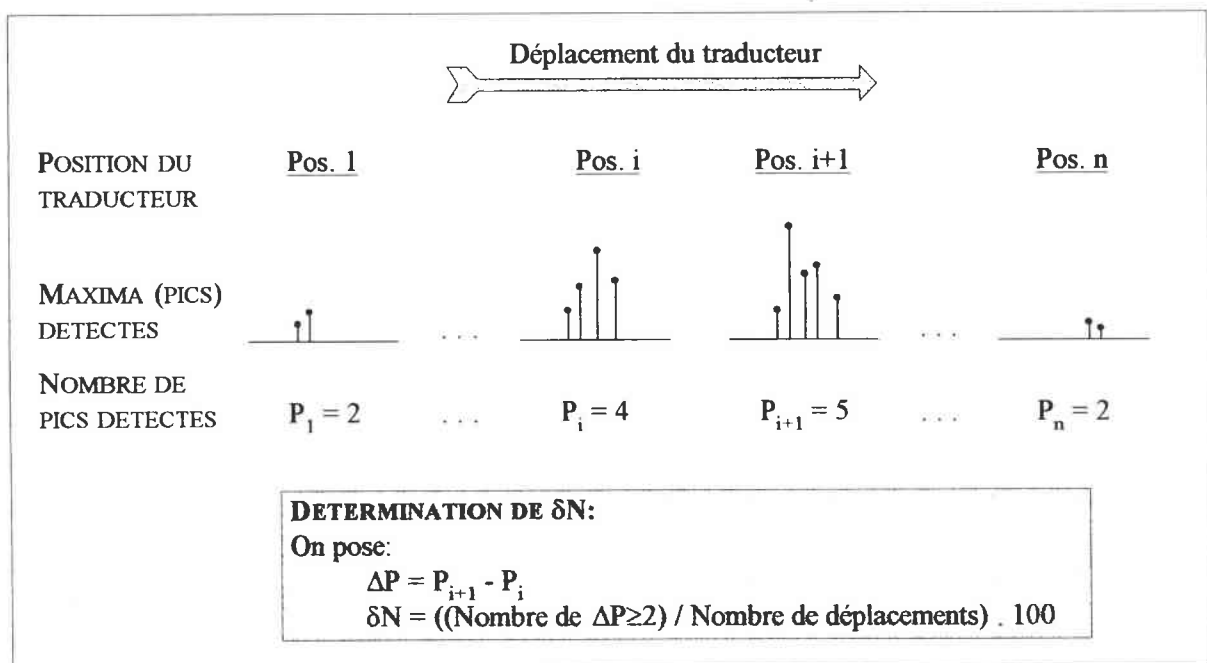


Figure V-19:

Principe de détermination de δN

En figure V-19 est montré le principe de détermination du second paramètre que nous avons appelé δN , et qui représente le nombre de variations “brutales” du nombre de maxima détectés par écho de défaut sur tout le déplacement du transducteur où le défaut est observable.

Pour ce second paramètre, nous nous sommes intéressés au nombre de pics détectés par écho de défaut observé pour une position du transducteur, et à l'évolution de celui-ci lors du déplacement du transducteur. Nous avons alors déterminé la différence entre le nombre de maxima détectés lors de deux déplacements consécutifs, et cela, sur tout le déplacement. Nous avons ensuite étudié le nombre de fois où cette différence était supérieure ou égale à deux, c'est-à-dire le nombre de fois où plusieurs pics apparaissent ou disparaissent sur tout le déplacement du transducteur.

δN est défini par la relation suivante:

$$\delta N = [(\text{Nombre de } \Delta P \geq 2) / \text{Nombre de déplacements}] \cdot 100$$

avec ΔP : différence du nombre de pics détectés entre deux positions successives du transducteur (figure V-19).

Les résultats obtenus sont exposés dans le paragraphe suivant.

V. 5. Résultats et discussion

V. 5. 1. Présentation des résultats

Nous avons contrôlé douze défauts réels: six fissures ramifiées, ou fortement rugueuses, et six nids de soufflures.

Comme pour cette étude le gain du contrôle a été augmenté, nous en avons tenu compte lors de l'analyse des résultats, en négligeant certains pics d'amplitude trop faible, que nous considérons être du bruit. Ainsi, après observation des tableaux de regroupement des maxima, nous avons choisi une valeur de seuil égale à 15%: nous avons, en effet, constaté que les pics dont l'amplitude n'atteint jamais 15 % n'apportaient rien à l'étude.

Remarque: cette valeur de seuil est propre à notre étude puisqu'elle dépend du gain utilisé pour le contrôle (paragraphe V. 4.).

Lors de la détermination des valeurs des paramètres, nous avons donc appliqué deux tests supplémentaires sur les amplitudes:

- pour δA : toutes les variations brutales d'amplitude de pics dont le pouvoir réfléchissant ne dépasse pas la valeur 15 % sont négligées;

- pour δN : tous les pics dont l'amplitude ne dépasse jamais la valeur 15 % lors du déplacement du traducteur ont été négligés.

Ainsi, les paramètres traités ont été calculés pour des pics disposant d'une amplitude relativement importante.

Nous avons étudié les résultats obtenus à partir de différentes valeurs de seuil pour δA (paragraphe V. 4. 3.). Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau V-3.

Fichiers	Nature*	nb dépl	$\Delta A \geq 4\text{dB}$	δA_4	$4 \leq \Delta A \leq 6\text{dB}$	δA_{4-6}	$\Delta A \geq 6\text{dB}$	δA_6
e345c7	varial	13	10	76.92	6	46.15	4	30.77
f470c11	varial	12	14	116.67	6	50	8	66.67
f470c12	varial	15	23	153.33	5	33.33	18	120
f470c10	varial	15	34	226.67	11	73.33	23	153.33
f370c8	varial	13	17	130.76	5	38.46	12	92.3
f370c7	varial	15	19	126.67	8	53.33	11	73.33
e160c1	varoul	16	10	62.5	8	50	2	12.5
e160c2	varoul	17	7	41.18	4	23.53	3	17.65
e160d3bis	varoul	15	4	26.67	3	20	1	6.67
f245d5b	varoul	14	20	142.85	5	35.71	15	107.14
f245d6	varoul	13	19	146.15	5	38.46	14	107.69
f245d5	varoul	15	9	60	0	0	9	60

* Varial: fissure ramifiée Varoul: nid de soufflures

Tableau V-3:

Résultats obtenus pour δA sur douze défauts réels étudiés

Dans ce tableau, nous retrouvons:

- le nom des fichiers d'acquisition, dans lequel sont indiqués le nom de la pièce contrôlée, l'angle d'incidence utilisé, l'accès depuis lequel le contrôle a été réalisé, et le numéro du défaut étudié,

- le type de comportement théorique étudié: VAROUL ou VARIAL selon la nature du défaut étudié,
- le nombre de déplacements (nb dépl) effectués par le traducteur, et pendant lequel un écho de défaut est observé,
- le nombre de cas où la variation d'amplitude est supérieure ou égale à 4 dB, et δA_4 correspondant,
- le nombre de cas où la variation d'amplitude est comprise entre 4 dB et 6 dB inclus, et δA_{4-6} correspondant,
- le nombre de cas où la variation d'amplitude est supérieure ou égale à 6 dB, et δA_6 correspondant.

Le tableau V-4 donne les résultats obtenus pour δN sur les douze mêmes défauts.

Fichier	Défaut	nb dépl	nb var nb pics ≥ 2	δN
e345c7	varial	13	3	23.08
f470c11	varial	12	5	41.67
f470c12	varial	15	7	46.67
f470c10	varial	15	8	53.33
f370c8	varial	13	5	38.46
f370c7	varial	15	6	40
e160c1	varoul	16	3	18.75
e160c2	varoul	17	6	35.29
e160d3bis	varoul	15	3	20
f245d5b	varoul	14	3	21.42
f245d6	varoul	13	3	23.07
f245d5	varoul	15	2	13.33

* Varial: fissure ramifiée Varoul: nid de soufflures

Tableau V-4:

Résultats obtenus pour δN sur douze défauts réels étudiés

A partir des tableaux V-3 et V-4, nous avons représenté les paramètres δA et δN , obtenus sur chaque fichier d'acquisition traité, dans un plan (δA , δN).

Comme nous avons testé différents modes de calcul de δA , nous donnons, en figures V-20, V-21 et V-22, toutes les distributions de points obtenues.

- Etude des variations d'amplitude supérieures ou égales à 4 dB (figure V-20).

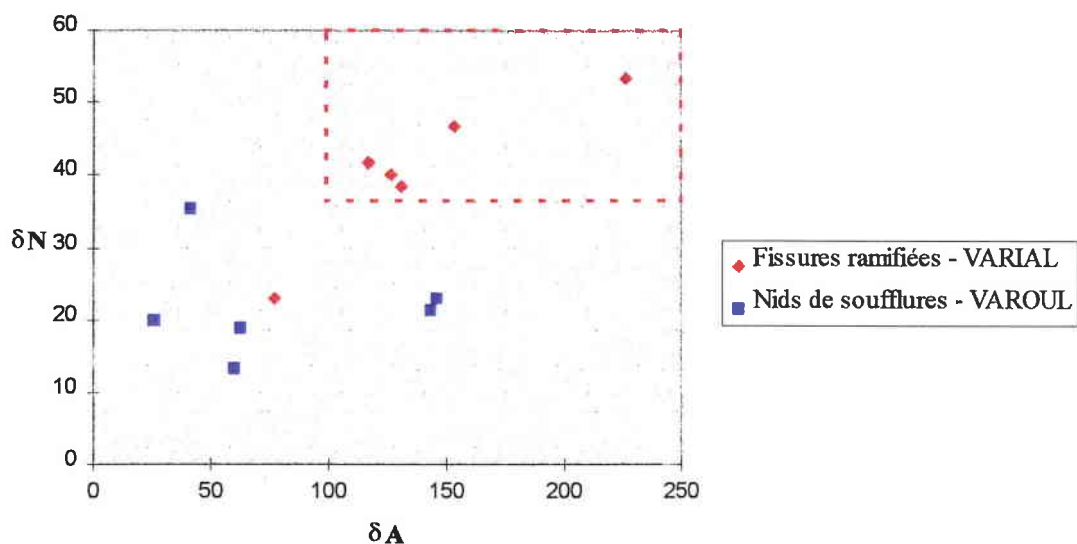


Figure V-20:

Résultat obtenu pour ΔA supérieur ou égal à 4 dB

- Etude des variations d'amplitude comprises entre 4 dB et 6 dB (figure V-21),

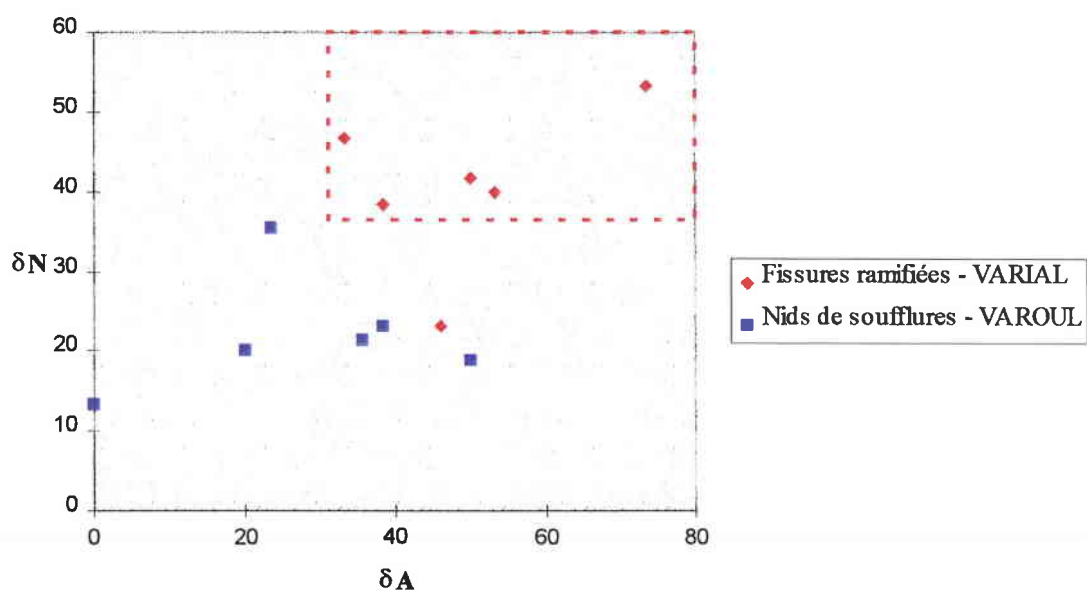


Figure V-21:

Résultat obtenu pour ΔA compris entre 4 dB et 6 dB

- Etude des variations d'amplitude supérieures ou égales à 6 dB (figure V-22),

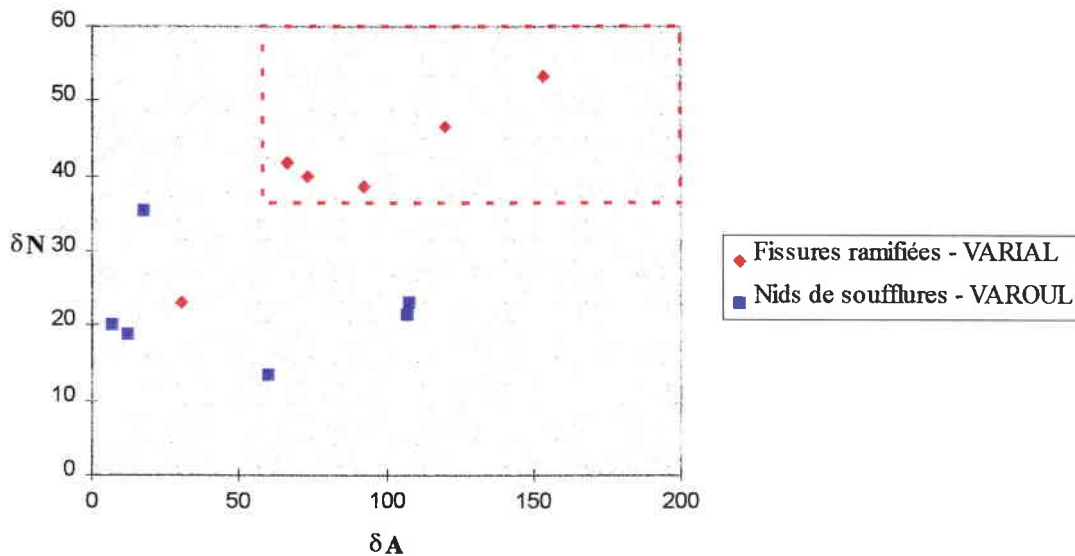


Figure V-22:

Résultat obtenu pour ΔA supérieur ou égal à 6 dB

V. 5. 2. Discussion

Si nous observons les différentes représentations montrées en figures V-20, V-21 et V-22, nous observons qu'une série de points se regroupe dans le coin supérieur droit des graphiques, et ceci quelle que soit la méthode de calcul de δA . Nous retrouvons les hypothèses proposées au début de ce chapitre. En fait, le comportement VARIAL des échos de défaut obtenus sur une fissure ramifiée se caractérise par un nombre de variations d'amplitudes relativement importantes et un nombre de variations du nombre de pics détectés importants. La fissure ramifiée idéale, c'est-à-dire présentant un écho de défaut variant d'une manière complètement aléatoire, ressortirait dans le coin supérieur droit. Le nid de soufflures idéal, dont l'écho de défaut ondulerait parfaitement lors du déplacement du traducteur, apparaîtrait dans le coin inférieur gauche (nous n'avons pas représenté ici les résultats obtenus sur la pièce S1, car ses conditions de contrôle diffèrent de celles utilisées pour les défauts réels).

Seul un point correspondant au défaut 7 de la pièce E3 est mal regroupé. En fait, une étude dynamique manuelle des échos obtenus sur le défaut fait ressortir un comportement de type VAROUL, normalement attribué à un nid de soufflures. Lors d'un contrôle manuel traditionnel, l'opérateur aurait conclu à la présence d'un défaut volumique.

Seule une coupe de la pièce au niveau du défaut aurait pu permettre d'expliquer la raison de l'obtention d'un tel résultat. En effet, l'analyse de la radiographie réalisée sur l'éprouvette ne donne pas d'indication satisfaisante.

Nous sommes donc ici en présence d'un défaut qui, quelle que soit la méthode utilisée, manuelle ou automatique, sera classé en défaut volumique par la procédure cascade.

Les résultats obtenus sur les autres défauts montrent que l'exploitation d'un seul des deux paramètres étudiés n'est pas suffisante pour conclure. En effet, bien qu'il semble possible de définir un seuil de distinction pour δN ($\delta N = 37$), il arrive qu'un nid de soufflures présente une valeur de δN proche de ce seuil. Mais la valeur de δA obtenue sur ce même défaut, est plutôt basse et permet de classer le défaut en défaut volumique. De la même façon, certains nids de soufflures présentent des valeurs de δN faibles. Mais leurs valeurs de δA étant élevées, leur classification en défaut volumique est possible.

Lors de l'étape cinq de la procédure Cascade, pour pouvoir conclure quant à la nature non volumique d'un défaut, il est nécessaire d'obtenir, pour un écho de défaut considéré, une valeur élevée pour δN et pour δA .

Si nous comparons les résultats obtenus pour les trois valeurs de ΔA et en négligeant le point du défaut 7 de la pièce E3, nous constatons **que le meilleur regroupement est obtenu pour ΔA supérieur ou égal à 4 dB**. Les deux autres cas, cependant, donnent des résultats corrects. **Cela permet de contrôler un premier résultat obtenu avec une condition portant sur ΔA donnée, par une étude réalisée avec une autre condition portant sur ΔA .**

Nous avons pu déterminer les valeurs limites de paramètres δA et δN pour une condition donnée de ΔA , définissant ainsi une zone caractéristique des fissures ramifiées. Ces valeurs sont données dans le tableau V-5.

Conditions sur ΔA	δA	δN
$\Delta A \geq 4$ dB	≥ 100	≥ 37
4 dB $\leq \Delta A \leq 6$ dB	≥ 30	≥ 37
$\Delta A \geq 6$ dB	≥ 65	≥ 37

Tableau V-5:

Limites de la zone de classification des fissures ramifiées

Le retour d'expérience sur chantier permettra d'affiner ces valeurs.

La procédure Cascade classe les défauts en recherchant les échos ayant un comportement de type VARIAL. Elle dit que si un comportement VARIAL est observé, le défaut est classé en défaut non volumique, sinon il sera classé en défaut volumique. Dans le cas de nos douze défauts, cinq présentent un comportement dynamique de leur écho de type VARIAL, et sont classés en défauts non volumiques. Les sept défauts restants sont donc classés en défauts volumiques.

Les résultats obtenus avec la classification automatique, en considérant les seuils du tableau V-5, sont donc les suivants:

- onze défauts sur douze ont été classés avec succès, soit 91,67 % de réussite;
- cinq fissures ramifiées sur six ont été classées avec succès, soit 83,33 % de réussite;
- six nids de soufflures sur six ont été classés avec succès, soit 100 % de réussite.

De plus, nous avons obtenu une concordance exacte entre la classification manuelle et la classification automatique.

V. 6. Evolution du développement informatique des paramètres

Après avoir déterminé et validé une première fois ces paramètres de façon semi-automatique (détection sous MUSTIG, représentation sous EXCEL), nous avons voulu les automatiser entièrement sous MUSTIG, en évitant ainsi la phase d'établissement des tableaux présentés dans le paragraphe précédent. Cela a été réalisé pour le paramètre δA . Les résultats

obtenus sont identiques à ceux obtenus grâce à la méthode semi-automatique. Par contre, l'automatisation de δN n'a pas été possible sous MUSTIG. En effet, cet outil n'est pas initialement prévu pour procéder à des calculs sur des tableaux (la détermination de δA repose uniquement sur des études de vecteurs). Nous nous sommes donc assez vite retrouvés bloqués.

L'automatisation sous MUSTIG n'a donc pas été possible. Mais l'intégration sous VISUAL C++ des algorithmes de traitement déterminés pendant cette étude dans un logiciel destiné au chantier est en cours.

V. 7. Conclusion

Nous avons trouvé deux paramètres, δA et δN , qui permettent de définir une zone de classification des défauts dont le comportement dynamique des échos est de type VARIAL, c'est-à-dire les fissures ramifiées ou fortement rugueuses. Ces deux paramètres ont été déduits du comportement des échos ultrasonores obtenus par la réflexion du faisceau ultrasonore sur le défaut lors du déplacement du traducteur sur la pièce contrôlée. Grâce à ceux-ci, nous avons pu regrouper entre eux six nids de soufflures sur les six étudiés, et cinq fissures ramifiées sur les six étudiées. La fissure qui a été mal classée présente, en contrôle manuel, un comportement dynamique de nid de soufflures. Elle serait donc aussi mal classée par un opérateur lors d'un contrôle classique. Nous obtenons donc une concordance exacte entre la classification manuelle et la classification automatique.

Conclusion générale

Notre travail, destiné au développement d'une aide automatisée au diagnostic permettant la classification de défauts détectés dans les soudures bout-à-bout en acier faiblement allié, traduit la procédure Cascade, appartenant à la recommandation IS. US. 319.21 - 2^{de} édition. Cette procédure comporte cinq étapes successives qui permettent de classer les défauts détectés en défauts volumiques ou en défauts non volumiques.

Ce travail se décompose en deux phases: la première concerne la classification de défauts tels que les fissures longitudinales, les manques de fusion ou les soufflures, qui sont classés en appliquant successivement les quatre premières étapes de la procédure Cascade sur leurs signaux. La seconde phase concerne la distinction particulière entre les défauts de type fissure ramifiée ou fortement rugueuse, généralement inacceptables, et ceux de type nid de soufflures. Celle-ci est traitée par la cinquième et dernière étape de la procédure.

LES PREMIERES ETAPES DE LA PROCEDURE CASCADE

Pour chaque étape de la procédure Cascade, nous avons mis en place une méthode automatique permettant de classer un défaut selon sa nature volumique ou non volumique.

Nous avons appliqué les quatre premières étapes de la procédure Cascade sur une population de vingt-sept défauts réels regroupant des fissures longitudinales, des manques de fusion, des manques de pénétration et des excès de pénétration, et nous avons classé avec succès la totalité de ces échantillons.

Les trois premières étapes reposent sur une étude des amplitudes des échos détectés. Après avoir sélectionné les échos intéressants (première étape), des représentations judicieuses suffisent pour faire un diagnostic.

Grâce à la détermination du parcours sonore de l'écho considéré, nous pouvons localiser la position du défaut dans le cordon de soudure, et choisir la méthode de classification à utiliser.

Ainsi, dans le cas le plus simple de défauts détectés dans le volume du cordon de soudure, des représentations graphiques de type C-scan mettent en évidence les indications disposant d'un pouvoir réfléchissant très important, et permettent de classer les défauts en défauts non volumiques. Dans le cas de défauts localisés au niveau de la finition ou de la racine de la soudure, il est indispensable de vérifier que l'écho obtenu correspond bien à un défaut, et non pas à la géométrie de la pièce. Nous avons alors choisi d'appliquer le critère du temps dynamique qui permet de s'assurer de la nature de l'indication réfléchissante étudiée, par étude du parcours sonore de l'écho détecté par rapport à un déplacement du traducteur parallèle à la soudure. Ceci constitue la seconde étape.

Lors de la troisième étape, dans le cas où le pouvoir réfléchissant de l'indication détectée est moins important, nous avons représenté, puis comparé les courbes échodynamiques obtenues pour deux incidences de contrôle différentes. Si nous constatons une différence de pouvoir réfléchissant suffisamment importante entre ces deux incidences, le défaut est classé en défaut non volumique. Sinon, il faut passer à la quatrième étape.

L'automatisation de cette quatrième étape a nécessité un traitement différent. Le diagnostic repose en effet, cette fois-ci, sur l'allure de l'écho de défaut. Nous avons donc introduit une notion de rugosité de l'écho qui permet de comparer l'écho étudié avec un écho de référence unique et propre, obtenu sur une génératrice de trou de référence. Nous considérons que tout écho, dont la rugosité est similaire à celle obtenue sur l'écho de référence, est considéré comme étant unique et propre. Le défaut correspondant est alors classé en défaut volumique. Dans le cas contraire, il faut passer à la cinquième et dernière étape, qui constitue la seconde phase de notre travail.

LA CINQUIEME ETAPE DE LA PROCEDURE CASCADE

D'après cette dernière étape de la procédure Cascade, il faut faire la différence entre des échos provenant d'un défaut de type fissure ramifiée, et d'autres provenant d'un défaut de type nid de soufflures. Cette distinction est délicate à réaliser lors d'un contrôle manuel traditionnel, même pour un contrôleur expérimenté. Nous avons donc cherché à déterminer des paramètres caractéristiques de ces deux types de défaut permettant de faire une distinction efficace.

Pour cela, nous avons d'abord étudié le comportement dynamique théorique des échos ultrasonores obtenus par réflexion sur les défauts lors d'un déplacement du traducteur

perpendiculaire au cordon de soudure. A partir des courbes échodynamique et temps dynamique, nous avons essayé de mettre en évidence un comportement caractéristique de chaque défaut. Ce comportement n'est facilement visible que pour un défaut idéal. Par conséquent, après analyse de ce même comportement sur des défauts réels, nous avons cherché et trouvé deux nouveaux paramètres, δA (nombre de variations "brutales" de l'amplitude des maxima détectés dans les échos de défaut sur tout le déplacement du traducteur où le défaut est observable) et δN (nombre de variations "brutales" du nombre de maxima détectés par écho de défaut sur tout le déplacement du traducteur où le défaut est observable), qui permettent de définir deux zones de classification des défauts. La représentation graphique δN en fonction de δA nous donne une zone bien déterminée correspondant aux défauts associés à un comportement dynamique de type VARIAL (fissures ramifiées), qui sont à éliminer. Cette zone correspond à une valeur élevée simultanée de δA et δN . Ce travail a été effectué suivant trois conditions initiales légèrement différentes, donnant des résultats très proches. D'après ces trois conditions, nous avons déterminé des valeurs simultanées de seuil pour δA et δN concernant la zone "VARIAL". D'autre part, l'emploi successif de deux conditions permet de confirmer de manière sûre un diagnostic.

Nous avons pu regrouper entre eux six nids de soufflures sur les six étudiés, et cinq fissures ramifiées sur les six étudiées. La fissure qui a été mal classée présente, en contrôle manuel, un comportement dynamique de nid de soufflures. Elle serait donc aussi mal classée par un opérateur lors d'un contrôle manuel réglementaire.

Nous avons donc obtenu une concordance exacte entre la classification manuelle et la classification automatique.

Ainsi, nous avons cherché et trouvé les paramètres significatifs de chaque étape de la procédure Cascade, permettant de réaliser l'automatisation complète de ces étapes.

L'intégration sous VISUAL C++ des algorithmes de traitement déterminés pendant notre étude dans un nouvel outil de chantier est en cours.

Références bibliographiques

- [1] G. CHANTY, A. NOUVET. Identification de la nature des défauts détectés aux ultrasons dans les joints soudés à franc-bord.
- [2] Institut de Soudure. Recommandation concernant le contrôle manuel par ultrasons des soudures à pleine pénétration. Document IS. US. 319.21. 1^{ère} édition. Mai 1977. Publications de la Soudure Autogène.
- [3] J.L. ROSE, L. NIKLAS, P. MAST. Flaw classification techniques in ultrasonic inspection. 8th World Conference on Non destructive Testing, Réf. 3H1 (1-8), Cannes, France, 6-11 Septembre 1976.
- [4] J.L. ROSE, H. SCHLEMM. Equivalent flaw size measurements and characterization analysis. *Materials Evaluation*, vol. 34, n°1 (1-8), 1976.
- [5] J.L. ROSE, P. MAST, L. NIKLAS. The potential of "simulearning" in flaw characterization. *British Journal of NDT*, vol. 17, n°6 (176-181), 1975.
- [6] J.L. ROSE. A 23 flaw sorting study in ultrasonics and pattern recognition. *Materials Evaluation*, vol. 35 (87-92+96), Juillet. 1977.
- [7] S.F. BURCH, N.K. BEALING. A physical approach to the automated ultrasonic characterization of buried weld defects in ferritic steel. *NDT International*, vol. 19, n°3 (145-153), Juin 1986.
- [8] S.F. BURCH, N.K. BEALING. Automated ultrasonic characterization of welding defects in steel. *NDT 86 - 21st Annual British Conference on NDT* (157-168), 1986.
- [9] S.F. BURCH, A.R. LOMAS, A.T. RAMSEY. Practical automated ultrasonic characterization of welding defects. *British Journal of NDT*, vol. 32, n°7 (347-350), Juillet 1990.
- [10] A.R. BAKER, C.G. WINDSOR. The classification of defects from ultrasonic data using neural networks: the Hopfield method. *NDT International*, vol. 22, n°2 (97-105), Avril 1989.

- [11] C.G. WINDSOR, F. ANSELME, L. CAPINERI, J.P. MASON. The classification of weld defects from ultrasonic images: a neural network approach. *British Journal of NDT*, vol. 35, n°1 (15-22), Janvier 1993.
- [12] A. McNAB, I. DUNLOP. AI techniques applied to the classification of welding defects from automated NDT data. *British Journal of NDT*, vol. 33, n°1 (11-18), Janvier 1991.
- [13] K.N. KARNA, D.M. BREEN. An artificial neural networks tutorial: Part 1 - Basics. *Neural Networks*, vol. 1, n°1 (3-9).
- [14] British Standard BS 3923: Part 1: Ultrasonic examination of welds. 1986.
- [15] I. DUNLOP, A. McNAB. Shape classification of flaw indications in three-dimensional ultrasonic images. *IEE Proceedings Science, Measurement and Technology*, vol. 142, n°4 (307-312), 1995.
- [16] S.K. PARUI, S.E. SARMA, D.D. MAJUMDER. How to discriminate shapes using the shape vector. *Pattern Tecogn. Lett., Bol.* 4, n°3 (201-204), 1986.
- [17] C.H. LO, H.S. DON. 3D moment forms: their construction and application to object identification and positioning. *IEEE Trans., PAMI-11*, n°10 (1053-1064), 1989.
- [18] L. SPIRKOVSKA, M.B. REID. Robust position, scale, and rotation invariant object recognition using higher-order neural networks. *Pattern Recogn.*, vol. 25, n°9 (975-985), 1992.
- [19] C.H. CHEN, G.G. LEE. Neural Networks for ultrasonic NDE signal classification using time-frequency analysis. *IEEE Int. Conf. on Acoustic, Speech and Signal Processing*, vol. 1 (493-496), 1993.
- [20] A. MASNATA, M. SUNSERI. Neural Network classification of flaws detected by ultrasonic means. *NDT & E International*, vol. 29, n°2 (87-93), 1996.
- [21] N. ERMOLOV, V.E. BELYI, V.I. IVANOV, V.G. SHCHERBINSKII, A.K. VOPIPKIN. Flaw shape discrimination in ultrasonic testing. 8th World Conference on Non destructive Testing, Réf. 3H8 (1-6), Cannes, France, 6-11 Septembre 1976
- [22] H. SEIGER, J. WAGNER. Flaw classification by a spectral division of ultrasonic echoes. *NDT International*, vol. 16, n°4 (195-200), Août 1983.
- [23] A. K. VOPIPKIN, I.N. ERMOLOV, V.G. STASEEV. Experimental investigation of an ultrasonic spectral method of determining the nature of defects. *Soviet Journal of NDT*, vol. 14, n°1 (34-43), 1978.

- [24] D.W. FITTING, L. ADLER. Ultrasonic spectral analysis for non destructive evaluation. Plenum Press, New York, 1981.
- [25] O. GANGLBAUER, F. WALLNER, J. AUßERWÖGER, J.L. ROSE, L. NIKLAS. Fehlerklassifikation in Schweißverbindungen mit Ultraschall unter Einbeziehung des Echodynamik-Verhaltens. 3rd European Conference on NDT (36-45). Florence, Italia, 15-18 Octobre 1984.
- [26] G. KRUG, V. ORJELIK, R. AHARONI. A novel method for off-line defect characterization and sizing from standard B-scan data. 7th ECNDT, proceedings vol 3 (2482-2488), Copenhagen, Danemark, 26-29 Mai 1998.
- [27] D. DE VADDER, M. DOSSO. Caractérisation ultrasonore des bords de fissures par traitement numérique du signal. 3rd European Conference on NDT (362-374). Florence, Italia, 15-18 Octobre 1984.
- [28] L. PARADIS, M. SERRE, J. SALLARD, F. CHAMPIGNY. Caractérisation de défauts par traitement du signal. Congrès COFREND sur les Essais Non Destructifs (847-851), Nantes, France, 23-26 Septembre 1997.
- [29] N. MERCIER. Caractérisation de défauts par l'étude de la répartition des pôles et des zéros de la fonction de transfert du système échographique ultrasonore. 6^{ème} Colloque International Sur Les Méthodes De Contrôle Non Destructif (131-135), 1986.
- [30] N. MERCIER, J.F. DE BELLEVAL. Comment extraire de l'information de la phase d'un signal: application à l'échographie ultrasonore. 10^e Colloque GRTESEI, Nice, 1985.
- [31] N. MERCIER, J.F. DE BELLEVAL, P. LANCELEUR. Characterization of flaws using the poles and zeros of the transfer function of the corresponding ultrasonic system. Ultrasonics, vol. 31, n°4 (229-235), 1993.
- [32] INSTITUT DE SOUDURE. Recommandation concernant le contrôle manuel par ultrasons des soudures à pleine pénétration. Document IS. US. 319.21. 2^{de} édition. Juin 1995. Publications du Soudage et de ses Applications.
- [33] INSTITUT INTERNATIONAL DE LA SOUDURE. Manuel pour l'examen par ultrasons des soudures. Publications de la Soudure Autogène. 1978.
- [34] T.H. NGUYEN, M. GROZELLIER, M. BIETH. Caractérisation semi-automatique des défauts détectés par ultrasons dans les joints soudés. 6^{ème} Colloque International sur les Méthodes de Contrôle Non Destructif (297-302), 1986.

- [35] D. CHAUVEAU. Non destructive characterisation of flaws (an account of five years of work), European Journal of NDT, vol. 2, n°1 (3-10), 1992.
- [36] B. BRION, J.M. TCHILIAN, M. ERNANDES, A. VALTEAU. Essai de classification des indications ultrasonores des soudures en volumique et non volumique par application de la procédure Cascade de l'IS.US.319-21. Congrès COFREND sur les Essais Non Destructifs (93-97), Nantes, France, 23-26 Septembre 1997.
- [37] JOURNAL OFFICIEL. Qualité et Sécurité. Appareils à pression, textes généraux n° 1498-1.
- [38] AFNOR. Guide pratique de contrôle par ultrasons de pièces en acier. 1982.
- [39] J. F. DE BELLEVAL. Non destructive inspection methods for propulsion systems and components. AGARG LS-103. Avril 1979.
- [40] Contrôles non destructifs - Ultrasons niveau 3. Institut de Soudure. Août 1993.
- [41] Classification des défauts dans les soudures par fusion des métaux, avec commentaires explicatifs. NF EN 26520 - ISO 6520. Février 1992.
- [42] N. KOPP, D. CHAUVEAU, D. FLOTTE, M. LUMBRERAS. Application of ultrasonic sensors: non destructive characterization of weld defects. Eurosensors XI, The 11th European Conference on Solid State Transducers, Varsovie, 21-24 Septembre 1997.
- [43] N. KOPP, D. CHAUVEAU, D. FLOTTE, M. LUMBRERAS. Automated classification of weld defects by ultrasonic non destructive testing. 7th ECNDT, Copenhague, 26-29 Mai 1998 (1141-1144).
- [44] N. KOPP, D. CHAUVEAU, D. FLOTTE, M. LUMBRERAS. Use of ultrasonic transducers to distinguish non-planar defects like clustered porosities and planar defects like rough cracks in welds of carbon steel plates. Eurosensors XII, The 12th European Conference on Solid State Transducers, Southampton, 13-16 Septembre 1998, vol. 1(129-132).
- [45] N. KOPP, D. CHAUVEAU, D. FLOTTE, M. LUMBRERAS. Automated classification of weld defects detected by ultrasonic non destructive testing. SPIE, International Symposium on Industrial and Environmental Monitors and Biosensors, Boston, 2-5 Novembre 1998 (à paraître).
- [46] Norme française NF A 09-300. Essais non destructifs - Ultrasons - Vocabulaire. AFNOR. Décembre 1987.

ANNEXE 1**Glossaire [46]**

- **Absorption**: Diminution de la pression acoustique due à la conversion de l'énergie acoustique en énergie thermique.
- **Amortisseur**: dispositif lié au transducteur de façon à augmenter mécaniquement l'amortissement de sa vibration.
- **Amplitude d'écho**: hauteur maximale de l'enveloppe des oscillations formant l'écho.
- **Angle critique**: angle d'incidence au-delà duquel il n'y a plus réfraction pour un mode de propagation donné.
- **Angle de divergence**: angle formé, dans le champ éloigné, par la normale à l'interface et l'axe du faisceau acoustique incident.
- **Angle de réflexion**: angle au point d'incidence formé par la normale à l'interface et l'axe du faisceau acoustique réfléchi.
- **Angle de réfraction**: angle au point d'incidence formé par la normale à l'interface et l'axe du faisceau acoustique réfracté.
- **Appareil de contrôle par ultrasons**: appareil permettant l'alimentation d'un ou plusieurs transducteurs et la réception, à gain variable, des signaux recueillis par ceux-ci en vue du contrôle par ultrasons.
- **Appareillage de contrôle par ultrasons**: ensemble constitué par l'appareil de contrôle par ultrasons, le ou les transducteurs, les câbles de liaison et, éventuellement, les appareils annexes.
- **Atténuation**: Diminution de la pression acoustique par absorption et diffusion.
- **Base de temps**: circuit électronique permettant d'obtenir sur le dispositif de visualisation de l'appareil de contrôle ultrasonore une échelle calibrée en temps ou en millimètres de parcours sonore.
- **Bloc d'étalonnage**: bloc de dimensions données et de propriétés physiques connues servant à l'étalonnage et à la vérification de l'appareillage de contrôle par ultrasons.

- **Bloc ou pièce de référence:** pièce servant à régler l'appareillage de contrôle par ultrasons en vue d'un contrôle spécifique.
 - **Bruit de fond:** signaux parasites dus à l'appareillage de contrôle par ultrasons.
 - **Champ éloigné - Zone de Fraunhofer:** zone du faisceau acoustique d'un transducteur plan situé au-delà du champ proche, dans laquelle la pression acoustique décroît de façon monotone avec la distance.
 - **Champ proche:** zone du faisceau acoustique d'un transducteur plan situé à proximité de celui-ci, dans laquelle, par suite des interférences, la pression acoustique ne décroît pas de façon monotone avec la distance. Sa limite correspond à la position du dernier maximum de la pression acoustique.
 - **Contrôle automatique:** technique de contrôle dans laquelle le déplacement relatif du transducteur à la pièce soumise au contrôle par ultrasons est mécanisé et où des dispositifs spéciaux assurent tout ou une partie de l'analyse des signaux.
 - **Contrôle en demi-bond:** technique de contrôle dans laquelle le trajet de l'onde ultrasonore est direct entre le point d'incidence et le réflecteur, sans réflexion intermédiaire.
 - **Contrôle en un bond:** technique de contrôle dans laquelle le trajet de l'onde ultrasonore entre le point d'incidence et le réflecteur utilise une réflexion sur une surface.
 - **Contrôle manuel:** technique de contrôle dans laquelle l'opérateur déplace manuellement le transducteur et assure l'interprétation des signaux.
 - **Contrôle par contact:** technique de contrôle dans laquelle le transducteur est appliqué sur la surface de contrôle par l'intermédiaire d'un milieu de couplage.
 - **Contrôle par réflexion:** technique de contrôle dans laquelle sont utilisés les échos obtenus par réflexion de l'onde ultrasonore sur toute solution de continuité, telle que fissure, inclusion, etc.
 - **Contrôle par transmission:** technique de contrôle dans laquelle l'onde ultrasonore est recueillie et observée après avoir traversé la pièce soumise au contrôle.
 - **Conversion de mode:** transformation du mode de vibration par réflexion ou réfraction.
 - **Couplant ou milieu de couplage:** produit permettant d'assurer la liaison acoustique entre le transducteur et la pièce soumise au contrôle.
 - **Courbe de correction amplitude / distance (C.A.D.):** courbe tracée à l'aide de réflecteurs identiques, situés à différentes profondeurs dans la matériau, permettant de tenir compte de la variation d'amplitude en fonction des parcours ultrasonores.
-

-
- **Défaut**: anomalie non acceptable d'après les critères précisés par une norme, un code, ou une spécification.
 - **Diffraction**: phénomène modifiant la répartition de la pression acoustique provoqué par la présence de zones, de dimensions de l'ordre de la longueur d'onde, sièges de variations locales des caractéristiques acoustiques.
 - **Diffusion**: diminution de la pression acoustique due à des phénomènes de réflexion, diffraction ou réfraction au sein d'un matériau donné.
 - **Divergence du faisceau acoustique**: dans le champ éloigné, élargissement du faisceau acoustique en fonction de la distance au transducteur.
 - **Echo**: vibration ultrasonore réfléchi par un réflecteur et, par abus de langage, le signal qui en résulte et qui est visualisé sur l'écran de l'appareil en représentation de type A (aspect de l'écho = forme du signal visualisé sur l'écran de l'appareil de contrôle par ultrasons).
 - **Echodynamique**: courbe enveloppe de l'ensemble des échos d'un réflecteur résultant du déplacement du transducteur.
 - **Echo de fond**: écho provenant de la réflexion sur la surface opposée à la surface de contrôle.
 - **Echo multiple**: écho résultant de réflexions multiples.
 - **Effet de bord**: phénomène résultant de la diffraction des ondes ultrasonores par les bords d'un réflecteur et donnant des indications ultrasonores spécifiques.
 - **Faisceau acoustique ou ultrasonore**: zone de l'espace dans laquelle se propage une onde ultrasonore.
 - **Fenêtre de mesure ou porte de sélection**: intervalle de temps réglable pendant lequel les signaux sont pris en compte. Il peut être matérialisé sur le système de visualisation par un créneau de sélection.
 - **Impédance acoustique**: rapport de la pression acoustique à vitesse de déplacement des particules. Pour un matériau parfaitement élastique et une onde de compression plane, elle est égale au produit de la masse volumique par la vitesse de propagation.
 - **Impulsion (ultrasonore)**: vibration (ultrasonore) présentant un nombre très réduit d'oscillations.
 - **Incidence normale**: attaque d'une interface par un faisceau acoustique sous un angle d'incidence nul.
-

- **Incidence oblique:** attaque d'une interface par un faisceau acoustique sous un angle d'incidence non nul.
 - **Indication ultrasonore:** information, obtenue lors d'un contrôle, résultant de la présence d'un réflecteur.
 - **Interface:** limite entre deux milieux ayant des propriétés acoustiques différentes.
 - **Longueur d'onde:** distance minimale, dans la direction de propagation d'une onde périodique, entre deux points où les vibrations sont en concordance de phase.
 - **Onde transversale ou de cisaillement:** onde dans laquelle la direction d'oscillation est perpendiculaire à la direction de propagation.
 - **Onde longitudinale ou de compression:** onde dans laquelle la direction d'oscillation est parallèle à la direction de propagation.
 - **Onde plane:** onde dans laquelle les surfaces d'ondes sont des plans parallèles.
 - **Onde ultrasonore - ultrasons:** onde associée à une vibration élastique se propageant à la suite d'une excitation locale, dont la fréquence est située au-delà du domaine audible pour l'homme.
 - **Parcours ultrasonore:** terme habituellement employé lors de l'utilisation d'un seul transducteur pour définir la distance, mesurée le long du trajet ultrasonore, entre le point d'incidence et le réflecteur.
 - **Piézo électricité:** propriété qu'ont certains corps cristallins de se déformer sous l'action d'une charge électrique, et réciproquement, par réarrangement des ions positifs et négatifs.
 - **Point d'émergence du transducteur:** point d'intersection de l'axe du faisceau acoustique avec la surface du transducteur.
 - **Point d'incidence:** point d'intersection de l'axe du faisceau acoustique avec l'interface considérée.
 - **Réflecteur:** toute discontinuité pouvant provoquer une réflexion de l'onde ultrasonore.
 - **Réflexion:** changement de direction de propagation de l'onde ultrasonore dans le milieu d'incidence au niveau d'une interface.
 - **Réfraction:** Changement de direction de propagation d'une onde ultrasonore lorsqu'elle traverse une interface entre deux milieux dans lesquels les vitesses de propagation de l'onde sont différentes.
-

-
- **Représentation de type A ou A-scan:** visualisation du signal ultrasonore dans laquelle l'abscisse représente le temps de parcours de l'onde ultrasonore et l'ordonnée son amplitude.
 - **Représentation de type B ou B-scan:** dans un contrôle par réflexion, visualisation des indications ultrasonores situées sur la surface engendrée par l'axe du faisceau acoustique lors de son déplacement relatif.
 - **Représentation de type C ou C-scan:** visualisation des indications ultrasonores présentes dans un volume contrôlé par projection de celles-ci sur une surface parallèle à la surface de contrôle.
 - **Représentation de type D ou D-scan:** visualisation des indications ultrasonores présentes dans un volume contrôlé par projection de ces indications sur une surface orthogonale à la surface de contrôle.
 - **Surface de contrôle:** surface de la pièce à partir de laquelle est effectuée le contrôle.
 - **Temps dynamique:** courbe représentant les variations du temps de vol en fonction du déplacement du traducteur.
 - **Temps de parcours:** temps correspondant au parcours de l'onde ultrasonore entre le point d'incidence sur la pièce et le réflecteur.
 - **Temps de vol:** temps écoulé entre l'émission ultrasonore et la réception d'un signal d'écho ou d'un signal transmis.
 - **Traducteur:** dispositif contenant en particulier un ou plusieurs transducteurs destiné à l'émission et/ou à la réception des ondes ultrasonores.
 - **Trajet ultrasonore:** chemin parcouru par une onde ultrasonore dans un matériau.
 - **Transducteur:** élément actif du traducteur permettant la conversion d'énergie électrique en énergie acoustique, et réciproquement.
-

ANNEXE 2

Critère du mouvement orbital

Son principe repose sur l'analyse de la réflectivité des défauts ou de leur extrémités lorsque le traducteur d'ondes longitudinales ou transversales obliques décrit un mouvement orbital autour du défaut ou des ses extrémités, en prenant celui-ci ou celles-ci comme centre de rotation (figure 2-1).

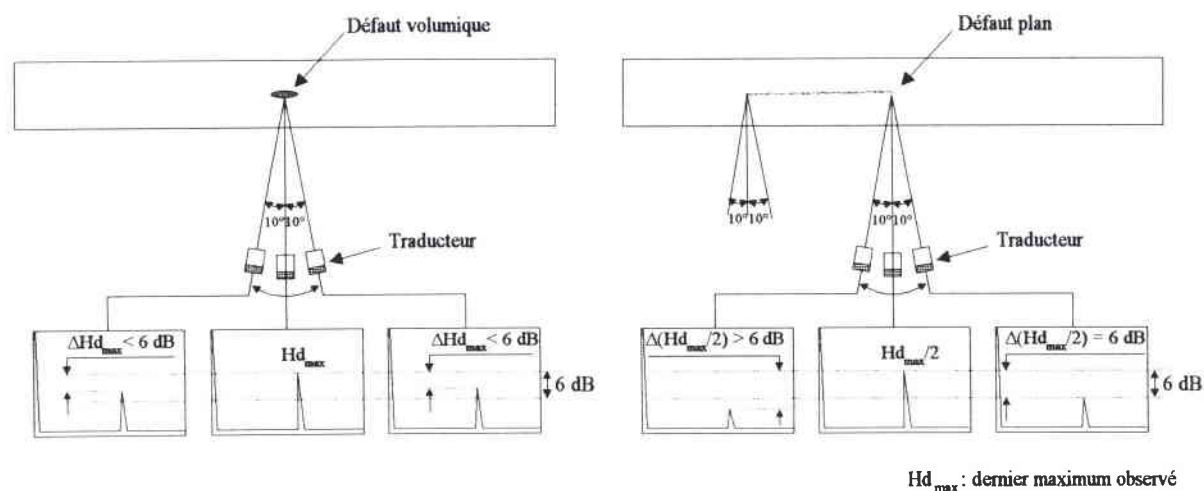


Figure 2-1:

Principe du critère du mouvement orbital

Si la décroissance de l'amplitude ΔH_d de l'écho est inférieure à 6 dB, le défaut est considéré comme volumique.

Si la décroissance de l'amplitude ΔH_d de l'écho est supérieure ou égale à 6 dB, le défaut est considéré comme non volumique.

ANNEXE 3

Principe de tracé d'une Courbe Amplitude - Distance (C.A.D.)

Le principe de tracé d'une Courbe Amplitude-Distance (C.A.D.) consiste à visualiser sur l'écran de l'appareil ultrasonore des échos de réflexion obtenus sur des trous de référence situés à des profondeurs croissantes avec un gain (G_0) constant. Cette courbe représente le lieu des sommets des échos de référence d'amplitude H_r .

Si un maximum est observé, on ajustera celui-ci à 80 % de la hauteur de l'écran.

Si la C.A.D. ne présente pas de maximum, l'amplitude de référence H_r , obtenue sur le trou situé à la profondeur la plus faible de la cale de référence considérée, sera réglée à 80 % de la hauteur de l'écran.

La figure 3-1 montre le principe du tracé des C.A.D. à partir d'un bloc de référence d'épaisseur 25 mm.

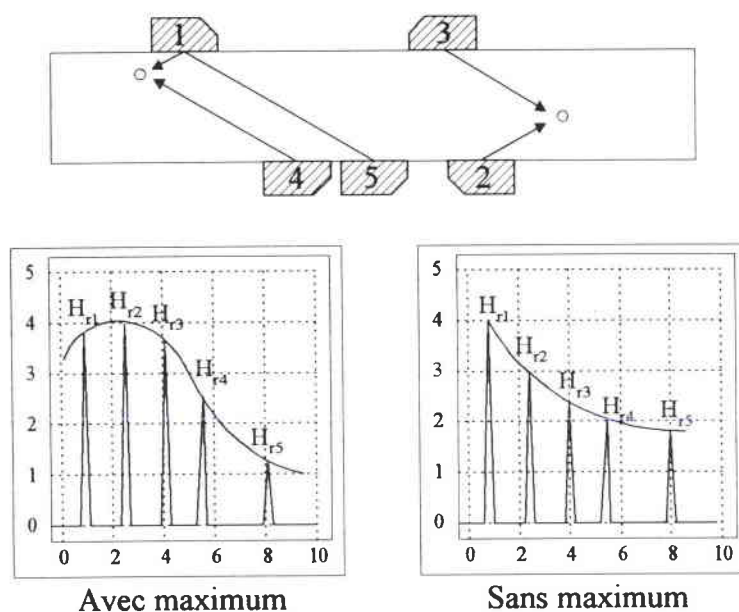


Figure 3-1

Principe du tracé d'une Courbe Amplitude-Distance

ANNEXE 4

Méthode de l'effet de coin

Objet: Différencier les échos dus à une surépaisseur excessive des échos dus à un défaut non volumique situé au raccordement.

Comme indiqué sur la figure 4-1, lorsqu'une indication est observée, par exemple dans la zone de raccordement B, la méthode consiste à comparer, pour les positions d'examen 1 et 3 représentées (figure 4-2), les amplitudes des échos obtenus au bond* avec une incidence de 45°.

***Remarque:** le contrôle au demi-bond est une technique dans laquelle le trajet de l'onde ultrasonore est direct entre le point d'incidence et le réflecteur, sans réflexion intermédiaire, alors que le contrôle au bond utilise une réflexion intermédiaire sur le fond de la pièce.

Lorsque l'indication observée ne correspond qu'à un raccordement brutal de la surépaisseur sur les matériaux de base, on constate successivement:

- la présence d'un écho le plus souvent de moyenne ou forte amplitude pour les positions d'examen 1 et 2 (figure 4-1),

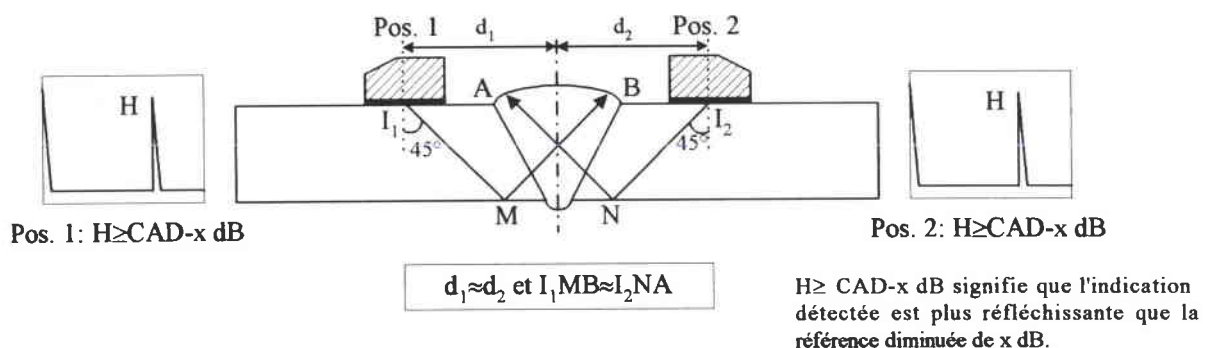


Figure 4-1:

Méthode de l'effet de coin à 45° - Premier cas sans défaut

- la présence d'un écho de moyenne ou forte amplitude pour la position d'examen 1, et l'absence de tout écho ou la présence d'un très faible écho pour la position d'examen 3 (figure 4-2).

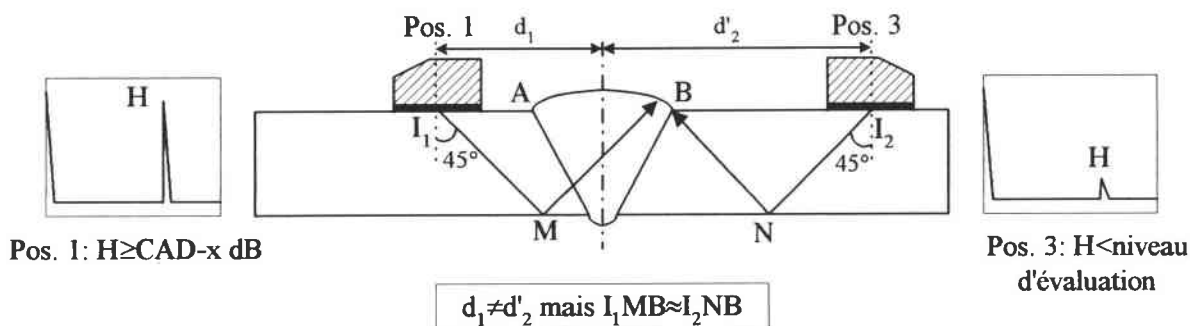


Figure 4-2:

Méthode de l'effet de coin à 45° - Second cas sans défaut

Lorsque l'indication observée correspond réellement à un défaut non volumique au raccordement (fissure ou manque de fusion), on constate (figure 4-3):

- la présence d'un écho généralement de forte amplitude pour la position d'examen 1 dû à l'influence conjuguée de la surépaisseur et du défaut non volumique débouchant ou sous-jacent,

- la présence d'un écho également de forte amplitude pour la position d'examen 3 dû au seul effet de coin provoqué par le défaut non volumique et la surface de la tôle.

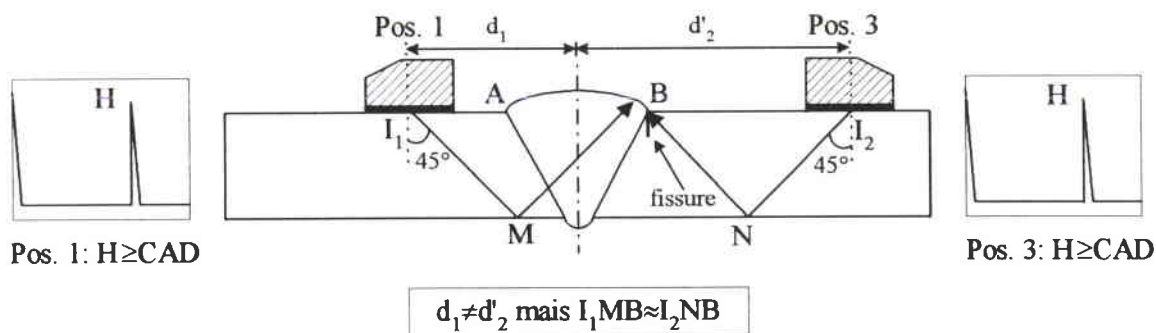


Figure 4-3:

Méthode de l'effet de coin à 45° - Présence d'un défaut

ANNEXE 5

Méthode des ondes rampantes

Principe des ondes rampantes

L'obtention d'une onde rampante est réalisée à partir d'un transducteur d'angle dont l'incidence du faisceau est légèrement inférieure à la valeur du premier angle critique. Le lobe latéral supérieur du faisceau d'ondes longitudinales, qui fait un angle voisin de 90° avec la normale au point d'émergence, constitue un faisceau d'ondes rampantes.

Un transducteur d'ondes rampantes génère également dans le matériau une onde transversale, dont l'angle de réfraction est voisin de 32° . Dans ces conditions et comme indiqué en figure 5-1, l'angle d'incidence de ces ondes sur la surface opposée au matériau supposé parallèle à la face d'examen, sera également de 32° .

Lors de la réflexion du faisceau, il se produira une conversion de mode qui, pour cette valeur d'angle d'incidence, donnera lieu à une onde transversale réfléchie sous un angle de 32° mais de faible intensité, et à une onde longitudinale réfléchie sous un angle d'environ 77° mais de forte intensité. Le lobe latéral inférieur de ce faisceau d'ondes longitudinales qui fait un angle voisin de 90° avec la normale au point d'incidence, constitue un faisceau d'ondes rampantes.

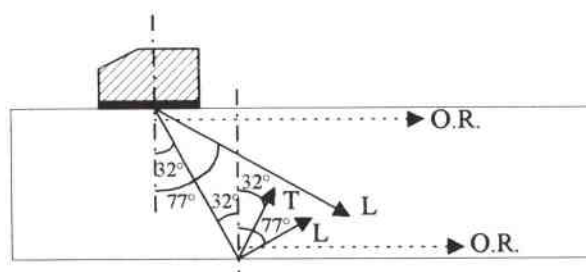


Figure 5-1:

Génération d'ondes rampantes en racine

Application dans le cas des défauts superficiels situés à moins de 5 mm de la face de palpation

Générées sur de courtes distances dans les couches superficielles d'un matériau, ces ondes, contrairement aux ondes de surface (ou de Rayleigh), ne sont pas perturbées par les charges acoustiques de surface (projections de soudage, couplant,...) (figure 5-2).

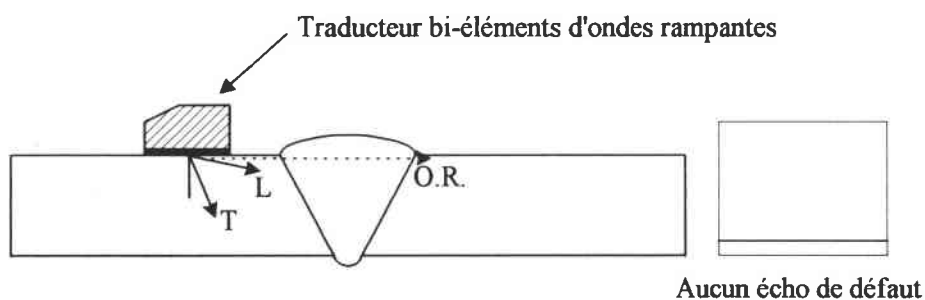


Figure 5-2:

Principe des ondes rampantes: cas d'une soudure saine

En revanche, lorsqu'un défaut de compacité du type fissure affecte l'une des zones de raccordement côté face de palpation, il peut être détecté par réflexion, lorsque le traducteur d'ondes rampantes se trouve dans son voisinage immédiat (voir figure 5-3).

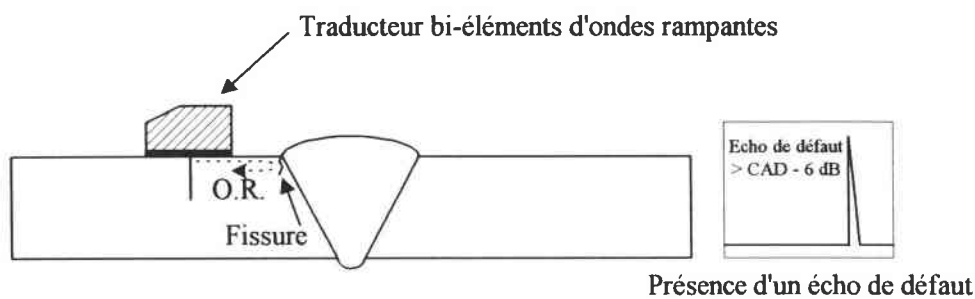


Figure 5-3:

Principe des ondes rampantes: cas d'une soudure comportant une fissure au raccordement

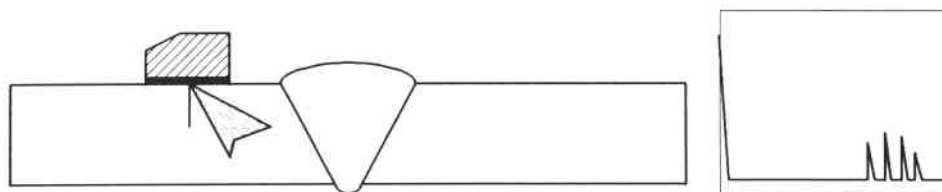
Toute indication dépassant CAD - 6 dB doit être considérée comme un défaut non volumique.

Application dans le cas des défauts superficiels situés à moins de 5 mm de la face opposée à la face de palpation

Les ondes rampantes peuvent être exploitées pour discriminer la présence d'un défaut non volumique débouchant sur la surface opposée, non accessible, à la surface de palpation d'un bourrelet de pénétration (manque de fusion, fissure en racine d'une soudure,...).

Si le point de réflexion de l'onde transversale incidente se trouve au voisinage de la racine de la soudure, les défauts de compacité autres que les défauts de forme convexes (comme le bourrelet de pénétration) pourront être détectés et se traduiront par un écho d'amplitude supérieure à CAD - 6 dB (figure 5-4).

a) Soudure saine ou comportant un excès de pénétration



b) Soudure comportant un défaut en racine

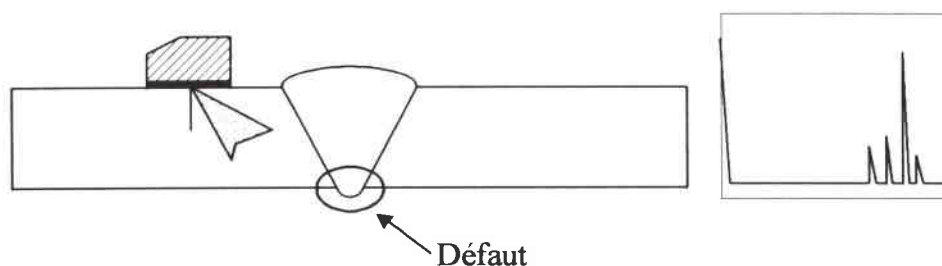


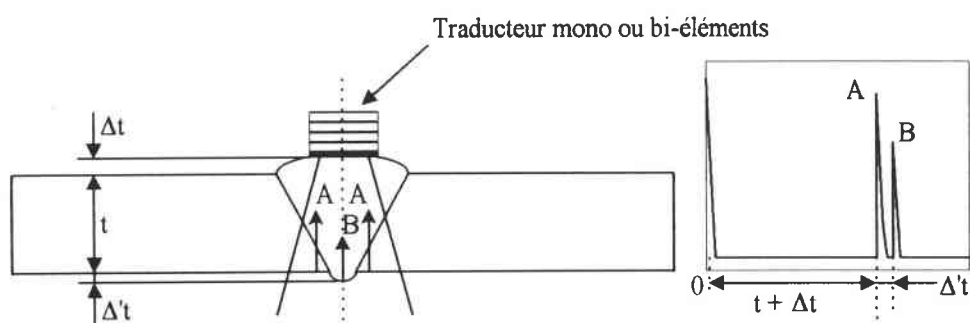
Figure 5-4:

Méthode des ondes rampantes en racine

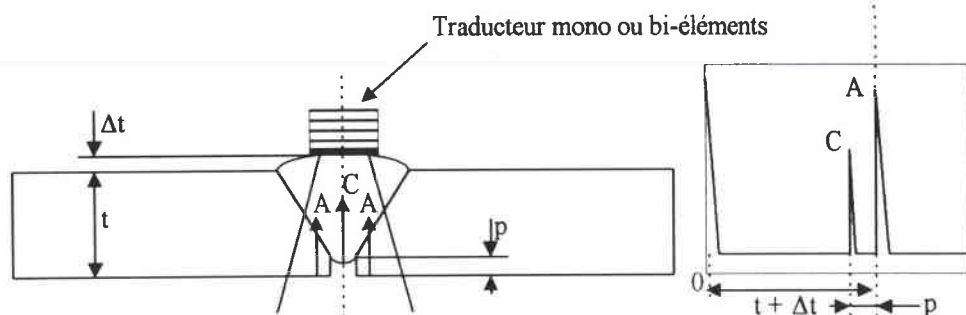
ANNEXE 6

Méthode des ondes longitudinales à 0°

a) Mesure de reference



b) Manque de penetration ouvert



c) Manque de fusion du talon en racine

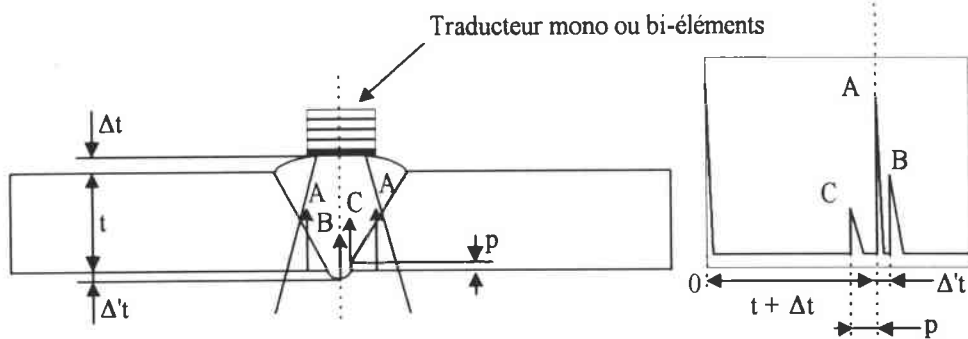


Figure 6-1:

Méthode des ondes longitudinales à 0°

Basée sur la mesure du parcours ultrasonore, cette méthode doit permettre d'établir, avec la précision nécessaire, le profil transversal et longitudinal de la soudure, non seulement perpendiculairement au-dessus de la zone douteuse, mais également de part et d'autre de celle-ci, en vue de comparaisons.

Le traducteur d'ondes longitudinales à 0° sera disposé sur la soudure au-dessus de la zone douteuse (figure 6-1). Afin d'optimiser le couplage traducteur-soudure, il pourra être nécessaire d'aplanir ou d'araser localement la surépaisseur.

ANNEXE 7**Méthode des ondes transversales**

Basée sur la mesure du parcours ultrasonore selon l'axe du faisceau d'ondes transversales entre le point d'émergence du transducteur et l'indication observée, cette méthode, lorsqu'appliquée avec soins, doit permettre de différencier les échos de bourrelets de ceux issus d'un défaut de compacité.

Simple quant à son principe, cette méthode est toutefois délicate d'application et nécessite de déterminer expérimentalement au préalable de façon précise la valeur du parcours sonore p_{s0} comme indiqué en figure 7-1.

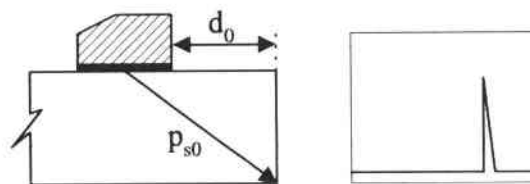


Figure 7-1:

Mesure du parcours sonore sur un coin

Cette opération ayant été effectuée, la discrimination des défauts en racine sera réalisée en déplaçant le transducteur d'ondes transversales parallèlement à l'axe de la soudure et à une distance voisine de d_0 par rapport à cet axe.

Dans le cas d'un bourrelet de pénétration régulier et satisfaisant, on observe des deux côtés de la soudure la présence d'un écho unique et propre apparaissant à un parcours supérieur à p_{s0} (figure 7-2).

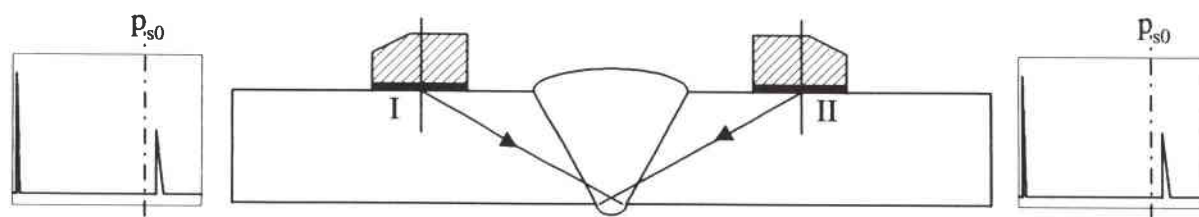


Figure 7-2:

Cas d'une soudure saine comportant un bourrelet de pénétration

Dans le cas d'un excès de pénétration, on observe des deux côtés de la soudure la présence d'un écho pouvant être de forte amplitude unique et propre apparaissant à un parcours supérieur à p_{s0} , mais plus important que pour un bourrelet de pénétration régulier et normal (figure 7-3).

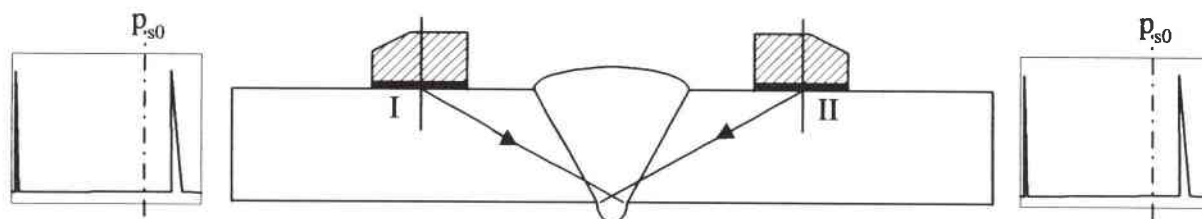


Figure 7-3:

Cas d'une soudure comportant un excès de pénétration

Dans le cas d'un défaut de compacité en racine, on peut observer les échogrammes représentés sur la figure 7-4. Tout écho d'amplitude supérieure au niveau d'évaluation et apparaissant à un parcours inférieur ou égal à p_{s0} pour une position de transducteur voisine de d_0 doit être considéré comme un défaut dans la mesure où l'on observe:

- l'échogramme de type A accès I et II,
- l'échogramme de type B accès I et II,
- l'échogramme de type A accès I et l'échogramme de type B accès II ou réciproquement,
- l'échogramme de type C accès I ou II.

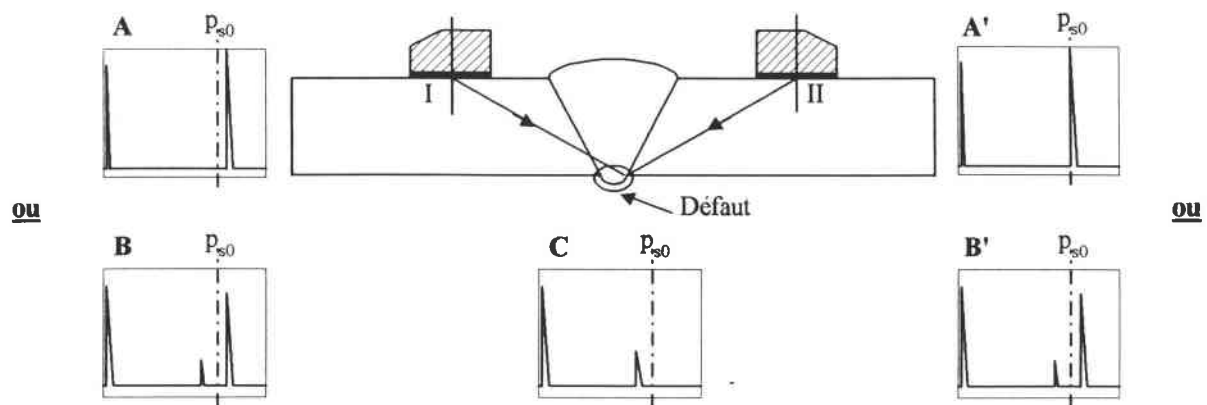


Figure 7-4:

Cas d'une soudure comportant un défaut en racine

Contribution à la caractérisation en contrôle non destructif ultrasonore de défauts de soudures bout-à-bout en acier faiblement allié. Elaboration d'une procédure d'aide au diagnostic.

La recommandation IS US 319.21 - 2nde Edition, incluse dans la norme européenne EN 1713, définit une méthode de contrôle manuel par ultrasons des soudures à pleine pénétration, dans laquelle est décrite la procédure Cascade comme une série de cinq tests successifs qui permet de classer les défauts détectés en défauts volumiques ou non volumiques.

Afin de donner aux contrôles une notion de répétabilité, et de diminuer de façon considérable le temps d'interprétation des résultats, on cherche, aujourd'hui, à rendre automatique la classification des défauts.

Le but de notre travail est de réaliser une aide interactive au diagnostic la plus automatisée possible.

Notre travail se développe en deux phases: la première concerne les quatre premières étapes de la procédure Cascade. Pour les trois premières étapes, nous avons trouvé des représentations graphiques caractéristiques; tandis que pour la quatrième étape, nous avons étudié la rugosité de l'écho de défaut par rapport à un écho de référence. Les vingt-sept défauts réels étudiés ont été classés avec succès.

La cinquième et dernière étape concerne la distinction entre les fissures ramifiées (comportement VARIAL), défauts généralement inacceptables, et les nids de soufflures (comportement VAROUL). Cette distinction automatique n'avait jamais été faite. Nous avons cherché et trouvé deux paramètres significatifs qui ont permis de classer, sans ambiguïté, les défauts réels étudiés.

Mots clés: Contrôle non destructif - Ultrasons - Soudure - Acier faiblement allié - Caractérisation de défauts - Fissures ramifiées - Nids de soufflures

Contribution to the characterization of flaws detected in carbon steel butt welds by ultrasonic non destructive testing. Elaboration of a help to sentence procedure.

The second edition of the guideline IS US 319.21 has been issued in 1995. The Part B of this document ("Cascade" procedure) has been proposed as a draft for european standard and issued as the EN 1713 european standard without main modifications. This document defines a method of characterization for ultrasonic manual weld testing, in which the "Cascade" procedure is described as a succession of five steps allowing to classify the detected flaws in volumetric or non volumetric flaws.

In order to ensure the repeatability and to decrease significantly the time of interpretation, nowadays the researchers try to develop an automated flaw classification based on the "Cascade" procedure.

The aim of our study is to realize an interactive help to sentence the type of flaw automated as for as possible.

Our work has been divided in two phases: the first one concerns the four first steps of the "Cascade" procedure. For the three first steps, we have found significative graphics, whereas for the fourth step, we have studied the flaw echo "roughness" in comparison with the reference echo "roughness". The twenty-seven studied flaws have been classified sucessfully.

The fifth last step concerns the discrimination between the rough cracks (corresponding to the VARIAL pattern), generally unacceptable, and the clustered porosities (corresponding to the VAROUL pattern). This automated discrimination had not already been realized. We have searched for an efficient algorithm and found two features which have allowed to classify the real studied flaws without any ambiguity.

Keywords: Non destructive testing - Ultrasonic - Weld - Carbon steel - Flaw characterization - Rough cracks - Clustered porosities

S.C.D.U. METZ : Section Technopole

T



022 222233 2